الفسيولوچيا
علم وظائف الأعضاء المقارن

د/ حياه السودان إبراهيم عثمان
أستاذ مشارك علم الحيوان
كلية العلوم - جامعة الخرطوم

مؤسسة شباب الجامعة
40 ش د/مصطفى مشرفة
تليفاكس : 4839496 الإسكندرية
Email:shabab.elgamaa@yahoo.com

الفسيولوجيا

علم وظائف الأعضاء المقارن

تأليف

د. حياة السودان إبراهيم عثمان

أستاذ مشارك/ علم الحيوان

كلية العلوم - جامعة الخرطوم

٢٠٠٩

الناشر

مؤسسة شباب الجامعة

٤٠ ش د./ مصطفى مشرفة

الإسكندرية تليفاكس: ٤٨٣٩٤٩٦

Email: Shabab Elgamaa@yahoo.com

* دكتورة حياة السودان إبراهيم

* من مواليد أم درمان.

* تحصلت على الدرجات العلمية التالية :

B.Sc. (1973) من جامعة الخرطوم

M.Sc. (1979) من جامعة الخرطوم

Ph.D. (1983) من جامعة لندن / المملكة المتحدة.

* تعمل بجامعة الخرطوم منذ تخرجها في عام 1973 وقد تخصصت فى علم وظائف الأعضاء.

* تشغل الآن منصب أستاذ مشارك بقسم علم الحيوان.

* صدر لها كتاب «الفسيولوجيا، علم وظائف الأعضاء العام» (1999) عن مؤسسة شباب الجامعة – أسكندرية .

* عضو منظمة نساء العالم الثالث للعلوم (Twows)

إهداء

أهدى هذا الكتاب إلى ذكرى أمي الخالدة

بسم الله الرحمن الرحيم

تمهيد

أقدم للطالب والقارئ العربى هذا الكتاب والذى جاء ليكمل كتابى عن «علم وظائف الاعضاء العام» (1999). هذا ويمثل الكتابان منهجا لتدريس مادة الفسيولوجيا لطلاب الجامعات وعليه آمل أن يسد الكتابان معاً بعض النقص الموجود فى المكتبة العربية فى هذا المجال. قد قمت فى هذا الكتاب باستعراض الآليات الفسيولوجية الخاصة بالحيوان.

شمل بعضها أوجه المقارنة بين جميع الرتب الحيوانية تقريباً؛ وظيفة وتطور الجهاز العصبى (الفصل الثانى والرابع)، آليات الاحساس (الفصل الثالث)، الجهاز الهضمى (الفصل الخامس)،التنفس (الفصل العاشر)، الجهاز الدورى (الفصل الثامن).

بينما اقتصر بعضها على آليات فريدة «كجهاز الغدد الصماء عند الحشرات» (الفصل السابع). كذلك تضمن الكتاب بعض الآليات الهامة؛ مثل الحركة (الفصل السادس) التنظيم الأسموزى والاخراج (الفصل التاسع) أيض الطاقة وتنظم درجة الجسم (الفصل الحادى عشر).

هذا وقد خصصت الفصل الأول لاستعراض بعض النظريات والخواص البيوكيميائية الهامة لربط فسيولوجيا الأعضاء بفسيولوجيا الخلية.

وقد اعتمدت فى كتابى على استخدام اللفظ المبسط والشرح المباشر؛ وحتى لا أعزل القارئ عن الأصول الاجنبية لكثير من المصطلحات فقد درجت على ذكر المصطلح فى البداية باللغة الأنجليزية.

أننى أمل وأنا أقدم هذا الكتاب، أن يشكل وحدة متكاملة مع كتابى «علم وظائف الأعضاء العام» (1999) وأن يصبح نواة لتجميع المزيد من آليات الأداء الوظيفى الفريدة فى المملكة الحيوانية. كما أمل أن يسهم كل من يقرأ هذا الكتاب فى ابداء ملاحظتهم سواء فى مادة الكتاب أو فى الطريقة التى قدمت بها النص حتى أستفيد منها مستقبلاً.

فى ختام هذا التمهيد لا يسعنى إلا أن أتقدم بالشكر لمؤسسة شباب الجامعة بالأسكندرية لقيامها بطبع ونشر هذا الكتاب.

د. حياة السودان إبراهيم

محتويات الكتاب

صفحة

الفصل الأول
مقدمة

1-1	جوهر الفزيولوجى	3
1-2	النظريات الفزيائية والكيمياوية	5
1-3	الطاقة	25
1-4	الأنزيمات	46
1-5	آليات التنظيم الأيضية	60

الفصل الثانى
وظيفة الجهاز العصبى

2-1	الخلايا العصبية	84
2-2	الخلايات الداعمة	85
2-3	الاشارات العصبية	87
2-4	التشابكات العصبية	91
2-5	الناقلات العصبية	95

الفصل الثالث
آليات الاحساس

3-1	الاحساس بالمواد الكيمياوية	104
3-2	الاحساس بالمؤثرات الميكانية	106
3-3	الاحساس بالمؤثرات الكهربائية	112
3-4	الاحساس بالمؤثرات الحرارية	113
3-5	الاحساس بالمؤثرات الضوئية	115

الفصل الرابع

تطور الجهاز العصبى

4-1	الأجزاء الرئيسية للجهاز العصبى المركزى للفقاريات	134
4-2	الجهاز العصبى المستقل	139
4-3	بعض خصائص الجهاز العصبى	143
4-4	سلوك بعض الحيوانات التي لا تمتلك جهازا عصبيا	145
4-5	تحديد الاتجاه بواسطة الحيوانات	148

الفصل الخامس

جهاز الغدد الصماء عند الحشرات

5-1	مراحل نمو الحشرات	157
5-2	تنظيم النمو عن طريق الهرمونات	158
5-3	تأثير الهرمونات المختلفة على النسيج الطلائى	163

الفصل السادس

الحركة

		170
6-1	انقباض العضلات	172
6-2	التنظيم العصبى – عضلى	175
6-3	عضلات الطيران عند الحشرات	177
6-4	الميكانية العضو – هيكلية	182
6-5	الهيكل العظمى	

الفصل السابع

التغذية ، الهضم ، الامتصاص

7-1	عملية الهضم	190
7-2	التغذية	191
7-3	نظرة عامة على الجهاز الهضمى	201
7-4	الغدد خارجية الافراز	209

الفصل الثامن

الجهاز الدورى

8-1	التشريح الوظيفى للقلب عند الفقاريات	225
8-2	ديناميكية الدم	233
8-3	الجهاز الشرايانى	237
8-4	الجهاز الوريدى	241
8-5	الشعيرات الدموية	241
8-6	الجهاز الليمفاوى	244
8-7	تنظيم وظيفة القلب والأوعية	246
8-8	استجابة القلب والاوعية للتمارين الرياضية	251
8-9	استجابة القلب والأوعية للغطس تحت الماء	253

الفصل التاسع

التنظيم الأسموزى والاخراج

9-1	مشاكل التنظيم الاسموزى .	259
9-2	التنظيم الأسموزى بواسطة الحيوانات	263
9-3	الطبقة الطلائية كنسيج منظم للأسموزية	265
9-4	أعضاء التنظيم الأسموزى عند الفقاريات	267
9-5	أعضاء التنظيم الأسموزى عند اللافقاريات	273
9-6	التنظيم الأسموزى داخل الماء	277
9-7	التنظيم الأسموزى على اليابسة	281
9-8	مثال كلاسيكى	287
9-9	اخراج الفضلات النيتروجينية	289

الفصل العاشر

جهاز التنفس

10-1 الرئية عند الفقاريات : تنفس الهواء 301

10-2 الخياشيم عند الفقاريات : تنفس الماء 318

10-3 تنظيم عملية تبادل الغازات والتنفس 326

10-4 التحكم فى عملية التنفس بواسطة الجهاز العصبى 328

10-5 استجابة الجهاز التنفسى لاختلاف تركيز الغازات 330

10-6 الاستجابة للغطس تحت الماء 332

10-7 الاستجابة للتمارين الرياضية 332

10-8 نظم أخرى لنقل الغازات 335

10-9 كيف تتنفس البيضة؟ 337

10-10 تجمع الأكسجين داخل العوامات. 340

الفصل الحادى عشر

أيض الطاقة وتنظيم درجة حرارة الجسم

11-1 ما هو أيض الطاقة ؟ 347

11-2 تصنيف الحيوانات حسب درجة حرارة الجسم 348

11-3 حجم الجسم ومعدل الأيض 350

11-4 تأثير درجة الحرارة على الحيوان 352

11-5 التكيف الحرارى 356

11-6 الصفات الحرارية للحيوانات (أ) 359

11-7 الاستراتيجيات الحرارية للحيوان 361

11-8 الصفات الحرارية للحيوانات (ب) 362

11-9 المنظم الحرارى للثديات 373

11-10 التنظيم الحرارى أثناء التمارين الرياضية 376

11-11 السكون. 378

11-12 طاقة الحركة 381

الفصل الأول

المقدمة

الفصل الأول
المقدمة

يمكننا تعريف الفزيولوجيا المقارنة على أنها دراسة لوظائف الاعضاء المختلفة للحيوانات، وكذلك وظائف الأجزاء المكونة لهذه الأعضاء ويظل الهدف الأسمى هو الفهم الكامل، ومن الناحية الفزيائية والكيميائية، للآليات التى تعمل داخل الكائن الحى وعلى كل المستويات من مستوى العضيات إلى مستوى الحيوان الكامل. وهذا الهدف، فى الحقيقة، طموح جداً إذ حتى الكائنات وحيدة الخلية تكون على درجة عالية من التعقيد. لهذا السبب كان من المفيد تقسيم علم وظائف الاعضاء إلى العديد من التخصصات الجزئية، مثل فزيولوجيا الخلية، فزيولوجيا الاعضاء المختلفة من تنفسية وهضمية... الخ. بالرغم من التقسيمات المختلفة، يوجد العديد من التداخلات والنظريات المشتركة والتى تظهر عبر علم وظائف الاعضاء مما يجعل منه نسيجاً واحداً. كذلك اتضح أن النظريات المشتركة قد نشأت نتيجة لخواص المادة والطاقة.

كما وجد أن الوظائف المختلفة للجسم تتطلب تكامل نشاط العديد من الأنشطة والأعضاء. مثلا لا يستطيع المخ أن يؤدى وظيفته من غير أن يصله امداد مستمر من الدم؛ يُضخ إليه بواسطة القلب. كما لا يستطيع القلب أن يبقى حياً ولو لدقائق من غير أن يصله أمداد من الأكسجين توفره الرئيتان ، ولا تستطيع الرئيتان أن تعملا من غير اشارات عصبية لعضلات التنفس تأتى من المخ ... وهكذا.

1-1 جوهر الفزيولوجى

سنتناول فيما يلى القليل من النظريات الأساسية التى هى من صميم دراستنا لوظائف الأعضاء المختلفة عند الحيوان. كما ستظهر لنا العديد من هذه النظريات عند دراستنا لوظائف الأعضاء المختلفة فى الفصول التالية .

1-1-1 اعتماد الوظيفة على الشكل:

تعتمد الحركة عند الحيوان على شكل العضلات والعناصر الهيكلية؛ وعلي الكيفية التى تتصل بها العضلات مع العناصر الهيكلية مثل العظام. فى هذا المثال البسيط يتضح بصورة جلية كيفية اعتماد الوظيفة على الشكل. ولكن تصبح هذه الظاهرة أكثر غموضا، لكنها ليست أقل واقعية، عندما ننظر إلى النظم الأقل مثل الأنسجة، الخلايا والعضيات. أحدى أكثر الأمثلة التى تمت دراستها هى تركيب جزيئات الانقباض، الأكتين والميوسين، والتركيب الدقيق لألياف العضلات، إذ أن فهمنا لهذا التركيب ساعدنا على فهم آلية انقباض العضلات. أيضا تنطبق النظرية القائلة بأن الوظيفة تعتمد على الشكل على المستوى البيوكيميائى حيث نجد أن تغيير شكل جزئى البروتين، ولنقل الأنزيم، عن طريق تسخينه إلى ما فوق 40° مئوية يفقده وظيفته الحيوية.

1-1-2 الوراثة والفزيولوجى

يعمل الانتقاء الطبيعى من أجل الحفاظ على ما نطلق عليه germ line DNA وهو الذى يحافظ على استمرارية النوع، أما الأجزاء التى تجعل الحيوان أقل ملائمة لبيئته فيتم حذفها. كما ذكرنا سابقا ، تعتمد الوظيفة على الشكل، هذا أيضا ينطبق على عملية الانتقاء الطبيعى. لكن بما أن عملية التطور لا تعمل إلا فى نطاق القوانين الكيميائية والفزيائية؛ نجد أن طبيعة ووظيفة النظم الحية محدودة بالخواص الفزيائية والكيميائية للجزيئات المكونة لها.

يخدم الشكل الجسمانى والوظائف المختلفة للاعضاء بقاء DNA من جيل إلى آخر. إذن توجد علاقة تكافلية سمبيوزية بين جزئ DNA وباقى الكائن الحى لا يستطيع أحدهما التواجد دون الآخر. فالأعضاء تدين بوجودها لجزئ DNA ولا يستطيع جزئ DNA البقاء والاستمرار من جيل إلى آخر إلا من خلال الحياة القصيرة للكائن الحى.

لهذا السبب يتم تكريس كل وظائف الجسم المباشرة والغير مباشرة لتناول وتحويل الطاقة والمواد من البيئة لضمان بقاء النوع

1-1-3 نظرية الاتزان (الثبات) الداخلى

أول من نوه إلى أهمية الثبات الداخلى homeostasis هو العالم الفرنسى كلودبيرنارد Claude Bernard فى القرن التاسع عشر، حينما لاحظ مقدرة الحيوانات على الحفاظ على مكونات سوائل الجسم ضمن حدود ضيقة مما يساعد الحيوان على العيش فى البيئات المختلفة وقد اطلق عليها لفظ البيئة الداخليةmilleu interier يتم تنظيم البيئة الداخلية بواسطة كائنات وحيدة الخلية كما يتم بواسطة الفقاريات المعقدة. فى الاخيرة، يتم الحفاظ على مكونات السائل الذى يحيط بالخلايا، السائل البينى، فى حدود ضيقة وكذلك بالنسبة لدرجة حرارة الجسم الداخلية عند الثديات والطيور.

تمكنت الكائنات وحيدة الخلية من غزو المياه العذبة لأنها تستطيع الحفاظ على مكونات السيتوبلازم عن طريق التغذية الاختيارية للغشاء والنقل النشط للأيونات وغيرها من الطرق التى تبقى على ثبات هذه المكونات داخل السيتوبلازم مختلفا عن البيئة الخارجية. تعمل نفس الآليات عند الكائنات متعددة الخلايات التى تنظم السائل البينى أو البيئة الداخلية. هذا وتعتمد معظم عمليات التنظيم فى الكائنات متعددة الخلايا على آلية التغذية المرتجعة حيث يتطلب التنظيم الاختبار والتصحيح المستمرين.

1-2 النظريات الفزيائية والكيميائية

تشكل الكائنات الحية الموجودة علي كوكب الأرض تنوعاً كبيراً، فهى تتراوح من الفيروسات، البكتريا والكائنات وحيدة الخلية إلى الفطريات ، النباتات الخضراء، الحيوانات اللافقارية والحيوانات الفقارية. بالرغم من هذا التنوع إلا

أن النظم الحية، تشترك جميعا فى بعض الأساسيات. فكل الحيوانات والنباتات والكائنات الدقيقة تتكون من نفس العناصر الكيميائية العضوية والغير عضوية. كذلك تتم كل العمليات المكونة للحياة داخل وسط مائى وهى بذلك تعتمد على الخواص الكيميائية والفزيائية لهذا المحلول الفريد الواسع الانتشار.

يتفق معظم علماء البيولوجى الآن على أن العمليات البيوكيميائية والفزيولوجية للكائنات الحية تعتمد على الخواص الكيميائية والفزيائية للعناصر والمركبات التى تكون النظم الحية. للوهلة الأولى يبدو ذلك تبسيطاً مخلاً، لأن خواص النظم الحية تبدو أكثر احكاماً وتعقيداً من أن توصف بأنها خليط من العناصر والمركبات؛ وفى هذا يكمن جزء من الاجابة. فالنظم الحية ليست خليطا كيميائيا بسيطا ولكن تراكيب غاية فى التنظيم تتكون من جزيئات معقدة. تساهم الجزيئات الكبيرة الحجم فى تنظيم وتوجيه النشاط الكيميائى للنظم الحية. بينما تعطى العضيات مثل غشاء الخلية، الليزوسومات والميتوكوندريا بنية تركيبية للنظم الحية وذلك عن طريق فصلها إلى حجيرات وحجيرات جزئية مما يساعد الجزئيات على أداء وظائفها المختلفة.

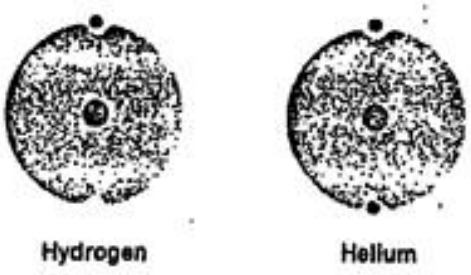
1-2-1 الذرات الروابط والجزئيات

يتكون 99 بالمئة من حجم الحيوان من الهيدروجين، الأكسجين، النتيروجين والكربون وهى موجودة فى جسم الإنسان بالنسب التالية (النسبة المئوية للعدد الكلى للجزئيات). الهيدروجين بنسبة 63 بالمئة ؛ والاكسجين بنسبة 5.5 بالمئة، الكربون بنسبة 9.5 بالمئة والنيتروجين بنسبة 1.4بالمئة.

إن التواجد البيولوجى لهذه المواد «تقريباً فى كل الكائنات الحية» ليس بمحض الصدفة، كما يقول جورج فالد George Wald، ولكنه نتيجة للخواص المعينة لهذه المواد التى جعلتها مناسبة لكيمياء الحياة. سنقوم أولا باستعرض

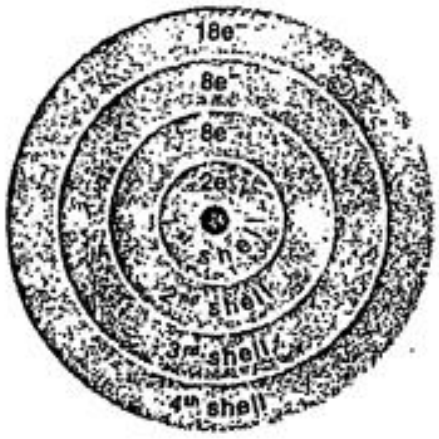
العوامل الفزيائية التى تؤثر على التركيب الكيميائى للمادة، ثم بعد ذلك نتعرض لملاحظة فالد، متناولين فقط بعض الخواص البسيطة.

تتكون كل ذرة من نواة من البروتونات (وهى تحمل شحنة موجبة) والنيترونات (لاتحمل أى شحنة) تحيط بها «سحابة» من الالكترونات (وتحمل شحنة سالبة) يساوى عددها عدد البروتونات داخل النواة، لذلك لا تحمل الذرة، داخل العناصر الطبيعية أى شحنة كهربية. تتوزع الالكترونات (e^-) على العديد من المدارات orbits بحيث تشغل بعض المواضع باحتمالات أكبر من غيرها. هذا التوزيع منتظم جداً بحيث يكون للذرة التى تحتوى على 2 إليكترون مدارا واحدا حول النواة كما في جزئ H_2 والهيليوم (الشكل1-1).



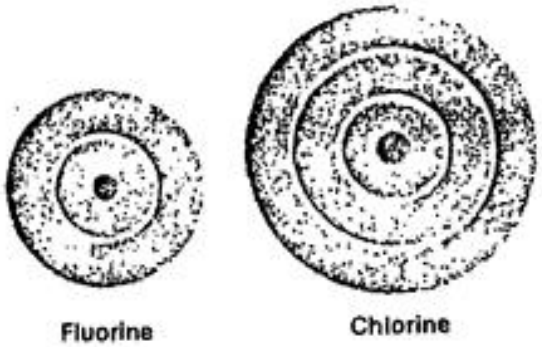
الشكل 1-1 ذرة هيدروجين يوجد بها الكترون واحد فى المدار الأول
ذرة He يوجد بها 2 e^-

بالنسبة للذرات التى تحتوى على 3 إلى 10 اليكترونات (Li, Be, B, C, N, O, F, Ne)؛ يكتمل المدار الأول حينما يحتله 2 اليكترون . تحتل باقى الالكترونات المدارات التى تليه إلي أن يصل عددها 8 اليكترون لكل مدار (الشكل2-1) (2 فى الأول، 8 فى كل من الثانى والثالث، 18 فى الرابع وهكذا). بحيث تكون الذرات التى يكتمل مدارها الخارجى أى لا تستطيع تقبل أى اليكترون إضافى ، مستقرة وتقاوم التفاعلات الكيميائية كالغازات الخاملة inert gases مثل الهيليوم He والنيون Ne.



الشكل 2-1 عدد -e اللازمة لملء الـ 4 مدارات الأولى

لكن لمعظم العناصر الأخرى مدارات خارجية غير مكتملة، لذلك تتفاعل مع غيرها من الذرات. مثلا للهيدروجين اليكترونا واحدا فى مداره الواحد وللاكسجين فقط 6 اليكترونات بدلا عن 8 فى المدار الخارجى (الشكل A 3-1) لذلك لكل من ذرة O_2 ، ذرة H_2 ميل للمشاركة فى الاليكترونات لتكمل كل منهما مدارها الخارجى وتصبح مستقرة. بالرغم من أن لعدد الاليكترونات فى المدار الخارجى تأثير هام على الخواص الفزيائية وتفاعل الذرة، ايضا هنالك بعض الخواص الفزيائية الأخرى الهامة التى تحدد الخواص الكيميائية للذرات. إحدى هذه العوامل هو حجم (أو وزن) الذرة. فكلما كانت الذرة ثقيلة (أى ازداد عدد البروتونات والنيترونات داخل النواه) كلما زاد عدد الالكترونات التى تحيط بالنواه.



الشكل 3-1 ذرتى فلورين وكلورين

عندما يزيد عدد الالكترونات عن 10 يتكون مدار ثالث وتصبح الكترونات التكافؤ valency ، أى الموجودة على الغلاف الخارجى، أكثر بعدا عن النواه لذلك تكون أقل ارتباطا بالنواه. مثال ذلك يكون Cl والذى يمتلك 7 الكترون فى المدار الثالث أقل تفاعلا من F الذى يمتلك 7 الكترون فى المدار الثانى (الشكل B 1-3) لكل من الذرتين ميل إلى اكتساب اليكترون واحد لتكملة المدار الخارجى. يكون هذا الميل أكبر فى F نتيجة للجاذبية الكهروستاتية العالية من النواة التى تقل بالنسبة للكلورين حيث يبعد المدار الثالث عن النواه. كنتيجة لذلك تكون للذرات الصغيرة روابط أقوى وأكثر ثباتا من الذرات الكبيرة الحجم.

1-2-2 ملائمة (H_2, O_2, C & N_2) للحياة

إذا نظرنا إلى الجدول الدورى (الجدول 1-1) نجد أن من بين المواد الشائعة على سطح القشرة الأرضية (الجدول 1-2) فقط (H_2, O_2, C & N_2) لها مدارى اليكترونات أو أقل؛ Heو Ne غازان خاملان بينما يكون B و F أملاحاً نادرة الوجود ويكون المعدنان Li و Be روابط سهلة التفكك بالعكس يكون (H_2, O_2, C & N_2) روابط تساهمية covalent قوية عن طريقة مشاركتها (1, 2, 3, 4) اليكترون على التوالى لتكمل المدار الخارجى.

الجدول 1-1 الجدول الدورى – يشير كل من الصفوف إلى مدار مختلف – العناصر التى تظهر بالخط السميك لها أهمية فزيولوجية فى حالتها الأيونية

First shell	1 H																2 He
Second shell	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
Third shell	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
Fourth shell	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
Fifth shell	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
Sixth shell	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
Seventh shell	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104	105	106												

	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw

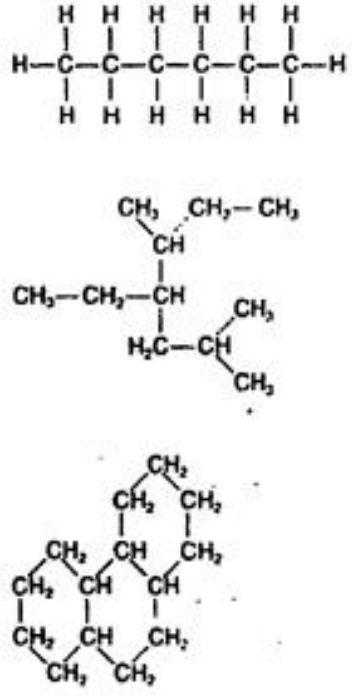
الجدول 2-1 العناصر الكيميائية التى يحتويها جسم الإنسان مقارنة
مع العناصر الموجودة فى ماء البحر وعلى القشرة الأرضية
النسبة المئوية من العدد الكلى للذرات

جسم الانسان		ماء البحر		القشرة الأرضية	
H	63	H	66	O	47
O	25.5	O	33	Si	28
C	9.5	Cl	0.33	Al	7.9
N	1.4	Na	0.28	Fe	4.5
Ca	0.31	Mg	0.033	Ca	3.5
P	0.22	S	0.017	Na	2.5
Cl	0.03	Ca	0.006	K	2.5
K	0.06	K	0.006	Mg	2.2
S	0.05	C	0.0014	Ti	0.46
Na	0.03	Br	0.0005	H	0.22
Mg	0.03			C	0.19
<	0.01	<	0.1	<	0.1

كل الباقى

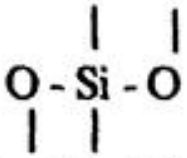
لماذا تكون الروابط القوية أو الثابتة مهمة؟ ليتخيل القارئ الفوضى التى يمكن أن تحدث إذا كانت الروابط الكيميائية داخل جزئ DNA غير ثابتة. نادرا ما تتغير (أى تحدث طفرات) للروابط بين العناصر المكونة للجزئ (H, C & P) H_2, O_2, N_2 أثناء عملية الاستنساخ (فى المتوسط تحدث أقل من طفرة للجين لكل من 10,000 عملية استنساخ). بالرغم من أن حدوث الطفرات من حين إلى آخر يكون ضروريا لعملية التطور، إلا أن تماسك الكائن الحى والنوع على المدى القصير يكون ضروريا (أى استقرار جزئ DNA والجزئيات الكبيرة الأخرى).

3 من 4 من العناصر المهمة بيولوجيا وهى O_2، N_2، C بين المواد الوحيدة فى الطبيعة التى تكون روابط مزدوجة أو روابط ثلاثية بذا يزداد تنوع التركيب الجزئى للمواد التى تكونها هذه العناصر مثلا يستطيع O_2 أن يتحد مع Cمكونا ثانى أكسيد الكربون O = C = O نتيجة لوجود الرابطة المزدوجة يكون CO_2 خامل نسبيا ولذلك يستطيع الانتشار بسهولة من مصدر تكونه ويعاد استخدامه فى عملية التمثيل الضوئى بواسطة النباتات الخضراء. إن مقدرة ذرة الكربون لتكوين 4 روابط أحادية أو 2 رابطة مزدوجة جعلتها تكون العديد من المركبات والتوافقيات مع نفسها ومع غيرها من الذرات. بامكان ذرة الكربون تكوين سلاسل مستقيمة أو متفرقة (الشكل4-1) ؛ وباتحادها مع ذرات أخرى توفر تنوعا لانهائيا من الاشكال الجزئية والتراكيب.



الشكل 4-1 الهياكل الجزئية المختلفة التى تكونها ذرات الكربون

إذا أخذنا السيليكون من نفس العمود ويقع تحت C على الجدول الدورى (الجدول1-1) . بالرغم من خواصة الشبيهة بالكربون إلا أنه ليس كمثل الكربون فهو كبير الحجم ولا يكون روابط مزدوجة ، لذلك يرتبط مع ذرتى O_2 بواسطة روابط احادية



تاركا المدارات الخارجية غير مكتملة بالنسبة للثلاث ذرات التى تكون ثانى أكسيد السيليكون SiO_2 بما أن الميل لتكوين روابط مزدوجة لا يتحقق لذلك يتحد مع غيرها مكونة بوليمو كبير من حبات الرمل أو الصخور. لذلك يتضح أن Si بالرغم من خواصة الشبيهة بالكربون ، فهو أنسب لتكوين الصخور بدلا عن مشاركته على مجال واسع فى تكوين الجزئيات البيولوجية الكبيرة.

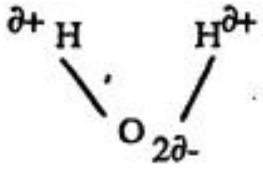
بالاضافة إلى العناصر الأربع الهامة بيولوجيا، هنالك بعض العناصر الأخرى لا تقل عنها أهمية وإن كانت موجودة بكميات قليلة وهى تشمل الفسفور والكبريت وأربع عناصر معدنية (Na^+, K^+, Mg^{++} & Ca^{++}) وأيون الكلوريد Cl^-

1-2-3 الماء

الماء جزء لا يتجزأ من الحياة ولكن نسبة إلى كونه شائع جداً فغالبا ما ينظر إليه بعدم مبالاة كمادة خاملة تملأ المساحات الموجودة داخل الانظمة الحية. الحقيقة بالطبع هى أن الماء مادة عالية التفاعل، تختلف فزيائيا وكيميائيا عن معظم السوائل الأخرى.يمتلك الماء العديد من الصفات الغير عادية والمميزة الهامة جدا للنظم الحية. فى الحقيقة، ستكون الحياة كما نعرفها غير ممكنة إذا لم يكن للماء هذه الخواص. يتكون معظم وزن جسم الكائن الحى من الماء وحتى حيوانات اليابسة يحتوى جسمها على 75 بالمئة أو أكثر من الماء. هذا ويتم توجيه معظم المجهود الفزيولوجى للحيوان نحو الحفاظ على ماء الجسم وثبات مكوناته.

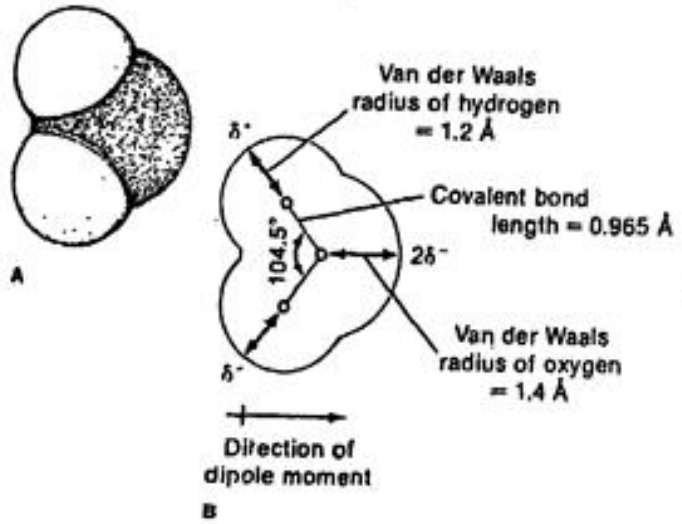
سنتناول فيما يلي تركيب جزئ الماء وتنشأ منه مباشرة خواص الماء التى نعتقد أنها هامة للحياة.

ترتبط ذرة O_2 مع ذرتى H_2 بين جزيئات الماء بواسطة روابط تساهمية قطبية polar covalent bonds تنشأ القطبية أو اختلاف توزيع الشحنة الكهربية، نتيجة للشحنة الكهربية السالبة العالية لذرة O_2 بالمقارنة مع H_2. تجعل هذه الشحنة السالبة العالية الالكترونين الموجودين على ذرتى H_2 يحتلان مكانا اقرب لذرة O_2 من ذرة H_2 نفسها لذلك تكون الرابطة 40 بالمئة أيونية.



تشير ∂ إلى الشحنة الجزئية المحلية

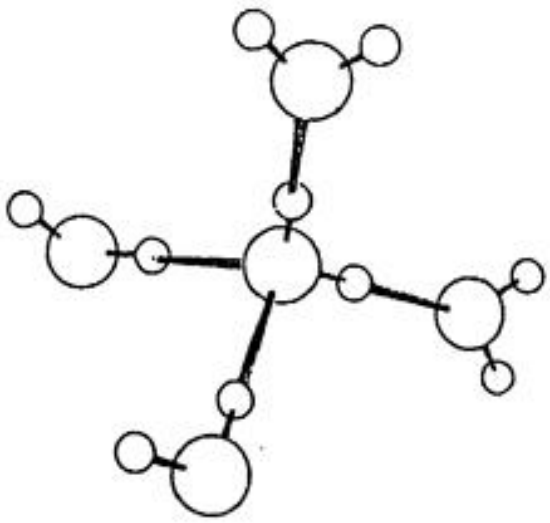
يمكن أيضا تمثيل جزئ الماء كما فى الشكل (1-5) حيث تكون الزاوية بين الرابطتين اللتين تجمعان ذرة O_2 مع ذرتى H_2 104.5° بدلا عن 90° .



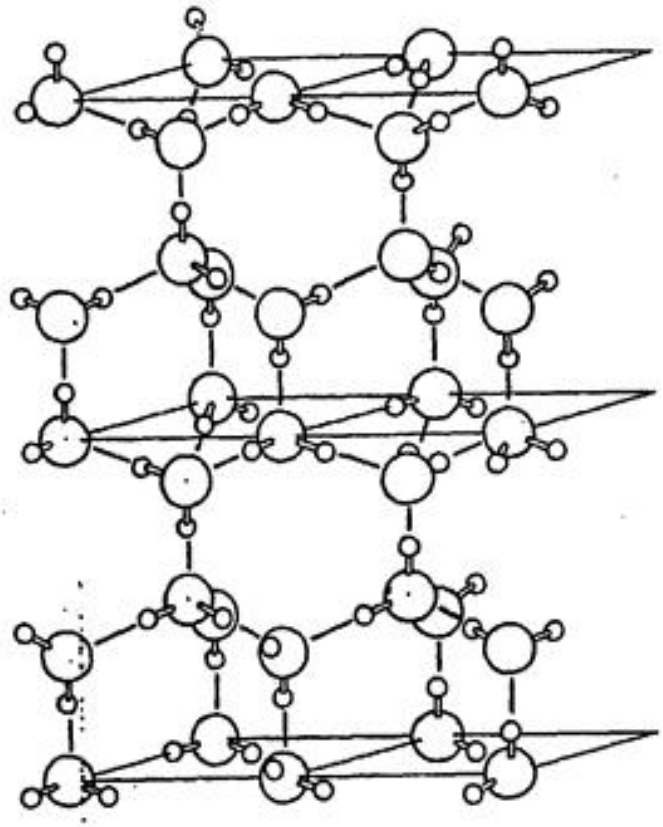
الشكل 1-5 رسومات توضح العلاقة بين ذرات H_2, O_2 داخل جزئ الماء (A) النموذج الثلاثى الابعاد (B) أطوال وزوايا الروابط

جاء اتساع الزاوية هذا نتيجة للطبيعة الشبه قطبية للرابطة H-O، يختلف H_2O إلى درجة كبيرة جدا فزيائيا وكيميائيا لمركبات الهيدروجين الأخرى مثل H_2S. فهو يتصرف كمغنطيس ذو قطبين كهربيين +ve ، -ve (الشكل 1.5). لهذا السبب فهو يميل إلى أن ينتظم داخل مجال كهروستاتى.

أهم خواص الماء الكيميائية هى مقدرته على تكوين روابط هيدروجينية بين البروتونات التى تحمل شحنة موجبة والأكسجين الذى يحمل شحنة سالبة بين كل الجزئيات المتجاورة للماء (الشكل 1.6) ترتبط فى كل جزئ ماء 4 من 8 من الاليكترونات فى المدار الخارجى للأكسجين بروابط تساهمية مع 2H . هذا يترك 2 زوج من الالكترونات يتفاعل بحرية كهروستاتياً. (أى ليكون روابط هيدروجينية) مع H^+ للجزئ المجاور. لأن زاوية الرابطة التساهمية تساوى 105° تقريبا لذلك ترتبط جزئيا مع الماء مكونه شكل رباعى الوجوه المثلثية tetrahedral . وهذا هو أساس التركيب البلورى لمعظم أنواع الثلج شيوعا (الشكل 1.7).



الشكل 1-6 4 جزئيات ماء ترتبط بواسطة روابط هيدروجينية



الشكل 7-1التركيب البلورى للثلج

خواص الماء:

الرابطة الهيدروجينية التى تربط جزيئات الماء ببعضها البعض غير ثابتة وغير مستقرة . يتراوح عمر الرابطة الهيدروجينية داخل الماء بين 10^{-01} ، 10^{-11} ثانية، وتحتاج إلى 4.5k cal/mol لكسرالروابط الهيدروجينية فى حين أن الرابطة التساهمية O-H داخل جزئ الماء تحتوى على طاقة مقدارها 110k cal /mol

بالرغم من قوتها المتواضعة إلا أن الرابطة الهيدروجينية تزيد من الطاقة الاجمالية المتطلبة لفصل أحد جزيئات الماء عن باقى الجزئيات. لهذا السبب تكون درجة ذوبان ودرجة غليان ودرجة تبخر الماء أعلى من مركبات الهيدروجين الأخرى مثل H_2S، HF، NH_3، بين مركبات الهيدروجين الشائعة نجد أن للماء فقط درجة غليان تصل 100° مئوية وهى أعلى من درجة الحرارة الشائعة على

سطح الأرض. ايضا طبيعة الترابط بين جزئيات الماء جعل للماء توترا سطحيا عاليا surface tension وقوة تماسك cohesion عالية. كما أن المحيطات والبحار كانت ستتحول إلى ثلج ما عدا الطبقة السطحية فى حالة ما إذا كان الثلج أكثر كثافة من الماء، ويتكون من تحت إلى أعلى. أما كون الثلج أقل كثافة من الماء فذلك لأن لبلوراته بنية تشابكية مفتوحة، بينما الماء، الذى تترابط فيه الجزئيات عشوائيا تكون فيه الجزئيات أكثر تجمعا مع بعضها وبالتالى أكثر كثافة.

الماء كمحلول

الماء هو أكثر المحاليل «شمولية» universal تكون هذه الخاصية نتيجة ثابت العزل الكهربائى dielectric constant العالى للماء وهو ناتج عن القطبية الكهروستانية للماء. [ثابت العزل الكهربى العالى يعنى أنه يقلل من القوة الكهروستانية لأى مادة تذوب فى الماء حسب المعادلة التالية:

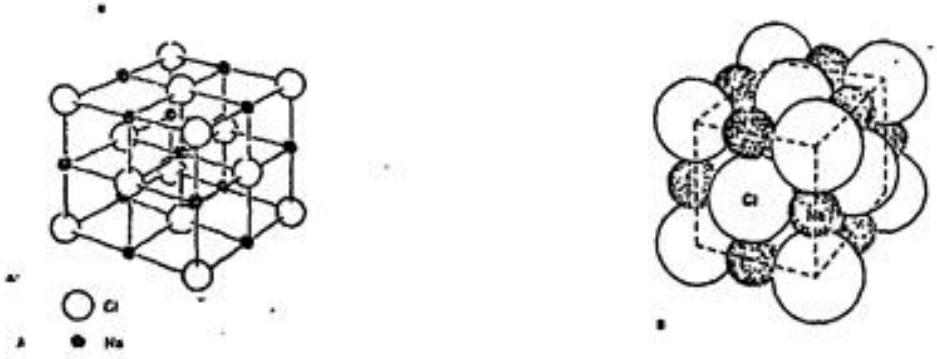
$$F = f_1 f_2 / Ed^2$$

حيث F القوة بالدينdynes بين الشحنتين f_1, f_2، d المسافة بالسنتيمترات بين الشحنتين و E هو ثابت العزل الكهربائى للماء].

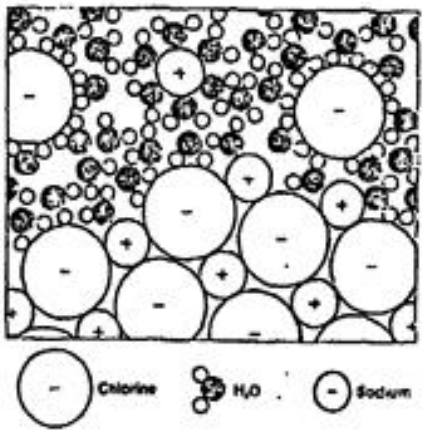
هذا يتضح أكثر بالنسبة للمواد الأيونية أو الالكتروليت وتشمل الأملاح، الأحماض والقواعد والتى تتفكك جميعها إلى أيونات عند إذابتها فى الماء (المواد التى لا تتفكك مثل السكر، الكحول والزيت يطلق عليها لا الكتروليت).

يوضح الشكل (1.8) انتظام أيونات Na^+ و Cl^- داخل بلورة NaCl وتتكون البلورة نتيجة للجاذبية الكهروستاتية بين أيونات Na^+ بالشحنة الموجبة وأيونات Cl^- ذات الشحنة السالبة. هذا ولا تستطيع المحاليل الغير قطبية مثل hexane اذابة NaCl لأنه لا يوجد مصدر للطاقة بداخلها ليفصل أحد الأيونات عن باقى البلورة. لكن يستطيع الماء إذابة NaCl؛ كما يستطيع اذابة معظم المواد الأيونية والاملاح، الأحماض والقواعد، لأن جزئ الماء ذو القطبين يستطيع التغلب على

التفاعلات الكهروستاتية بين الأيونات كما هو موضح بالشكل (1-9) ينجذب أيون O^{2-} إلى أيون Na^{+} بينما ينجذب البروتون H^{+} إلى أيون Cl^{-} وتكون النتيجة تجمع جزئيات الماء حول الأيونات المنفردة فيما يعرف بالتذاوب solution أو التميؤ hydration.

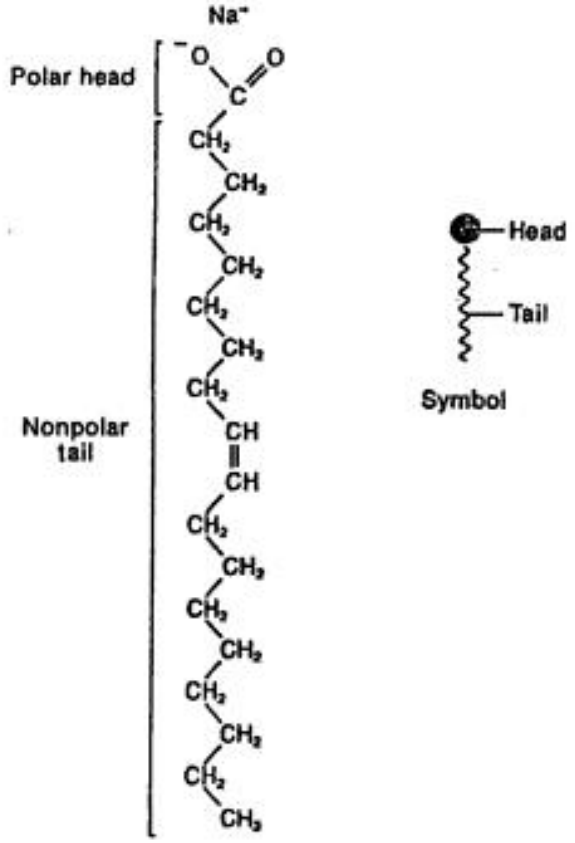


الشكل 8-1 A التركيب الداخلي لبلورة NaCl B – توضيح الحجم النسبي لأيونات Na^{+} و Cl^{-}

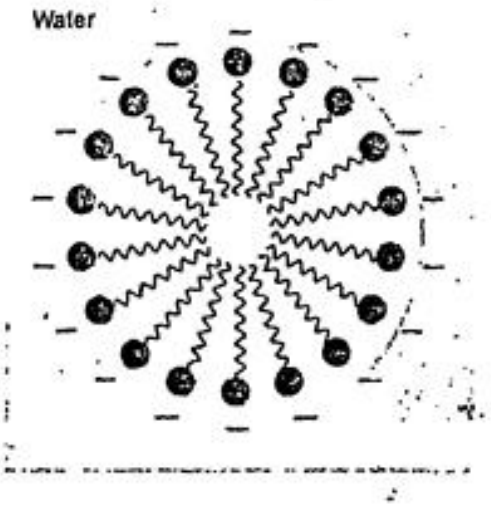


الشكل 9-1 حلمأة الاملاح بواسطة جزيئات الماء تنجذب O_2^{2-} إلى الأيونات الموجبة بينما تنجذب + إلى الأيونات السالبة

أيضا يذيب الماء بعض المواد العضوية كالكحول والسكر، وهى لا تتأين فى المحلول، لكن لهذه الجزئيات العضوية مزايا قطبية. بخلاف ذلك لا يستطيع الماء اذابة المواد الغير قطبية مثل الدهون والزيوت لأنها لا تستطيع التفاعل معها عن طريق الروابط الهيدروجينية. لكن يتفاعل الماء جزئيا مع المركبات amphipathicالتى تحتوى على مجموعة قطبية ومجموعة غير قطبية مثل جزئ الصابون (الشكل1-10) الذى له قطب محب للماء Hydrophilic وقطب كارة للماء hydrophobic إذا تم خلط الماء مع Na oleate سيتسبب الماء فى تحويله إلى حبيبات صغيرة وتنظم حبيباته كما موضح بالشكل (1-11) حيث تكون الأجزاء الكارهة للماء فى الداخل بينما تكون الأجزاء القطبية المحبة للماء للخارج. نفس السلوك تظهره الليبيدات الفسفورية الموجودة على غشاء الخلية.



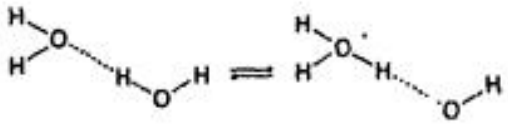
الشكل 10-1 تركيب أحد جزئيات الدهن القطبية الرأس، sodium oleate
(والرمز الذى يشير لها)



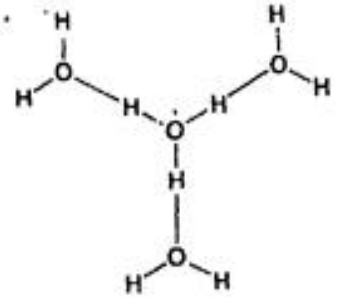
الشكل 11-1 انتظام لبيد قطبى داخل مذيب قطبى مثل الماء
تتجنب الأطراف الكارهة للماء ملامسة جزئيات الماء فتتجمع فى الوسط

تأين الماء

يمكن توضيح الروابط الهيدروجينية داخل جزئ الماء كما فى الشكل (1-12) الذى يوضح أن الروابط التساهمية قد تتبادل مع الروابط الهيدروجينية. بحيث تكون 3 ذرات H مع ذرة O أيون هيدرونيم hydronium ورمزه H_3O^+ تاركة ذرة أكسجين أخرى متحدة مع ذرة H واحدة مكونه أيون الهيدروكسيل ورمزه OH^-. هذا الاحتمال فى الحقيقة ضعيف جداً. عند أى وقت يحتوى لتر الماء عند درجة حرارة 25° مئوية فقط على 1.0×10^{-7} mol من أيون H_3O^+ ومثله OH^-. تجذب الأقطاب الموجبة لأيون H_3O^+ جزئيات H_2O الغير مفككة مكونة H_3O^+ ثابتة (الشكل 13-1) يكتب تفكك الماء هكذا.



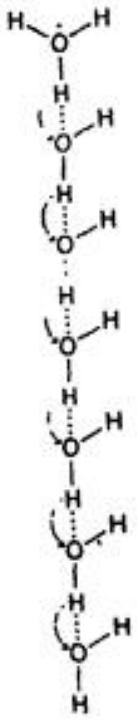
الشكل 12-1 تكوين أيونات الهيدرونيم



الشكل 1-13
أيونات الهيدرونيم داخل الماء ترتبط
مع 3 جزئيات ماء بواسطة روابط هيدروجينية

$$H_2O \longleftrightarrow H^+ + OH^-$$

لكن يجب تذكر أن البروتون H^+ لا يوجد حراً داخل الماء وإنما كجزء من أيون H_3O^+ . لكنه قد يحول جزئ H_2O إلى H_3O^+ أو قد يحول H_3O^+ أحد البروتونات إلى جزئ ماء آخر (الشكل 1-14) يتم هذا التسلسل إلى مسافات طويلة ولكن لا ينتقل أى بروتون إلا مسافة قصيرة. هذه السلسلة المكونة من انتقال واحلال البروتون شبيهة بما يحدث فى بعض العمليات البيوكيميائية، مثل عملية التمثيل الضوئى وعملية التنفس الخلوى (التى سوف نتعرض لها لاحقا ضمن هذا الفصل) .



الشكل 1-14
انتقال البروتونات بين جزئيات الماء – يتحول كل جزئ لمدة وجيزة إلى أيون هيدرونيم

الأحماض والقواعد :

أى مادة تمنح بروتونات تعتبر مادة حمضية وأى مادة تستقبل البروتونات تعتبر مادة قاعدية وعليه فإن H_3O^+ حامض وأن OH^- قاعدة.

أمثلة للأحماض

حمض كلوريد الهيدروجين $HCl \longleftrightarrow H^+ + Cl^-$

حمض الكاربونيك $H_2CO_3 \longleftrightarrow H^+ + HCO_3^-$

الأمونيا $NH_4^+ \longleftrightarrow H^+ + NH_3$

الماء $H_2O \longleftrightarrow H^+ + OH^-$

أمثلة للقواعد

الأمونيوم $NH_3 + H^+ \longleftrightarrow NH_4^+$

هيدروكسيد الصوديوم $NaOH + H^+ \longleftrightarrow Na^+ + H_2O$

الفوسفات $HPO_4^{2-} + H^+ \longleftrightarrow H_2PO_4^-$

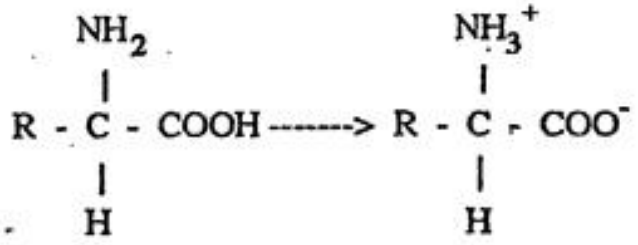
الماء $H_2O + H^+ \longleftrightarrow H_3O^+$

لمعرفة المزيد من الأحماض والقواعد يرجى مراجعة الفصل (24) من كتاب علم وظائف الاعضاء العام (1999).

أهمية pH البيولوجية :

تركيز H^+ ، OH^- مهم فى النظم البيولوجيه، لأن البروتونات تستطيع التحرك بحرية لترتبط بالمجموعات سالبة الشحنة ومن ثم تعادلها . كذلك تعادل

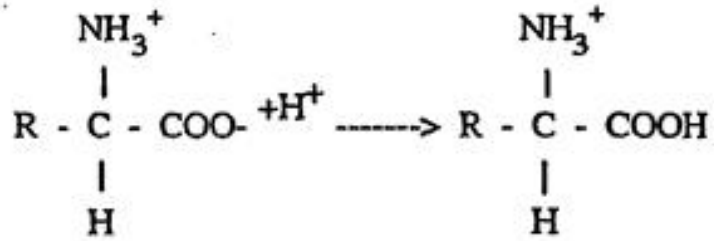
OH^- المجموعات موجبة الشحنة. هذه المقدرة على معادلة الوسط ذات أهمية خاصة بالنسبة للأحماض الأمينية والبروتينات التى تحتوى على كل من المجموعة الكاربوكسيلية (سالبة الشحنة) والمجموعة الأمينية (موجبة الشحنة) وبذلك توجد داخل المحلول بتركيب ثنائى القطبين.



أيون أمفوتيرى ذو شحنة موجبة غير مفكك

فى طرف وشحنة سالبة فى الطرف الآخر Zwitterion

عند PH معينة (نقطة التعادل الكهربى isoelectric point) يكون صافى الشحنة فى كل من الأيون الغير مفكك والأيون الأمفويترى مساويا لصفر. فى حالة انخفاض pH فإن تركيز H^+ سيزداد وعليه سيقوم بمعادلة COO^- وينتج عنه أن عدد كبير من جزئيات الحمض الأمينى سوف تحمل صافى شحنة موجبة



هذا ويحدث العكس عند ارتفاع pH.

لكل من الأيونات الامفتورية نقطة تعادل كهربى – أى قيمة– pH يكون عندها صافى الشحنة (من ناحية احصائية) مساو لصفر ليس للعديد من الاحماض الأمينية مجموعات امفوتيرية غير المجموعة ألفا COOH – وألفا NH_2

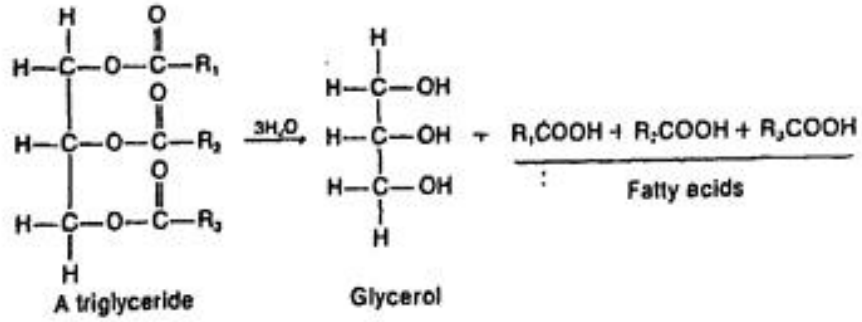
– لكن للبعض مجموعات كاربوكسيلية وأمينية إضافية والتى يمكن أن تعبير حمضية أو قاعدية. تحدد هذه المجموعات الجانبية القابلة للتفكك الخواص الكهربية للجزئ وتجعله حساسا لـ pH. تتضح أهمية هذه الحساسية فى تغييرها خواص الموضع النشط للانزيمات مما يجعل تكوين مركب «أنزيم مادة» أكثر احتمالا عند pH مثلى سنتعرض له لاحقا فى نهاية هذا الفصل.

1-2-4 الجزئيات البيولوجية :

إن مقدرة الكربون على تكوين روابط عالية الأستقرار هى التى جعلت منه عنصرا مناسبا لتكوين الجزئيات البيولوجية فهو يمثل العمود الفقارى للأربع أصناف من المواد العضوية الموجودة فى الكائنات الحية، اللبيدات، الكربوهيدرات، البروتينات والأحماض النووية.

اللبيدات :

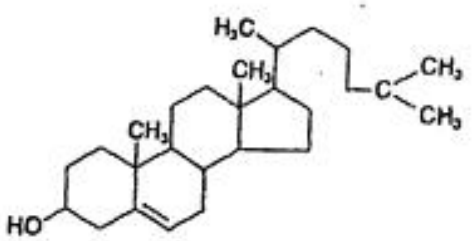
اللبيدات من أبسط أنواع الجزئيات البيولوجية ومن أمثلتها الدهون. يتكون جزئ الدهن من جزئ جليسرول يرتبط مع أحماض دهنية لذلك تسمى بالجلسريدات الثلاثية triglyceides. تتم مسماه جزئ الدهن باضافة OH^- و H^+ وعليها يتحول إلى مكوناته أى الجلسرول والأحماض الدهنية. ويحتوى كل منهما على عدد زوجى من ذرات الكربون (الشكل 15-1).



الشكل 15-1 حلمأة أحد الجلسريدات الثلاثية ترمز R إلى حمض دهنى

قد يحتوى الحمض الدهنى على روابط مزدوجة بين بعض ذرات الكربون ويكون فى هذه الحالة غير مشبعا unsaturated أو قد تتشبع السلسلة بذرات H^+ مكونة حمض دهنى مشبع saturated. تحدد كل من درجة التشبع وطول سلسلة الحمض الدهنى (أى عدد ذرات الكربون الخواص الفزيائية للدهن مثل درجة الذوبان.

للدهون ذات السلاسل القصيرة الغير مشبعة درجة ذوبان منخفضة (الجدول 3-1) حيث تكون سائلة (أى زيتاً) عند درجة حرارة الغرفة العادية. أما الدهون المشبعة ذات السلاسل الطويلة فتكون جامدة عند درجة حرارة الغرفة هذا ويعتقد أن الدهون المشبعة تتحول بسهولة إلى كوليسترول (الشكل 16-1) وهو يسبب تصلب الشرايين عند الانسان. تعمل الدهون كمخزون للطاقة ويتم تجميعها داخل النسيج الدهنى عند الفقاريات. عادة يعطينا 1g من الدهن 2 ضعف الطاقة التى تنتج عن 1g من الكربوهيدرات (الجدول 4-1).



الشكل 16-1تركيب الكوليسترول

فى الليبيدات الفسفورية يتم احلال احدى السلاسل الدهنية للجلسريدات الثلاثية بواسطة مجموعة تحتوى على الفوسفات تدخل الليبيدات الفسفورية فى تكوين الأغشية البيولوجية لأن لها طرف يذوب فى الماء hydrophilic وطرف يذوب فى الدهون lipophilic هذا يكون طبقة تسمح بالانتقال بين المرحلتين المائية والدهنية. تشمل مجموعة الليبيدات الأخرى المهمة بيولوجيا الشمع waxes، الهرمونات الاسترويدية steroid hormones والاسترول sterols . وكذلك الليبيدات الجليكولية Glycolipids و Sphingolipids

الجدول 3-1 درجة ذوبان بعض الاحماض الدهنية .

للدهون الغير مشبعة درجة ذوبان أقل من الدهون المشبعة

الحمض الدهنى	التركيب	درجة الذوبان (°C)
الدهون المشبعة		
Lauric acid	$CH_3 (CH_2)_{10} COOH$	44
Palmitic	$CH_3 (CH_2)_{14} COOH$	63
Arachidic	$CH_3 (CH_2)_{18} COOH$	75
Lignoceric	$CH_3 (CH_2)_{22} COOH$	84
الدهون الغير مشبع		
Oleic	$CH_3 (CH_2)_{14} (CH)_2 COOH$	13
Linoleic	$CH_3 (CH_2)_{11} (CH)_2 COOH$	-5
Arachidonic	$CH_3 (CH_2)_7 (CH)_2 COOH$	-50

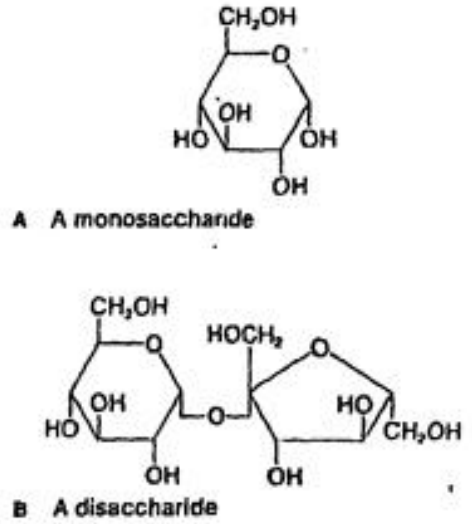
الجدول 4-1 كمية الطاقة بالكيلو سعر للجرام

التى تنتجها المواد الغذائية المختلطة

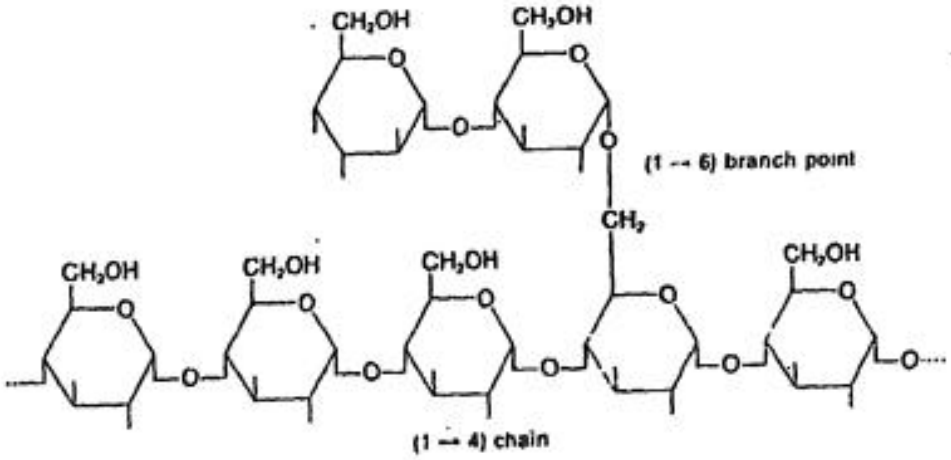
المادة	الطاقة kcal/g
الكربوهيدرات	4.0
البروتينات	4.5
الدهون	9.5

الكربوهيدرات :

لجزئ الكربوهيدرات نسبة واحد كربون إلى 2 هيدروجين إلى واحد اكسجين. كيميائيا هى polyhydroxy aldehydes or ketones وهى تشمل السكريات الأحادية monosaccharides والثنائية disaccharides (الشكل 17-1) والبوليمرات التي تعرف بالنشا Starches (الشكل 18-1).



الشكل17-1 A تركيب أحد السكريات الاحادية، الجلوكوز B تركيب أحد السكريات الثنائية، سكروز



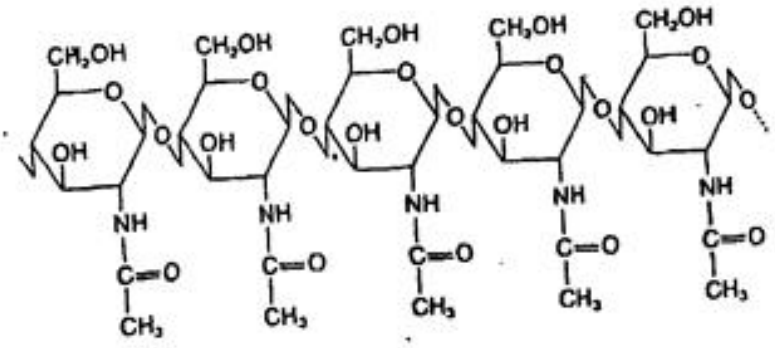
الشكل 18-1 تركيب أحد عديدات التسكر، جليكوجين يحدث التفرع بعد كل 8 إلى 10 وحدات جلوكوز

للسكريات الاحادية شكل دائرى. توجد 1 ذرة كربون خارج الحلقة وتكمل 1 اكسجين الحلقة.

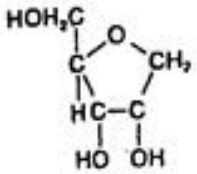
الجلوكوز سكر أحادى ثلاثى (الشكل 1-17A) يتم تصنيعه بواسطة النباتات الخضراء من الماء وCO_2 بواسطة عملية التمثيل الضوئى. كل الطاقة التى يتم اصطيادها بواسطة النباتات الخضراء ويتم نقلها كطاقة كيميائية إلى عالم الحياة (أى كل الأنسجة النباتية والحيوانية) يتم توصيلها عبر هذا السكر الأحادى السداسى، الجلوكوز. كما سنلاحظ لاحقا يتم هدم الجلوكوز جزئيا أو كليا إلى CO_2 و H_2O اثناء عملية التنفس الخلوى مع تحرير الطاقة الكيميائية التى تم تخزينها داخل الجزئ اثناء عملية التمثيل الضوئى. أيضا تحتوى الخلايا على نظم تصنيع يتم بواسطتها تحويل جزئ الجلوكوز إلى سكر أحادى آخر أو إلى سكر ثنائى مثل السكروز (الشكل 1-17B) أو إلى نشأ (الشكل 1-18).

تخزن الخلايا الكربوهيدرات في شكل نشأ. يوجد النشأ عند الحيوان فى شكل جليكوجن glycogen (الشكل 1-18). ولأنه يحتاج إلى قدر قليل من الماء لذلك يكون مثاليا كمخزون مركز من الغذاء. يوجد الجليكوجن عند الفقاريات فى شكل حبيبات صغيرة داخل خلايا الكبد والعضلات. أيضا تكون بوليمرات الكربوهيدرات مواد بنائية مثل الكيتين chitin وهو المكون الأساسى للهيكل الخارجى للحشرات والقشريات وهو بوليمر يحتوى على سكر سداسى يتصل بحمض أمينى D-glycosamine (الشكل 1-19) ومثل السيليولوز (بوليمر من أصل نباتى) فهو مرن وينوب فى الماء.

أحد السكريات الخماسية الهامة هو سكر الريبوز (الشكل 1-20)؛ أحد مكونات الأحماض النووية.



الشكل 19-1 تركيب أحد عديدات الببتيد كيتين chiyin
يتكون عن بلمرة n-acetyl glucosamine



الشكل 20-1 السكر الخامسي ريبوز ribose

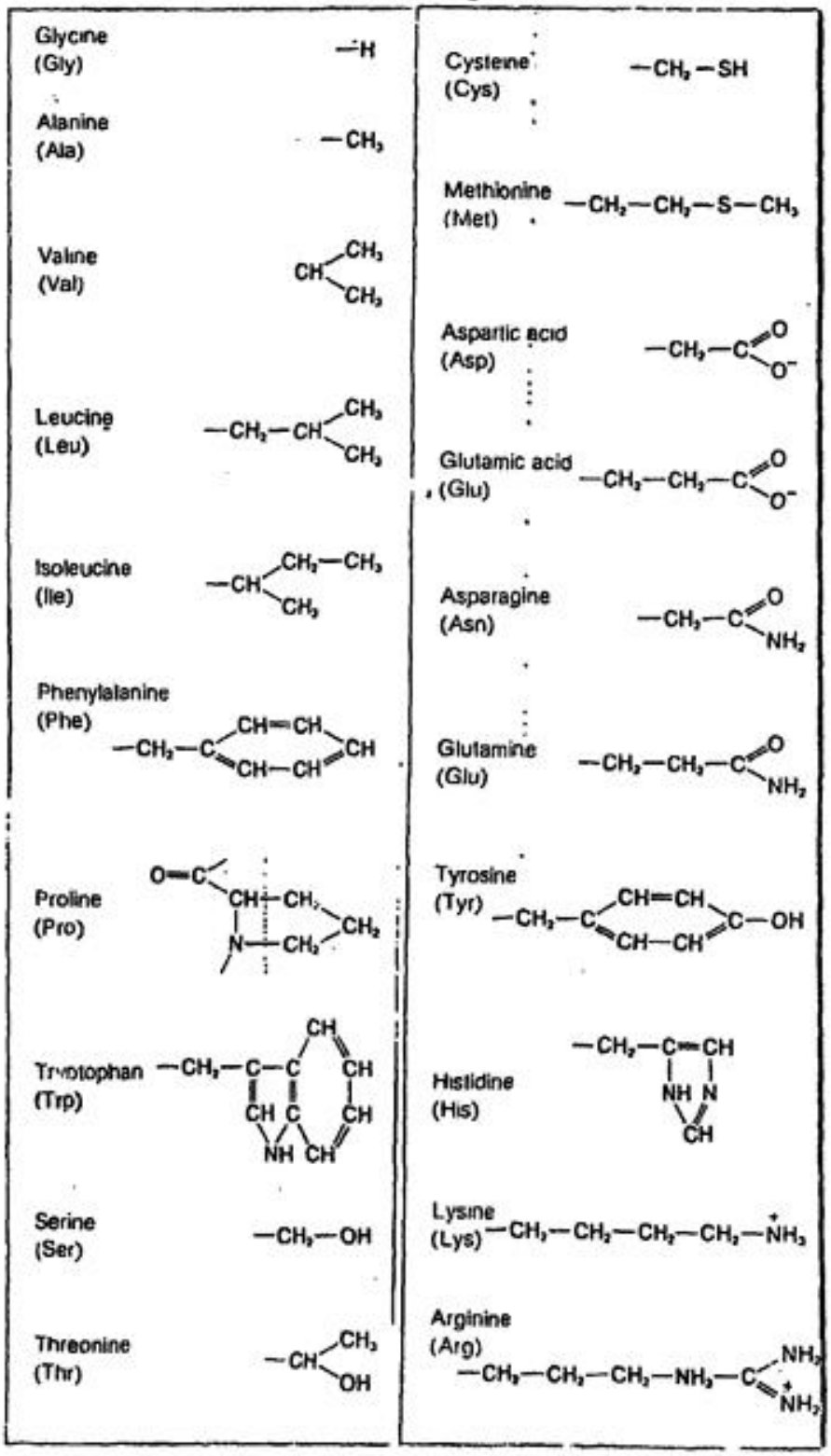
البروتينات :

أكثر الجزئيات العضوية فى الخلايا الحية تعقيداً وكثرة هى البروتينات حيث تكون 50 بالمئة من الوزن الجاف للخلية تتكون البروتينات من الأحماض الأمينية (الجدول 5-1) تنقل كل المعلومات الوراثية التى يتم تشفيرها داخل جزئ DNA فى الأول إلى جزئيات بروتينات، فتتحول الشفرة إلى تسلسل أحماض أمينية amino acid sequence وهى المحدد الرئيسى لصفات أى جزئ بروتينى.

يتم فى الجدول (6-1) تصنيف البروتينات على أساس الوظيفة البيولوجية مع القليل من الأمثلة. جميع لأحماض الأمينية التى تكون البروتينات من النوع ألفا. بما أن المجموعة الأمينية تنشأ من ذرة الكربون ألفا لذلك تختلف الأحماض الأمينية، وعددها 20، عن بعضها البعض بالنسبة لتركيب المجموعة الجانبية (الشكل 21-1).

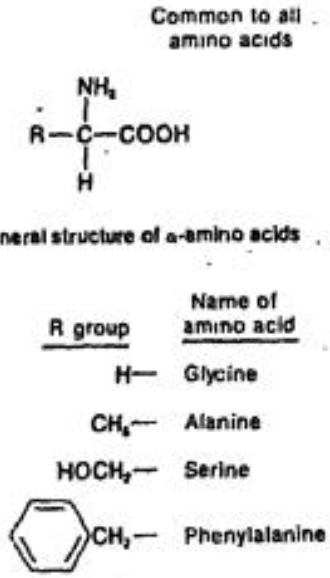
الجدول 5-1 المجموعات الجانبية للاحماض الامينية

الشائعة (عددها 20) راجع الشكل 1-21



الجدول 6-1 تصنيف البروتينات حسب الوظيفة

نوع البروتين	مثال	الموضع والوظيفة
انزيمات	Trypsin	حلمأة بعض الببتيدات
	Cytochrome c	نقل الالكترونات
التنظيم	Calmodulin	تحكم داخل الخلايا يرتبط Ca^{2+}
	Tropomyosin	تنظيم انقباض العضل
التخزين	Ovalbumin	زلال البيض
	Casein	بروتين اللبن
النقل	Hemoglobin	ينقل O_2 فى الدم
	Serum albumen	ينقل الأحماض الدهنية فى الدم
الانقباض	Myosin	الخيوط الثابتة فى الليفة العضلية
	Actin	الخيوط المتحركة فى الليفة العضلية
الوقاية أو الدفاع	Antibodies	تهاجم الاجسام الغريبة
	Fibrinogen	تجلط الدم – يمنع فقدان الدم
السموم	Bungarotoxin	سم الكوبرا – يمنع استقبال الناقلات العصبية
الهرمونات	Insulin	ينظم أيض الجلوكوز
	Growth hormone	يحفز نمو العظام
بروتينات هيكلية	Glycoproteins	يغلف الخلايا والجدر
	α Keratin	الجلد، الريش ، الاظافر
	Sclerotin	الهيكل الخارجى للحشرات
	Fibroin	الحرير – خيوط العنكبوت



الشكل 21-1 A- تركيب أحد الأحماض الأمينية ترمز R إلى مجموعة جانبية
B – 4 أمثلة للمجموعات الجانبية التى توجد فى الأحماض الأمينية (راجع الجدول 5-1)

يعرف تسلسل الأحماض الأمينية الذى يميز جزئ البروتين بالتركيب الأ لى primary . وفيه تتحد الأحماض الأمينية بواسطة روابط ببتيدية لتكون عدد ببتيد عن طريقة ازالة جزئ ماء. قد يتكون جزئ البروتين من واحد، 2 أو العديد من السلاسل الببتيدية التى قد ترتبط بروابط تساهمية أو بواسطة روابط أخرى أضعف (مكونا الشكل الرباعى للبروتين).

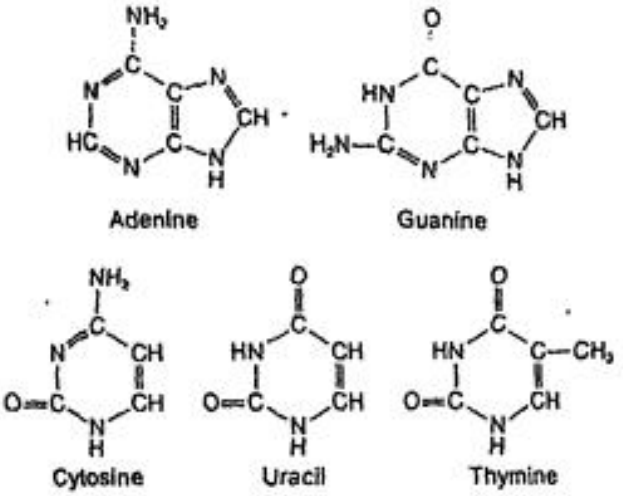
يحدد التركيب الأولى الشكل الذى يتخذه الجزئ فى الأبعاد الثلاثية (الشكل الثلاثى) وهذه تعتمد على تركيب المجموعات الجانبية.

التركيب الثانوى وهو على شكل (1) حلزونى α -helix ويوجد فى البروتينات الليفية fibrous مثل تلك التى تكون الشعر، الأظافر ، المخالب، الصوف، القرون، والريش.(2) شكل صفائح مثنية pleated sheats ويوجد فى الحرير silk الذى تنتجة دودة فراشة الحرير.

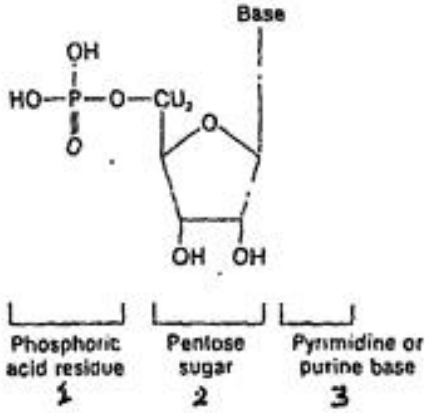
الأحماض النووية :

يحمل جزئ حمض دى أوكسى ريبونيوكليك deoxyribonucleic اختصارا DNA فى نظام القواعد المتتالية شفرة بالمعلومات التى تمر من كل خلية إلى الخلايا البنيوية ومن جيل إلى جيل. تتم ترجمة المعلومات داخل جزئ DNA عبر جزئ حمض ريبونيوكليك ribonucleic acid اختصارا RNA ومن ثم إلى تسلسل الأحماض الأمينية المكونة لجزئ البروتين .

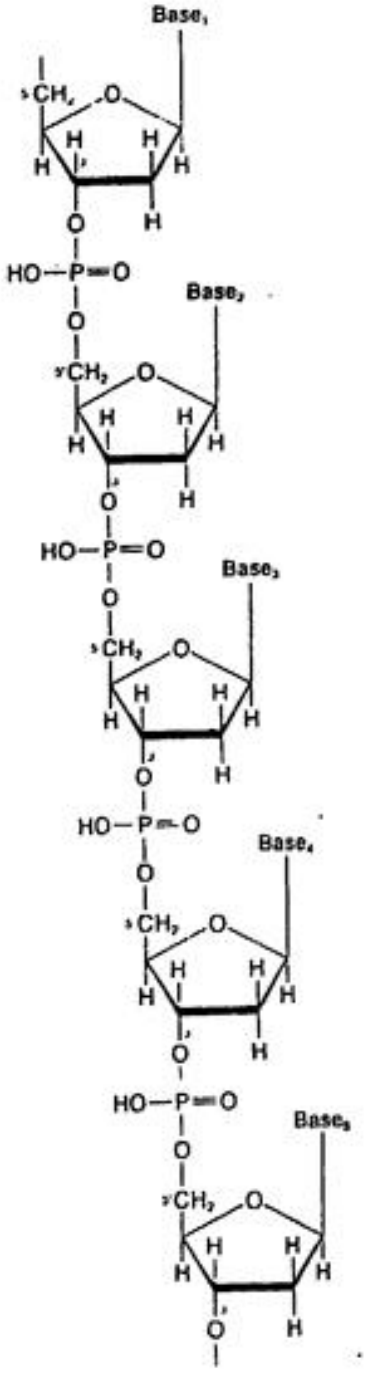
الأحماض النووية عبارة عن بوليمرات للنيوكليوتيدات Nucleotides والتى تتكون كل منها من قاعدة من البريميدين pyrimidine أو البورين purine (الشكل 22-1) ، سكر خماسى ومجموعة فوسفات (الشكل 23-1). يوجد 5 نيوكليوتيدات ، أدنين adenine ، ثيمين tymine، جوانين guanine وسيستوسين cystosine وتوجد جميعها فى جزئ DNA. ويوجد يوراسيل uracil بدلا من ثيمين فى جزئ RNA . يتكون العمود الفقرى لجزئ DNA من السكر الخماسى ومجموعة الفوسفات (الشكل 24-1) ترتبط الفوسفات بين الموضع '3 لحلقة السكر الخماسى والموضع '5 لحلقة السكر الخماسى الذى يليه. تمتد القواعد للخارج وتسلسلها هو الذى يحدد المعلومات الجينية التى يحملها الجزئ. يلتف الجزئ من شكل حلزونى مكونا من خطين تربطهما روابط هيدروجينية بين الثيمين والأدنين وبين السيستوسين والجوانين كما هو موضح فى الشكل (25-1). إن أبعاد التركيب الجزئ لا تسمح بتكوين تسلسل آخر لذلك يعمل خطى DNA عند انفصالهما كقالب لتكوين الخط المقابل له. كذلك يعمل كقالب لتكوين خط RNA الرسول (mRNA) كما هو موضح بالشكل (25-1). بعد تكونه على جزئ DNA يترك mRNA النواة ويذهب إلى الريبوسومات التى تقوم بقراءة المعلومات التى يحملها الجزئ ومن ثم تترجم إلى أحماض أمينية. تتكون الشفرة الجنينية من 4 حروف (A, G C, T) تتحد في كلمات تتكون كل منها من 3 أحرف .



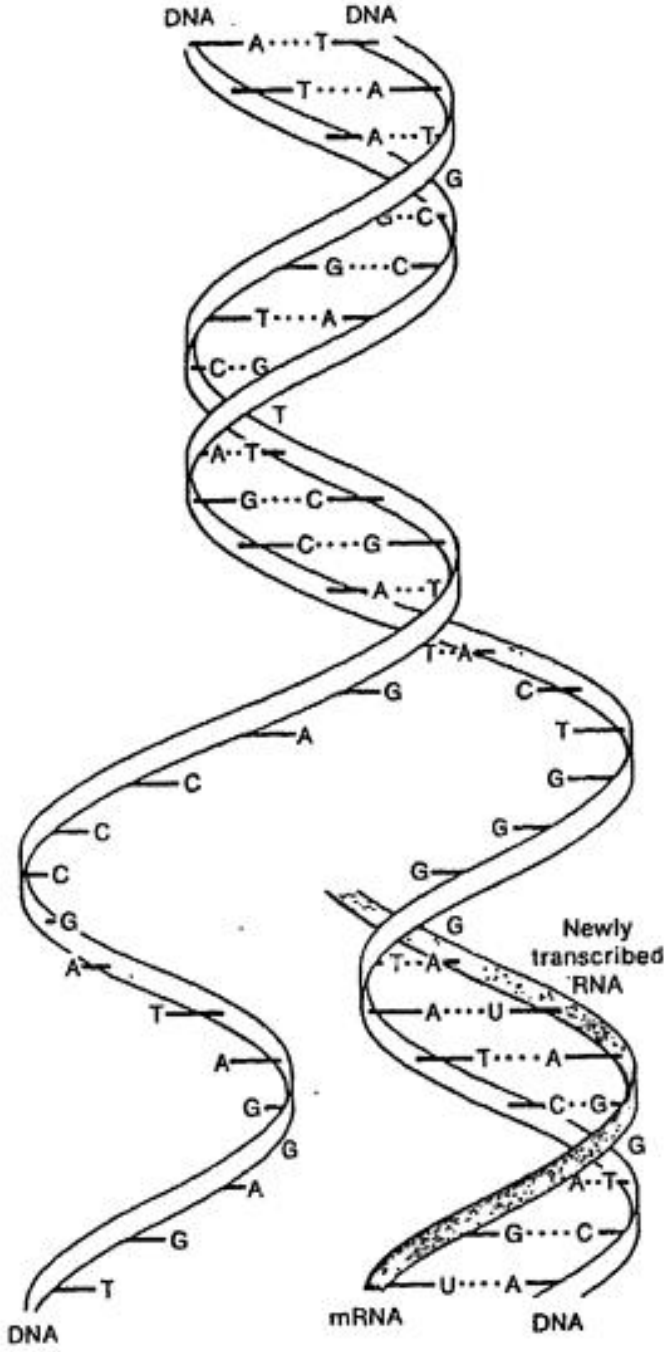
الشكل 22-1 القواعد البورين والبريميدين



الشكل 23-1 تركيب أحد الأحماض النووية
(1) مجموعة فوسفات (2) سكر خماسي (3) قاعدة بورين أو بريميدين



الشكل 24-1 تركيب شريط واحد لـ DNA



الشكل 125-1 الاستنساخ : تكون mRNA

1-3 الطاقة

يمكن النظر للحيوانات على أنها آلات: كما فى جميع الآلات أى حادثة مهما يكن عدم أهميتها يصحبها تحويل للطاقة من نوع إلى آخر. هذا حقيقى حتى حينما تكون اجزاء الآلة من الصغر مثل الجزئيات المتفاعلة.

يتم تزويد الحيوان بالطاقة عن طريق عمليتى الهضم والأيض، حيث يتم تحويل الطاقة الكيميائية الموجودة داخل جزئيات الطعام إلى صورة يستطيع الجسم الاستفادة منها. بالاضافة إلى الطاقة المستهلكة فى أنشطة مثل الحركة، انقباض العضلات ونقل المواد نقلا نشطا عن الأغشية البيولوجية، يحتاج الحيوان إلى الطاقة الكيميائية لتصنيع المواد المركبة التى تتكون منها العضيات والخلايا والأنسجة. لأن الحيوان يحتاج إلى صيانة مستديمة لذلك يجب أن يأخذ جزئيات الطعام باستمرار ليستمد منها الطاقة اللازمة لأداء وظائفة ولاصلاح ماتلف. إذا فشل الحيوان فى أخذ الطعام فإنه يهلك.

كل التحويلات الكيميائية للطاقة التى تتم داخل الكائن الحى يطلق عليها مصطلح الأيض metabolism. تتم عمليات الأيض، داخل الخلايا، عبر مسارات metabolic pathways، يحتوى المسار على آلاف التفاعلات المختلفة. هذا ولاتحدث التفاعلات عشوائيا، لكن فى تسلسل منظم، حيث يتم تنظيمها بواسطة العديد من آليات التحكم الجينية والكيميائية. بالاضافة إلى انتظام الجزئيات والذرات داخل تراكيب معينة، فإن ما يحيز النظم الحية عن الغير حية هو الأيض الخلوى Cellular metabolism.

عمليات الأيض الخلوى عند الحيوانات نوعان:

1- استخلاص الطاقة الكيميائية من جزئيات الطعام ثم استخدام هذه الطاقة لتأدية الوظائف المختلفة.

2- تحويل جزئيات الطعام الكيميائيا إلى جزئيات صغيرة لتصنيع أنواعا أخرى من الجزئيات البيولوجية.

سنتناول فيما يلى الديناميكية الحرارية والنظريات الكيميائية التى تصاحب تحويل واستخدام الطاقة داخل الخلايا. لذلك سنتناول الآليات التى يتم بواسطتها استخلاص الطاقة من جزئيات الطعام والطريقة التى تصبح بها الطاقة متاحة للعمليات الفزيولوجية المختلفة التى تتطلب طاقة والتى سنتعرض لها في فصول هذا الكتاب المختلفة.

1-3-1 الطاقة : التعريف والنظريات :

يمكن أن نعرف الطاقة على أنها المقدرة على أداء عمل. هذا ويعرف العمل على أنه ناتج القوة فى المسافة.

$$W = FD$$

W = العمل ، F = القوة ، D = المسافة.

مثلا حينما تقوم القوة برفع حمل يساوى وزنه 1kg إلى ارتفاع 1m يكون العمل الميكانى مساويا 1m.kg. بمجرد رفع الكتلة فانها تحتوى، نسبة إلى وجودها المرتفع، طاقة كامنة تساوى 1m.kg والتى يمكن أن تتحول إلى طاقة حركية kinetic energy إذا سمحنا للوزن بأن يهبط. هناك ايضا أنواع مختلفة للطاقة وتشمل الطاقة الميكانية الكامنة (مثل الزنبرك المشدود أو الوزن المرتفع)، طاقة كيميائية كامنة (مثل الجازولين، الجلوكوز)، طاقة ميكانية حركية (جسم واقع)، الطاقة الحرارية، (وهى عبارة عن طاقة حركية عند المستوى الجزئى).

الطاقة الكهربية والطاقة الاشعاعية. سنتناول فيما يلى الطاقة الكامنة فى التركيب الجزئى للمواد وهى ما يعرف بالطاقة الكيميائية.

قبل أن نسترسل يكون من المفيد أن نستعرض القانون الأول والثانى للديناميكية الحرارية thermodynamics.

ينص القانون الأول على أن الطاقة فى الكون لا يمكن أحداثها أو فقدانها.

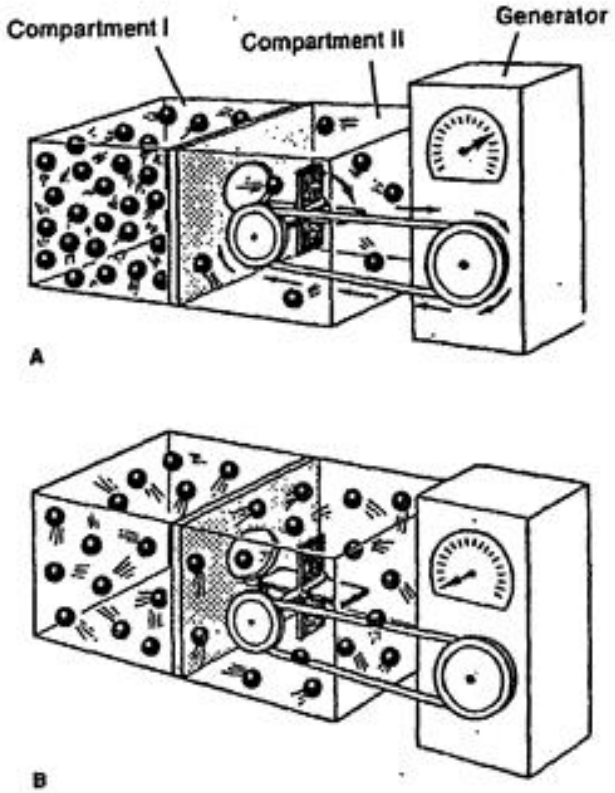
ينص القانون الثانى على أن كل الطاقة الموجودة فى الكون ستتحول فى النهاية إلى حرارة ويصبح تنظيم المادة عشوائيا أى أنه داخل النظام المغلق سوف تزداد الانتروبيا entropy تدريجيا وأن كمية الطاقة الصالحة لاداء عمل نافع سوف تقل. يشير لفظ انتروبيا entropy إلى درجة العشوائية داخل النظام.

يحتوى النظام المرتب على طاقة نتيجة ترتيبة (عدم عشوائيته) لأنه حينما يصبح غير مرتبا (أى عندما يزيد الانتروبى) فإنه يؤدى عملاً. يتضح ذلك فى الشكل (1-26A) الذى يوضح جزئيات غاز داخل نظام افتراضى مكون من حجرتين تفتحان على بعضهما. فى البداية يكون الغاز مختصرا على الحجرة 1. فى الحقيقة، هذه الحالة لا تنشأ ذاتيا بل يتم احداثها عن طريق استهلاك طاقة مثلا بواسطة مكبس. يكون الغاز، داخل الحجرة 1 فى حالة ترتيب. حينما يسمح للغاز بالتسرب من الحجرة 1 إلى الحجرة II، يزداد انتروبيا النظام (أى يصبح النظام اكثر عشوائية). يولد تحرك جزئيات الغاز من الحجرة 1 إلى الحجرة II طاقة يمكن الاستفادة منها بتحويلها إلى عمل عن طريق وضع جهاز عند الفتحة بين الحجرتين.

حينما يصبح النظام عشوائيا تماما (أى تصل الانتروبيا قيمة مقبولة) لا يمكن الحصول على عمل اضافى بالرغم من أن جزئيات الغاز تبقى فى حركة مستديمة (الشكل 1-26B).

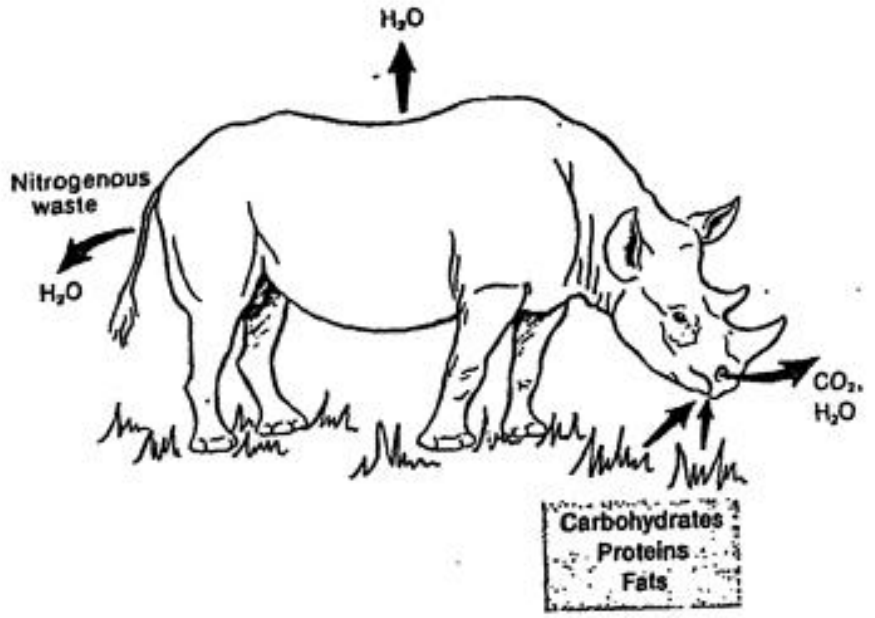
حينما ينمو الحيوان من البويضة إلي الحيوان الكامل فإن الترتيب يزداد. لذلك أعتقد أن النظم الحية لا تحقق القانون الثانى للديناميكية الحرارية. ولكن

يجب أن نتذكر أن القانون يعنى النظم المغلقة والحيوان ليس بواحد منها. فالكائنات تحقق نتروبيا منخفضى جدا على حساب الطاقة التى تستمدها من البيئة المحيطية.



الشكل 126-1 توضيح كيفية تحرير الطاقة عند الانتقال من حالة تكون فيهما الانتروبيا منخفضة
A إلى حالة تزداد فيها الانتروبيا
B تستغل الطاقة المحررة فى أداء عمل (راجع النص)

بذلك فإن حيوانا يأكل، يهضم ويهدم العشب بكميات تسمح بالحفاظ على وزن ثابت فهو يزيد من انتروبيا المواد التى يتغذى عليها (الشكل 27-1) وحيث يتم تحويل الجزئيات المرتبة جدا داخل العشب إلى H_2O, CO_2 ومواد نيتروجينية صغيرة الحجم، محررة بذلك الطاقة المخزونة. فغاز CO_2 والماء H_2O يمثلان حالة أقل ترتيبا بالنسبة لجزئيات الطعام. والتكسير الأيضى للسليولوز يمثل حالة ازياد فى الانتروبيا. فى ذات الوقت تستخدم خلايا الحيوان جزءا من الطاقة الكيميائية الموجودة داخل جزئيات الطعام، لمقابلة احتياجها من الطاقة. ونلاحظ هنا أن ذلك لا يتعارض مع انقانون الثانى الديناميكية الحرارية.



الشكل 127-1 تناول الطعام بواسطة الحيوان يزيد من انتروبيا جزئيات الطعام التى تتحول إلى جزئيات أصغر حجما وتحتوى على طاقة أقل – تستخدم بعض الطاقة المحررة بواسطة الحيوان لأداء الوظائف النشطة المختلفة

خلاصة القول إن انخفاض الانتروبيا بالنسبة للحيوان يحدث على حساب ازدياد الانتروبيا لجزئيات المواد المتناولة التى تنتجها النباتات الخضراء مستخدمة الطاقة الشمسية.

تعمل النظم الحية تحت ظروف ضغط ودرجة حرارة متوحدة نسبيا، لأنه لا يوجد سوى فروق بسيطة فى الضغط ودرجة الحرارة بين أجزاء الجسم المختلفة للكائن الحى. يشار للطاقة التى يستفاد منها فى أداء عمل بالطاقة الحرة وتنسب بالمعادلة التالية :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

H هى الحرارة التى يتم توليدها أو امتصاصها بواسطة التفاعل (أيضا تسمى انثالبسى). T درجة الحرارة القصوى S الانتروبيا (cal/mol.k).

يتضح من هذه المعادلة أن التفاعل الذى لا ينتج عنه اختلاف فى الحرارة ($\Delta H = 0$) يصاحبه انخفاض فى الطاقة الحرة (أى أن ΔG تكون سالبة) إذا كان هناك ازدياد فى الانتروبيا (أى ΔS تكون موجبة) والعكس صحيح. بما أن سير التفاعل يكون فى اتجاه ازدياد الانتروبيا (القانون الثانى) فإن التفاعلات الكيميائية سوف تحدث ذاتيا إذا تسببت فى ازدياد الانتروبيا (أى انخفاض الطاقة الحرة ، ΔG سالبة). أى أن انخفاض الطاقة الحرة هو القوة المحركة للتفاعلات الكيميائية وهو المسار الحتمى تجاه ازدياد الانتروبيا. هذا ويتطلب الهدم الحتمى للطاقة الكيميائية المفيدة إلى طاقة حرارية لا يستفاد منها، أن النظم الحية، يجب أن تحصل على طاقة جديدة من وقت لآخر لكى تحافظ على تركيبها ووظيفتها . فى الحقيقة، أحد أهم الخواص المميزة التى تميز النظم الحية من المادة الغير حية هو المقدرة على الحصول على طاقة مفيدة من البيئة.

ماعدا بعض أنواع البكتريا والطحالب التى تحصل على الطاقة من أكسدة مواد غير عضوية والكائنات الدقيقة التى تتغذى عليها، فإن جميع الحياة على وجه الأرض تعتمد على الطاقة المشعة من الشمس. مصدر هذه الطاقة الكهرومغنطيسية (وتشمل الضوء المرئى) هو تحويل الطاقة النووية إلى طاقة إشعاعية. جزء بسيط جدا من هذه الطاقة يصل الأرض وجزء بسيط جدا منه يتم امتصاصه بواسطة النباتات الخضراء اثناء عملية التمثيل الضوئى. تستخدم هذه الطاقة لتصنيع جزئ الجلوكوز من H_2O, CO_2 . تعتمد كل الحيوانات على هذه الطاقة الموجودة داخل الجزئيات العضوية التى يتم تصنيعها بواسطة النباتات الخضراء.

تأخذ الحيوانات آكلة العشب herbivorous هذه المواد مباشرة من النباتات، بينما تأخذها آكلات اللحوم carnivorous عند مستوى ثان، ثالث أو رابع بتغذيتها على حيوانات أخرى.

1-3-2 تحويل الطاقة الكيميائية بواسطة النقل المتزامن :

هنالك العديد من أنواع التفاعلات الكيميائية، لكن يمكننا توضيح خواص معدل التفاعلات والطاقة بواسطة تفاعلات بين B, A لتعطى D, C

$$A + B \longleftrightarrow C + D$$

هذا التفاعل، كما تشير الأسهم، أنعكاسى. نظريا كل التفاعلات الكيميائية انعكاسية، إذا لم يتم ازالة النواتج. ولكن تكون القابلية لأن يستمر التفاعل إلى الأمام، فى بعض التفاعلات، كبيرة جداً بحيث يمكن اعتبارها غير انعكاسية. يميل التفاعل لأن يسير إلى الأمام (أى تحتوى النواتج على طاقة حرة أقل من المواد المتفاعلة، أى أن ΔG تكون سالبة).

فى هذه الحالة تحتوى المواد المتفاعلة علي طاقة كامنة أكثر من النواتج ويقال عن التفاعل أنه مولد للحرارة exergonic أو exothermic مثال ذلك أكسدة الهيدروجين .

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2\,H_2O + \text{heat} \qquad (4)$$

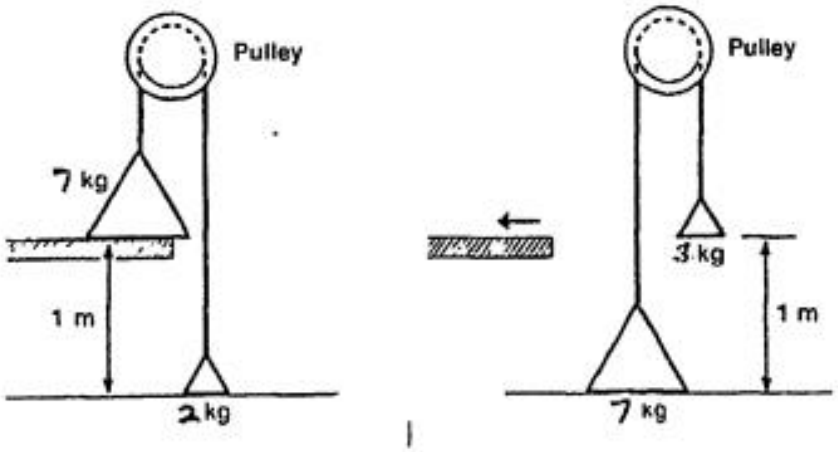
يتم عكس هذا التفاعل بواسطة الطاقة التى يتم اصطيادها بواسطة الكلوروفيل داخل النباتات الخضراء اثناء عملية التمثيل الضوئى.

$$2H_2O \xrightarrow{\text{كوانتم ضوئى}} 2\,H_2 + O_2 \qquad (5)$$

هذا التفاعل الذى يتطلب طاقة هو مثال للتفاعل الممتص للحرارة endergonic أو endothermic بعض التفاعلات البيوكيميائية مولدة للحرارة والبعض الأخر ممتص للحرارة. لايمثل النوع الأول مشاكل تذكر من ناحية الطاقة لأنها تستمر بمفردها تحت الظروف الملائمة. لكن يحتاج النوع الثانى لأن

يزود بالطاقة. تتم هذه العملية داخل الخلايا عن طريق العمليات المتزاوجة coupled reactions والتى يتم أثناءها نقل الطاقة من جزئ إلى آخر عن طريق مادة وسيطة intermediate

يوضح الشكل (1-28) مثال شبيه بالتفاعلات المتزاوجة حيث يفقد جسم يزن 7kg (على اليسار) طاقته الكامنة حينما يسقط من علو 1m . فى هذه الحالة يقوم برفع جسم يزن 2kg (على اليمين) مسافة 1m. لأن الجسمين موصولان بواسطة حبل فوق بكرات pulleys فإن سقوط 7kg متزاوج مع رفع 2kg. يتضح أن الجسم الساقط يستطيع أن يرفع جسما آخر فقط إذا كان يكبره وزنا. بالمثل فإن التفاعل المولد للحرارة يستطيع أن يسير تفاعلا ممتصا للحرارة فقط إذا حرر الأول طاقة أكثر مما يحتاجه التفاعل الثانى، نتيجة لذلك تفقد بعض الطاقة فى شكل حرارة وتكون درجة الكفاءة أقل من 100 بالمئة.



الشكل 28-1 نموذج آلى لتوضيح التفاعل المتقارن – سقوط الجسم الذى يزن 7 kg يؤدى إلى رفع الجسم الآخر الذى يزن 2 kg

1-3-3 جزئ ATP

أكثر المواد الغنية بالطاقة شيوعا هو أدنوسين ثلاثى الفوسفات adenosine triphosphate اختصاراً ATP (الشكل 29-1) نوضح دور ATP فى تسيير

التفاعلات التى تحتاج طاقة عن طريق التزاوج بهذا التفاعل بين مركبين X , Y

$$X + ATP \longleftrightarrow X.P. + ADP \qquad (6)$$

$$\Delta G^{\circ} = -3.0 \text{ k cal/ mol}$$

$$X.P + Y \longleftrightarrow XY + P \qquad (7)$$

$$\Delta G^{\circ} = -2.3 \text{ k cal/ mol}$$

مجموع الطاقة التى يتم تحريرها بواسطة هذين التفاعلين (-5.3k cal) يساوى مجموع اختلاف الطاقة الحرة للتفاعلين الأساسيين

$$ATP + HOH \longleftrightarrow ADP + Pi \qquad (8)$$

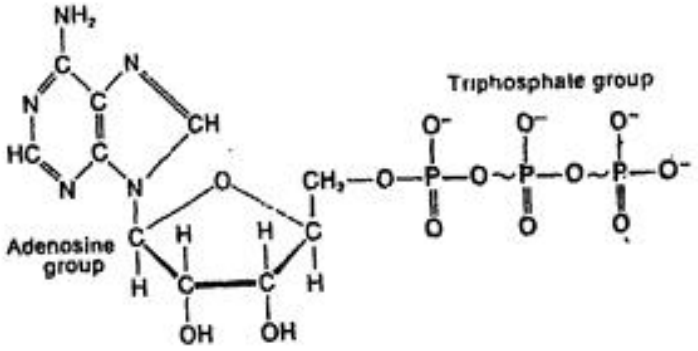
$$\Delta G^{\circ} = -7.3 \text{ k cal/ mol}$$

$$X + Y \longleftrightarrow XY \qquad (9)$$

$$\Delta G^{\circ} = - + 2.0 \text{ k cal/ mol}$$

بذلك وبالرغم من أن ΔG° لتفاعل X, Y لها قيمة موجبة (+2.0 kcal) لكن لأن ΔG° حلمأة جزئ ATP أكبر وسالبة (-7.3 kcal) إذن يكون صافى ΔG° للتفاعل المتزاوج سالبا. أى أن التفاعل يولد الطاقة وبذلك يسير للأمام.

توجد مركبات أخرى تحتوى على مجموعة فوسفات عالية الطاقة. فمثلا arginine phosphate و creatine phosphate يعملا كمخزن للطاقة للتصنيع ATP سريعا من ADP أثناء النشاط العضلى وتسميان phosphagens يوجد creatine phosphate عند الفقاريات فقط بينما يوجد arginine phosphate فى كل من الفقاريات واللافقاريات.



الشكل29-1تركيب جزئ ATP

1-3-4 معدلات التفاعل ودرجة الحرارة

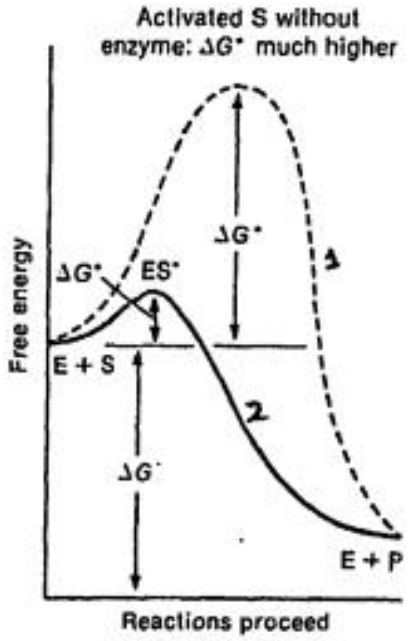
يعتمد معدل سير التفاعل على درجة الحرارة. ذلك ليس بمستغرب إذ أن درجة الحرارة تعبر عن تحرك الجزئيات. فكلما زادت درجة الحرارة ازداد معدل تحرك الجزئيات .بذلك يزداد معدل تصادم الجزئيات فى الوحدة الزمنية وبذا تزداد درجة التفاعل.

تسمى الطاقة المتطلبة لجعل 2 جزئ يتفاعلان حينما يصطدمان ببعضهما بطاقة التنشيط الحرة أو طاقة التنشيط activation energy. متطلبات التنشيط ضرورية للتفاعلات المولدة للحرارة كما للتفاعلات الماصة للحرارة. يوضح الشكل (1-30) العلاقة بين طاقة التنشيط وسير التفاعل، يجب أن تزود المواد أولا بطاقة تكفى لجعلها تتفاعل. بما أن التفاعل ينتج عنه طاقة حرة إذن فالطاقة المحتواة فى النواتج أقل من الطاقة المحتواة فى المواد المتفاعلة.

فى الصناعة، يمكن الاقلال من معدل التفاعل والطاقة (أى درجة الحرارة المتطلبة لتنشيط المواد المتفاعلة) عن طريق استخدام مواد محفزة catalysts. وهى مواد تساعد على سير التفاعل ولكن لايتم استهلاكها ولا تتغير اثناء سير التفاعل .

يتم فى الخلية الحية تحفيز التفاعلات بواسطة محفزات بيولوجية تعرف بالانزيمات enzymes. يوضح الشكل (30-1) تخفيض طاقة التنشيط بواسطة أحد الأنزيمات. ليس للأنزيم أى تأثير على الاختلاف العكسى للطاقة الحرة وبذلك درجة الأتزان equilibrium point لكنه يزيد المعدل فقط.

ساعد وجود الانزيمات فى اتمام التفاعلات، التى كان مقدرا لها أن تأخذ وقتا طويلاً، وذلك عند درجة حرارة يحتملها الكائن الحى. ميزة هامة أخرى للمواد المحفزة هو أنها تساعد على تنظيم معدل سريان التفاعل. مثال H_2 والذى ينفجر عند اكسدته فى غياب البلاتين ولكن عند اضافة البلاتين فهو ينظم معدل أكسدة H_2 بواسطة O_2. وبالمثل يتم تنظيم معظم التفاعلات البيولوجية بواسطة مقدار أو نشاط (أى الكفاءة التحفيزية) لبعض الأنزيمات.



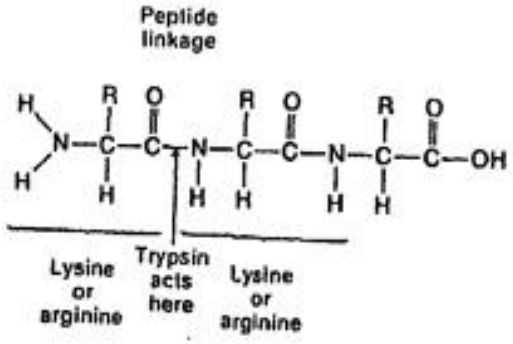
الشكل 30-1طاقة التنشيط (1) فى غياب الانزيم (2) فى وجود الانزيم

1-4 الانزيمات

الانزيمات جزئيات بروتينية. يقاس نشاط الانزيم أو مقدرته التحفيزية بواسطة إجمالى حركته turnover number وهى عدد جزئيات المادة التى تتفاعل مع جزئ واحد من الأنزيم فى الثانية، لتعطى النواتج. تحتاج معظم الانزيمات إلى وجود مساعد cofactor يكون عبارة عن ذرة حديد أو جزئ صغير يتحد مع جزئ البروتين الرئيسى مكونا مركب الانزيم النشط. وبالعكس تحتاج بعض الانزيمات إلى ازالة جزء منهما لتصبح نشطه.

1-4-1 خاصية الانزيم :

يحفز كل أنزيم ، إلى درجة ما، بعض أنواع التفاعلات دون غيرها. تعمل بعض الانزيمات على أنواع معينة من الروابط ولذلك قد تعمل على مواد مختلفة تتفق فى أنها تمتلك تلك الرابطة المعينة. مثلا التفاعل الذى يتم تحفيزه بواسطة انزيمات هدم البروتينات هو حلمأة الروابط الببتيدية . يقوم تريبسن trypsin بحلمأة أى ببتيد تكون فيه المجمعة carbonyl جزءاً من عنصر arginine أو lysine بغض النظر عن موقعها داخل السلسلة الببتيدية (الشكل 31-1).



الشكل 31-1 حلمأة الرابطة C-N بواسطة trypsin بين 2 ليسين أو 2 أرجنين أو بين ليسين وأرجنين

2-4-1 النشاط التحفيزى:

خاصية الانزيم ناتجة من أن المواد المتفاعلة تناسب "fit" مع جزء معين من سطح الانزيم يعرف بالموضع النشط active site. يعتقد أن الموضع النشط يتكون من المجموعات الجانبية لبعض الاحماض الأمينية التى تقترب من بعضها فى التركيب الثلاثى للانزيم. ترتبط هذه المجموعات الجانبية مع جزئ المادة المتفاعلة بواسطة روابط كهروستاتية، روابط هيدروجينية وروابط فاندروال wander waal's . لمعظم الأحماض الأمينية الموجودة عند الموضع النشط مجموعات جانبية قابلة للتأين، قد تساعد فى ربط المواد المتفاعلة والمساعدة وربما تساعد فى سير التفاعل نفسه.

تستند عملية التحفيز بواسطة الانزيمات على آلية التفاعلات العضوية. لقد ذكر لينينجر Lehringer (1977) 4 عوامل رئيسية يعتقد فى أنها تساهم فى التحفيز الكبير لمعدل التفاعلات بواسطة الأنزيمات.

1- قد تحمل بعض الانزيمات المواد المتفاعلة، بحيث تضعها فى الاتجاه المناسب الذى يسمح للمجموعات المتفاعلة أن تكون قريبة من بعضها مما يزيد احتمال تفاعلها.

2- قد يتفاعل الانزيم مع المواد مكوناً وسيطاً غير مستقر الذى يدخل بسهولة فى تفاعل ثان مكونا النواتج.

3- قد تعمل المجموعات الجانبية عند الموضع النشط كمانحات أو مستقبلات بروتون فتحدث بذلك التفاعلات الحمضية أو القاعدية.

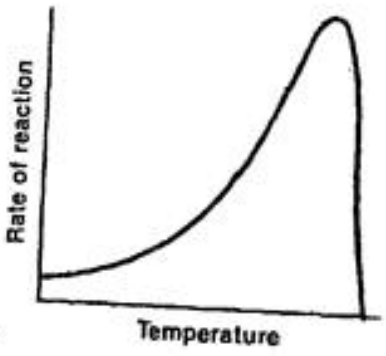
4- قد يحدث ارتباط الأنزيم مع المادة المتفاعلة «شد» داخلى فى الرابطة «المعينة» فيزيد بذلك احتمال كسرها. فى كل الحالات يزيد تكوين مركب

الانزيم – المـادة enzyme substrate complex اختصارا ES من احتمال التفاعل.

عند انتـهـاء التـفـاعل ينفصل الانزيم تاريكا النواتج. ويصبح الانزيم حرا ليرتبط مع جزئ آخر من المادة المتفاعلة. بما أن ES يستمر لزمن محدد فيمكن أن يتـحـول كل الانزيم إلى ES إذا كان تركيز المادة المتفاعلة عالى بالنسبة لتركيز الأنزيم.

1-4-3 درجة الحرارة ومعدل التفاعل

أى أرتفـاع فى درجة الحـرارة فـوق الطبـيـعى يؤدى إلى أن يفـقـد الانزيم تركيبية الثلاثى وبالتالى يفقد وظيفته. لهذا السبب تعطى التـفـاعلات المـحـفزة انزيميا عند رسم معدل التـفـاعل مـع درجة الحـرارة بيـانا كمـا هو مـوضح فى الشكل (1-32). عند ارتفاع درجة الحرارة يحدث ارتفاع فى معدل التفاعل نتيجة لازدياد الطاقة الحركية لجزئيات المواد المتفاعلة. حينما ترتفع درجة الحرارة أكثر من ذلك يزداد تعطيل الانزيم نتيجة لتغيير تركيبه الثلاثى عندما تضعف الروابط الهيدروجينية وغيرها.



الشكل 1-32 أختلاف معدل التفاعل المحفز انزيميا مع اختلاف درجة الحرارة

الجدول 7-1 الطاقة الحرة الناتجة عند حلمأة

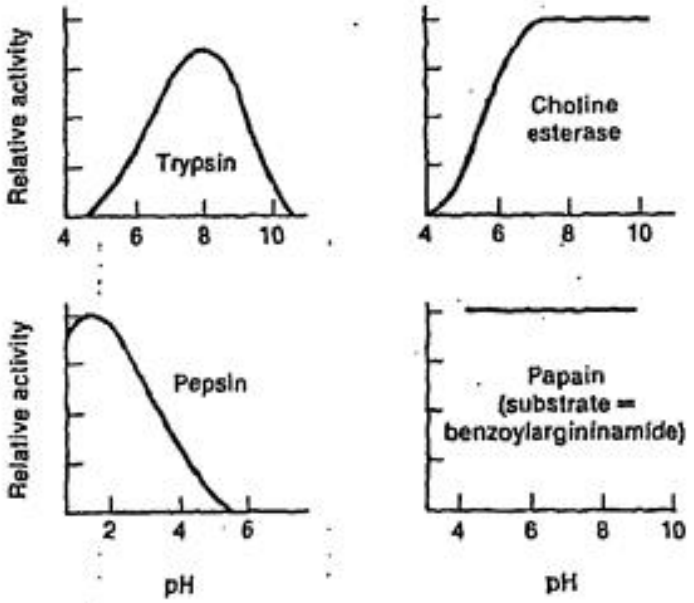
بعض المركبات التى تحتوى على الفوسفات

	ΔG°/kcal	المادة
Phosphocreatine	-10.3	فوسفو كرياتين
Acety phosphate	-10.1	أستيل فوسفات
Phosphoarginine	-7.7	فوسفو أرجنين
ATP	-7.3	ATP
Glucose-1- phopsphate	-5.0	جلوكوز -1- فوسفات
Fructorse-6-phosphate	-3.8	فركتوز - 6- فوسفات
Glucose -6-phosphate	-3.3	جلوكوز-6- فوسفات
Glycerol-6-phosphate	-2.3	جلسرول -1- فوسفات

عند درجة حرارة معينة (درجة الحرارة المثلى) optimum temperature يساوى معدل تحطيم الانزيم بواسطة الحرارة الازدياد فى التفاعل بين الانزيم والمواد ويلغى الاثران الناتجان عن ازدياد درجة الحرارة بعضهما. عند درجة الحرارة تلك يصل معدل التفاعل اقصاه. ثم عند ازدياد درجة الحرارة عن ذلك، يزداد تحطيم الانزيم وينخفض معدل التفاعل سريعاً. إن حساسية الانزيمات والبروتينات الأخرى لدرجة الحرارة تفسر ما لدرجة الحرارة المرتفعة من تأثير قاتل على الحيوانات.

1-4-4 حساسية الانزيم لدرجة الحمضية

عادة ما تساهم الروابط الكهروستاتية لتكوين ES بما أن OH^-, H^+ يمكن أن يعملا كأيونين مناوئين للمواضع الكهروستاتية فيمكن أن تغيران من معدل التفاعل. لذلك ليس بمستغرب إذا أثر pH الوسط على فعالية الأنزيم (الشكل 1-33) بحيث يكون لكل انزيم pH مثالية يعمل عندها.

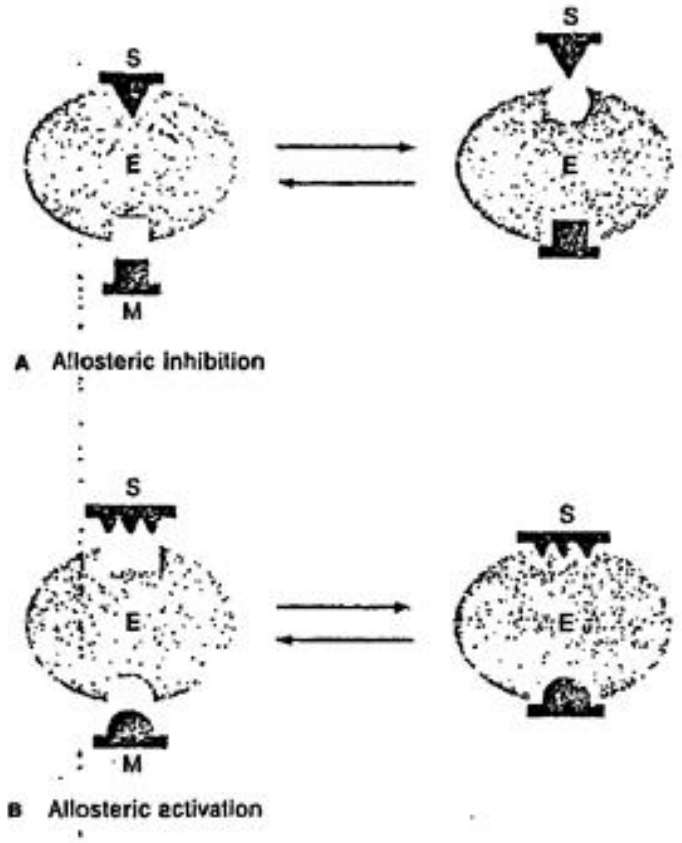


الشكل 1-33 تاثير pH على نشاط الأنزيمات

1-4-5 تعديل نشاط الأنزيم:

يخضع نشاط بعض الأنزيمات للتنظيم بواسطة بعض المواد المنظمة أو المعدلة modulators، والتى تتفاعل مع موضع على جزئ الاتزان سم يختلف عن الموضوع النشط، يعرف بالموضع الألوستيرى allosteric site وحينما ترتبط به المادة المعدلة يحدث تغيرا فى التركيب الثلاثى للأنزيم هذا يغير من شكل الموضع النشط (الشكل 1-34) وبذلك يقلل أو يزيد من قابلية الأنزيم للمواد

المتفاعلة. تعمل الانزيمات التى تخضع لمثل هذا التعديل عند مواقع هامة فى المسارات الأيضية حيث يلعب تعديل نشاطها دوراً هاما فى التحكم فى تلك المسارات.



الشكل 34-1 تأثير الوستيرى على نشاط الانزيم عن طريق تغيير هيكل الموضع النشط (A) فى حالة التثبيط (B) فى حالة التمفيز

مساعدات الانزيمات :

كما ذكرنا سابقاء تحتاج بعض الانزيمات إلى مساهمة جزئيات صغيرة تعرف بالمساعدات cofactors . أحد مجموعات المساعدات عبارة عن جزئيات عضوية تسمى coenzymes والتى تقوم بتنشيط الجزء البروتينى لقبولها لذرات الهيدروجين أو البروتونات من ES . مثلا يتطلب الانزيم جلوتاميت glutamate مساعد nicotinamide adenine dinucleotide اختصارا NAD لازالة ذرات H من جلوتاميت

$$glutamate + NAD_{ox} \longleftrightarrow \alpha.\ ketoglutarate + NAD_{red} + NH_3$$

هذا وتحتوى العديد من المساعدات على الفيتامينات كجزء منها. بما أن الجزء البروتينى من الانزيم لا يستطيع العمل بدون المساعد فليس بمستغرب أن الفقر ببعض الفيتامينات يتسبب فى العديد من التأثيرات الباثولوجية. وتحتاج انزيمات أخرى إلى بعض الأيونات المعدنية لأداء وظيفتها (موضحة بالجدول 8-1). لأيون الكالسيوم أهمية خاصة لانه يختلف عن الأيونات الأخرى الهامة فزيولوجيا، مثل $Cl^-, K^+, Na^{2+}, Mg^{2+}$ وهى موجودة بكميات غير محدودة، فى أنه يوجد داخل الخلايا بكميات منخفضة جدا ، أقل من $10^{-6}M$.

يتم تنظيم أيون Ca^{2+} داخل الخلية بواسطة غشاء الخلية وكذلك بواسطة الميتوكوندريا. بهذه الطريقة تستطيع الخلية التحكم فى نشاط الانزيمات المرتبطة بأيون Ca^{2+}. تشمل الأنشطة التى يتم تنظيمها بواسطة تركيز أيو Ca^{2+} انقباض العضلات، أفراز الناقلات العصبية والهرمونات، نشاط الاهداب، تكوين الانيبيات الدقيقة والحركة الأميبية.

1-4-6 الطاقة الحركية للانزيمات :

يعتمد معدل سير التفاعل علي تركيز المواد، النواتج، والأنزيمات. للتبسيط دعنا نتخيل أن النواتج تتم ازالتها وقتيا. فى هذه الحالة، يتحدد معدل التفاعل بتركيز المواد المتفاعلة أو الأنزيم . لنفترض كذلك أن الأنزيم موجود بكمية فائضة، بحيث أن تركيز المادة A يحدد معدل تحويلها إلى النواتج P

$$A \xrightarrow{K} P$$

يمكن التعبير عن معدل التحويل بواسطة

$$\frac{-d[A]}{dt} = K[A]$$

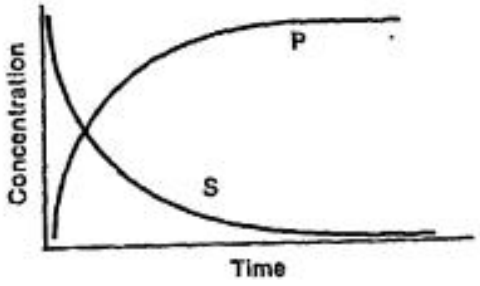
الجدول 8-1 بعض الانزيمات ومعدلات الانزيمات

التى تحتاج أو تحتوى على أيونات معدنية مساعدة

الانزيم	الايون
Alcohol dehydrogenase	Zn^{2+}
Carbonic anhydrase	Zn^{2+}
Troponin	Ca^{2+}
Phosphodiesterase	Ca^{2+}
Phosphohydrolases	Mg^{2+}
Phosphtrasferases	Mg^{2+}
Arginase	Mn^{2+}
Phosphotransfe kases	Mn^{2+}
Cytochromes	Fe^{2+} or Fe^{3+}
Peroxidases	Fe^{2+} or Fe^{3+}
Tyrosinase	Cu^{2+}
Cytochrome oxidase	Cu^{2+}
Pyruvate phosphorinase	$K^{+} + Mg^{2+}$
Plasma membrane ATP ase	$Na^{+} + K^{+} \& Mg^{2+}$

حيث A هو تركيز المادة الوقتى، K ثابت المعدل rate constant للتفاعل و d [A] / dt- هو معدل تحويل A إلى P.

فى الشكل (35-1) تم رسم اختفاء A وظهور P كدالة من الزمن. لاحظ أنه مع انخفاض [A] أسيا تزداد [P] أسيا. تظهر الدالة الأسية دائما عندما يكون معدل التغير فى كمية ما (أى d[A]/dt) تتناسب مع القيمة الوقتية لتلك الكمية (أى[A]).



الشكل 35-1 تغيير تركيز المواد المتفاعلة (S) والناتج (P) اثناء سير التفاعل S---> P

يقال عن الطاقة الحركية لمثل هذا التفاعل أنه من الدرجة الأولى first order (الشكل36B-1) يقاس ثابت المعدل للتفاعل من الدرجة الأولى بواسطة S^{-1}. يمكن أن يعكس ثابت المعدل ليعطى ثابت الزمن الذى يقاس بواسطة S- بذلك للتفاعل من الدرجة الأولى، الذى له ثابت معدل 10/S ، ثابت وقت 1/10 S .

بالنسبة لتفاعل بين مادتين B, A فى وجود الانزيم

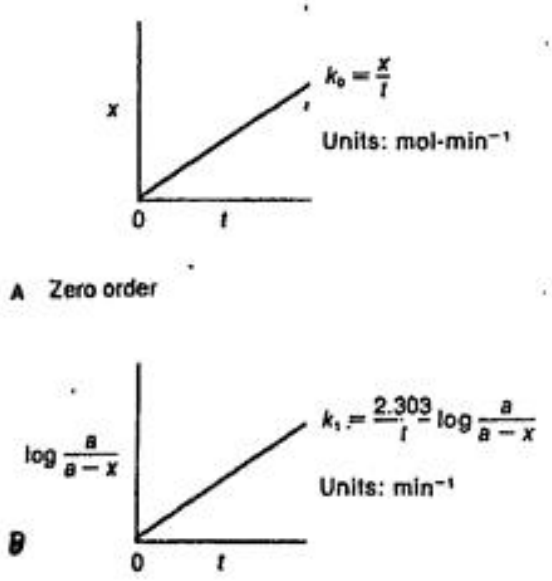
$$A + B \xrightarrow{K} P$$

يتناسب معدل اختفاء A مع الناتج [B] [A]

$$\frac{-d[A]}{dt} = K[A]$$

يستمر هذا التفاعل بطاقة حركية من الدرجة الثانية second - order

جدير بالذكر أن درجة التفاعل لا يتم تحديدها بواسطة عدد المواد المتفاعلة ولكن بواسطة المواد الموجودة فى تراكيز تحدد المعدل rate-limiting بذلك إذا كانت B موجودة بوفرة كثيرة يصبح التفاعل A + B ---> P من الدرجة الأولى إذ يتم تحديد المعدل بواسطة مادة واحدة هى A. لا يتعتمد معدل التفاعل على تركيز المواد إذا كان الانزيم موجودا فى تركيز محدود وكل جزئيات الانزيم مرتبطة بالمواد (أى أن الانزيم مشبع) يسير مثل هذا التفاعل وفق الطاقة الحركية ودرجة -الصفر zero-order (الشكل1-36A).



الشكل 1-36 A تفاعل درجة- الصفر و B تفاعل درجة - الأولى ترمز X إلى كمية المادة (S) التى تتفاعل خلال الزمن t وترمز كذلك إلى المادة عند A فى الزمن - نلاحظ أن الرسم B هو شبه لوغاريثمى لذلك يمثل الخط المستقيم علاقة أسية زمنية.

التركيز المنخفض للمادة يكون التعادل من الدرجة الأولى (أى Vo α [S]).
عند التركيز العالى للمادة يصبح التفاعل درجة - صفر لان كل الانزيم مشبع بالمادة وتركيز الانزيم وليس المادة يحدد V_0 (الشكل 1-37). فى الخلية الحية، نجد كل درجات التفاعل وكذلك خليط من تلك الدرجات.

1-4-7 قابلية الانزيم للمادة

إن أقصى معدل لأى تفاعل Vmax يحدث حينما تكون كل جزئيات الانزيم قد تشبعت بالمادة. أى حينما يكون S موجودة بكثرة ويصبح E هو الذى يحدد معدل التفاعل (الشكل 37-1).

لكل تفاعل انزيمى V_{max} خاص به يميزه عن غيره. بالرغم من أن كل الانزيمات من الممكن أن تصبح مشبعة، إلا أنها تظهر اختلافات فى التركيز S الذى يمكن أن يحدث عنده التشبع السبب فى ذلك أن الانزيمات تختلف فى قابليتها تجاه المواد enzyme-substrate affinity كلما زادت قابلية الانزيم والمادة إلى تكوين مركب ES كلما ارتفعت نسبة الانزيم الكلى – E_t المرتبط كمركب ES عند أى تركيز للمواد S. بالعكس كلما قلت قابلية الانزيم كلما انخفض تركيز S الذى يحدث التشبع. هناك علاقة حميمة بين قابلية S إلى E وبين الطاقة الحركية للتفاعل.

$$S \longrightarrow E \longrightarrow P$$

تم اقتراح نظرية فعالية وطاقة الانزيمات بواسطة ميكلس L-Michaelis ومنتن M.L.Menten عام (1913) ثم أضيف إليها بواسطة بيرجس Briggs وهالدين. Haldane معادلة Michaelis-Menten.

$$V_0 = \frac{V_{max}\ [S]}{K_M + [S]}$$

حيث V_0 معدل التفاعل المبدئى عند تركيز مادة [S]

V_{max} معدل التفاعل مع المزيد من المادة

K_m ثابت michaelis -menten

لنأخذ الحالة الخاصة حينما تساوى $V_0 = 1/2\ V_{max}$ إذا نحصل على

$$\frac{V_{max}}{2} = \frac{V_{max}\,[S]}{Km + [S]}$$

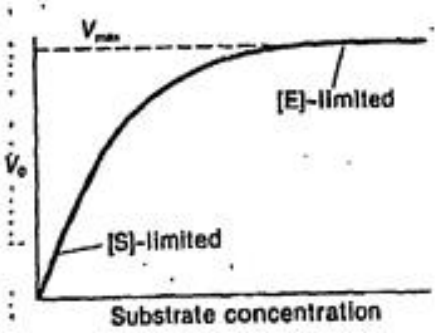
عندما نقسم على Vmax

$$\frac{1}{2} = \frac{[S]}{Km + [S]}$$

ثم نغير التنظيم لنحصل على

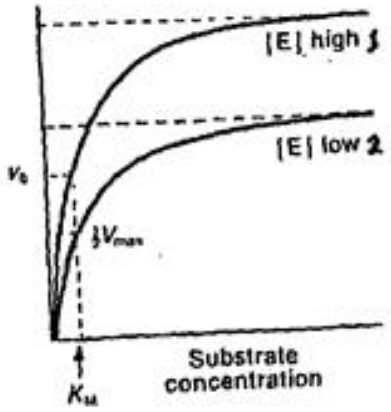
$$Km + [S] = 2\,[S]$$

$$Km = [S]$$



الشكل 37-1 ازدياد معدل التفاعل V_0 مع ازدياد تركيز المادة (S) إلى أن يصل درجة قصوى V_{max} عندما تصبح تركيز الانزيم (E) هو الذى يحكم معدل التفاعل

إذن Km تساوى تركيز المادة الذى يكون عنده معدل التفاعل مساويا لنصف المعدل عند درجة التشبع. بالنسبة لأنزيم معين والمادة التى يعمل عليها فهو يساوى تركيز المادة الذى يكون عنده معدل التفاعل الابتدائى مساويا 1/2 Vmax يمكننا أن نقول أن Km تمثل تركيز المادة التى يكون عندها نصف الانزيم متحد مع المادة أى [Et]/ [ES] = 2 هذا ولا تعتمد Km على تركيز الأنزيم بل على قابليته للمادة، يوضح الشكل (1-38) K_m لأحد الانزيمات عند تركيزين مختلفين.



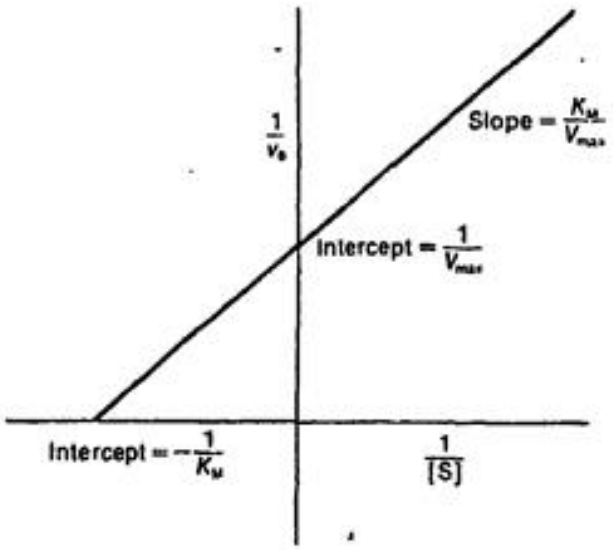
الشكل 1-38 Km أو ثابت michaelis - menten
وهو يساوى تركيز المادة عند V_0 يساوى 1/2 Vmax
(١) تركيز عالى للانزيم (٢) تركيز منخفض

كما يتضح من الشكل (1-38) فإن الرسم يكون hyperbolic ولا يمكن رسمه إلا بواسطة العديد من القراءات. لكن يمكننا رسمه بطريقة أخرى Lineweaver-Burk form من نقاط بسيطة مستعملين القيمة التبادلية

$$\frac{1}{V_0} = \frac{K_m}{V_{max}} + \frac{1}{[S]} + \frac{1}{V_{max}}$$

وينتج عنه خطا مستقيم بميل K_m / V_{max} ويقاطع المحور $1/V_0$ عند $1/V_{max}$ والمحور 1/[S] عند $1/K_m$ (الشكل 1-39).

جدير بالذكر أن معادلة M-M لا تقتصر على التفاعلات بينا الانزيمات والمواد، لكن يمكن تطبيقها على أى نظام يظهر طاقة تشبع كما موضح بالشكل (1-37).



شكل 1-39 رسم line weaver-burk plot

يقطع الرسم المحور السيني عنده $-1/k_m$ = -1/[s]

والمحور الصادى عند 1/V max (راجع النص)

1-4-8 تثبيط الأنزيمات

تقوم بعض الجزئيات بتثبيط عمل الانزيمات. يحدث التثبيط فى الخلايا الحية كوسيلة للتحكم فى التفاعلات الانزيمية. يمكن أن يبطل عمل الانزيم بواسطة مواد تكون روابط تساهمية مستقرة مع مجموعات موجودة على الموضع النشط وبذلك تحول دون تكون ES. يكون هذا النوع من التثبيط غير قابل للانعكاس irreversible. لكن يوجد نوعان من التثبيط القابل للانعكاس reversible،(1) تنافسى competitive ، يمكن عكسه بزيادة تركيز المواد المتفاعلة و (2) غير تنافسى noncompetitve لا يمكن عكسه بهذه الطريقة. يعمل النوع المنافس مباشرة على الموضع النشط وهو يشبه المواد المتفاعلة فى تركيبه الكيميائى. وهو ينافس مع المادة على الموضع النشط بذلك فإن ازدياد تركيز أحدهما يقلل فرصة ارتباط الأخر.

يمكن تمييز المثبط المنافس من الغير منافس فى رسم lineweaver Burk (الشكل 40-1) حيث يزيد المثبط المنافس من ميل الخط أى يقلل من معدل التفاعل (الشكل 40A-1) . لكن يبقى التقاطع عند المحور $1/V_o$ كما هو أى عند $1/[S] = 0$.

يحدد التقاطع مع محور $1/[S]$ قيمة K_m. يلاحظ أن هذه القيمة تزداد مع ازدياد تركيز المثبط [I] . كلما قل ثابت التفكك Ki للمركب EI كلما احتجنا إلى تركيز أكبر من S ليزيح المثبط عن الموضع النشط .

أيضا تحدث المثبطات الغير تنافسية ازدياد فى ميل الخط Lineweaver-Burk (الشكل 40A-1) لكن يصاحب هذا انخفاض فى معدل التفاعل عند تركيز المواد غير المحدود أى ازدياد القيمة التى يتقاطع فيها الرسم مع $1/V_o$. ينتج هذا عن فشل المادة فى ازاحة المثبط غير التنافسى من الموضع الألوستيرى. كما أن تقاطع الخطوط عند نفس النقطة على المحور $1/[S]$ يدل على أنه لايوجد تغيير فى قيمة Km. هذا ويساوى تأثير المثبط الغير تنافسى تخفيض الانزيم ليس بمستقرب أن Km لا تتغير إذا لا تعتمد Km على تركيز الانزيم كما ذكرنا سابقا.

1-5 آليات التنظيم الايضية :

بدون تنظيم معدلات التفاعلات فإن الأيض الخلوى يكون غير متكامل وغير موحد. وستكون الظواهر الطبيعية عند الحيوان مثل النمو والتميز والصيانة مستحيلة، بغض النظر عن الاستجابات التعويضية للآلة البيولوجية للاجهاد الذى يفرض من الخارج.

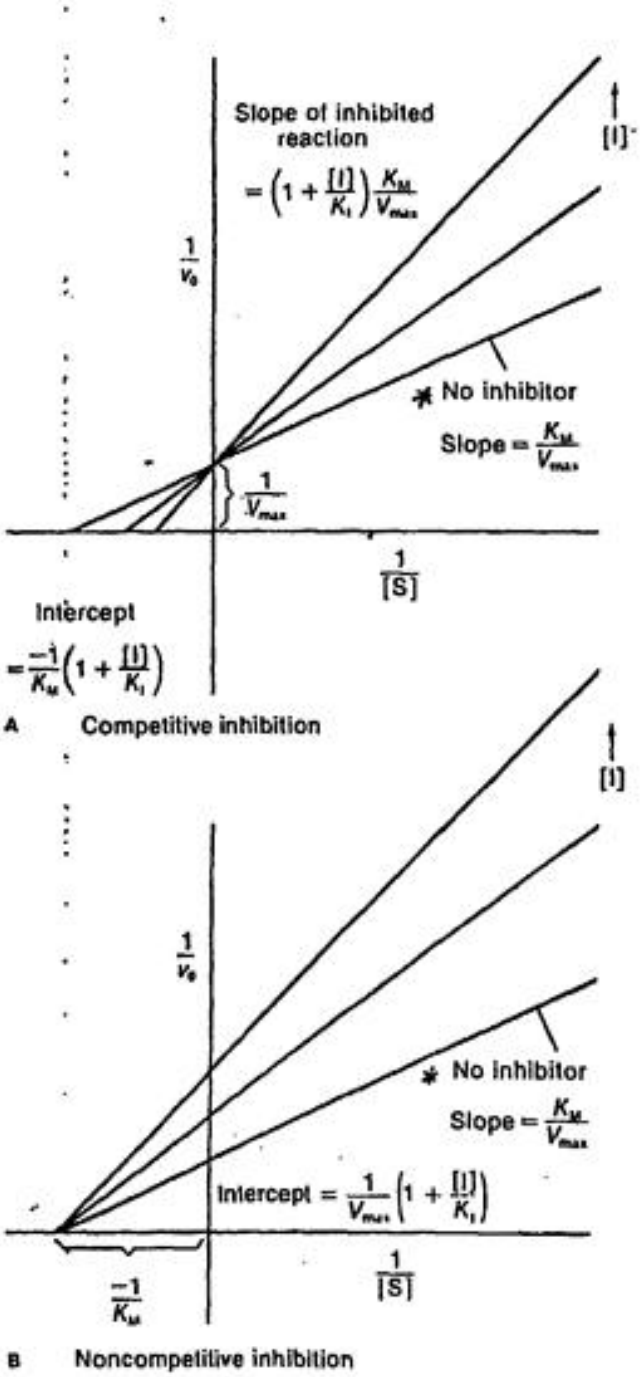
يوجد 3 أنواع رئيسية من التحكم الأيضى

1- التحكم الجينى علي تصنيع الأنزيم.

2- التغذية المرتجعة السالبة

3- التحكم فى نشاط الانزيم.

سنتناول فيما يلى كل من هذه الخطوات بشئ من التوضيح:



شكل 1-40 A line weaver-burk plot تثبيط تنافسى B تثبيط غير تنافسى

مقارنة بالتفاعل الغير مثبط * راجع النص

1 - التحكم الجينى

تمثل عدد جزئيات الانزيم الموجودة داخل الخلية دالة من معدل التصنيع ومن معدل تحطيم جزئيات الأنزيم.

يؤدى ازدياد درجة حرارة الانزيم إلى فقدان وظيفة الانزيم كذلك يتم تحطيم الانزيمات بواسطة الانزيمات التى تهدم البروتينات .proteolytic en يتم تنظيم معدل تصنيع الأنزيم بواسطة آليات جينية. هذا يسمح بتصنيع الانزيم بعد تعرض الخلايا لجزئيات المواد المتفاعلة أو أى جزئيات شبيهة.

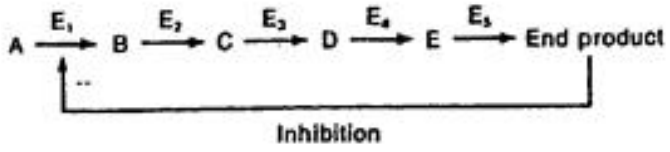
هذا يمثل نوع من الاقتصاد فى تصنيع الانزيم عند الطلب. أحيانا تتحكم النواتج النهائية في تصنيع الانزيم. إذا بدأت النواتج تتجمع (أى سبب كان لا تستخدم بواسطة الخلية يتم تعطيل المسار التصنيعى برمته عن طريق انخفاض تصنيع الانزيم المنظم.

لنظم التنظيم الجينية أهمية عظمى أثناء تطور الكائن. فكل خلية جسدية للحيوان تحتوى علي نفس المعلومات مشفرة في جزئ DNA. لكن تحتوى الانسجة المختلفة على كميات مختلفة من الانزيمات المشفرة جينيا. أتضح أن بعض الجينات فى النسيج تعمل بينما البعض الآخر لا يعمل. قد يحدث هذا الوضع نتيجة لحث الانزيمات أو قهرها - كاستجابة لاختلافات فى البيئة الكيميائية المحلية للخلايا والأنسجة المختلفة للكائن الحى فى طور التحور.

2- التغذية المرتجعة السالبة:

لبعض المسارات الأيضية آليات مضمنة بداخلها للتحكم المباشر (أى ليس جينيا) (الشكل 41-1) حيث يعمل الانزيم الأول كمنظم لأن نشاطه يخضع للتعديل بواسطة النواتج النهائية. وعادة ما يكون التحكم فى شكل تثبيط. هذا التثبيط

بواسطة الناتج النهائى يمنع تراكم النواتج لأنه يخفض من معدل المسار بكامله. يحدث التفاعل بين جزئ الناتج النهائى والأنزيم على موضع بخلاف الموضع النشط. أى عن طريق آلية ألوستيرك.



شكل 1-41 تثبيط ألوستيوى لأحد الأنزيمات بواسطة الناتج النهائى (راجع النص)

3- التحكم في نشاط الانزيم

أتاح احتياج بعض الانزيمات، إلى عوامل مساعدة مثل الأيونات، للخلايا وسيلة أخرى لتنظيم معدل سير التفاعل. يعتمد تركيز بعض الأيونات داخل الخلية على الانتشار والنقل النشط عبر غشاء الخلية. بتنظيم مستوى تركيز المساعد (أى الأيون) تستطيع الخلية التحكم في نشاط الأنزيم. وأحد من أهم العوامل المساعدة هو تركيز أيون Ca^{2+} الذى يلعب دوراً هاما فى العديد من الوظائف البيوكيميائية للخلية. دور Ca كرسول ثان ومنظم داخل الخلية ناتج من التركيز المنخفض جدا لأيون Ca^{2+} داخل السيتوبلازم (أقل من $10^{-6}M$). لذلك أى تغيير ولو كان ضئيل جداً فى اندفاع Ca^{2+} إلى داخل الخلية يمكن أن ينتج عنه فرق كبير فى نسبة Ca^{2+} داخل الخلية هذا وقد يحدث أيون Ca^{2+} تأثيره على الانزيمات عن طريق الارتباط الألوستيرى.

1-5-1 انتاج ATP أيضيا

لتوضيح ذلك نحتاج إلى تشبيه الحيوان ، مرة أخرى، بالآلة. إذا قارنا استخدام الحيوان للطاقة باستخدام سيارة للطاقة لوجدنا أن الاثنين يحتاجان للتزويد بالوقود من حين إلى آخر. لكن استخدامها للطاقة يختلف على الأقل في

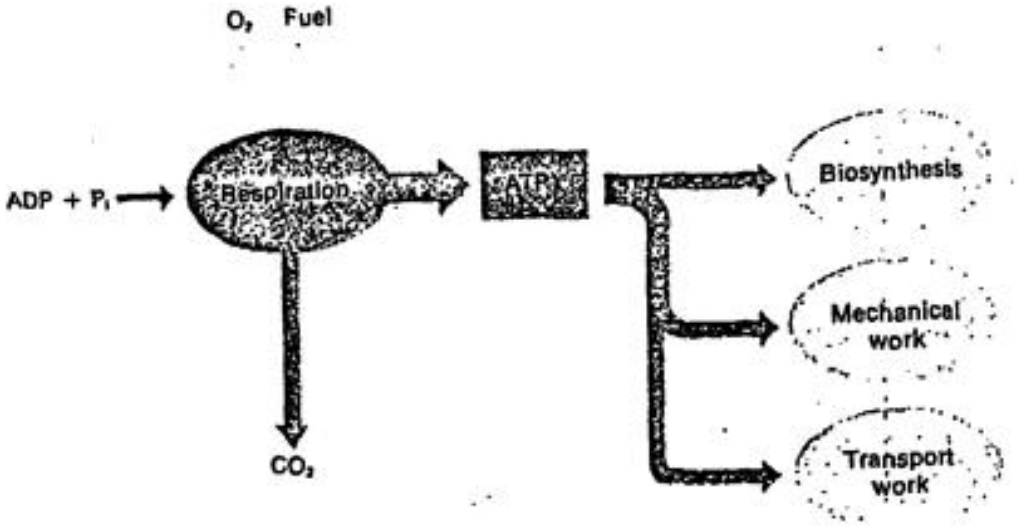
نقطة جوهرية واحدة. يتم داخل السيارة أكسدة جزئيات البنزين إلى H_2O, CO_2 في خطوة اشتعال واحدة، يزيد بعدها ضغط الغاز داخل الاسطوانة (السيلندر) نتيجة للحرارة المتولدة عن هذا التأكسد السريع. فتدفع بالمكبس (إى البستون) أعتمد هذا التحويل على درجة الحرارة العالية للبنزين المشتعل. أى تم تحويل الطاقة الكيميائية للبنزين مباشرة إلى طاقة حرارية وقد امكن استغلال الحرارة لتعطى عملا فقط نتيجة للاختلاف الكبير فى درجة الحرارة والضغط بين جزئين من الآلة.

بما أن النظم الحية لا تستطيع سوى تحمل فروقات بسيطة فى درجة الحرارة والضغط، فإن الحرارة الناتجة فى خطوة الاشتعال الوحيدة كما فى مثال السيارة أعلاه ستكون غير مجدية فى تزويد النظم الحية بالطاقة. لهذا السبب فقد طورت النظم الحية آليات أيضية لتحويل الطاقة الكيميائية على عدة مراحل عن حريق مجموعة من التفاعلات المنفصلة أو المستقلة.

يتم الاستفادة من الطاقة الموجودة داخل المواد الغذائية عن طريق تكوين مواد وسيطة تحتوى طاقة أقل. فى كل خطوة يتم فقدان بعض الطاقة فى شكل حرارة بينما ينتقل الباقى كطاقة حرة داخل النواتج. ثم يتم نقل الطاقة أخيراً إلى الوسيط عالى الطاقة ATP وغيره من الوسائط التى تستخدم بواسطة الخلايا لأداء الوظائف المختلفة. (الشكل 42-1).

يتم استخلاص الطاقة الكيميائية من 3 أصناف من جزئيات الطعام، الكربوهيدرات، الدهون والبروتينات بعد عملية الهضم تدخل هذا المواد الجسم كسكريات أحادية، أحماض دهنية وأحماض أمينية على التوالى. ثم تدخل هذه الجزئيات الأنسجة والخلايا حيث ، (1) يتم تكسيرها مباشرة إلى جزئيات أصغر لاستخلاص الطاقة أو لاعادة تنظيمها فى جزئيات أخرى، (2) يتم بناءها فى جزئيات كبيرة مثل الجليكوجين، الدهون أو البروتينات. باستثناءات بسيطة (3)

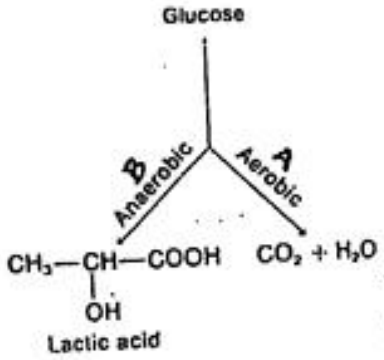
يتم أيضا هدم هذه المواد إلى H_2O, CO_2 ويوريا. تقريباً، يتم تجديد كل الأجزاء المكونة للخلية بواسطة أجزاء تصنع حديثا من المواد البسيطة.



شكل 42-1 استخدام ATP بواسطة الأنظمة البيولوجية

يمكن لبعض المخلوقات البسيطة وتشمل بعض أنواع البكتريا والخمائر وكذلك بعض الكائنات وحيدة الخلية أن تعيش تحت ظروف لاهوائية anaerobic (أى فى غياب O_2). تقع الحيوانات اللاهوائية فى مجموعتين (1) ملزم Obligatory وهى لا تستطيع النمو فى وجود O_2 مثل Botulism Bacteruim و (2) اختيارى facultutive وهي تنمو وتتكاثر في وجود أو فى غياب O_2 مثل الخمائر Yeasts. تحتاج الفقاريات ومعظم اللافقاريات إلى جزئ O_2 للتنفس الخلوى. لكن حتى هذه الحيوانات لها بعض الأنسجة التى تستطيع التنفس اللاهوائى لمدة من الزمن تبنى أثناءها ما يعرف بدين الأكسجين الذى يتم ازالته عند توفر O_2. يفهم مما سبق ذكره أن هناك مسارين أيضيين لتوفير الطاقة أيضيا فى عالم الحيوان. (1) المسار الهوائى الذى يتم فيه أكسدة جزئيات الطعام إلى CO_2 وماء بواسطة O_2 الجزئى و (2) المسار اللاهوائى حيث يتم

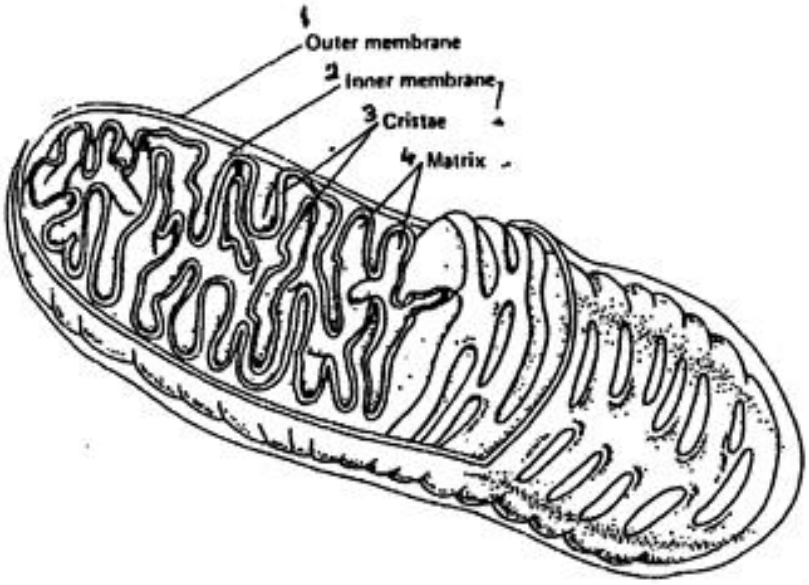
أكسدة الطعام جزئيا (أى تأكسد غير مكتمل) إلى حمض لاكتيك lactic (الشكل 1-43) يساوى مقدار الطاقة التى يتم تحريرها بواسطة المسار (2) كسرا من المسار (1) لهذا السبب تعيش الخلايا التى لها معدل أيض عالى لفترة بسيطة من الزمن فى غياب O_2 مثال لذلك الخلايا العصبية للمخ عند الثديات، التى تموت أو تتعطل وظيفتها إذا حرمت من O_2 لبضع دقائق.



شكل 1-43 A المسار الهوائى و B المسار اللاهوائى لأيض الجلوكوز

يتم الأيض الهوائى داخل الميتوكوندريا (الشكل 1-44) يحتوى الميتوكوندريون على غشاء خارجى وآخر داخلى لا يرتبطان ببعضهما ولكل منهما وظيفة مختلفة عن الآخر. يكون الغشاء الداخلى ثنيات تزيد من سطح الغشاء الداخلى مقارنة مع الغشاء الخارجى. الغشاء الداخلى هام جداً لانتاج ATP أثناء الأيض الهوائى. يحتوى الميتوكوندريون على DNA الذى يقوم باعادة نسخ الميتوكوندريا، الريبوسومات والأجسام الكثيفة.

توجد الميتوكوندريا بكميات كبيرة داخل الخلايا النشطة، تتراوح بين 800 و2500 فى خلية الكبد وهى تتجمع داخل الخلية فى المناطق التى يوجد فيها نشاط عالى يتطلب استخدام ATP.



شكل 44-1رسم ثلاثى الابعاد لميتوكوندريون (1) غشاء خارجى
(2) غشاء داخلى (3) cristae (4) matrix

1-5-2 الأكسدة الفسفرة وتحول الطاقة :

عند أكسدة جزئ الجلوكوز يتم تحرير الطاقة أى يزداد الانتروبى

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O$$

$$\Delta G^{\circ} = -686 \text{ kcal/ mol}$$

أى يتم تحرير 686 kcal عند أكسدة جزئ جلوكوز واحد، إذا تم حرق جزئ الجلوكوز فى خطوة واحدة تظهر هذه الطاقة كحرارة. لكن ما يحدث اثناء التنفس الخلوى عبارة عن أكسدة تدريجية لجزئ الجلوكوز يتم خلالها اصطياد بعض الطاقة فى جزئ ATP الذى يتم تكوينه عن طريق فسفرة جزئ ADP. ويصبح التفاعل الكلى داخل الخلية كما يلى :

$$C_6H_{12}O_6 + 38\,Pi + 38\,ADP + 6O_2 \longrightarrow$$

$$6CO_2 + 6H_2O + 38\,ATP$$

$$\Delta G^{\circ} = -420\ kcal/mol$$

تظـهر 420 Kcal كحـرارة ويتـم تضمـين 266 Kcal فى 38 جـزئ مـن ATP (7 Kacl/mol ATP)

كيف يتم نقل الطاقة من جزئ الجلوكوز إلى جزئ ATP ؟ لنجيب على ذلك دعنا نقر بأن أكسدة جزئ عبارة عن انتقال الالكترونات من ذلك الجزئ إلى جزئ آخر. فى تفاعل أكسدة – اختزال يتم أكسدة الجزئ المختزل (مستقبل الكترونات) بواسطة الجزئ المؤكسد (مانح الكترونات)

$$\text{electron donor} \longleftrightarrow e^- + \text{electron acceptor}$$

فى كل مرة تنتقل فيها الالكترونات من جزئ مختزل إلى جزئ مؤكسد يتم تحرير الطاقة.

إذا شبهنا المقدرة على منح الالكترونات بالضغط SI تضغط الماء الموجود فى مكان عالى مثلا) أذكر، إذا كان للجزئ ضغط e^- عالى يقال أن له قوة اختزال كامنة عالية وسوف يعمل كمادة مختزلة أما إذا كان له ضغط e^- منخفض فسيعمل كمادة مؤسكدة.

ويتناسب الفرق فى الطاقة الحرة مع الفرق فى ضغط الالكترونات للجزئين مختزل – مؤكسد.

تنتقل e^- ، فى اثناء التنفس الهوائى، من مستوى ضغط إلى مستوى أقل حتى تصل المستقبل الأخير وهو جزئ O_2. من المحتمل أن جزئ O_2 أصبح

مؤكسدا نهائيا نتيجة للضغط -e المنخفض جدا وكذلك وجوده بكثرة فى الجو نتيجة لعملية التمثيل الضوئى بواسطة النباتات الخضراء.

إحدى وظائف الأيض الخلوى هو النقل المتدرج للـ e^- من الجلوكوز إلى O_2 فى سلسلة من الخطوات الصغيرة بدلا عن خطوة وحيدة حيث يتم نقل -e عبر مجموعة من المستقبلات والمانحات المتدرجة فى الضغط اللـ -e بحيث يتم الاستفادة فى الطاقة في تصنيع جزئ ATP.

1-5-3 الانزيمات المساعدة التى تنقل الالكترونات:

يتم ازالة الـ e^- والبروتونات H^+ من المواد المتفاعلة اثناء عمليات معينة على المسار الأيضى بواسطة انزيمات تسمى dehydrogenases . تعمل هذه مع الانزيمات المساعدة أو الكوانزيمات coenzymes مثل الفلافين flavin.

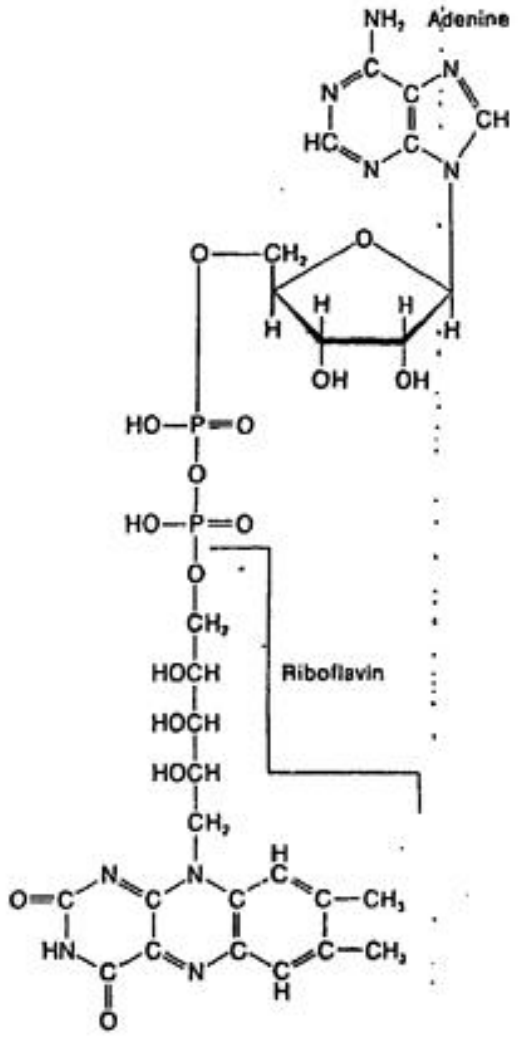
أكثر الأنواع شيوعاً nicotinamide adenine dinucleo tide اختصارا NAD^+ و flavin adeni.ne di.nucleotide اختصارا FAD (الشكل 1-45) تعمل هذه المواد كمستقبلات -e عندما تكون مأكسدة وكمانحة -e عندما تكون مختزلة.

reduced substrate + NAD^+ <——>

$NADH + H^+$ + Oxidized subs.

طاقة جزئ NADH أو FADH2 عالية جدا مقارنة مع O_2. نتيجة لذلك ينتج عن انتقال $2e^-$ من NADH إلى O_2 طاقة حرة 52 Kcal/mol - . تمثل هذه الطاقة جزءا كبيرا من الطاقة المحتواة فى جزئ الجلوكوز 686 Kcal mol لأن أكسدة جزئ الجلوكوز – ينتج عنها 10 جزئ NADH ، 2 جزئ $FADH_2$ وهى تحتوى على ما مجموعة (12 x 52 = 624 Kcal) ، بذلك فإن 91 بالمئة من الطاقة الحرة

داخل جزئ الجلوكوز يتم تحويلها إلى الكوانزيمات التى تنقل e^-. لكى يتم تحريرها ، كما ذكرنا في الخطوات التالية حيث يستفاد من 266 Kcal فى تصنيع ATP.

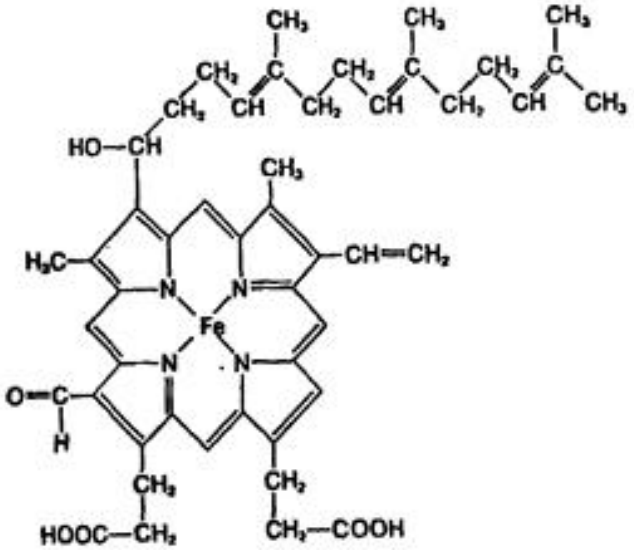


شكل 45-1 ترتيب FAD

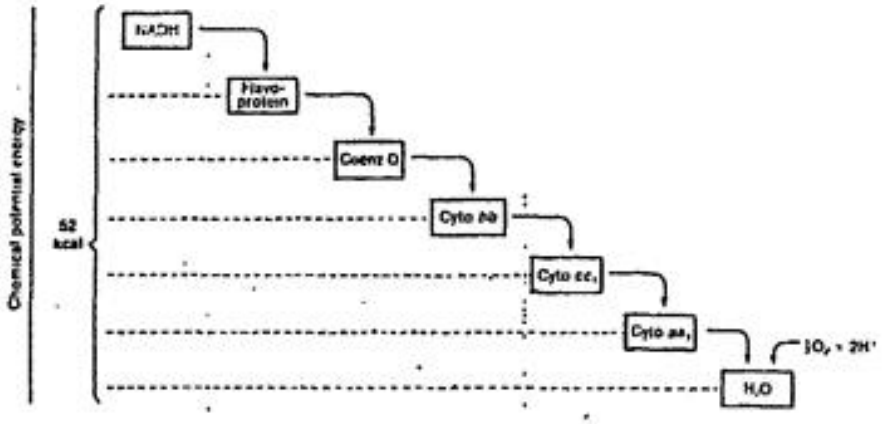
1-5-4 سلسلة نقل الالكترونات :

بالرغم من الفرق الكبير فى ضغط e بين NADH و O_2 إلا أنه لا يوجد آلية انزيمية يمكن عن طريقها أكسدة NADH, $FADH_2$ مباشرة بواسطة O_2- بدلاً عن ذلك نشـأت سلسلة من التـفـاعـلات لنقل هى سلسلة نقل الالكتـرونات electrontransport chain أو السلسلة التنفسية respiratory chain. تتحرك خلالها e^- حـوالى 7 خطوات منفصلة من الطاقة الاختزالية العالية الكامنة فى جزئ NADH و $FADH_2$ إلى المستقبل النهائى O_2 ويمثل هذا المسار الهوائى المشترك لكل e^- خلال الأيض الهوائى ووظيفته، كما سنرى، هى توظيف نقل e^- بكفاءة لتصنيع ATP من ADP.

تتكون سلسلة نقل e- من عدد من الأنزيمات تعرف بالسيتوكرومات cytochomes تحتوى كل منها على مجموعة heme التى تتكون من حلقة porphyrin مع ذرة حديد عند الوسط (الشكل 46-1) وهى شبيهة بمجموعة الهيم داخل جزئ الهيموغلوبين عند الثديات. يوضح الشكل (47-1). وظيفة السلسلة التنفسية حيث يتم نقل e^- من NADH إلى ضغط أقل عبر 7 خطوات أو تفاعلات متزاوجة إلى أن يتم تسليمها إلى O_2 بواسطة aa3.



شكل 46-1 هيكل هيمA الذى يعمل كمستقبل وما فى الكترونات السيتوكروم aa3



شكل 1-47 انتقال الالكترونات من مستوى ضغط إلى آخر خلال السلسلة التنفسية

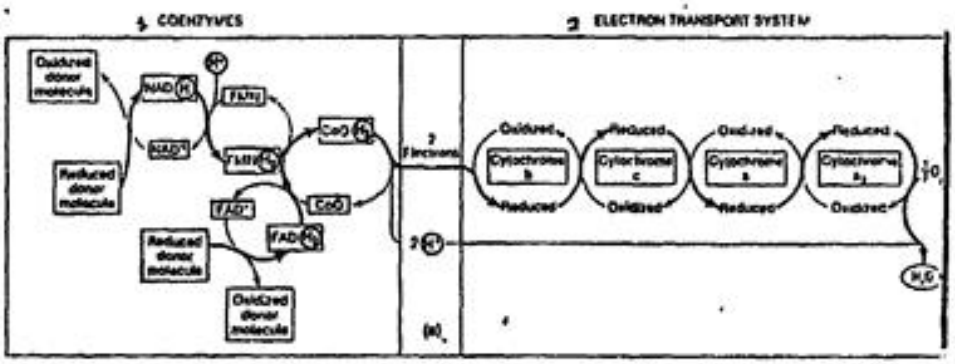
هنالك فائدة كبيرة فى توفير الطاقة عند أكسدة NADH فى عدة خطوات صغيرة منفصلة بدلا عن أكسدتها بواسطة جزئ O_2 فى خطوة واحدة، تصبح هذه الفائدة واضحة جدا إذا عرفنا أن تبادل الطاقة فى النظم الحية صغير جدا مقارنة مع الطاقة الحرة الناتجة عن أكسدة جزئ NADH بواسطة O_2. يحتاج تصنيع جزئ ATP واحد 7.3 Kcal بينما إذا تم أكسدة NADH فى خطوة واحدة فسينتج عنها 52 Kcal وتسمح بتصنيع جزئ واحدة من ATP، هذا سيوفر فقط 14% من الطاقة (7.3/52) بينما يفقد الباقى كحرارة. بتجزئته إلى خطوات يتم تحرير الطاقة فى كميات صغيرة بحيث تسمح بالتصنيع الأمثل لجزئ ATP فهناك 3 خطوات يمكن اثناءها تصنيع جزئ واحد من ATP (الشكل 1-48). يسمى تصنيع ATP اثناء سلسلة نقل e Oxidative phosphorylation وتحدث عند نقل -e من

(1) flavoprotein إلى Coenzyme

(2) Cytocrome b إلى Cytocrome C

(3) Cytocrome aa_3 إلى جزئ O_2

$$2e^- + 2H+ + 1/2\,O_2 \longrightarrow H_2O$$



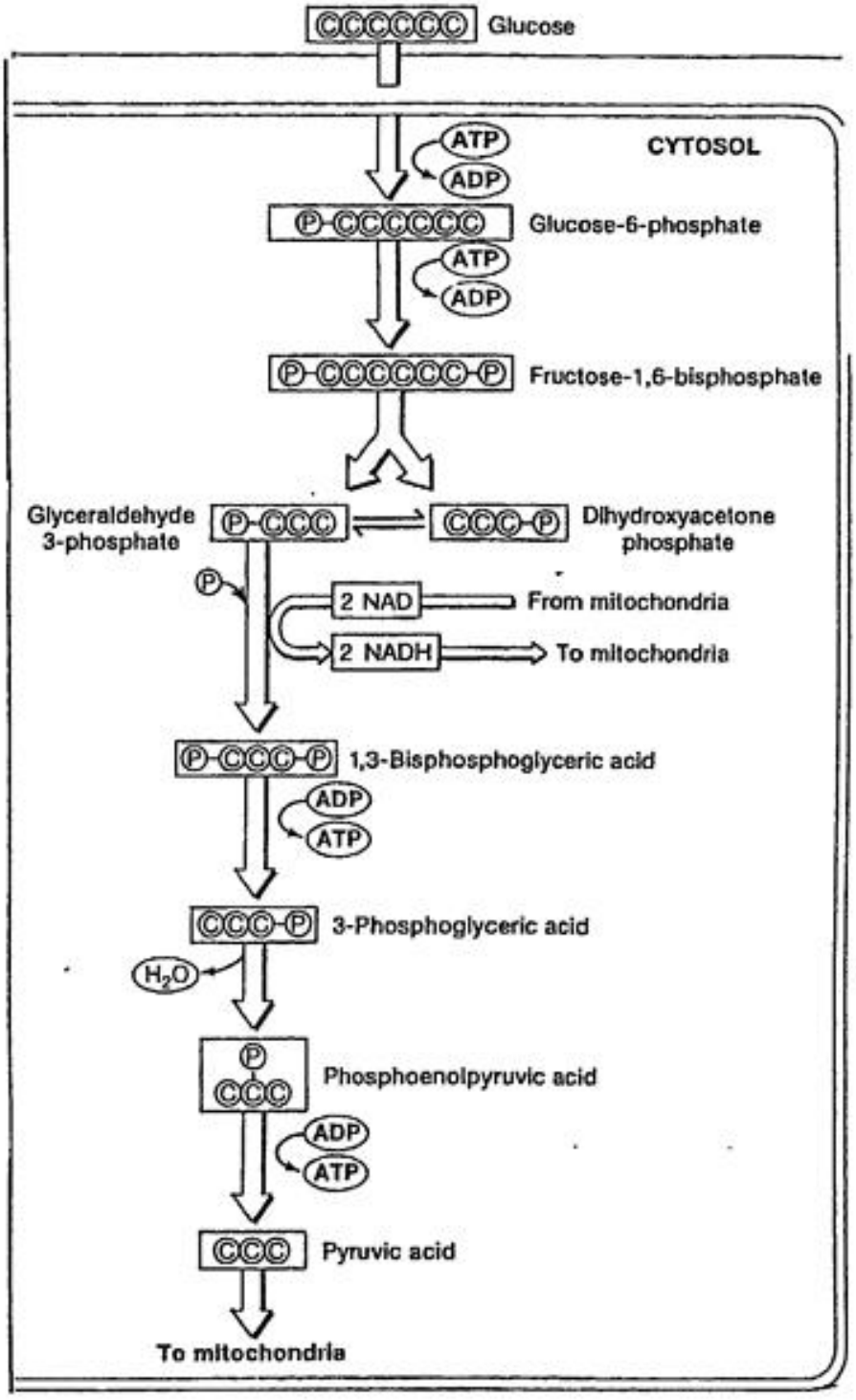
شكل 48-1 سلسلة نقل الالكترونات - تكون e^- والـ H^+ فى النهاية H_2O

1-5-5 هدم الجلوكوز:

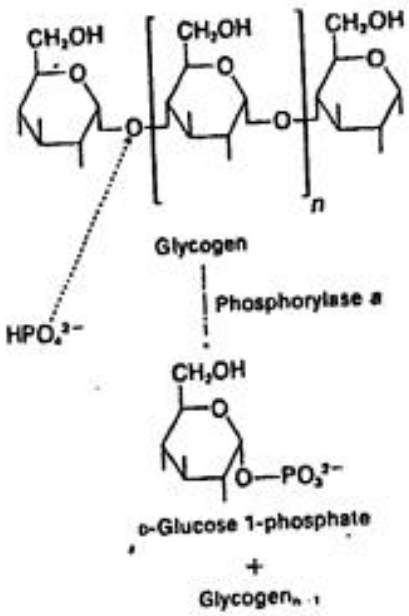
مصطلح جليكوليزس glycolysis ويعنى هدم الجلوكوز يشير إلى مسار هدم الجلوكوز ليعطى حمض pyruvic (الشكل 49-1). هذا المسار أساسى لكل من الأيض الهوائى واللاهوائى. وفيه يتم أولا فسفرة الجلوكوز بواسطة ATP إما أثناء فسفرة الجليكوجن (الشكل 50-1) أو كما فى التفاعل

$$\text{glucose} + \text{ATP} \longrightarrow \text{glucose 6- phosphate} + \text{ADP}$$

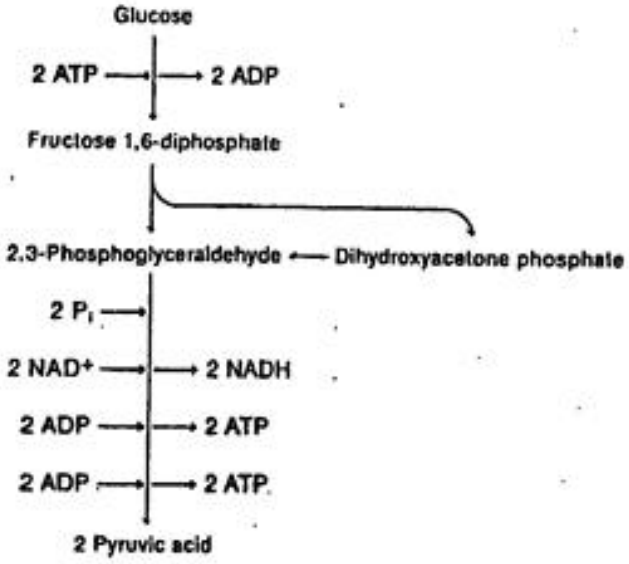
يستهلك 2 جزئ من ATP لفسفرة جزئ جلوكوز. ليعطى كل جزئ من السكر الثلاثى 2 جزى ATP. بما أن كل جزئ من الجلوكوز يعطى 2 جزئ من السكر الثلاثى إذن يكون صافى ATP، من عملية هدم الجلوكوز فى غياب O_2، هو 2 جزئ لكل جزئ جلوكور (الشكل 51-1).



شكل 49-1 عملية هدم الجلوكوز ويحتوى 6 ذرة كربون إلى حمض بيروفيك
ويحتوى 3 ذرة C (راجع النص)

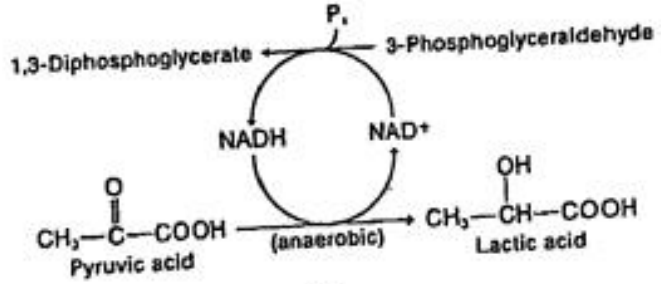


شكل 50-1 فسفرة الجليكوجن



شكل 51-1 استخدام وانتاج ATP اثناء عملية هدم الجلوكوز
حيث يكون صافي الانتاج 2 جزئ ATP (Vander 75)

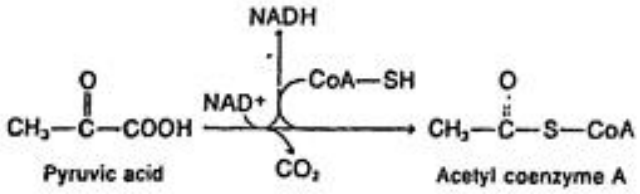
يتم اثناء الأيض اللاهوائى اختزال حمض بيزرفيك pyruvic إلى لاكتيت lactate أو ايثانول (كما فى بعض الكائنات الدقيقة مثل الخميرة) بذا تتم أكسدة NADH إلى +NAD فى هذه الحالة يتم استقبال e بواسطة pyruvate بدلاً من O_2 هذا ويوضح (الشكل 52-1) الدائرة اللاهوائية NADH <——> +NAD.
اثناء الأيض الهوائى يتم أكسدة هذا الجزئ NADH بواسطة O_2 معطيا 3 جزئ ATP ، كما وضحنا سابقا، عبر سلسلة نقل e^-.



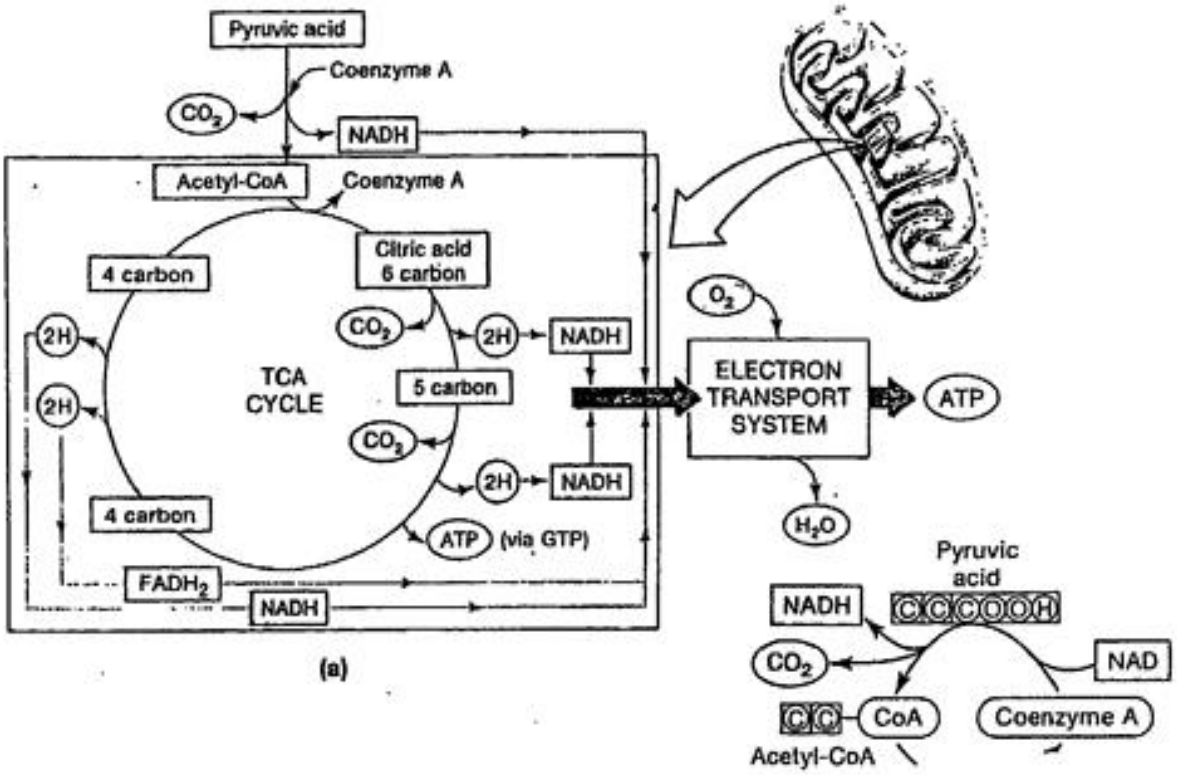
شكل 52-1 دورة NADH <——> NAD^+ عند الهدم اللاهوائى للجلوكوز

1-5-6 دورة كربس

عند الأيض الهوائى يتم نزع ذرة كربون من حمض pyruvic لتكوين جزئ تاركا عنصر CO_2 الذى يحتوى ذرتى C. يستقبل NAD^+ ذرة H من حمض pyruvic وواحدة من coenzyme A اختصاراً COA ، هذا يسمح بتكثيف ذرتى C من acetate مع COA مكونا acetyl COA (الشكل 53-1) يدخل هذا المركب فى سلسلة من التفاعلات فيما يعرف بدوره كربس علي مكتشفها العالم كربس Hans Krebs (1940) تعرف أيضا بدوره tricarboxlic acid cycle أختصاراً TCA (الشكل 54-1). وفيهما يتم هدم كل هعنصر acetate إلى 2 جزئ CO_2 وجزئ H_2O يتم تحفيز هذه التفاعلات بواسطة انزيمات موجودة داخل الميتوكوندريون يكون التفاعل .



شكل 53-1تكوين acetyl CoA من حمض البيروفيك



شكل 54-1 رسم بسيط يوضح دورة كريس أو TCA

$$2\,CH_3\text{-}\,\overset{O}{\overset{\|}{C}}\text{-}\,COOH + 5\,O_2 \longrightarrow 6\,CO_2 + 4\,H_2O$$

فى كل مرة تكتمل فيها دورة TCA يتم ازالة ذرتى C و 4 ذرات O_2 فى شكل 2 جزئ CO_2 (الشكل 55-1) وفى كل دورة تتم ازالة 8 ذرة H_2 (2 فى كل خطوة). يتم أكسدة الهيدروجين (e^- أو H^+ مصاحب له) إلى H_2O بواسطة

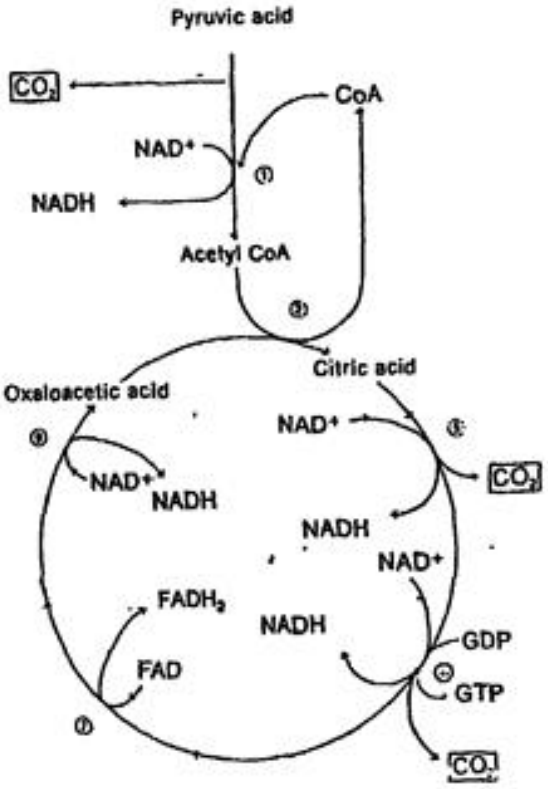
جـزئ O_2 عـبر سلسلة نقل e^- . يتـرك CO_2 الميتوكوندريون وبالتالى الخلية بواسطة الانتشار البسيط ومن ثم يخرج عبر الجهاز التنفسى والجهاز الدورى.

1-5-7 دين الأكسجين :

حينما يتلقى النسيج الحيوانى، مثل النسيج العضلى، O_2 أقل مما يسمح بانتاج ATP بكميات كافية، يتم اختزال بعض حمض pyrnvic إلى حمض lacic بدلا من دخوله دورة TCA. لكل 2جزئ من pyruvic يتم اختزالها يتم اكسدة 2 جزئ NADH (الشكل 1-55) يكلف ذلك 6 جـزئ ATP كان من الممكن تصنيعها . إذا استمر نقص O_2 ، يزداد تركيز حمض lactic فى السائل البينى ومن ثم يدخل الدورة الدموية . عند انتهاء النشاط العضلى تتم اكسدة حمض lactic إلى pyruvate بواسطة NAD^+ والانزيم lactate dehydrogenase

$$\underset{\text{Lactic}}{CH_3 - \overset{OH}{\overset{|}{CH}} - COOH} + \underset{NAD^+}{} \xrightarrow{\text{Lact-dehy.}} \underset{\text{pyruvic}}{CH_3 - \overset{O}{\overset{\|}{C}} - COOH} + \underset{NADH}{}$$

ومن ثم يتم تصنيع ATP عبر سلسلة نقل -e عن طريق أكسدة NADH بواسطة جزئ O_2. يدخل بعض pyruvic الذى يم اعـادته إلى دورة TCA ويستخدم البعض الأخر لتصنيع alanine والجلوكوز. بذلك فإن حالة نقص O_2 تقابل بالايض اللاهوائى مع انخفاض فى كفاءة تصنيع ATP. لكن تحفظ الطاقة الكيميائية الغير مستغلة داخل الانسجة كحمض lactic ثم يعاد استخدامها للايض الهوائى عند توفر O_2. مع توقف المجهود العضلى يستمر الجهاز الدورى والتنفسى فى امداد كميات كبيرة نشأ كنتيجة لتراكم حمض اللاكتيك.



شكل 1-55 انتاج CO_2، NADH، $FADH_2$ و GTP بواسطة TCA
(راجع الشكل1-54)

الفصل الثانى
وظيفة الجهاز العصبى

الفصل الثانى

وظيفة الجهاز العصبى

إن الجهاز العصبى هو وبلاشك أكثر الأشكال البيولوجية دقة فى التنظيم. يحتوى الجهاز العصبى لكائن متطور كالإنسان على 10^{10} إلى 10^{11} خلية عصبية neuron ومثلها أو أكثر من الخلايا الداعمة sustentacular C. أو gelial C. . تقوم الخلايا العصبية بترتيب نفسها أثناء النمو فى تنظيمات متداخلة ، تثير الاعجاب، وهى الدوائر العصبية neural circuits التى تكون الجهاز العصبى. يعتقد معظم العلماء بأن الوظائف «المدهشة» للجهاز العصبى وتشمل النشاط العصب – عضلى neuro muscular، الاحساس، التعلم، الادراك وغيرها تعتمد على الخواص الفزيائية والكيميائية للجهاز العصبى، وقد شكل تحديد الطريقة التى تتم بها هذه الوظائف، ولا يزال ، أكبر تحد للعلماء.

بالرغم من التعقيد الكبير للجهاز العصبى لكننا قد تعلمنا، خاصة فى السنوات الأخيرة، الكثير عن الآليات الاساسية التى يعمل بها. تعتمد وظيفة الجهاز العصبى، إلى درجة كبيرة، على النشاط الكهروكيميائى للخلايا العصبية والتى توجد، كما ذكرنا فى اعداد كبيرة. لكن، حمدا لله، لايصاحب هذا العدد الكبير كثرة فى أنواع الخلايا أو الاشارات التى تنتج عن هذه الخلايا. بمعنى آخر فإن التعقيد فى الجهاز العصبى والأداء «المذهل» لهذا الجهاز لا يعتمدان على تنوع فى الإشارات العصبية nerve impulses انما يرد ذلك إلي طبيعة نقاط الوصل أى التشابكات synapses التى تتفاعل عن طريقها الخلايا العصبية مع بعضها البعض.

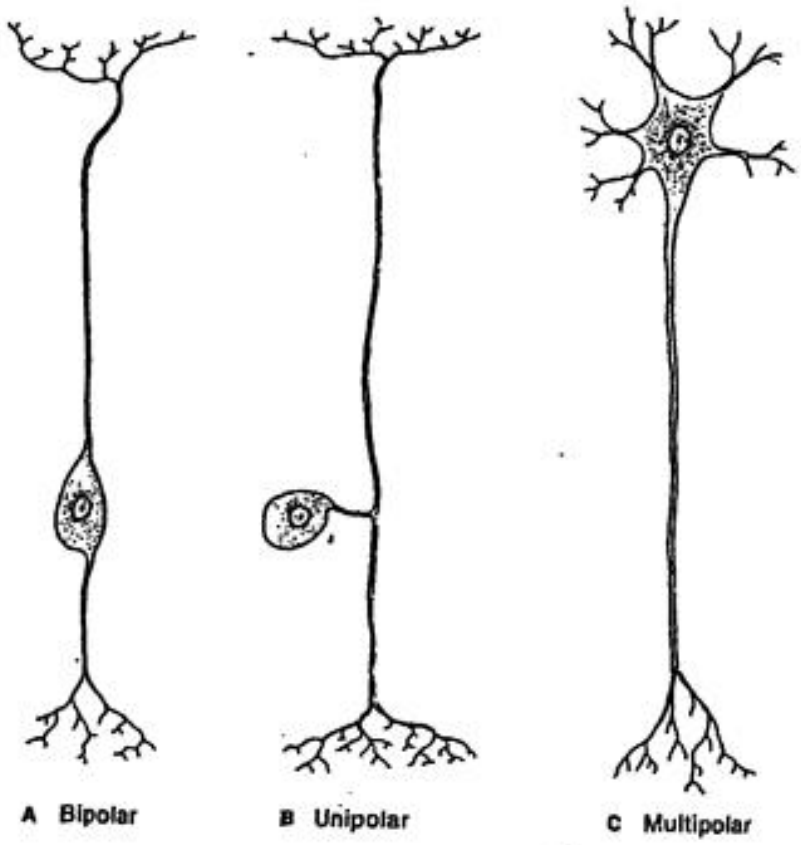
جدير بالذكر أن الاشارات العصبية والتى تعرف كذلك بالنبض أو السيال العصبى عبارة عن تغير حركى سريع فى الجهد الكهربى يعرف بفرق الجهد

الفعال action potential وهى ايضا عملية ازالة استقطاب depolanization قصيرة جداً وسرية لغشاء الليفية العصبية . وهذا يصل الجهد الكهربى أو جهد الغشاء عند الراحة فى بعض الألياف العصبية إلى 90 mv – أى يكون داخل الغشاء أكثر سلبية من خارجة.

2-1 الخلايا العصبية

توجد انواع مختلفة من الخلايا العصبية فى المملكة الحيوانية (الشكل 1-2) وهناك طرق كثيرة لتصنيفها على اساس الشكل. أحد الفوارق الرئيسية هو وجود المحور axon من عدمه وقد صنف العالم جولجى Golgi الخلايا التى لها محور على أنها النوع الأول Type I والتى ليس لها محور بأنها النوع الثانى Type II. يتحدد وجود type II فى الدوائر المحلية 10 cal circuits حيث تتصل بالخلايا التى تجاورها مباشرة. تشبه الخلية (C) فى الشكل (1-2) خلية عصبية حركية نموذجية عادة تنشأ مثل هذه الخلية من الحبل الشوكى spinal cord وتغذى ألياف العضلات الهيكلية . وهى تنتمى إلى type I وتقوم بنقل الاشارات العصبية على مسافات طويلة (الشكل 2-2) فى هذه الخليـــة تتم الاثارة عند الزوائد الشجيرية dendrites وكذلك عند جسم الخلية soma بواسطة زوائد طرفية من خلايا عصبية أخرى يتم توليد فرق الجهد عند بداية المحور axon hillock ومن ثم يحمل على طول المحور إلى النهايات الطرفية التى تنتهى عادة عند احدى التشابكات العصبى – عضلية.

عند فصل المحور عن جسم الخلية فسرعان ما يتحلل ويموت فى خلال أيام أو أسابيع. هذا ولا تحدث عملية اعادة النمو regeneration عند الثديات إلا بالنسبة للأعصاب الطرفية فقط. أما بالنسبة للحيوانات الدنيا فتحدث اعادة النمو بسهولة كبيرة وكذلك اعادة تغذية العضلات بالاعصاب.

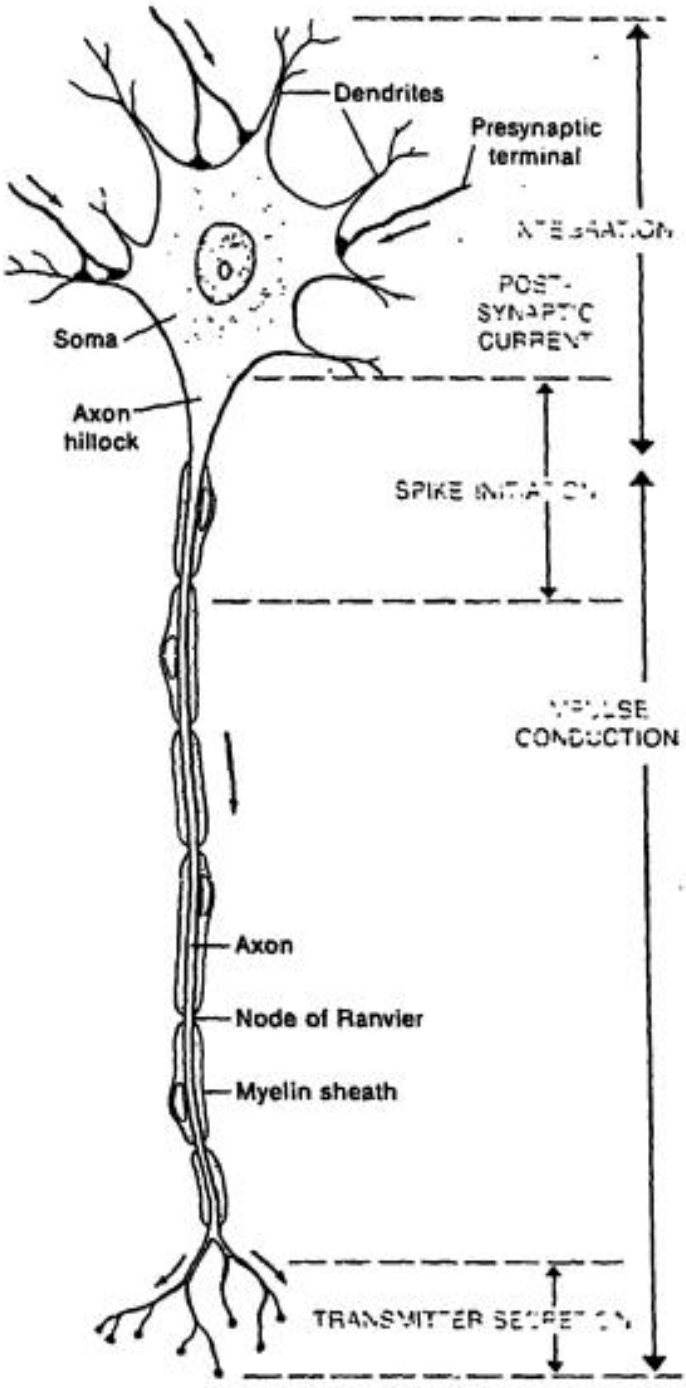


شكل 1-2 Montagna 1959

3 خلايا عصبية تنتمى إلى النوع الأول A- قطبين، B قطب واحد C- عدة أقطاب type I

2-2 الخلايا الداعمة :

تتكون الخلايا الداعمة sustentaculare أو gelial C. من العديد من الأنواع وتمثل نصف حجم الجهاز العصبى عند الفقاريات ووجودها أقل من ذلك عند اللافقاريات وهى تملأ جميع الفراغات بين الخلايا العصبية فى حالة الجهاز العصبى المركزى central nervous system اختصاراً CNS . تاركة مسافة بينية عرضها (20 nm) بين غشاء الخلية الداعمة والخلية العصبية. عادة ينشأ فرق جهد كهربى electrical potential فى هذه الخلايا. هذا وقد ظل دور الخلايا الداعمة فى الجهاز العصبى لغزاً محيرا إلى زمن طويل. لكن اتضح أن لها العديد من الوظائف؛ إحدى هذه الوظائف يرجع إلى ما يتمتع به غشاء الخلية



شكل 2-2 خلية عصبية حركية من الحبل الشوكي يوجد غلاف نخاعي حول المحور

الداعمة من نفاذية عالية لأيون البوتاسيوم. فهو يأخذ K^+ من المساحات البينية حينما يندفع هذا الأيون بكميات كبيرة اثناء النشاط الكهربى للخلية العصبية. ثم بعد ذلك يتم تحريره ببطء من الخلايا الداعمة لتأخذه الخلية العصبية مرة أخرى.

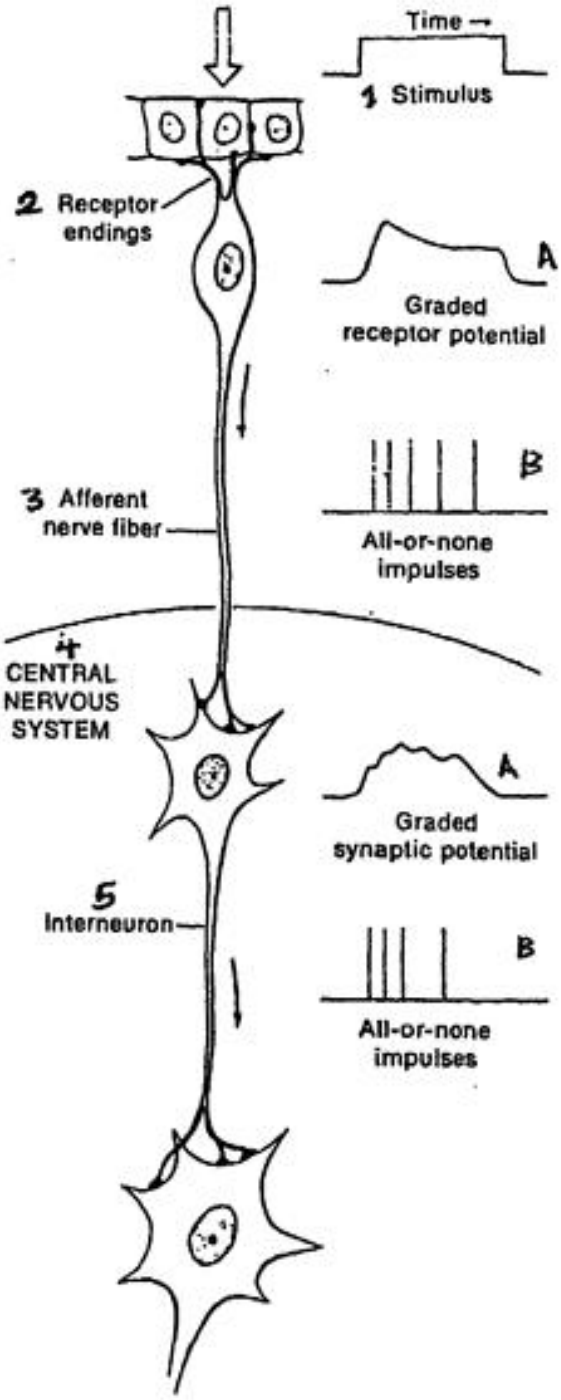
كذلك توفر الخلايا الداعمة عزلا كهربائيا للمحور ويتم ذلك بواسطة خلايا شفان Schwann والتى تلتف حول المحور مكونة ما يعرف بالغلاف النخاعى myelin sheath (الشكل 2-2 كذلك راجع الشكل 2-5) هذا بالاضافة إلى دعمها للخلايا العصبية أيضيا وتركيبياً.

2-3 الاشارات العصبية:

هناك نوعان أساسيان للإشارات العصبية التى ترسلها الخلايا العصبية، النوع الأول ويعرف بالجهد التدريجى graded potential ، بينما يندرج النوع الثانى تحت ظاهرة الفعل الكلى أو الكف التام all-or-none ويكون هذا نتيجة لنشؤ فرق الجهد الفعال action potential .

يوضح الشكل (2-3) هذين النوعين من الإشارات . تؤدى الطاقة المؤثرة على أى من مستقبلات الاحساس إلى نشؤ فرق جهد (أى يحدث تغيير فى الفولت عند قياسه عبر غشاء الخلية). ينشأ فرق الجهد هذا تدريجيا حسب القوة المؤثرة أى ينتج عن المؤثرات الضعيفة فرق جهد طفيف بينما تؤدى المؤثرات القوية إلى نشؤ فرق جهد كبير. عادة يبقى فرق الجهد هذا ما بقى المؤثر. ينتشر فرق الجهد هذا ببطء دون أن يولد نفسه على طول النهايات الطرفية الحسية للخلية العصبية، لذلك فهو يتناقص كلما ابتعد عن مصدر منشائه. لذلك لا تستطيع هذه الاشارات توصيل المعلومات على مدى مسافات طويلة.

تؤدى الاشارات العصبية لخلايا الاستقبال الحسية، التى تم توضيحها أعلاه (النوع الأول)، إلى افراز إحدى المواد وتعرف بالناقلة العصبية neurotrans mitter والتى تؤدى إلى تغيير فى فرق الجهد فى الخلية البعد تشابكية (الشكل 2-3).

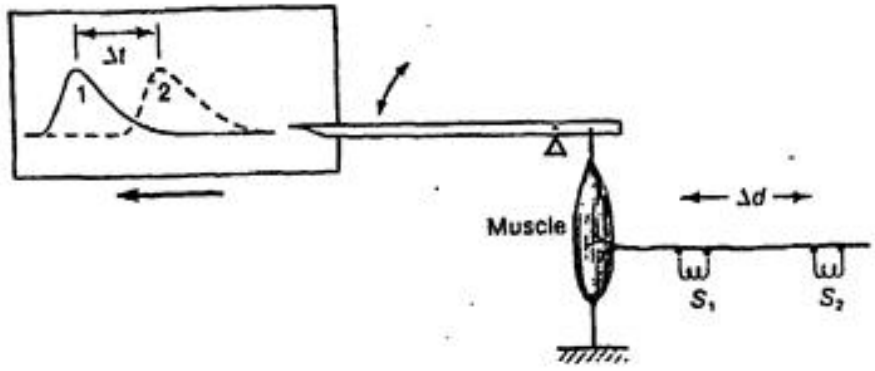


شكل 3-2 نوعان من الجهد الكهربى للخلايا العصبية (A) الجهد التدريجى
(B) فرق الجهد الفعال (ظاهرة الفعل الكلى أو الكف التام) (1) المؤثر (2) النهايات المستقبلة،
(3) العصب الوارد ، (4) الجهاز العصبى المركزى ، (5) خلية بين عصبية

أما إذا وصل قيمة معينة threshold value فانه يولد اشارة عصبية من النوع الثانى all-or-none أى الفعل الكلى أو الكف التام والتى تنتشر على طول المحور للخلية البعد تشابكية.

يوجد النوع الأول فى شبكية الفقاريات وفي بعض أجزاء الجهاز العصبى المركزى للفقاريات كذلك فى الجهاز العصبى للحشرات. لكن لكى تنتقل الاشارات إلى مسافات طويلة كما فى الخلايا العصبية الحركية فلابد من توليد فرق الجهد الفعال (النوع الثانى).

يمكن قياس السرعة التى ينتشر بها فرق الجهد الفعال وبالتالى الاشارة العصبية بطريقة بسيطة موضحة بالشكل (4-2) وفيها تتم إثارة العصب فى موضعين يبعدان عن بعض بمسافة 3cm . ينتج عن كل إثارة إنقباض فى العضل. يقاس الزمن بين الإثارة العُضلية وحدوث الانقباض latent period لكلا الموضعين.



شكل 2. قياس السرعة التى ينتشر بها الجهد الكهربى الفعال (راجع النص)

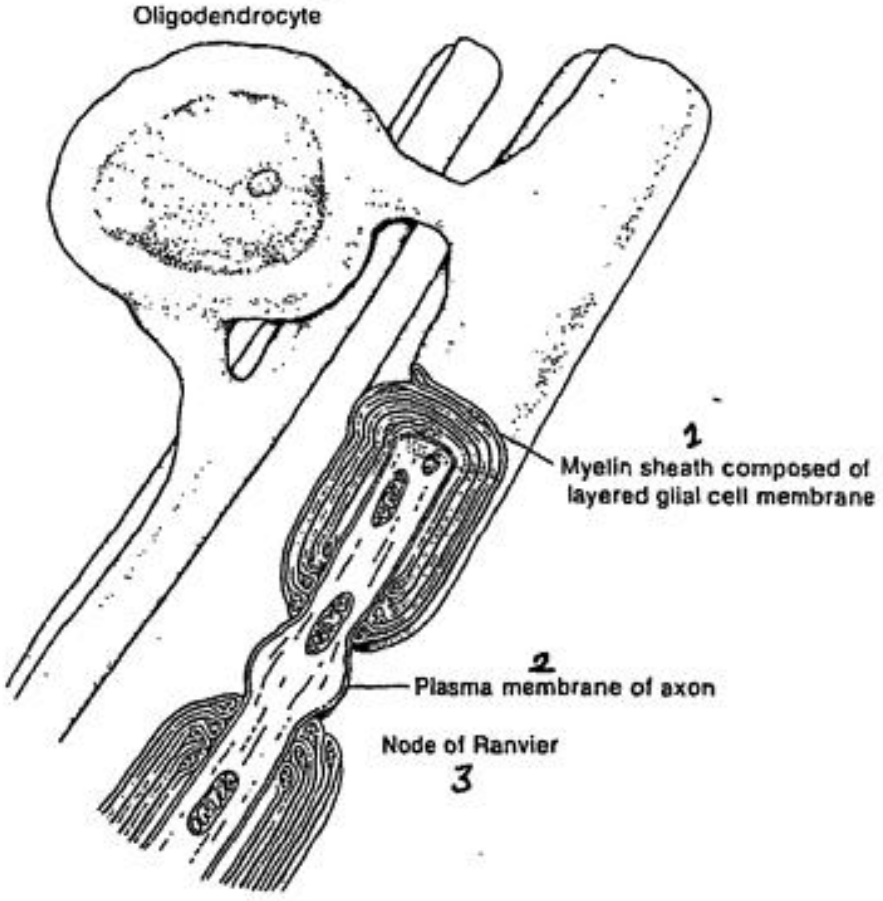
لنفترض أن هذا الزمن قد قل بمقدار جزء من ألف من الثانية (1ms) عند تحريك موضع الاثارة إلى الوضع الأبعد (أى الأقرب للعضل). يمكننا حساب سرعة انتشار فرق الجهد الفعال Vp كما يلى

$$Vp = \frac{d}{t} = \frac{3\ cm}{1\ ms} = 3 \times 10^{3}\ cm/S$$

ترمز (d) للمسافة و (t) للزمن، (ms) ميلى ثانية أى جزء من ألف من الثانية (s) ثانية.

هذا أقل بمقدار 7 مرات من سرعة التيار الكهربى فى سلك من النحاس أو فى محلول كهربى electrolyte . تتراوح سرعة الاشارات العصبية من 120 m/s بالنسبة للمحور السميك إلى العديد من السنتيمترات فى الثانية بالنسبة للمحاور الرفيعة. هذا وقد تغلبت الطبيعة على مشكلة التوصيل البطئ بطريقتين :

(أ) ازدياد فى قطر المحور الذى يقلل المقاومة كما فى المحور العملاق للمفصليات، و(ب) عن طريق النقل الوثاب فى الفقاريات حيث يتم عزل المحور بتغليفه بغلاف دهنى بواسطة خلايا شفان (الشكل 5-2) ماعدا عند عقد رانفيير. فى هه الحالة ينتقل فرق الجهد الفعال من عقدة إلى أخرى مما يزيد من سرعة النقل.



شكل 5-2

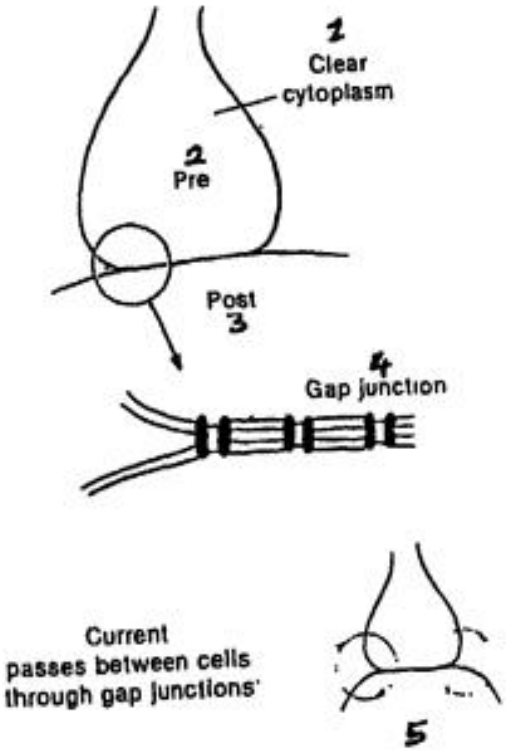
طبيعة الغلاف النخاعى الذى يغلف محور الخلايا العصبية

(1) الغلاف النخاعى وهو يتكون من العديد من الطبقات ، وتكوين خلايا شفان schwann .

(2) الغشاء البلازمى للمحور ، (3) عقدة رانفيير

2-4 التشابكات العصبية :

التشابكات العصبية synapses هى مواضع الالتقاء بين الخلايا العصبية وتنقسم إلى نوعين، كهربية وكيميائية عند التشابك الكهربى ecctrical synapse يكون غشاء الخلية القبل تشابكية presynaptic قريب جداً من غشاء الخلية البعد تشابكية post synaptic ويرتبط الغشاءان بنقاط وصل gap junctions (الشكل 2-6) التى تسمح بمرور الأيونات وبالتالى التيار الكهربى من خلية إلى أخرى



شكل 2-6
تشابك كهربى (1) سيتوبلازم نقى، (2) خلية قبل تشابكية
(3) خلية بعد تشابكية ، (4) نقاط الوصل (5) يمر التيار بحرية بين الخليتين

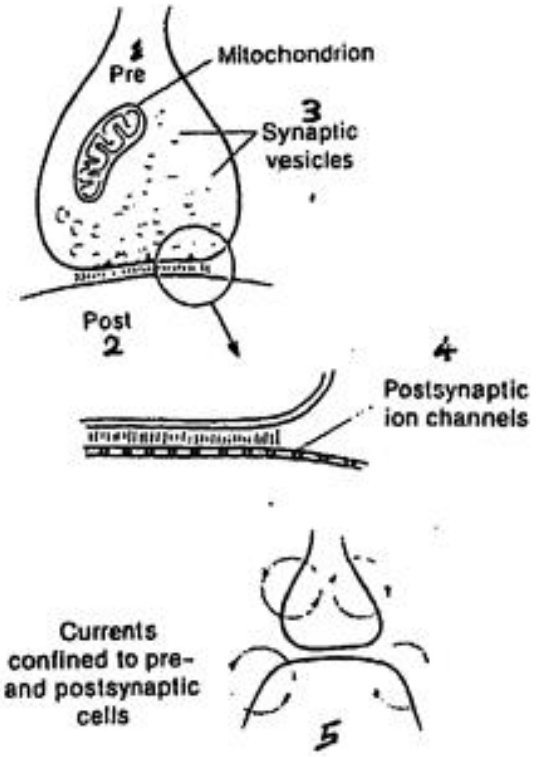
فى هذه الحالة لا يختلف انتقال الجهد الكهربى من خلية إلى أخرى عن انتقال فرق الجهد الفعال داخل الخلية نفسها. بذا ينتقل السيال العصبى سريعا من

خلية إلى أخرى. يناسب التشابك الكهربى فى توصيل السيال العصبى فى مجموعة من خلايا الجهاز العصبى المركزى، كذلك يوجد فى المحور العملاق لدورة الأرض وفى غشاء عضلة القلب عند الفقاريات. لكن لا يصلح لمرور الأيونات عند التشابكات التى تتطلب تجميع الجهد ليصل إلى فرق الجهد الفعال اللازم لإثارة خلايا كبيرة الحجم مثل الليفة العضلية والتى يتم تغذيتها بواسطة التشابكات الكيميائية chemical synapses.

تعمل معظم التشابكات فى الجهاز العصبى عن طريق افراز مادة كيميائية تكون بمثابة الوصل بين الخلية القبل تشابكية والخلية البعد تشابكية (الشكل 7-2) يتم نشؤ فرق الجهد الفعال عند التشابكات الكيميائية على عدة مراحل (الشكل 8-2) ، (1) يؤدى وصول الجهد الكهربى إلى النهاية الطرفية للخلية القبل تشابكية إلى (2) تنشيط قنوات أيون الكالسيوم Ca^{++} فيندفع الكالسيوم إلى داخل الخلية القبل تشابكية. (3) عندما يدخل أيون الكالسيوم فإنه يؤدى إلى افراز الناقلة العصبية من الحويصلات القبل تشابكية حيث تنتشر فى الشق التشابكى و (4) من ثم ترتبط بمواضع استقبال على الغشاء البعد تشابكى، (5) يؤدى الارتباط إلى تنشيط قنوات عبور الأيونات الذى يؤدى بدوره إلى (6) نشؤ جهد كهربى فى الخلية البعد تشابكية. إذا كان هذا الجهد كبيرا بحيث يفوق قيمة معينة «العتبة» فإنه يؤدى إلى نشؤ فرق الجهد الفعال فى الخلية البعد تشابكية ومن ثم يتم توصيل النبض العصبى.

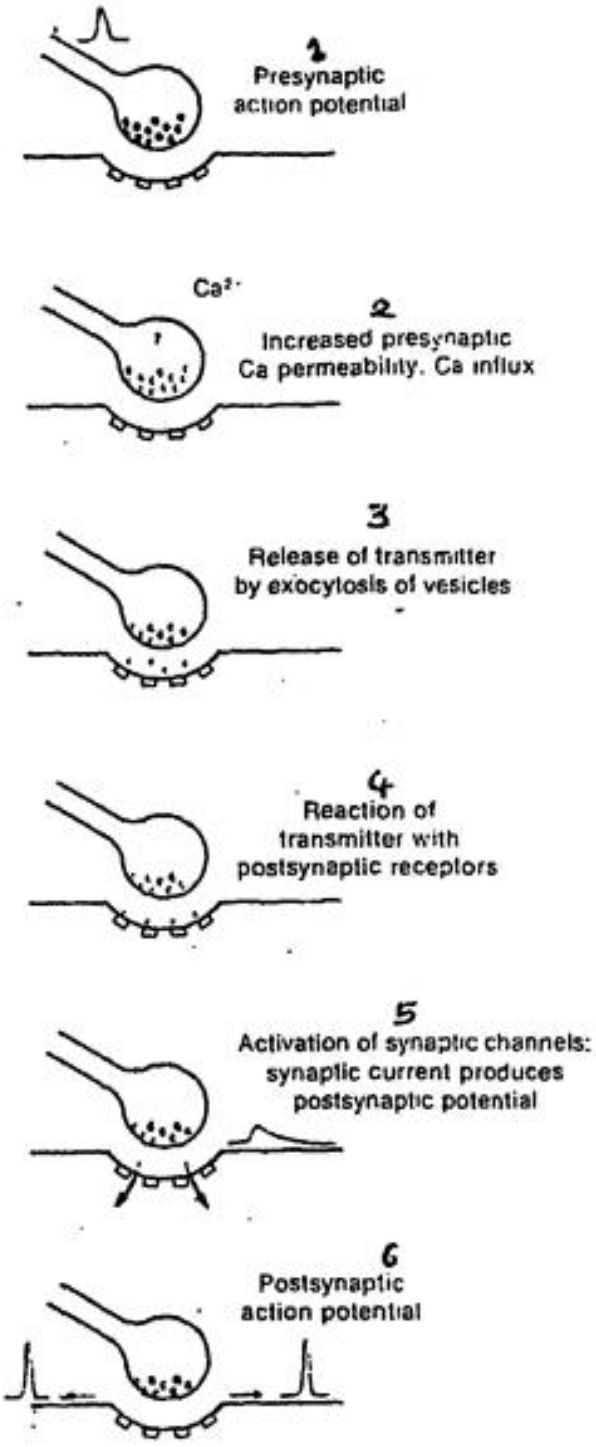
عموما يكون التشابك الكيميائى أكثر مرونة من التشابك الكهربى إذ يسمح بكل من عمليتى الاثارة أو التنشيط stimulation للخلية البعد تشابكية أو التثبيط inhibition. فمثلا تعمل مادة أستيل كولين acetylcoline، وهى أكثر الناقلات العصبية شيوعاً، على إثارة الخلية البعد تشابكية عند التشابك العصب. عضلى (فى هذه الحالة تكون الخلية البعد تشابكية عبارة عن الليفة العضلية) فى

الفقاريات. كذلك تتسبب فى الاثارة عند العقد السمبتاوية محدثة زيادة فى نفاذية الغشاء البعد تشابكى لأيونى الصوديوم والبوتاسيوم. هذا وتعمل نفس المادة أى أستيل كولين كمادة مثبطة، أى تقلل النشاط، عند النهايات العصبية للجهاز النظير سمبتاوى parasympathetic التى تغذى القلب والأحشاء حيث تحدث زيادة في نفاذية الغشاء البعد تشابكى لأيونى البوتاسيوم والكلوريد.



شكل 7-2 تشابك كيميائى (1) خلية قبل تشابكية ، (2) خلية بعد الشابكية (3) حويصلة افرازية، (4) القنوات الأيونية البعد تشابكية (5) التيار الكهربى لا يمر من خلية إلى أخرى

أيضا يعتبر التشابك الكيميائى أكثر مرونة لأنه يسمح بأن تقوم ألياف قبل تشابكية صغيرة الحجم بأثارة ألياف بعد تشابكية كبيرة الحجم عن طريق التأثير على نفاذية الغشاء البعد تشابكى فينشأ فرق الجهد الفعال ومن ثم ينتشر على طول الليفة العصبية الكبيرة.



شكل 8-2 مراحل تكون الجهد الكهربى الفعال (1) وصول الجهد الفعال،
(2) تنشيط قنوات Ca^{2+}، دخول Ca^{2+} للخلية (3) افراز المادة الناقلة العصبية،
(4) ارتباط الناقلة العصبية بالمستقبلات على الاغشاء البعد تشابكى،
(5) تنشيط قنوات عبور الأيونات (6) نشؤ الجهد الكهربى فى الخلية البعد تشابكية.

ينشأ فرق الجهد الفعال فى الخلية الحركية عند بداية المحور بعد hillock مباشرة (الشكل 9-2). يوجد العديد من الآلاف من النهايات التشابكية على خلية الحركة الوحيدة. يتم تجميع الاشارات الواردة من هذه التشابكات ولا تحدث عملية ازالة الاستقطاب إلا عن بلوغ قيمة العتبة بذلك لاتحدث إثارة عن طريق الإشارات الضعيفة أو الغير مؤثرة. يمكننا القول أنه يتم تحديد إثارة الخلية الحركية من عدمه عن طريق معالجة المدخلات من الموارد المختلفة «أثارة أو تثبيط» وقد أطلق العلماء على أسلوب معالجة المدخلات بواسطة الجهاز العصبى المصطلح العام «التكامل العصبى» neural integration بمعنى «الترابط فى وحدة كاملة» وهو يحدث على عدة مستويات.

جدير بالذكر أن التشابك العصب – عضلى يعمل عن طريق إشارة بعد تشابكية وحيدة لكل إشارة قبل تشابكية.

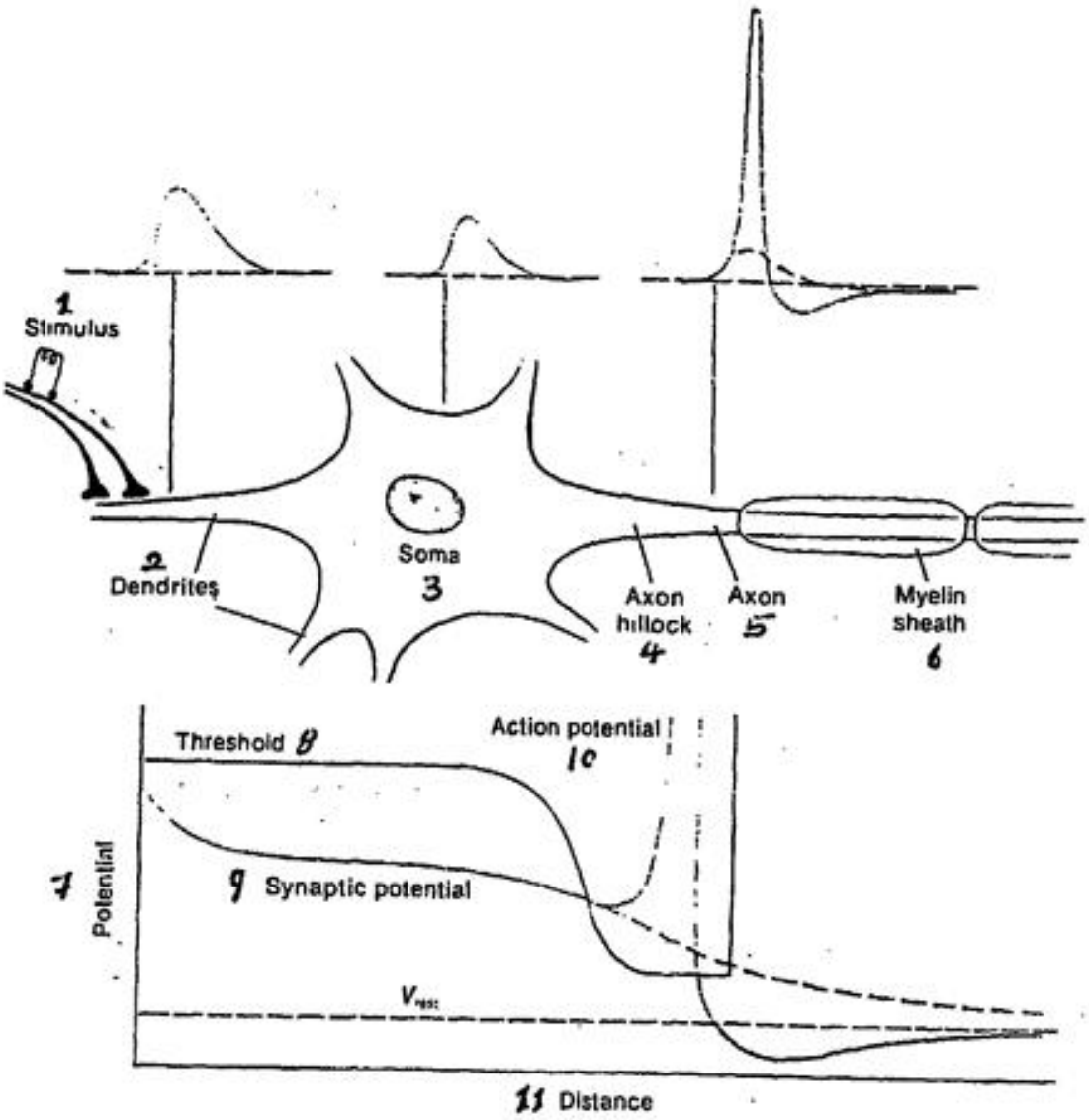
2-5 الناقلات العصبية :

إحدى أكثر المشاكل صعوبة فى فزيولوجيا الاعصاب هو تحديد أنواع المواد الكيميائية، والتى تصنف كناقلات عصبية neurotransmitters، والتى يتم افرازها عند التشابكات المختلفة. هذا ولكى يتم اعتبار إحدى المواد كناقلة عصبية فى بعض الأنسجة، يجب تحقيق بعض الشروط ومنها :

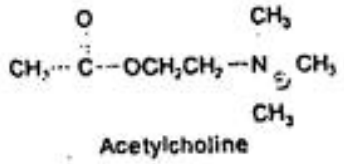
(1) عند وضع المادة المستخلصة أو المصنعة على غشاء الخلية البعد تشابكية ، نتوقع أن تحدث فى الخلية نفس ردود الفعل التى تحدث عن طريق إثارة الخلايا القبل تشابكية .

(2) يجب أن يتم تحرير المادة اثناء اثارة الخلايا القبل تشابكية.

(3) يجب أن يبطل مفعول المادة بواسطة المواد التى تبطل مفعول النقل الطبيعى للإشارات العصبية بالاضافة إلى مادة أستيل كولين acetyl Coline الشكل (2-10).

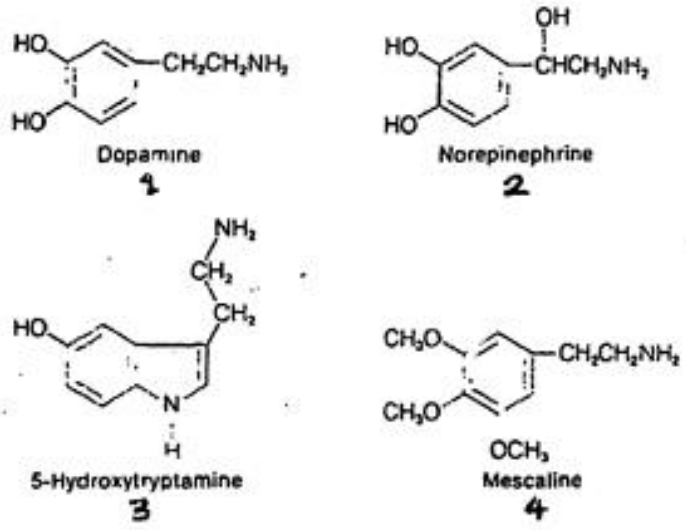


شكل 9-2 نشوء الجهد الكهربي الفعال في الخلية العصبية عند منطقة الرابية hillock عند بلوغ قيمة العتبة (1) المؤثر ، (2) زوائد شجيرية ، (3) جسم الخلية ، (4) الرابية (5) المحور، (6) الغلاف النخاعي ، (7) الجهد ، (8) العتبة ، (9) الجهد التشابكي، (10) الجهد الفعال، (11) المسافة



شكل 10-2 جزئي آستيل كولين

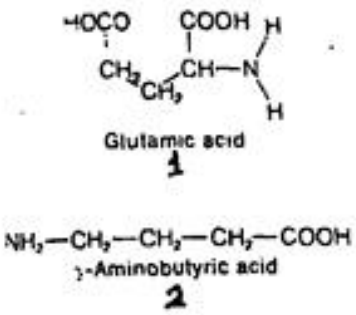
وقد ورد ذكره سابقا، هنالك مواد أخرى تعمل كناقلات عصبية مثل الأمينات biogenic amines ومنها الأمينات الأحادية monoamines ومن أمثلتها ابينفرين epinephrine، ونورا بينفرين norepinephrine دوبامين dopamine وسيروتونين serotonin (الشكل 11-2). يمكن اكتشاف وجود هذه المواد داخل الخلايا على شريحة معدة عن طريق القطع البارد لأن هذه المواد تشع عند تعريض الخلايا للضوء فوق البنفسجي ultra violet اختصاراً uv وذلك بعد تثبيتها بواسطة فورم ألديهيد formaldehyde .



شكل 11-2 الأمينات الأحادية monoamines
(1) دوبامين (2) نوراپينفرين، (3) سيروتونين (4) مسكالين

بعض الأحماض الأمينية مثل حمض الجلوتاميك glutamic acid (الشكل 12-2) يتم افرازها عند التشابكات التي تحدث إثارة داخل الجهاز العصبي المركزي للفقاريات وكذلك عند التشابكات العصب – عضلية للحشرات والقشريات. تعمل إحد مركبات حمض البيوتريك وهي α-aminobutyric

اختصارا جابا GABA (الشكل 12-2) كمادة ناقلة مثبطة للخلية العصبية الحركية عند القشريات وكذلك داخل الجهاز العضبى المركزى للفقاريات.



شكل 12-2

(1) حمض الجلوتاميك (2) ألفا أمينوبيوتريك

مجموعة أخرى من الناقلات العصبية تعرف بالبتيدات العصبية neuropeptides . وهى مواد بروتينية يتم انتاجها بواسطة العديد من الأنسجة مثل الخلايا الغددية داخلية الافراز، خلايا الجهاز العصبى المستقل. وكذلك العديد من اجزاء الجهاز العصبى المركزى. مثال لهذه البيتيدات، هرمون جلوكاجون glucagon، هرمون جاستوين gastrin وهرمون كول سيتوكنين cholecystokinin .

هنالك مجموعتان من البروتينات العصبية لقيت أهتماما شديدا هما الاندورفينات endorphins والانكفاليات enkephalins. لهذه البروتينات تأثير مخفف للألم analgesic وتأثيرات تحدث البهجة والنشوة كتلك التى يحدثها الأفيون opium.

يرتفع تركيز هذه المواد فى المخ كنتيجة لتناول الطعام، الاستماع للموسيقى وغيرها من الأنشطة التى تدخل السرور. نتيجة لذلك ولأن هذه المواد ترتبط فى الجهاز العصبى بنفس مواضع ارتباط المواد الأفيونية opiates مثل الأفيون ومشتقاته لذلك سميت بالمواد الأفيونية داخلية المنشأ endogenous

opioids عند تعاطى مواداً مثل الأفيون، المورفين والهيروين فإنه يحدث للخلايا العصبية نوع من الاعتياد الأيضى على هذه المواد فيما يعرف بالادمان addiction (وقد شاع فى الغرب استخدام لفظ عقاقير drugs ليشير لهذه المواد بينما نستخدم هنا لفظ مخدرات).

الفصل الثالث

آليات الاحساس

الفصل الثالث

آليات الاحساس

لخلايا الاحساس والتى تطلق عليها مستقبلات الاحساس sensory receptors حساسية عالية لنوعية معينة من أنواع الطاقة المؤثرة مثل طاقة الموجات الضوئية، طاقة الموجات الصوتية، الطاقة الحرارية أو الطاقة الميكانية ... الخ، وهى غير حساسة نسبيا لغيرها من المؤثرات. تقوم الخلايا المستقبلة بتحويل الطاقة المؤثرة إلى إشارة كهربية تكون، فى الغالب، عبارة عن عملية ازالة استقطاب. فى الواقع تكون مواضع الاستجابة الرئيسية، فى معظم خلايا الاستقبال، جزئيات موجودة على غشاء الخلية أو على الأغشة داخل الخلية.

تترجم قوة المؤثر إلى نبض كهربى أى عصبى. هذا وتظهر حساسية العديد من الألياف الحسية تناسباً طردياً من لوغاريثم log قوة المؤثر حتى يصل أقصى معدل لها: هذه العلاقة الوغاريتمية بين قوة المؤثر وحجم الاستجابة تسمح باستقبال المؤثرات الحسية على مدى حيوى واسع، مع الاحتفاظ بحساسية عالية بالنسبة للمؤثرات الضعيفة. بذلك يمكننا القول بأن الحساسية تكون عالية بالنسبة للمؤثرات الضعيفة وتقل مع ازدياد القوة المؤثرة.

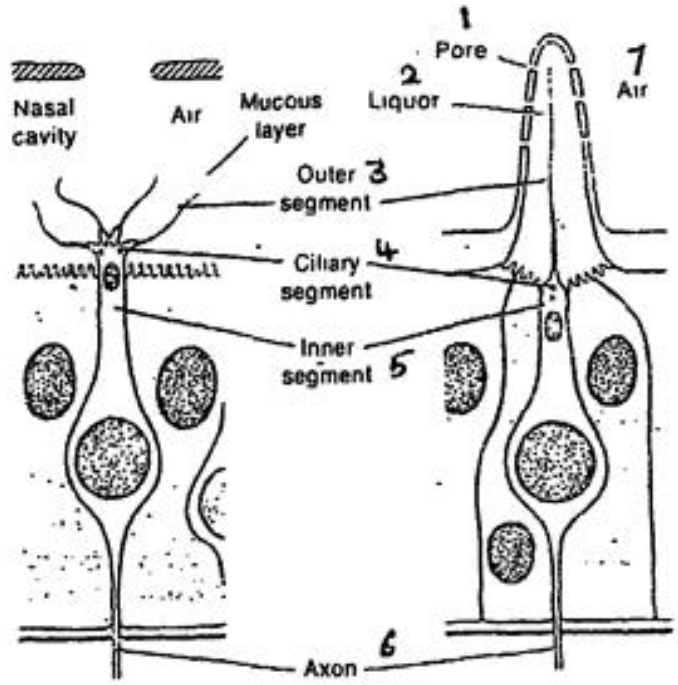
تمكن المدخلات المتوازية من المستقبلات، التى تقوم بتغطية مناطق مختلفة من المجال المؤثر، جهاز الاحساس من التفاعل مع كافة مجالات القوة المؤثرة مما لو كانت كل خلية تعمل على حدة.

أحد خواص الخلايا المستقبلة هو «التعود» أو التكيف sensory adaptation، وفيه يقل الاحساس أو ينعدم إذا استمر عمل المؤثر لفترة طويلة من الزمن. يحدث التعود فى بعض خلايا الاستقبال سريعاً بينما يحدث فى البعض الآخر ببطء. تختلف الآلية التى يحدث بها التكيف فهو قد يحدث أحيانا على مستوى الخلية المستقبلة أو قد يحدث بالنسبة لمراكز ترجمة الاحساس داخل الجهاز العصبى المركزى.

3-1 الاحساس بالمواد الكيميائية :

حساسية الخلايا إلي جزئيات محددة واسع الانتشار وهو يشمل التفاعلات الأيضية للأنسجة التى تحدثها الرسل الكيميائية مثل الهرمونات، حساسية بعض الخلايا لتركيز جزئيات مثل الاكسجين أو ثانى أكسيد الكربون CO_2. أيضا تشمل مقدرة بعض الكائنات الدنيا مثل البكتريا على اكتشاف بعض المواد فى البيئة المحيطة. لكننا سنحصر أهتمامنا هنا على خلايا الاحساس الكيميائية التى تشمل مستقبلات التذوق gustatory أو الطعم taste) والتى تشكف عن وجود الجزئيات المذابة، ومستقبلات الشم olfactory (أو smell) والتى تكشف عن وجود الجزئيات المحمولة بواسطة الهواء . ولأن المادة المحمولة فى الهواء تذوب أولا فى الطبقة المائية التى تغلف غشاء الشم ثم بعد ذلك تؤثر على مستقبلات الشم لذلك لايوجد اختلاف يذكر بين مستقبلات التذوق ومستقبلات الشم فكليهما يستجيب لوجود المواد المذابة.

مثلما توجد مستقبلات التذوق والشم عند الفقاريات كذلك توجد عند اللافقاريات وخير مثال لذلك مستقبلات الشم لذى الحشرات. والتى تكون حساسة بدرجة كبيرة فمستقبلات الشم الموجودة على قرون الاستشعار antennae (المفرد antenna) لذكر فراشة دودة الحرير silkworm moth (الاسم العلمى bombyx mon) تستطيع اكتشاف الفرمون pheromone الجنسى بومبيكول bombykol الذى تفرزه انثى الفراشة. يستجيب الذكر سلوكيا إلى تركيز يصل إلى جزئ واحد من الفرمون لكل 10^7 جزئ من الهواء. تسمح هذه الاستجابة العالية الحساسية للذكر بأن يتعرف على وجود الأنثى التى تبعد عنه بالعديد من الأميال (فى اتجاه الريح). يوضح الشكل (1-3) خلية شم حسية نموذجية للحشرات.



شكل 1-3 خلية شك نموذجية عند الحشرات (1) ثقب (2) مادة سائلة (3) جزء خارجي (4) جزء الهدب (5) جزء داخل (6) المحور (7) الهواء

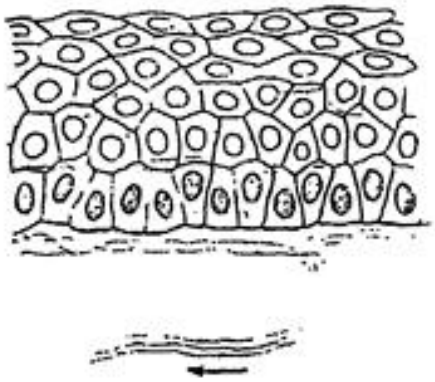
كذلك تملك الحشرات مستقبلات كيميائية على أطراف أرجلها عبارة عن شعيرات تذوق تقوم باكتشاف المواد الغذائية مثل جزئيات السكر مما يحفز سلوك التغذية عند الحشرات.

حاسة الشم عند الفقاريات أكثر تعقيداً من اللافقاريات إذ تستطيع التمييز بين العديد من الروائح المختلفة بواسطة مستقبلات الشم المختلفة. لكن من التجارب التى اجريت على الضفدع لم يتمكن العلماء من إثبات علاقة واحد-إلى-واحد بين بعض الروائح وبعض أنواع مستقبلات الشم. بدلا عن ذلك يمكن أن تحتوى كل من خلايا الشم المختلفة على مجموعة من الجزئيات المستقبلة المختلفة، كل منها تستجيب إلى أحدى الروائح على حدة.

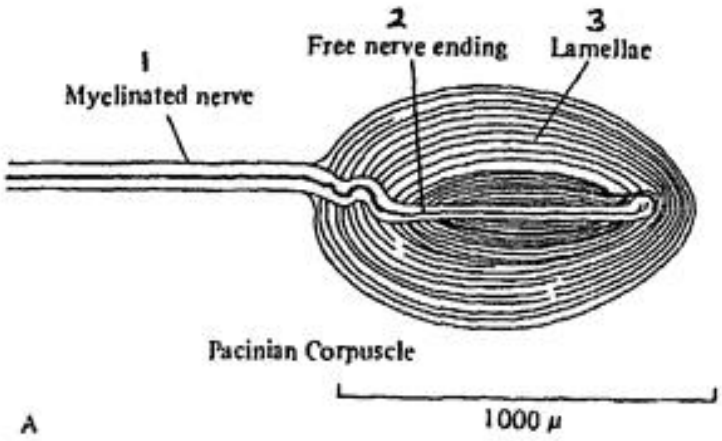
جدير بالذكر أن مقدرة الثدييات على التمييز بين مجموعة كبيرة من الروائح المختلفة تكمن فى مقدرة مراكز الشم فى المخ على التعرف على كم هائل من التوافقيات الواردة من خلايا الشم المتنوعة الموجودة فى طلائية الأنف.

3-2 الإحساس بالمؤثرات الميكانية :

بين أبسط المستقبلات المتكاينة mechanoreceptors النهايات الطرفية، لبعض الأعصاب، غير المميزة الموجودة داخل النسيج الضام connective tissiue للجلد (الشكل 2-3). لكن عادة تكون المستقبلات الميكانية أكثر تعقيدا من ذلك، وهى عادة ما تحتوى على تراكيب إضافية مهمتها توصيل الطاقة الميكانية إلى الخلايا العصبية المستقبلة. مثل كريات باسين pacinian corpuscles (الشكل 3-3) وهى مستقبلات للشد أو الجذب والاهتزاز توجد داخل الجلد ، العضلات، الأحشاء، الألياف الوترية والمفاصل عند الثدييات.

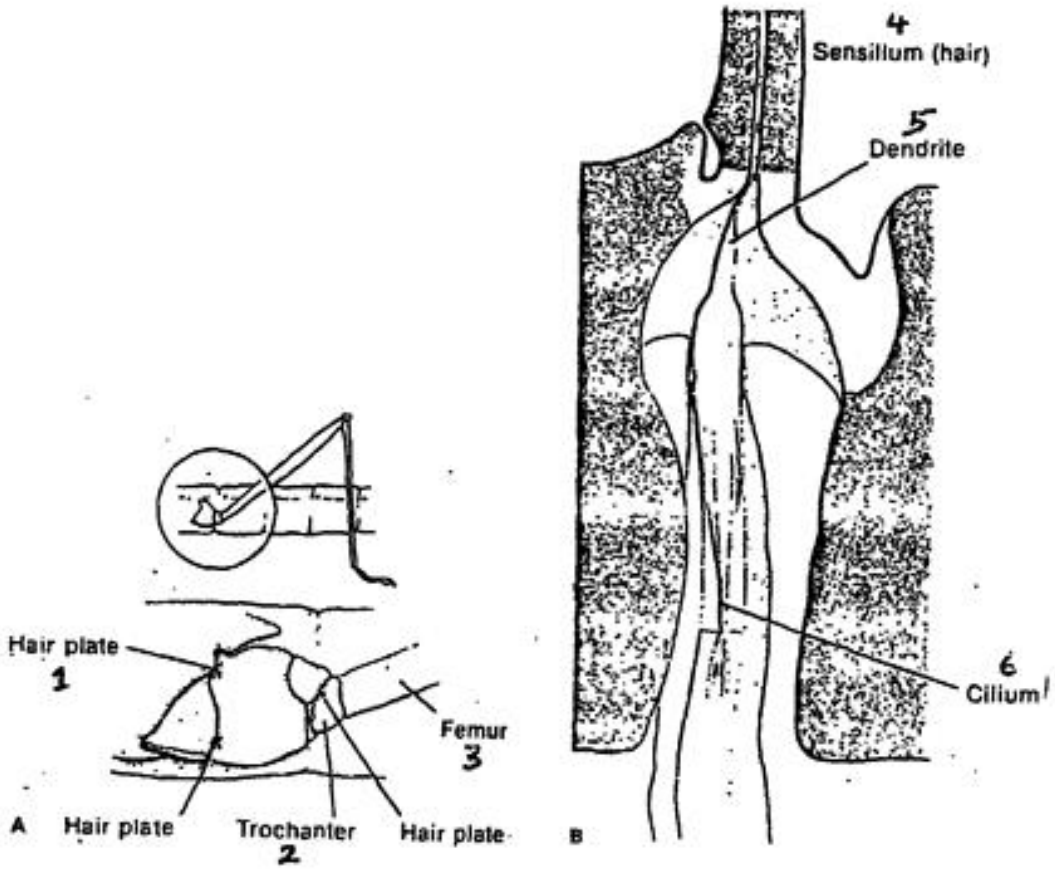


شكل 2-3 المستقبلات الميكانيكية داخل النسيج الضام للجلد



شكل 3-3 Pacinian Corpuscle مستقبلات ميكانيكية توجد عند الثديات داخل الجلد، العضلات، الاحشاء، الالياف الوترية والمناصل (1) عصب يحيط به الغلاف النخاعى (2) النهاية الطرفية للعصب (3) صفائح

كذلك مستقبلات الشد داخل مختلف العضلات عند المفصليات والفقاريات. والسنسيليا sensilla، وهى شبيهة بالشعر، وتمتد عبر الهيكل الخارجى للمفصليات (الشكل 4-3). أما أكثر التراكيب الاضافية تعقيدا فتوجد داخل الأذن الوسطى والأذن الداخلية للثديات (الشكل 5-3).



شكل 4-3

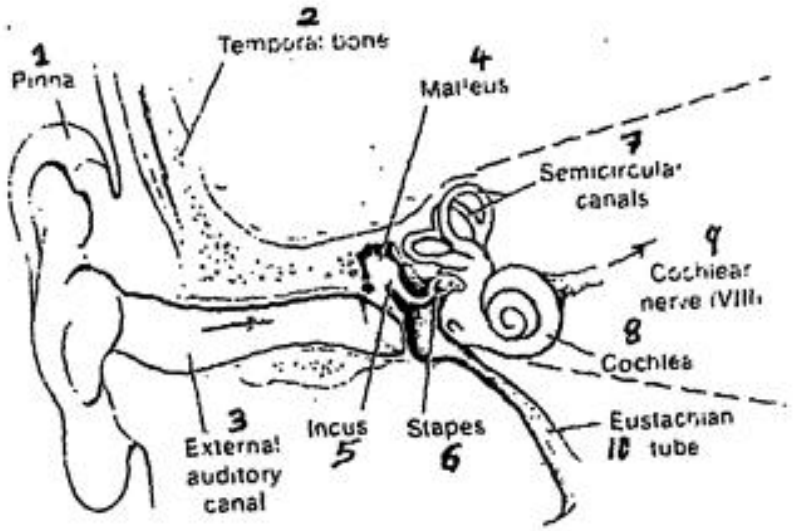
السنسيليم، يستقبل المؤثرات الميكانية

A موضعه على (1) الصفيحة الشعيرية لأحد المفصليات

(2) الرضفة trochanter، (3) عظم الفخذ

(B) التشريح الوظيفى للسنسيليم (4) شعرة، (5) أحدى الزوائد الشجيرية (6) احدى الأهداب

(C) عندما تنحنى الرجل وبالتالى يتم شد الزوائد الشجيرية للمستقبلات الميكانية



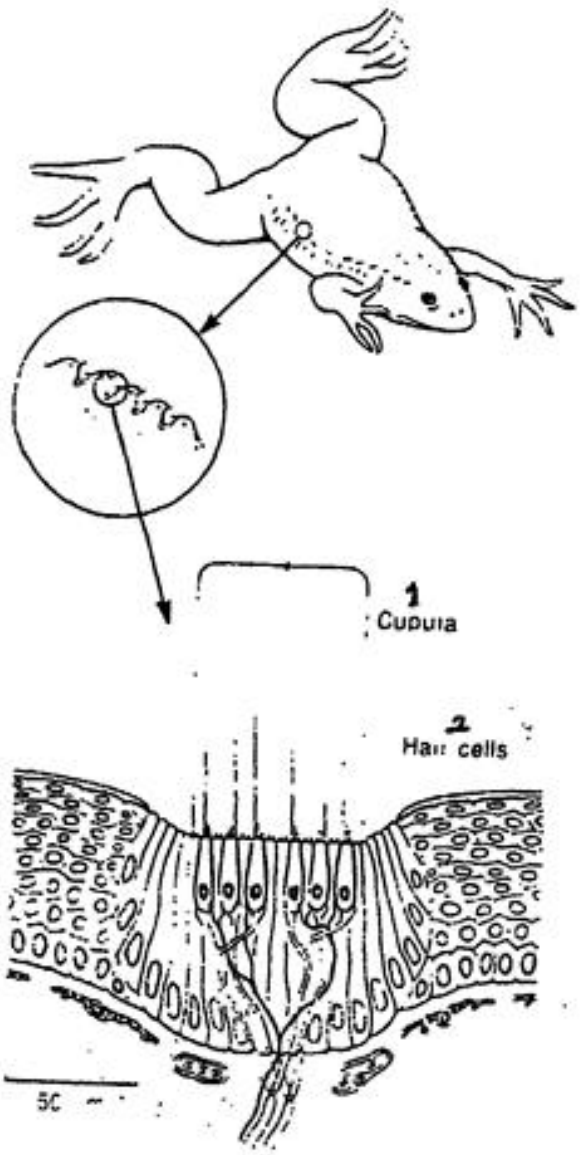
شكل 5-3 الأذن، تستجيب للمؤثرات الميكانية

(1) صوان الأذن (2) العظم الصدغي (3) قناة الأذن الخارجية

(4) المطرقة (5) السنوان (6) الركاب (7) القنوات الهلالية (8) القوقعة

(9) العصب القوقعي (10) قناة يوستاش

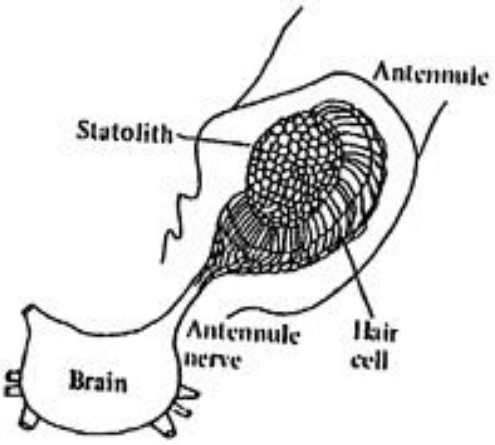
يكون التأثير المباشر على المستقبلات الميكانية هو ازاحة لغشاء الخلية ينتج عنه ازدياد في نفاذية الغشاء للصوديوم. هذا وتكون حساسية هذه الخلايا عالية جدا بحيث يمكن لازاحة ميكانية من الصغير بحيث لا تزيد عن 0.1 nm (عند مستوى النسيج أو الخلية) أن تحدث تغييرا في نفاذية الغشاء لأيون الصوديوم. تعتبر الخلايا الشعرية في الفقاريات ذات حساسية ميكانية عالية وهي توجد في جهاز الحبل الجانبي lateral line عند الأسماك والبرمائيات (الشكل 6-3). كذلك توجد داخل أعضاء السمع والتوازن في جميع الفقاريات.



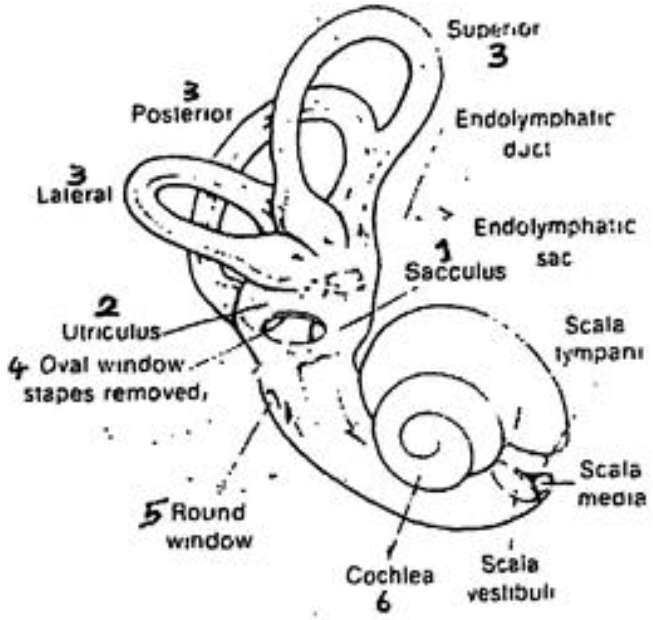
شكل 6-3 جهاز الحبل الجانبى لضفدع
(1) الكؤيس (2) خلايا شعرية

أبسط أنواع الأجهزة التى تستجيب للتسارع acceleration هو كيس الموازنة statocyst عند اللافقاريات (لا يوجد لدى الحشرات التى تعتمد على حواس أخرى مثل حاسة الابصار فى عملية تحديد وجهتها). يتكون كيس الموازنة من قناة مجوف مبطنة بالمستقبلات الميكانية التى تحتوى على أهداب

تلامس الحصاة statolith كما فى الكركند (جراد البحرى) lobster (الشكل 7-3) الحصاة الموازنة عبارة عن حبات رمل أو أجسام صلبة يأخذه الحيوان من البيئة المحيطة أو تفرزها خلايا طلائية كيس الموازنة statocyst أما أعضاء التوازن عند الفقاريات فقد نشأت عند الجزء الأمامى لجهاز الحبل الجانبى والتى تتكون من الكيس الدقيق sacculus والقربة الدقيقة utriculus يعطى الأخير الثلاث قنوات الهلالية semicircular الموجودة بالأذن الداخلية والتى تتعامد مع بعضها البعض (الشكل 8-3) وحينما يتحرك الرأس فإنه يجرف الليمف الداخلى الذى يمر بالنتوء الجلاتينى أو الكويس cupula والتى تحتوى على خلايا حسية عند قاعدتها (كما فى الشكل 6-3) يوجد داخل الأذن الداخلية للفقاريات مواد معدنية صلبة مكونة مما يعرف بالحصية الاذنية otolith وهو شبية بالحصاة الموازنة غير أنه لا يتأثر بالتسارع إنما بوضع الحيوان بالنسبة للجاذبية الأرضية. كذلك تستخدمه الفقاريات الدنيا للاحساس بالذبذبات كتلك التى تحدثها الموجات الصوتية.



شكل 7-3 رسم يوضح كيس الموازنة statocyst لاحدى المفصليات الكركند/ جراد البحر lobster (1) الحصاه stutolith (2) قرن استشعار
(3) عصب يغذى قرن الاستشعار (4) المخ



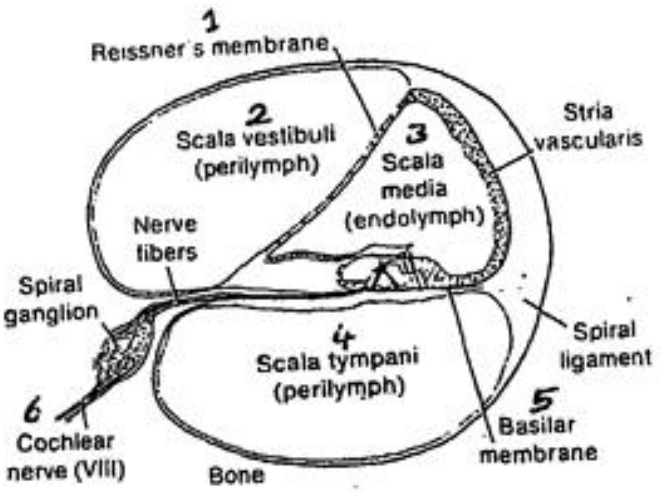
شكل 8-3

الأذن الداخلية للثديات

(1) الكيس الدقيق (2) القربة الدقيقة (3) القنوات الهلالية

(4) النافذة البيضاوية (5) النافذة المستديرة (6) القوقعة

يختص عضو كورتى organ of corti (الشكل 9-3)، وهو يوجد داخل القوقعة cochlea، بتحويل التحركات الميكانية، الناتجة عن أثر الموجات الصوتية المحمولة فى الهواء على الأجزاء المختلفة للأذن، إلى اشارات عصبية يحملها العصب السمعى إلى الجهاز العصبى المركزى. توجد القوقعة بشكلها الحقيقى (الشكل 8-3) فقط فى الثديات . بينما توجد عند الطيور والزواحف قناة قوقعية مستقيمة تحتوى على الغشاء القاعدى وعضو كورتى. هذا ولا توجد قناة قوقعية فى الفقاريات الدنيا. وفيها يتم الاحساس بالموجات الصوتية بواسطة الخلايا الشعرية الموجودة داخل الكيس الدقيق والقربة الدقيقة (الشكل 8-3) نتيجة لحركة الحصية الأذنية بداخلها.

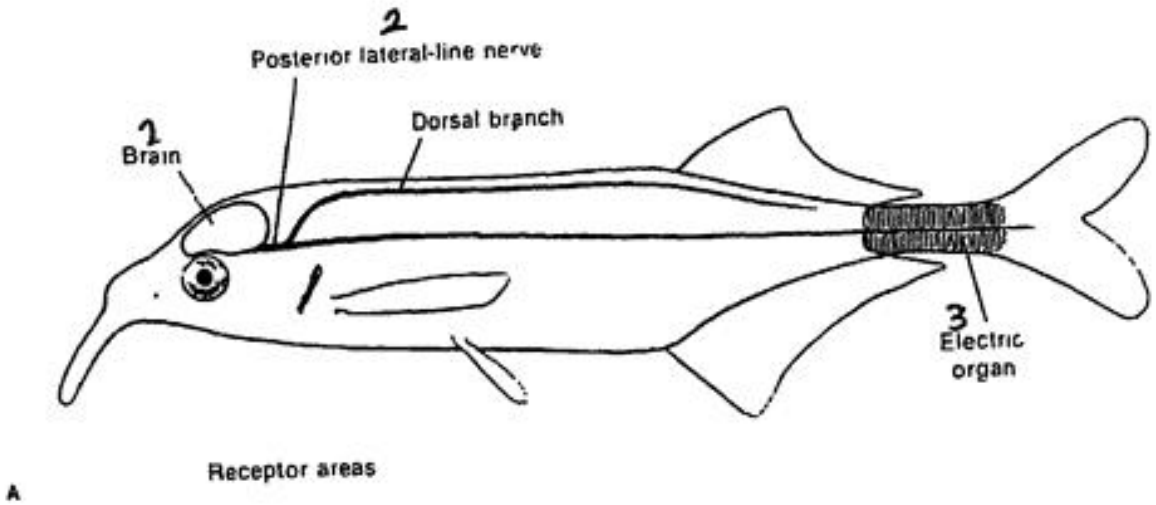


شكل 9-3 قطاع عرضى عبر القناة القوقعية يوضح عضو كورتى وهو يقع على الغشاء القاعدى
(1) غشاء رسيتر (2) قناة الدهليز (3) القناة الوسطى
(4) القناة الطبلية (5) الغشاء القاعدى (6) العصب القوقعى

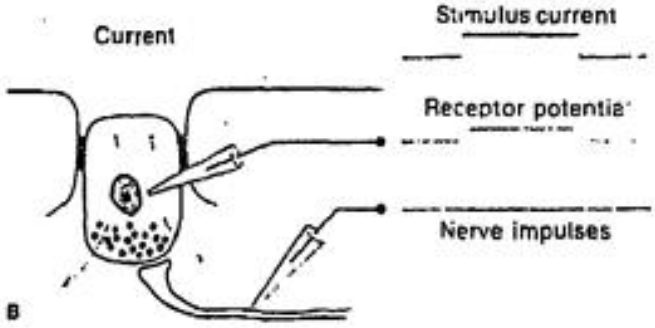
3-3 الاحساس بالمؤثرات الكهربية :

فقدت الخلايا الشعرية، الموجودة على جلد بعض أنواع الاسماك العظمية والغضروفية ، أهدابها وتحولت إلى احساس التيارات الكهربية. مصدر هذه التيارات الكهربية يكون إما من الاسماك نفسها أو تيارات نابعة من انسجة حيوانات أخرى. تتوزع المستقبلات الكهربية dctroreceptors عند الأسماك فوق الرأس والجسم على جهاز الحبل الجانبى (الشكل 10-3). الغشاء الخارجى للخلية المستقبلة مقاومة كهربية أقل من الغشاء القاعدى. يدخل التيار عن طريق ثقوب طلائية فيؤثر على المستقبل الكهربى (الشكل 11-3). يؤدى التيار إلى ازالة استقطاب الغشاء القاعدى، مما يدفع بأيون الكالسيوم خلال الغشاء الخارجى. أى تزداد نفاذية الغشاء الخارجى لأيون الكالسيوم. يؤدى اندفاع Ca^{2+} إلى داخل الخلية إلى تحرير الناقلة العصبية وهذا يؤدى بدوره إلى ارسال الاشارات العصبية.

جدير بالذكر أن بعض أسماك الأنقليس eels والرعاد الكهربى torpedoes تنتج تياراً كهربياً عاليا يشل حركة الفريسة أو العدو.



شكل 3-10 Bennett (68) جهاز الحبل الجانبى وعليه تتوزع المستقبلات الكهربية عند احدى الاسماك Gnathogemus petersii (1) المخ (2) العصب الحبل جانبى الخلفى (3) العضو الكهربى



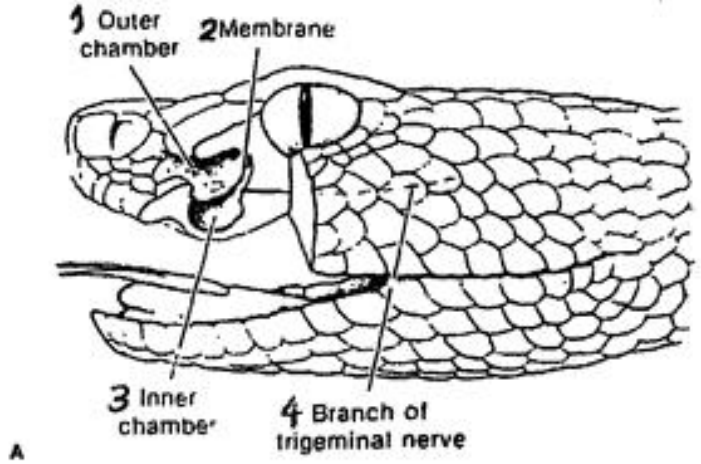
شكل 3-11 خلية استقبال كهربية . يمر التيار الكهربى عبر أحد الثقوب ،،

3-4 الاحساس بالمؤثرات الحرارية :

تقوم بعض النهايات الطرفية للأعصاب بالاستجابة لدرجة الحرارة و/ أو التغيير فى درجة حرارة الجلد. توجد المستقبلات الحرارية thermoreceptors داخل تحت المهاد hypothalamus (داخل المخ) عند الفقاريات. وتستقبل

الاشارات من الجلد وأجزاء الجسم الأخرى ومن ثم تكون تغذية مرتجعة feed back وبذا يتحكم تحت المهاد فى الآلية المنظمة لدرجة حرارة الجسم.

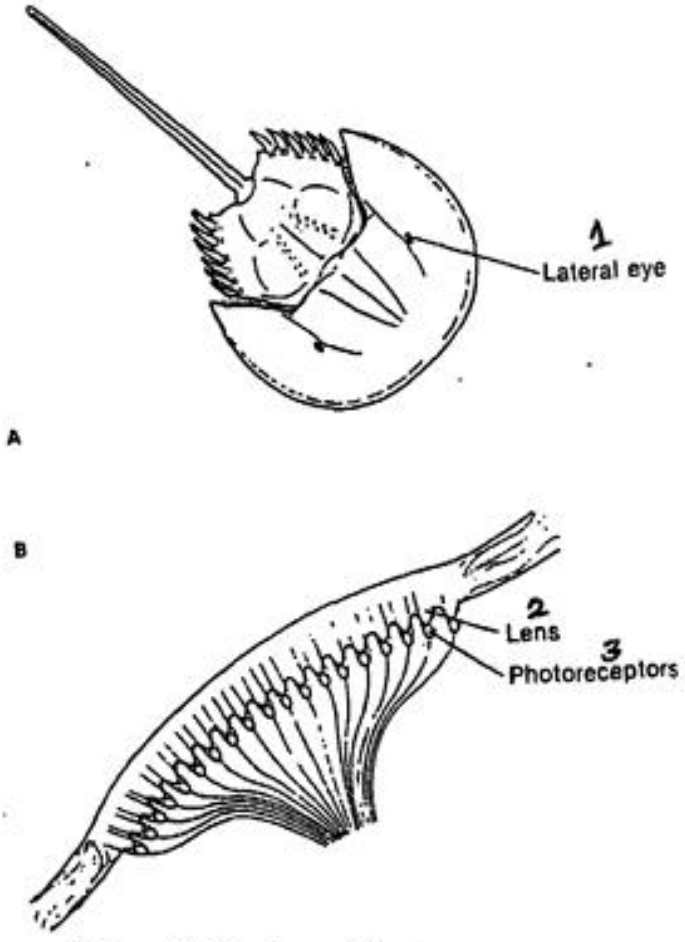
توجد فى بعض الحيوانات مثل الحية ذات الاجراس أو الحية المجلجلة rattle snake مستقبلات شديدة الحساسية للحرارة تتعرف على الموجات تحت الحمراء IR (الشكل 12-3) وهى تقوم بقياس أى ارتفاع فى الحرارة يصل أو يزيد عن $0.002\ C^{\circ}$. بذا تستطيع الحية (الثعبان) التعرف على فريسته التى تكون عادة من الثدييات صغيرة الحجم مثل القوارض، وهى على بعد 40 cm، نتيجة لاختلاف درجة حرارتها (أى الفريسة) عن البيئة المحيطة.



شكل 12-3 Bullock & Dieke المستقبلات الحرارية عند ذات الاجراس crotalus oriviclis وهى توجد على غشاء الحجرة الداخلية. (1) الحجرة الخارجية (2) غشاء (3) الحجرة الداخلية (4) العصب / فرع trigeminal مثلث التوائم أو الوجوه.

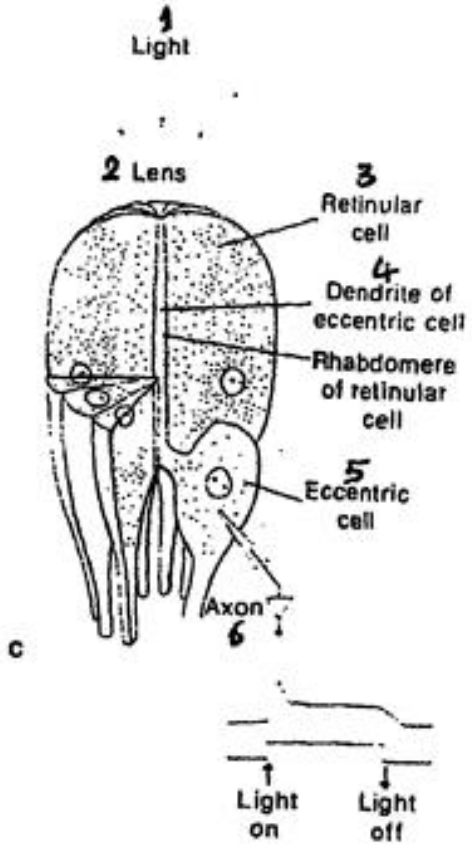
3-5 الاحساس بالمؤثرات الضوئية :

تشترك المستقبلات الضوئية photoreceptors فى امتلاكها لصبغة حساسة للضوء مرتبطة بغشاء استقبال. يتم تغيير تركيب هذه الجزئيات الحساسة للضوء photopigments بواسطة الفـوتونات photons الضوئية. أكثر المستقبلات الضوئية التى تمت دراستها هى للسرطان الشبيه بحدوة الحصان horseshoe crab أو ملك السراطين Limulus polyphemus وهو ليس بسرطان حقيقى إذ ينتمى إلى احدى فصائل العنكبوتيات arachnida المنقرضة . توجد لدى هذا الحيوان عينان مركبتان compound جانبيتان. الوحدة الوظيفية للعين المركبة هى العوينة أو العين الصغيرة ommatidium وتقع كل واحدة منها تحت سطح سداسى للقرنية cornea . لكل عين صغيرة عدسة لتجميعالضوء (شكل 13-3). يتكون الهين الصغيرة من واحدة من الزوائد الشجيرية dendrite التى هى امتداد



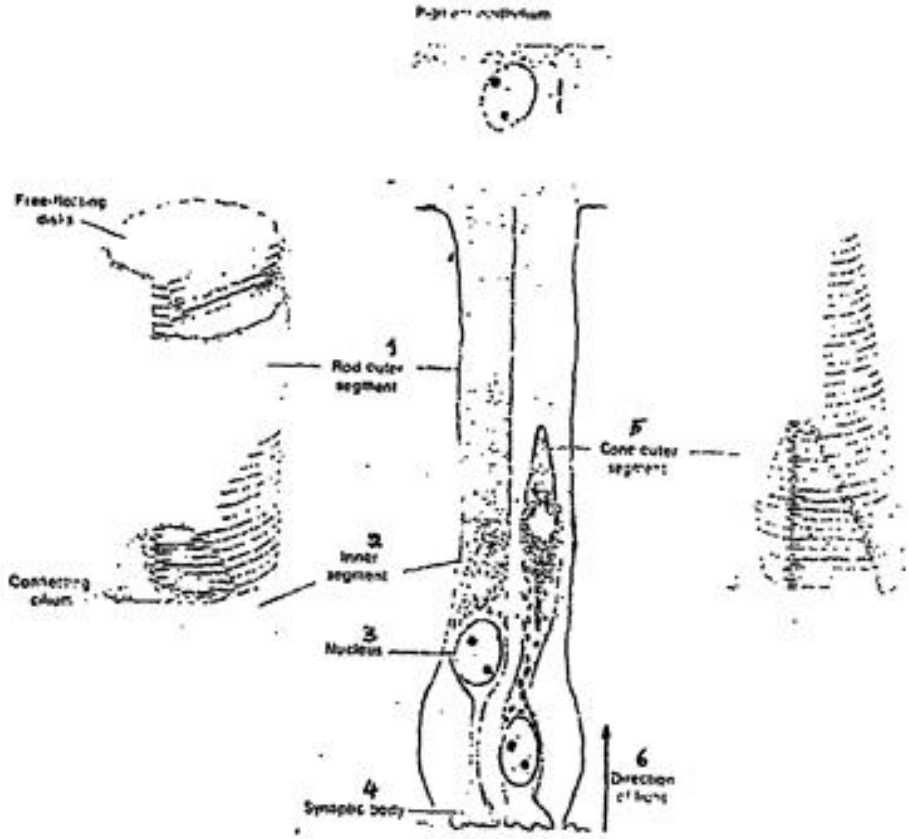
شكل 13-3 العين المركبة للسرطان حدوة الحصان (1) عين جانبية (2) عدسة (3) مستقبل ضوئى

للخلية المركزية وتحيط بها 12 خلية شبكية (الشكل 14-3). هذا وتحتوى الخلايا الشبكية على جزئيات الصبغ الضوئى. بالرغم من أن العين الصغيرة عند ملك السراطين limulus يختلف عن المستقبلات الضوئية لدى الثديات إلا أنها تحمل العديد من السمات المشتركة مثل تشابه الأصباغ والخواص الكهربية الأساسية للخلايا. هذا يقود إلى اقتراح، أن الخصائص البسيطة لآلية الاحساس بالضوء تتبع من سلوك الخلايا المستقبلة للضوء نفسها وتظل نسبية من غير تعديل بواسطة الجهاز العصبى المركزى.

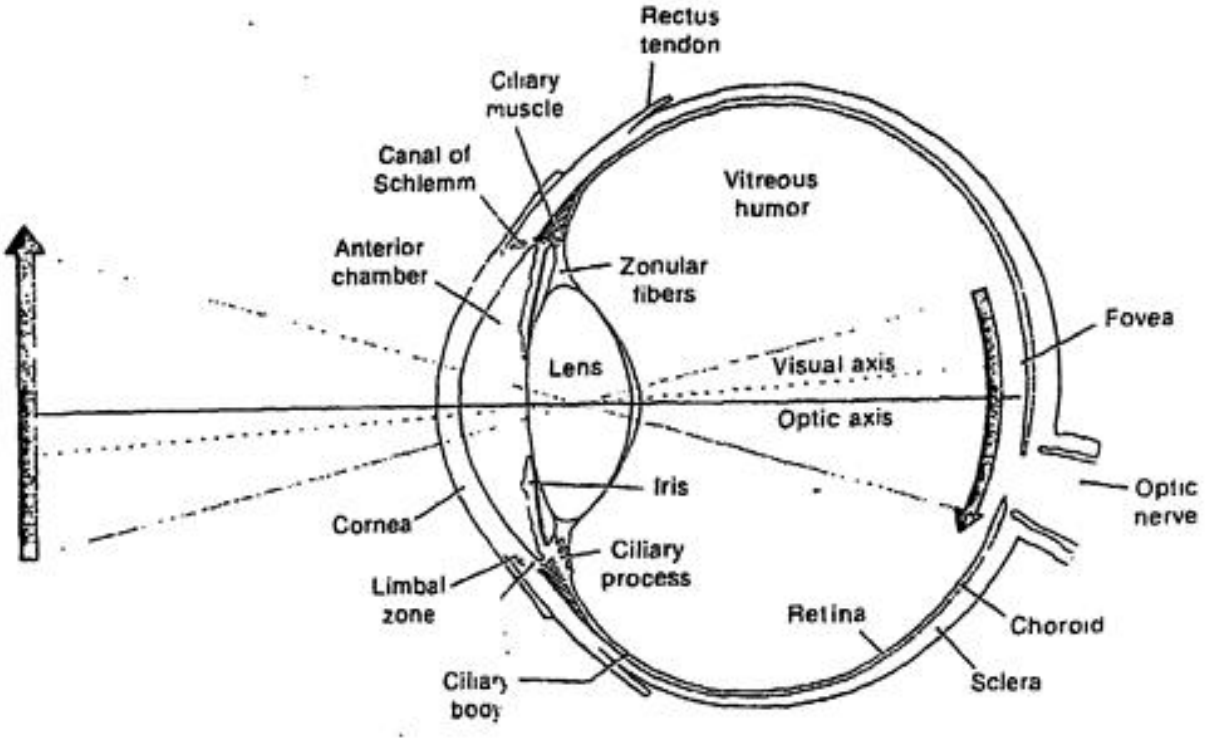


شكل 14-3 التشريح الوظيفى للعين الصغيرة ، العوثية (1) عين جانبية (2) عدسة (3) مستقبل ضوئى (4) زائدة شجيرية (5) خلية مركزية (6) محور

الخلايا التى تستجيب للاثارة بواسطة الضوء عند الفقاريات نوعين، العصى rods والمخاريط cones (الشكل 15-3)، وتوجد ضمن طبقة الشبكية retina داخل العين، التى تحتوى أيضا على العديد من التراكيب الأخرى (الشكل 16-3) مؤدية إلى التكامل الوظيفى للعين كعضو للابصار.



شكل 15-3 العصبي والمخاريط وتوجد على طبقة الشبكية (مأخوذة من عين الضفدع)
(1) الحلقة الخارجية (عصاه) (2) الحلقة الداخلية (3) النواة (4) الجسم التشابكى
(5) الحلقة الخارجية (مخروط) (6) اتجاه الضوء



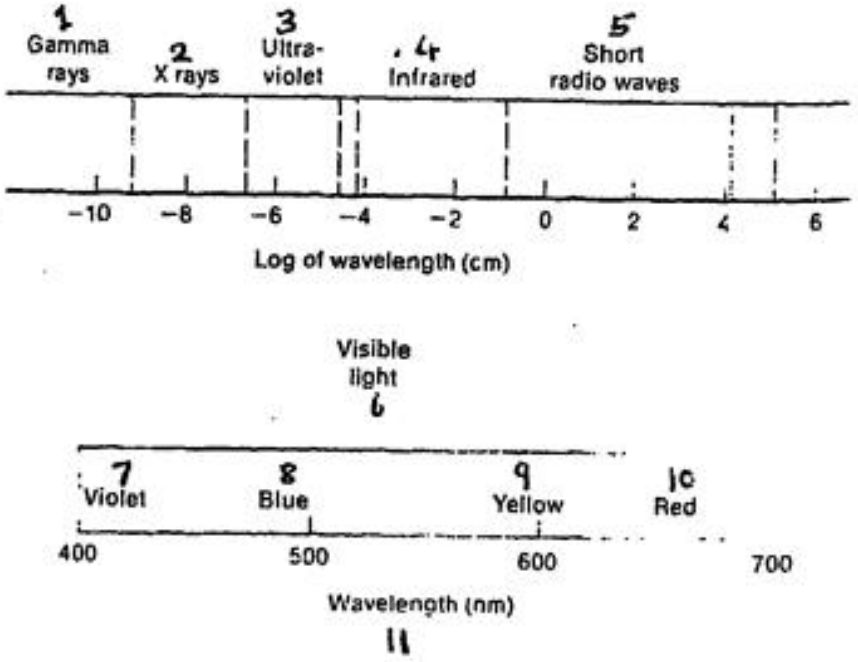
شكل 16-3 التشريح الوظيفى للعين عند الثديات (العام)

الأصباغ الضوئية :

نتناول فى ما يلى الأصباغ الضوئية photopigments أيضا تعرف بالأصباغ البصرية visual pigments إن الطيف الاشعاع spectrum الكهرومغناطيسى electromagnetic يمتد من أشعة جاما gamma rays التى يبلغ طول موجاتها 10^{-12}cm إلى موجات الراديو radio wavas التى يبلغ طول الموجة فيها 10^{6} cm (الشكل 17-3). يسمى الجزء الذى يقع بين 10^{-8} cm إلى 10-2 cm بالضوء light. يمكننا رؤية حيز صغير من هذا الجزء. ويتراوح ما بين 400nm إلى 740nm توجد تحت هذا الحيز الأشعة فوق البنفسجية ultraviolet اختصاراً UV وفوقه توجد الأشعة تحت الحمراء infraned اختصاراً IR . لا تستطيع الثديات بما فيها الإنسان رؤية أى من UV أو IR. بينما تستطيع

العين المركبة للحشرات مشاهدة UV أى تستطيع أن تميز الألوان التى تعكس UV وهى موجودة فى الطبيعة مثل الأزهار ولكننا لانستطيع مشاهدتها. تساوى الطاقة E (وتقاس بواسطة جرام. سعر حرارى للجزئ g.cal/ mol المحتواه داخل الكوانتم quantum من الشعاع ثابت بلانك planck's constant مقسوما على طول الموجة λ بالسنتيمترات

$$E = \frac{2.854}{\lambda} \text{ g. cal/mol}$$



شكل 3-17 الطيف الكهرومغنطيس The electromagnetic spectrum

(1) أشعة جاما (2) الأشعة السينية (3) الأشعة فوق البنفسجية

(4) الأشعة تحت الحمراء (5) موجات الراديو القصيرة (6) الضوء المرئى

(7) بنفسجى (8) أزرق (9) أصفر (10) أحمر (11) طول الموجة

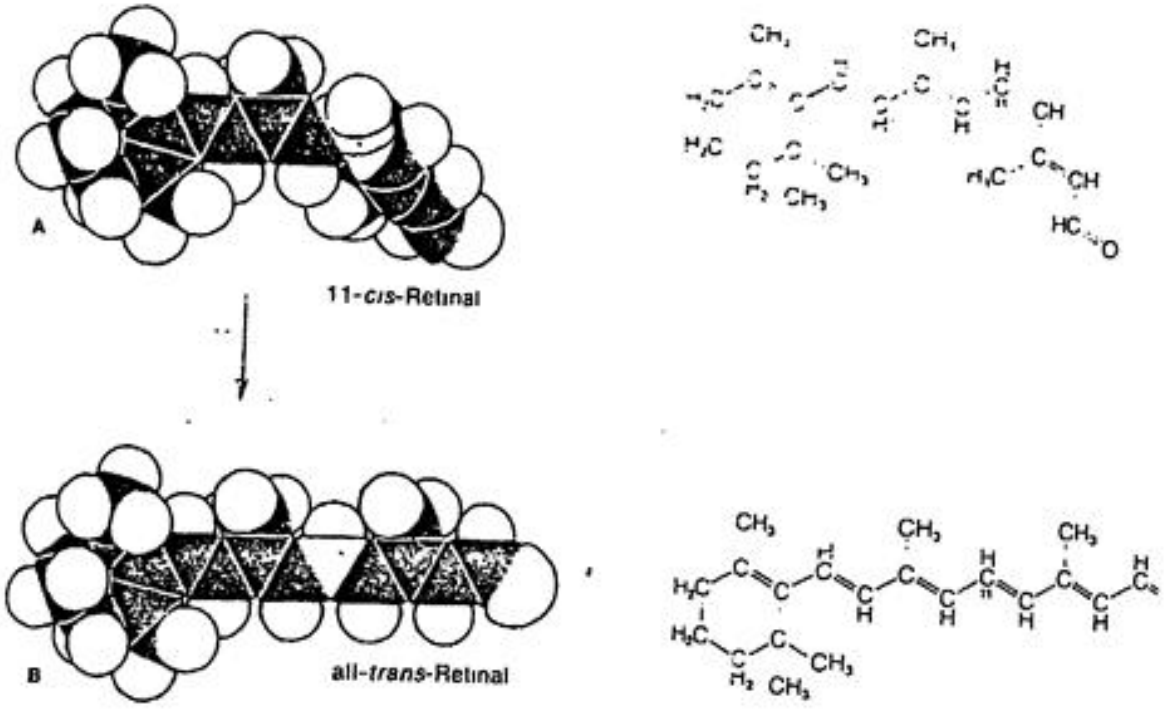
إذن تزداد الطاقة مع انخفاض طول موجة الشعاع فيكون للموجة القصيرة جداً 1nm طاقة عالية تستطيع أن تكسر الروابط الكيميائية. بينما يرى الموجات الطويلة جدا 1000 nm للطاقة وبذلك فهى لا تؤثر على تركيب الجزئيات.

الأصباغ الضبوئية التى تحتويها الخلايا أو العضيات للكائنات الحية والتى تطورت لتتمكن من احتواء الطاقة الموجودة فى ضوء الشمس. تم انتقائها نسبة لامتصاصها الأقصي بين هذه الحدود.

عند امتصاص كوانتم من الضوء بواسطة جزئ من أحد الأصباغ الضوئية فإنه يرفع طاقة الجزئ عن طريق اتساع القطر الذى تدور فيه الالكترونات المرتبطة بالروابط ثنائية الانواج conjugated double bonds. وهذا هو أساس تحويل الطاقة المشعة فى عملية التمثيل الضوئى، بواسطة النباتات الخضراء، إلى طاقة كيميائية. وهى كذلك أساس الاحساس بالرؤيا عند الحيوانات. من المهم أن نعرف أن كل الصبغات العضوية تمتلك خاصية التأثر بالطاقة الضوئية نتيجة لوجود سلسة أو حلقة كربونية لها روابط أحادية وروابط ثنائية موجودة بالتبادل alternating (الشكل 18-3). كل أصباغ الرؤيا التى تمت دراستها حتى الآن تحتوى على مكونين رئيسيين، جزء بروتينى أو بسين opsin ومجموعة إضافية prothetic كاروتينية carotenoid تستجيب للضوء بتغيير فى الشكل الذى يؤدى إلى تغيير فى شكل الأوبسين (الشكل19-3).

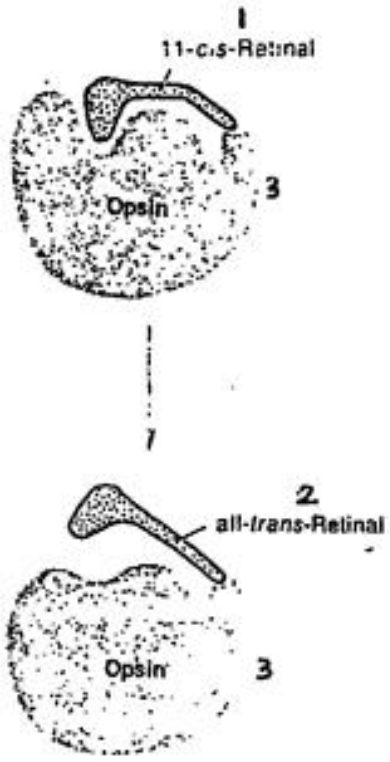
أحد الاصباغ البصرية ريتنال retinal ، موجود ضمن جزئ rhodopsin، وهو مشتق من فيتامين A_1 حيث يعاد تصنيعه من فيتامين A_1 الموجود فى الخلايا المشيمية.

نوع أخر من الكاريتينويد موجد فى خلايا الابصار ضمنى جزئ بورفيروبسين porphropsin هو 3-dehydroretinal الذى يختلف قليلاً عن رتينال وهو مشتق من فيتامين A_2.



شكل 18-3 جزئى الرتينال (A) عند الوضع المنحنى cis
(B) عند الوضع المستقيم trans عند تأثره بالضوء

يظهر توزيع كل من رودوبسين وبورفيروبسين مساراً بيئيا هاماً. ففى الفقاريات التى تعيش على سطح اليابسة يكون صبغ الابصار من مجموعة رودوبسين يوجد هذا الصنف أيضا عند اللافقاريات مثل الليميولس ، الحشرات والقشريات. بينما يكون صبغ بورفيروبسين أكثر شيوعا بين أسماك المياه العذبة وبعض البرمائيات. هذا وتتحول الأسماك التى تهاجر من المياه العذبة إلى المياه المالحة من البورفيروبسين إلى الرودوبسين نتيجة لأن امتصاص الأخير لموجات الضوء القصيرة (اللون الأزرق الذى يسود فى اعماق البحار) يكون عاليا.

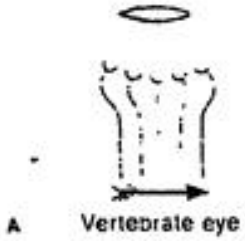


شكل 19-3 التغيرات التى تحدث لجزئى rhodopsin
عند تأثره بالضوء
(1) رتينال cis (2) رتينال trans (3) أوبسين

آليات الرؤيا

تمتلك جميع أنواع الحيوانات ، حتى وحيدة الخلية، وسائل تميز بواسطتها اتجاه الضوء وكذلك الاختلاف فى تركيزه. فى الحيوانات وحيدة الخلية والديدان المفلطحة flatworms يتم تحديد اتجاه الضوء بمساعدة صبغ عازل للضوء sercening pigment والذى يلقى ظلالاً على العضى الحساس للضوء. يوجد فى السوطيات flagellates التى لها عضى حساس للضوء عند قاعدة السوط، محجوب من جانب واحد بواسطة ما يعرف بنقطة العين eyespot (وهى التى تحتوى الصبغ) يساعد هذا العضى فى معرفة اتجاه الضوء. أكثر من ذلك تمتلك إحدى مجموعات بعض الحيوانات وحيدة الخلية البحرية عضيا يشبه العدسة مهمته تركيز الضوء على كوب الصبغ. بالرغم من امكانية تكوين صور خام بواسطة هذا العضى لكن ليس فى مقدور هذا الحيوان، وحيد الخلية ، تمييز الصور لأن تمييز الصور يتطلب أكثر من مجرد عدسة إذ يجب وجود آلية لتمييز المواضع المختلفة للصورة الضوئية. فى معظم العيون التى تتكون بداخلها

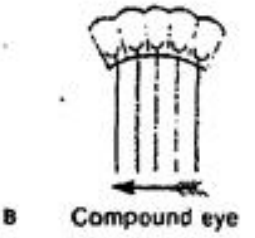
الصور يتم التعرف على الصورة بواسطة العديد من المستقبلات الضوئية الموجودة على الشبكية بحيث تستطيع كل خلية حس تمييز جزء واحد من الصورة ، المتكونة على الشبكية بواسطة العدسة (الشكل 20-3). كما يحدث داخل العين البسيطة للفقاريات ومنها ينتقل هذا النسق إلى الجهاز العصبى المركزى.



شكل 20-2 العين البسيطة وعند الفقاريات توجد عدسة وحيدة

أما بالنسبة للعين المركبة للمفصليات

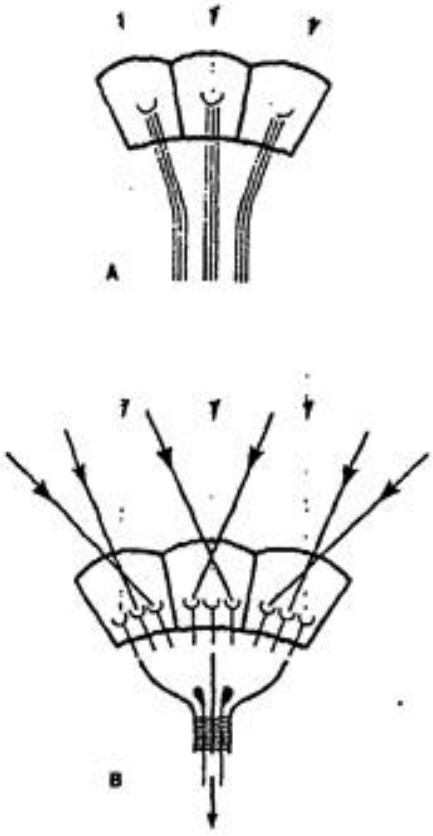
فيكون الوضع أكثر تعقيدا حيث يقوم كل عين صغيرة بتمييز مخروط حوالى 2 إلى 3° من مجال الرؤيا (الشكل 21-3). لذلك تكون الرؤيا أقل حدة عند اللافقاريات من نظيرتها عند الفقاريات التى تستطيع كل خلية تمييز 0.02° من مجال الرؤيا.



شكل 21-3 العين المركبة (عند المفصليات) لكل عوينة عدسة خاصة بها

النوع الآخر من العين المركبة موجود لدى الذباب flies حيث تنتظم خلايا الشبكية للعين الصغيرة في دائرة مفتوحة. عادة توجد خلية واحدة أو خليتين شبكيتين فى الوسط. فى هذه الحالة تميز كل عين جزء مختلف من مجال الرؤيا. ثم تقود خلايا الشبكية داخل العين المجاورة إلى شبكة عصبية واحدة بحيث

تنتهى حوالى 7 من هذه الخلايا والتى تشاهد عادة نفس المجال عند خلية عصبية بعد تشابكية واحدة (الشكل 22-3) ينتقل منها السيال إلى الجهاز العصبى المركزى.



شكل 22-3 نوعين للعين المركبة (A) كل الخلايا الشبكية الواحد تستجيب لنقطة منفصلة فى مجال الرؤيا (B) كل خلية شبكية داخل كل من 7 أو 8 استجيب لنقطة منفصلة فى مجال الرؤيا – ثم تتجمع الاستجابة عند خلية ثانوية مشتركة

تجميع مدخلات الخلايا الشبكية التى تستقبل نفس الإشارة الضوئية، يخدم فى تدعيم ترابط الصورة المرئية spatial coherence وفى الترجمة العصبية لمجال الرؤيا بواسطة الجهاز العصبى المركزى. تستطيع بعض الحشرات والقشريات أن تحدد اتجاهها بالنسبة للشمس حتى إذا حجبت السحب الشمس

عنها. معتمدة فى ذلك على الضوء المستقطب polarized لضوء الشمس على أجزاء السماء حسب موضع الشمس. لقد أكتشف أن بعض المفصليات تستطيع تمييز الاختلاف للمتجه الكهربى للضوء وتستخدم هذه المعلومات فى تحديد اتجاهها وفى عملية الابحار navigation.

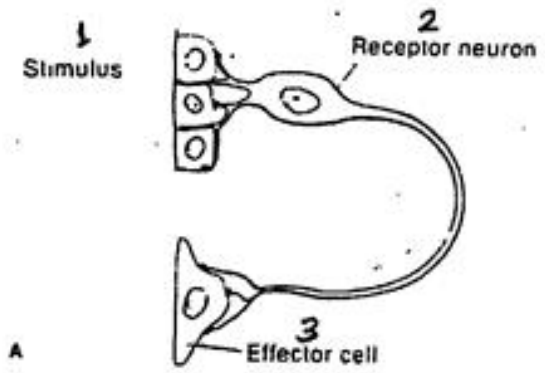
الفصل الرابع
تطور الجهاز العصبى

الفصل الرابع

تطور الجهاز العصبى

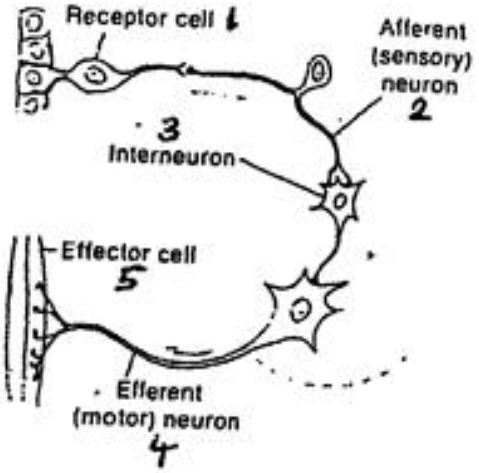
يعتبر السلوك الحيوانى أكثر جوانب الحياة إثارة. خاصة عندما نتجه من السلوك البسيط الناتج عن مؤثر مباشر إلى السلوك الأكثر تعقيداً والذى يعتمد على معلومات تم تجميعها وتخزينها نتيجة لممارسات ماضية لذلك لايمكن التنبؤ بها. بالنسبة للمشاهد، إذا جاز لنا أن نستعير لغة العصر «عصر تقنية المعلومات» بأن نطلق على السلوك تعبير برامج الكمبيوتر software فإن مكونات جهاز الكمبيوتر hardware يتكون من الشبكات العصبية neural networks وهى بالتحديد دوائر من الخلايا العصبية المترابطة ببعضها البعض. وهى تختلف عن الدوائر الكهربية فى امتلاكها لخاصية اللدونة plasticity أى أنها تملك المقدرة على أن تتعدل وظيفيا وإلى درجة ما تشريحيا كاستجابة للخبرة السابقة.

أبسط أنواع الشبكات العصبية يمثلها القوس المنعكس reflex arc والذى ربما احتوى فى بداياته على خلية مستقبلة تغذى خلية مستجيبة (الشكل 1-4)



الشكل 1-4 رسم افتراضى لقوس منعكس بدائى
(1) مؤثر (2) خلية مستقبلة (3) خلية مستجيبة

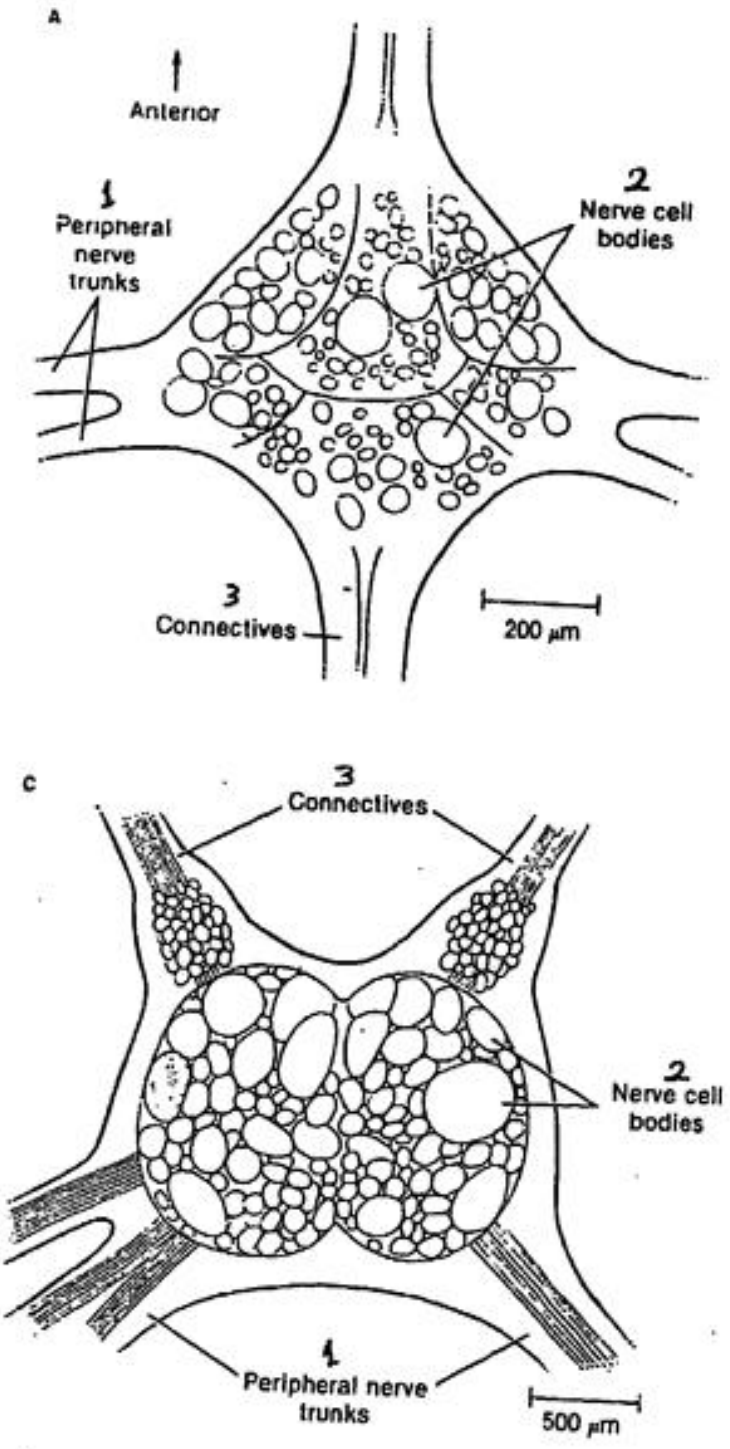
مع تعقيد الدوائر العصبية نشأت أجهزة عصبية مركزية تسمح بتركيز الخلايا العصبية فى حيز ضيق، كذلك أصبحت مناطق الوصل أكثر تعقيدا وقد أتاح المحور الطويل لخلايا الحس sensory والحركة motor والذى يتجمع فى شكل



شكل 3-4 قوس منعكس متعدد التشابك (1) خلية مستقبلة (2) خلية عصبية واردة (حسية) خلية بين عصبية (4) خلية عصبية صادرة (حركية) (5) خلية مستجيبة

أولى أشكال التطور للجهاز العصبى هو انتظام الخلايا العصبية فى شكل عقد ganglia (المفرد ganglion) أول ما ظهرت فى اللاحشويات وقد وجدت بعد ذلك فى كل الأنواع العليا الأخرى. تحتوى العقدة (الشكل 4-4) على أجسام العديد من الخلايا العصبية. يوجد لدى اللافقاريات الحلقية segmented عقدة واحدة فى كل حلقة. عادة تقوم العقدة بوظائف الحلقة الموجودة بداخلها زائداً وظائف واحد أو أكثر من الحلقات المجاورة. ترتبط العقد المتتالية بواسطة آليات عصبية، التى تصل العقد ببعضها البعض مكونة بذلك الحبل العصبى الأمامى ventral nerve cord الذى يوجد لدى الدودة الحلقية annelids والمفصليات (الشكل 4-5) .

* أحد أهم التطورات فى نشوء السلوك المعقد هو الاتجاه نحو التحام العديد من العقد الموجودة فى المقدمة مكونة العقدة الكبيرة superganglion أو المخ brain . وتكون هذه أكثر تعقيدا من العقد الحلقية وتظهر نوعا من التحكم فى وظيفة هذه العقدة. يعزى الازدياد فى حجم المخ بالنسبة للأجزاء الأخرى للكم الهائل نسبيا للمدخلات الحسية الواردة إليه من العدد الكبير لأجهزة الاحساس الموجودة فى مقدمة الحيوان. وكذلك نتيجة لتطور مراكز التنظيم داخل المخ التى تقوم بطريقة مباشرة أو غير مباشرة، عن طريق الهرمونات، بتنظيم وظائف الجسم.

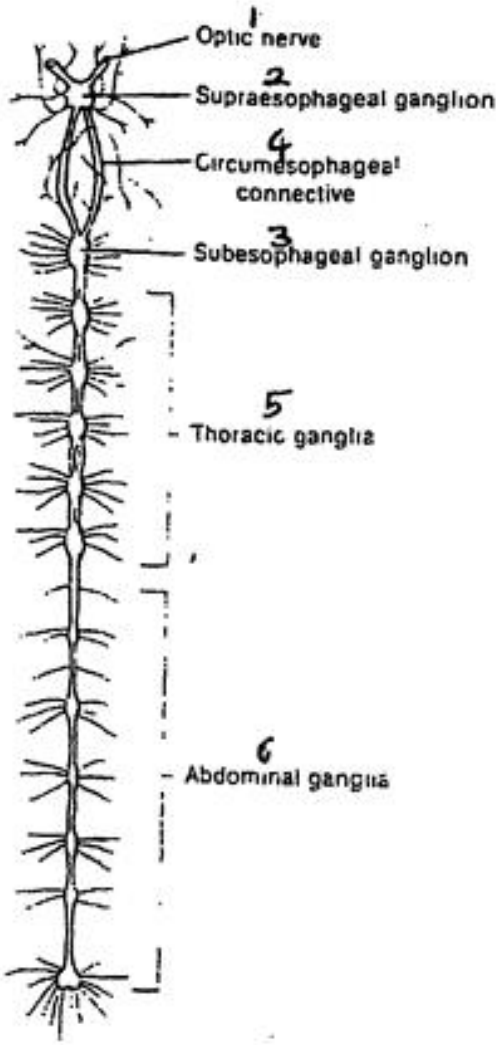


شكل 4-4 وجود العديد من الخلايا العصبية داخل العقد gang lia عند اللافقاريات

(A) علق-طفيل leech g. of segmental القدد الحلقية

(B) حيوان رخوى slug g. of aldominerl القدد البطنية

(1) الترنك العصبى الطرفى (2) أجسام الخلايا العصبية (3) connectives



شكل 5-4 الحبل العصبى الأمامى لل lobster ويظهر فيه التنظيم الحلقى scymentry

(1) العصب البصرى (2) عقدة فوق المرئ (3) عقدة تحت المرئ

(4) العصب الضام الرابط connectives يحيط بالمرئ (5) العقد الصدرية (6) العقد البطنية

نتيجة للتماثل الشعاعى radial symmetry لا تمتلك قنفذيات الجلد echinoderms عقدة شبيهة بالمخ كالتى توجد لى الديدان الحلقية والمفصليات التى لها تماثل جانبى bilateral. للرخويات molluscs عقد غير متشابهة وغير حلقية متصلة بألياف عصبية طويلة. بينما نجد أكثر الأجهزة العصبية تعقيدا بين

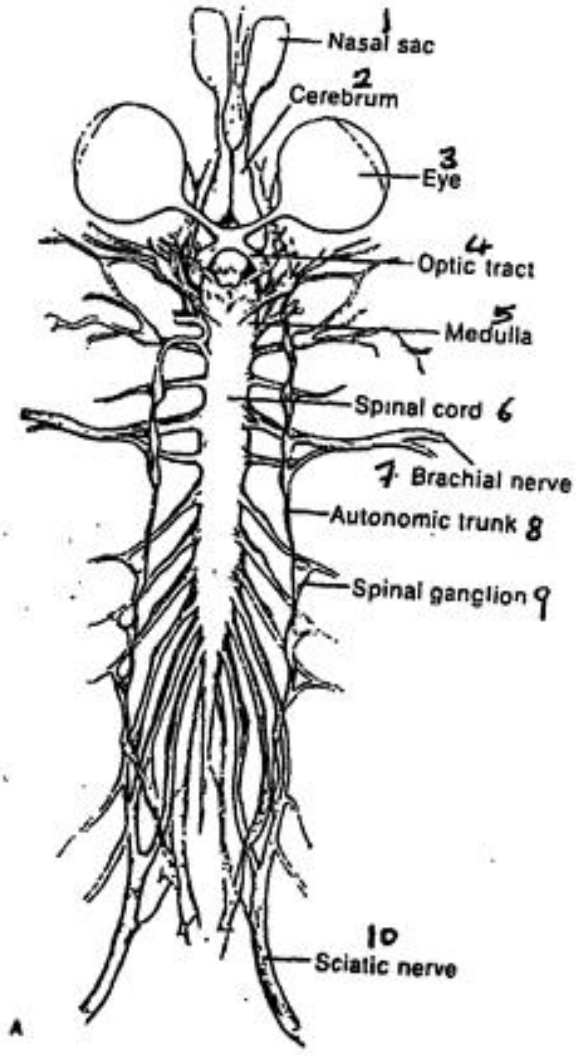
اللافقاريات لدى الاخطبوط octopus حيث يكون حجم المخ كبيرا إذ يحتوى على 108 خلية عصبية. كما إن ظاهرة وجود مخ فى مقدمة الحيوان تكون اكثر تطورا عند الفقاريات منه عند اللافقاريات بالرغم من وجود لدى الأولى بعض السمات الأثرية rudimentary فى مسارات العصب الرأسى والشوكى spinal (الشكل 4-6). بالرغم من التركيب المعقد للجهاز العصبى إلا أنه يخضع لبعض القوانين الثابتة. ينص أحدها، قانون بل – مجندى Bell-Magendie rule، على أن الألياف العصبية الواردة efferent (الحسية) تدخل CNS عن طريق المسارات الخلفية للأعصاب الرأسية والشوكية، بينما تخرج الأعصاب الصادرة afferent (الحركية motor) من CNS عن طريق المسارات الأمامية مع وجود بعض الاستثناءات لهذا القانون.

هنالك ظاهرة وجود وفرة redundancy كبيرة فى الخلايا العصبية للفقاريات. إذ بينما نجد فى بعض المفصليات أن الخلية العصبية الواحدة تقوم بتغذية جميع الألياف العضلية لأحدى العضلات وفى البعض الآخر تغذى الخلية الواحدة أكثر من عضلة لأحد الأطراف. من ناحية أخرى نجد عند الفقاريات تتم تغذية العضلة الهيكلية الواحدة بواسطة عدة مئات من الخلايا الحركية. تتحكم كل منها فى وحدة حركية motor unit وهذه تتكون عادة من حوالى 100 ليفة عضلية وقد تصل أحيانا 2000 ليفة.

4-1 الأجزاء الرئيسية للجهاز العصبى المركزى للفقاريات:

يمر الحبل الشوكى Spinal cord داخل تجويف العمود الفقارى (الشكل4-7) وهو موضع الارتباط بين الاقواس المنعكسة التى منشؤها العنق، الصدر ، البطن أو العجز. عند النظر إلى قطاع عرضى للحبل الشوكى (الشكل 4-8) تكون الخلايا البينعصبية الصاعدة حسية والهابطة حركية وتوجد أليافها على محيط الحبل الشوكى مكونة المادة البيضاء white matter (يكون اللون

الأبيض نتيجة للغلاف النخاعى للمحور) . بينما يتكون وسط الحبل الشوكى من المادة الرمادية grey matter التى تحتوى على جسم الخلية، الزوائد الشجيرية والنهايات التشابكية. توجد قناة فى وسط الحبل الشوكى وهى امتداد للتجاويف ventricles داخل المخ.

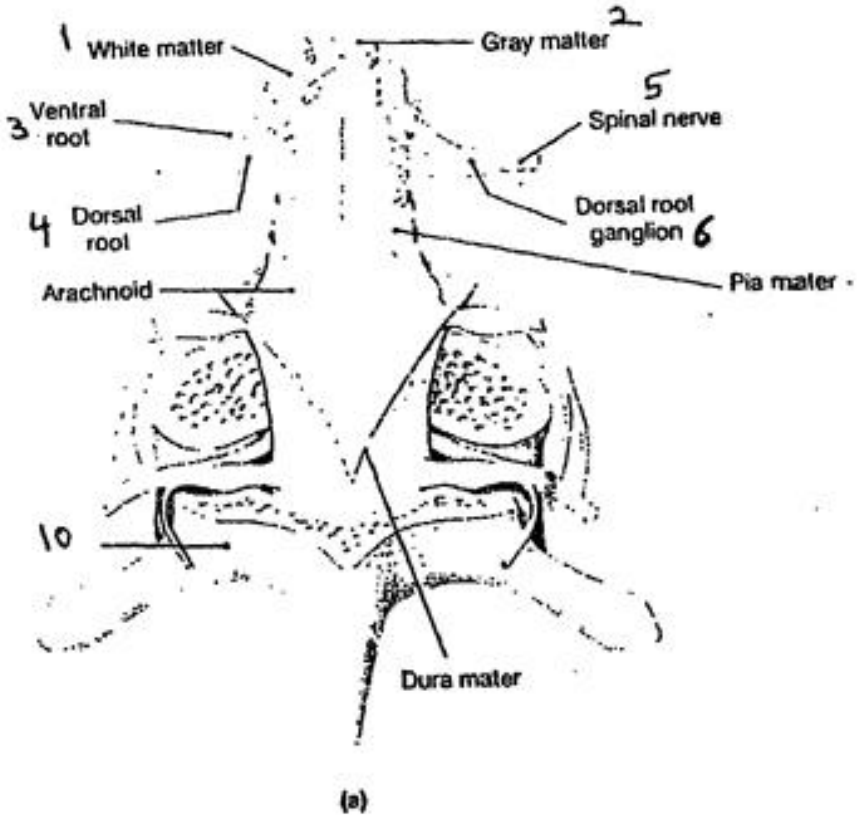


شكل 6-4 المخ والحبل الشوكى للضفدع

(1) كيس الشم (2) cerebrum (3) عين (4) المسار البصرى

(5) النخاع (6) الحبل الشوكى (7) عصب عضدى/ذراعى brachial (8) الترنك المستقل

(9) العقد الشوكية (10) العصب الوركى sciatic



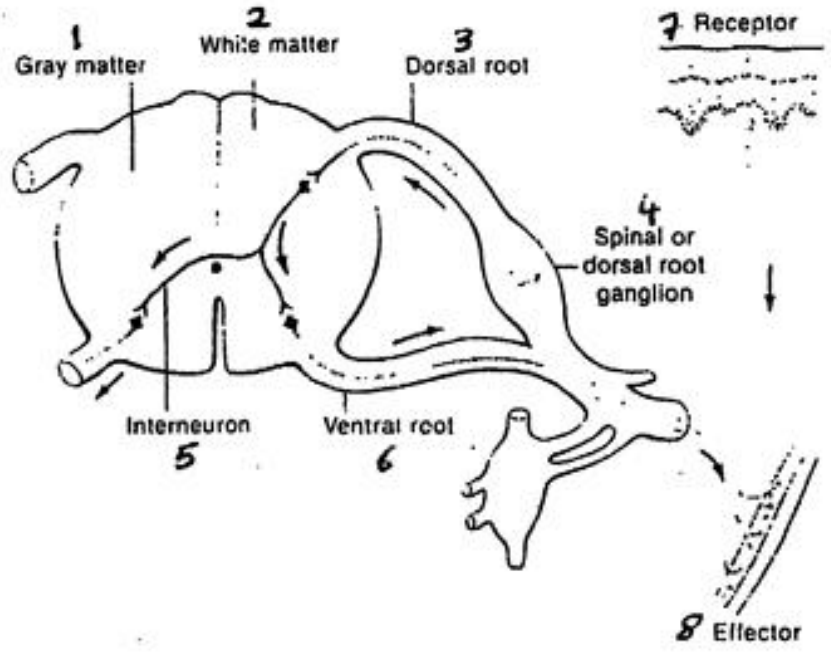
شكل 7-4 العمود الفقارى وبداخله الحبل الشوكى (1) المادة البيضاء (2) المادة الرمادية (3) مسار امامى (4) مسار خلفى (5) عصب شوكى (6) عقدة (10) فقارة

* يكون الجزء العلوى من الحبل الشوكى (أى المقدمة) النخاع المستطيل medulla oblongata (الشكل 4-6 و الشكل 4-9) يحتوى النخاع المستطيل على مراكز للتحكم فى التنفس والقلب والجهاز الدورى بينما يحتوى الحبل الشوكى على التوصيلات العصبية المسئولة عن حركة الأطراف وبعض وظائف الاحشاء.

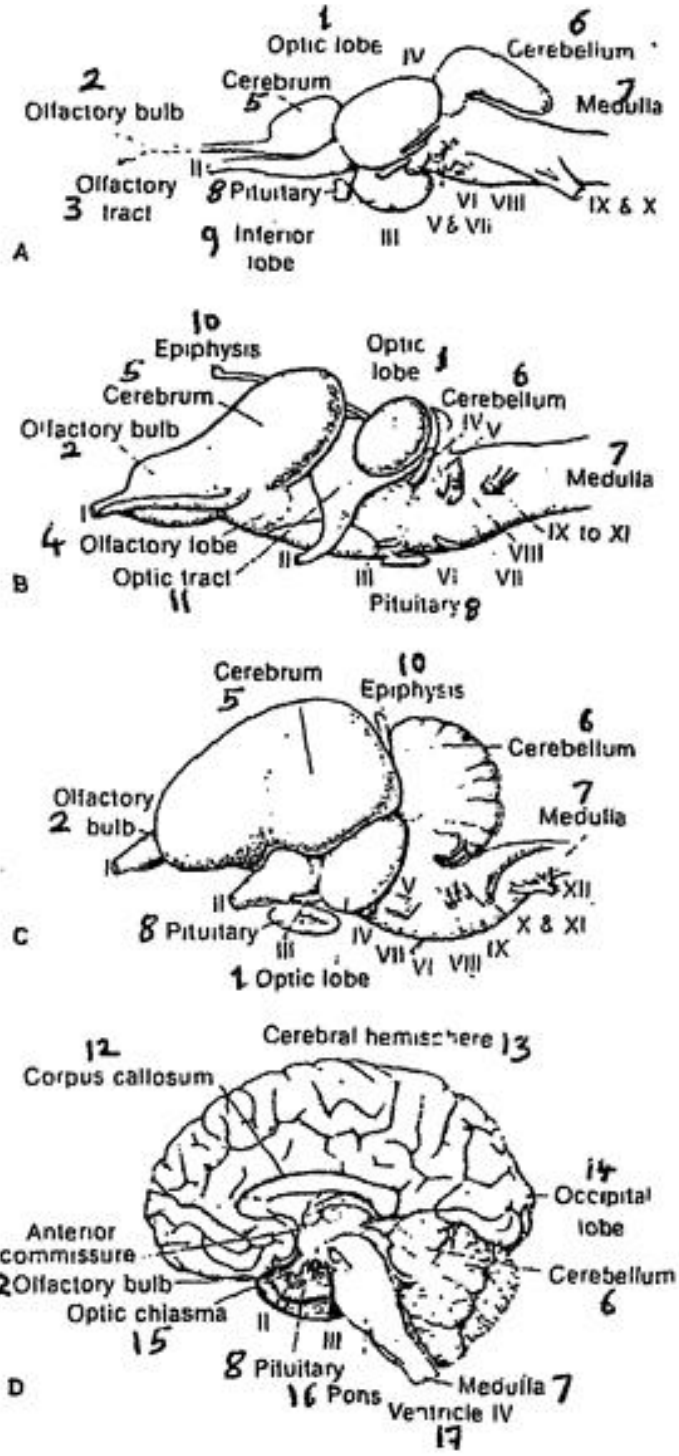
* يوجد المخيخ cerebellum (الشكل 4-9) فى مقدمة النخاع المستطيل ويتكون من جزئين فى شكل نصف كروى تكون ملتفة convoluted عند الفقاريات العليا. يتم داخل المخيخ معالجة المعلومات الواردة (أى المدخلات) من القنوات الهلالية وغيرها من المستقبلات الميكانية ومن الجهازين البصرى والسمعى . بعد

ذلك تتكامل هذه المدخلات ويساعد الناتج فى تناسق coordinate الاشارات الحركية المسئولة عن انتصاب القامة posturce، تحديد وجهة الحيوان وكذلك حركة الأطراف المناسبة.

* تحتوى تحت المهاد hypothalamus (لايظهر فى الشكل 9-4) ولكن موضعه فوق الغدة النخامية مباشرة) على العديد من المراكز التى تتحكم فى وظائف الأحشاء والعواطف المصاحبة للتغذية، الشرب، الاتصال الجنسى، الفرح، الغضب، والتحكم فى درجة حرارة الجسم. تتحكم بعض الخلايا العصبية- الافرازية لتحت المهاد فى توازن الماء والملح فى الجسم وكذلك فى وظيفة الغدة النخامية التى تتحكم بدورها فى افراز الهرمونات بواسطة معظم الغدد الصماء داخل الجسم.



شكل 8-4 قطاع عرضى للحبل الشوكى للفقاريات
(1) المادة الرمادية (2) المادة البيضاء (3) المسار الخلفى (4) عقدة (5) المسار الامامى
(6) خلية بينعصبية (7) مستقبل (8) مستجيب



شكل 9-4 التشريح الوظيفى للمخ عند الفقاريات المختلفة

(A) سمك (B) ضفدع (C) طائر (D) ثديى (إنسان)

لاحظ الازدياد التدريجى فى حجم الـ cerebrum ، كذلك كبر حجم الـ cerebrum ، فى الطيور والثديات . تشير الارقام الرومانية للأعصاب الرأسية .

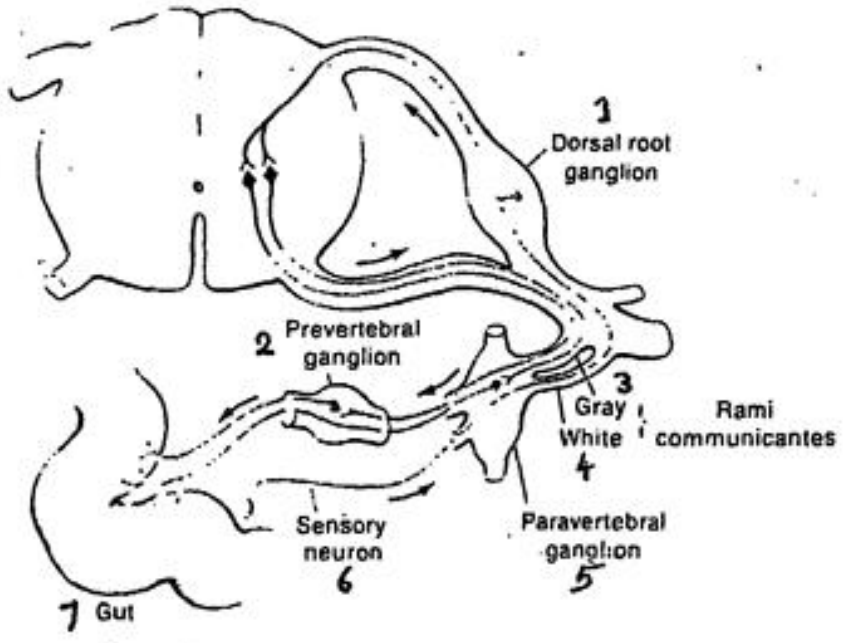
(1) الفص البصرى lobe

* القشرة فى الثديات العليا تكون القشرة cortex ، وهى عبارة عن الطبقة السطحية لنصف كرة المخ وتتكون من المادة الرمادية وتحتوى على أعمدة متراصة فى غاية التنظيم قوامها أجسام الخلايا العصبية. توجد القشرة ثنيات folds واضحة للعين وهى تؤدى إلى زيادة كبيرة فى مساحة بالقشرة. هذا وتكون بعض مناطق القشرة مناطق احساس فقط. بينما يكون البعض الآخر مناطق حركة فقط. مثال للمناطق المقصورة على الاحساس، القشرة السمعية auditory cortex الموجودة ضمن الفص الصدغى temporal lobe وكذلك القشرة البصرية visual cortex الموجودة على الفص القذالى occipital lobe .

توجد فى الثديات العليا مناطق غير مخصصة للاحساس أو للحركة. تختص هذه المناطق فى الربط بين الحواس، التعلم والذاكرة وكذلك اللغة عند الانسان.

4-2 الجهاز العصبى المستقل :

يتم تنظيم وظيفة الأحشاء عند الفقاريات بواسطة الجهاز العصبى المستقل الذى يقع خارج الجهاز العصبى المركزى. يوضح الشكل (10-4)

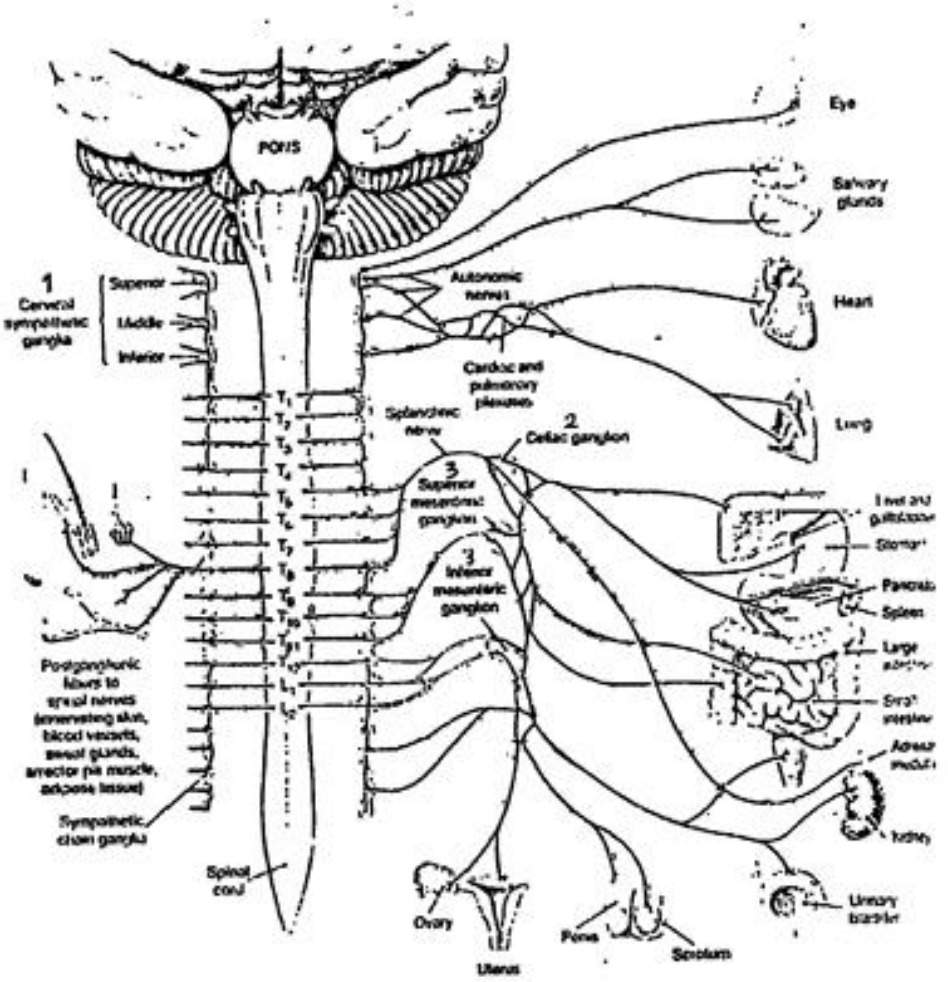


شكل 10-4 قوس منعكس للجهاز العصبى المستقل :
(1) عقدة خلفية (2) عقدة بطنى prevent (3) موصل رمادى (4) موصل أبيض
(5) عقدة جانبيه (6) خلية عصبية حسية (7) المعى

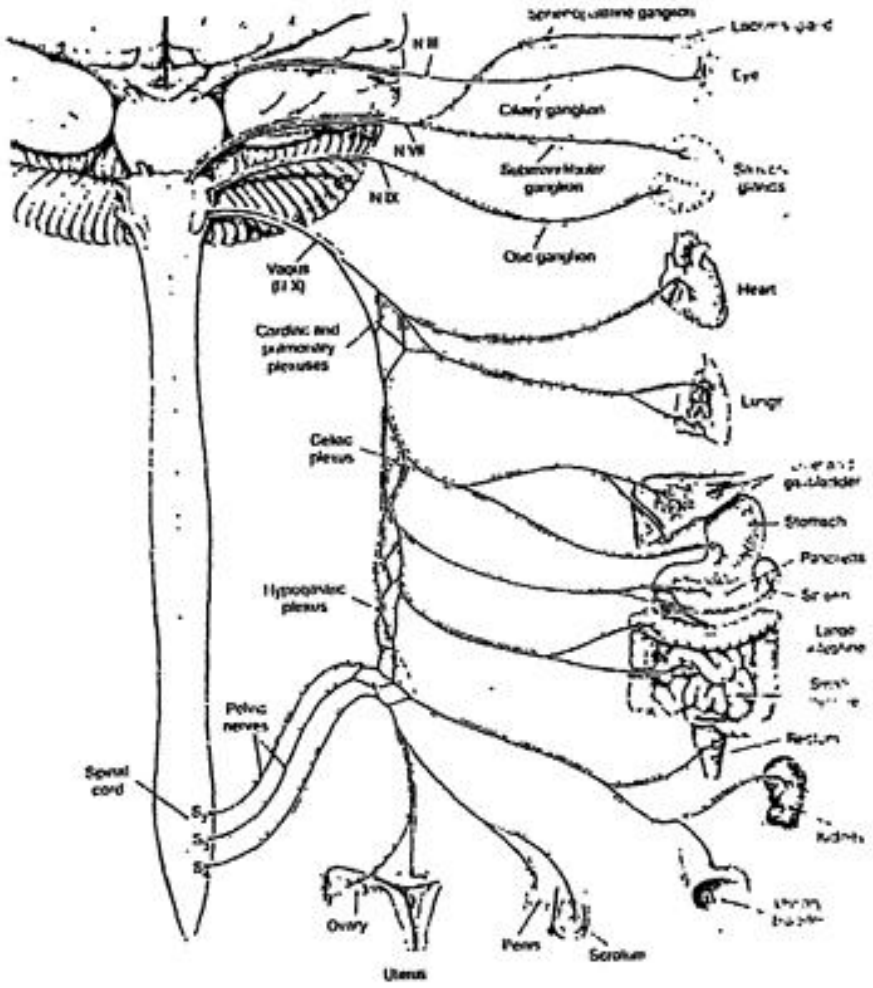
القوس المنعكس للجهاز المستقل. هذا ولا يختلف الجزء الوارد (الحسى) عن القوس المنعكس الجسدى somatic (الشكل 7-4) فى الحقيقة يمكن لاحدى الخلايا الحسية أن تغذى كل من القوسين. يختلف القوس المنعكس للجهاز العصبى المستقل عن القوس الجسدى بالنسبة لوضع الألياف الصادرة (الحركية). إذ يقع جسم الخلية البعد عقدية postganglionic للجهاز المستقل خارج CNS. بينما يقع جسم الخلية للعصب الصادر داخل المادة الرمادية للحبل الشوكى فى حالة القوس الجسدى.

تنشأ الخلايا قبل تشابكية للجهاز العصبى الودى أو السمبتاوى (أيضا يعرف بالجهاز الصدر بطنى thoracolumbar) من الجزء الصدرى والبطنى للحبل الشوكى (الشكل 11-4) ثم تتشابك مع الخلايا البعد تشابكية عند سلسلة العقد الموجودة خارج العمود الفقارى paravertebral . بينما ينشأ الجهاز نظير الودى أو نظير سمبتاوى para sympathetic (أو الجهاز الرأسى – عجزى craniosacral) من المخ ومن الجزء العجزى للحبل الشوكى – (الشكل 12-4). عادة تتشابك خلايا الجهاز النظير سمبتاوى مع الخلايا البعد عقدية عند أو بالقرب من أعضاء الأحشاء التى تقوم بتغذيتها بدلا عن عقد منفصلة كما فى الجهاز السمبتاوى.

يقوم الجهازين السبمتاوى ونظير السمبتاوى بتغذية نفس الأعضاء، لكنهما عموما يفرزان مادة كيميائية أو ناقلة عصبية مختلفة ولهما فعالية متضادة على وظيفة العضو. مثلا يتم تثبيط وظيفة جهاز الاثارة للقلب عن طريق استيل كولين الذى يتم تحريره بواسطة العصب نظير السمبتاوى. بينما يتم تنشيط الوظيفة ذاتها بواسطة نورابينفرين الذى يتم تحريره بواسطة العصب السمبتاوى. هذا وتنعكس وظيفة الجهازين هذه بالنسبة للوظيفة الافرازية للقناة الهضمية حيث يتم تنشيط الافراز بواسطة استيل كولين ويتم تثبيطة بواسطة نورابينفرين ولايفوتنا



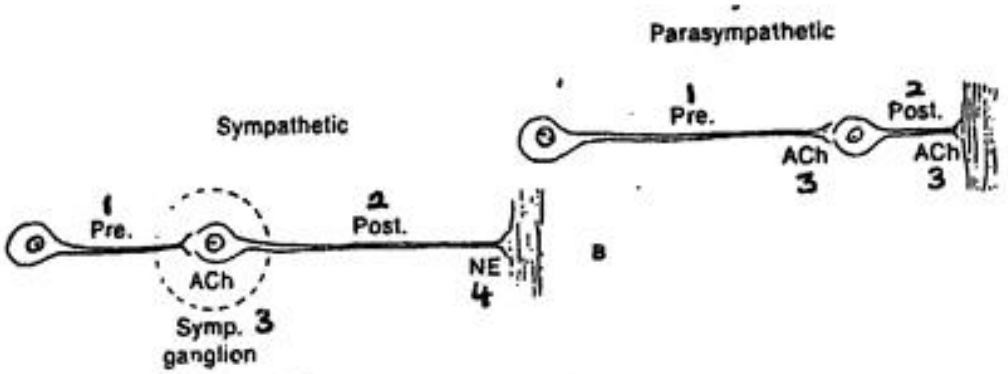
شكل 11-4 الجهاز العصبى السمبتاوى يوضح عن طريق الرسم الأعضاء والاجهزة التى تغذيها الأعصاب السمبتاوية (1) عقد عنقية (2) عقدة تجويف بطنية (3) معوية



شكل 12-4 الجهاز العصبى نظير السمبتاوى يوضح عن طريق الرسم الأعضاء والاجهزة التى يغذيها العصب نظير السمبتاوى
تشير الارقام الرومانية للأعصاب الرأسية

ذكر احدى الوظائف الهامة للجهاز السمبتاوى فهو يساعد فى تهيئة الحيوان لمواجهة الضغوط أو الخطر بتحفيز آليات الدفاع الضرورية «للقتال أو الهرب fight or flight» .

* الناقلة العصبية الرئيسية التى يتم تحريرها بواسطة خلايا العصب نظير السبمتاوى القبل والبعد عقدية هى استيل كولين. بينما تفرز خلايا العصب السميتاوى القبل عقدية استيل كولين وتفرز الخلايا البعد عقدية نورابينفرين (الشكل 13-4).



شكل 13-4 رسم مبسط للخلايا (A) العصبية السمبتاوية (B) والنظير سمبتاوية
(A) تفرز الخلايا القبل عقدية استيل كولين وتفرز البعد عقدية نورا بينفرين
(B) تفرز الخلايا القبل والبعد عقدية استيل كولين

4-3 بعض خصائص الجهاز العصبى

بالرغم من الدرجة العالية التعقيد للجهاز العصبى لكن يمكننا اقتراح العديد من التعميمات عن تنظيم ووظيفة الجهاز العصبى.

التعميم الأول هو أن الجهاز يتكون تشريحيا من مناطق وصل محددة ومعينة بين الخلايا مكونة بذلك الشبكات العصبية للجهاز. هذا ويتم تأسيس الدوائر العصبية أثناء النمو ويتم تعديلها خلال فترة حياة الحيوان عن طريق

استخدامها. ويؤدى عدم الاستخدام إلى فقدان الوظيفة. مثال ذلك، عند تغطية عينى القط خلال فترة حرجة بعد الولادة يحدث ضمور فى وظيفة الابصار.

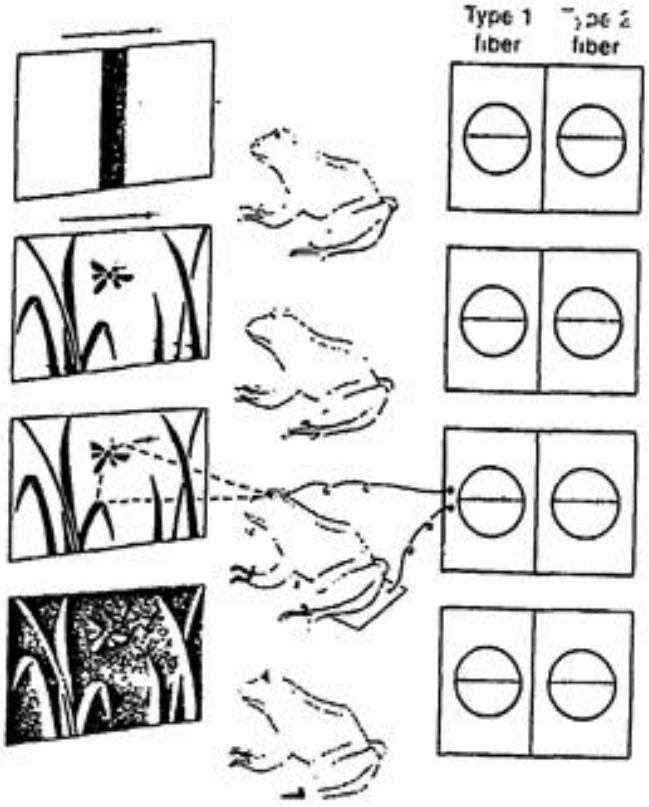
أما التعميم الثانى فيمكن تصنيف الشبكات العصبية إلى العديد من الأصناف.

(١) مرشح احساس sensony filter

(٢) مولد للنمط pattern generating

(٣) مبرمج مركزى centrally programmed

نأخذ بالدراسة مرشح الاحساس ووظيفته حجب جميع المدخلات الحسية ماعدا بعضها. أكثر الدراسات التى أجريت على هذه الظاهرة كانت على الدوائر الحسية البصرية. يختلف الجهاز البصرى عن جهاز التلفاز الذى يتم فيه تحويل المعلومات، أى الاشارات الضوئية، من نقطة إلى نقطة من أنبوب أشعة الكاثورphotocathode لكاميرا التلفاز إلى الشاشة الفوسفورية للجهاز المستقبل. أما جهاز الابصار فهو يختار بعض الخصائص من مجموع المدخلات التى تصل العين ويتجاهل الباقى. يوضح الشكل (14-4) مثالا تقليديا لعملية الترشيح الحسى عند تسجيل نشاط العصب البصرى لعين الضفدع. يتضح من هذه التجربة أن بعض الألياف تستجيب فقط الخصائص المعينة لمجال الرؤيا. يرسل أحد أنواع الألياف سيالاً كاستجابة فقط عندما يتحرك جسم صغير، مثل الذبابة، أمام خلفية مضيئة تحتوي على أجسام لاتتحرك مثل أوراق العشب. وجد أن هذه الألياف لا تستجيب إذا حركنا كل المشهد أو إذا أضاءنا النور وأطفيناه كذلك لا تستجيب الألياف عند مشاهدة ذبابة لا تتحرك. هذا يفسر لماذا لا تتغذى الضفادع على الحشرات الميته. لأن ما يحفز عملية التغذية عند الضفدع هو مدخل بصرى لجسم صغير يتحرك أمام خلفية ثابتة وليس غير ذلك.



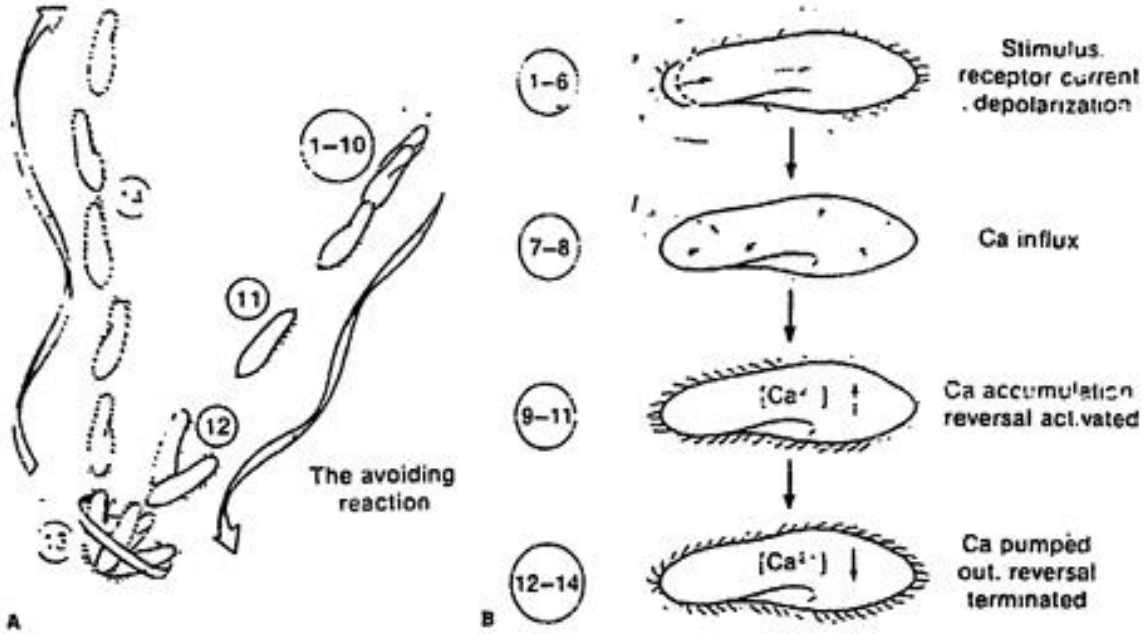
الشكل 14-4 عملية الترشيح الحسى عند تسجيل نشاط العصب البصرى لعين الضفدع
(راجع النص)

4-4 سلوك بعض الحيوانات التى لا تمتلك جهازاً عصبيا :

تظهر الحيوانات وحيدة الخلية مقدرة على اكتشاف المؤثرات وينعكس ذلك كتغيير فى سلوكها (تتحرك مثلا) كاستجابة لهذه المؤثرات. هذا ويمكننا القول أن لبعض الحيوانات وحيدة الخلية ذاكرة وإن كانت أثرية rudimentary تؤثر على سلوكها. ولكن كيف يمكننا تفسير ذلك فى غياب جهاز عصبى؟

حينما يصطدم أحد الحيوانات المهدبة ciliates مثل البارامسيوم paramecium بجسم غريب عند طرفه الأمامى فإنه يسبح للخلف مسافة قصيرة

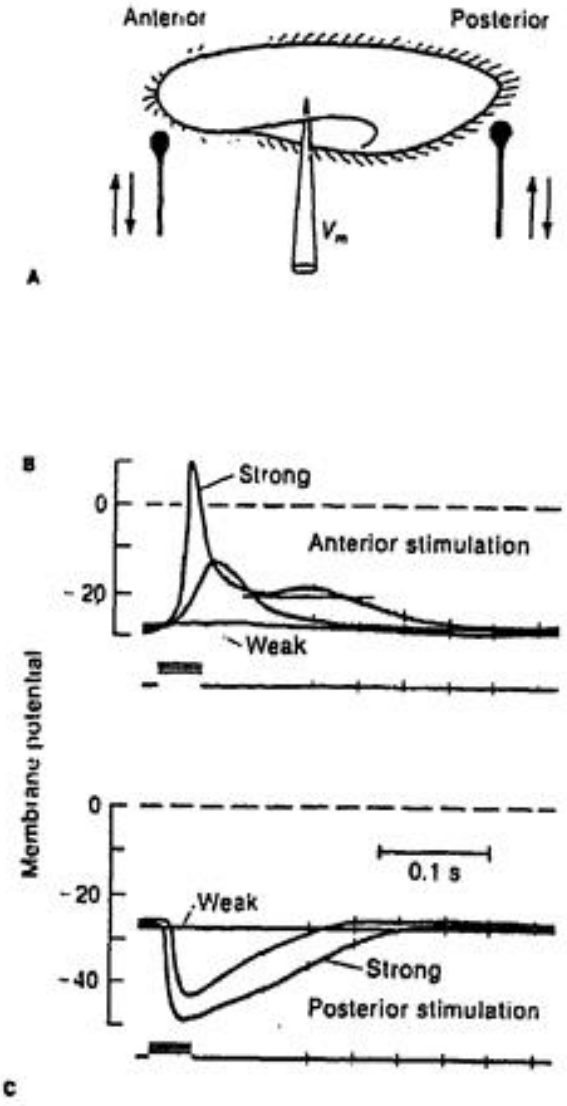
ثم يدور مرتكزا علي الطرف الخلفى ومن ثم يتحرك إلى الأمام بميلان عن مساره الأول (الشكل 15-4). وبهذا السلوك فهو يتحاشى المؤثر. علي عكس ذلك حينما يصطدم الباراسيوم عند الطرف الخلفى فهو يندفع سابحاً إلى الأمام بسرعة أكبر وبهذا السلوك فهو يهرب من المؤثر. بالرغم من أن هذه الاستجابات تبدو وكأنها ذات هدف- لكن أوضحت الدراسات الفزيولوجية أنها نتيجة لحركة الأيونات الناتجة عن مؤثر ميكانى.



شكل 15-4 الباراميسيوم يستجيب لملامسة جسم غريب عند طرفه الأمامى يتراجع للخلف ثم يستدير ويتحرك فى نفس الاتجاه ولكن بزاوية مختلفة

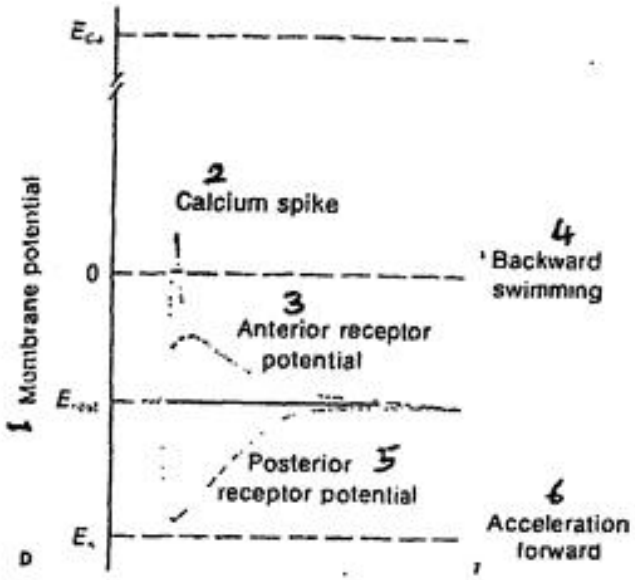
يتم التحكم فى معدل سرعة واتجاه حركة الأهداب عن طريق جهد الغشاء. تجعل ازالة الاستقطاب depdorization الاهداب تعكس ضربتها بذلك يسبح الحيوان إلى الخلف. بيما تؤدى حالة الاستقطاب الزائدة hyperpolarization إلى التسارع للأمام مما يجعل الحيوان يسبح فى هذا الاتجاه. يمكن احداث كل من ازالة الاستقطاب وحالة الاستقطاب الزائدة فى غشاء الخلية الخلفى والأمامى على التوالى عن طريق الاثارة الميكانية (الشكل 16-4) هذا يقودنا للسؤال

التالى، ما الذى يجعل الطرفين المختلفين للبارمسيوم يظهران استجابة مختلفة لنفس المؤثر ؟



شكل 4-16 :A يتم اثارة الطرف الأمامى والخلفى لحيوان البارامسيوم
(B) عند اثارة الطرف الأمامى تحدث ازالة استقطاب .
(C) عند اثارة الطرف الخلفى تحدث حالة استقطاب زائدة .

أظهرت التجارب أن اثارة الجزء الأمامى تؤدى إلى ازدياد فى نفاذية الغشاء لأيون الكالسيوم ولأن تركيز Ca2+ يكون أعلى فى الخارج لذلك يندفع إلى داخل الخلية متسبباً فى إزالة استقطاب الغشاء . بينما تؤدى إثارة الجزء الخلفى بنفس المؤثر الميكانى إلى ازدياد فى نفاذية الغشاء لأيون البوتاسيوم حيث يندفع K^+ إلى خارج الخلية مسببا حالة الاستقطاب الزائدة للغشاء (الشكل 4-17) هذا يؤدى إلي تسارع الحيوان للأمام.



شكل 4-17 حالة ازالة الاستقطاب ناتجة عن اندفاع Ca^{2+} لداخل الخلية كاستجابة للمؤثر الميكانى على الطرف الأمامى للحيوان فيتحرك الحيوان نحو الخلف .
حالة الاستقطاب الزائدة ناتجة عن اندفاع K^+ إلى خارج الخلية كاستجابة للتأثر على الطرف الخلفى فيتسارع الحيوان للامام .
(1) جهد الغشاء (2) ذروة C^{2+} (3) الجهد عند الطرف الامامى (4) يسبح للخلف
(5) الجهد عند الطرف الخلفى (6) يتسارع للأمام

4-5 تحديد الاتجاه بواسطة الحيوانات

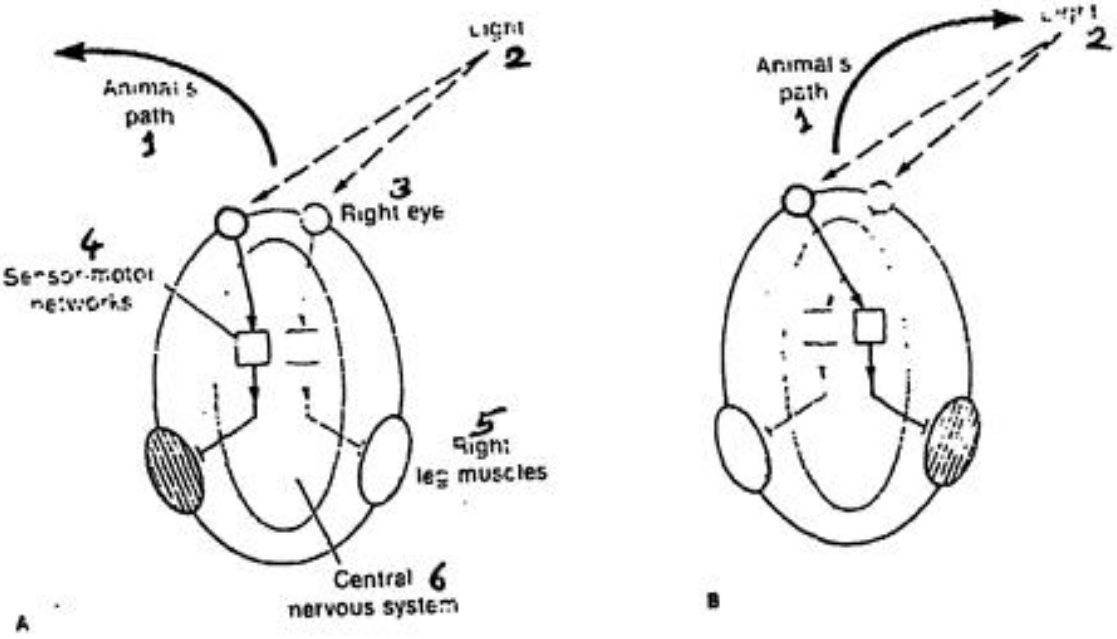
المقدرة على تحديد اتجاه السير عند الحيوان animal orientation ويتم بعدة آليات :

4-5-1 آلية التحرك الموجة :

يقال عن الحيوانات التى تتحرك نحو مصدر الضوء بأن لها تحرك نحو الضوء أو حركة ضوئية موجبة positive phototaxes وتلك التى تتحرك بعيدا عن مصدر الضوء يكون لها تحرك بعيدا عن الضوء negative phototaxes. وقد اقترح واحد من العلماء بأن مثل هذا التحرك الموجه taxes البسيط ينتج عن التنشيط الحركى الغير متماثل asymmetrical نتيجة لمدخل حسى غير متماثل. بذلك يتحرك الحيوان نحو أو بعيدا عن مصدر الضوء. هذا ويتخذ الحيوان الاتجاه السالب تجاه الضوء حينما يؤدى الضوء الواقع على إحدى العينين إلى استجابة حركية للأطراف ، التى توجد فى نفس الجانب الذى توجد فيه العين تؤدى إلى اندفاع الحيوان بعيدا عن مصدر الضوء. هذا ويحدث الاتجاه الموجب تجاه الضوء إذا ما تسبب المؤثر الضوئى على العين فى استجابة حركية للأطراف، التى تقع على الجانب الآخر للجسم، تؤدى بذلك إلى تحرك الحيوان نحو مصدر الضوء. (الشكل 18-4). هذا وقد دعمت التجارب هذا الافتراض.

4-5-2 تحديد الاتجاه عن طريق الذبذبات

تقوم معظم الحيوانات بتحديد موقع الفريسة عن طريق رصدها للذبابات التى تحدثها الفريسة على «الارضية التى تقف عليها». خير مثال لذلك هو العنكبوت الذى يتنبه إلى وجود الفريسة فى الشبكة نتيجة لاهتزاز خيوط الشبكة. كذلك تستطيع عقرب الصحراء الليلية تحسس الذبذبات التى تحدثها الفريسة على طبقة الرمل السطحية حيث تحدد موقع الفريسة وتتحرك نحوها وهى على بعد 0.5m. يساعدها على ذلك، بالاضافة إلى وجود السنسيلاsensilla، وهى مستقبل ميكانى (راجع الفصل 3) وجود مستقبل حساس للذبذبة على كل واحدة من أرجلها الثمانية (الشكل 19-4). هذا ويعتمد تحديد الاتجاه على توقيت الذبذبات لكل رجل.



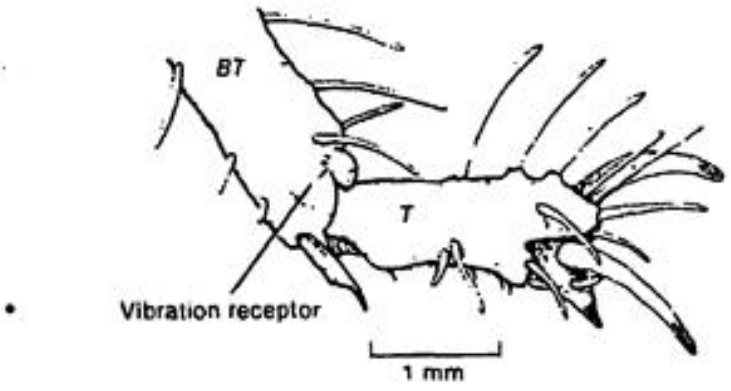
الشكل 18-4

(A) ازدياد حركة الاطراف ناحية العين التى تستقبل الضوء

(A) ازدياد حركة الأطراف من الناحية المعاكسة العين التى تستقبل الضوء

(1) مسار الحيوان (2) مصدر الضوء (3) العين (4) شبكات حسية حركية

(5) عضلات الرجل (6) الجهاز العصب المركزى



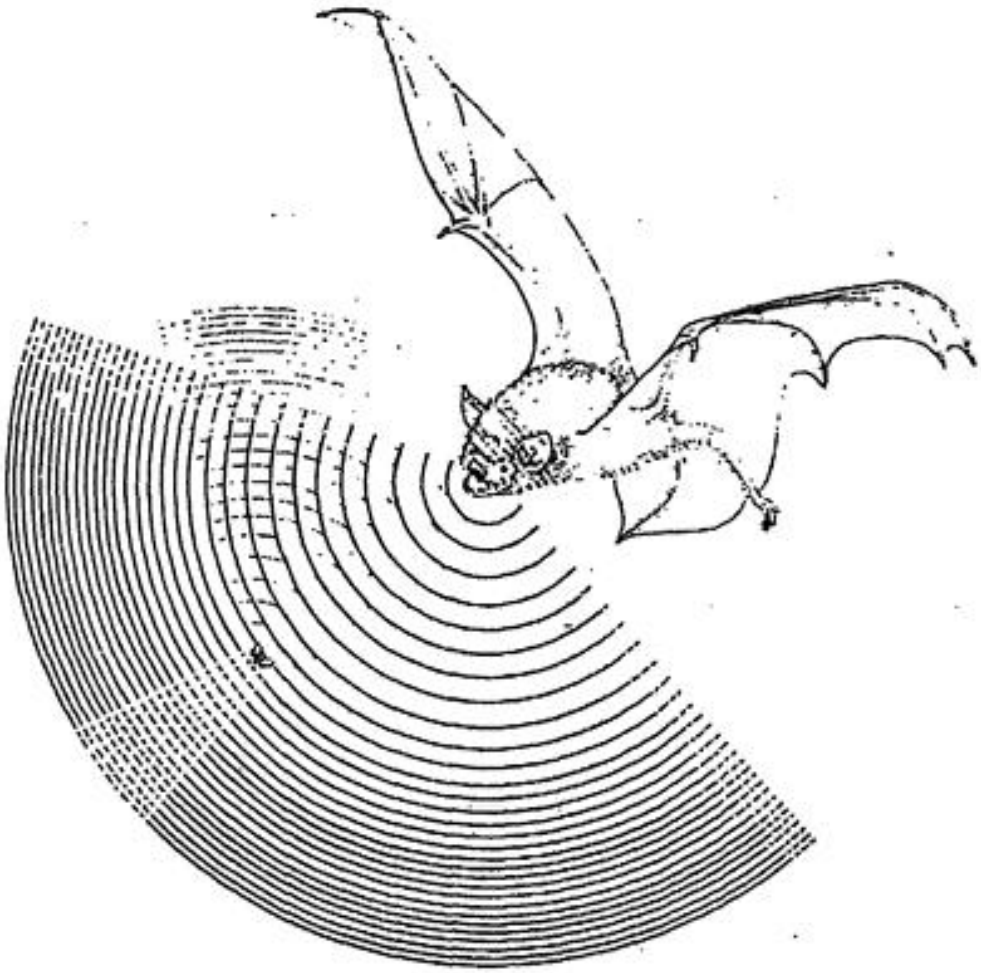
شكل 19-4 مستقبلات ميكانية (تحس الذبذبة) على أرجل عقرب الصحراء الليلية

أيضا تستطيع الحيوانات المائية تحديد اتجاهها داخل الماء عن طريق اكتشاف الذبذات، داخل الماء أو على سطحه، كما فى الخنفساء المائية ويتسكس. هذا وتستخدم الأسماك والعديد من البرمائيات جهاز الحبل الجانبى لاكتشاف الذبذبات داخل الماء وبذلك يستطيع الحيوان تحديد اتجاه تحركه، تجاه الفريسة أو بعيدا عن الخطر.

4-5-3 تحديد الصدى

لبعض الثدييات والطيور مقدرة يستطيع الحيوان بواسطتها أن يحدد بعد، اتجاه، حجم وطبيعة الاجسام الموجودة فى البيئة المحيطة، وذلك عن طريق بث موجات عالية التردد ومن ثم استقبال صدأ هذه الموجات عند انعكاسها واصطدامها بجسم ما. تسمى هذه الآلية بعملية تحديد الصدى echolocation . وقد تطورت على وجه الخصوص فى مجموعتين من الثديات، بعض أنواع الوطواط microchiroptera وبعض الحيتان خاصة الدلافين dolphins وفيل البحر porpoises تكون الموجات الصوتية التى يرسلها الوطواط ، غير مسموعة بالنسبة للإنسان وتصل حدتها إلى $200dynes / Cm^2$ عند بثها من فم الوطواط.

هذا ويكون الصدأ المنعكس ضعيفاً جداً ولكن تستطيع أذنا الوطواط تمييزه (الشكل 20-4). من بين جميع الأصوات المتزامنة التى تصل أذنى الوطواط تكمن هذه المقدرة على العديد من التعديلات المورفولوجية والعصبية التى تساعد على عملية تحديد الصدى . ففى الوطواط نجد أن الأنف مجهز بثنيات معقدة، كما أن هنالك تباعد بين فتحتى الأنف الشئ الذى يؤدى إلى تكبير الصوت. أما صوان الأذن فهو كبير جداً ليساعد فى عملية التقاط الصدأ. بينما طبلة الأذن والعظام الصغيرة ossides للأذن الوسطى خفيفة الوزن مما يساعد على التمييز العالى للذبذبات.



شكل 20-4 تحديد موقع الفريسة
باستخدام صدى الموجات الصوتية التى يرسلها الوطواط (راجع النص)

زد على ذلك تقوم أوعية الدم، النسيج الضام والنسيج الدهنى بعزل الأذن الداخلية عن الجمجمة وهى بذلك تقلل من توصيل الصوت من الفم إلى الأذن (الشئ الذى يقلل من كفاءة جهاز السمع). وأخيرا ليس بمستغرب أن نجد أن مراكز السمع على قشرة المخ كبيرة نسبيا مقارنة مع الحجم الصغير للمخ.

4-5-4 بحار الحيوانات

إن مقدرة الحيوانات على الابحار navigation لمسافات شاسعة قد أذهلت الإنسان من قديم العصور وذلك لقلة المعرفة بالدلائل cues التى تستخدمها الحيوانات لتحديد الاتجاه أثناء عملية الابحار. مع مرور الزمن ازداد الفهم لهذه الدلائل، ولكن ببطء، نسبة إلى كثرة الآليات الحسية المستخدمة لعملية الابحار بواسطة بعض من هذه الحيوانات. فهى تستخدم العديد من أجهزة الاحساس وكذلك تستعيض ببعض الأجهزة الحسية حينما لا تلائم الظروف البعض الآخر. هكذا يجعل هذا التنوع ، فى الأجهزة الحسية المستخدمة، التجربة العلمية المحكمة التى يتحتم خلالها اختبار متغير واحد، مهمة صعبة التنفيذ. لقد ثبت الآن مثلا أن الطيور تستخدم، بدرجات متفاوتة، معالم الأرض، موضع الشمس والنجوم، الضوء المستقطب ، الروائح ، الأصوات وحتى المجال المغنطيسى للأرض فى تحديد الاتجاه اثناء الابحار.

بوصلة زمنية :

يستخدم النحل موضع الشمس ونمط الضوء المستقطب polarized فوق السماء لحفظ الاتجاه ما بين الخلية وحقل الغذاء. ويستطيع النحل توصيل هذه المعلومات إلى غيره من النحل داخل الخلية عن طريق رقصات الاهتزاز waggle. كما تستطيع بعض الطيور الابحار فوق مسافات شاسعة من المحيطات لاتوجد بها أية معالم أرضية مستخدمة مواقع النجوم وهى تستطيع تعويض الفروق فى هذه المواقع التى تنتج عن حركة الأرض بالنسبة لغيرها من الأجرام السماوية مستخدمة ما نطلق عليه الآن البوصلة الزمنية clock compass وقد أمكن برهان وجود هذه البوصلة الزمنية عن طريق استخدام البلانيتاريوم planitarium .

استخدام الدلائل المغناطيسية

أعتقد منذ زمن بعيد أن، بعض الحيوانات تستخدم المجال المغنطيسى للأرض لتحديد اتجاهها عند الابحار أو العودة للاعشاش. فمثلا يستطيع الحمام الزاجل homing pigeon العودة إلى أعشاشه فى يوم غائم ومن غير الاعتماد على معالم أرضية . عادة تتخذ الاتجاه الصحيح بعد تحليقها لوقت وجيز. لكنها تفشل فى ذلك عند ربط مغنطيس صغير إلى رأسها أو عند نقلها من أعشاشها داخل حاويات لا ينفذ إليها المجال المغناطيسى . هذا وقد قادنا ذلك إلي طرح السؤال التالى، هل تكون الحيوانات مجهزة بآلية تمكنها من اكتشاف المجال المغنطيسى مباشرة؟ فقد وجدت مادة المغنتيت magnetite ، وهى مادة مغنطيسية بيولوجية توجد بكميات صغيرة داخل تراكيب سوداء دقيقة بين المخ والجمجمة، عند الحمام. أيضا تحتوى القشرة الدماغية cerebral cortex للحيتان الأوقيانوسية pelagic على مادة المغنتيت . وقد لوحظ أن هذه الحيتان تخرج أحياناً بأعداد كبيرة إلى مياه الشطئان فى ظاهرة يتعقد أنها ربما كانت بسبب خلل فى الخواص المغنطيارضية geomagnetic للمحيطات فضلت بذلك طريقها.

جدير بالذكر أن ظاهرة الاستجابة للمجال المغنطيسى قد لوحظت بالنسبة لحيوانات أخرى مثل بعض الحلزونات، أحد أنواع أسماك الأنقليس eel وحتى البكتريا التى توجد فى الوحل mud .

الفصل الخامس

جهاز الغدد الصماء عند الحشرات

الفصل الخامس

جهاز الغدد الصماء عند الحشرات

لقد تم العثور على خلايا داخلية الافراز endoerine، خاصة خلايا عصب افرازية neuroscrnetory، فى كل المجموعات اللافقارية بما فى ذلك المجوفات الهدرية hydroid coelentrates ففى الهدرة hydra تفرز الخلايا العصبية هرمونا يحفز النمو وذلك اثناء فترة التبرعم، التجديد والنمو.

جدير بالذكر أن معرفتنا بالوظيفة الهرمونية لكل المجموعات اللافقارية قد تمس فى الغالب عن طريق الملاحظات المورفولوجية و morphological والهيستوكيميائية histochemical. هذا وقد حظيت دراسة هرمونات النمو والتحور metamorphosis فى الحشرات باهتمام كبير أدى إلى الألمام بجوانبها المختلفة.

5-1 مراحل نمو الحشرات :

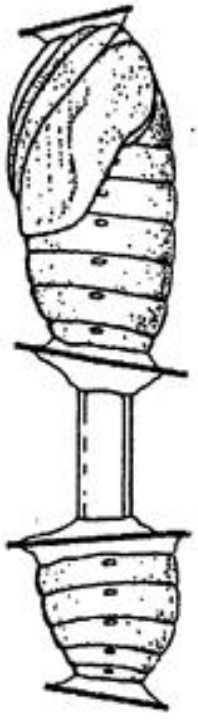
تظهر الحشرات ناقصة التطور hemimetabolus تحوراً غير مكتمل البراغيث hemiptera والجراد orthoptera والـــ dictyoptera. فدورة الحياة تبدأ حينما تفقس البيضة معطية أو الحوراء nymph غير ناضجة تبدأ الحورية فى الأكل والنمو وتمر بالعديد من مراحل طرح الافات molts. مبدلة بذلك الهيكل الخارجى القديم بهيكل طرى جديد، الذى يتمدد إلى حجم أكبر قبل أن يصير صلباً. تسمى المرحلة بين اثنين من الـ molt بالطور instar. هذا ويقوم آخر طور إلى مرحلة النضج adult أما الحشرات كاملة التطور holometabolous، أى التى تمر بمراحل تطور كاملة، مثل الذبات diptera، الفراش lepidoptera قشريات الاجنحه والخنافس cleoptera، تكون دورة حياتها أكثر تعقيدا مما سبق ذكره. إذ تفقس البيضة معطية اليرقة larva (وتعرف بعدة أسماء مثل اليسروع يرقات

الفراشة caterpiller، الدودة worm أو maggot). التى تمر بمراحل الطور instars ويعد العديد من عمليات طرح الإهاب molts تتحور معطية مراحلة الخادرة pupa، وهى مرحلة وسط بين اليرقانة larva والحشرة الكاملة. وفيها تظل «الحشرة» ساكنة خارجياً بينما تحدث العديد من التغيرات reorganization داخليا مؤدية إلى الحشرة الناضجة. تكون مرحلة اليرقانة larva مخصصة للتغذية لذلك تلحق أضراراً كبيرة بالمحاصيل الزراعية هناك بعض اليرقانة التى تعيش على اللحم الميت مثل الذباب وغيرها يعيش على مواد مواد غذائية مختلفة. أما مرحلة النضج فهى مخصصة للتكاثر وفى بعض الأنواع لا تتغذى الحشرة خلالها على الاطلاق.

5-2 تنظيم النمو عن طريق الهرمونات

بدأت التجارب للكشف عن آلية تحكم الهرمونات على عملية النمو والتطور فى الحشرات منذ العام 1917 وقد بدأها العالم كويس kopec الذى قام بعمل رباط ligature ليرقانة الفراش moth فى فترات مختلفة من الطور instar. وقد وجد هذا العالم أنه عند عمل الرباط ligature عند فترة حرجة فى حياة اليرقانة تقوم الرياقانة بالتحول إلى خادرة فى الجزء الأمامى للرباط وتبقى من غير تحور فى الجزء الخلفى. وقد وجد كذلك أن قطع الحبل العصبى الأمامى ليس له تأثير على هذه الملاحظة، فاستنتج بذلك، أنه توجد مادة تدور فى سوائل الجسم تقوم بتنشيط التحور إلى مرحلة الخادرة وأنه يتم افراز هذه المادة بواسطة نسيج يوجد فى الجزء الأمامى من اليرقانة. باختبار العديد من الأنسجة وجد أن ازالة المخ تمنع عملية التحور إلى مرحلة الخادرة وأن اعادة زرع المخ يجعلها تتم. هذا وقد أدت التجارب اللاحقة إلى التعرف على أحد الهرمونات الذى تنتجه خلايا المخ وهو يقوم بتنشيط غدد بعد صدرية prothoracic والتى تتحكم فى عملية طرح الإهاب.

أطلق على المادة التى يفرزها المخ الهرمون المنشط للغدد الصدرية prothoracicotropic hormone اختصاراً PTTH، أيضا يعرف بهرمون المخ brain hormone. وقد وجد أن عمل الرباط من بعد تنشيط الغدد الصدرية بهذا الهرمون لا يمنع التحول وأن التحول يتم فى البطن (بعد عزلها) عن طريق زرع غدد صدرية ثم تنشيطها بواسطة PTTH. إن شدة قدرة الحشرات على الاحتمال hardiness وتحملها للمعالجة والمعاملة handling جعلتها مثالية لاجراء العديد من التجارب مثل الـparabiosis (الشكل 1-5). وقد أمكن عن طريق هذه العملية وصل حشرتين أو جزئين مختلفين لحشرة واحدة، بحيث يسهل تبادل سوائل الجسم بينهما كما يمكن أيضا بواسطة هذه العملية ملاحظة التغييرات التى تصاحب النمو عن طريق نوافذ مغطاة بزجاج رفيع.



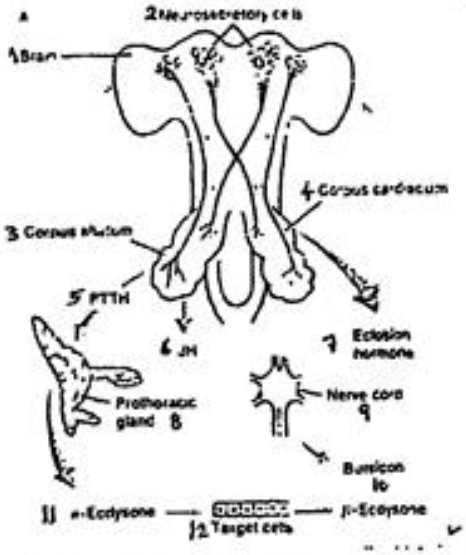
الشكل 1-5 رسم توضيحى عملية parabiosis حيث تم توصيل الجزء البطنى للغادرة بواسطة أنبوب زجاجى توجد نوافذ زجاجية على الأطراف لتسمح بمراقبة الأنسجة الداخلية.

يعتمد تنظيم نمو وتطور الحشرات هرمونيا على 7 هرمونات (الجدول 1-5). هذا ويشتمل جهاز الغدد الصماء المسئول عن النمو والأيض فى الحشرات على الخلايا والوظائف التالية :

الجدول 1-5 الهرمونات المسئولة عن النمو عند الحشرات

الهرمون	المصدر	التركيب	العضو المستهدف	المفعول	التنظيم
PTTH	خلايا عصب افرازية داخل المخ	ببتيد	الغدد الصدرية	يحفز افراز اكديسون	مؤثرات بيئية وداخلية يثبط بواسطة JH
أكديسون	الغدد الصدرية الحويصلة المبيضية	ستروييد	الخلايا الطلائية الاجسام الدهنية	تصنيع RNA- البروتين افراز طلائية جديدة	بواسطة PTTH عوامل تثبيط وتنشيط من المخ
JH	المخ	مشتق من تيربين terpene	الطلائية الحويصلة المبيضية	فى اليرقة يثبط التحور فى الحشرة الكاملة يحفز تصنيع المخ ينشط الوظيفة التناسلية	
بيبسيكون	خلايا عصب -افرازية داخل CNS	ببتيد	الخلايا الطلائية	يحفز تكوين الجلد	العوامل التى تحفز التحور
هرمون السكون diapause	خلايا عصب افرازية فى العقد تحت المرئ	ببتيد	المبيض ، البيض	يحفز سكون البيض	يتم تنظيم الافراز بواسطة CNS
أكلوسيون	خلايا عصب افرازية داخل المخ	ببتيد	الجهاز العصبى	يحفز خروج الحشرة الكاملة من الشرنقة	يحفز داخليا

1- خلايا عصب افرازية، يوجد جسم الخلية فيها فى المنطقة pars intercerebralis داخل المخ (الشكل 2-5) والتى تصنع PTTH وهو بروتين صغير حجمه الجزئى 5000.



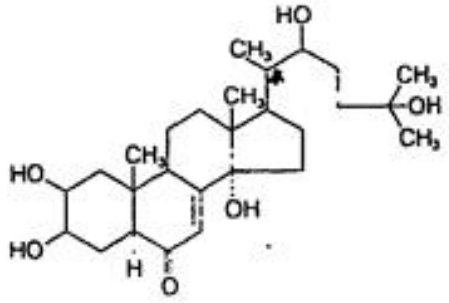
الشكل 2-5 جهاز الغدد الصماء لاحدى الحشرات

(1) المخ (2) خلايا عصب افرازية (3) corpus allutun
(4) corpus cardiacum (5) PTTH (6) JH (7) الكلوسيون
(8) غدد صدرية (9) الحبل العصبى (10) بيروسيكون
(11) اكديسون (12) الخلايا المستهدفة

2- يتم نقل PTTH عبر محور الخلايا العصب افرازية ليخزن داخل نسيج وعائى عصبى neurohemal تكونه النهايات العصبية للمحاور، إلـ corpus allatum. جدير بالذكر أن المحاور تقوم باختراق الـcorpus cardiacum ولكن لا تنتهى عنده كما كان يعتقد سابقا.

3- يقوم PTTH ، الموجود فى الدم، بتنشيط الغدد الصدرية لتفرز الفا-اكديسون α- ecdysone (الشكل 3-5) وهو أحد الاستيرويدات الشبيهة بالكوليسترول ، ولكنه يختلف عنه وعن بقية الاستيرويدات التى تفرزها الفقاريات فى حتوائه على عدد كبير من مجموعات الهيدروكسيل OH^- التى تؤدى إلى زيادة ذوبان الهرمون فى الماء. تحتاج الحشرات إلى تناول

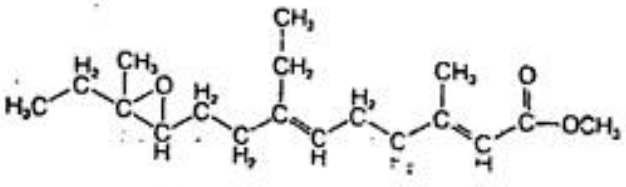
الكوليسترول ضمن غذائها لتصنيع ألفا-اكديسون. الذى يعتقد الآن أنه جزئ سابق هرمون النشط بيتا اكديسون ß-ecdysone الذى يتم انتاجه من سابقه داخل الانسجة المستهدفة.



الشكل 3-5 جزئ α-ecdysone وهو من الاستيرويدات
يتم تحويله إلى ß ecdysone باضافة OH^- عند C-20

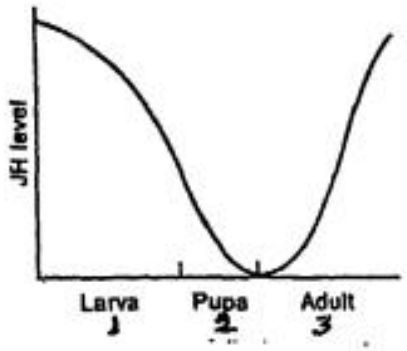
4- تنتج بعض الخلايا العصب – افرازية الأخرى، وهى موجودة داخل المخ وفى الحبل العصبى هرمون بيرسيكون bursicon وهو يؤثر على كل نواحى النمو فى النسيج الطلائى بما فى ذلك عملية أكتساب اللون الداكن tanning (أى صلابة الطبقة الكيتينية chitinous واكتسابها للون الداكن) والتى تأخذ العديد من الساعات لكى تكتمل بعد كل طرح molt .

5- يحتوى الـ c.allatum على خلايا افرازية غير عصبية تقوم بانتاج وافراز هرمون الحداثة juvenile h. اختصاراً JH (الشكل 4-5). يعمل JH فى وجود الفا اكديسون ليحفز الاحتفاظ بخصائص الحداثة juvenile لليرقانه larva. بذلك يؤخر التحور حتى يكتمل تطور اليرقانة.



الشكل 4-5 جزئ JH

تم توضيح وجود JH أثناء المراحل المبكرة للنمو فى حوالى منتصف الثلاثينات من هذا القرن نتيجة للتجارب التى أجراها عالم الحشرات الشهير wigglesworth مستخدما التوصيل الـ parabiotic (الشكل 1-5) وذلك عن طريق توصيل مرحلة مبكرة مع مرحلة متأخرة الشئ الذى منع الأخيرة من التحور إلى طور النضج. يكون تركيز JH فى الدم عند ذروته خلال المراحل المبكرة لطور اليرقانة ويصل أدنى معدل له اثناء مرحلة الخادرة (الشكل 5-5). هذا وتتم عملية التحور لمرحلة النضج عند اختفاء JH من الدم. لكن يعود مستوى تركيز JH فى الارتفاع مرة أخرى فى الحشرة الناضجة ليساعد في تطور الوظيفة التناسلية. فهرمون JH يحفز لدى الذكر (فى بعض الأنواع) تكوين الاعضاء التناسلية الثانوية accessory . فى الأنثى (فى معظم الأنواع) يحفز الهرمون تصنيع المح yolk ونضج البيض.



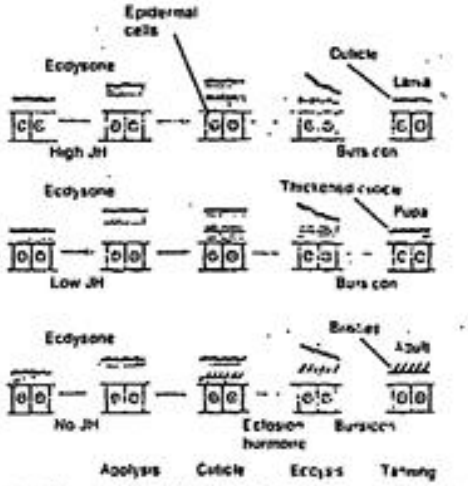
الشكل 5-5 اختلاف تركيز JH اثناء دورة حياة احدى الحشرات
(1) اليرقانة larva (2) الخادرة (3) الحشرة الكاملة

5-3 تأثير الهرمونات المختلفة على النسيج الطلائى:

حظى النسيج الطلائى epidermis بأهمية خاصة فى التجارب التى أجريت على عملية التطور والدور الذى تلعبه الهرمونات فى هذه العملية. يوضح (الشكل 5-6) تأثير الهرمونات المختلفة على طبقة الإهاب أو البشرة cuticle .

يقوم اكديسون بتحفيز انتاج طبقة جديدة من الإهاب وتبدأ العملية بازاحة الإهاب القويم من على الخلايا الطلائية التى تليه.

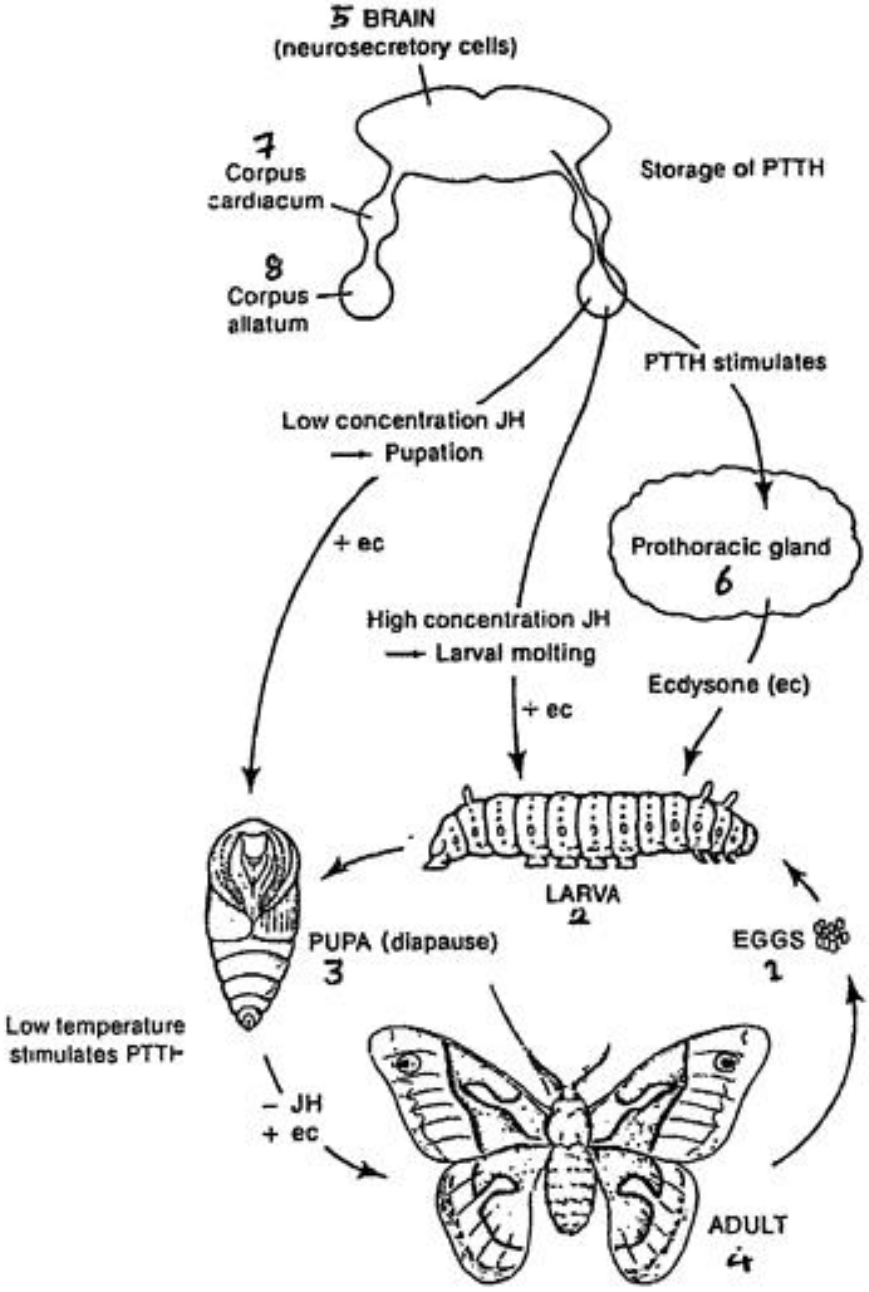
يعقب ذلك عملية تصنيع للإهاب الجديد بينما يتم هضم الاهاب القديم جزئيا، بواسطة انزيمات خاصة بعملية طرح الاهاب molt التى تقوم بإفرازها الطبقة الطلائية. هذا ويختلف نوع الإهاب الجديد حسب تركيز هرمون JH فى الدم، فعند التركيز المرتفع يتم انتاج إهاب من النوع اليرقى الخاص بطور اليرقانة ، بينما يتم عند التركيز المنخفض لهرمون JH انتاج إهاب من النوع الخاص بمرحلة الحشرة الكاملة. هذا ويقوم هرمون الكلوسيون eclosion وبيرسيكون bursicon باكمال المراحل النهائية لعملية الطرح. بما فى ذلك عملية الانسلاخ ecdysis. (أى طرح الحشرات لجلدها القديم وانسلاخها منه) للحشرة حديثة الانسلاخ إهاب شاحب وطرى سرعان ما يتمدد للحجم الجديد ثم بعد ذلك يتصلب ويصطبغ باللون الداكن تحت تأثير بيرسيكون (الشكل 6-5).



الشكل 6-5 التغيرات التى تحدث فى طبقة الجلد والهرمونات التى تحفزها اثناء عملية الطرح والتى تؤدى إلى (A) مرحلة اليرقانة (B) مرحلة الخادرة (C) مرحلة الحشرة الكاملة
(ii) إقصاء (ii) تكوين الاهاب (iii) الانسلاخ (iv) تكوين اللون الداكن
(1) خلايا طلائية (2) اهاب (3) الهلب

يوضح الشكل (7-5) دور هرمونات التطور فى دورة حياة أحد انواع الفراش cercopia moth . يؤدى هرمون PTTH إلى تحفيز عملية طرح الاهاب فى اليرقانة بتأثيره على الغدد الصدرية لتفرز هرمون أكديسون. يستمر النمو عند سلسلة من الطور instars والتى تبقى فى طور اليرقانة طالما بقيت نسبة تركيز JH (وتفرزه الـC.allatum) عالية. تكتمل هذه المرحلة عبر 4 أو 5 طور يتناقص خلالها تركيز JH تدريجيا وفى النهاية يؤدى انخفاض JH إلى مرحلة الخادرة pupa وهى فترة البيات الشتوى فى هذه الحشرة حيث تبقى في حالة سكون. مع انحسار الشتاء، تؤدى اعادة افراز PTTH إلى تحرير هرمون أكديسون الذى يعمل في غياب JH إلى بلوغ مرحلة النضج.

دور JH هنا شبيه بدور هرمون ثيروكسين thyroxin على تطور الضفدع فى كلا الحالتين يؤدى تغيير العلاقة بين تركيز الهرمون ومرحلة النمو إلى اختلال عملية التطور. هذا ونسبة للدور الفعال لهرمون JH فى منع الوصول لمرحلة النضج فى الحشرات، يمكن استخدام هذا الهرمون لمكافحة الآفات الزراعية بأمان حيث أنه غير سام ولا يضر بالبيئة ولا يستطيع جهاز المناعة لدى الحشرات تكوين أجسام مضادة لهذا الهرمون.



الشكل 7-5 الأطوار المختلفة لعملية التحول [illegible] عند الفراش والهرمونات التى تنظمها
(1) البيض (2) اليرقانة (3) الخادرة (4) مرحلة الحشرة الكاملة (5) المخ (6) الغدد الصدرية
corpus allatum (8) corpus cardiacum (7)
– الهرمونات وتركيزها موضوع على الاسهم [illegible]

الفصل السادس

الحـــركـــة

الفصل السادس

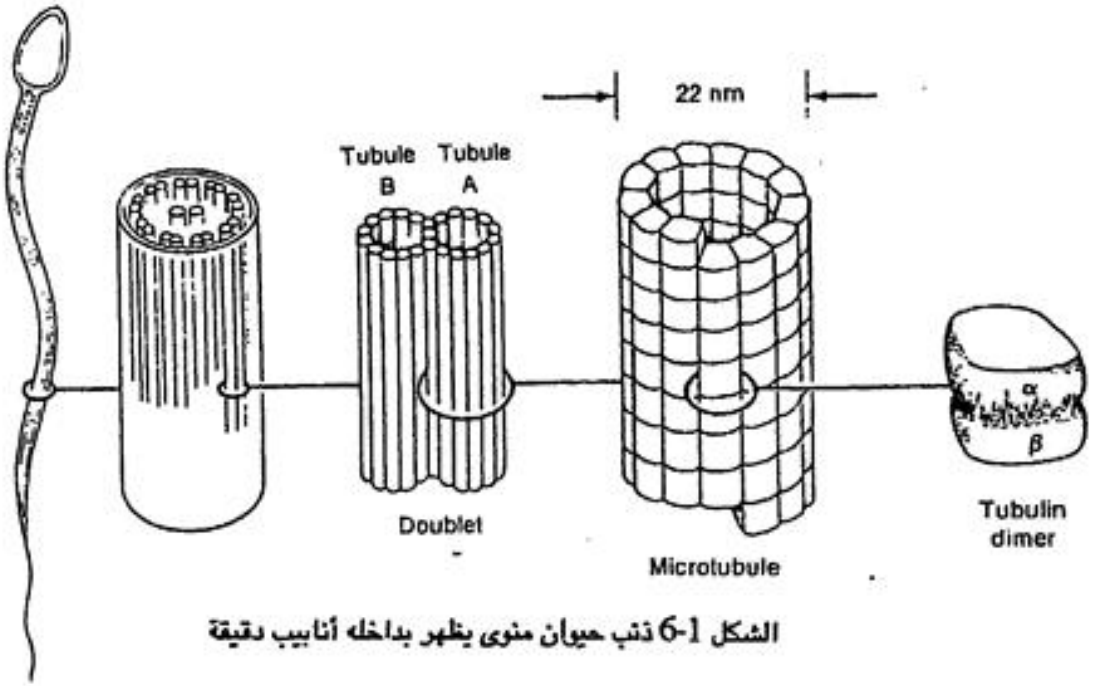
الحركة

حركة الحيوان مثل الانتقال من مكان إلى آخر، مضغ الطعام، الاتصال الجنسى وكل عمليات الاتصال اللاكيميائية، عبارة عن أوامر عصبية تتم ترجمتها إلى نشاط ميكانى متناسق coordinated.

يتم توليد الحركة فى الحيوان بواسطة 3 آليات رئيسية، الحركة الامينية (1)، حركة الأهداب، والسياط (2)، وتقبض العضلات (3) تتحرك الحيوانات وحيدة الخلية وفقا للآليتين الأوليتين أى الحركة الأميبية وحركة الأهداب والسياط.

تعتمد الحركة الأميبية على بروتينات هيكلية سيتوبلازمية cytoskeletal مثل الأكيتين actin والتيوبيولين والتى تتبلمر معطية أنيبيبات دقيقة وخيوط دقيقة على التوالى. بينما يقوم الميوسين myosin وهو بروتين انزيمى (يتفاعل مع ATP) له وظيفة حركية بالتفاعل مع البوليمرات الهيكلية السيتوبلازمية. هذا ويشكل التفاعل المخلى بين الأكتين والميوسين أساس الحركة الأميبية ويحدث خلالها انسياب للسيتوبلازم .

تنشأ الأهداب والسياط فى الخلايا من أجسام قاعدية شبيهة بالسنتريول centriole ويوجد داخل كل منها أنابيب دقيقة (بنظام 2+9 ، الشكل 1-6) هذا وتعتمد حركة الأهداب والسياط على آلية أنزلاق انبوبية شبيهة بانزلاق خيوط الاكين actin والميوسين myosin للنسيج العضلى لدى الفقاريات والتى تناولناها باسهاب فى الفصل (11) من كتاب «علم وظائف الاعضاء العام)1999م.



الشكل 1-6 ذنب حيوان منوى يظهر بداخله أنابيب دقيقة

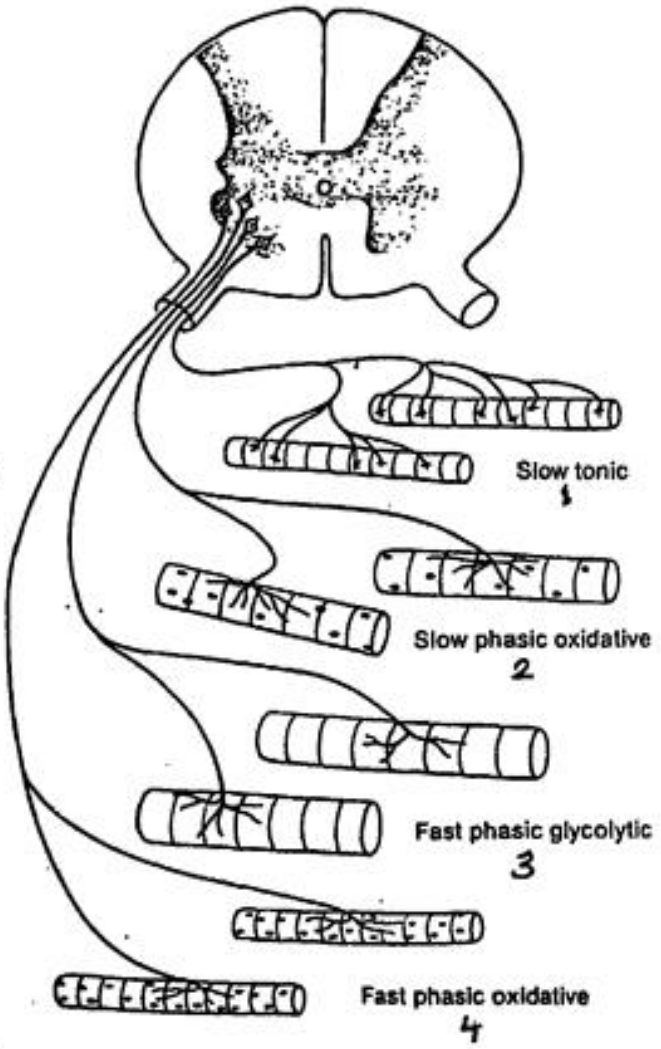
6-1 انقباض العضلات :

إن انقباض العضلات يعتبر أكثر ظواهر الحياة وضوحا للعيان ولذلك فقد أثار خيال الفلاسفة ثم اهتمال العلماء منذ عصور سحيقة. لقد اتضح الآن أن انقباض العضلات ينشأ نتيجة الأثارة الكهربية لغشاء الخلية العصبية هذا ويتم تصنيف العضلات إلى نوعين حسب الخواص المورفولوجية والوظيفية، وهى. العضلات المخططة والعضلات الملساء . يوجد العديد من أنواع العضلات المخططة، وهى التى تشمل العضلات الهيكلية المسئولة عن الحركة الخارجية للحيوان، يتم توضيحها بواسطة الشكل (6-2)

(1) Tonic muscle fibers

وهى تنقبض ببطء وتوجد فى عضلات انتصاب القامة posture للبرمائيات والزواحف والطيور، وفى الحزم العضلية muscle spindles والعضلات الخارجية للعين عند الثدييات. تستقبل هذه الألياف العديد من النهايات العصبية التى تنبع

جيمعها من خلية حركية وحيدة، لذلك فهى لا تحتاج إلى توليد جهد فعال لأن الاثارة تنتقل اليها عبر النهايات العصبية المنتشرة على طول الليفة العضلية.



الشكل 2-6 أنوع الألياف الرئيسية للعضلة الهيكلية للفقاريات
(1) Slow tonic (2) Slow phasic oxidative
(3) fast phasic glycolytic (4) fast phasic oxidative

أحد الخواص البيوكيميائية للألياف التوترية هو التفاعل البطئ جداً للانزيم myosin-ATP ase، لذلك يبقى العضل منقبضاً لفترة طويلة وبكفاءة عالية.

(2) slow phasic fibres

تتميز هذه الألياف بأنها تنقبض ببطء وأيضاً يُتْعِبها الفتور fatigue ببطء. وهى توجد في عضلات انتصاب القامة لدى الثديات.

(3) fast phasic glycolytic fibres

تنقبض هذه الألياف القوية سريعاً ولكن أيضا يصيبها الفتور سريعا نتيجة لتكون دين الأكسجين (راجع الفصل 1) يوجد هذا النوع فى عضلات الصدر فى الدجاج وكذلك عند بعض ذوات الدم البارد كالبرمائيات والزواحف.

(4) fast phasic oxydative fibres

تمتاز هذه الألياف بسرعة الانقباض مع بطء الفتور. لذلك فهى تستخدم للتحرك السريع المتكرر وهى توجد فى عضلات الطيران لدى الطيور البرية.

6-2 التنظيم العصب - عضلى :

أ- لدى المفصليات :

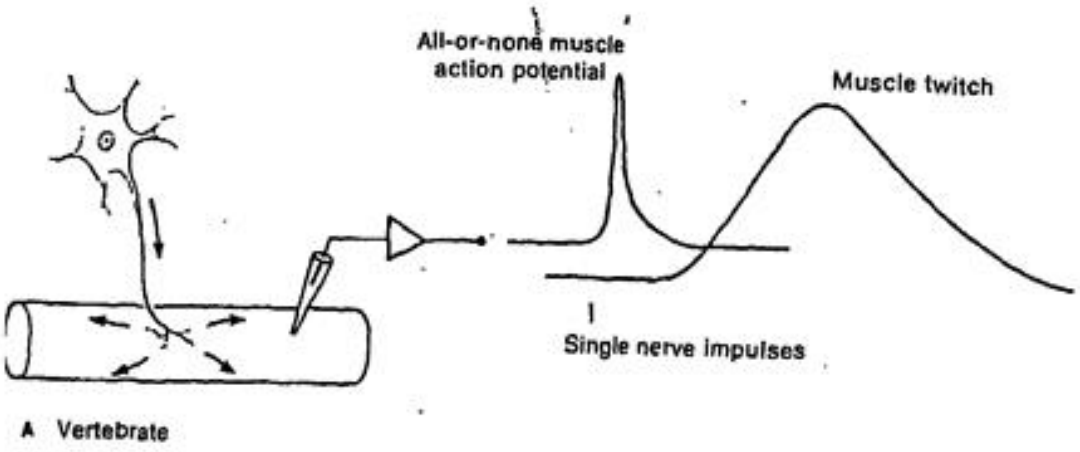
يتكون الجهاز العصبى عند المفصليات من عدد صغير نسبيا من الخلايا العصبية وعدد صغير من وحدات الحركة، التى عليها تنفيذ كل الانقباضات الضعيفة والقوية من غير استقطاب المزيد من وحدات الحركة. ففى بعض العضلات عند المفصليات يمكن لخلية حركية وحيدة أن تغذى كل أو معظم الألياف العضلية.

أيضا لا ينشأ جهد فعال في العديد من أنواع العضلات لدى المفصليات أو هو ينشأ فى نطاق ضيق (وهى فى ذلك تشبه الألياف التوترية tonic للفقاريات) هذا ويتم الانقباض عن طريق الجهد الكهربى المتدرج للألياف العضلية ولكن

يزداد تنوع وتعقيد العضلات الهيكلية في المفصليات بوجود العديد من أنواع الألياف التى تختلف عن بعضها فى الخصائص الكهربية، الفزيولوجية والمورفولوجية.

ب- عند الفقاريات :

يغذى الليفة الـ twitch للفقاريات نهاية عصب- عضلية واحدة ينشأ عندها جهد فعال بعد تشابكى وينتشر دون تناقص على طول الليفة العضلية (أى all-or-none) (الشكل 3-6)

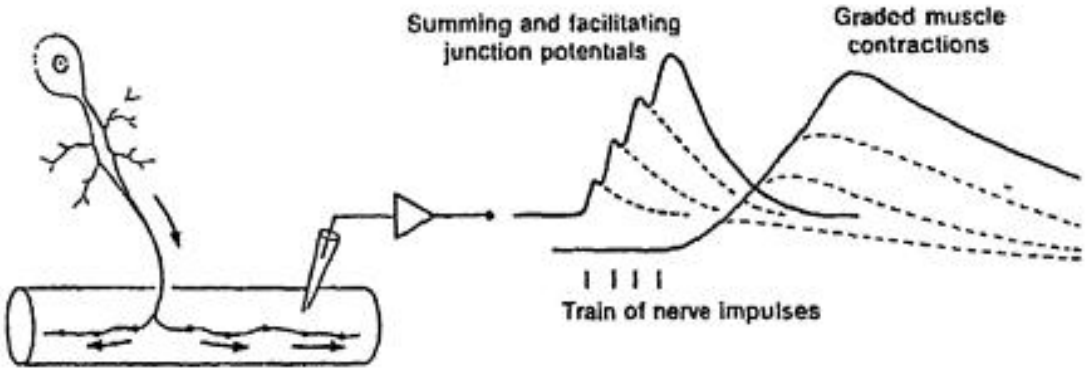


الشكل 3-6 نهاية عصب – عضلية وحيدة علي ليفة عضلية للفقاريات twitch
تحدث الليفة انقباضا all-or-none كاستجابة لجهد كهربى يتم نقله – all-or-none

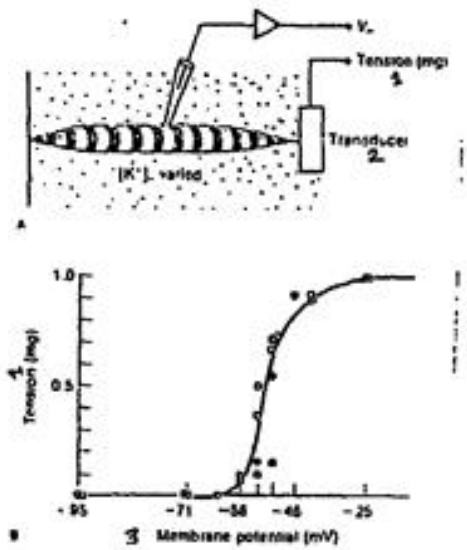
أما الألياف التوترية tonic للفقاريات فهي تشبه ألياف العضلة الهيكلية للقشريات إذ تستقبل العديد من النهايات العصب-عضلية (الشكل 4-6). بما أن النهايات العصبية تقوم بنقل فرق الجهد الفعال من المحور على طول الليفة العضلية لذلك لا يكون انتشار الجهد الكهربى داخل الألياف العضلية ضروريا.

وبناء علي ذلك لا ينشأ جهد كهربى من النوع all-or-noneولكن ينشأ انقباض تدريجى نتيجة للجهد التدريجى عند التشابكات (الشكل4-6) ولأن الارتباط بين جهد الغشاء والانقباض متدرج (الشكل 5-6) فيمكن لكل ليفة

عضلية الانقباض بدرجات متفاوته بدلا عن الانقباض المحدد كما فى الألياف الـ twitch والتى يؤدى انقباضها لفترات طويلة إلى التشنج .tetanus . لذلك يمكن للألياف التوترية العمل بكفاءة عالية وعلى مدى واسع من التوتر وبعدد قليل من وحدات الحركة.



شكل 4-6 العديد من النهايات العصب – عضلية على ليفة عضلية للمفصليات تحدث الليفة انقباضا كاستجابة لجهد تدريجى



شكل 5-6 العلاقة بين جهد الفشاء والانقباض (راجع النص) .
(1) الجهد (2) محول الطاقة (3) جهد الفشاء .

6-3 عضلات الطيران عند الحشرات

لا تظهر عضلات الطيران فى معظم أنواع 4 من مراتب الحشرات ، وهى النحل والدبور، الذباب ، الخنافس والبراغيث، صلة بين توقيت انقباض الألياف وتوقيت وصول السيال من العصب الحركى. تعرف هذه بالعضلات الغير متزامنة asynchronus ، (لنميز بينها وبين العضلات المتزامنة synchronus أى التى تنقبض مع نبض عصبى). أيضا تعرف بالعضلات الليفية fibrillar بالرغم من عدم وجود صلة بين توقيت الانقباض وتوقيت المدخل العصبى لهذه العضلات، إلا أنه ولكى تبقى العضلة فى حالة تأهب يتطلب ذلك وصول نبض ثابت ومستديم من السيال العصبى . ولكن كيف يحدث انقباض العضلات الليفية fibrillar باستقلال عن توقيت وصول جهد الفشاء؟ كمثل غيرها من العضلات تحتاج العضلة الليفة التى تركيز عالى لأيون الكالسيوم داخل الليفة. يبقى تركيز Ca^{2+} عاليا طالما استمر المؤثر العصبى. لكن لا تبتدى الحالة النشطة الا حينما تشد العضلة فجأة، وبالعكس تنتهى الحالة النشطة بزوال الشد.

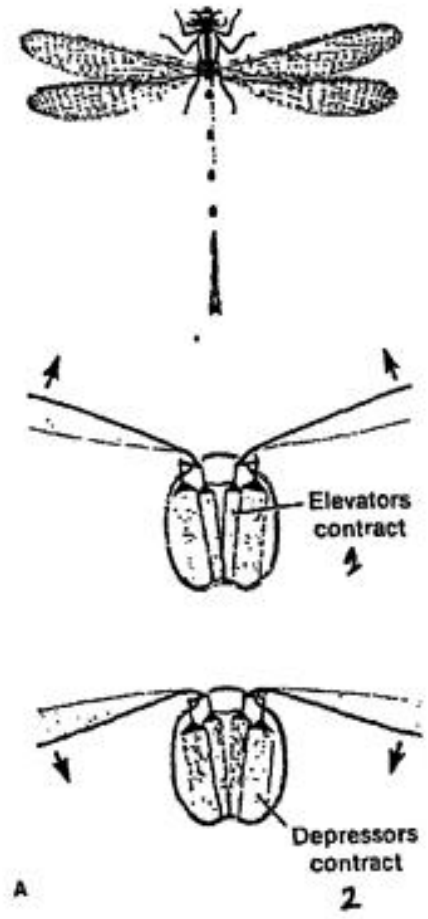
تنتج عضلا الطيران المتزامنة تحريك الجناحين إلى الأعلى وإلى أسفل بواسطة نظام روافع بسيط موضحا بالشكل (6-6). أما العضلات الغير متزامنة فلها صلات عضل -هيكلية معقدة حيث يتخذ الصدر وضعين مختلفين، عند انقباض عضلات الطيران المتضادة antagonists، إلى الأعلى وإلى الأسفل (الشكل 6-7).

عندما تنقبض العضلات الرافعة، أي التى تتسبب فى تحريك الجناح إلى الأعلى، تتسبب فى جذب سقف الصدر حتى يمر بنقطة غير ثابتة click . تحدث هذه الحركة ثلاثة أشياء ،

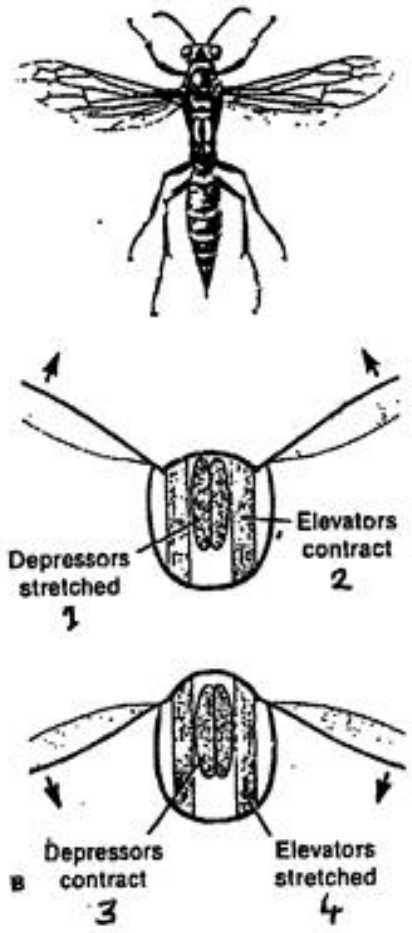
(1) تحريك الجناحين إلي الأعلى.

(2) تشد، وبذلك تنشط العضلات المخفضة ، أى التى تتسبب فى حركة الجناح إلى الأسفل عن طريق ضم هيكل الصدر من الأمام إلى الخلف بذلك يتسع الصدر (بطن – ظهر).

(3) ترتخى العضلات الرافعة فجأة وبذلك يتوقف نشاطها. تكتمل الدائرة انعكاسياً. حيث يؤدى نشاط العضلات المخفضة (الخطوة 2) إلى أن تعيد سقف الصدر إلى أعلى وبذلك يعود إلى وضعه المرتفع (الخافض للأجنحة) (الشكل 7-6).



الشكل 6-6 عضلات الطيران المتزامنة synchronus عند حشرة damselfly (راجع النص)
(1) عندما تنقبض الرافع (2) عندما تنقبض الخوافض



الشكل 7-6 عضلات الطيران الغير المتزامنة asynchronus عند الدبور wasp (راجع النص)
(1) عند شد الخوافض (2) تنقبض الروافع (3) عند انقباض الخوافض (4) تشد الروافع

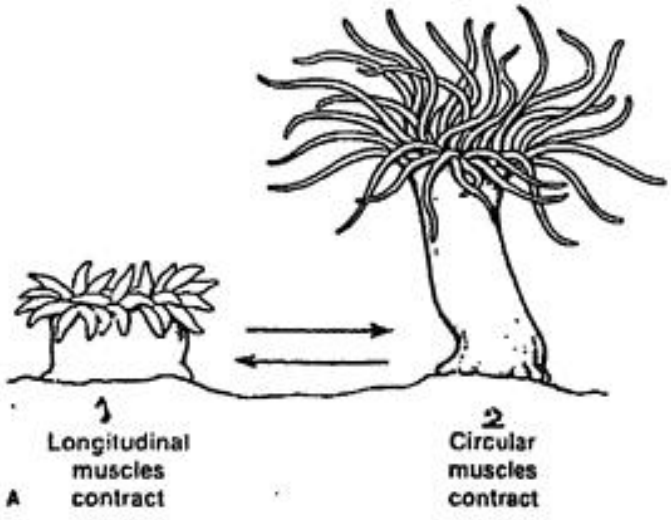
وعندما يتوقف السيال العصبى لهذه العضلات يعاد استقطاب الغشاء وينخفض تركيز Ca^{2+} داخل الألياف، بذا يقف نشاط العضلات ويتوقف الطيران. إذن فإن المدخل العصبى يعمل فقط كمفتاح on-off . هذا ويعتمد معدل الانقباض على الخواص الميكانية للعضل وجهاز الطيران المكون من الصدر، العضل والاجنحة.

6-4 الميكانية العضل - هيكلية

لكى تنجز عملا يجب أن تكون العضلة قادرة على تحويل قوة الانقباض إلى

حمل load . ويحدث ذلك عن طريق جهاز ميكانى مثل الهيكل الداخلى للفقاريات بروافعه levers، مفاصله joints، بكراته pulleys والتوصيلات العضلية المختلفة.

وفى المفصليات يكون الهيكل الخارجى درعاً يقى العضلات وغيرها من الأنسجة كما يعمل على نفس النظريات الميكانية مثل الهيكل الداخلى.هذا وتفتقر العديد من اللافقاريات الدنيالوجود هيكل صلب.لكن حتى هذه الحيوانات تستطيع التحرك وتحديد شكلها عن طريق الانقباض العضلى. يستخدم البعض منها، مثل الهيدرا hydra والديدان الحلقية هيكل هيدروستاتى hydrostatic (الشكل 8-6). حيث تنقبض العضلات الطولية والعرضية في مواجهة السائل المائى الموجود داخل التجويف. انقباض العضلات الطولية يقلل من الطول أى يصير الحيوان قصيرا بينما يؤدى انقباض العضلات العرضية إلى زيادة الطول على حساب العرض. هذا وتعتمد الحركة الدودية لامعاء الفقاريات على نفس الآلية.

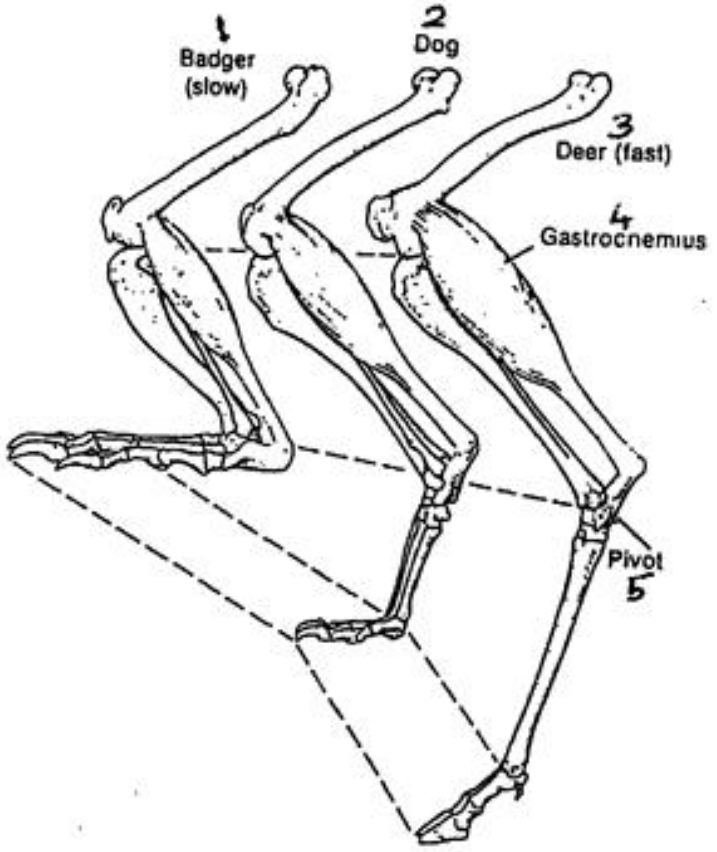


الشكل 8-6 شقائق النعمان تمتلك هيكل hydrostatic حيث تنقبض العضلات فى مواجهة بعضها مستفيدة من وجود الماء الغير قابل للضغط داخل الحيوان .
(1) حينما تنقبض العضلات الطولية، (2) حينما تنقبض العضلات الدائرية

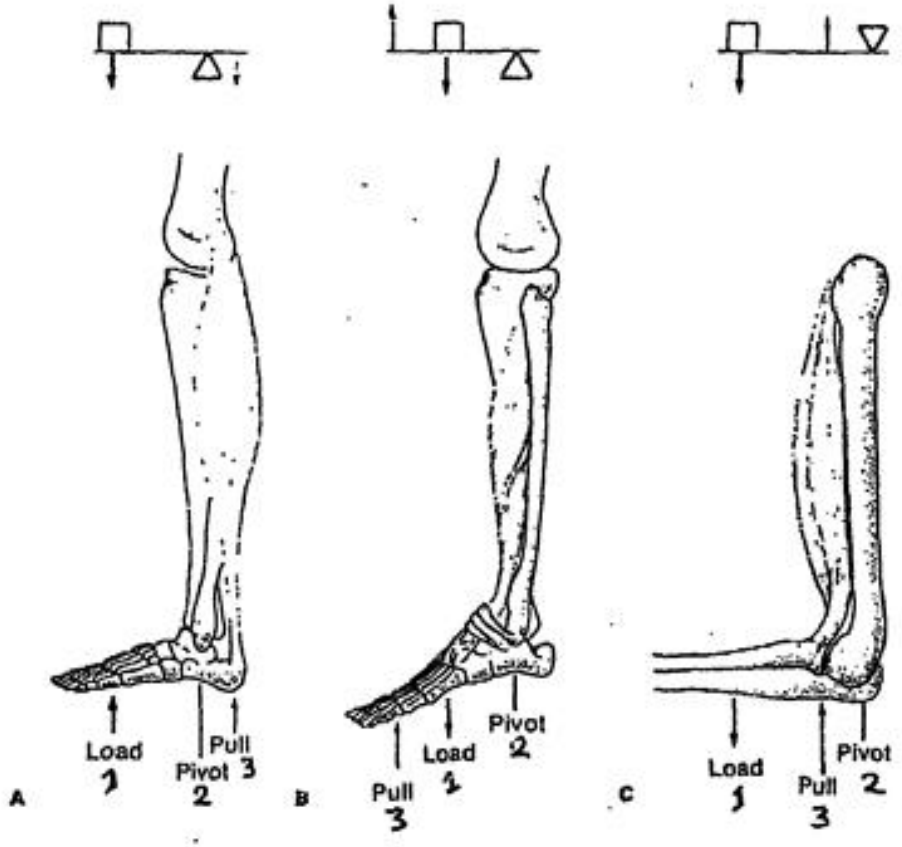
* تدخل العديد من الخواص الميكانية للعضلات والهياكل فى تحديد السرعة التى يمكن للعضل، عن طريقها، تحريك جزء طرفى من الجسم (مثل

القدم) بالنسبة لجزء يسبقة (مثل الركبة). وهى تشمل المسافة النسبية بين المفاصل، موضع اندراج insertion العضل، نسبة طول الاطراف والحمل. هذا وقد جاءت الاختلافات الأساسية فى التركيب الهيكلى للحيوانات المختلفة وفى تركيب الأطراف المختلفة لاحد الحيوانات لتلائم التخصصات الميكانية المختلفة؛ وهى تعمل عادة على قوانين الروافع البسيطة التى عرفناها فى الفيزياء.

عند مقارنة رجل حيوان الغرير badger، وهو حيوان يعتمد علي الحفر، مع رجل غزال deer وهو يعتمد على السرعة (الشكل 9-6) يتضح أن ، نسبة المسافة من إصبع القدم إلى نقطة الارتكاز، على المسافة من الكعب heel إلى نقطة الارتكاز تكون أكبر عند الغزال. هذه النسبة تعطى رجل الغزال سرعة أكبر ولكن قوة أقل. يوضح الشكل (10-6) ثلاثة نظم أساسيّة للروفاع فى الهيكل العظمى للفقاريات . يعمل العضل فى كل منها فى مواجهة الحمل عن طريق ارتكاز واحد من أجزاء الهيكل ضد الآخر عند نقطة ارتكاز يوفرها أحد المفاصل.

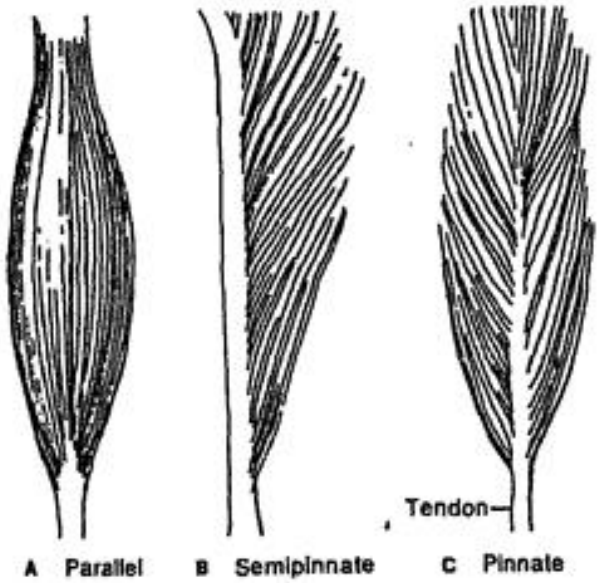


الشكل 9-6 التكيفات التى تؤدى إلى القوة كما فى رجل الغرير badger أو السرعة كما فى رجل الكلب وإلى درجة سرعة أكبر رجل الغزال. لقد رسمت بحيث يتساوى طول الفخذ femur
(1) الغرير (2) الكلب (3) الغزال (4) العضلة (5) نقطة الارتكاز



الشكل 10-6 ثلاثة نظم للروافع موجودة ضمن هياكل الفقاريات حيث تعمل العضلة فى مواجهة الحمل حول نقطة الارتكاز .
(A) رافعة من الدرجة الأولى (B) رافعة من الدرجة الثانية .
(C) رافعة من الدرجة الثالثة .

واحد من العوامل الهامة للوظيفة العضل – هيكلية تكون نتيجة لوضع الألياف العضلية بالنسبة لليفة الوترية tendon. فهناك التنظيم الريشى الشكل pinnate أو الشبه ريشى semipinnate الموجود فى عضلة الورك gastrocnemius (الشكل 6-11B&C). بالمقارنة مع التنظيم المتوازى ويوجد فى العضلات الخياطية sartorius الشكل (6-11A)



الشكل 11-6 ترتيب الالياف العضلية على الليفة الوترية
(A) تركيب متوازى (B) شبه ريشى (C) ريشى

عند تساوى الحجم والأبعاد يكون للألياف الريشية الشكل قوة أكبر على الليفة الوترية من الألياف المتوازية. يتأتى ذلك نتيجة للعدد الكبير للألياف فى الحالة الأولى. لكن نسبة إلى أن الألياف الريشية الشكل تكون أقصر طولاً من الألياف المتوازية لذلك فهى لاتستطيع الانقباض الشامل والسريع. لذلك نجد العضلات ذات الألياف المتوازية حيث تكون سرعة الانقباض مهمة بينما نجد النظام الريشى حينما تكون القوة هى المفضلة.

أيضا تؤثر درجة مرونة الليفة – الوترية على الوظيفة العضل – هيكلية. إذ تقوم الليفة الوترية بتخزين الطاقة الحركية kinetic حينما تشد نتيجة لانقباض الألياف العضلية أو كنتيجة لقوى خارجية، مثل قوة دفع الجسم عند محاولة ثنى أحد المفاصل. مثلا حينما يجرى الانسان فإن الطاقة المخزونة فى الوتر المشدود تستخدم لرفع كعب القدم بعيداً عن الأرض.

مثال آخر لاستخدام الطاقة المخزونة فى العناصر المرنة هو القفزة الباليستية (كالقذيفة)ballistic عند بعض الحشرات ومنها الجراد. فقبل أن تقفز الجرادة تكون الرجل منثنية تماما ويكون الجسم قريبا من الأرض. تنقبض العضلات الباسطة extensor ، والقابضة flexor معا، بينما تبقى الرجل فى نفس الوضع. بهذه الطريقة يتم تخزين قدر كبير من الطاقة الكامنة فى الوتر وعضلات وهيكل الرجل، كاستجابة إلى مؤثرات حسية من خلال اعضاء البصر، اللمس أو غيرها ، يتم تنشيط خلايا بين-عصبية تقوم بتثبيط الخلايا الحركية للعضلة القابضة فترتخى هذه فجأة. يؤدى الارتخاء المفاجئ إلى تحرير الطاقة المخزونة فى العضلة الباسطة والتراكيب المرنة المرتبطة بها فتمتد الرجل بسرعة وقوة كبيرتين جدا بذلك تندفع الجرادة فى قفزة عالية تشبه القذيفة.

6-5 الهيكل العظمى :

يمثل الهيكل العظمى جهاز دعامة يحمى الجسم من القوى الخارجية ويسمح للعضلات بأن تحرك أجزاء معينة من الجسم عن طريق القوى الكامنة فى انقباض العضلات. يتكون الهيكل العظمى من مادة عالية المرونة وهى العظم ، لدراسة فزيولوجيا العظم، الرجاء الرجوع للفصل 17 من كتاب علم وظائف الاعضاء العام (1999). أما هنا فسنتناول العظم كجهاز دعامة داخلى لجسم الكائن الحى.

يتعرض الهيكل الصلب للانكسار حينما ينثنى أو يلتوى. إذا أخذنا عمودا اسطوانيا وثبتناه عند أحد أطرافه وأعملنا قوة فى الطرف الآخر فسوف ينثنى وقد ينكسر إذا كانت القوة كبيرة. هذا ويكون الانكسار فى وسط العمود، حيث يمثل وسط العمود أقل مشاركة فى قوته ويكون الدعم الميكانى أكثر عند أطراف الأسطوانة. لذلك نجد أن النموذج الأمثل لعظم الاشكال الهيكلية هو أنبوب مجوف بدلا عن عصاة صلبة.

تزداد قوة الاسطوانة مع ازدياد نصف قطرها، مثلا تكون قوة اسطوانة نصف قطرها (2r) ، يساوى 6 أضعاف عصاة صلبة نصف قطرها r (يتساوى الوزن فى الاثنين). أى أن العظم المجوفة تكون قوتها 3 أضعاف العظم الصلبة توجد 4 أنواع للعظام عند الثديات وهى :

(1) عظام طويلة ورفيعة مثل عظام الأطراف.

(2) عظام صغيرة ومكتنزه يتساوى طولها تقريبا مع عرضها مثل عظام الرسغ(wrist) carpal وعظام الكاحل (ankle) tarsal.

(3) عظام رفيعة مسطحة مثل لوحة الكتف scapula والجمجمة skull.

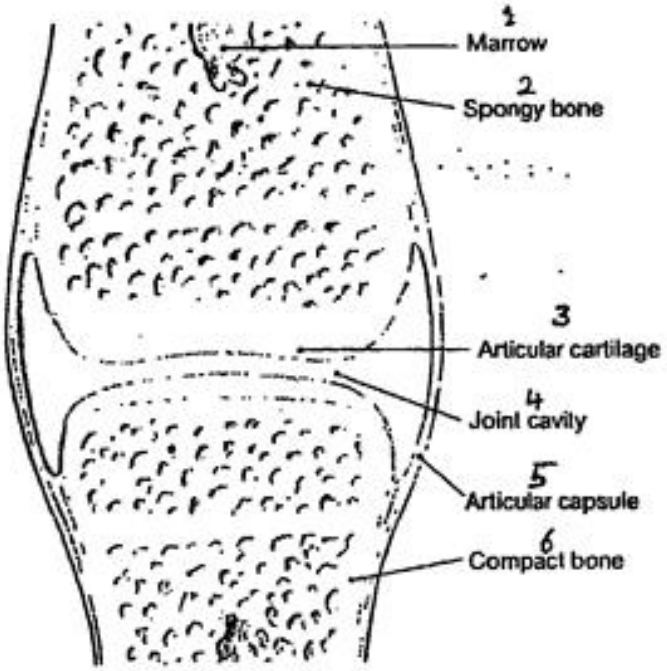
(4) الفقارات (المفرد فقارة، فقرة)vertebrae

تمثل العظام مادة مناسبة للأشكال الهيكلية التى تعنى بالدعم والحركة وذلك نسبة لمقاومتها العالية للشد والضغط. لكنها تحتوى على مواد معدنية كثيرة (تصل كثافة العظم 2000) لذلك يكون من الضرورى الاقلاق من كمية العظم (وبالتالى وزنة) . دون الاخلال بقوته الميكانية المتطلبة لاداء وظيفته.

وحيث أن قوة العظام المجوفة أكبر من العظام الصلبة، لذلك نجد أن العظام الطويلة، مثل عظم الفخذ عند الثديات تكون مجوفة. هذا ويكون التجويف ممتلئا بالنخاع bone marrow . من هنا نستخلص أن التجويف أفاد من ناحيتين فمن ناحية حقق القوة الميكانية المطلوبة ومن ناحية أخرى قلل من وزن العظم.

أيضا يمكن الاقتصاد فى وزن العظم عن طريق وجود مسامات فى العظم (العظم الاسفنجى). نجد أن عظم الفخذ، مثلا، يحتوى على عظم جامد compact على السطح الخارجى وعظم مسامى cancellous فى الداخل خاصة عند

الاطراف. أيضا يخفف العظم المسامى عند الاطراف القوة الضاغطة علي الغضروف، الذى يغطى أسطح العظام عند المفاصل، حيث يسمح بانزلاق الأسطح على بعضها (الشكل 12-6).



الشكل 12-6 مفصل الركبة
(1) نخاع (2) عظم اسفنجى (3) غضروف المفصل (4) تجويف المفصل
(5) غلاف المفصل (6) عظم متضام

الفصل السابع

التغذية ، الهضم والامتصاص

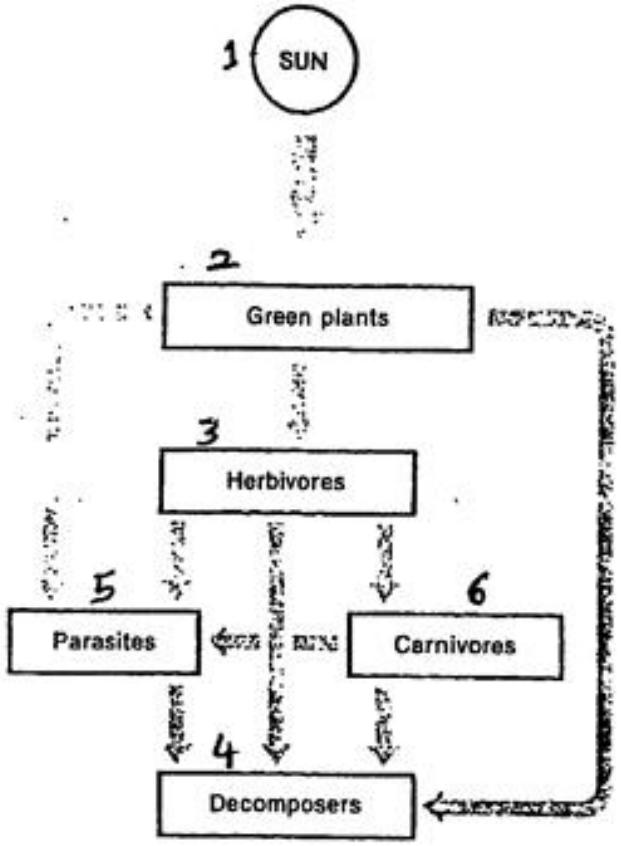
الفصل السابع

التغذية، الهضم والامتصاص

تعتمد الكائنات الحية على مصادر خارجية من المواد الخام والطاقة التى تحتاجها للنمو، لتجديد الأنسجة وأداء الوظائف المختلفة. بالطبع يجب أن يتساوى المجموع الكلى للعناصر المتناولة والطاقة المستمدة، جميع المخرجات زائداً العناصر التى تدخل فى تكوين الأنسجة الجديدة زائدا كل الطاقة التى يتم استهلاكها. يتم الحصول على الطعام الذى يستخدم فى توفير العناصر اللازمة لنمو وتجديد الانسجة وكمصدر للطاقة من العديد من المصادر النباتية والحيوانية ومصادر غير عضوية. لكن تأتى الطاقة المستخدمة في تزويد كل الوظائف فى جسم الحيوان، فى النهاية، من مصدر وحيد هو الشمس (الشكل 1-7). هذا وليس في استطاعة أى كائن حى أن يستفيد من الطاقة الشمسية مباشرة فيما عدا الكائنات التى تصنع غذاءها autotrophic عن طريق التمثيل الضوئى photosynthesis، أى النباتات الخضراء التى تحتوى على مادة اليخضور clorophyll. تأخذ النباتات الخضراء (وتشمل الكائنات وحيدة الخلية) الطاقة الشمسية لتصنيع مواد عضوية من الماء وثاني أكسيد الكربون، تحتوى المواد العضوية المصنعة علي طاقة كيميائية يمكن تحريرها واستخدامها لتزويد التفاعلات التى تحتاج إلى طاقة داخل الأنسجة الحية. بذلك يتناول كل الحيوانات المواد عضوية heterotrophic التى تحتوى على الطاقة الكيميائية الضرورية للحياة.

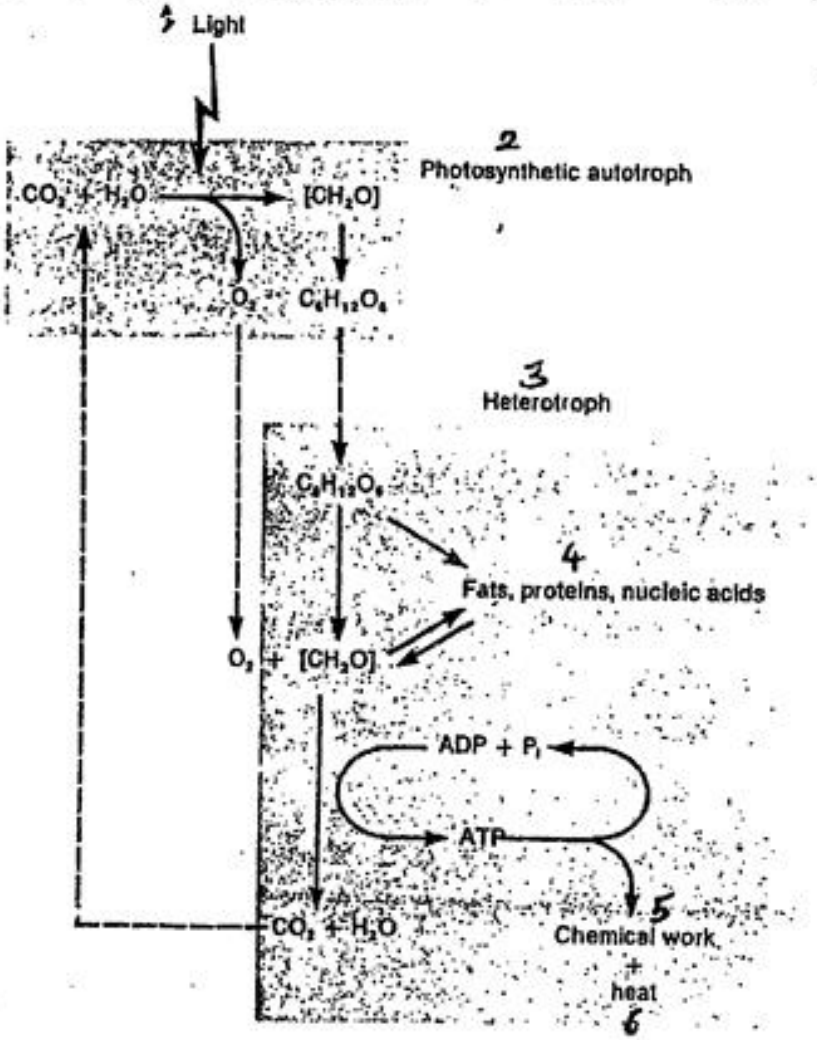
يوضح الشكل (2-7) رسما مبسطا لسريان الطاقة من الشمس إلى جزئ ATP. أولى المواد التى يتم تصنيعها عن طريق التمثيل الضوئى، هى السكريات الأحادية من الماء وثانى أكسيد الكربون. يتم ، فى السلاسل الغذائية القصيرة أكل النباتات الخضراء بواسطة حيوان كبير الحجم مثل الفيل. هذا الحيوان ليس

له أعداء فى الطبيعة فيذلك يكون عن نهاية السلسلة إلى أن يموت فتحلله البكتريا أو تاكله الحيوانات التى تاكل الجيف .scavengers فى السلاسل الغذائية الطويلة يكون التسلسل النباتات المغمورة أو المعلقة phyotoplankton—› الحيوانات المغمورة أو المعلقة zooplankton —› سمكة صغيرة —› سمكة متوسطة —› سمكة كبيرة. لكن انسياب المواد الغذائية فى الطبيعة يكون أكثر تعقيدا من ذلك (الشكل 1-7).



الشكل 1-7 العلاقة بين مستويات الطاقة المختلفة
تشير الاسهم إلى اتجاه سريان الطاقة. تمثل (1) الشمس (2) النباتات الخضراء (3) الحيوانات العشبية موقعا مركزيا فى حين أن (4) البكتريا التى تقوم بتحليل الجزئيات العضوية مهمة لدورة المواد (5) اللطفيليات، (6) أكلات اللحوم

هذا ويكون هنالك فقدان لمواد غذائية ولطاقة حرة فى كل مرحلة عند الانتقال من مستوى غذائى trophic level إلى آخر. فمثلا يحتوى الفدان من القمح على طاقة أكثر إذا ما تم استهلاكه بواسطة الإنسان مباشرة مما لو استعمل كعلف للإبقار، أى تم تحويله إلى لحمة بقر أما فقدان الطاقة فينتج عن الحاجة لعملية تجديد الانسجة الذى يتطلب تكسير جزئيات الطعام إلى جزئيات أصغر ثم تحويل هذه الجزئيات مرة أخرى إلى جزئيات أكبر حجما وأكثر تعقيدا.



الشكل 2-7 سريان الطاقة الكيميائية فى الطبيعة، (1) الضوء (2) الكائنات ذاتية التغذية autotroph (التمثيل الضوئى) (3) الكائنات heterotroph متنوعة التغذية (4) جزئيات الدهون، البروتينات والاحماض الدهنية (5) استهلاك الطاقة الكيميائية (6) حرارة

7-1 عملية الهضم :

لكى يستفيد الحيوان من الطعام للعمليات المختلفة من نمو وتجديد للأنسجة وتحرير للطاقة يحتاج أولاً أن يهضم هذا الطعام عملية الهضم هى فى المقام الأول عملية كيميائية معقدة تتطلب عمل انزيمات enzymes معينة تقوم بتكسير جزئيات الطعام الكبيرة إلى جزئيات أبسط وأصغر حجما بحيث تستطيع عبور غشاء الخلايا بسهولة. مثال ذلك أن النشا وهو عديد سكريات polysaccharide طويل- السلسلة يتم تكسيره إلى جزئيات أكثر صغرا، السكريات الثنائية disaccharide ومن ثم إلى سكريات أحادية monosaccharides.

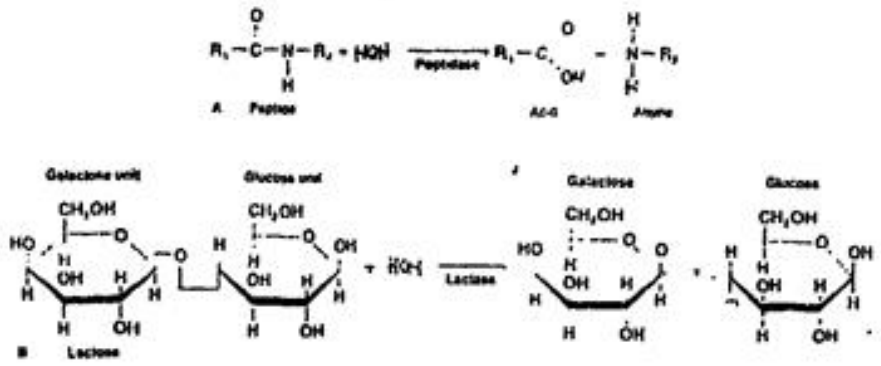
كما يتم تكسير البروتينات إلى عديد ببتيد polypeptide ومن ثم إلى ببتيدات ثنائية dipeptides وأحماض أمينية aminoacids. كما يتم تكسير الدهون إلى أحماض دهنية وجلسرول.

كل العمليات الكيميائية التي نطلق عليها هضم تتطلب حلمأة hydrolysis الجزئيات الكبيرة، أى استخدم جزئ ماء اثناء تكسير الرابطة بحيث يضاف H^+ إليأحد مكوناته ويضاف OH^- للآخر (الشكل 3-7).

لايمكن الاستفادة من الطاقة الكيميائية التى يتم تحريرها داخل الجهاز الهضمى اثناء عملية الحلمأة ماعدا كحرارة. لهذا السبب نجد أن الأنزيمات الهضمية لاتقوم بتكسير الروابط التى تحتوى على قدر كبير من الطاقة والتى توجد داخل المكون نفسه مثال تلك الموجودة داخل جزئ الجلوكوز والتى يتم تحريرها أيضياً داخل الخلايا لتستغل فى الوظائف الحيوية للخلايا والانسجة.

وفى الحيوانات متعددة الخلايا المتزويات metazoa تتم عملية الهضم داخل تجويف القناة الهضمية alimentary canal (الشكل 4-7) حيث يتم افراز الانزيمات اللازمة لعملية الهضم بداخلها. بعد ذلك تدخل المواد التى تم هضمها

من القناة الهضمية إلى مجرى الدم عن طريق عملية الامتصاص absorption. يستفاد من هذه الجزئيات فى توفير الطاقة، النمو وتجديد الأنسجة فيما يعرف بالتمثيل الغذائى assimilation وذلك بعد دخولها للأنسجة.



الشكل 7-3 عملية حلمأة (A) الببتيدات و(B) السكريات الثنائية يتم فى كل منها اضافة جزئ ماء

7-2 التغذية

يشمل مصطلح التغذية nutrition مجموع العمليات التى يستخدمها الحيوان للحصول على تناول، هضم وتمثيل الطعام.

استراتيجيات التغذية (تناول الطعام)

تمثل عملية الحصول على المتطلبات الغذائية مفتاح نجاح النوع species، فمعظم وظائف الحيوان الروتينية مكرسة لخدمة هذا الغرض. هذا وتستخدم الحيوانات استراتيجيات مختلفة لتحصل على الطعام. هنالك من الحيوانات ما

يبحث عن، يجمع، يطارد، ينقض، يقبض، أو يفترس الطعام أما الحيوانات المقعدة التى لا تستطيع الحركة من مكان إلى آخر فإنها تلجأ إلى طرق أكثر «دهاء» مثل امتصاص الطعام عن طريق السطح الخارجى للجسم، الترشيح filter feeding أو الاقتناص.

7-2-1 امتصاص الطعام عبر سطح الجسم :

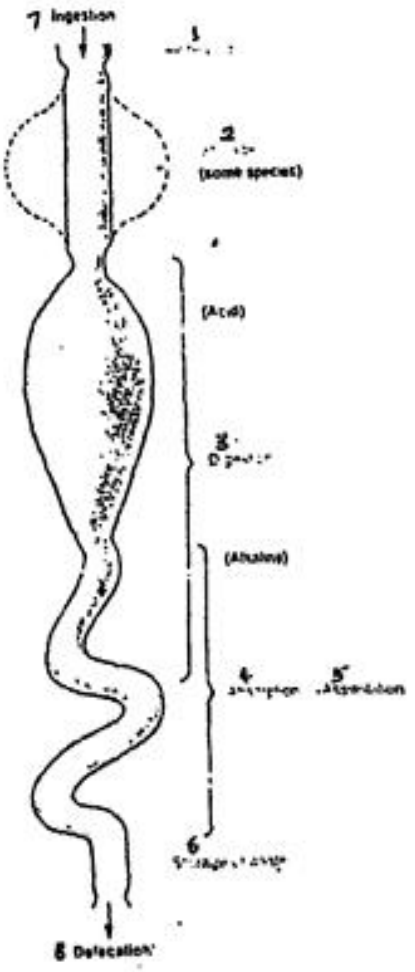
تستطيع بعض أنواع الحيوانات وحيدة الخلية protozoa، الطفيليات الداخلية endoparasites واللافقاريات المائية، أخذ جزئيات الطعام عبر السطح الخارجى للجسم مباشرة من البيئة المائية التى تعيش بداخلها.

تؤخذ جزئيات الطعام الصغيرة مثل الأحماض الأمينية من البيئة ضد منحنى تركيزها، عن طريق آليات النقل المختلفة (راجع علم وظائف الأعضاء العام، (1999) الفصل 4) كما تؤخذ جزئيات أو حبيبات الطعام ككل عن طريق التناول الخلوى أو الالتهام الخلوى endocytosis وتشمل كل من الشرب الخلوى pinocytoiss والبلع أو الأكل أو الالتهام الخلوى phagocytposis. فى هذه العملية يلتحم الجزئ أو حبيبات الطعام الصغيرة إلى سطح الخلية يلى ذلك دخول الغشاء إلى الداخل مكونا حويصلة طعام food vacuole والتى تسبح داخل السيتوبلازم إلى أن تلتحم مع أحد اليزوسومات lysosomes، وهو عضى يحتوى على أنزيمات هضم. بعد اكتمال عملية الهضم تدخل المواد الناتجة عن عملية الهضم إلى السيتوبلازم مثلما يحدث فى الباراسيوم paramecium (الشكل 5-7).

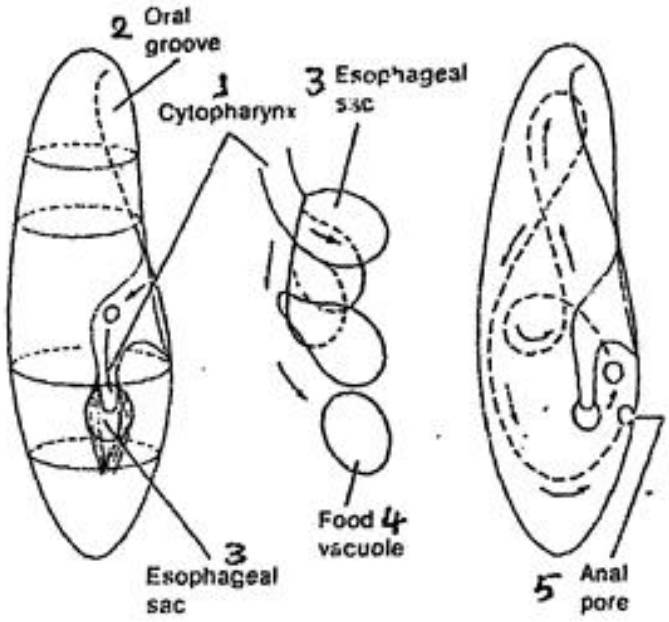
7-2-2 تناول الطعام عن طريق الترشيح

تضطر الحيوانات المقعدة sessile أن تنتظر الطعام ليأتى إليها. وهى عادة تعيش داخل بيئة مائية وتعتمد فى غذائها على الكائنات الصغيرة التى تجلبها

تيارات المياه حيث تقوم باصطيادها بطرق غاية فى الذكاء مثال للحيوانات المقعدة الى تتغذى على العوالق planktons ، الاسفنجيات sponges، العضدى الأرجلbrachiopods، الرقيقى الخياشيم lamellibrachs والزقيات tunicates.



الشكل 4-7رسم يمثل الشكل العام للقناة الهضمية
(1) الاستقبال (2) التخزين (فى بعض الانواع) (3) الهضم (4) الامتصاص
(5) التمثيل (6) تخزين الفضلات (7) اخذ الطعام (8) اخراج الفضلات



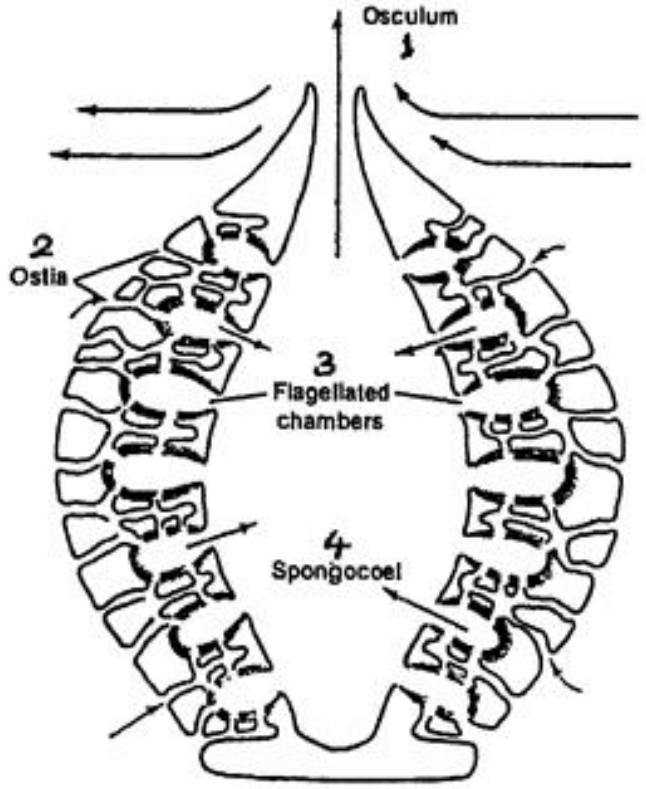
الشكل 5-7 تكوين حويصلة الطعام داخل البارامسيوم. تجويف حبيبات الطعام إلى داخل cytopharynx (1) الموجود عند نهاية oral groove (2) تمر الحبيبات إلى كيس المرئ مكونا (4) حويصلة الطعام تخرج الفضلات عبر (5) فتحة الشرج

تعتمد الاسفنجيات فى جلب الطعام على التيارات التى تتولد سلبيا، أى لا يقوم الحيوان بتوليدها (الشكل 6-7) ثم تمسك بالطعام مستخدمة السياط الموجودة على خلايا تبطن التجويف الجسمى وتعرف بالخلايا القمعية choanocytes.

أما كيف يتكون التيار سلبياً؟ فيحدث كالآتى، يتسبب سريان الماء عبر الفتحة العلوية للأسفنج osculum (وهو مخروطى الشكل) فى انخفاض الضغط خارجه. كنتيجة لذلك يتم سحب الماء خارج الاسفنج عبر الفتحة فيتم احلاله بواسطة الماء الذى يدخل عبر الفتحات ostia العديدة الموجودة علي جدار الجسم.

للمخاط mucus دور هام بالنسبة للعديد من الحيوانات التى تعتمد على

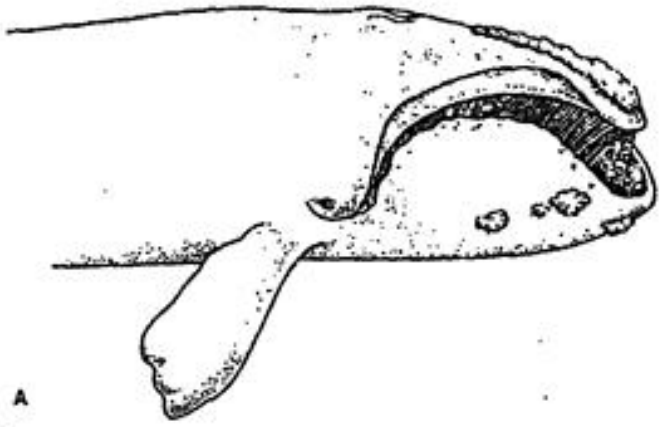
الترشيح حيث تلتصق به حبيبات الطعام وتقوم الأهداب الموجودة على الطلائية والتى يغطيها المخاط بنقل المخاط وما يحتوية من طعام إلى فتحة الفم. تظهر أهمية هذه الآلية فى المياه الراكدة نسبيا.



الشكل 6-7 قطاع طولى لأحد الاسفنجيات يوضح تيارات المياه التى تتولد سلبيا
(راجع النص) (1) osculum (2) ثقوب (3) حجرات بها سياط (4) تجويف الاسفنج

جدير بالذكر أن أكبر الحيوانات حجماً وهو حوت البلين baleen whale يتغذى على العوالق ولذلك فهو مزود بحافة من الخيوط المتوازية من القرتين keratin، تتدلى بين فكية العلوى والسفلى وتعمل كمصفاة (الشكل 7-7). عند اغلاق الفم يخرج الماء من خلال الخيوط تاركا الحيوانات الصغيرة (مثل القشريات) داخل الفم حيث يتم ابتلاعها. أيضا تمتلك طيور النحام flamingo

جهازا شبيها بذلك (الشكل 8-7) تجمع بواسطته الحيوانات الصغيرة وغيرها من الكائنات morsels التى تتواجد على قاع المياه العذبة الضحلة



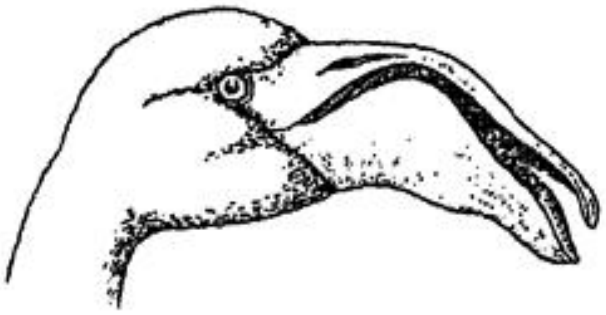
.الشكل 7-7 تحور الفم ليناسب التغذية عن طريق الترشيح (راجع النص)(حوت البالين)

7-2-3 اختراق الضحية ثم امتصاص ما بها من رطوبة

تناول الطعام عن طريق اختراق جسم الضحية يوجد بين الديدان المفلطحة platyhelminthes، أو ديدان السلكيـــة أو الخـــيطيـــة nematodes والديـدان الحلقيةannelids والمفصليات. أما الوطواط مصاص الدماء vampire bat فهو لا يمتص بل يلعق الدم الذى يخرج من الجروح التى يحدثها بأسنانه الحادة.

يحتوى لعاب الحيوانات التى تمتص الدماء، كالعلق الطبى leetches على مواد مانعة لتجلط الدم. بين المفصليات نجد البعوض mos ، البرغوث السريرى والقمل lice، تمتص دم الإنسان ناقلة له العديد من الأمراض إن لم تكن فى حد ذاتها تمثل ازعاج . لكن توجد آلية الامتصاص كذلك فى المفصليات مثل البرغوث الحقيقى hemiptera والذى يخترق النباتات ويمتص رحيقها وفيه تكون

أجزاء الفم فى شكل خرطون probosis (الشكل9-7). هذا ويتم طى الخرطوم، بعد تناول الطعام، حتى لا يعيق الحيوان فى حركته.



الشكل 8-7 تحور الفم ليناسب التغذية عن طريق الترشيح (راجع النص) النحام

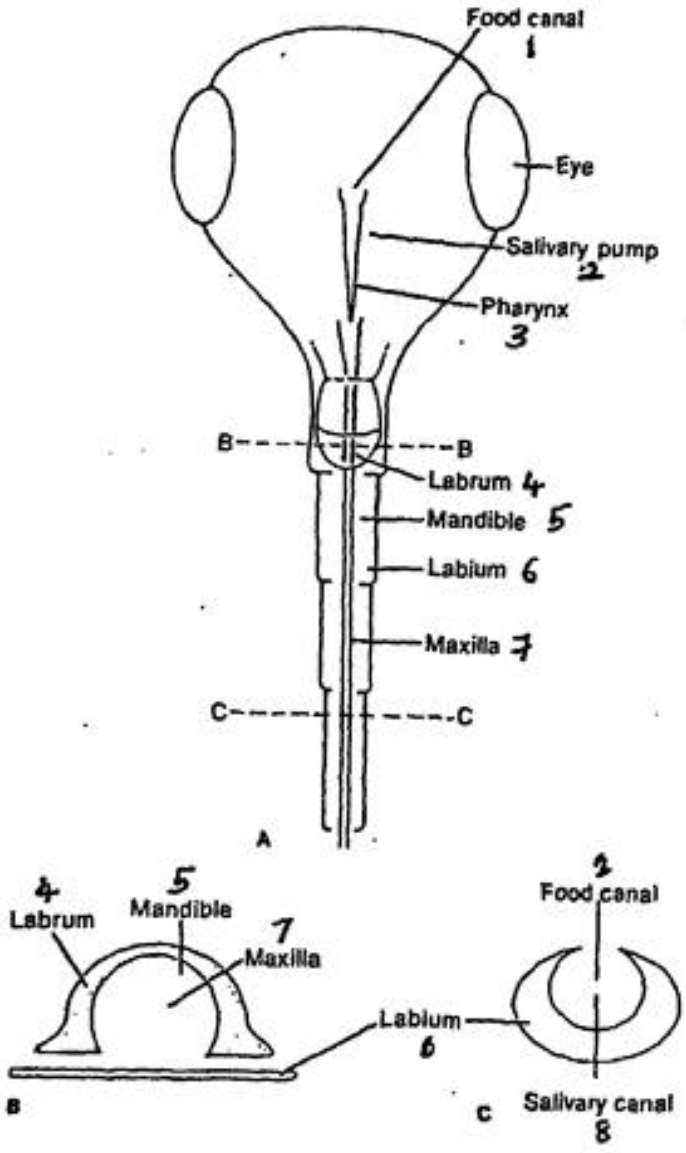
7-2-4 تمزيق الطعام وتقطيعه، بواسطة المناقير والأسنان

بالرغم من أنه لاتوجد أسنان حقيقة عند اللافقاريات إلا أنه قد تمتلك ما يشبه المنقار أو ما يشبه الاسنان مثال الاخطبوط الذى يمتلك مناقارا يستخدم لتمزيق الطعام.

تمتلك الفقاريات الدنيا الأسماك، البرمائيات والزواحف اسنانا مدببة توجد على الفك أو على سقف الفم. وهى تساعد فى ثقب، تمزيق أو ابتلاع الفريسة عادة تقوم هذه الحيوانات بابتلاع الفريسة بكاملها.

للطيور مناقير وليست لها أسنان يوضح الشكل (7-10) العديد من أنواع المناقير وهى تختلف باختلاف نوع الطعام أو باختلاف طريقة التغذية.

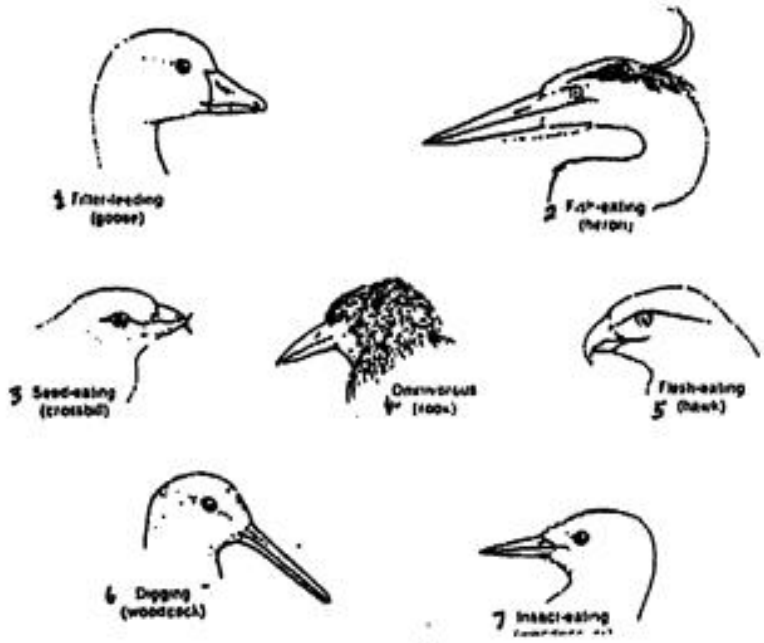
تمتلك الثعابين مثل الكوبرا أسنانا متحورة تستخدم لحقن السم (الشكل 7-11) يرتبط الفك السفلى للثعبان مع الفك العلوى بواسطة رباط مرن elastic ligament هذا يساعد الثعبان على ابتلاع حيوانات يفوق حجمها قطر رأس الثعبان (الشكل 7-11).



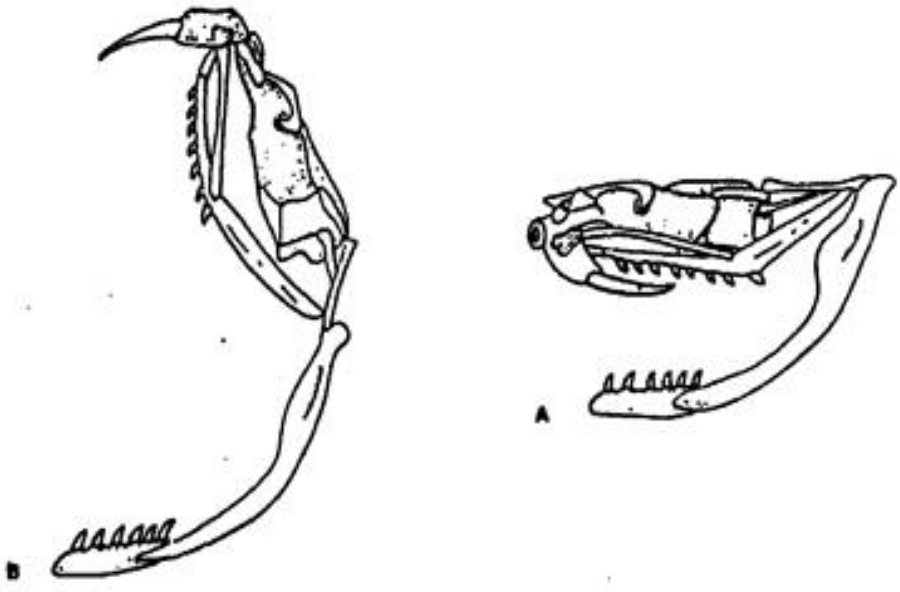
الشكل 9-7 أجزاء الفم التى تحورت لتناسب امتصاص رحيق النباتات فى برغوث

(1) قناة الطعام (2) مضخة اللعاب (3) البلعوم (4) الشفة العليا

(5) الفك الأسفل (6) الشفة السفلى (7) الفك الأعلى (8) قناة اللعاب

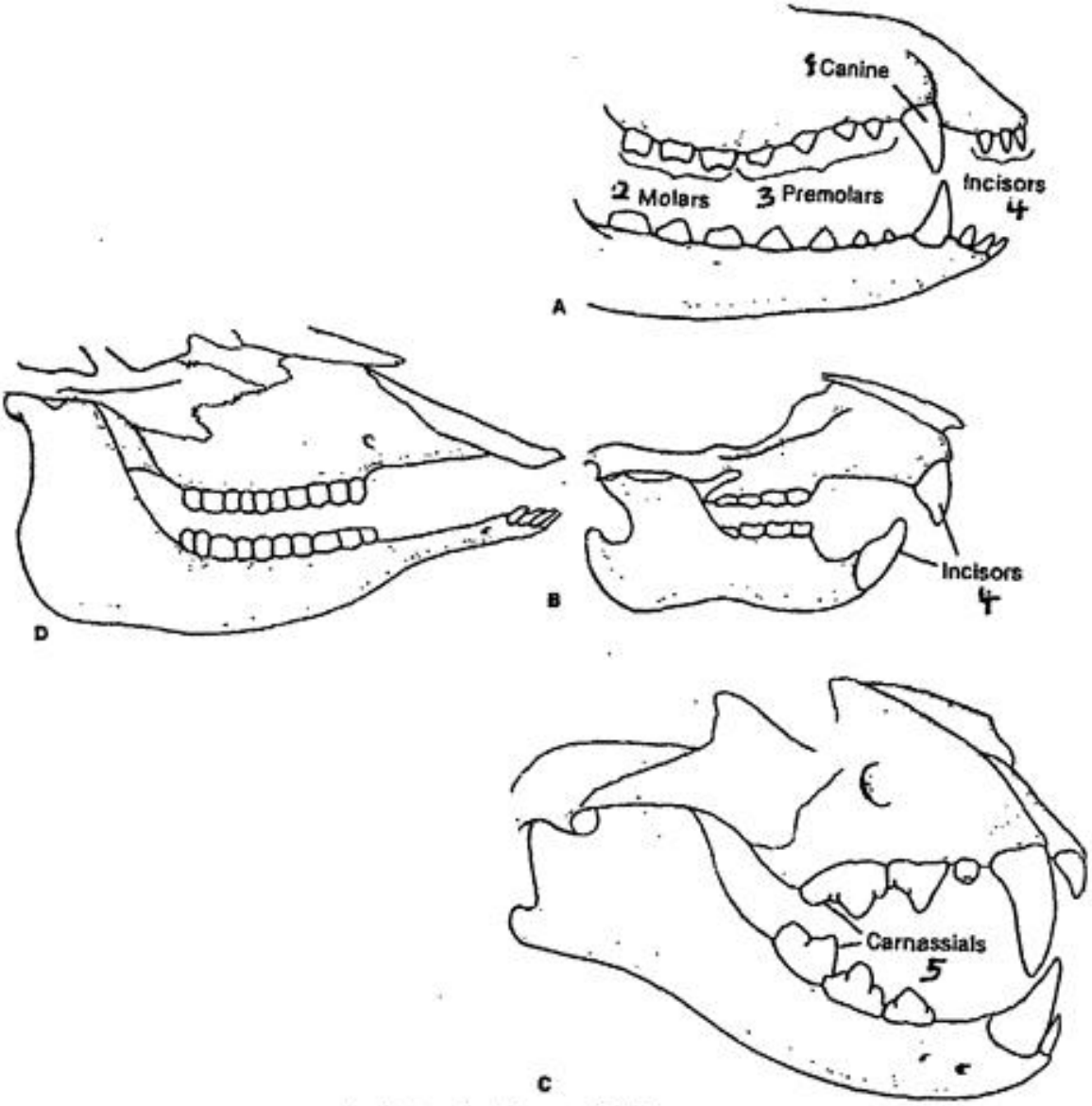


الشكل 10-7 تحور مناقير الطيور لتناسب طرق تناول الطعام المختلفة
(1) الترشيح (الأوزة) (2) أكل الاسماك البلشون heron
(3) أكل الحبوب (القرزبيلcrossbille) (4) أكل متنوع (غراب الفيطrook)
(5) اللحوم (الصقرhawk) (6) الحفر لدجاجة الأرض (7) أكل الحشرات (نقار الخشب)



الشكل 11-7 الاسنان المتحورة للكوبرا (أنياب)
يرتبط فكا الثعبان العلوي والسفلي بواسطة رباط مرن

تحورت الأسنان فى الثديات لتخدم أغراضا مختلفة (الشكل 12-7). تستخدم القواطع خاصة بواسطة الارينبيات lagomorphs فى عملية القرض أو القضم gnawing . تستخدم الأنياب المدببة canines بواسطة آكلات اللحوم carnivores وآكلات الحشرات insectivores والرئيسيات للعض والتمزيق.



الشكل 12-7 تحور الأسنان عند الثديات
(A) التركيب العام للأسنان (B) السنجاب (c) الأسد (D) الثور
(1) نائب (2) الطواحن (3) طواحن (4) القواطع (5) قواطع

أيضا لاكلات اللحوم قواطع حادة وطواحن molars حواف كالسكين تعرف بالقواطع carnassials وهى تستخدم لتقطيع اللحم إلى قطع صغيره يسهل بلعها. أما الطواحن عند الحيوانات الماشية مثل المزدوج الأصابع (كل ذى ظفر مشقوق) artrodactyla (البقرة ، الخنزير وفرس النهر) مفردات الاصابع (لها حافر) perissodactyla (الحصان والحمار الوحشى) والخرطومية proboscidea (الفيل والماموث) فتستخدم فى عملية الطحن بالتحريك من جنب إلى جنب. تتكون هذه الأسنان من طبقات folded من المينا enamel، الملاط cement والعاجينdentine تختلف عن بعضها فى صلابتها ومعدل تاكلها بذلك تتكون طبقات تساعد الحيوان على عملية الطحن.

استخدام السم للامساك بالفريسة :

تستخدم السموم والتى تعمل فى معظمها على الجهاز العصبى (بين الثعابين يحتوى سم بعض ذوات الاجراس rattlesnake على مادة تكسر كرويات الدم الحمراء) بواسطة العديد من المجموعات الحيوانية للتحكم فى الفريسة أو كآلية للدفاع. هذه السموم عبارة عن مواد بروتينية وبذلك يتم تكسيرها بواسطة انزيمات الحيوان المفترس عندما يقوم بهضم فريسته.

7-3 نظرة عامة على الجهاز الهضمى .

لقد ذكرنا سابقا أن الحيوانات وحيدة الخلية، والاسفنجيات تتغذى فى الغالب عن طريق الالتهام الخلوى. وفيه تقوم الخلايا بالامساك بجزئيات الطعام ومن ثم وضمها داخل الخلية intracellular digestion. لكن تعتمد الحيوانات الأعلى رتبة على الهضم خارج الخلية extracellular digestion والتى تتم داخل تجويف أنبوبى؛ القناة الهضمية alimentary canal (الشكل 4-7). من ناحية جغرافية topologically يقع هذا التجويف خارج الجسم، أى يتم تبادل المواد مع البيئة المحيطة وإن كانت العملية تخضع للتنظيم.

يتعرض الطعام عند مروره عبر هذه القناة لمعالجة ميكانية، كيميائية وبكتيرية. بعد أن يتم هضم الطعام تنتقل نواتج الهضم أو يتم تخزين المواد الغير مهضومة مع مخلفات البكتريا لوقت قصير ثم يتم من بعد اخراجها كفضلات.

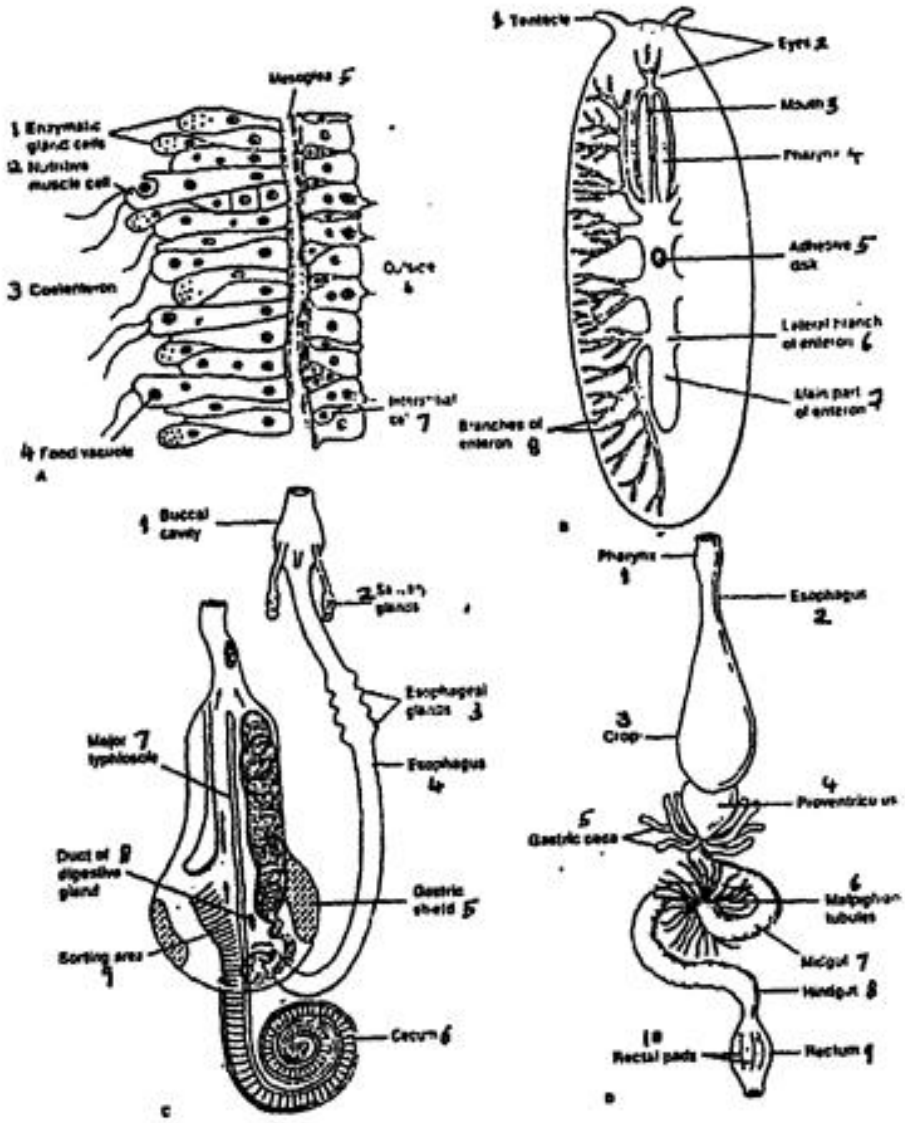
القناة الهضمية مصممة (الشكل 13-7 والشكل 14-7) بحيث تسمح بمرور الطعام فى اتجاه واحد فقط . عند مروره الطعام يتم خلطه بالانزيمات الهاضمة التى تعمل تحت ظروف pH مختلفة توفرها خلايا طلائية القناة الهضمية أو التراكيب المرتبطة بها. لاتوجد قناة هضمية فى اللاحشويات التى يكون لها تجويف غير نافذ يعرف ويفتح عن طريق الفم الذى تلفظ منه أيضا الفضلات. هذا وتوجد القناة الهضمية فى كل الشعب الاعلى مرتبة من الديدان المفلطحة.

تنقسم القناة الهضمية وظيفيا إلى 4 أجزاء رئيسية (1) الاستقبال (2) النقل والتخزين (3) الهضم والامتصاص (4) امتصاص الماء وطرد الفضلات

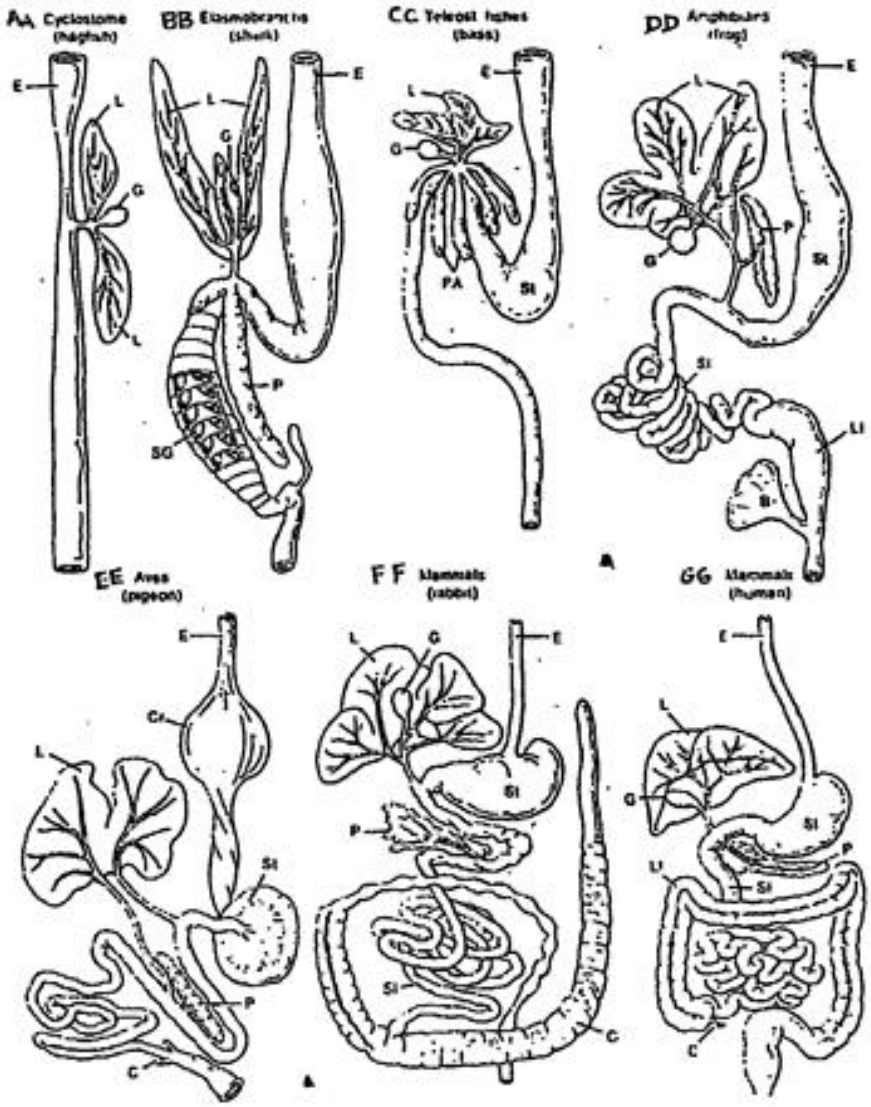
(1) استقبال الطعام

تتكون القناة الهضمية، عند مقدمتها، من أعضاء وتراكيب لها مهمة تناول الطعام وابتلاعه وتشمل أجزاء الفم، تجويف الفم buccal cavity البلعوم pharynx والتراكيب المصاحبة مثل المناقير ، الاسنان ، اللسان والغدد اللعابية.

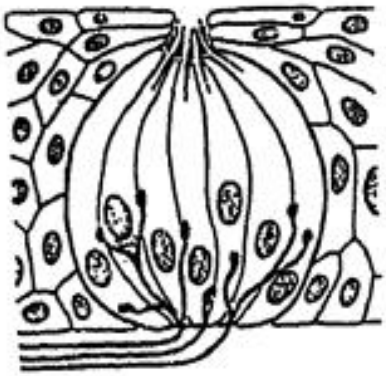
توجد الغدد اللعابية فى معظم الـmetazoa الأعلى رتبة من الديدان المفلطحة. المهمة الرئيسية للعاب saliva، هى تزليق الطعام lubrication) ليسهل بلعه. يساعد وجود المخاط mucus علي عملية البلع. وأهم مكوناتة mucopoly saccharide يعرف بالمخاطين mucin. احيانا يحتوى اللعاب على مواد اضافية مثل انزيمات الهضم والسم. وفى الأنواع التى تتغذى على الدم يحتوى اللعاب على مضادات التجلط anticoagulants. يساعد اللسان ويوجد عند الحبليات على عملية البلع، هذا ويستخدم فى بعض الحيوانات للامساك بالطعام كما في الضفادع. أيضا يستخدم فى الحس الكيميائى chemoreception لاحتوائية علي براعم التذوق (الشكل15-7).



الشكل 13-7 القناة الهضمية عند بعض اللافقاريات (A) قطاع طولى لمائط الجسم عند الهيدرا،
(B) الجهاز الهضمى للديدان المفلطحة (C) الجهاز الهضمى الحلزونى (D) الجهاز الهضمى للصرصار
(A) (1) خلايا غددية (2) خلايا عضلية للتقوية (3) الهوش: جوف الحيوان اللاهشوى (4) حويصلة
طعام (5) الهلام المتوسط mesoglea (6) خارج الحيوان (7) خلية بينية (B)(1) مجس (2) عيون
(3) فم (4) بلعوم (5) قرص لاصق (6) فرع جانبى للقناة الهضمية (7) الجزء الرئيسية (8) الفرع
(C) (1) تجويف الفم (2) الغدد اللعابية (3) غدد المرئ (4) المرئ (5) gastric sheild
(6) cecum (7) typhlosole (8) قناة الغدة الهضمية (9) منطقة الفرز (D)(1) الحلق (2) المرئ
(3) الحوصلة (4) proventricurlus (5) gastric caeca (6) انابيب مالبيجيان
(7) المعى الأوسط (8) المعى الخلفى (9) المستقيم (10) rectal pads



الشكل 14-7 الجهاز الهضمي عند الحيوانات الفقارية (AA) الجريث cyclostome fish
(BB) أسماك غضروفية (القرش) (CC) الأسماك العظمية (bass) (DD) البرمائيات (الضفدع)
(EE) الطيور (الحمام) (FF) الثديات (الأرنب) (GG) الثديات الانسان (B) كيس البول (C) cecum
حوصلة (E) المرئ (G) الحويصلة الصفراء (L) الكبد (L1) الأمعاء الغليظة (SG) معى حلزونى
spiral gut (P) بانكرياس (PA) زوائد بوابى (Si) الأمعاء الدقيقة (St) المعدة .



A Vertebrate taste bud

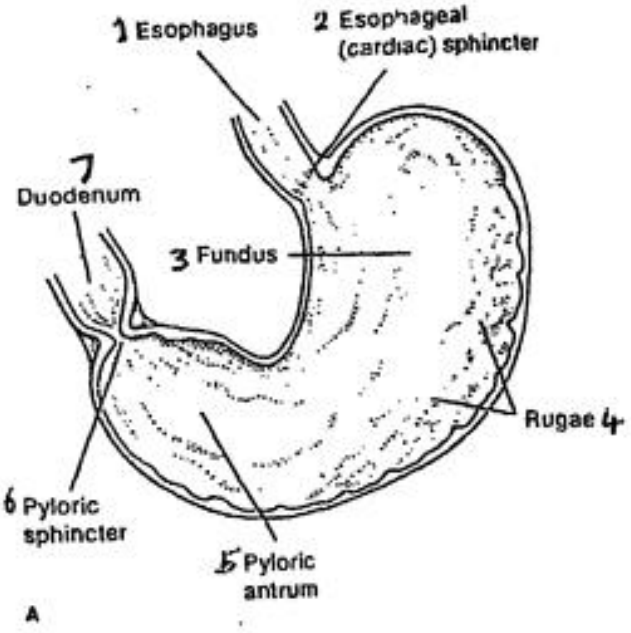
الشكل 7-15 برعم التذوق عند الفقاريات

(2) نقل وتخزين الطعام :

يتم نقل الطعام عند الحبليات وبعض اللافقاريات فى شكل مضغة bolus من الفم، عبر الحلق، بواسطة المرئ، ومنه يصل إلى المعدة. هذا وتساعد الحركة الدودية للمرئ فى عملية توصيل الطعام. فى بعض الحيوانات، مثل الطيور، يحتوى المرئ على جزء متمدد فى شكل كيس (حويصلة الطعام) crop والتى تستخدم للتخزين الطعام قبل هضمة. فى بعض الطيور تستخدم الحوصلة كذلك لهضم الطعام جزئيا قبل أن يقوم الطائر باخراجها لتغذية صغارة.

(3) هضم الطعام وامتصاصه :

تتم معظم عمليات هضم الطعام داخل المعدة والأمعاء الدقيقة وذلك عند الفقاريات وبعض اللافقاريات. تتم داخل المعدة مراحل الهضم الأولية والتى عادة ما تتم فى وسط حمضى، أيضا تساعد المعدة فى عملية الخلط والطحن الميكانية وبذا تكتمل هذه العملية التى تبدأ داخل التجويف الفمى أثناء تناول الطعام. لهذا السبب تم تزويد جدار المعدة، فى الفقاريات اكلة اللحوم وتلك التى تتغذى بالمواد النباتية والحيوانية معا omnivorous بعضلات قوية (الشكل 7-16). توجد فى بعض اللافقاريات بما فيها الحشرات، بدلا عن المعدة ، أصابع تعرف بـ gastric coca (الشكل 7-13) وتوجد بها خلايا افرازية وايضا خلايا ملتهمة تكتمل بداخلها عملية هـ ببيات الطعام التى تم هضمها جزئيا.

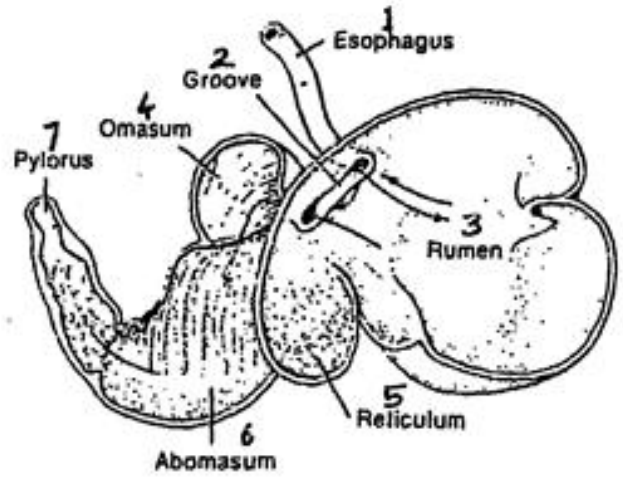


الشكل 7-16 المعدة وحيدة الحجرة عند الثديات monogastric

(1) المرئ (2) العضلة العاصرة الفؤادية (3) قاع جوف المعدة (4) تجاعيد
(5) جيب أو تجويف المعدة (6) العضلة العاصرة البوابية (7) الاثنى عشر

بعض الطيور لها قانصة gizzard متينة الجدار مزودة بالعضل (الشكل 7-14)، توجد بداخلها حبيبات من الرمل والحصى يتم ابتلاعها بواسطة الطائر لتساعد فى عملية طحن الطعام الذى يتكون عادة من الحبوب عادة تتكون المعدة من غرفة واحدة monogastric لكن أحيانا تتكون المعدة من العديد من الحجرات digastric وتوجد لدى الثديات فى الرتبة الجزئية.ruminantia إى الحيوانات المجترة (وخمس الغزلان، الزراف، الخرفان... الخ) (الشكل 7-17). أيضا توجد المعدة عديدة الحجرات خارج هذه الرتبة الجزئية خاصة فى الرتبة الجزئية tylopoda (الجمل واللاما).

تقوم الحيوانات المجترة ruminates باجترار الطعام (اعادته للفم مرة أخرى) ليعاد طحنة وذلك بعد أن يكون قد تم هضمه جزئيا وتخميره بواسطة الكائنات الدقيقة الموجودة فى القسم الأول من المعدة. ويشمل المعدة الأولى rumen والمعدة الثانية reliculum .



الشكل 17-7 المعدة متعددة الحجرات عند الثديات

(1) المرئ (2) أخدود (3) المعدة الأولى rumen (4) ذات التلافيف omasum المعدة الثالثة

(5) المعدة الثانية reticulum (6) المنفحة أو المعدة الرابعة – الحقيقية (7) بوابى

إذن تسمح هذا الطريقة للحيوان باتبلاع طعامه على عجل أثناء الرعى grazing ثم بعد ذلك مضغة بارتياح فى مكان آمن. بعد أن يتم مضغ الطعام المجتر يعاد ابتلاعه. فى هذه المرة يمر إلى الجزء الثانى من المعدة ويتكون المعدة الثالثك (الذات التلافيف) omasum والمعدة الرابعة أو المنحفة abosum (المعدة الحقيقية).

ويبدأ المرحلة الثانية للهضم حيث يتم تكسير الطعام بواسطة الانزيمات التى يتم افرازها بواسطة طلائية المعدة.

تحتوى معدة الحيوانات المجترة (الشكل 17-7) علي 4 حجرات يعمل الجزء الأول كحجرات تخمير حيث تقوم البكتيريا والكائنات وحيدة الخلية التى تعيش بداخلة symbiotic بتكسير الكربوهيدرات عن طريق التخمير إلى butyrate ، lactate، acetate، propionate. تمر الكائنات الدقيقة ونواتج التخمير عند بلعها للمرة الثانية بعد اجترارها إلى المعدة الثالثة (وهى غير موجود عند الجمل) ثم

إلى المنفحة وهو الجزء الوحيد الذى يقوم بافراز انزيمات هضم وهو يعادل معدة الحيوانات غير المجترة. جدير بالذكر أن تخمير الطعام داخل المعدة لا يقتصر على الحيوانات المجترة ولكنه يوجد أيضا عند الحيوانات التى يمر الطعام فيها ببطء عبر المعدة مما يسمح بتكاثر الاحياء الدقيقة مثل حيوان الكنجر kangaroo والطيور الشبيهة بالدجاج galliform رتبة الدجاج.

الأمعاء الدقيقة :

يمر الطعام ، فى الفقاريات، من المعدة ، حيث تؤدى الحركة الدودية للمعدة إلى عصر المحتويات الحمضية إلى داخل الأمعاء الدقيقة وذلك عبر العاصرة البوابية pyloric sphincter . تستمر عملية الهضم داخل الامعاء ولكن يتغير الوسط إلى قاعدى.

تختلف تقسيمات الأمعاء إلى درجة كبيرة بين المجموعات المختلفة للحيوانات . في الحيوانات التى تحتوى فيها القناة الهضمية علي ceca و diverticula (وهى أنابيب أو أكياس عمياء تنبع من القناة الهضمية كما في العديد من اللافقاريات) لا تكون للأمعاء أى وظيفة هضمية.

تنقسم الأمعاء الدقيقة فى الفقاريات (الشكل 17-7) إلى 3 مناطق ، (1)الاثنى عشر duodenum وهو قصير نسبيا وفية يتم افراز انزيمات هاضمة بواسطة الطلائية، كما يستقبل عصارة البنكرياس التى تحتوى على انزيمات هاضمة، وعلى الصفراء ووظيفتها استحلاب الدهون ومعادلة الوسط الحمضى القادم من المعدة.

(2) الصمائم jejunum وفيه يتم أيضا افراز انزيمات بواسطة الطلائية و(3)اللفائف ileum والذى يعمل على امتصاص المواد الغذائية إلى داخل الدورة الدموية كما تكتمل بداخله بعض عمليات الهضم التى بدأت داخل الأثنى عشر والصمائم.

تحتوى الأمعاء في معظم الحيوانات على كميات كبيرة من الأحياء الدقيقة التى تساعد فى عملية الهضم وعادة يتم هضمها أيضا. كما أن هنالك وظيفة أخرى هامة لبعض الأحياء الدقيقة المتكافلة symbionts داخل الأمعاء وهى تصنيع بعض الفيتامينات الهامة.

(4) امتصاص الماء والتخلص من الفضلات :

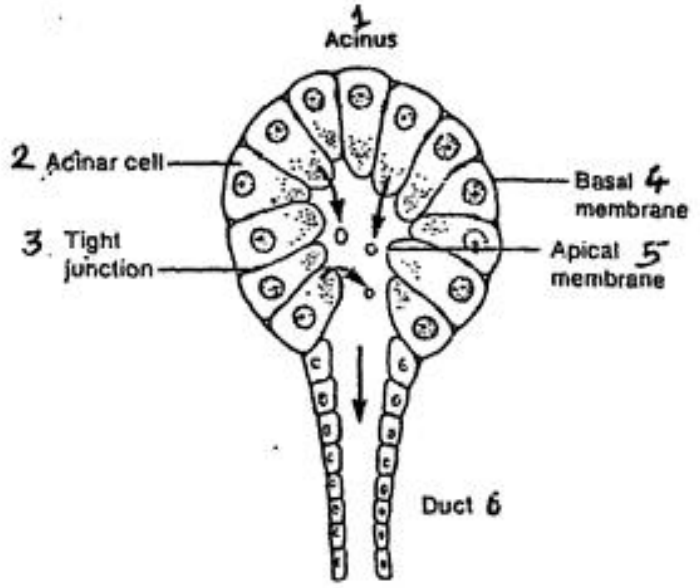
يختص الجزء الأخير من القناة الهضمية بازالة الماء الزائد من المحتويات بداخله ثم التخلص من باقى المواد غير المهضومة في شكل فضلات. تتم عملية امتصاص الماء عند الفقاريات فى الجزء الأخير من الأمعاء الدقيقة.

7-4 الغدد خارجية الأفراز:

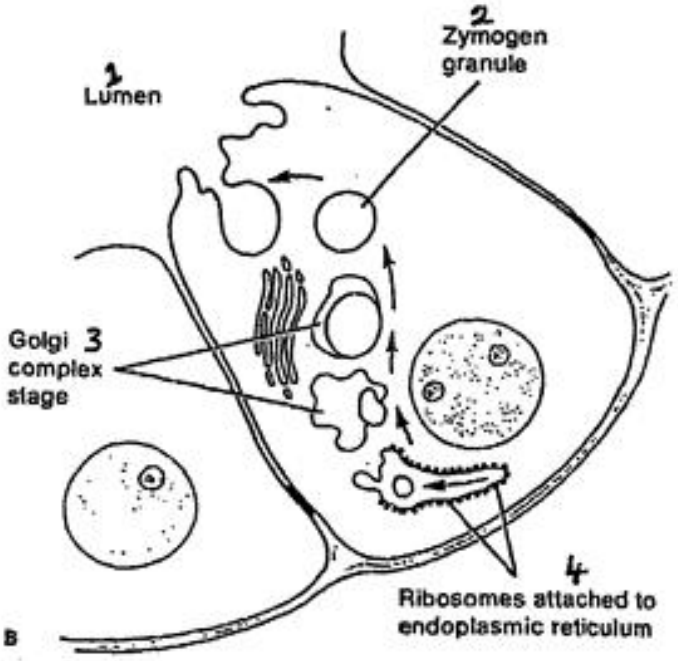
تقوم الغدد خارجية الأفراز .exocrine gl بتفريغ عصارتها عبر قناة داخل إحدى تجويفات الجسم مثل الفم، الأمعاء، الانف أو القناة البولية، وهي بذلك تختلف عن الغدد داخلية الافراز، .endocrine gl والتى تقوم بافراز المواد مباشرة داخل الدورة الدموية. تشمل الغدد خارجية الافراز المرتبطة بالقناة الهضمية، الغدد اللعابية، الخلايا الافرازية، طلائية المعدة والأمعاء والخلايا الافرازية داخل الكبد والبنكرياس.

تتكون الغدة النموذجية من طلائية مكونة من تجمع خلايا افرازية تبطن تجويف العنبة acinus (الشكل 18-7)

يتصل كل منها بقناة صغيرة تتجمع مع غيرها من القنوات مكونة قناة كبيرة تفتح فى القناة الهضمية. عادة يكون الوجه القاعدى للخلايا في اتصال وثيق بالدورة الدموية. تتكون الحبيبات الافرازية (الشكل 19-7) داخل تجويف الريبوسومات الملتصقة بالشبكة الاندوبلازمية الخشنة. بعد ذلك تتجمع داخل جهاز جولجى مكونة حويصلات تختلف عن غيرها (الموجودة فى النسيج العصبى) بأنها أكبر حجما وشكلها اقل تجانسا وتعرف بحبيبات الزيموجين zymogen بعد ذلك يتم افرازها إلى تجويف العنبة acinus بعدة طرق .



الشكل 18-7 غدة خارجية الافراز (1) عنبة (2) خلية عنبية (3) نقطة وصل محكمة (4) غشاء قاعدى (5) غشاء رأسى (6) قناة



الشكل 19-7 تكون وافراز الحبيبات الزيمو جين- بواسطة خلية العنبة(1) التجويف (2) حبيبات زيموجين (3) الحبيبات داخل جهاز جولجى (4) الريبوسومات مرتبطة بالشبكة الندويلازمية

(1) الطرد الخلوى exocygtosis ؛ يتحد غشاء الحويصلة مع الغشاء الخارجى للخلية فيتم طرد المحتويات من داخل الخلية. تنظم هذه العملية عن طريق مستوى أيون الكالسيوم داخل الخلية. وتتم هذه العملية فى كل من الغدد داخلية الافراز وخارجية الافراز التى تتكون فيها المادة (أو العصارة) داخل حويصلات.

(2) apocrine sec. يتم ازالة الجزء العلوى من الخلية الذى يحتوى على المادة الافرازية يحدث هذا عند الرخوياتmolluks .

(3) merocine sec. ينفصل الجزء العلوى للخلية.pinches off ثم ينفتتح داخل العنبة محررا المادة الافرازية.

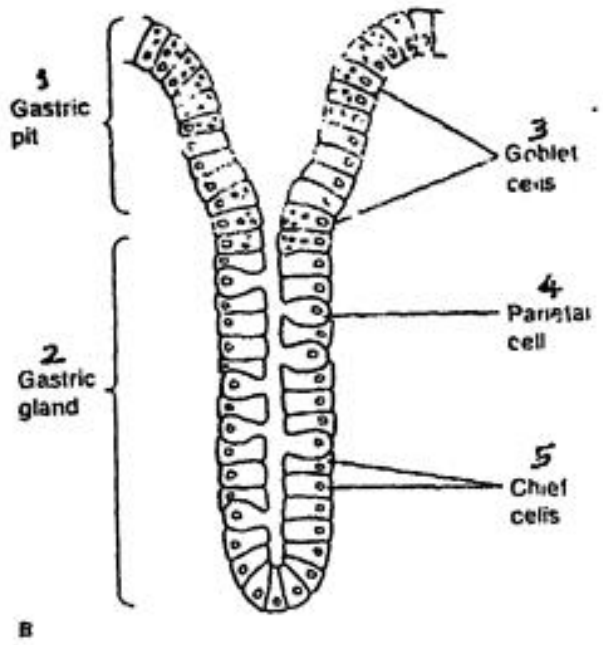
(4) holocrine sec. يتم اقصاء الخلية بكاملها إلى داخل العنبة وعند تحللها يتم تحرير محتوياتها من مواد افرازية.

الماء والالكتروليت

تقوم الغدد خارجية الافراز بافراز كميات كبيرة من السوائل داخل القناة الهضمية ، يعاد امتصاصها فى الجزء الخلفى للقناة. تحتوى هذه السوائل علي كميات متراوحة من الانزيمات، الالكتروليت، المخاط والماء وبعض المواد الخاصة مثل مكونات الصفراء. يتم افراز المخاط بواسطة خلايا goblet توجد في طلائية المعدة (الشكل 20-7) والأمعاء وهي تكون طبقة تحمى الطلائية من المؤثرات الميكانية والانزيمية الضارة. تفرز الغدد اللعابية والبنكرياس سائل مائي أقل لزوجة.

الصفراء وأملاح الصفراء:

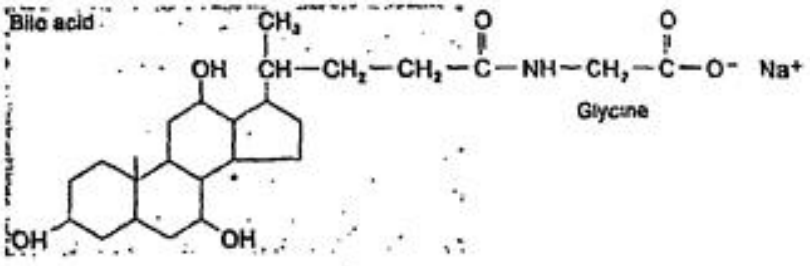
أملاح الصفراء املاح عضوية تتكون من أحماض يتم تصنيعها بواسطة الكبد من الكوليسترول ثم تتحد مع الاحماض الأمينية والصوديوم مكونة أملاح الصفراء (الشكل 21-7) تقوم الصفراء بثلاثة وظائف هامة :



الشكل 20-7 الغدد المعدية

(1) gastric pit (2) غدة معدية (3) خلايا كأسى

(4) خلايا جدارية (5) خلايا رئيسية



الشكل 21-7 أملاح الصفراء

(1) توفر محيط قاعدى لعملية الهضم التى تتم داخل الامعاء.

(2) تساعد على استحلاب الدهون ليسهل هضمها ، كذلك تساعد فى اذابة الفايتمينات التى تذوب فى الدهون ليسهل نقلها إلى داخل الدورة الدموية.

(3) عن طريق الصفراء يتم اخراج المواد التى لا تذوب فى الماء مثل صبغ الهيمولوجلوبين Hb، الكوليسترول ، الاستيرويدات، العقاقير وبذا تخلص الدم منها.

الانزيمات الهاضمة

يتم افراز 3 مجموعات رئيسية من الانزيمات وذلك حسب نوع المادة المراد هضمها وهى :

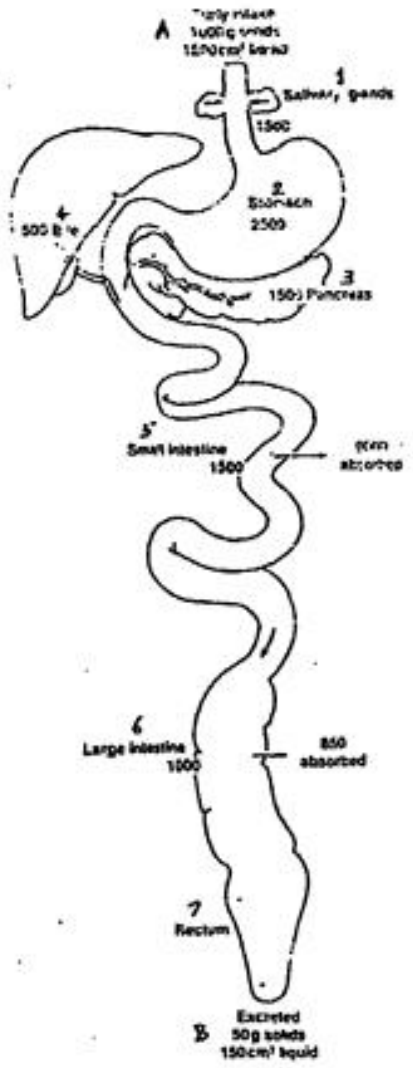
(1) الانزيمات التى تهضم البروتينات proteases

(2) الانزيمات التى تهضم المواد الكربوهيدراتية carbohydrases

(3) الانزيمات التى تهضم الدهون lipases

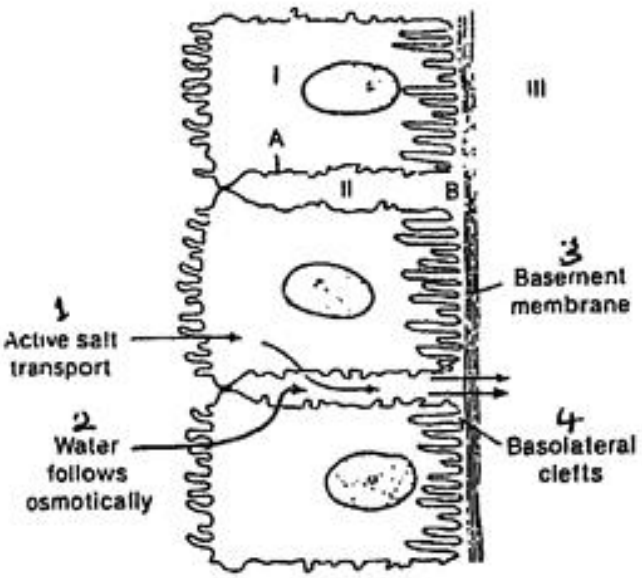
التوازن المائى والالكترونى داخل القناة الهضمية

تقوم الغدد خارجية الافراز بافراز قدر كبير من الماء والاملاح داخل تجويف القناة الهضمية قدرت كميتها بحوالى 8L في اليوم (الشكل 22-7). من الواضح أن مرور هذا القدر من الماء سيكون نكبة إذا تم فقدانه إلى خارج القناة مع الفضلات، وهذا ما لا يحدث إذ يعاد امتصاص هذا القدر بكامله (اضافة إلى كميات الماء التي يتم شربها) بواسطة الأمعاء ويحدث معظمة في الجزء الأخير من الأمعاء الدقيقة.

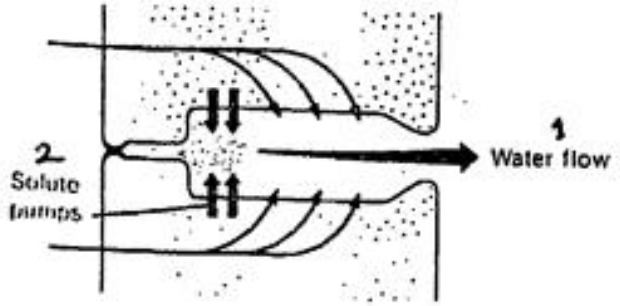


الشكل 22-7 عبور المياه داخل القناة الهضمية للإنسان بالسنتيمترات المكعبة .
(1) الغدد اللعابية (2) المعدة (3) البنكرياس(4) الصفراء (5) الامعاء الدقيقة (6) الامعاء الغليظة
(7) المستقيم (A) الطعام والماء (B) الفضلات

القوة الدافعة التى تقود صافي حركة الماء من داخل تجويف الأمعاء إلى داخل الخملة علي طلائية الأمعاء هو الضغط الاسموزى. يؤدى الضغط الأسموزى العالى خاصة علي الجدر الجانبية لخلايا الطلائية (الشكل 23-7 والشكل 24-7) إلي سحب الماء اسموزيا من خلايا الطلائية ومن ثم تعويضها بالماء الذي يدخل الخلية (عبر الجدار العلوى) من داخل التجويف المعوى.



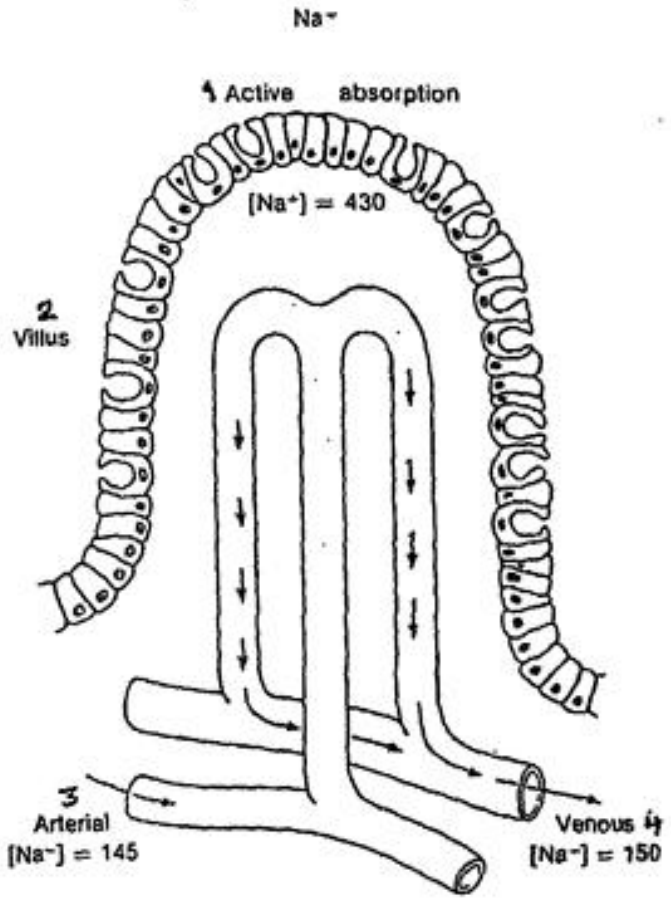
الشكل 23-7 نقل الماء اسموزيا عبر طلائية الامعاء
(1) النقل النشط للصوديوم، (2) نقل الماء اسموزيا (3) غشاء قاعدى (4) شقوق جنب قاعدية



الشكل 24-7 يعتمد (1) نقل الماء سلبيا اسموزيا على
(2) النقل النشط للمواد المذابة إلى داخل المساحات البينية

يتم معظم امتصاص الماء عبر الطلائية عند أو بالقرب من «الطرف العلوى» للخملات حيث توجد الخلايا التى تقوم بعملية الامتصاص النشط لأيون الصوديوم ويتبعه امتصاص أيون الكلوريد سلبيا، بذا يتجمع NaCl عند الحافة

العلوية للخملة. أيضا يزداد تركيز NaCl عند رأس الخملة نتيجة لوجود آلية تيار مضاد لامتصاص الصوديم (الشكل 25-7).



الشكل 25-7 نشوء انحدار في تركيز الصوديوم داخل الخملة villus
عن طريق آلية التيار المضاد (1) النقل النشط (2) خملة (3) شريان (4) وريد

الفصل الثامن

الجهاز الدورى

الفصل الثامن
الجهاز الدورى

تستخدم الحيوانات وباستمرار بعض المواد الضرورية لعمليات الأيض المختلفة التى تنتج عنها مخلفات يجب التخلص منها. وما لم يكن سمك الحيوان أقل من 1mm فإن عملية نقل هذه المواد عن طريق الانتشار البسيط بين الحيوان والبيئة المحيطة تكون غير ممكنة. لذلك نجد أن الحيوانات الأكبر حجما تمتلك جهازا دوريا، ونقصد به الدم والأوعية التى يمر من خلالها. ينقل الدم المواد المختلفة عبر الجسم، وتشمل هذه المواد غازات التنفس، المواد الغذائية، مخلفات الأيض، الهرمونات، الأملاح والاجسام المضادة.

الدم نسيج معقد يحتوى علىٰ الكثير من أنواع الخلايا ويعمل كأداة نقل vehicle لمعظم عمليات تنظيم الثبات الداخلى للجسم كما أنه يلعب دوراً فى كل الوظائف الفسيولوجية للجسم تقريبا.

يمكن تقسيم الجهاز الدورى فى المملكة الحيوانية إلى نوعين :

(1) جهاز دورى مفتوح open circulatory system و (2) جهاز دورى مغلق closed circulatory system. يتكون الأخير من عدة مكونات هى :

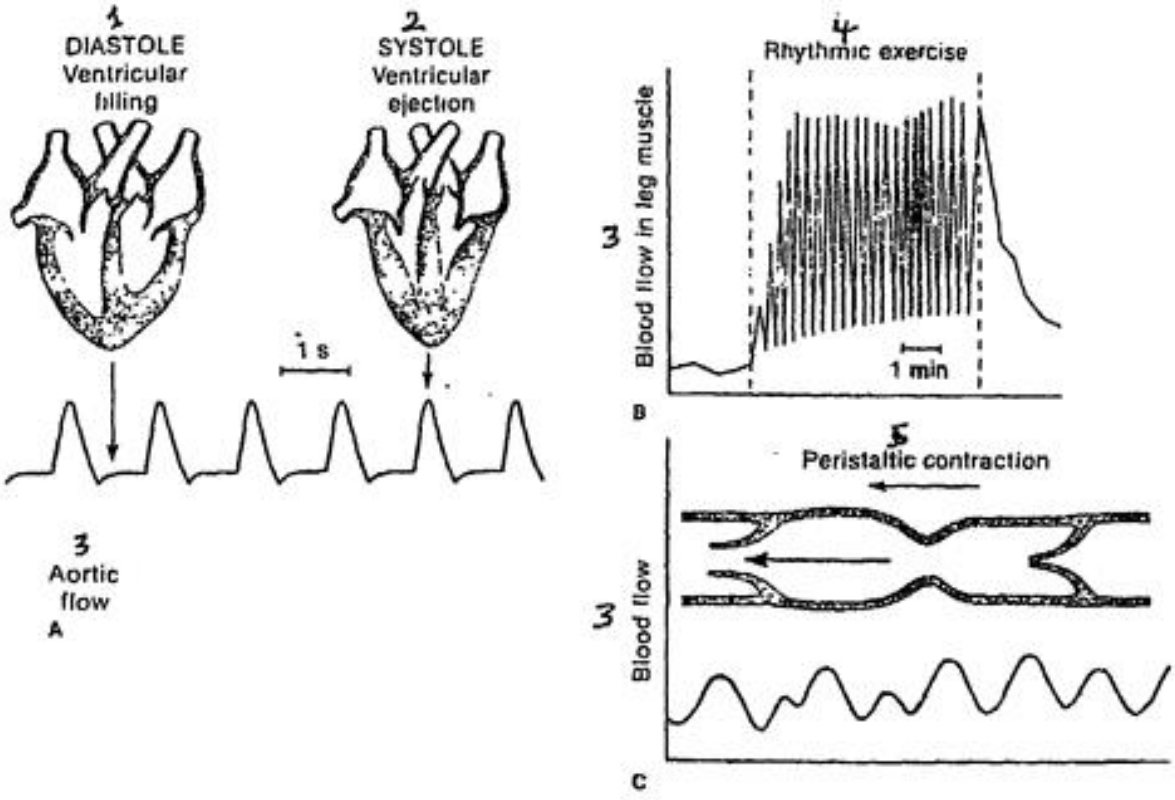
(1) عضو ضخ رئيسى ، القلب الذى يدفع الدم حول الجسم.

(2) جهاز شريانى artemial system والذى يعمل علي توزيع الدم حول الجسم وأيضا يعمل كخزان للضغط.

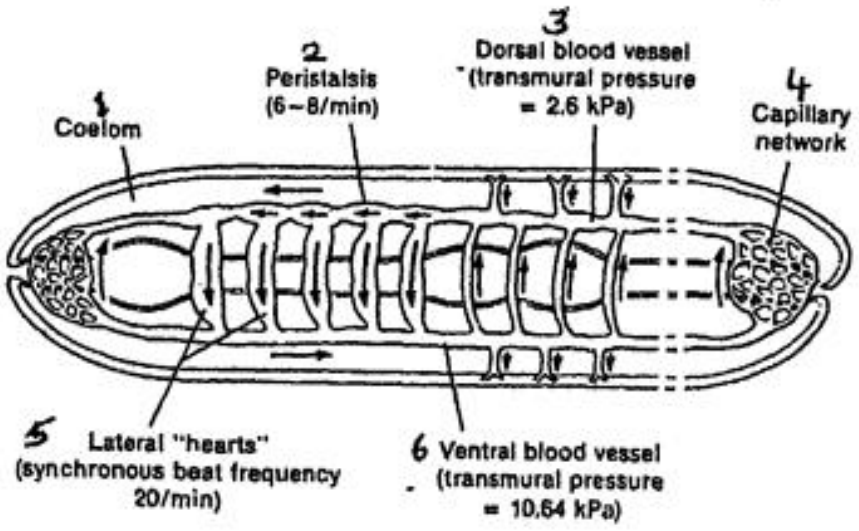
(3) الشعيرات الدموية capillaries ويتم من خلالها نقل المواد بين الدم والأنسجة.

(4) جهاز وريدى venous system ويعمل كخزان للدم وعن طريقه يعود الدم إلي القلب من جديد.

هذا ويتم دوران الدم حول الجسم نتيجة للانقباض المتواتر للقلب، عن طريق عصر squeezing الأوعية الدموية اثناء الحركة وعن طريق التقلصات الدودية peristaltic للعضلات الملساء التى تحيط بالأوعية الدموية (الشكل 1-8). تختلف أهمية كل من هذه الآليات فى مجموعات الحيوانات المختلفة. إذ يلعب القلب دوراً رئيسياً فى حركة الدم عند الفقاريات. بينما نجد فى المفصليات أن لحركة الأطراف أهمية مماثلة لنبضات القلب فى تحريك الدم. أما فى الدودة الأرضية العملاقة Glossoscolex giganteus فيتم تحريك الدم بواسطة الانقباضات الدودية للوعاء الخلفى فيندفع الدم نحو الامام مزودا بذلك القلوب الجانبية (وعددها 5) بالدم (الشكل 2-8).



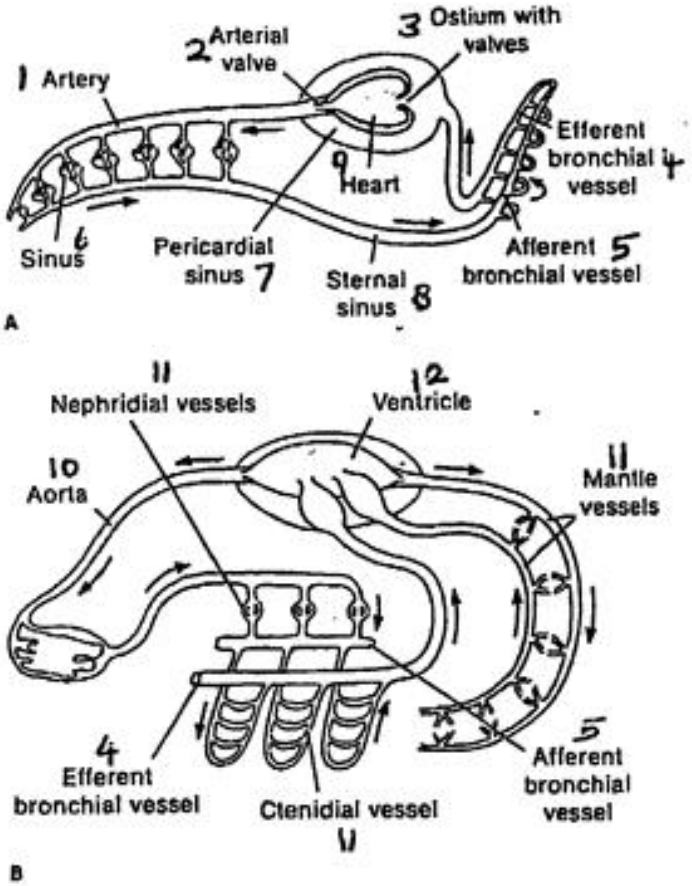
الشكل 1-8 اختلاف سريان الدم ويسببه (A) انقباض عضلة القلب (B) انقباض عضلة الرجل (C) الحركة الدودية للأوعية تمت ملاحظته فى الجهاز الوريدى للوطواط وشرايين الدودة الارضية العملاقة
(1) انبساط (2) انقباض (3) رسيان الدم (4) حركة منتظمة (5) انقباضات دودية



الشكل 2-8 الدورة الدموية في الدودة الارضية العملاقة
Glossoscolex giganteus (1) تجويف البطن (2) الحركة الدودية (3) الوعاء الخلفى
(4) شعيرات دموية (5) «قلوب» جانبية (6) وعاء أمامى

جدير بالذكر أن الجهاز الدورى فى جميع الحيوانات مزودة بصمامات valves توجد به septa تسمح بتحريك الدم فى اتجاه واحد، بينما تقوم العضلات الملساء حول الأوعية الدموية بتغيير قطر الوعاء وبذا تتحكم فى كمية الدم التى تغذى نسيجا معينا فى الجسم.

لمعظم اللافقاريات جهازا دوريا مفتوحا ، ونعنى به نظام يتم بواسطته تفريغ الدم الذى يضخ بواسطة القلب داخل تجويف الجسم الذى يعرف لذلك بالhemocoel وهو يقع بين طبقة الـectoderm والـendoderm . هذا ويشار للسائل داخل التجويف الجسم بالدم أو hemolymph وهو يحيط بالانسجة مباشرة. يوضح الشكل (3-8) . تنظيم الاوعية الرئيسية بالنسبة للدورة الدموية المفتوحة فى مجموعتين من اللافقاريات هذا ويصل حجمُ الدم عند اللافقاريات من 20 إلى 40 بالمئة من حجم الجسم مقارنة بالفقاريات التى يصل حجم الدم فيها 15 إلى 10 بالمئة من حجم الجسم.



الشكل 3-8 الدورة الدموية عند اللافقاريات

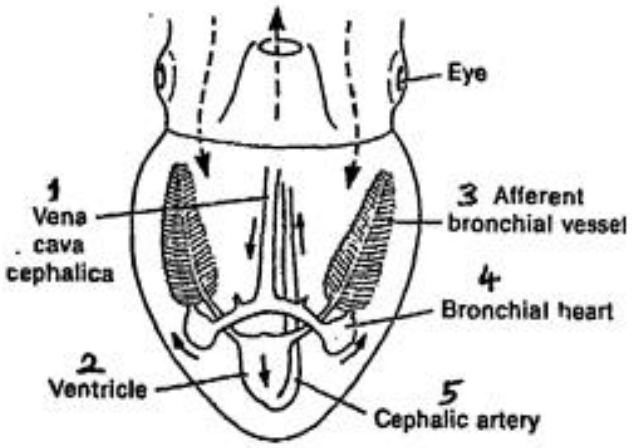
(A) الاربيان – جرادة البحر crayfish (B) حلزون ذو صدفتين

(1) شريان (2)، (3) صمامات (4) وعاء صادر شعبي bronchial (5) وعاء وارد

(6)، (7)، (8) جيب (9) القلب، (10) الاورطي، (11) اوعية دموية (12) البطين

للدورة الدموية المفتوحة ضغطا منخفضا لا يتعدى 0.6 إلى 1.3 kpa ، وذلك فى بعض الحلزونات التى تعيش على اليابسة حيث يساعد ضغط الدم في الحفاظ علي هيئة الجسم.لا يلعب الدم دورا يذكر فى نقل غازات التنفس لدى المفصليات

نتيجة لامتلاكها جهازا قوامه شبكة من القصبات الهوائية tracheal system لتبادل الغازات بين الأنسجة والهواء (راجع الفصل 10). كما لا تستطيع المفصليات انتاج سائل لاخراج الفضلات عن طريق ترشيح البلازما، إذا لا يوجد الضغط اللازم لاتمام تلك العملية، لذلك تقوم باخراج مخلفات الايض عن طريق الافراز (الفصل 9) . تمتلك بعض الفقاريات مثل الدورة الأرضية والرأسي الأرجل (رخويات) cephalopods (الشكل 4-8) وجميع الفقاريات دورة دموية مغلقة حيث يمر الدم عبر دائرة متصلة من الأوعية الدموية،



الشكل 4-8 الدورة الدموية عند اللافقاريات رأسية القدم cephalopod

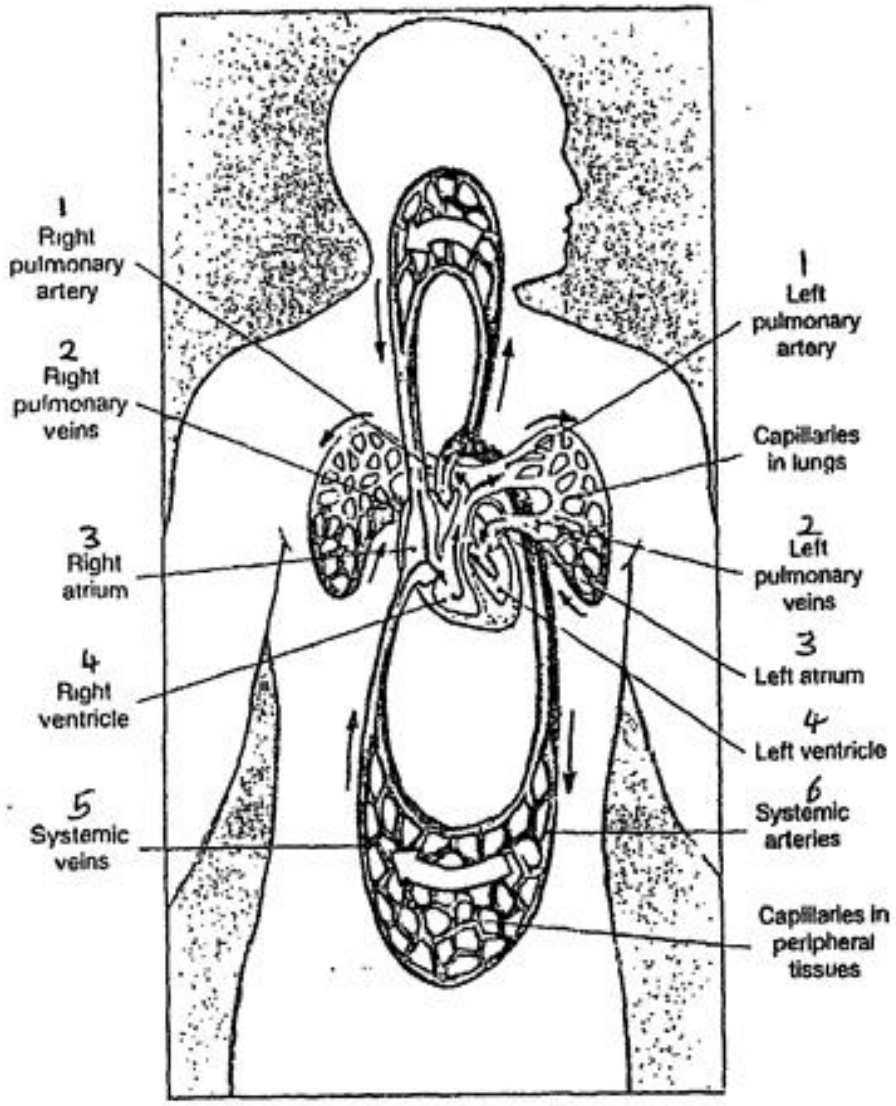
(1) الاجوف venacava (2) البطين (3) وعاء وارد شعبى

(4) قلب شعبى (5) شريان رأسى cephalic

الشرايين والاوردة والشعيرات الدموية (الشكل 5-8) يقوم القلب فى الدورة الدموية المغلقة، بضخ الدم عبر الشرايين التى تعمل كخزان لضغط الدم الذى يدفع بالدم خلال الشعيرات الدموية.

للشعيرات الدموية جدر رفيعة تسمح بمعدل عالى لتبادل المواد بين الدم والأنسجة. هذا ولكل نسيج عدد كبير من الشعيرات الدموية بحيث لا تنفصل أية خلية عن إحدى الشعيرات الدموية بأكثر من 2 إلى 3 خلايا. وكنتيجة للجدر الرفيعة للشعيرات الدموية والضغط العالى للدم يتم ترشيح بعض السائل فى

المساحات البينية. لذلك تجد الجهاز الليمفاوى lymphatic system الذى يعمل في معية مع الجهاز الدورى المغلق ليعيد السائل المفقود، من الأنسجة ، إلى الدم مرة أخرى.



الشكل 5-8 الدورة الدموية للثديات

(1) شريان رئوى (2) وريد رئوى (3) أذين (4) بطين (5) أوردة (6) شرايين

نجد عند الثديات دورتين منفصلتين، الدورة الصغرى أو دورة الرئة pulmonary circulation والدورة الكبرى أو دورة الجسم systemic circulation.

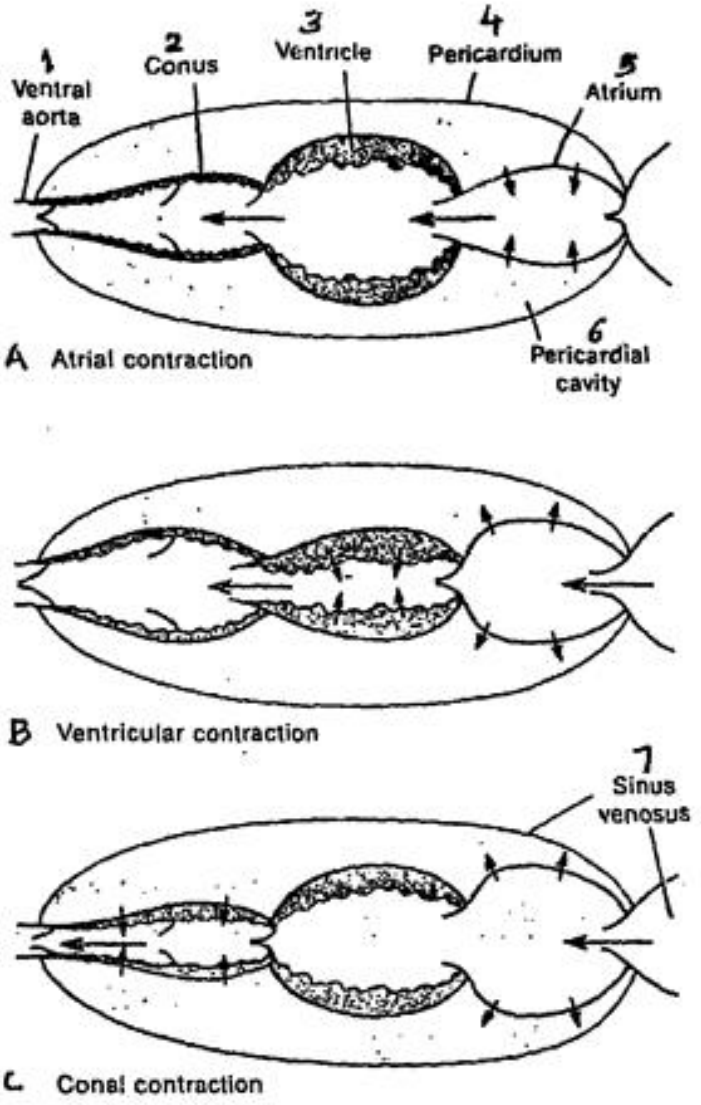
يتجمع الدم من الشعيرات الدموية، بعد مروره بالانسجة، إلى داخل جهاز الأوردة venous system الذى ينقل الدم إلي القلب مرة أخرى ويعمل كخزان لحجم الدم.

8-1 التشريح الوظيفى للقلب عند الفقاريات

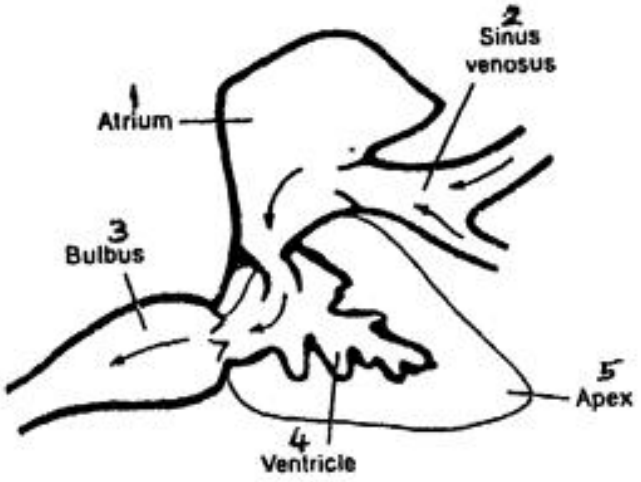
يختلف شكل القلب عند الفقاريات المختلفة وسنتناول فى ما يلى كل مجموعة علي حدة.

الاسماك

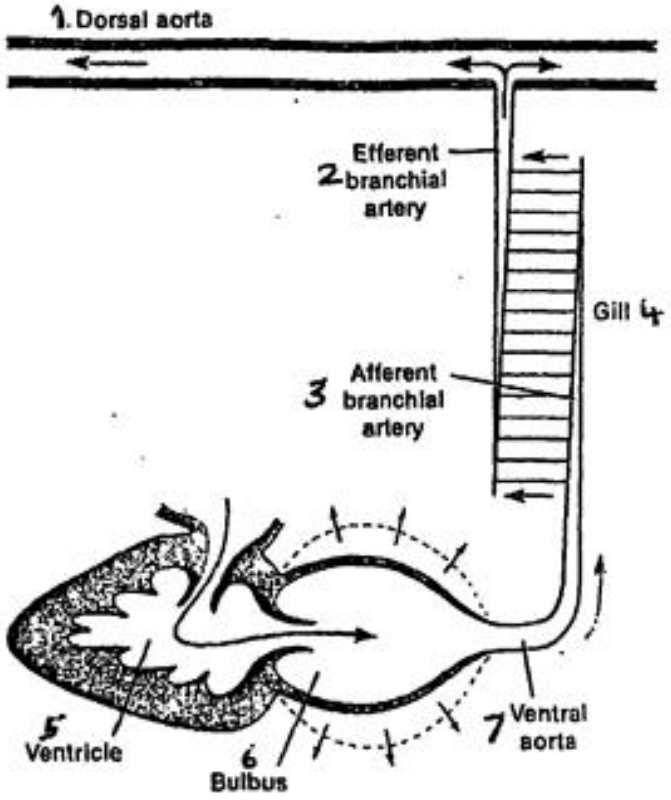
يتكون القلب عند الأسماك من 4 حجرات متتالية تجويف sinus venosus ، أذينatrium، بطين ventricle، يصلى الشكل bulbus أو conas (الشكل 8-6 والشكل 8-7). لجميع الحجرات المقدرة علي الانقباض عدا الbulbus عند الاسماك العظمية. هذا وتوجد صمامات تسمح بمرور الدم فى اتجاه واحد يمر الدم بعد ضخه بواسطة القلب عبر الاوعية الدموية للخياشيم (وهى أسطح التنفس) ومن ثم إلى الأبهر. الخلفى الذى يوزع الدم إلى باقى الجسم (الشكل 8-8).



الشكل 6-8 القلب عن الأسماك الغضروفية يحتوى على 4 حجرات
A عند انقباض الاذين B عند انقباض البطين C عند انقباض الـconus
(1) الاورطى الامامى (2) conus (3) البطين (4) الغشاء التيمورى
(5) الاذين (6) sinus venosus



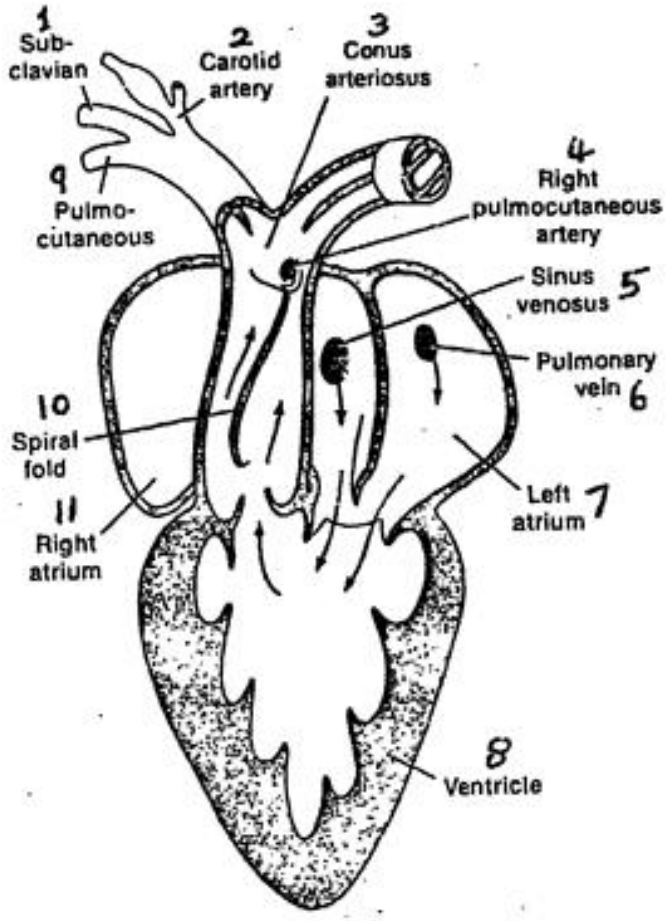
الشكل 7-8 القلب عن الأسماك العظمية trout (1) الاذين (2) sinus vcnosus
البطين (4) bulbus (3)



الشكل8-8يضخ قلب الاسماك العظمية الدم إلى داخل الـ bulbusومن ثم عبر الاورطى الامامى القصير إلى الخياشم (أسطح التنفس) بعد ذلك يمر الدم عبر الاورطى الخلفى إلى باقى الجسم
(1) الابهر الخلفى (2) الشريان الصادر (3) الشريان الوارد
(4) الخياشم (5) البطين (6) bulbus (7) الأبهر الخلفى

البرمائيات

يوجد عند البرمائيات أذنين منفصلين وبطين واحد (الشكل9-8) بالرغم من أن البطين غير منقسم عند الضفدع إلا أنه يوجد فصل بين الدم المؤكسج oxygenated والدم غير المؤكسج.



الشكل9-8 التشريح الوظيفى لقلب الضفدع (من الامام)

subclavian (1) (2) الشريان السباتى conus arteriosus (3)

(4) الشريان الجلدى – رئوى (5), (9) sinus venosus (6) الوريد الرئوى

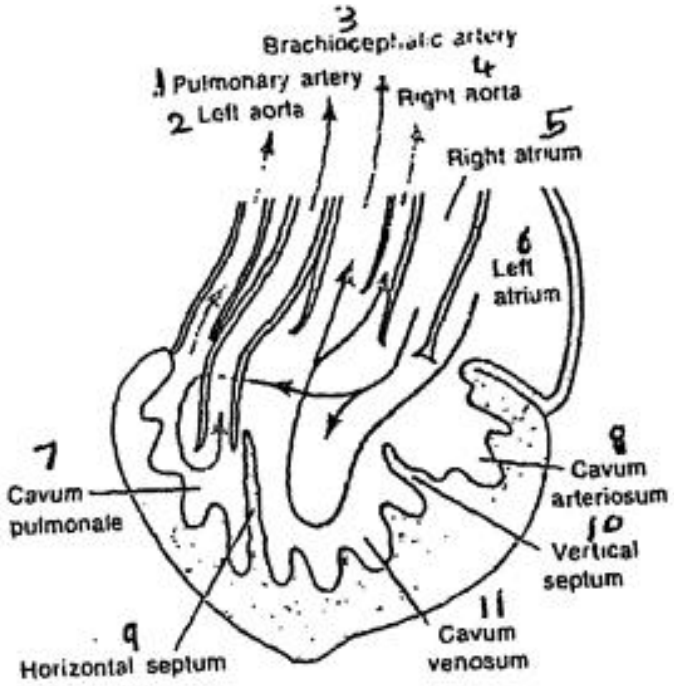
(7) الاذين الايسر (8) البطين (10) ثنية حلزونية (11) الاذين الأيمن

يتم توجيه الأول، الوارد من الرئتين والجلد، إلى الجسم بينما يتم توجيه الثاني، الوارد من الجسم، إلى دورة الرئتين، يساعد فى هذا الفصل، بين الدم المؤكسج والغير مؤكسج، وجود ثنيات حلزونية داخل الـconus arteriosus (الشكل 9-8). يتراوح حجم الدم الذاهب إلى الرئتين أو إلى الجسم عكسيا مع مقاومة الرئتين لتدفق الدم. عند ملء الرئتين بالهواء اثناء عملية الشهيق تقل المقاومة داخلها ويزداد تدفق الدم إليهما. أما بين توقيت التنفس، أى بين كل شهيق والذي يليه فتزداد المقاومة داخل الرئتين فيقل بذلك تدفق الدم اليها، بذلك يتم توجيهه نحو الجسم.

الزواحف :

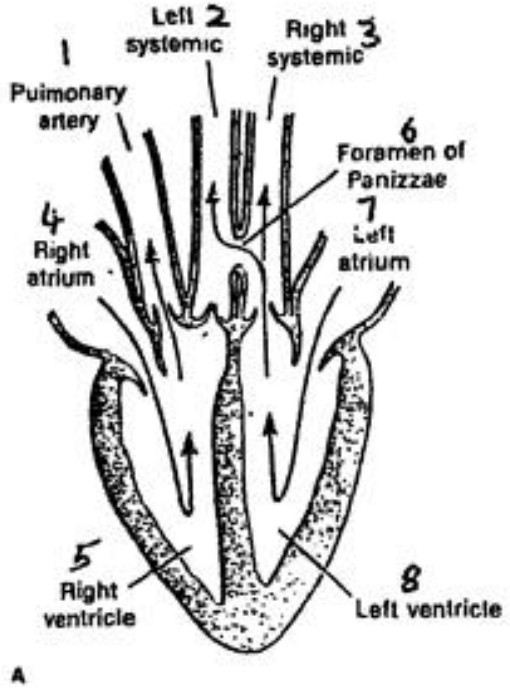
يكون البطين مقسوما جزئيا عند الزواحف، بخلاف التمساح، الذى يوجد لديه انقسام كامل للبطين إلى جزئين. لكل الزواحف systemic arch أيمن وأخر أيسر. ينقسم البطين جزئيا عند السلاحف والعظاءة أو سحلية lizards والثعابين بواسطة غشاء فاصل septum غير مكتمل ، يشار اليه بالأفقيhorisontal septum وهو يفصلcavum pulmonale عن cavum venosum و cavum anteriosum اللذين ينفصلان جزئيا عن بعضهما بواسطة الغشاء الفاصل العمودى vertical septum (الشكل 10-8). ينقبض الأذين الأيمن قبل الأيسر ويدفع بالدم داخل c.p. عند انقباض البطين يندفع الدم من c.p إلى الدورة الرئية ومن c.v و c.a إلى دورة الجسم.

ضغط الدم داخل الشريان الرئوى أقل منه داخل الـ s.arch لذلك يندفع الدم أولا إلى الرئتين.

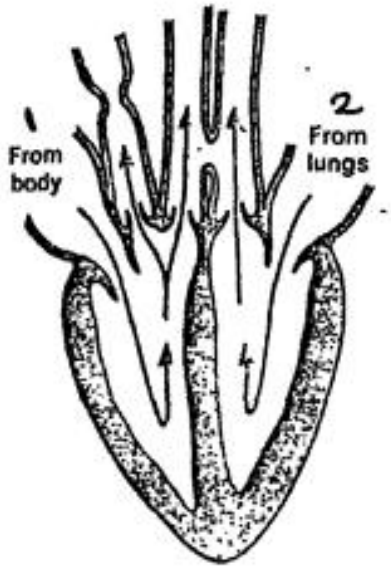


الشكل10-8 التشريح الوظيفى لقلب السلحفاه (من الامام)
(1) الشريان الرئوى (2) الابهر الايسر (3) شريان عضدى رأسى (4) الابهر الأيمن
(5) الأذين الأيمن (6) الأذين الأيسر (7) التجويف الرئوى (8) التجويف الشريانى
(9) الغشاء العرضى (10) الغشاء الرأسى (11) التجويف الوريدى

هنالك بعض من تدفق الدم من اليسار إلى اليمين داخل البطين عند السلاحف يوجد عند التمساح بطين مقسوما كليا ، كما يوجد اثنين systemic arch الأيسر ينشأ من البطين الأيمن بينما ينشأ الايمن من البطين الأيسر. يتصل الs.a عند القاعدة بواسطة ثقب foramen of ponizae (الشكل 11-8). يبقى الضغط داخل s.a الأيسر أعلى منه داخل البطين الأيمن، لذلك تكون الصمامات عند قاعدة s.a الأيسر مغلقة فيندفع الدم من البطين الأيمن إلي الرئتين عبر الشريان الرئوى، بذلك تشبه الدورة عند التمساح ، الدورة عند الثديات أى يوجد انفصال كامل بين الدورة الرئوية ودورة الجسم، ولكن للتمساح مقدرة لتحول الدم shunt بين الرئتين وذلك عندما يتوقف التنفس فى حالة الغطس (الشكل 12-8). فى هذا الأثناء تزداد مقاومة مرور الدم إلى الرئتين فيرتفع الضغط داخل البطين الأيمن.



الشكل 11-8 الشريح الوظيفي لقلب التمساح (من الامام) (1) الشريان الرئوي (2) شريان الجسم الايسر (3) شريان الجسم الأيمن (4) الاذين الأيمن (5) البطين الأيمن (6) الثقب (7) الأذين الأيسر (8) البطين الأيسر



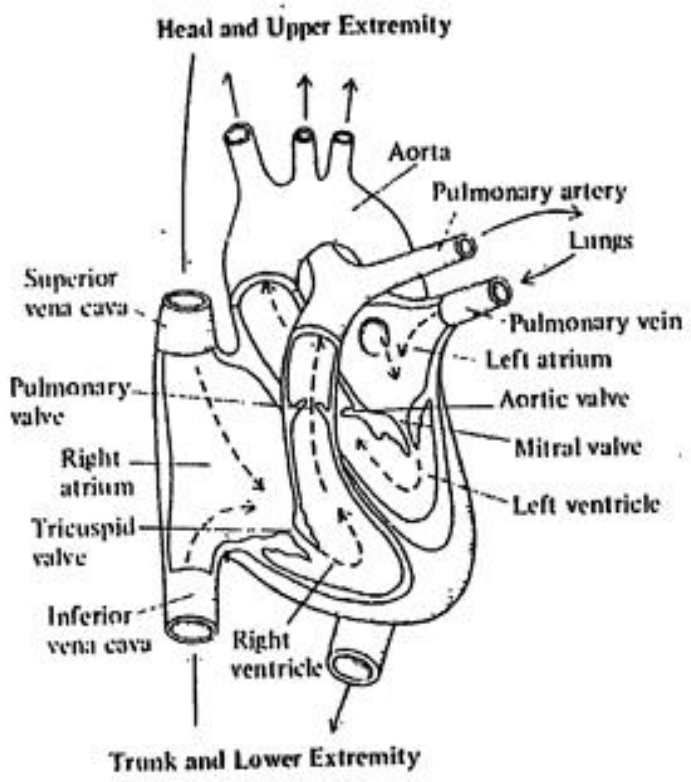
الشكل 12-8 توجيه الدم داخل القلب أثناء الغطس عند التمساح (1) من الجسم (2) من الرئتين

ونتيجة لذلك تفتح الصمامات عند قاعدة s.a الأيسر فيندفع الدم من البطين الأيمن فى كل من شريان الرئة، s.a الأيسر، بذلك اثناء انقطاع التنفس apnea يتم تزويد الجسم بجزء من الدم العائد من الجسم.

الثديات

يتكون القلب فى الثديات من 4 حجرات ، أذنينين وبطينين (الشكل 13-8).

يدخل الدم الوارد من الرئة إلى الأذين الأيسر ثم يمر منه إلى البطين الأيسر الذى يضخ الدم إلى الجسم عبر الـ s.a. يعود الدم من الجسم إلى الأذين الأيمن ويمر منه إلى البطين الأيمن الذى يقوم بضخ الدم إلى الرئتين وتوجد صمامات تمنع المرور العكسى للدم.



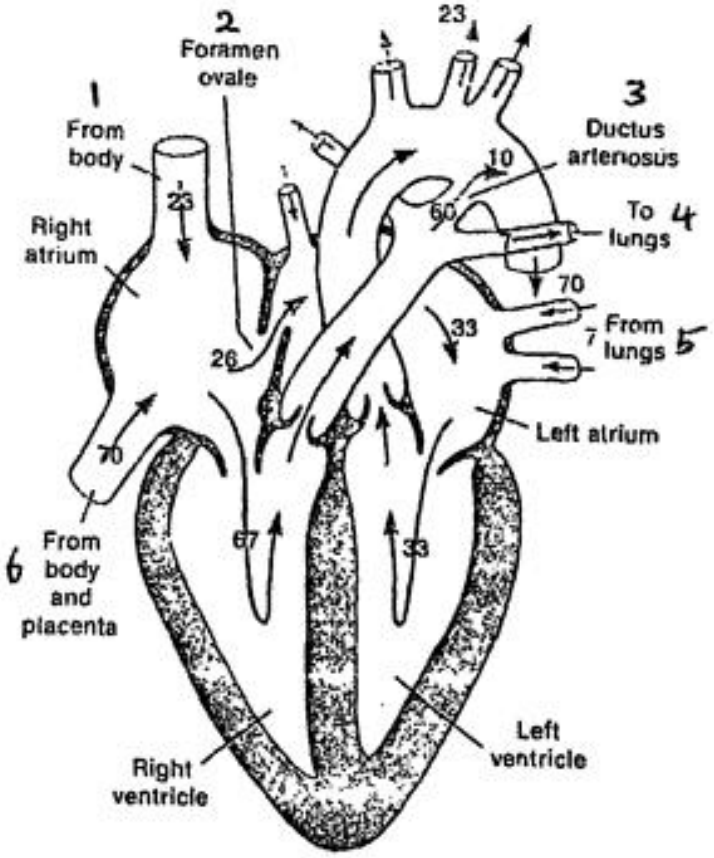
الشكل 13-8 التشريح الوظيفى للقلب عند الثديات (من الامام)

قلب الجنين عند الثديات

عند الولادة تتحول الدورة الدموية المشيميه placental إلى دورة دمـوية رئوية. يتطلب ذلك العديد من التـعديلات الجوهرية فى سريان الدم فى القلب والاوعية الدموية. تكون الرئتان عند الجنين فى حالة collapsed بذلك تمثلان مقاومة عالية لسريان الدم فلا يمر الدم من الشريان الرئوى إلى الرئتين. هذا ويكون الشريان الرئوى متصلا بال s.a بواسطة وعاء دموى قصير لكنه متسع. ductrus arteriosus (الشكل 14-8). بذلك يتم توجيه معظم الدم الذى يضخه البطين إلى دورة الجسم أى هناك تحويل لسريان الدم من الجزء الايمن للقلب إلى الجزء الايسر . عند الولادة تمتلى الرئتان بالهواء ويسرى فيهما الدم مما ينتج عنه مردود عالى للدم داخل الأذين الأيسر (من الرئتين). كذلك تختفى الدورة المشيمية وتزداد المقاومة لسريان الدم فى الجسم ككل، فيرتفع نتيجة لذلك الضغط داخل دورة الجسم ويتم إغلاق d.a. توجد فى الجنين فتحة بين الأذين الايمن والأيسر foramen ovale وهى تسمح بمرور الدم من الجهة اليمنى إلى اليسرى . يتم إغلاق f.o. عند الولادة نتيجة لازياد الضغط داخل الأذين الأيسر، الذى يمتلئ بالدم الوارد من الرئتين عنه فى الأذين الأيمن الذي يمتلئ بالدم الوارد من الجسم.

8-2 ديناميكية الدم

يدفع انقباض القلب الدم عبر الشرايين والشعيرات والأوردة التى تكون الجهاز الدورى هذا ويسرى الدم في دائرة متصلة . سنقوم فيما يلى بعرض للنمط العام لسريان الدم عبر هذه الأوعية والصلة بين ضغط الدم وسريان الدم داخل الجهاز الدورى ، أى ما يعرف بديناميكية الدم hemodynamics .



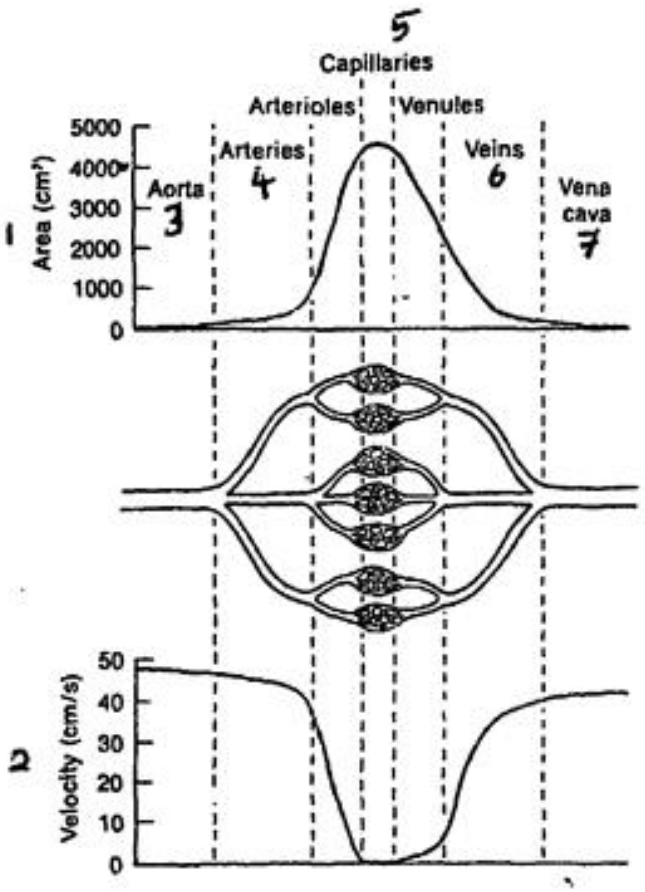
الشكل 14-8 سريان الدم داخل القلب عند جنين الثديات

(1) من الجسم (2) الثقب (3) ductus antesiosus

(4) إلى الرئتين (5) من الرئتين (6) من الجسم والمشيمة .

بما أن السوائل غير قابلة للضغط ينتج عن ذلك أنه فى مقابل نفس العدد من ليترات الدم التى يضخها القلب يسري نفس العدد من الليترات فى الدقيقة عبر الشرايين والشعيرات والأوردة . لا تعتمد سرعة سريان الدم فى أى جزء من الجسم علي بعد الجسم من القلب ولكن علي المساحة القطعية الكلية cross-sectional لذلك الجزء ويقصد بها مجموع مساحة الشرايين ، الشعيرات أو الأوردة للجزء أو النسيج المعين، هذا وتكون السرعة عالية حينما تكون المساحة صغيرة لذلك نجد السرعة أعلى فى الأبهر والشريان الرئوى عند

الثديات، ثم تنخفض السرعة عند مرور الدم بالشعيرات، لكنها ترتفع مرة أخرى عند مـــرور الدم بالأوردة الشكل (15-8) لمـعـدل سـريان الدم البطئ داخل الشـعيرات مغذى وظيفى هام إذ هنا يتم التعادل البطئ للمواد بين الأنسـجة والدم.

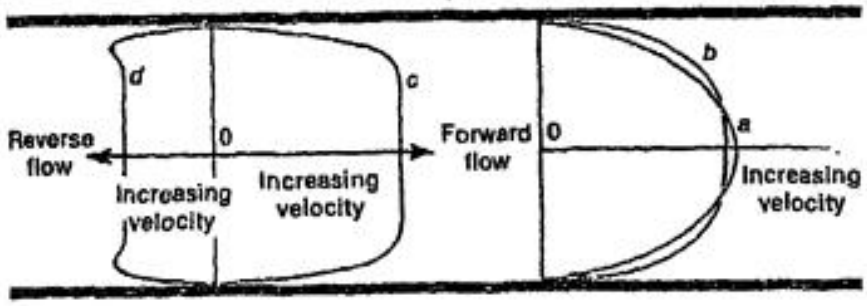


اشكل 15-8 ايتناسب سرعة الدم عكسيا مع المساحة القطعية الكلية cross-soctional
(1) المسافة (2) السرعة (3) الابهر (4) الشرايين (5) الشعيرات (6) الاوردة (7) الاجوف

الدفق الصفحى والدفق المضطرب

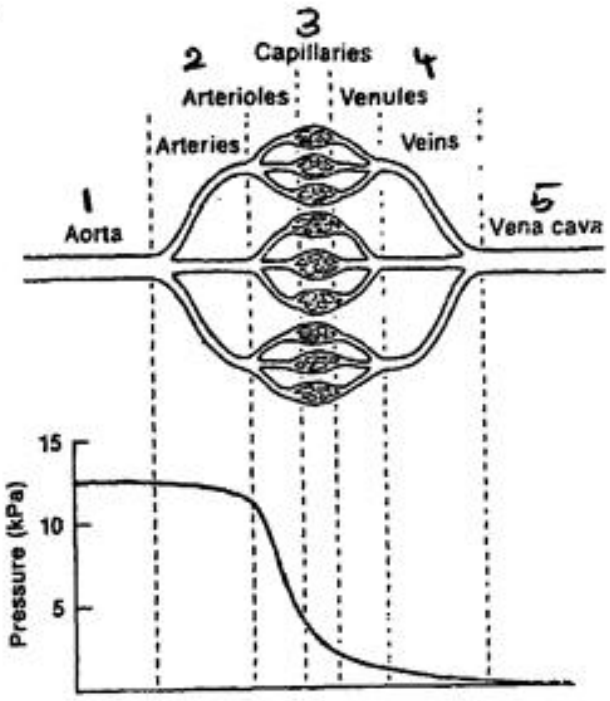
يكون سـريان الدم، داخل العـديد من اجـزاء الدورة الدمـوية. انسـيـابى laminar أو صـفـحى stream-lined وهو يمـتاز بأن له سرعـة مكافـئة المـقطع الجانبى parabolic velocity prafile (الشكل 17-8). أى يكون السريان صفرا

بالقرب من الجدار ويبلغ درجته القصوى عند محور الوعاء. للشرايين الكبيرة profile سريان للدم أكثر تعقيدا من الشرايين الصغيرة، التى يكون فيها السريان صفحى، إذ يندفع الدم داخل الشرايين الكبيرة بسرعة ثم يبطئ مع كل خفقة. وبما أن الأوعية مرنة فإنها تتمدد وترتخى مع اختلاف الضغط ، أى تارجحه مع كل خفقة قلب وينتج عن ذلك مقطع جانبى أكثر عرضاً much-flatter profile لسرعة سريان الدم داخل الشرايين الكبيرة (الشكل 16-8).



الشكل 16-8 الشكل العام لسريان السوائل عبر الانابيب

يحدث السريان المضطرب turbulent-flow عند نقاط معينة من الدورة. يتحرك السائل فى اتجاه غير متطابق مع محور السريان ويحتاج إلي طاقة اكبر لتحريك السائل داخل الوعاء فى هذه الحالة. يكون السريان المضطرب مزعجا noisy (عكس السريان المضطرب الذى يكون هادئا) ويمكن سماعه بواسطة سماعة الطبيب. ينخفض الضغط إلى درجة كبيرة عندما يمر الدم من جهاز الشرايين إلى جهاز الأوردة (الشكل 17-8). لاختلاف لزوجة الدم تأثير واضح على سريانه. فلزوجة البلازما بالنسبة للماء 1.8 وتزداد اللزوجة نتيجة وجود خلايا الدم الحمراء. هذا وقد قيست لزوجة الدم عند الثديات والطيور فكانت 3 و 4 أضعاف لزوجة الماء على التوالى. لذلك يحتاج الدم إلى ضغط أعلى ليندفع عبر الأوعية مما لو كان بلازما. هذا وتتجمع كريات الدم الحمراء فى منتصف الوعاء لذلك تكون اللزوجة عالية فى الوسط وتقل نحو الجدر.



الشكل 17-8 اختلاف ضغط الدم داخل الأجزاء المختلفة
للجهاز الدورة الدموية يحدث انخفاض كبير فى الضغط عند مرور الدم من الشرايين إلى الشعيرات .
(1) الأبهر (2) الشرايين (3) الشعيرات (4) الاوردة (5) الاجوف

8-3 جهاز الشرايين :

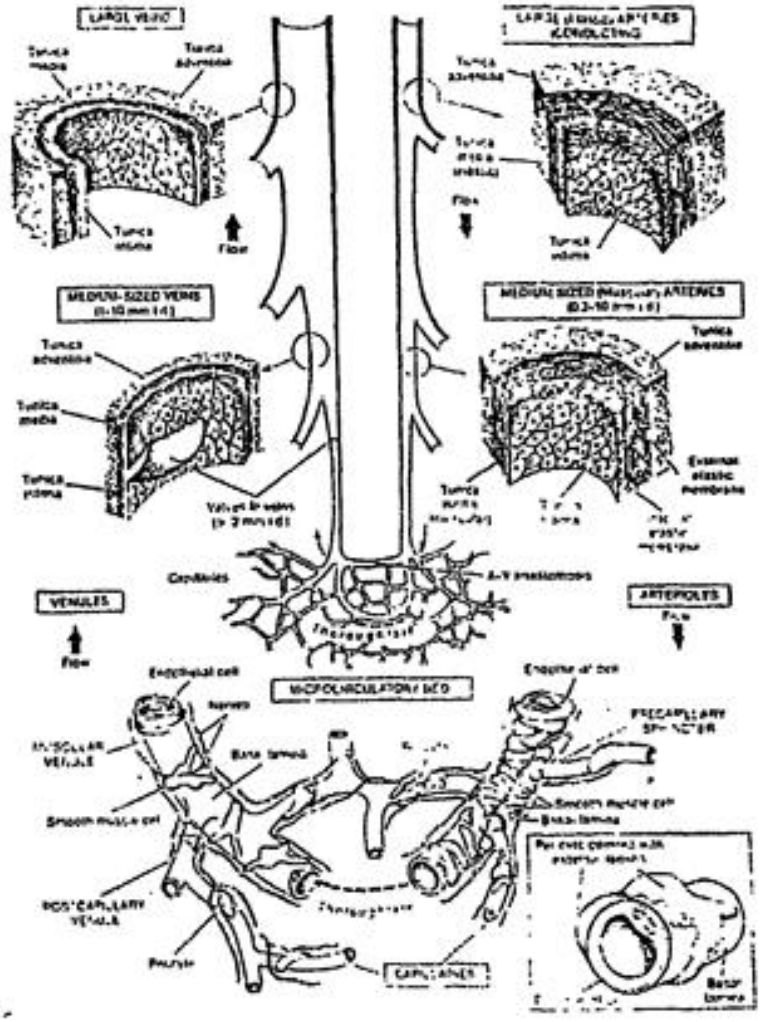
يتكون جهاز الشرايين من أوعية متفرعة تنقل الدم من القلب إلى الشعيرات الدموية. جدر الشرايين سميكة ومرنة وعضلية، تبطنها كباقى الأوعية الدموية خلايا بطانية endothelial. تغلف الأوعية من الخارج بواسطة طبقة tunica adventetia (الشكل 18-8). يؤدى الجهاز الشريانى 4 وظائف موضحة بالشكل (19-8) وهى كالآتى :

(1) يعمل كمعبر للدم بين القلب والشعيرات .

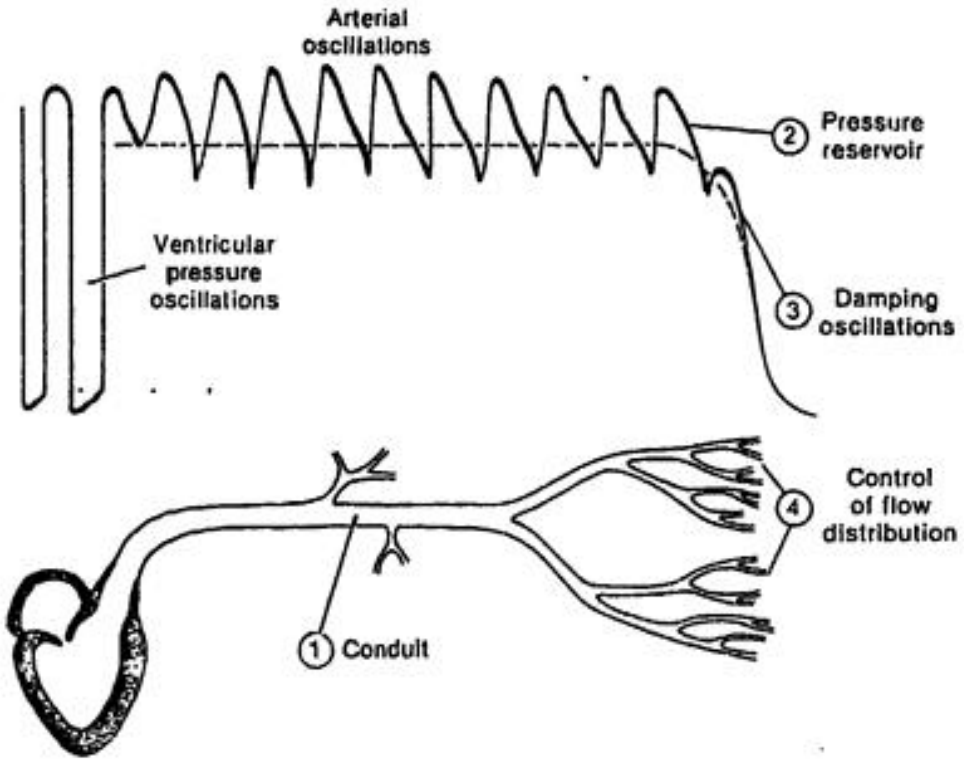
(2) يعمل كخزان للضغط يدفع الدم فى الشرايين الرقيقة .

(3) يمتص الذبذبة أو التأرجح فى ضغط وسريان الدم الذى يحدثه خفقان القلب وينتج بذلك سريان متجانس للدم داخل الشعيرات.

(4) يتحكم فى توزيع الدم إلى شعيرات الأنسجة المختلفة عن طريق الانقباض للأفرع الطرفية «للشجرة» الشريانية . مثلا قد يقل الدم المتدفق للجلد عن طريق حدوث ضيق في الشرايين التى تغذيه، اثناء تناول الطعام حيث يتوجب امداد الجهاز الهضمى بقدر اكبر من الدم.



الشكل 18-8 رسم يوضح الشكل العام للشرايين والأوردة عند الثديات.



الشكل 19-8 4 وظائف الجهاز الشريانى

(1) توصيل الدم من القلب إلى اجزاء الجسم (2) مخزن للضغط نتيجة لمرونة جدر الشرايين

(3)امتصاص التأرجح فى الضغط وفى سريان الدم الناتج عن «نبض القلب »

(4) التحكم فى سريان الدم للأنسجة المختلفة ناتج عن مقاومة السوائل فى الشرايين الطرفية

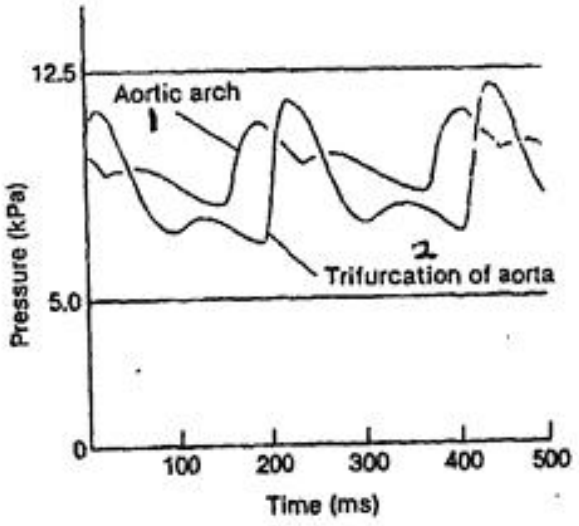
ضغط الدم

يقاس الضغط داخل الشرايين عبر الجدر transmural pressure (أى فرق الضغط داخل وخارج الوعاء عبر جدر الوعاء) اثناء دورة القلب . يشار لأقصى ضغط للدم داخل الشرايين بالضغط الانقباضى systolic وإلى أدنى ضغط diastolic. والفرق بينهما هو نبض الضغط بالانبساطى pressure pulse، يقاس الضغط بالمليمترات من الزئبق ونسبة الضغط كالاتى :

$$\frac{\text{systolic pressure}}{\text{diastolic pressure}} = \frac{120}{80} \quad \text{min Hg}$$

(لتحويله إلى kilopascals يضرب فى 0.1333).

يزداد كل من ذروة ضغط الدم وحجم نبض الضغط داخل الأبهر، عند الثديات والطيور، كلما ازداد البعد عن القلب (الشكل20-8). هنالك 3 احتمالات لتفسير هذه الظاهرة.



الشكل 20-8 قياس ضغط الدم آنيا عند الارنب داخل الأورطى
(1) علي بعد 2 cm. من القلب ثم (2) عند التفرع trifurcation .24cm من القلب

(1) انعكاس الموجات من افرع الشرايين؛ يتم تجميع الموجة المبدئية والموجة المنعكسة. عندما تتطابق الذروات يكون الضغط أعلى منه عندما تكونان غير متطابقتين . يعتقد أنه ، بالقرب من القلب، تكون ذروة الضغط الأولى والضغط المنعكس غير متطابقتين . بذلك يقل الضغط داخل الأبهر بالقرب من البطين ويزداد كلما ابتعدنا عنه.

(2) تقل مرونة الأوعية كلما بعدنا عن القلب فتصبح أقل مرونة ويقل القطر.

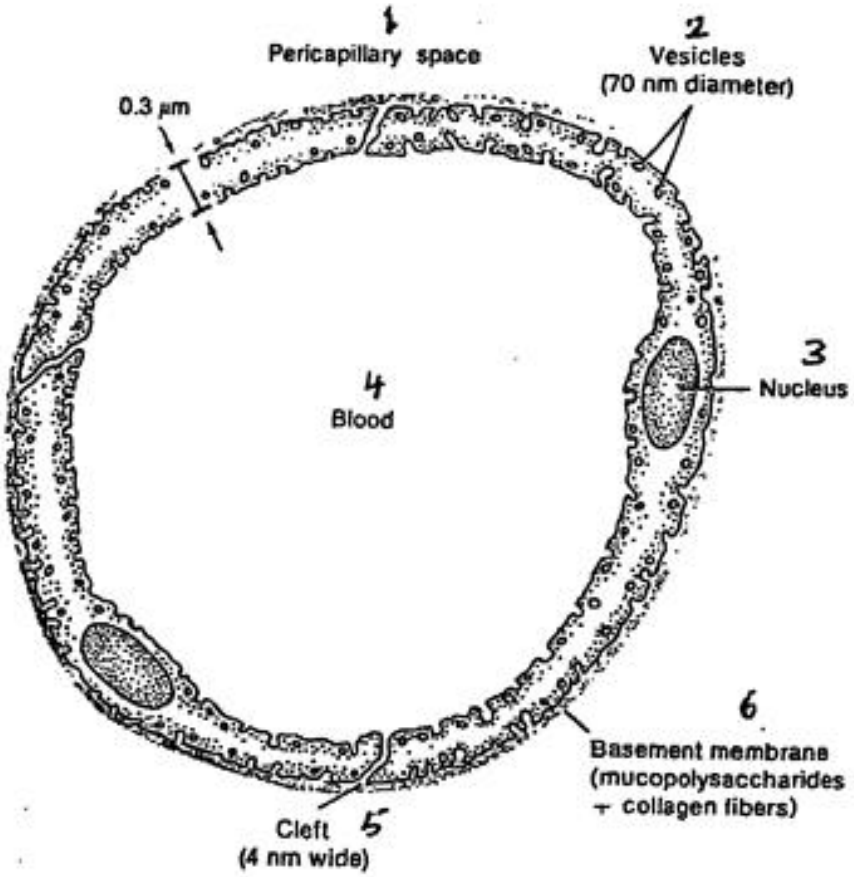
(3) نبض القلب عبارة عن موجة معقدة تتكون من العديد من الموجات المتناسقة. يعتقد أن الاختلاف فى شكل موجة نبض الضغط مع المسافة نتيجة لتجميع الموجات المتناسقة مختلفة.

8-4 الجهاز الوريدى:

يعمل الجهاز الوريدى كمعبر لحركة مرور الدم من الشعيرات إلي القلب. حجم الدم الموجود داخل الأوردة ، عند الثديات، حوالى 50 بالمئة ولا يتعدى الضغط kpa 1.5. جدر الأوعية أقل سمكا من جدر الشرايين. هذا وتؤثر العديد من العوامل، بخلاف خفقان القلب، فى سريان الدم عبر الأوردة، مثل نشاط عضلات الأطراف والضغط الذى يحدثه الستار الحاجز علي الأمعاء. أيضا تساعد عملية التنفس فى إعادة الدم إلى القلب، أى أن يؤدى اتساع القفص الصدرى إلى انخفاض الضغط داخله مما قد يؤدى إلى جذب الدم الوريدى من الرأس والتجويف البطنى إلى داخل الوريد الاجوف vena cava .

8-5 الشعيرات الدموية :

توجد فى جميع الأنسجة شبكة متسعة من الشعيرات الدموية بحيث لا تزيد المسافة الفاصلة بين الخلية واحدة الشعيرات بأكثر من 2 أو 3 خلايا. هذا التوزيع مهم لتبادل المواد من غازات التنفس، المواد الاخراجية والمواد الغذائية عن طريق الانتشار الذى هو فى الأساس عملية بطيئة جدا. تتكون جدر الشعيرات من طبقة وحيدة من الخلايا البطانية. تتحطم هذه الخلايا بسهولة عند ازدياد ضغط الدم نتيجة لصغر قطرها. هذا ولا تحتوى جدر الشعيرات على نسيج ضام أو نسيج عضلى . يحيط بطبقة الخلايا البطانية غشاء قاعدى من الكولاجين و mucopolysacchride (الشكل 21-8).

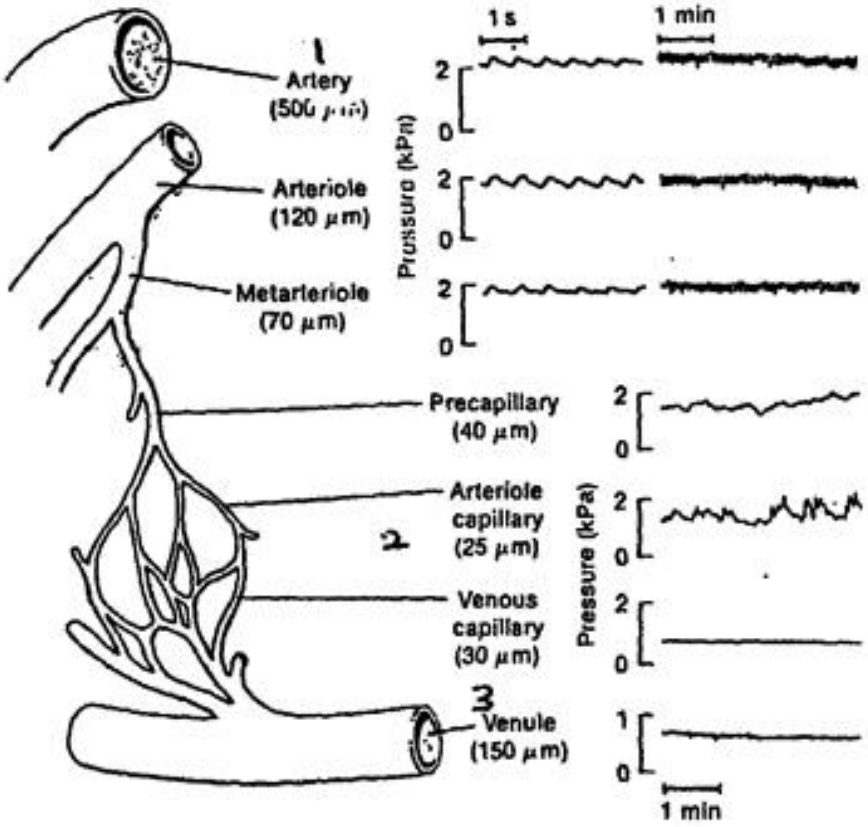


الشكل 21-8 قطاع عرضى لجدار أحد الشعيرات داخل النسيج العضلى

(1) مساحة خارجية (2) حويصلات (3) نواة (4) الدم

(5) شق (6) غشاء قاعدى

تختلف نفاذية الشعيرات باختلاف الانسجة. يعزى هذا الاختلاف إلى اختلاف فى الشكل. تمت دراسة الشعيرات داخل النسيج العضلى أكثر من غيرهافى باقى الانسجة (الشكل 22-8).

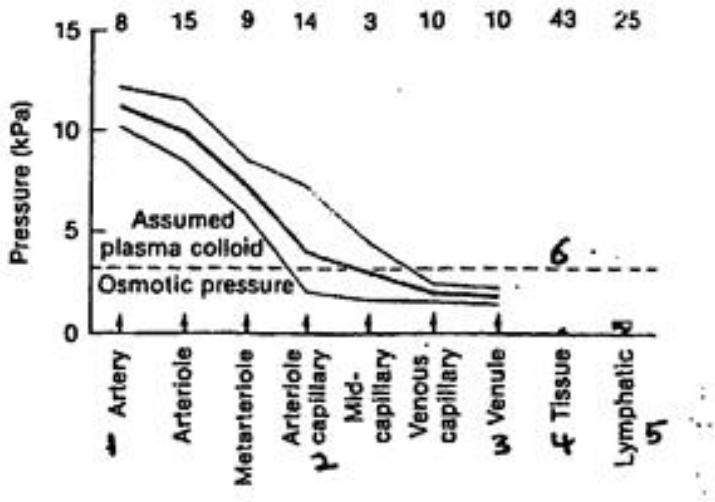


الشكل 22-8 ضغط وسريان الدم الذى يغذى الامعاء عند الضفدع انخفض ضغط الدم من 2.6 kpa داخل الشرايين إلى 0.5 kpa داخل الأوردة

(1) شريان (2) شعيرات (3) وريد

توجد الشعيرات بحيث لا تبعد الا بمسافة قصيرة عن شريان أو وريد دقيق. نتيجة لذلك يكون هناك توزيع متساوى للضغط فى أى مجموعة من الشعيرات فى النسيج الواحد . عند قياس الضغط عبر جدر الشعيرات وجد أنه يساوى 1.3 kpa (الشكل 22-8 والشكل 23-8).

هذا وينتج عن الضغط العالى داخل الشعيرات ترشيح للدم داخل المساحات البينية. وتوجد قوة مضادة لضغط الترشيح هذا وهى الضغط الغروى الأسموزى للدم.



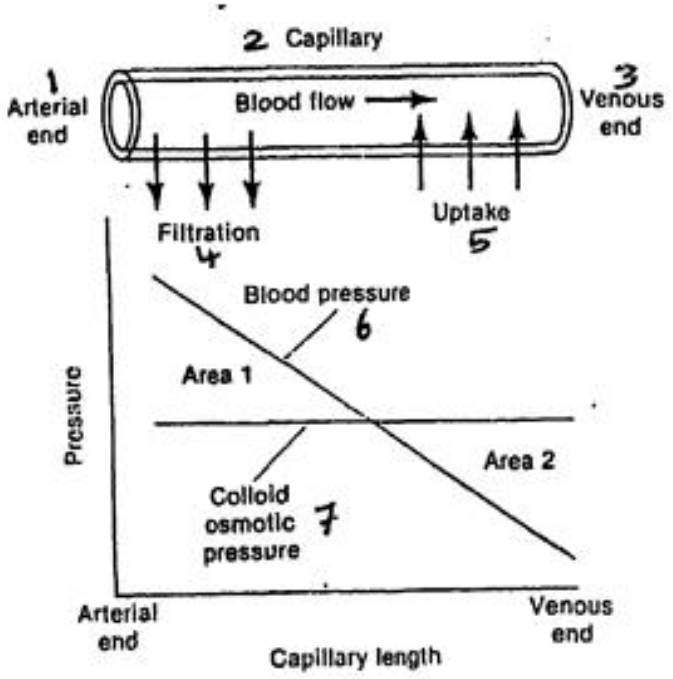
الشكل 23-8 الضغط داخل الدم ، الجهاز الليمفاوي والانسجة (الطبقة تحت جلدية) للوطواط
(1) شريان (2) شعيرات (3) وريد (4) نسيج (5) ليمف(6) الضغط الغروى
تشير المساحة المظللة إلى 1SE ± (st. error)

إذا رجعنا للشكل (21-8) نجد أن ضغط الترشيح أعلى من الضغط الغزوى الاسموزى عند الطرف الشريانى للشعيرات (المساحة1)، لذلك يتم ترشيح السوائل من الدم إلى المساحات البينية. ينخفض ضغط الدم علي طول الشعيرات وفي الجهة الوريدية يفوق الضغط الغرورى الأسموزى ضغط الدم (المساحة2) لذلك يتم اعادة السوائل مرة أخرى عن طريق الخاصية الاسموزية إلى مجرى الدم لكن عموما يكون السائل المفقود (المساحة 1) أكبر من السائل المسترد (المساحة 2) لذلك يتبقى جزء من السوائل المرشحة داخل الأنسجة ويتم اعادتها للدم. عن طريق الجهاز الليمفاوى. تسهل عملية خروج السوائل إلى المساحات البينية من عملية تبادل المواد بين الدم والأنسجة.

8-6 الجهاز الليمفاوى :

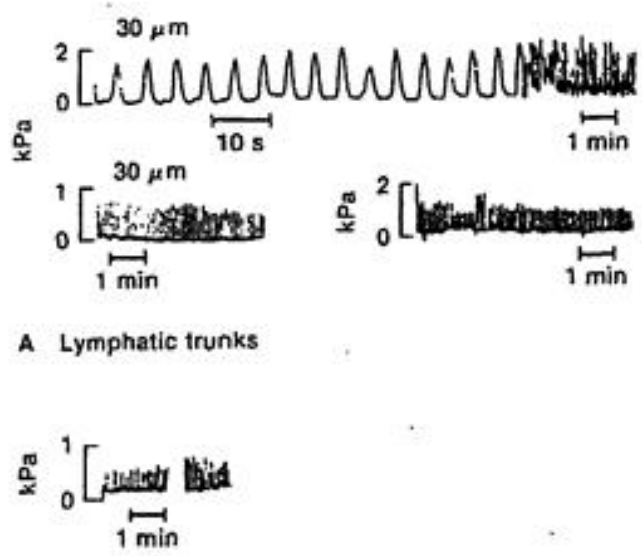
يعمل الجهاز الليماوى على اعادة السوائل الزائدة والبروتينيات التى يتم ترشيحها داخل المساحات البينية عبر الشعيرات إلي مجرى الدم مرة أخرى.

يتم امتصاص الجزئيات الكبيرة خاصة الدهون والهرمونات من الأمعاء عن طريق الجهاز الليمفاوى ومن ثم تمر إلى الدم. أيضا يعمل الجهاز الليمفاوى فى دفاع الجسم ضد الغزو الميكروبى عن طريق انتاج الخلايا الليمفاوية lymph والخلايا الوحيدة monocytes عند العقد الليمفاوية . تشبه الأوعية الليمفاوية الكبيرة الأوردة وهى، عند الثديات والعديد من الفقاريات، تفرغ عبر قناة صدرية thoracic duct داخل الوريد الأمامى ant. cardinal vein (راجع الشكل 5-8). عادة يكون ضغط الليمف أقل من ضغط الأنسجة المحيطة به بحوالى 1mmHg .



الشكل 24-8 الاختلاف فى ضغط الدم بالنسبة للفرق فى الضغط الفروى الاسموزى بين البلازما والسائل البينى داخل الشرايين (المساحة 1) تفوق ضغط الدم الفروى الاسموزى لذلك يتم ترشيح السوائل من الدم إلى المساحات البينية . هذا ويحدث العكس داخل (المساحة 2) لذلك ترجع السوائل مرة أخرى إلى لدورة (1) شريان (2) شعيرات (3) وريد (4) ترشيح (5) آخذ (6) ضغط الدم (7) الضغط الفروى الاسموزى للبلازما

توجد بالأوعية الليمفاوية صمامات تسمح بمرور السائل بعيدا عن الأنسجة. هذا وتحاط الأوعية احيانا بعضلات ملساء تنقبض تواتريا خالقة ضغط يصل 10mmHg يسمح بمرور السائل بعيدا عن الأنسجة (الشكل25-8).



A Lymphatic trunks

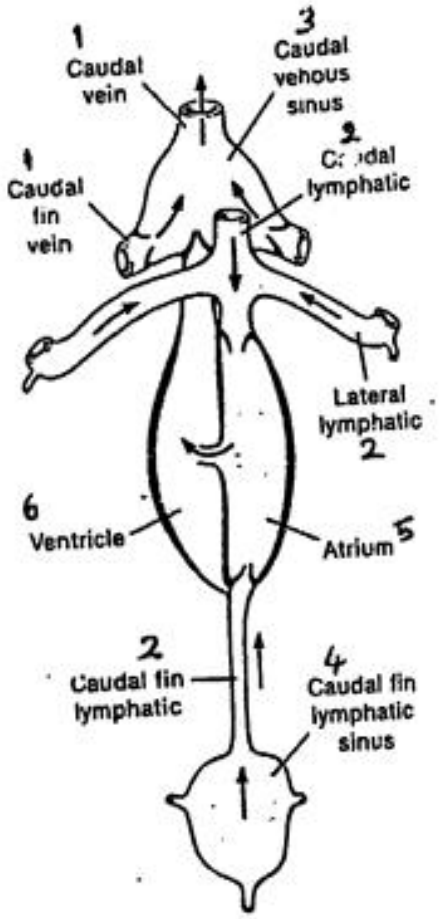
B Lymphatic capillary (5 μm)

الشكل 25-8 الضغط داخل الأوعية الليمفاوية لجناح للوطواط
A الترنك الليمفاوى B الشعيرات الليمفاوية

يوجد في العديد من المستديرات الفم cyclostomes ، الأسماك والبرمائيات قلب ليمفاوى يساعد فى تحرك السائل الليمفاوى نمو القلب (الشكل 26-8). يوجد قلب الليمف كذلك عند الزواحف واجنة الطيور وقد يبقى فى بعض الطيور بعد الموصلة الجنينية لكنه لا يوجد عند الثديات .

8-7 تنظيم وظيفة القلب والجهاز الدورى بواسطة الجهاز العصبى المركزى

ترتكز عملية تنظيم وظيفة القلب والجهاز الدورى بواسطة الجهاز العصبى المركزى علي تنظيم ضغط الدم داخل الشرايين والذى يتم تنظيفة بغية الحصول على سريان الدم المناسب داخل الشعيرات وهى تعتمد على (1) الحفاظ على ضغط الدم اللازم لتغذية المخ وعضلة القلب



الشكل 26-8 قلب الليمف يوجد عند ذيل سمكة الـ eel

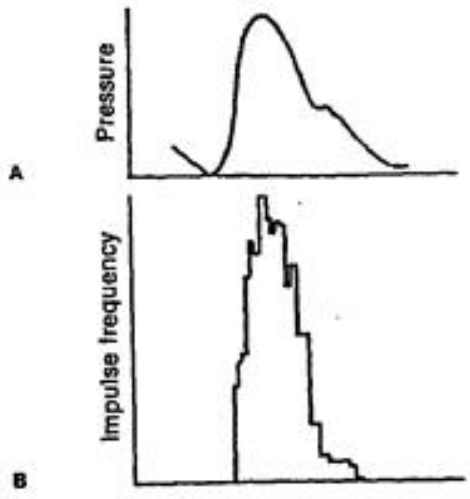
(1) أوردة (2) أوعية ليمفاوية (3) جيب وريدى (4) جيب ليمفاوى (5) أذين (6) بطين

و(2) عند تحقيق هاتين الغايتين، مد الأجزاء الأخرى من الجسم بالدم . و(3) التحكم فى ضغط الدم داخل الشعيرات وبالتالى حجم الأنسجة وحجم ومكونات السائل البينى. هذا وتوجد مستقبلات الضغط baroreceptors فى مواضع مختلفة من الجهاز الدورى وكذلك توجد مستقبلات كيميائية chemoreceptors لقياس نسبة الأكسجين، ثانى أكسيد الكربون وpH فى الدم ثم نقل الاشارات إلى المخ والجهاز العصبى المركزى، نستعرض فيما يلى المستقبلات المختلفة.

(1) المستقبلات الوعائية

(أ) المستقبلات الميكانية

تمت دراسة المستقبلات الميكانية أو مستقبلات الضغط السباتى الجيب carotid sinus بتوسع فى الشريان السباتى الداخلى carotid . حيث يكون فيه جدار الشريان أقل سمكا من غيره. يوجد تحت الظروف الفزيولوجية الطبيعية جهد كهربى للغشاء عند الراحة. هذا وترسل المستقبلات اشارات عصبية عند شد جدران الشريان (الشكل 8-28) يتسبب ازدياد ضغط الدم فى شد جدر الشريان . هذا وتكون الصلة بين ضغط الدم والاشارات العصبية التى يراسها المستقبلات sigmoid أى شبيه بحرف S ويكون الجهاز أكثر حساسية عند المدى الفزيولوجى (الشكل 8-27).



الشكل 8-27 العلاقة بين (A) نبض الضغط و (B) معدل نبض الضغط عند وحدة مستقبل ميكانى سباتى واحد

يتم نقل الاشارات إلى مركز القلب والأوعية فى النخاع المستطيل. ينتج عن ازدياد ضغط الدم ازدياد فى معدل نبض مستقبلات الضغط والذى يؤدى إلى رد فعل يترجم إلى تخفيض نتاج القلب وكذلك تخفيض المقاومة الطرفية لسريان

الدم فيذهب المزيد من الدم إلى الأطراف وبذلك ينخفض ضغط الدم (الجدول 1-8).

الجدول 1-8 التأثيرات الانعكاسية التى تمت ملاحظتها
عند اختلاف الضغط داخل الجيب الكاروتيدى
الضغط داخل الجيب الكاروتيدى

المؤثرات	ازدياد	انخفاض
العصب الحائر	++++	-
العصب السمبتاوى للقلب	-	+++
تغذية الكلى	-	+
تغذية العضلات	---	+++
الجلد	-	++
ADH	?	++

+ تشير إلى ازدياد التأثير المستقل
- تشير إلى انخفاض التأثير المستقل

ب- المستقبلات الكيميائية :

توجد المستقبلات الكيميائية داخل الجسم السباتى carotid والأوراطى aortic (راجع الفصل 10) وهى لا تقوم بالتأثير انعكاسيا فى التنفس فحسب ولكنها تؤثر كذلك على القلب والأوعية الدموية. تكون الاستجابة بازدياد النبض الكهربى للمستقبل عند ازدياد تركيز CO_2 فى الدم أو انخفاض تركيز O_2 أو اختلاف pH . تترجم هذه الاستجابة إلى انقباض فى الأوعية الدموية الطرفية وانخفاض فى معدل خفقان القلب يحدث ذلك عند الغطس ، بذلك يتوفر الدم اللازم للمخ في وجه انخفاض نتاج أو مردود القلب.

(2) المستقبلات القلبية

توجد العديد من المستقبلات الميكانية والكيميائية فى مواضع مختلفة من القلب، تقوم بالكشف عن أى اختلال فى وظيفة القلب وتنقل هذه المعلومات

للجهاز العصبى المركزى الذى يتفاعل بالعديد من الاستجابات. هذا وتنقسم مستقبلات القلب الميكانية إلى نوعين :

(أ) مستقبلات أذينية :

توجد العديد من المستقبلات الميكانية على الأذين تقيس الاختلاف فى معدل أو درجة امتلاء الأذين. يستجيب النوع A وهى آلياف واردة مغلفة بالنخاع لمعدل خفقان القلب، بينما يستجيب النوع B ، أيضا آلياف حسية واردة مغلفة بالنخاع إلى معدل امتلاء وحجم الأذين.

أحد العوامل الهامة لتحديد حجم الأذين ، هو تحديد ضغط وحجم الدم داخل جهاز الأوردة . فازدياد حجم الدم الوارد يزيد من امتلاء الأذين مما يؤدى إلى اثارة المستقبلات من النوع B، هذا ويكون رد الفعل أولا ازدياد فى معدل خفقان القلب، ثم يليه التأثير الثانى وهو زيادة فى عملية اخراج البول بواسطة الكلى نتيجة لانخفاض افراز ADH. بذلك توجد حلقة من التغذية المرتجعة السالبة لتنظيم حجم الدم.

أيضا يتم افراز أحد الهرمونات atrial naturetic protein اختصاراً ANP بواسطة القلب ويقوم بتحفيز انتاج البول بواسطة الكلية وكذلك آخراج الصوديم.

توجد مجموعة ثالثة من الآلياف (النوع C) وهى غير مغلفة، عند مناطق الوصل بين الأذين والأوردة وهى تتحكم فى معدل خفقان القلب. هذا ويؤدى اثارة النوع C إلى انخفاض ضغط الدم.

ب- مستقبلات بطينية :

توجد كل من الآلياف السمبتاوية المغلفة والغير مغلفة على جدار البطين . يتم تنشيط هذه الآلياف نتيجة لاعتراض سريان الدم فى الشريان التاجى. هذه الآلياف نوعان، ميكانية وكيميائية. عند التنشيط المنخفض تتسبب هذه الآلياف فى ازدياد التأثير السمبتاوى وانخفاض التأثير نظير سمبتاوى مما يؤدى إلى

ارتفاع معدل خفقان القلب وكذلك ازدياد ضغط الدم. عند الاثارة العالية لهذه الألياف تتسبب بالاحساس بالألم فى القلب.

توجد كذلك الألياف من النوع C على جدار البطين وتؤدى اثارتها إلى اتساع الأوعية الدموية الطرفية وعند ازدياد الاشارة يؤدى ذلك إلى ارتخاء المعدة وربما القئ.

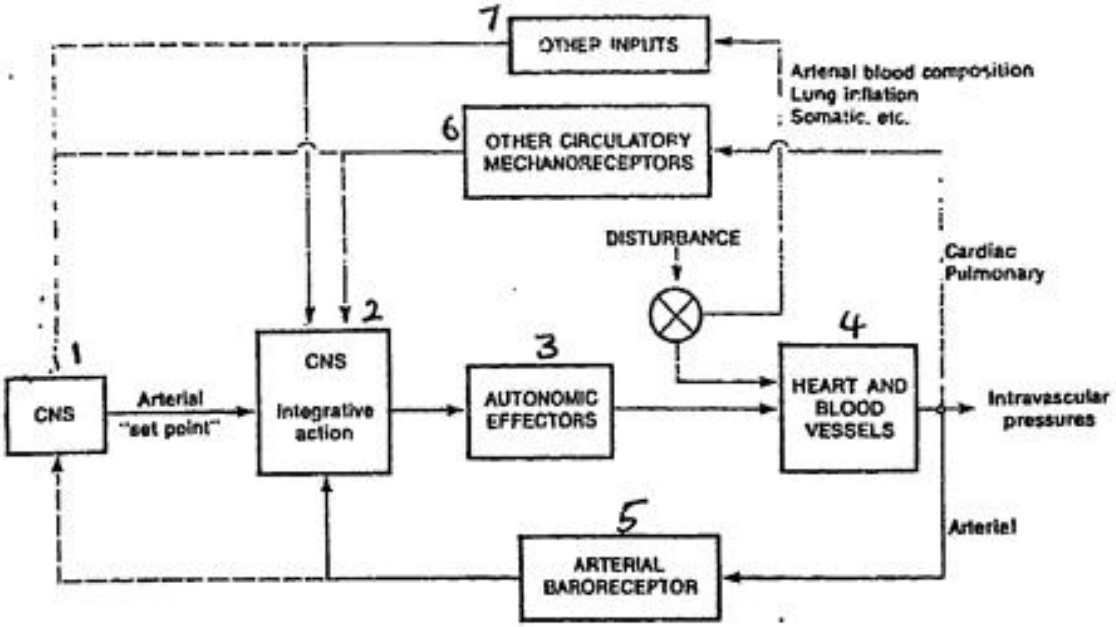
(3) الألياف الواردة من العضلات الحركية

توجد بالألياف خلايا حسية عبارة عن مستقبلات ميكانية تتم اثارتها نتيجة لانقباض العضلات . هذا وتختلف الاستجابة حسب اختلاف كيفية الانقباض أيسومترى isomeric (التمرين الساكنstatic)ومتواتر (متساوى التواتر)isotoric (وهو التمرين الفعال دينامى dynamic). يصاحب الأول ارتفاع فى ضغط الدم ولا يتغير نتاج القلب بينما يصاحب الأخير ازدياد كبير فى انتاج القلب دون اختلاف فى ضغط الدم. تكون الاستجابات انعكاسية ويتم تحليلها داخل مركز القلب – الأوعية داخل الجهاز العصبى المركزى. هذا ويصل رد الفعل للقلب عن طريق الألياف الصادرة التى تغذى القلب والاوعية الدموية وهى مبينة عن طريق الرسم فى الشكل (28-8).

يتم نقل المعلومات من مركز القلب والأوعية الدموية عن طريق الالياف السمبتاوية والنظير سمبتاوية التى تغذى القلب. ينتج عن اثارة الاعصاب السمبتاوية زيادة فى معدل خفقان القلب وفى انقباض الأوعية الدموية فيحدث نتيجة لذلك ارتفاع ملحوظ فى ضغط الدم، وفى نتاج أو مردود القلب. وعموما يحدث العكس عند اثارة الاعصاب النظير سمبتاوية فينتج عنه انخفاض فى ضغط الدم وفى مردود القلب.

8-8 استجابة القلب والاوعية الدموية للتمارين الرياضية :

تنظيم أداء القلب والاوعية الدموية اثناء التمارين الرياضية ، عملية معقدة تشمل العديد من مستويات التنظيم ، آليات تحكم عصبية مركزية، آليات عصبية انعكاسية طرفية وتحكم موضعى.



الشكل 28-8التحكم فى الدورة الدموية للثديات

(1) الجهاز العصبى المركزى (2) تكامل وظيفةCNS (3) الجهاز العصبى المستقل

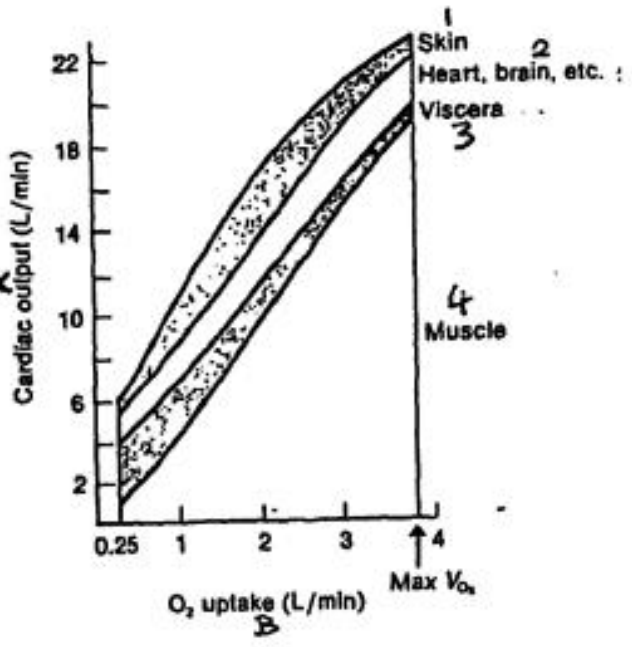
(4) القلب والأوعية الدموية (5) مستقبلات الضغط الشريانية

(6) مستقبلات ميكانية أخرى (7) مدخلات أخرى

أثناء التمرين الرياضى يزداد تدفق الدم إلى العضلات في تناسب مع نشاط العضلة. يتحقق ذلك عن طريق ازدياد فى نتاج القلب وانخفاض فى تدفق الدم إلى الامعاء والكلى (الشكل 29-8).

يعزى معظم الازدياد فى مردود القلب إلى ارتفاع المقاومة الطرفية بحوالى 50 بالمئة من القيمة عند الراحة وكذلك ازدياد الدم الوريدى العائد نتيجة لفعالية العضلات علي الأوردة (والتي تدفع بالدم تجاه القلب).

يتم امتصاص التأرجح الزائد فى «نبض الضغط » نتيجة لازدياد مرونة الشرايين ويرجع ذلك إلى ارتفاع تركيز الكاتكولامينات catecholamine (هرمونات تشمل ابينفرين و نورا بينفرين) فى الدم.

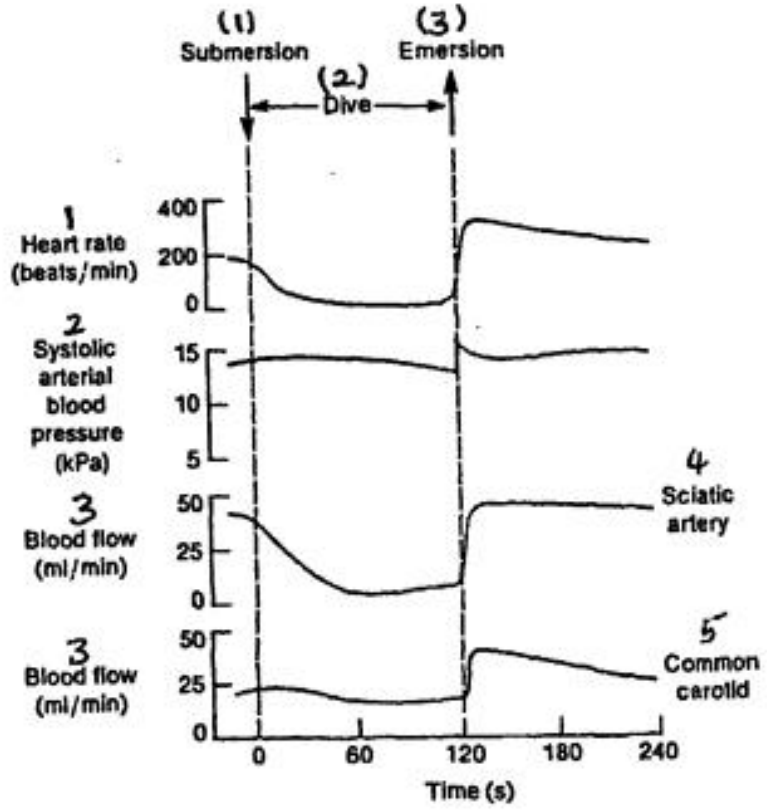


الشكل 29-8 A التوزيع النسب التقريبى للدم عند B مختلف مستويات التمرين (استهلاك O_2)
(1) الجلد (2) القلب – المخ (3) الامعاء (4) العضلات

8-8-1 استجابة الاوعية والقلب للغطس تحت الماء

تستطيع العديد من الفقاريات التى تتنفس الهواء أن تبقى تحت الماء فترات قد تطول. اثناء هذه الفترات تحدث تغيرات ملحوظة فى التنفس وفى أداء القلب والأوعية الدموية بحتمية توجيه الدم وبالتالى الاكسجين إلى الاعضاء التى لا تتحمل نقص O_2 مثل المخ، القلب وبعض الغدد الصماء.

تتوقف عمليتى الشهيق والزفير نتيجة لاثارة المستقبلات الحسية الموجودة على ممرات الانف والحلق (الشكل 30-8) . ينخفض تدفق الدم للعضلات ليصل صفرا فى بعض الحيوانات مثل الفقمة عجل البحر seals كما يحدث تضخم فى المخزون الوريدى يصاحبه انخفاض في معدل خفقان القلب. يعتبر النخاع المستطيل الموضع الرئيسي للتحكم فى عملية الغطس في البط ولكن يتطلب ايضا بعض التعلم فى الفقمة.



الشكل 30-8 تأثير الغطس على الدورة الدموية للبط
(1) بداية الغطس (2) فترة الغطس (3) انتهاء الغطس
(1) معدل خفقان القلب (2) ضغط الدم (3) سريان الدم (4) الشريان الوركى
(5) الشريان السباتى

أيضا تعمل المستقبلات الكيميائية الطرفية (داخل الجسم السباتى carotid) في الاستجابة لنقص PO_2، نقص pH وارتفاع PCO_2 . لكن تختلف الاستجابة لهذه المؤثرات حسب وضع الحيوان أى اثناء عملية تنفس الهواء أو اثناء انقطاع التنفس كما يحدث عند الغطس .

عند الحالة الطبيعية التى يستنشق خلالها الحيوان الهواء ينتج عن اثارة المستقبلات الكيميائية ازدياد واضح في معدل تهوية الرئه ، اتساع الأوعية الدموية ازدياد مردود القلب للحفاظ على ضغط الدم فى مواجهة سريان الدم المتزايد للأطراف. تحدث مثل هذه الاستجابة عند نقص O_2 وذلك عندما يصعد الحيوان إلى أعلى مرتفعا بذلك عن سطح البحر. أما نقص O_2 اثناء الغطس (ولأن الحيوان لا يتنفس) فينتج عنه انخفاض فى معدل خفقان القلب وانخفاض فى مردود القلب .

الفصل التاسع

التنظيم الأسموزى والاخراج

الفصل التاسع

التنظيم الاسموزى والاخراجى

علمنا فى فصول سابقة وفى كتاب علم وظائف الأعضاء العام (1999) أن ثبات البيئة الداخلية للحيوان homeostasis ونقصد بها ثبات مكونات السائل البينى، تمثل أهم مقصد للكائن الحى ومن أجل الحفاظ عليه، تعمل كل آليات التنظيم داخل الجسم، هذا وتشبه البيئة الداخلية للعديد من الحيوانات ماء البحر المخفف.

كما أن مقدرة العديد من الحيوانات في تنظيم مكونات البيئة الداخلية مرتبط بمقدرتها على العيش فى بيئات تختلف الأسموزية فيها عن الأسموزية المطلوبة لوظائف أنسجة الجسم. يتطلب التنظيم الأسموزى تبادل الماء والأملاح بين البيئة البينية أى البيئة الداخلية للحيوان، والبيئة الخارجية التى يعيش بداخلها لتعويض أى فقدان حتمى ، أو غير محكوم وكذلك أى إضافة حتمية، أو غير محكومة. يمثل نقل المواد المذابة والماء عبر طبقة الطلائية أساس النشاط الأسموزى. هذا ويعتمد التبادل الحتمى obligatory للماء على الآتى :

(1) وجود الانحدار gradient الأسموزى بين البيئة الداخلية والخارجية، (2) نسبة مساحة سطح الحيوان إلى حجمه، (3) نفاذية الغشاء، غلاف ، أهاب integument، (4) تناول الطعام والماء، (5) فقدان الماء أثناء عملية التنظيم الحرارى ، (6) التخلص من الفضلات الأيضية والهضمية .

تنتج الكلى عند الثدييات والطيور بولاً عالى الملوحة hrypertonic باستخدام العديد من الآليات مثل الترشيح filtration، اعادة الامتصاص reabsorption، الافراز secretion وآلية التيار المضاد countercurrent (راجع كلية الثدييات ، كتاب علم وظائف الاعضاء العام، 1999).

تعتمد آلية ترشيح البلازما داخل الكبيب على الضغط العالى للدم داخل الشرايين وبواسطته يتم ترشيح المواد المعدنية والمواد العضوية صغيرة الحجم تاركا الجزئيات الكبيرة وخلايا الدم. يعاد امتصاص الأملاح وبعض الجزئيات المرغوب فيها مثل سكر الجلوكوز. كما يتم افراز بعض المواد داخل الأنابيب الدقيقة. يوجد جهاز لآلية التيار المضاد ويشمل القناة الجامعة وحلقة هينلى ويمتد هذا إلى داخل نخاع الكلية، حيث يوجد تركيز عالي للأملاح واليوريا فى السائل البينى، بذلك يتم امتصاص الماء اسموزيا من داخل القنوات الجامعة إلى المساحات البينية ومن ثم إلى الدورة الدموية. هذا ويتم التحكم فى هذه الآلية بواسطة الهرمونات. بذا يمكننا القول أن تكوين البول، الناتج عن عمليات الترشيح، اعادة الامتصاص والافراز، يختلف كثيرا عن تكوين البلازما التى جاء منها:

تكوين البول فى معظم الفقاريات واللافقاريات شبيه بذلك إذ يتم ترشيح البلازما ultrafeltration، افراز Na^+، K^+ ، PO^{2-} بواسطة الأنابيب الدقيقة يتبعها التحرك السلبى للماء وبعض الجزئيات الأخرى، ثم يعاد امتصاص المواد الضرورية ومنها الماء.

تواجه الحيوانات التى تعيش فى مياه البحار وتلك التى تعيش علي ظهر اليابسة بخطر الجفاف، بينما تواجه حيوانات المياه العذبة بازدياد دخول الماء إلى جسمها عن طريق الأسموزية عبر الجلد. تعوض الطيور والزواحف والأسماك العظمية التى تعيش فى البحار، فاقد الماء عن طريق شرب ماء البحر ثم افراز الملح الزائد . بينما تقوم أسماك المياه العذبة بامتصاص الأملاح نشطا من البيئة وتمتنع عن شرب الماء.

* تعتبر الطيور والثديات الحيوانات الوحيدة التى تنتج بولاً مركزاً hypertonic . زد على ذلك تقوم الأنواع التى تعيش فى الصحارى باستخدام بعض الآليات التى تقلا من عملية فقدان الماء اثناء التنفس.

سنتناول فى هذا الفصل التبادل الأسموزى بين الحيوان والبيئة والآليات المختلفة التى تجعل الحيوان قادرا على العيش فى البيئات المختلفة عنه اسموزيا. فى نهاية الفصل سنتناول احدى المشاكل المرتبطة بالتنظيم الاسموزى وهى كيفية التخلص من المواد النيتروجينية السامة الناتجة عن أيض البروتينات والأحماض الأمينية.

9-1 مشاكل التنظيم الأسموزى :

إحدى أهم متطلبات التحكم فى البيئة الداخلية تكمن فى المقدرة على الاحتفاظ بقدر مناسب من الماء. وأحد المتطلبات الهامة الأخرى لوظيفة الخلية هو وجود التركيز المناسب من المواد المعدنية المذابة والمواد العضوية اللازمة لتغذية الخلية. تتطلب بعض الخلايا سائل بينى شبيه بماء البحر أى غنى بأيونى الصوديوم والكلوريد ومنخفض تركيز K^+, Ca^{2+} (الجدول 9-1 والجدول 9-2). يعمل ماء البحر كسائل بينى بالنسبة للافقاريات البسيطة . هذا وفى اللافقاريات الأكثر تعقيدا يشابه التركيز الأيونى للسائل البينى ماء البحر. كما يوجد نوع أو درجة من التنظيم للمواد المذابة وذلك فى معظم الحيوانات متعددة الخلايا (الشكل 9-1).

أخيرا يجب تحرير البيئة الداخلية من المواد الضارة، الناتجة عن عملية الأيض. يتم ذلك فى الحيوانات المائية البسيطة عن طريق إنتشار المواد الضارة من خارج الخلايا والبيئة الداخلية إلى المياه المحيطة بالحيوان.

هذا ويتم ازالة المواد النيتروجينية الضارة، عند الحيوانات التى تمتلك جهازا دوريا، اثناء مرورها بعضو إخراج يكون فى الغالب الكلية. كما لا يقتصر دور الكلية، فى الحيوانات التى تعيش على اليابسة ، فقط على ازالة المواد العضوية الضارة بل يعمل كجهاز رئيسى للتنظيم الأسموزى، كما تساعد أعضاء

الجدول 1-9 الأيونات الغير عضوية الرئيسية

الأيون	التوزيع	التاثير
Na^+	السائل البيني	الضغط الاسموزي البيني، نقل المواد عبر غشاء الخلية، التيار الداخلي لجهد الغشاء
K^+	السيتوبلازم	الضغط الاسموزي السيتوبلازمي يحدد جهد الغشاء عند الراحة
		التيار الخارجي لاعادة الاستقطاب
Ca^{2+}	تركيز منخفض داخل الخلايا	ينظم الافراج الخلوي وانقباض العضلات، يعمل كرسول ثاني
HPO_4^{2-}	داخل وخارج الخلية	ينظم تركيز أيون الهيدروجين
HCO_3^-		
Cl^-	خارج الخلايا	يعادل الأيونات الموجبة

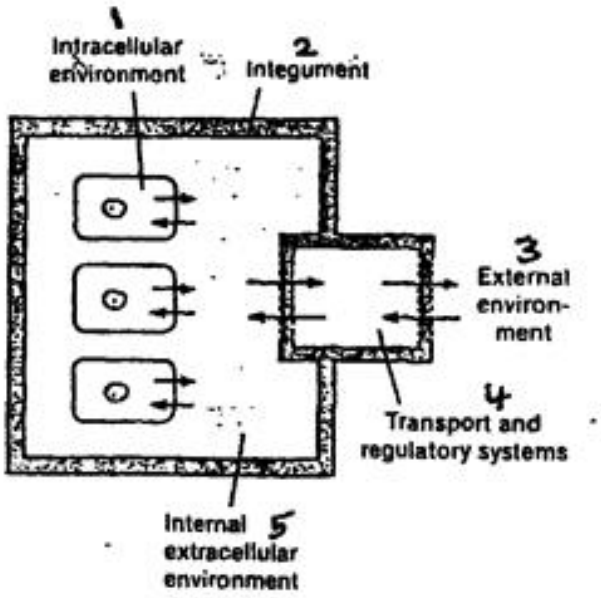
الجدول 2-9 تكوين السائل البيني عند بعض الحيوانات

ماء البحر	الوسط	التركيز	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	urea
		1000	460	10	10	53	540	
الحلقيات	SW		445	10.1	10.0	52.4	537	
	ter		76	4.0	2.9		43	
القشريات	FW		146	3.9	8.1	4.3	139	
	SW		472	10.0	15.6	6.7	470	
العشرات	Ter		60	12	17	25		
	Ter		161	7.9	4.0	5.6	144	
الاسماك	SW	1075	269	4.3	3.2	1.1	258	376
الفشروفية	FW		200	8	3	2	180	132
الاسماك	SW	337	180	4	3	1	160	
العظمية	FW	293	142	2	6	3	107	
البرمائيات	FW	210	92	3	2.3	1.6	70	
الزواحف	FW	278	140	3.9	5.1	3.6	111	
الطيور	FW	294	138	3.1	2.4		103	
الثديات	Ter		142	4.0	5.0	2.0	104	

• مقياس التركيز بواسطة millimole / l

sw = ماء البحر، fw = ماء عذب، ter = على اليابسة

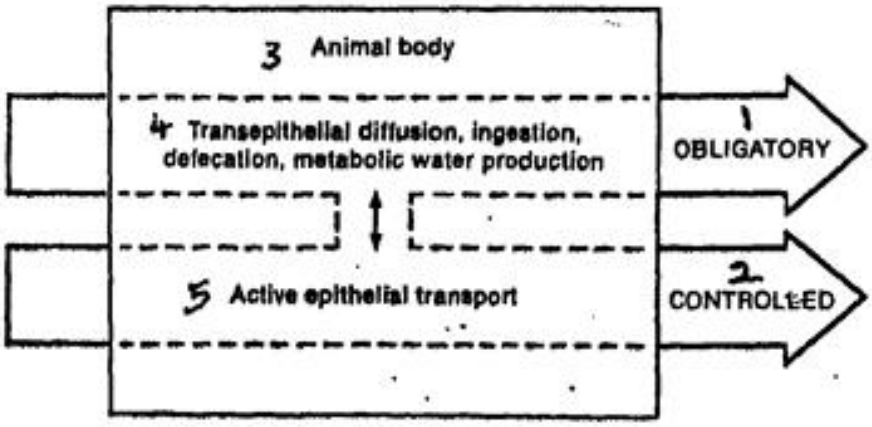
أخرى، عند البرمائيات، الأسماك واللافقاريات المائية، على عملية التنظيم الأسموزى كالخياشيم الجلد وحتى الأمعاء.



الشكل 1-9 تعمل نظم التحكم فى الحفاظ على البيئة الداخلية للحيوان، أى السائل البينى فى وجه الاختلاف فى البيئة الخارجية (1) البيئة داخل الخلية (2) الجلد، (3) البيئة الخارجية (4) نظم النقل والتحكم (5) البيئة الداخلية للحيوان السائل البينى

هنالك دائما اختلاف بين التركيز المثالى للأيونات داخل وخارج الخلية ، هذا ويستفاد من العديد من الآليات لتنظيم هذه الاختلافات بين، السائل داخل وخارج الخلية وبين السائل خارج الخلية والبيئة الخارجية التى يعيش فيها الحيوان. يسمى مجموع هذه الآليات بالتنظيم الأسموزى osmoregulation. بالرغم من حدوث بعض الاختلافات فى التوازن الأسموزى من ساعة إلى أخرى إلا أن الحيوان، عموماً، يكون فى حالة أسموزية ثابته على المدى الطويل.

يمكن تقسيم التبادل الأسموزى بين الحيوان وبيئته إلى قسمين (الشكل 9-2).



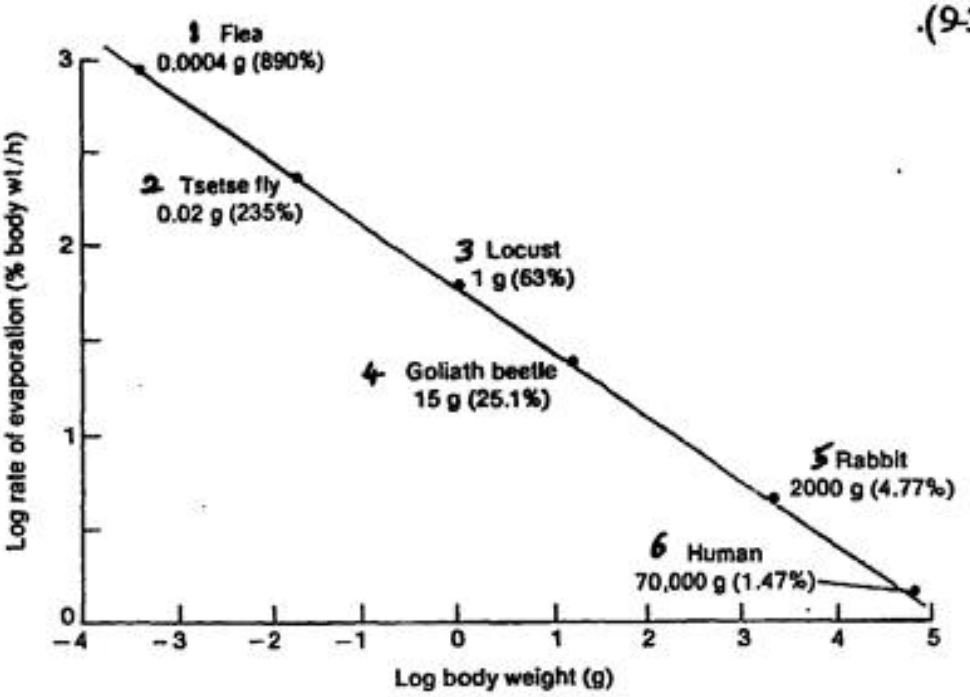
الشكل 2-9 يوجد نوعّان من نظم التبادل الاسموزى بين الحيوان وبيئته
(1) تبادل جبرى (2) تبادل منظم (راجع النص) (3) جسم الحيوان
(4)الانتشار عبر الطلائية ، تناول الطعام ، الاخراج، ماء الايض (5) النقل النشط

(1) التبادل الجبرى obligatory والذى يحدث نتيجة لعوامل فزيائية خارجية لا يستطيع الحيوان أن يتحكم فيها ، (2) تبادل منظم وهو ما يتم التحكم فيه فزيولوجيا وهو يساعد على الحفاظ على ثبات الوسط الداخلى. عادة يعوض التبادل المنظم ما يطرأ من خلل نتيجة للتبادل الجبرى. لقد قام بنتلى Bently 1971 باستعراض العوامل المختلفة التى تساهم فى التبادل الجبرى وهى :

(1) ميل الانحدار بين السائل البينى والبيئة المحيطة، كلما ازداد الفرق فى تركيز احدى المواد بين البيئة المحيطة وسوائل الجسم كلما كان هناك ميل لانتشار المادة إلى الجهة الأقل تركيزاً.

(2) نسبة سطح الجسم إلى الحجم، يتراوح حجم الحيوان مع تكعيب ابعاده الخطية بينما يتراوح سطح الحيوان مع تربيع أبعاده. هذا يعنى أن نسبة سطح الجسم إلى الحجم تكون أكبر لدى الحيوانات صغيرة الحجم. وهذا يعنى أيضاً أن نسبة تبادل الماء عبر الجلد يكون أعلى بالنسبة للحيوانات الصغيرة.

لذلك ولنسبة تبادل معينة نجد أن الحيوانات صغيرة الحجم ستفقد أو ستأخذ الماء أسرع من الحيوانات كبيرة الحجم والتى لها نفس الشكل (الشكل 9-3).



الشكل 9-3 كمية الماء المفقود (كنسبة مئوية من الوزن الجسم فى الساعة) فى بيئة حارة كالصحراء
(1) برغوث (2) ذبابة تستسى (3) جرادة (4) خنفساء (5) أرنب (6) انسان

(3) درجة نفاذية الجلد . يعمل الجلد كحاجز بين البيئة الداخلية والخارجية. تختلف درجة نفاذية الجلد للماء وغيره من المواد المذابة. نجد أن نسبة نفاذية الجلد للماء عالية بالنسبة للبرمائيات وهى تسمح بتبادل O_2, CO_2 ، الماء والأيونات، أيضا تكون طلائية الخياشيم لدى الأسماك عالية النفاذية للماء لكنها قد تستخدم ايضا فى النقل النشط لامتصاص الأملاح الضرورية من الماء، فى حالة العيش داخل المياه العذبة أو لافرازه فى حالة العيش داخل المياه المالحة.

هذا وللحيوانات التى تعيش على ظهر اليابسة جلد منخفض النفاذية للماء، لذلك فهى تفقد الماء بدرجة أقل عبر هذا الطريق. هذا وقد احتفظت الأنواع التى غزت الماء مثل الثدييات أو حشرات البرك بجلدها الذى لا ينفذ عبره الماء بسهولة. عموماً تقل درجة نفاذية الجلد للماء لدى الحيوانات التى تظهر درجة عالية من التنظيم الأسموزى. بينما ترتفع النفاذية فى الحيوانات التى تظهر درجة

منخفضة من التنظيم الأسموزى.

(4) التغذية؛ يتم تناول الماء مع الغذاء. قد يحتوى الطعام على كمية مياه أكبر أو أملاح أكثر. يتناول طائر النورس اثناء تغذيته على اللافقاريات البحرية كميات كبيرة من الأملاح. لذلك لابد له من التخلص من الملح الزائد فى الجسم. بينما تتناول أسماك المياه العذبة وكذلك البرمائيات قدرا كبيرا من الماء لذلك لابد من التخلص من الماء الزائد.

(5) تنظيم درجة حرارة الجسم، نسبة إلى درجة حرارة التبخر العالية للماء فقد أصبح مثالياً لتخليص الجسم من الحرارة الزائدة وذلك عن طريق تبخره من الاسطح الرطبة. تخضع أهمية الماء فى تنظيم درجة حرارة الجسم إلى العديد من التسوية والتضارب بين التكيف الفزيولوجى لدرجة حرارة البيئة والضغوط الأسموزية التى يواجهها الحيوان الذى يعيش على اليابسة خاصة فى الصحراء حيث يواجه الحيوان بدرجة حرارة جو مرتفعة يصاحبها يشح فى مصادر المياه يمكن فقدان الحرارة عن طريق تبخير الماء من أسطح التنفس مثل الرئية، الممرات الهوائية واللسان وكذلك من سطح الجسم. يفقد الماء عن طريق التنفس حتى فى حالة الأيض الأساسى. سنعود مرة أخرى إلى عملية تنظيم درجة حرارة الجسم فى الفصل (11).

(6) عوامل أيضية، يتحتم على الحيوان التخلص من مخلفات الهضم والأيض التى لا يستطيع الجسم الاستفادة منها ينتشر CO_2 من أسطح التنفس إلى الخارج هذا ويتم انتاج الماء ايضيا بكميات بسيطة (الجدول 3-9) لذلك فإن التخلص منه لا يشكل أية مشكلة. فى الحقيقة تستفيد بعض الثديات الصغيرة التى تعيش فى الصحراء من هذا الماء ويسمى ماء الأيض melabolic water لكن يظل التخلص من المواد النيتروجينية السامة يشكل عبئا اسموزيا على حيوانات اليابسة.

9-2 التنظيم الأسموزى بواسطة الحيوانات

تسمى الحيوانات التى تحافظ على أسموزية سوائل الجسم مختلفة عن البيئة المحيطة osmoregulatros بينما تسمى الحيوانات التى تختلف فيها

أسموزية سوائل الجسم عن البيئة المحيطة osmoconformers وهما موضحين بالجدول (2-9). تعتبر معظم الفقاريات ماعدا الاسماك الغضروفية والـ hagfish، «منظمة صارمة» وهى تحافظ على تكوين سوائل الجسم فى مدى أسموزى ضيق. عامة يكون الدم فى الفقاريات ذا أسموزية منخفضة مقارنة بمياه البحر.

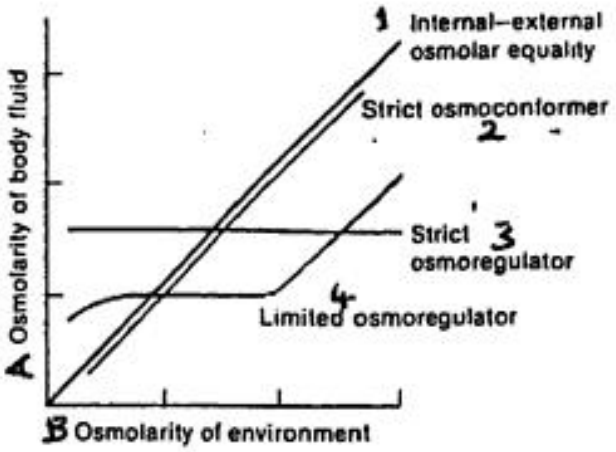
الجدول 3-9 العلاقة بين انتاج ماء الأيض، تحول الطاقة واستهلاك الاكسجين عند أكسدة مواد الطعام المختلفة

المادة	الماء جرام/جرام من المادة	استهلاك O_2 بالتر لكل جرام	الطاقة كيلو جول لكل جرام
الكربوهيدرات	0.56	0.83	17.58
الدهون	1.07	2.02	39.94
البروتينات	0.40	0.97	17.54

تقوم العديد من اللافقاريات التى تعيش على اليابسة بعملية التنظيم الأسموزى لسوائل الجسم. أما بالنسبة للافقاريات المائية فبعضها يدرج تحت «منظمة صارمة» مثلها مثل الفقاريات، بينما يقوم البعض بالتنظيم إلى درجة ما، والبعض الآخر يتعايش مع البيئة المحيطة دون تنظيم لأسموزية سوائل الجسم. يوضح الشكل (4-9) اختلاف أسموزية سوائل الجسم مع الاختلاف فى اسموزية البيئة المحيطة . يتضح الأن أن هنالك طريقتان تستطيع بها الحيوانات التلائم مع الاختلاف الكبير في اسموزية البيئة المحيطة.

أولا : قد يختار الحيوان فزيولوجيا عدم تنظيم الأسموزية وفى هذه الحالة تظهر الخلايا درجة عالية من التحمل الاسموزى osmotic tolerance.

ثانيا : قد يقوم الحيوان بتنظيم اسموزية سوائل الجسم وبذلك تحافظ على درجة عالية من الثبات الأسموزى للبيئة الداخلية فى وجه الاختلافات الكبيرة فى البيئة المحيطة.



الشكل 9-4 العلاقة (A) بين اسموزية سوائل الجسم B وأسموزية البيئة المحيطة لثلاثة رتب من الحيوانات المائية

(1) تتساوى اسموزية سوائل الجسم مع اسموزية البيئة المحيط (2) تتبع اسموزية سوائل الجسم، اسموزية البيئة. (3) تنظيم الاسموزية فى حدود ضيقة (4) تنظيم الاسموزية إلى درجة معينة

فى بعض الفقاريات البحرية يقوم الحيوان بالاحتفاظ بجزئ عالى الأسموزية مثل اليوريا والذى يقوم برفع أسموزية سوائل الجسم فيجعلها مقاربة للبيئة المحيطة كما يحدث فى الأسماك الغضروفية.

9-3 الطبقة الطلائية كنسيج منظم للأسموزية :

تعزى المقدرة على التنظيم الأسموزى فى الحيوانات متعددة الخلايا إلى كفاءة أحد الأنسجة حيث توجد به خلايا عالية التخصص . هذا النسيج هو الطلائية الناقلة transport epithelium الموجودة على الخياشيم ، الجلد، الكلى، والقناة الهضمية. تختلف الخلايا الطلائية عن جميع الخلايا الأخرى لاحتوائها على قطبين تشريحيا ووظيفيا بحيث يواجه الجانب العلوى تجويف متصل بالبيئة الخارجية. بينما يحتوى الجانب القاعدى على طيات عميقة مهمتها نقل الماء اسموزيا وهى تواجه السائل البينى الذى يحيط بجميع خلايا الجسم الأخرى.

يعتمد تركيز المواد فى هذا السائل على الوظيفة التنظيمية الأسموزية التى تقوم بها الخلايا الطلائية.

9-4 اعضاء التنظيم الأسموزى عند الفقاريات :

توجد بالاضافة للكلية، وهى أكثر أعضاء الأخراج والتنظيم الأسموزى تعقيدا، العديد من الأعضاء لدي الفقاريات وهى لا تقل أهمية عن الكلية فى الحفاظ على ثبات أسموزية الوسط الداخل. هذه الأعضاء مثل الخياشيم (عند الأسماك) أو غدد الملح (عند الزواحف والطيور).

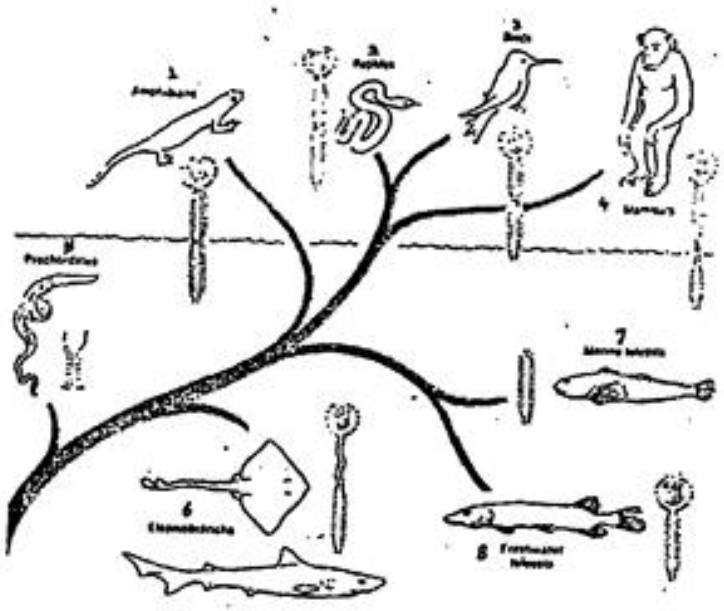
(1) الكلية :

تختلف الكلية فى الأنواع المختلفة للفقاريات. لكن تصبح الصورة واضحة إذا رجعنا أولا إلى تشريح ووظيفة الكلية عند الثديات (راجع كتاب علم وظائف الأعضاء العام، 1999). تؤدى الكلية عند الثديات بعض الوظائف التى تقوم بها فى الفقاريات الدنيا. أعضاء أخرى مثل الجلد والكيس البولي فى البرمائيات، الخياشيم عند الأسماك أو غدد الملح عند الزواحف والطيور. كذلك حظيت فزيولوجيا الكلية عند الثديات باكبر قدر من الدراسة.

تطور النفرون عند الفقاريات :

يمكن تتبع تطور النفرون وهو الوحدة الوظيفية للكلية (الشكل 5-9) يوجد نوع بدائى سابق عند الحبليات الأولية protochordates حيث يفتح الطرف القريب للنفرون فى التجويف البطنى coelom . يوجد أكثر الأنواع بدائية للنفرون (عند الفقاريات فى بعض الأسماك العظمية البحرية التى ينعدم فيها وجود كل من الكبيب ومحفظة بومان. يتكون البول فى هذه الحالة عن طريق الافراز ثم اعادة الامتصاص ولا توجد آلية للترشيح. ويوجد عكس هذه الحالة فى الـ hagfishes حيث يوجد الكبيب لكن لا وجود للأنابيب الدقيقة. هذا وتقضى محفظة

بومان مباشرة داخل التجويف البطنى . تظهر هذه الكلى درجة طفيفة من التنظيم الأسموزى ووظيفتها الرئيسية هى منع تراكم مخلفات الأيض السامة. لذلك يشبه السائل البينى في هذه الحيوانات ماء البحر (الجدول 2-9) فى تكوينه من الأيونات وتكون البلازما فى أسموزية مشابهة مع ماء البحر.



الشكل 5-9 تتبع تطور النفرون فى الحيوانات الفقارية
(1)البرمائيات (2) الزواحف (3) الطيور (4) الثدييات
(5) الحبليات الأولية (6) الاسماك المياه العذبة العظمية

كقانون عام فإن حجم الكبيب عند الأسماك العظمية التى تعيش داخل المياه العذبة يكون أكبر عن حجم الكبيب عند نظيرتها التى تعيش داخل البحار. ينطبق هذا أيضا على باقى الفقاريات العليا.

هذا ولا تستطيع الفقاريات الدنيا، حتى رتبة الزواحف، انتاج بولا عالى الملوحة (أى أعلى اسموزية) من البلازما فانتاج البول العالى الملوحة hypertonic مرتبط بالكفاءة العالية لآلية التيار المضاد. حيث تصير اسموزية البول أعلى بكثير من أسموزية البلازما وتقتصر هذه الآلية على الثديات والطيور.

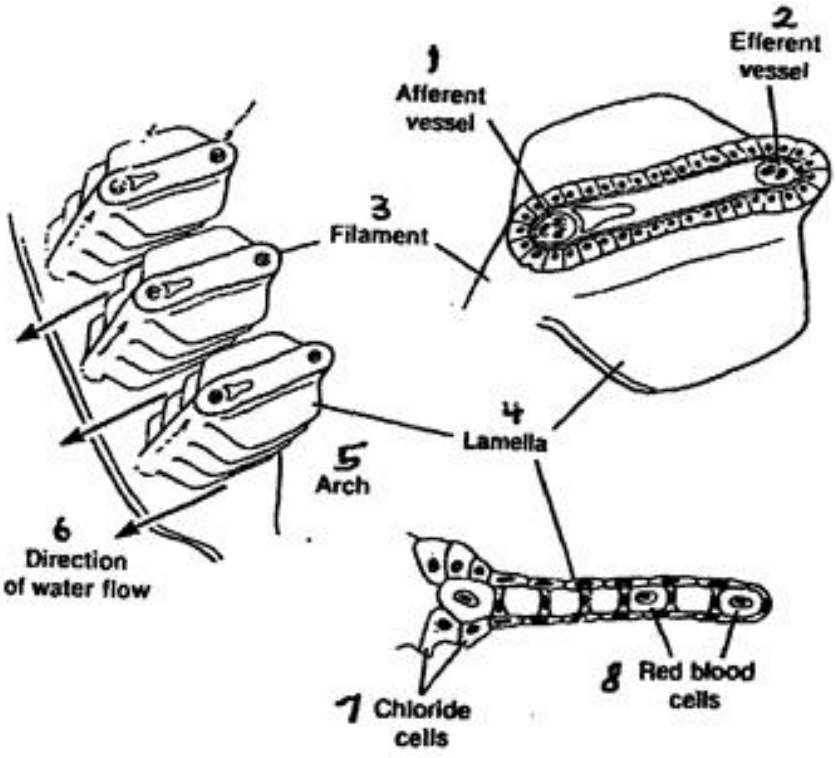
جدير بالذكر أن آلية التيار المضاد توجد أيضا فى الغضروفيات ولكن يختلف النفرون عن نظيره عند الثديات. فبينما يقوم النفرون فى الثديات بأخراج اليوريا والاحتفاظ بالماء لينتج بولا عالى الملوحة hyper يقوم النفرون عند الغضروفيات بالاحتفاظ باليوريا ولا ينتج بولا عالى الملوحة لذلك تبقى وظيفة آلية التيار المضاد عند الغضروفيات غير واضحة.

(2) الخياشيم عند الأسماك :

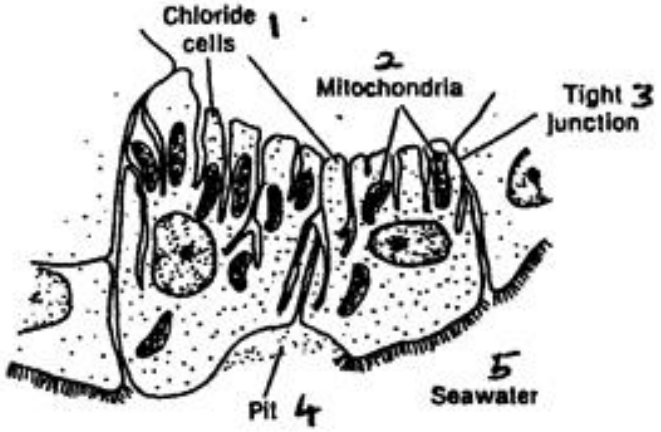
تكون الخياشيم فى العديد من الفقاريات واللافقاريات كذلك نشطة ، ليس فقط فى تبادل غازات التنفس لكن أيضا فى العديد من الوظائف المتنوعة مثل النقل النشط للأيونات، اخراج المواد النيتروجينية الضارة والحفاظ على التوازن الحمضى- قلوى.

هذا وتلعب الخياشيم دوراً هاماً، فى الأسماك العظمية ، فى التحمل الأسموزى. يوضح الشكل (9-6) التشريح الوظيفى للخياشيم. تحتوى الطلائية بالاضافة للخلايا المسطحة التى تحتوى على عدد قليل من الميتوكوندريا، ووظيفتها هى تبادل الغازات، على نوع آخر من الخلايا العمودية له قاعدة عريضة ويعرف بخلايا الكلوريد chloride-cells التى تحتوي علي العديد من الميتوكوندريا (الشكل 9-7)، وعلى انزيمات لها دور فى نقل الأملاح نقلا نشطا. أيضا يوجد بها انزيم glutamic dehydrogenases وغيره من أنزيمات أيض النيتروجين كذلك يوجد انزيم carbonic anhydrase وله دور فى التوازن

الحمضى-قلوى. كذلك تقوم خلايا الكلوريد بنقل الأيونات التالية H^+, Na^+, K^+, NH_4^+ و HCO_3^- . فى الأسماك التى تهاجر بين المياه العذبة والمياه المالحة ينعكس الاتجاه الذى يتم إليه نقل الملح تماشيا مع البيئة، فينقل إلى الخارج فى البيئة المالحة وإلى لداخل فى المياه العذبة. وهو تكيف يحدث تدريجيا ويمكن توضيحه تجريبيا في المعمل. حينما تقلل ملوحة المياه تحدث تغيرات فى خلايا الكلوريد منها اختفاء الـ pits .



الشكل 6-9 الغياشيم عند الاسماك العظمية، عضو للتنظيم الاسموزى
(1) وعاء وارد (2) وعاء صادر (3) خيط (4) صفيحة
(5) قوس (6) اتجاه الماء (7) خلايا كلوريد (8) خلايا الدم الحمراء



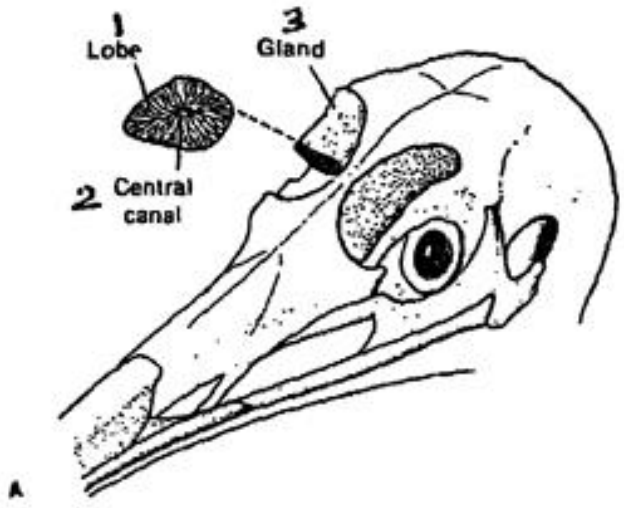
الشكل 7-9 خلايا الكلوريد وتحيط بها خلايا طلائية التنفس
(1) خلايا الكلوريد (2) ميتوكوندريا (3) نقاط وصل محكم (4) حفرة (5) ماء البحر

وعند التعرض إلى درجة ملوحة مرتفعة تظهر التغيرات التالية ، (1) ظهور الـ pits، (2) ازدياد عـــدد خـــلايا الكلوريد، (3) ازدياد نشـــاط الانزيم Na+-K+-ATpase وكـذلك ازدياد نشـاط الانزيم carbonic anhydrase و (4) ازدياد المساحة البينية للخلية بازدياد عدد الثنيات . يتم تحفيز هذه التغيرات عن طريق الهرمونات ومن بينها cortisol الذى يصاحب الانتقال للمياه المالحة و prolactin الذى يفرز كاستجابة للانتقال للمياه العذبة . هذا ويبدأ اسماك السلمون في افراز الملح للخارج بعد يوم واحد من نقله إلى الماء المالح.

(3) غدد الملح عند الزواحف والطيور:

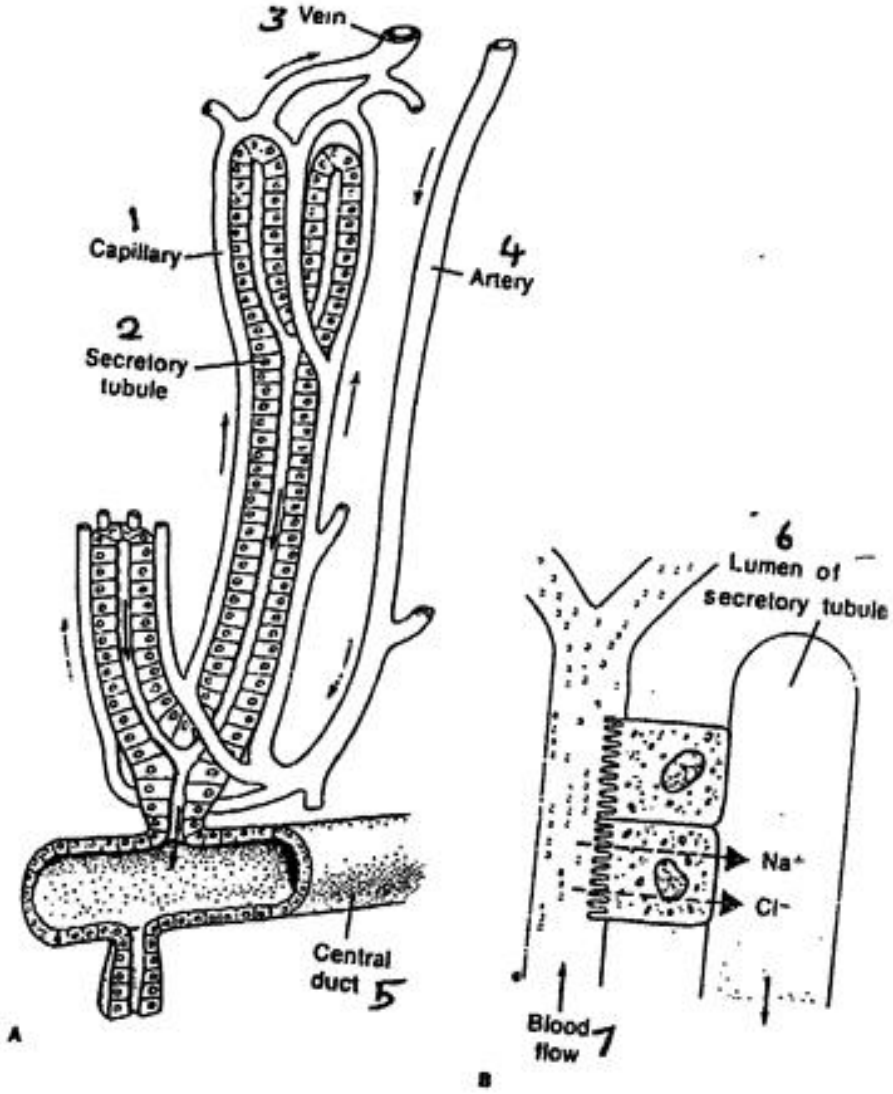
تم اكتشاف غدد الملح salt glands وتفرز محلولا مركز من NaCl بواسطة Knut Shmidt-Nielson أثناء دراسته لطيور البحر التى تعيش على الماء المالح. وهى موجودة فى كل طيور البحر، فى الاغوانة iguana البحرية ، ثعابين البحر، سلاحف البحر وفى العديد من الزواحف التى تعيش على اليابسة وكذلك فى النعام. للتماسيح غدد شبيهه، عند اللسان، تفرز الملح.

توجد غدد الملح عند الطيور في تجويف ضحل على الجمجمة فوق العينين (الشكل 8-9).



الشكل 8 -9 غدد الملح عند الطيور تقع فوق مجرى معين
وتفرغ محتوياتها الافرازية عبر قنوات فى مجرى الأنف
(1) معى (2) قناة مركزية (3) غدة الملح

وهى تتكون من العديد من الفصوص ، حوالى 1mm فى القطر، تفرز الفصوص محتواها عبر انابيب افرازية دقيقة تؤدى إلى قناة مركزية (الشكل 9-9) . تجرى القناة المركزية عبر المنقار لتفريغ افرازها عند فتحتى الأنف. هذا وتكون الخليا الطلائية لغدة الملح مرتبطة بروابط وصل محكم تمنع تسرب المياه من ناحية إلى أخرى عبر الطلائية ولا تشمل عملية تكوين السائل داخل غدد الملح على آلية ترشيح كما هو الحال بالنسبة للنفرون وهنالك دلائل تشير إلى أن افراز الملح يتم كنتيجة للنقل النشط. هذا وتوجد آلية تيار مضاد لتركيز الملح (الشكل 9-9).



الشكل9-9 التشريح الوظيفى لغدة الملح عند الطيور يحتوى الفص على آلاف من الأنابيب المتفرعة من قناة الملح وهى تعمل وفق آلية التيار المضاد لتركيز الملح

(1) شعيرات (2) أنابيب افرازية (3) وريد (4) شريان

(5) قناة مركزية (6) تجويف الأنبوب (7) مسار الدم

يتم التحكم فى افراز الغدة للملح بواسطة الجهاز السمبتاوى وكذلك عن طريق هرمونات من خلايا عصب افرازية، توجد داخل تحت المهاد وتشبه هذه

الهرمونات ADH ويتم افرازها كاستجابة لارتفاع اسموزية البلازما فتفرز الغدد سائلا أكثر تركيزا.

5-9 أعضاء التنظيم الأسموزى عند اللافقاريات

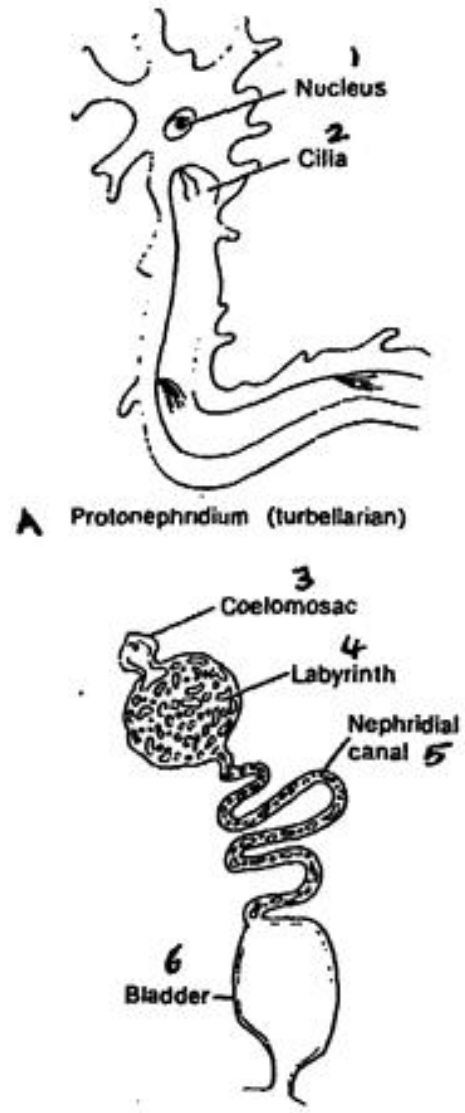
تظهر اللافقاريات درجة أكبر من التنوع وقد طورت مختلف اعضاء التنظيم الأسموزى (الشكل 10-9) عموما توظف هذه الأعضاء الآليات المختلفة التى سبق ذكرها من الترشيح، الامتصاص والافراز لتنتج بولا يختلف فى تكوينه واسموزيته عن سوائل الجسم.

تعتبر الحشرات والعناكب اللافقاريات الوحيدة التى تنتج بولا مركزا. يعتقد أنه يتم امتصاص الماء نشطاً من البول والفضلات فى المعى الخلفى لبعض الحشرات ولا توجد مثل هذه الآلية عند الفقاريات التى تعتمد على انسياب الماء اسموزيا.

(1) أعضاء الترشيح واعادة الامتصاص

توجد آلية الترشيح، كما فى محفظة بومان عند الفقاريات، فى كل من الحلزونات والقشريات. يتم فى العديد من الحلزونات الترشيح عبر جدار القلب إلى داخل التجويف التامورى pericardial. وينقل السائل الرشح إلى «الكلية» بواسطة قناة خاصة حيث يعاد امتصاص الجلوكوز، الأحماض الأمينية والأيونات الضرورية داخل الكلية. العضو الأسلسى للتنظيم الأسموزى بالنسبة للإربيان / جراد البحر crayfish هو الغدة القرنية antennal gl. (الشكل 10-9).

حيث يتم الترشيح داخل تجويف coelomosac وهو شبيه بالكبيب عند الفقاريات، بينما يتم افراز بعض المواد واعادة امتصاص البعض الآخر حسب متطلبات الحيوان الفزيولوجية فيخرج البول مختلفا عن السائل الذى تم ترشيحه مبدئيا.



الشكل 10-9 نفرون بدائى الديدان المفلطحة

B غدة «قرون الاستشعار cray fish يمثلان عضوى اخراج عند الحيوانات اللافقارية

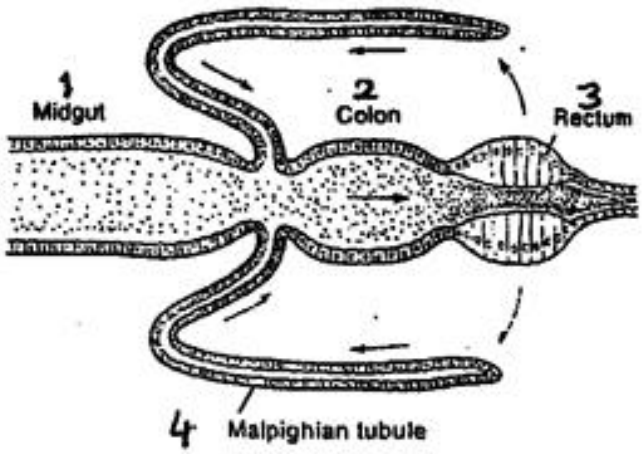
(1) نواة (2) هداب (3) كيس تجويفى (4) التيه (5) قناة النفرون (6) كيس

إن هذه الآلية ، ترشيح كل المواد ذات الوزن الجزئى الصغير الموجودة فى البلازما ثم إعادة امتصاص المواد المرغوب فيها مثل الجلوكوز، تسمح بتفادى الحاجة لوجود آلية للنقل النشط للمواد السامة الناتجة عن الأيض أو التى

يتعرض لها الحيوان فى بيئته. عيب هذه الآلية يكمن فى تكلفتها العالية من الطاقة اللازمة لاعادة امتصاص المواد المذابة المرغوب فيها.

(2) أعضاء الافراز الخاصة بالتنظيم الأسموزى

تمثل قنوات مالبيجان الدقيقة، والمعى الخلفى، عند الحشرات، الأعضاء الرئيسية التى تقوم بعمليتى الاخراج والتنظيم الأسموزى. (الشكل 11-9). يتكون هذا الجهاز من أنابيب طويلة رفيعة تفتح فى القناة الهضمية عند نقطة الاتصال بين المعي الأوسط والمعى الخلفى . هذا وتقع الأطراف المغلقة للأنابيب داخل تجويف الجسم.



الشكل 11-9 جهاز الاخراج عند الحشرات
(1) المعى الأوسط (2) القولون (3)المستقيم (4) انبوب مالبيجيان

يمر السائل الذى يتم افرازه داخل الأنابيب إى المعى الخلفى حيث يتم ازالة الماء ويخرج كبول مركز من خلال فتحة الشرج. مع نشوء جهاز الشعب الهوائية التنفسية عند الحشرات (راجع الفصل 10) تضاءلت الحاجة إلى وجود جهاز دورى قوى. نتيجة لذلك لا تستقبل انابيب مالبيجيان ضغطا عاليا للدم كما يحدث بالنسبة للنفرون، بدلا عن ذلك يحيط بها الدم الذى لا يختلف ضغطه عن ضغط السائل داخل الانبوب.

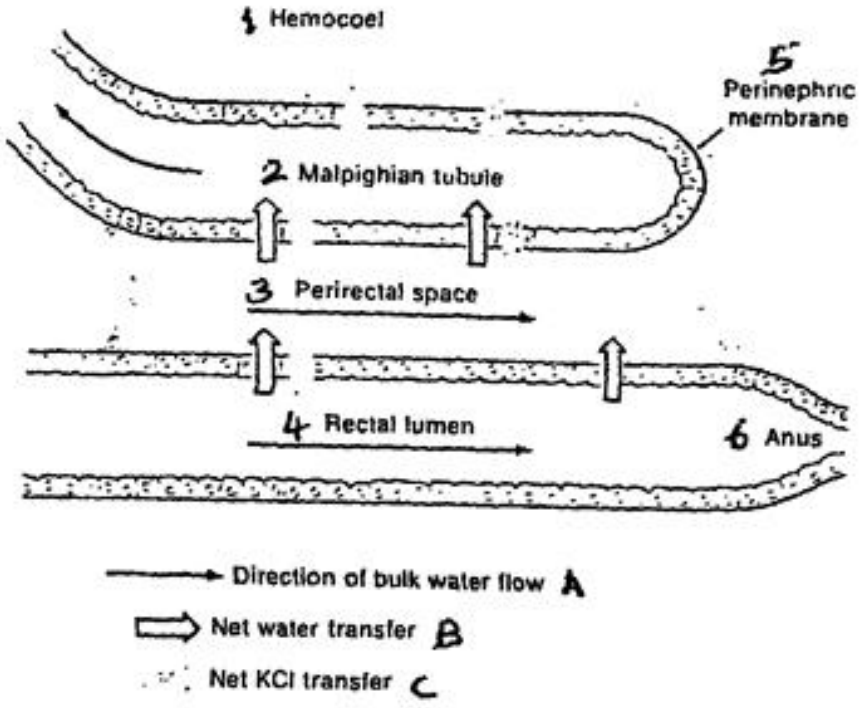
لذلك لا تحدث آلية الترشيح عند الحشرات بل يتم تكوين البول عن طريق الافراز وربما اعادة امتصاص بعض المكونات وهى بذلك شبه بتكوين البول بواسطة الكلية التى لا يوجد بها كبيب للأسماك العظمية التى تعيش داخل البحار. يحمل الجانب التجويفى لطلائية الأنابيب خملات دقيقة وميتوكوندريا (الشكل12-9).

الشكل12-9 خلية افرازية على جدار انبوب مالبيجيان عند الصرصار (1) ناحية البول (2) ناحية الدم

وهى سمات طلائية افرازية عالية النشاط. يتم افراز K^+ ,Na^+ ومخلفات أيض النيتروجين ، مثل حمض اليوريك allantion ، داخل الانابيب.

أن المحرك الأساسى للآلية هو نقل K^+ نقلا نشطا بينما تتبع معظم المواد الأخرى سلبيا. أيضا يتم نقل حمض اليوريك وغيره من مخلفات أيض النيتروجين نقلا نشطا. يتم تحديد مكونات البول فى المعى الخلفى حيث يعاد امتصاص الماء وبعض الأيونات للحفاظ على ثبات تركيز الدم.

هذا وينتقل الماء والأيونات التى تتم ازالتها من البول بواسطة المعى الخلفى إلى تجويف الانابيب بذلك يعاد تداول هذه المواد فى آلية شبيهة بالتيار المضاد (الشكل 13-9).



الشكل 13-9 جهاز امتصاص الماء على جدار المستقيم للخنفساء tenebrio يعاد امتصاص معظم الماء و KCl من المستقيم إلى أنابيب مالبيجيان
A اتجاه نقل الماء B صافي الماء المنقول C صافي KCl
(1) تجويف الجسم (2) انبوب مالبيجيان (3) مساحة خارج المستقيم
(4) تجويف المستقيم (5) غشاء محيط (6) فتحة الشرج

9-6 التنظيم الاسموزى داخل الماء:

تختلف ملوحة الماء بين البيئات المائية المختلفة وهى تتراوح ببضع ميللى أوزمولات فى اللتر الواحد فى حالة مياه البحيرات العذبة إلى 1000m osm/l فى حالة مياه البحار وربما أكثر فى حالة البحار المقفولة. عموما تختلف سوائل الجسم عن النهايات القصوى لاسموزية البيئة المحيطة يطلق على بعض الحيوانات المائية لفظ euryhaline وهى تستطيع تحمل مجال واسع من الملوحة، بينما يطلق على البعض الآخر stenohaline وهى تعيش ضمن مجال اسموزى ضيق.

سنتناول فيما يلى الطريقة التى تستطيع بواسطتها الحيوانات المائية التكيف مع المشاكل الأسموزية.

(1) حيوانات المياه العذبة

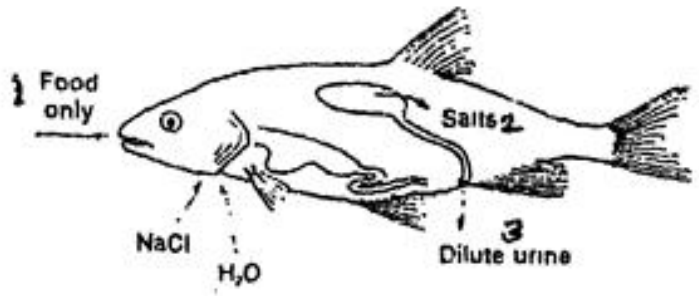
لسوائل جسم حيوانات المياه العذبة ، بما فيها اللافقاريات، الاسماك ، البرمائيات، الزواحف والثديات، عموما أسموزية أعلى من الماء المحيط (الجدول 2-9)، حيث تتراوح بين 200 إلى 300mosm/l بينما تصل اسموزية الماء 50mosm/l . نسبة لدرجة الأسموزية العالية hyperosmotic ، لحيوانات المياه العذبة، فهى مواجهة بنوعين من المشاكل فيما يخص التنظيم الأسموزى ، (1) معرضه للانتفاخ نتيجة لتحرك الماء إلى داخل الجسم مع انحدار ميل التركيز و (2) لأن البيئة المحيطة تحتوى على كمية منخفضة من الملح فهى مواجهة بفقدان الملح من الجسم إلى البيئة المحيطة باستمرار. لذلك على حيوانات المياه العذبة أن تمنع صافى دخول الماء للجسم وصافى نقصان الملح يتم ذلك بطرق عديدة :

(1) انتاج بولا مخففا (2) اعادة امتصاص الأملاح الضرورية من البول.

(3) النقل النشط للأملاح من البيئة المحيطة ، عبر طلائية الأمعاء، الخياشيم أو الجلد، إلى داخل الجسم.

هذا ونجد أن الخياشيم عند الأسماك، وكثير من الفقاريات المائية ، هى عضو التنظيم الأسموزى الرئيسى فى الجسم وتفوق الكلى فى كفاءتها لأداء هذه المهمة. باستطاعة أسماك المياه العذبة امتصاص Na و Cl بواسطة الخياشيم (الشكل14-9) من مياه تحتوى على 1mM/l من NaCl حينما يفوق تركيز NaCl فى البلازما 100mM/l . ايضا لحيوانات المياه العذبة، الأسماك الزواحف، الطيور والثديات، جلد ذو نفاذية منخفضة جداً للماء والأملاح.

هذا ولا تقوم الحيوانات التى تعيش داخل المياه العذبة ، عموما بشرب المياه (بخلاف الزواحف والطيور والثديات) بذلك تقل الحاجة إلى اخراج الماء الزائد.



الشكل 14-9 تبادل الماء والملح عند أسماك المياه العذبة
(1) تتناول الطعام فقط (2) يتم امتصاص الأملاح (3) تخرج بولاً مخففا

(2) حيوانات المياه المالحة :

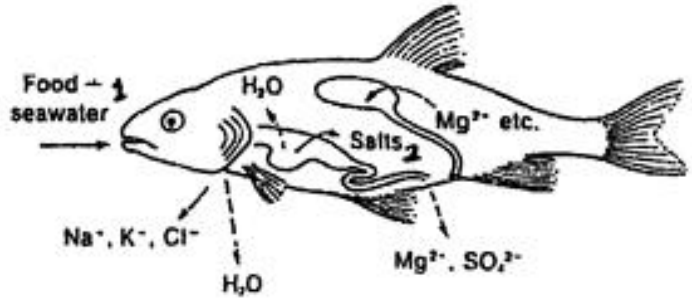
عموما تكون لسوائل الجسم عند اللافقاريات البحرية وكذلك الزقى (حيوان مائى) asciclians أو الحبليات البدائية، اسموزية شبيهة بماء البحر. كما أن الأملاح المعدنية فى سوائل الجسم شبيهة أيضا بماء البحر فى تكوينها (الجدول 2-9) لذلك لا تحتاج هذه الحيوانات للتنظيم الأسموزى. حالة نادرة بين الفقاريات الـisoosirot التى لها أسموزية مشابهة لماء البحر الـhagfish.

لكنها تختلف عن اللافقاريات بأنها تقوم بتنظيم تركيز الأيونات المختلفة . حيث يكون Ca^{2+}، Mg^{2+}، SO_4^- أقل و Na^+ ، Cl^- أعلى تركيزاً من ماء البحر. تنوع هنا إلى أن تنظيم تركيز أيونى Mg^{2+}, Ca^{2+} داخل سوائل الجسم هام جدا للوظيفة العصب – عضلية لدى الفقاريات.

كما نجحت الاسماك الغضروفية فى التعايش مع ماء البحر إلا أن منشأة هو الاحتفاظ باليوريا بينما يتم اخراج الملح الزائد بواسطة الكلية وكذلك بواسطة غدد المستقيم rectal glands وهى موجودة عند مؤخرة القناة الهضمية.

سوائل الجسم عند الاسماك العظمية البحرية تكون أقل ملوحة من ماء البحر لذلك فهى تفقد الماء. لتعويض ذلك تقوم بشرب ماء البحر (الشكل 15-9).

يتم افراز الملح الزائد ، المأخوذ مع الماء، بواسطة طلائية الخياشيم وتشمل الأيونات Cl^-, Na^+, K+ وتقوم الكلية بافراز Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-} ويتم امتصاصها إلى درجة أقل بواسطة طلائية الأمعاء، هذا ويكون البول شبيه مع البلازما لكنه غنى بالأيونات التى تفرزها الكلية . أيضا تفرز الطيور والزواحف البحرية بولا أقل ملوحة من ماء البحر لكن تقوم بافراز الملح الزائد بواسطة غدد الملح التى ذكرناها سابقا



B Marine teleost

الشكل 15-9 تبادل الماء والملح عند أسماك البحار (1) تناول الطعام وماء البحر
(2) يتم امتصاص الأملاح لكن تقوم باخراج الاملاح مع الفضلات وعبر الخياشيم

لا تمتلك ثديات البحر وهي الفقمة seals واسد البحر sealiom وال cetaceans وهي الحيتان والميلة البحر prboises اعضاء لافراز الملح الزائد كغدد الملح عند الطيور والزواحف أو الخياشيم عند الأسماك، لكنها تمتلك، كباقى الثديات كلية ذات درجة عالية من الكفاءة تقوم بافراز بولا عالى الملوحة hypertonic . بالرغم من ذلك لا تقوم ثديات البحر بشرب الماء المالح لكنها تبتلع القدر الموجود داخل الطعام. مصدر آخر للماء بالنسبة لثديات البحر، كما فى بعض ثديات الصحراء هو الماء الأيضى (الجدول 9-3).

أما الإنسان وباقى الثديات فهى غير مهيأة لشرب ماء البحر. تستطيع الكلية عند الإنسان التخلص من 6 g من +Na من الدم فى كل ليتر من البول. يحتوى ماء البحر على 12g/l من NaCl لذلك يعرض الإنسان جسمه للجفاف إذا شرب ماء البحر.

9-7 التنظيم الأسموزى على اليابسة

ما لم يكن الجو رطبا فإن الحيوانات التى لها طلائية جلدية منفذة للماء تكون عرضة للجفاف. تقل هذه الظاهرة إذا كانت الطلائية غير منفذة الماء. ولكن يصبح ذلك محدود إلى درجة ما حين يراد من السطح أن يقوم بتبادل غازات التنفس CO_2, O_2. لذلك نجد الحيوانات التى تتنفس الهواء عرضة للجفاف عبر طلائية التنفس ولقد تطورت العديد من الطرق لمجابهة هذه الظاهرة.

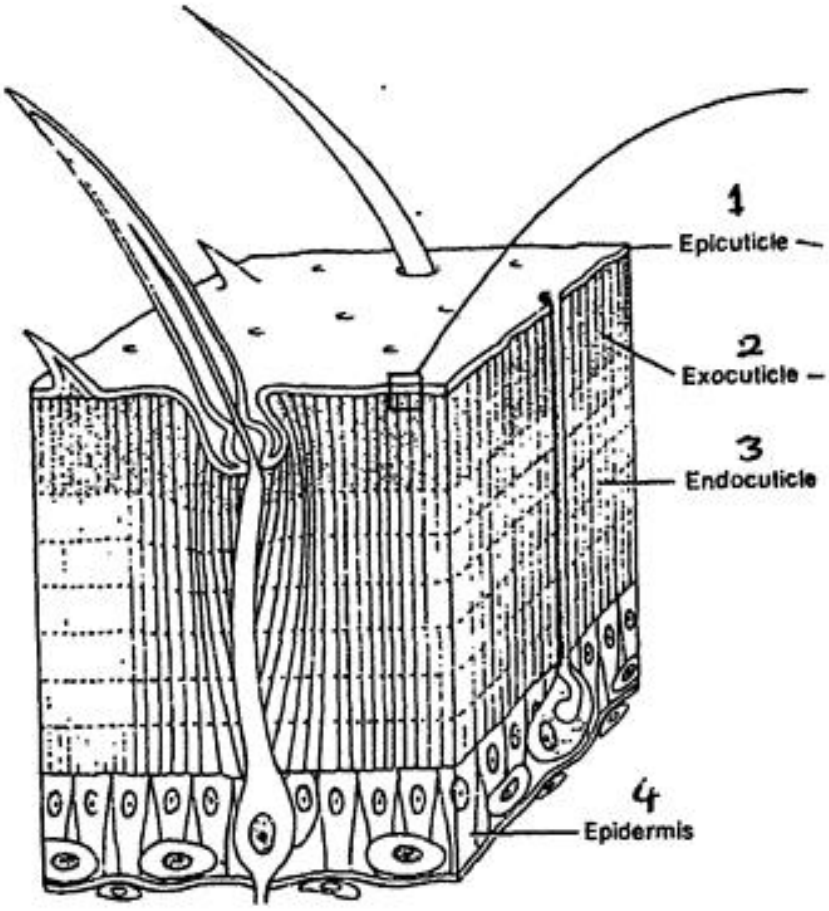
• تحرك الماء عبر الجلد

تكون طبقة الجلد فى معظم الحيوانات التى تعيش على اليابسة غير منفذة للماء. ويتم فقدان القليل من الماء عبر الجلد. مثلا نجد لدى الحشرات طبقة شمعية cuticle. تمنع تبخر الماء (الجدول 9-4) ، الشكل (9-16).

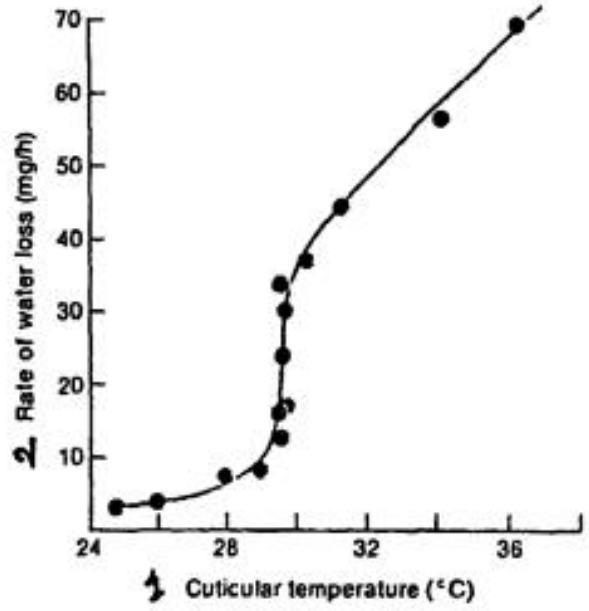
يتم توضيح أهمية الطبقة الشمعية لحماية الحيوان من الجفاف عن طريق قياس معدل فقدان الماء عند درجات الحرارة المختلفة (الشكل 9-17) حيث نلاحظ ارتفاع مفاجئ فى معدل فقدان الماء يزامن درجة انصهار الشمع.

تتراوح نفاذية الجلد للماء عند الفقاريات بدرجة كبيرة (الجدول 9-4). للزواحف ، بعض برمائيات الصحراء، الطيور والعديد من الثديات جلدا غير منفذ للماء نسبيا. لكن تواجه البرمائيات والثديات التى تثبت الحرارة عن طريق تبخر الماء بامكانية اصابتها بالجفاف عند درجات الرطوبة الأقل.

تبقى البرمائيات بالقرب من الماء. أما بالنسبة للضفادع التى تخاطر بالابتعاد عن الماء أو تلك التى تمضى فترة سكون أثناء موسم الجفاف، فلها كيس بول كبير نسبيا تقوم بتخزين الماء فيه لمقابلة احتياجها منه. هذا وتحتوى الطبقة الخارجية الضفدع قنوات صغيرة تقوم بسحب الماء بواسطتها عن طريق الخاصي الشعيرية لترطيب الجلد فتحفظ بذلك الماء الخارجى من التبخر.



الشكل16-9 الشكل العام لجلد الحشرات تعمى الطبقة الشمعية الخارجية المشرة من الجفاف
(1) الجلد السطحى (2) الجلد الخارجى (3) الجلد الداخلى (4) الطلائية



الشكل17-9تاثير (1) درجة حرارة الجلد على (2) معدل فقدان الماء من الصرصار
عند درجة 30°C تحدث قفزة فى معدل فقدان الماء وهى تعادل درجة ذوبان الشمع

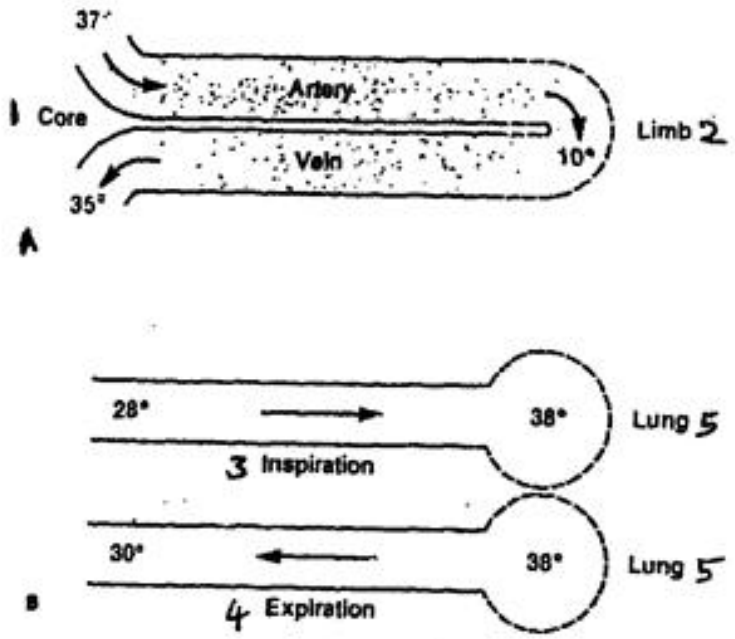
الجدول 4-9 فقدان الماء عن طريق التبخر لبعض الحيوانات

عند ظروف مناخية صحراوية

النوع	فقدان الماء $mg/cm^2/h$	الظـــروف	
		درجة الحرارة	درجة الرطوبة
المفصليات	0.2	30°C	0%
البرمائيات	4.90	25°C	100%
الزواحف	0.22	30°C	جاف
الطيور	1.48	30°C	
الثدييات	3.24	22°C	

• فقدان الماء اثناء تنفس الهواء

كما ذكرنا أعلاه فإن أسطح التنفس، وكنتيجة لجوهر وظيفتها تمثل معبرا رئيسيا يتم عن طريقه فقدان الماء من الجسم. وقد قللت الحيوانات من تبخر الماء بوجود أسطح التنفس (الرئتين) داخل تجويف ولكن حتي داخل القفص الصدرى، يتسبب تهوية الرئة بواسطة الهواء الجاف فى تبخر الماء من الأسطح الطلائية الرطبة . يزيد من هذا التبخر فى الطيور والثديات ارتفاع درجة حرارة الجسم عن درجة حرارة الهواء. ينطبق نفس الشئ على الطيور والزواحف التى ترفع درجة حرارة جسمها بطرق سلوكية. درجة تشبع الهواء الساخن تفوق درجة تشبع الهواء البارد لذلك يحتوى هواء الزفير الساخن على جزئيات ماء أكثر من هواء الشهيق وقد أمكن التغلب علي هذه الظاهرة فى عدد من الفقاريات التى تعيش فى الصحارى عن طريق الية تيار مضاد داخل الممرات الأنفية (الشكل 18-9). تعمل كالآتى :



الشكل 18-9 آلية التيار المضاد A للحفاظ على درجة حرارة الدم الذى يغذى الأطراف عند الثديات والطيور التى تقطن المناطق الباردة B للحفاظ على درجة حرارة الجسم والماء عند العديد من الحيوانات الفقارية (1) داخل الجسم (2) الاطراف (3) هواء الشهيق (4) هواء الزفير (5) الرئة

يتم تزويد هواء الشهيق ببخار الماء أثناء مروره على طلائية الأنف، ثم يزداد تشبعه بالماء وتسخينه داخل حجيرات الرئة. ثم يتم تبريد الهواء الزفير اثناء خروجه بواسطة طلائية الأنف فيفقد بذلك الكثير من الماء (عن طريق تكثيفه). ويساعد هذا الماء المتكثف فى ترطيب الهواء الداخل اثناء الشهيق. وهكذا تتكرر الدورة، عن طريق اعادة تكثيف بخار الماء داخل جهاز التنفس . عادة تكون للثديات التى تستخدم هذه الآلية أنوفاً باردة نسبيا.

أكبر طريق لفقدان الماء عند الحشرات التى تعيش على اليابسة هو فقدان الماء عن طريق جهاز الشعب الهوائية. والذى يتكون من شعب دقيقة تخترق الأنسجة وتنتشر بداخلها . ينتشر بخار الماء للخارج طالما بقيت هذه الشعب مفتوحة. لذلك السبب تم تزويد مدخل الشعب بواسطة فوهات spIracles شبيهة

بالصمامات تقفل عن طريق انقباض النسيج العضلى وذلك لتقليل فقدان الماء. هذا وتفتح الفوهات عند ارتخاء العضلات ويحدث ذلك نتيجة لارتفاع CO_2 فى الدم فيتم تبادل الغازات . هذا وقد لوحظ أن مستوى تركيز CO_2 المتطلب لفتح الفوهة التنفسية spiracles يزداد بازدياد اسموزية الدم، أى حينما تزيد الحاجة للحفاظ على الماء .

- **امتصاص الماء من الهواء:**

لبعض المفصليات التى تعيش على اليابسة مقدرة على امتصاص بخار الماء من الهواء، وفي بعض الأنواع ، حتى عندما تقل نسبة الرطوبة عن 50 بالمئة (الجدول 5-9).

الجدول 5-9 درجة الرطوبة الحرجة لبعض المفصليات
التى تستخلص الماء من البخار الموجود فى الهواء

	درجة الرطوبة ٪
العنكبوتيات (1)	92.0
(2)	84.0-90.0
الحشرات (1)	45.0
(2)	88.0

توجد هذه الظاهرة فى بعض العنكبوتيات arachnids مثل القراد ticks والعث mites والتى تعيش فى بيئة ينعدم فيها وجود الماء الحر. فى الحشرات يتم امتصاص الماء من الهواء عن طريق المستقيم بينما يتم عن طريق الفم فى القراد.

• فقدان الماء أثناء الأخراج وتنظيم الأيونات

تفقد حيوانات اليابسة الماء «قهريا» للتخلص من مخلفات أيض النيتروجين (سنتعرض له لاحقا فى هذا الفصل).

وكذلك لتنظيم الأيونات داخل البلازما. وقد ظهرت العديد من التكيفات الفزيولوجية لتقلل فقدان الماء المصاحب . نجد بين اللافقاريات التى تعيش على اليابسة أن الحشرات أكثر كفاءة فى اقتصاد فقدان الماء المصاحب للاخراج أو التنظيم الأسموزى. يوضح الجدول (6-9) نتائج احدى التجارب التى تم من خلالها تعريض الجراد لشرب ماء نقى أو محلول ملح مركز 450 mosm/l يحتوى على KCl, NaCl. فبينما بقى تركيز الدم ثابتا (اختلف بحوالى 0.5 mosm/l فقط) ارتفع تركيز الملح فى البراز مئات الأضعاف بعد شرب الملح. تمثل الكلية ، فى معظم الفقاريات التى تعيش على اليابسة العضو الرئيسى لعمليتى إخراج المواد النيتروجينية والتنظيم الأسموزى، خاصة فى الثديات التى لا تمتلك أى طريقة أخرى للتخلص من المواد النيتروجينية أو الاملاح الزائدة. وقد أمكن ذلك نتيجة لكفاءة التيار المضاد وحلقة هنلى الليتن بلغتا أقصي كفاءة لها فى ثديات الصحراء حيث تنتج بعض أنواع الفئران بولا عالى التركيز تصل اسموزيته 9000 mosm/l

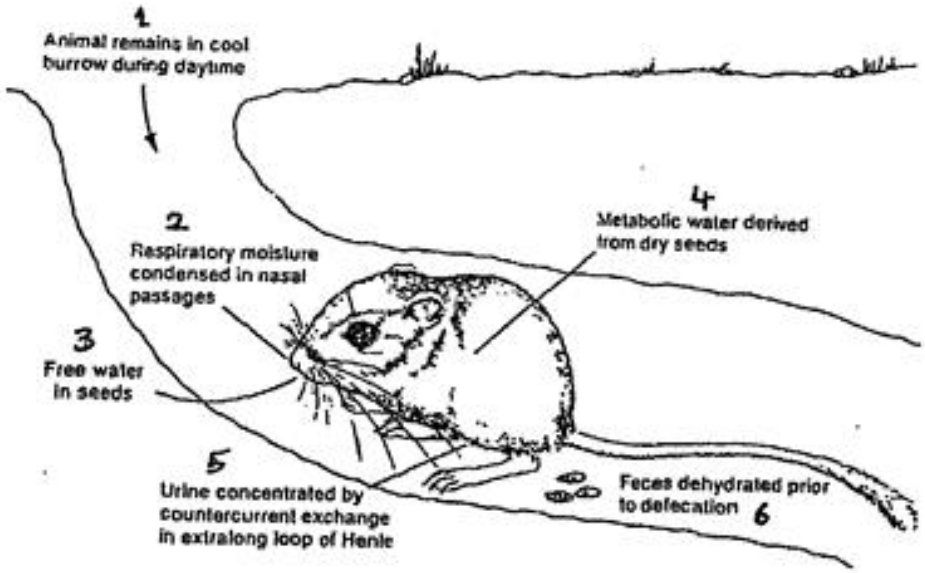
الجدول 6-9 تنظيم الأيونات عند الجراد

السائل	التركيز meq/l		
	Na	K	Cl
ماء الملح	300	150	450
الدم عند شرب الماء	108	11	15
الدم عند شرب ماء الملح	158	19	163
السائل داخل المستقيم			
(1) عند شرب الماء	1	22	5
(2) عند شرب ماء الملح	405	241	569

9-8 مثال كلاسيكي:

تخصص متكامل للحياة فى الصحراء لقد صار أحد الفئران Dipodomys morriami وهو يستوطن جنوب غرب أمريكا، مثالاً كلاسيكيا لكيفية حياة الثديات الصغيرة فى الصحراء .

يوضح الشكل (19-9) الاستراتيجيات المختلفة التى يستطيع بواسطتها، هذا الحيوان الصغير ، العيش فى الصحراء من دون شرب الماء الذى تفتقر له البيئة الصحراوية. يواجه D.M ، مثل بقية حيوانات الصحراء، ارتفاع شديد فى درجة الحرارة ونقص أو انعدام الماء. وإذا أخذنا فى الاعتبار الصلة الوثيقة بين تنظيم الماء وتنظيم درجة حرارة الجسم، إذ أن احدى طرق التخلص من الحرارة الزائدة هو عن طريق تبخير الماء، ندرك ما لاستراتيجيات الحفاظ على الماء مع تفادى ارتفاع درجة حرارة الجسم من أهمية قصوى.



الشكل 19-9 الاستراتيجيات التى يتبعها احدى الثديات الصغيرة للحفاظ على الماء
(1) يبقى الحيوان داخل الجحر البارد اثناء حر النهار (2) يتم تكثيف الماء المحمول فى هواء الزفير داخل الممرات الأنفية. (3) الماء الحر داخل الحبوب (4) ماء الأيض من اكسدة الحبوب الجافة (5) يتم تركيز البول عن طريق آلية التيار المضاد (6) يتم تجفيف الفضلات قبل اخراجها.

ولأن التبريد عن طريق تبخير الماء يتعارض مع شح المياه فقد تغلبت حيوانات الصحراء على ذلك بعدة طرق سلوكية وفزيولوجية. ففى D.M مثل معظم حيوانات الصحراء الصغيرة ، يتجنب الحيوان الحرارة العالية أثناء النهار بالتواجد داخل جحر داخل الأرض، حيث تنخفض درجة الحرارة ، والخروج ليلاً أى تتبنى سلوكا ليليا nocturnal لأداء وظائفها الحيوية مثل التغذية والتزاوج . وهو سلوك منتشر كتكيف للعيش فى الصحراء بذلك يتحاشى الحيوان النشاط الحركي، الذى يولد حرارة، أثناء النهار يقلل الوجود داخل الجحر البارد نسبيا العبء الحرارى على الحيوان ويقلل كذلك من فقدان الماء مع التنفس.

تعتمد آلية التيار المضاد (الشكل 18-9) على كون درجة حرارة البيئة المحيطة (أى داخل الجحر) منخفضة انخفاضا ملحوظا عن درجة حرارة الجسم الداخلية 37°C إلى 40°C .

كذلك يقوم .D.M بانتاج بولا عالى التركيز نسبة لوجود كلية عالية الكفاءة. وفضلات جافة تماما حيث يتم امتصاص الماء عبر المستقيم . هذا وقد مكنت جميع هذه التكيفات البيئية السلوكية والفزيولوجية الفأر من تحقيق توازنا مائيا بحيث يتساوى الماء المتناول مع الماء المخرج.

ولكن من أين لD.M بالماء ليشربه ؟ فهو يتغذى على الحبوب الجافة تماما (ربما احتوت على أثر من الماء) ولا يشرب اطلاقا إذ لا يوجد ماء. لذلك نجد أن هذا الحيوان يعتمد كلية على ماء الأيض، الذى ينتج عن أكسدة جزئيات الطعام داخل الجسم (الجدول 7-9). هذا ولا ينفرد .D.M فى ملائمته للبيئة الصحراوية فهذه الاستراتيجيات شايعة بين العديد من حيوانات الصحراء الصغيرة.

الجدول 7-9 اتزان الماء فى أحد الثديات الصغيرة فى الصحراء

Kangaroo rat

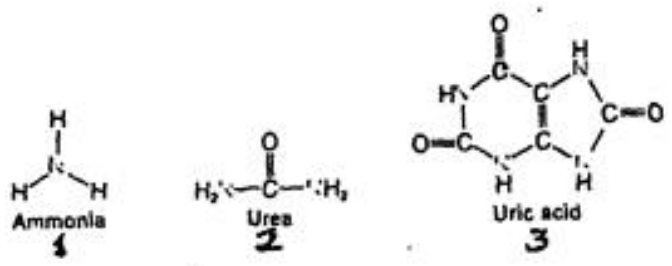
اكتساب الماء		فقدان الماء	
ماء الايض	90%	التبخر +	
ماء فى الطعام	10%	التنفس	70%
الشراب	0%	البول	25%
		البراز	5%
المجموع	100%		100%

9-9 اخراج الفضلات النيتروجينية

عند هدم الأحماض الامينية يتم تحرير المجموعة الأمينية NH_2 وكذلك المجموعة الكاربوكسيلية COOH تختلف المجموعة الأمينية عن المجموعة الكاربوكسيلية التى يمكن اكسدتها لتعطى CO_2 وماء. من الممكن استخدام NH_2 لتصنيع حمض أمينى آخر والا فإنها تصبح سامة. ويتوجب أزالتها حتى لا يرتفع تركيزها فى البلازما. وبما أن الماء يشكل عنصرا هاما لاخراج المواد النيتروجينية ، نجد أن الحيوانات قد طورت طرقا مختلفة للتخلص من هذه المواد وذلك حسب درجة توفر الماء فى بيئتها. هذا ويتم اخراج المواد النيتروجينية فى واحد من الصور التالية، أمونيا ammonia يوريا urea أو حمض يوريك uric acid (الشكل 9-20) تختلف هذه المركبات الكيميائية في درجة سميتها، لذلك كان «الخيار الفزيولوجى» أمام الحيوانات لكى تفرز أحد هذه الأشكال أو الآخر اثناء كل أو جزء من دورة حياتها.

تخرج معظم الأسماك العظمية واللافقاريات المائية المواد النيتروجينية فى شكل أمونيا، ذلك لأنها تستطيع وبسهولة التخلص من هذه المادة السامة جدا والتى لها درجة ذوبان عالية جدا. حيث أن تركيز الأمونيا في الدم إذا وصل 3x

10^{-5} mol/l فقط فإنه يكون مميتا للأرنب. هذا وترجع سمية الامونيا العالية إلى ، (1) ترفع درجة pH فى سوائل الجسم ، (2) تعيق بعض الآليات الحيوية لنقل الأيونات ، (3) تحتاج لكميات كبيرة من الماء لازالتها وغسلها. إذ تحتاج إلى 300 إلى 500ml لكل جرام من النيتروجين . لذلك فهى لا تصلح كناتج نهائى لأيض النيتروجين فى حيوانات اليابسة ، التى لجأت إلى تحويل الأمونيا إلى حمض يوريك أو إلى يوريا.



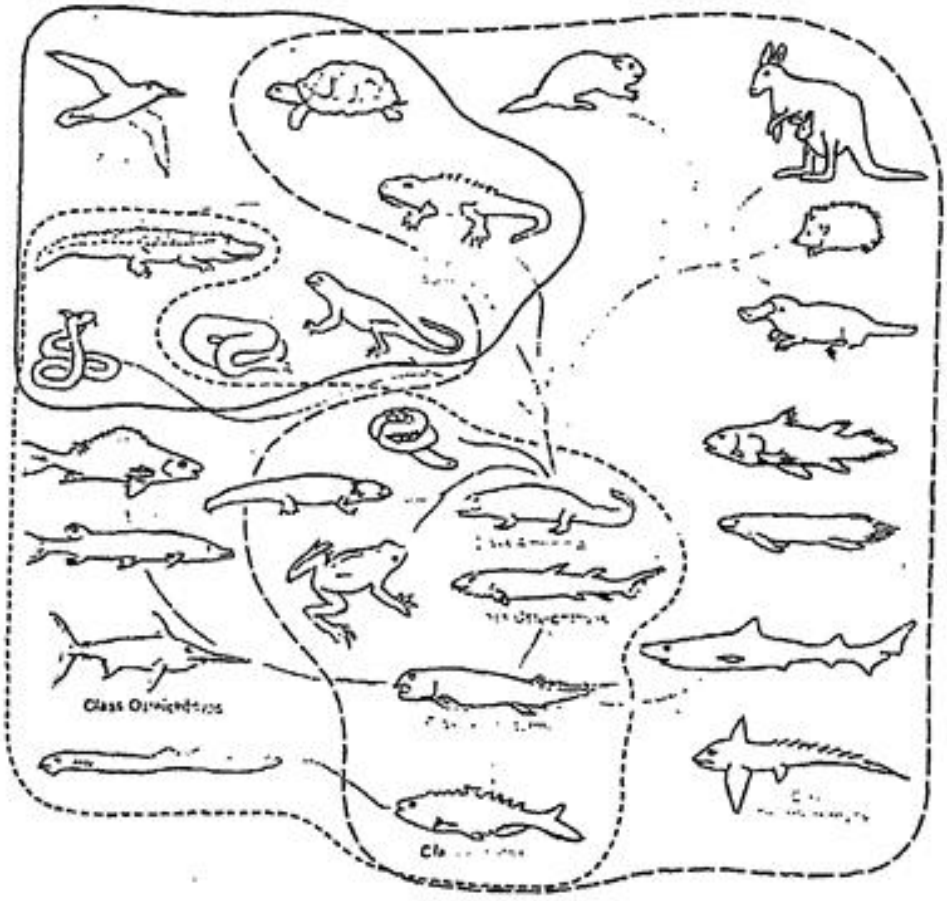
الشكل20-9 التركيب الكيميائى لمواد الاخراج النيتروجينية الثلاث
(1) أمونيا (2) يوريا (3) حمض يوريك

بالرغم من أن اليوريا تذوب بسهولة فى الماء إلا أنها أقل سمية وتحتاج إلى قدر أقل من الماء لغسلها 50ml لكل جرام نيتروجين . هذا ويحتوى جزئ اليوريا على ذرتى نيتروجين.

تخرج الطيور والزواحف ومعظم المفصليات التى تعيش علي اليابسة حمض يوريك أو الـ guanine وله الميزات التالية ، (1) يحمل جزى الحمض 4 ذرات نيتروجين ، (2) لأنه يذوب بدرجة طفيفة فى الماء فإنه يتطلب فقط 10ml لكل جرام نيتروجين لذلك يتم ترسيبه واخراجه فى شكل معجون . تخلف الطيور ما يعرف بالجوانو guano الذى يحتوى على بلورات بيضاء من حمض اليوريك وتشتهر به على الشوائ الشرقية لافريقيا.

ترسب أجنة الطيور حمض يوريك داخل البيضة لذلك لا تؤثر على اسموزيته وهى محدودة بكمية السائل الموجود داخل البيضة.

يوضح الشكل (21-9) العلاقات الـ phylogenetic الخاصة باخراج النيتروجين فى الفقاريات. ونلاحظ فى الشكل بعض التداخلات فى العديد من المجموعات الحيوانية ، وهناك ثلاث فوارق رئيسية:



الشكل 21-9 توضيح العلاقات الـ phylogentic واخراج النيتروجين عند الفقاريات وتشمل كل من المجموعات الثلاث على حيوانات منقرضة. لاحظ التداخل بين المجموعات الثلاث

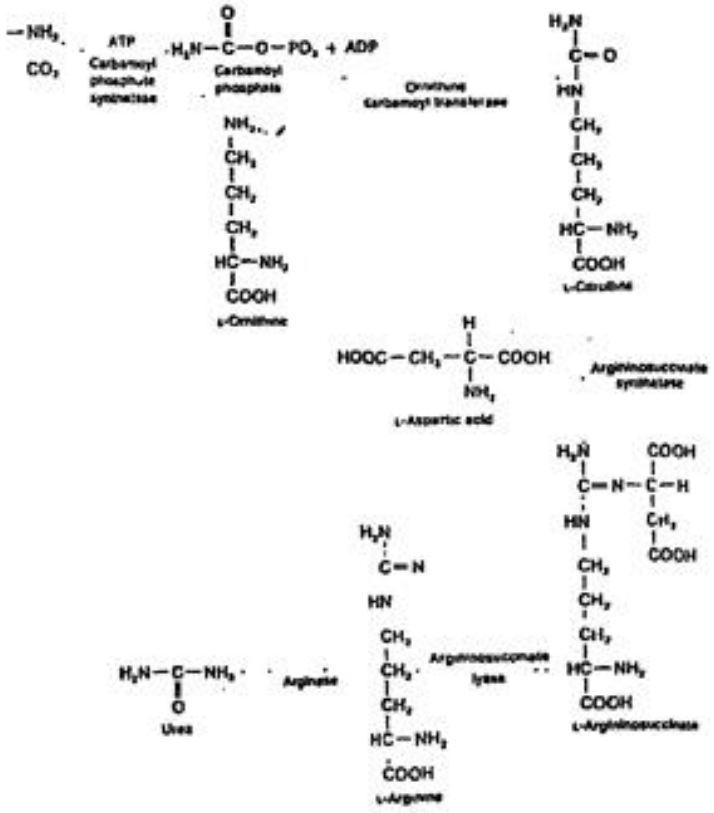
——— تخرج أمونيا - - - - - - - تخرج يوريا ——— تخرج حمض اليوريك

(1) الحيوانات التى تخرج اليوريا ureotelic يتم فى كل الفقاريات، عدا الأسماك العظمية تصنيع اليوريا فى الكبد بواسطة ornithine urea cycle (شكل 22-9) . يتم اضافة جزئى أمينى و CO_2 إلى ornithine ليكون arginine ومن ثم يتم تحرير جزئ اليوريا بواسطة الانزيم arginase الذى يوجد بكميات كبيرة فى هذه الحيوانات. تستخدم الاسماك العظمية والعديد من اللافقاريات مسارا آخر يعرف بالـ uricolytic pathway (الشكل 23-9) حيث يتم انتاج اليوريا من حمض اليوريك الذى ينتج إما عن طريق التبادل trans amination عن طريق aspartate أو أثناء أيض الأحماض النووية. يتم أولا تحويل حمض يوريك إلى allantoine أو allantoic acid بواسطة الانزيم uricase و allantoinase على التوالى . ثم تحرر اليوريا بواسطة allantoicase .

(2) الحيوانات التى تخرج حمض اليوريك uricotelic animals والتى تخرج النيتروجين فى شكل حمض يوريك.

ينشأ N_2 الذى يحتويه حمض يوريك من هدم الأحماض الأمينية glycine ، aspartate ، glutamine (الشكل 23-9). يحتاج حمض اليوريك إلى القليل جدا من الماء لاخراجه ولأنه يترسب فهو لا يضيف على ملوحة tonicity البول أو الفضلات، عامة تكون هذه الحيوانات قد تكيفت للعيش فى بيئات يشح فيها الماء.

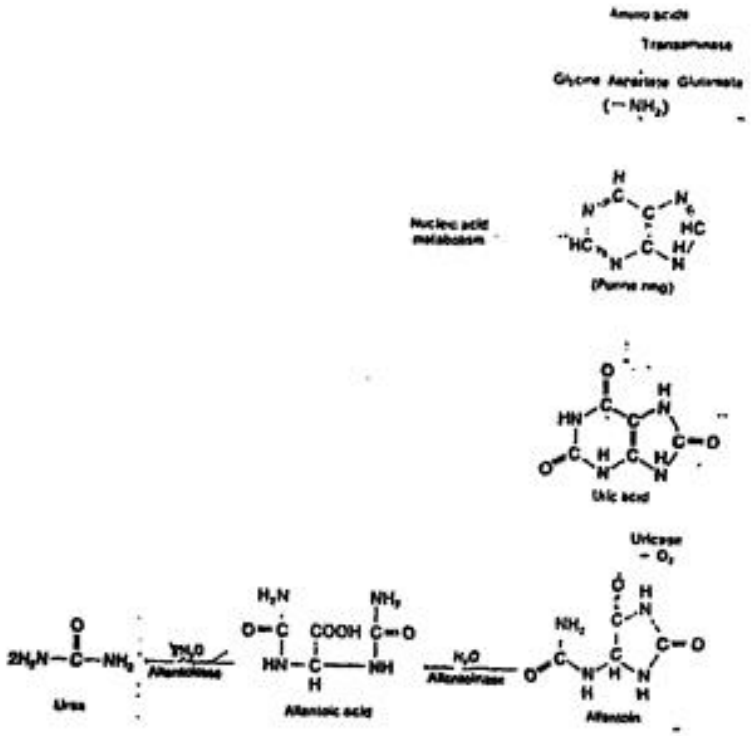
(3) الحيوانات التى تخرج الأمونيا. ammonotelic . تخرج هذه الاحيوانات الأمونيا حيث يتم نقل المجموعة الأمينية للأحماض الأمينية المختلفة بواسطة الأنزيم transaminase إلى glutamate ومن ثم إلى glutamine (الشكل 24-9) . يتم هدم الأخير داخل أنابيب الكلية حيث يتم تحرير الأمونيا. تأخذ الأمونيا NH_3 أيونا H^+ وتتحول إلى أيون الأمونيوم NH^+ ولأن هذا الأيون لا ينفذ بسهولة عبر غشاء الخلية بذلك لا يمكن له أن يرجع مرة أخرى إلى الأنسجة ولذلك يتم اخراجه مع البول.



الشكل 22-9 تكوين اليوريا عبر دورة اورنثين ornithine

لأن درجة سمية الأمونيا NH_3 أو NH_4^+ عالية جدا لذلك تنتقل المجموعة NH_2 داخل الجسم فى شكل glutamine وهو غير سام، إلى أن يتم هدمه بواسطة الكلى.

يتم اخراج الامونيا و H^+ فى الاسماك العظمية ، الموجودة داخل المياه العذبة، عبر طلائة الخياشيم فى تبادل مع Na^+ بذلك تتمكن الطلائية، وفى خطوة واحدة، أن تمتص Na^+ من الماء فتعوض بذلك فاقد الملح وفى ذات الوقت تخلص الحيوان من NH_4^+ وهو عالى السمية وكذلك من H^+ الزائدة.



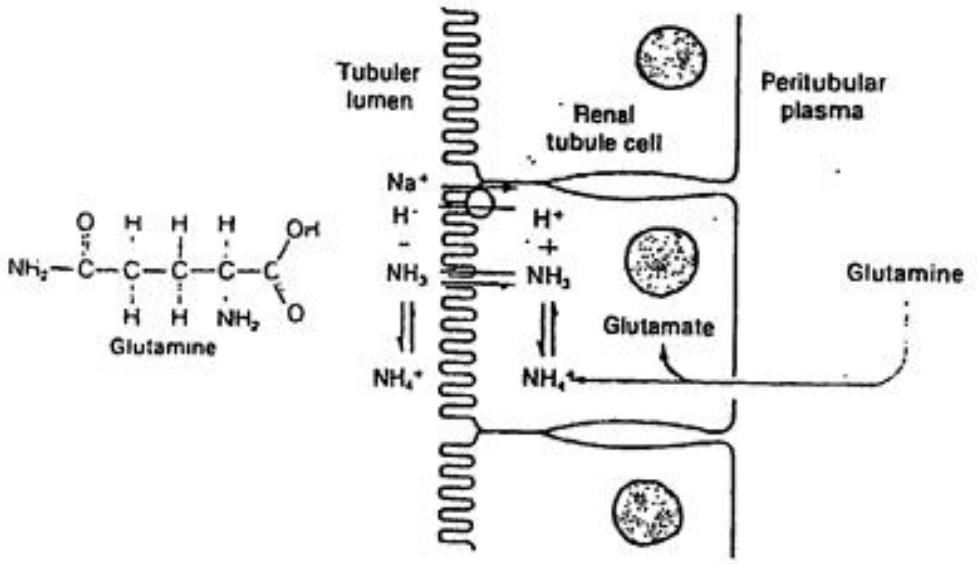
الشكل 23-9 انتاج حمض اليوريك واليوريا عبر مسار يوريكوليتك

يتم افراز NH_4^+ بواسطة الخياشيم، أيضا في الأسماك العظمية البحرية لكن يتم التخلص من Na^+ الزائد بطرق أخرى.

تتم عملية تركيز الفضلات النيتروجينية فى بول الفقاريات عن طريقتين:

(1) الترشيح الكبيبى تم اعادة امتصاص الماء والمواد المرغوب فيها تاركة المواد الضارة كما فى الثديات.

(2) الافراز النشط لبعض المواد داخل الأنابيب عبر الطبقة الطلائية ومن ثم إلى مجرى البول. يتم فى كلية الأسماك العظمية التى تعيش داخل مياه البحر، والتى لها كلية لا يوجد بها كبيب ، التخلص من N_2 عن طريق الافراز فقط.



الشكل 24-9 تكوين الأمونيا. تحمل مجموعة NH_2 داخل الدم فى داخل حمض جلوتامين. داخل طلائية أنابيب الكلية يتم نزع NH_2 من جلوتامين لتعطى NH_3 ينتقل إلى داخل تجويف الأنبوب عن طريق الانتشار حيث تتحد مع H^+ الذى يتم نقله فى تبادل مع Na^+ مكونا NH_4^+

الفصل العاشر

جهاز التنفـــس

الفصل العاشر

جهاز التنفس

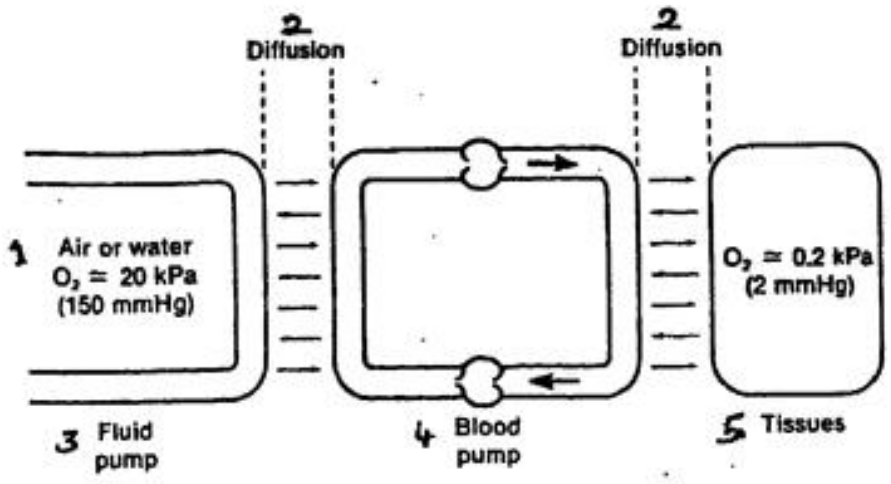
أثناء عملية التنفس الخلوى ، يقوم الحيوان باستهلاك الأكسجين وانتاج ثانى أكسد الكربون. تحدث التفاعلات اللازمة لذلك داخل الميتوكوندريا. يحصل الحيوان علي O_2 من البيئة ثم هو يحرر CO_2. لتستمر عملية التنفس الخلوى يجب أن يكون هنالك امداد دائم لغاز O_2 مع ازالة مستمرة لغاز CO_2. يزيد احتياج الحيوان للأكسجين وانتاجه لثانى أكسيد الكربون كدالة من الوزن، بينما يتناسب معدل نقل الغاز عبر السطح على مساحة السطح (تزيد مساحة سطح الكرة مع مربع القطر بينما يزيد الحجم مع مكعب القطر. فى الحيوانات الصغيرة، نسبة مساحة السطح للحجم كبيرة جدا، لذلك نجد فى هذه الحيوانات مثل الحيوانات وحيدة الخلية والتي يقل قطرها عن 0.5 mm، أن الانتشار وحده يكفى لتبادل غازات التنفس. يزيد ازدياد الحجم من المسافة اللازمة للانتشار ويقلل من نسبة مساحة السطح إلى الحجم. تم التغلب على هذه المشكلة، عند الحيوانات ، بتخصيص مساحة كبيرة لتبادل الغازات. فى بعض الحيوانات، تساهم المساحة الكلية للجسم فى تبادل الغازات ولكن بالنسبة للحيوانات الكبيرة النشطة نجد أن هنالك سطحا مخصصا لتبادل الغازات. يتكون هذا السطح من طبقة من الخلايا الوحيدة، طلائية التنفس، يصل سمكها 0.5 إلى 15 mm. تتراوح مساحة سطح التنفس عند الانسان بين 50، و100 m^2 بينما لا تتعدى مساحة سطح الجسم 2 m^2.

يتم تحريك الوسط الذى يحتوى علي O_2, CO_2 أى الهواء أو الماء، عن طريق تحريك هذا الوسط فى عملية تعرف بالتهوية ventilation. يوجد جهاز دورى فى الحيوانات كبيرة الحجم يساعد علي نقل O_2, CO_2 بين الأنسجة وأسطح التنفس هذا ويمر الدم عبر شبكة واسعة من الشعيرات وينتشر في طبقة

رفيعة جدا تحت طلائية التنفس، مقللاً بذلك من المسافة اللازمة لانتشار غازا التنفس.

ينص قانون غراهام Graham على أن معدل انتشار أى مادة يتناسب عكسيا مع الجزر التربيعى للوزن الجزئ (أو الكثافة) لجزئى O_2, CO_2 نفس الحجم لذلك فهما ينتشران بمعدلات شبيهة فى الهواء. أيضا يتم استهلاك O_2 وانتاج CO_2 بنفس المعدل تقريبا. لذلك من المتوقع أن أى جهاز نقل يحقق تزويد الحيوان بالاكسجين ، أيضا يحقق إزالة CO_2 بالمعدلات المناسبة.

يتم نقل غازات التنفس فى أىّ حيوان على عدة مراحل (الشكل 1-10) وهى:



الشكل 1-10 جهاز تبادل O_2, CO_2 وهو يتكون من مضختين وحاجزى انتشار
(1) الهواء أو الماء (2) الانتشار (3) مضخة للسائل (الماء أو الهواء)
(4) مضخة الدم عبر السطح التنفسى (6) الانسجة.

1- التنفس الخارجى أو التهوية الذى يضمن التزويد المستمر بالهواء أو الماء لاسطح التنفس (مثل الرئة والخياشيم).

2- انتشار O_2, CO_2 عبر طلائية التنفس.

3- نقل O_2, CO_2 بواسطة الدم.

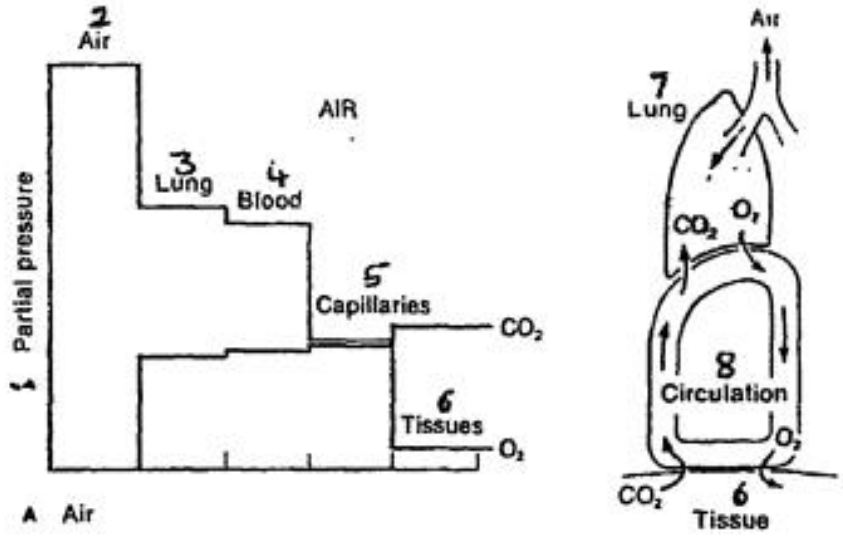
4- انتشار O_2, CO_2 عبر جدر الشعيرات، بين الدم والميتوكوندريا داخل خلايا الأنسجة المختلفة في هذا الفصل، سنقوم بدراسة الأجهزة المخصصة لتبادل O_2, CO_2. هذا وقد تناولنا في الفصل (25) (كتاب علم وظائف الأعضاء العام 1999) انتشار O_2, CO_2 عبر طلائية التنفس (الخطوة 2)، نقل O_2, CO_2 بواسطة سوائل الجسم من وإلى الخلايا (الخطوة 3) وتنظيم عملية التهوية .

10-1 الرئة عند الفقاريات : تنفس الهواء :

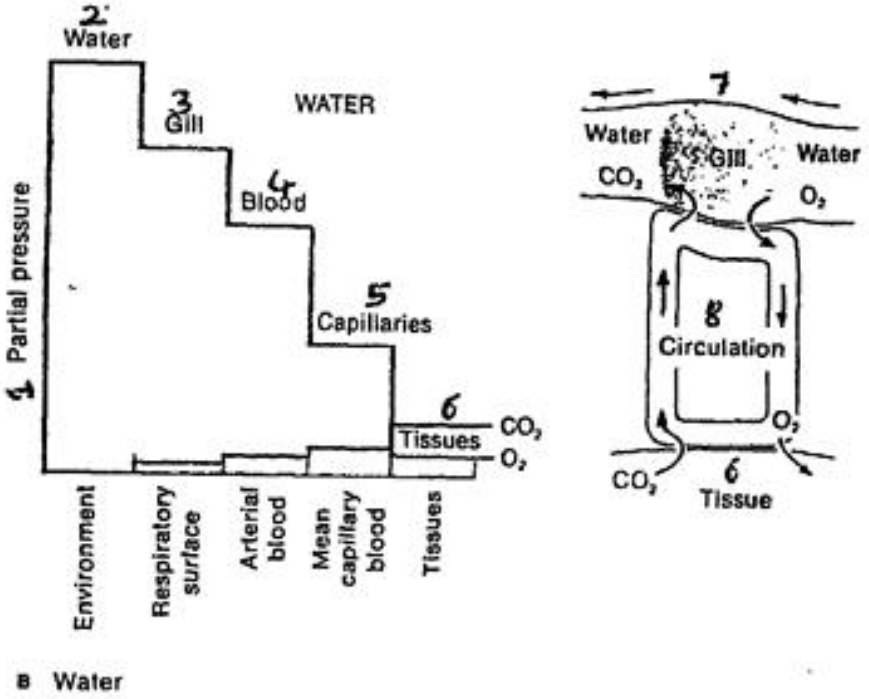
سنتناول في هذا البند كيفية انتقال O_2, CO_2 من البيئة المحيطة إلى الدم عبر طلائية التنفس للرئة.

تختلف الرئة في شكلها وتشريحها عن الخياشيم وتختلف طريقة تهويتها. تنشأ هذه الأختلافات لأن كثافة ولزوجة الماء 1000 ضعف كثافة الهواء ويحتوى الماء على جزء من 30 من تركيز O_2 الموجود في الهواء. زد على ذلك أن جزئيات الغاز تنتشر بمعدل أسرع (10.000 ضعفاً) في الهواء عن الماء. لذلك ، يتكون تنفس الهواء من تحريك تبادلي للهواء إلى داخل وخارج الرئتين (الشكل 10.2) بينما يتكون التنفس المائي من تحرك الماء في اتجاه واحد فوق الخياشيم (الشكل 10.3).

ينتج عن هذه الاختلافات ، في البيئة، شكل الجهاز التنفسي وطبيعة التهوية، اختلافات في الضغط الجزئي للغازات في الدم وفي الأنسجة بين الحيوانات التي تتنفس الهواء وتلك التي تتنفس الماء خاصة الضغط الجزئي لغاز ثاني أكسيد الكربون PCO_2 .



الشكل 2-10 التغير فى PCO_2 ، PO_2 بين الهواء والانسجة عند الفقاريات التى تتنفس الهواء

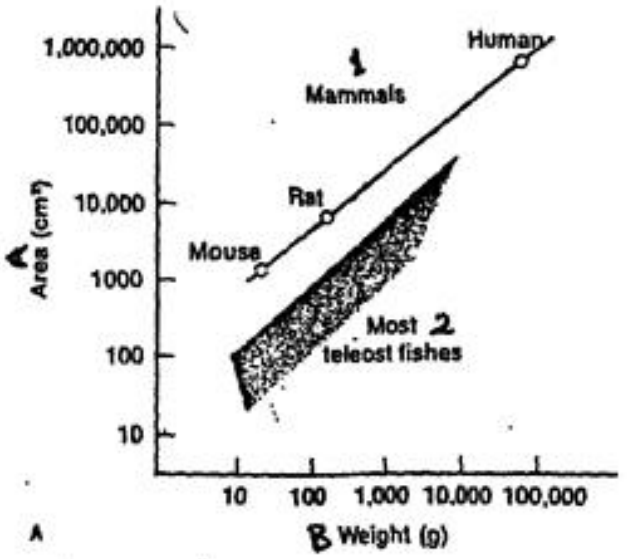


الشكل 3-10 التغير فى PCO_2، PO_2 بين الماء والانسجة عند الفقاريات التى تتنفس الماء
(1) الضغط النسبى (2) الماء (3) الخياشيم (4) الدم (5) الشعيرات
(6)الأنسجة (7) الخياشيم (8) الدورة الدموية

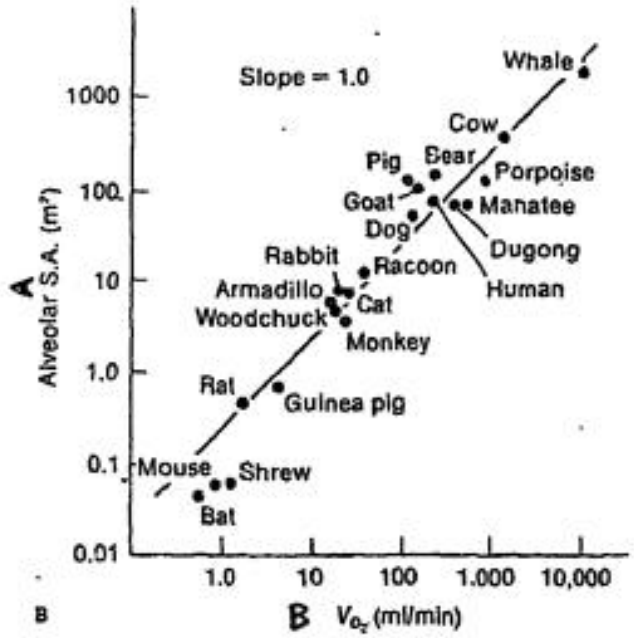
10-1-1 التشريح الوظيفى للرئتين :

تنشأ الرئة عند الفقاريات من انبوية مسدود عند أحد طرفيه diverticulum من الأمعاء وهى عبارة عن شبكة معقدة من الأنابيب والأكياس. هذا ويختلف شكلها بدرجة كبيرة من نوع إلى آخر. يختلف شكل الرئة عند البرمائيات وهو يتراوح بين كيس نو جدر ملساء إلى رئة تقسمها أغشية وثنيات إلى العديد من الأكياس الهوائية المتصلة ببعضها .

يوجد النوع الأخير عند الضفادع. تزداد درجة تقسيم الرئة عند الزواحف وتزداد أكثر عند الثدييات وتكون النتيجة ازدياد مساحة سطح التنفس للحجم الواحد من الرئة. يوجد تراوح كبير بين مسافة سطح التنفس عند الثدييات، عموما تزداد المساحة مع ازدياد وزن الجسم (الشكل 4-10) ومع ازدياد استهلاك O_2 (الشكل 5-10).



الشكل 4-10 العلاقة بين (A) سطح التنفس وB وزن الحيوان بالنسبة للحيوانات
(1) الثدييات (2) الاسماك العظمية



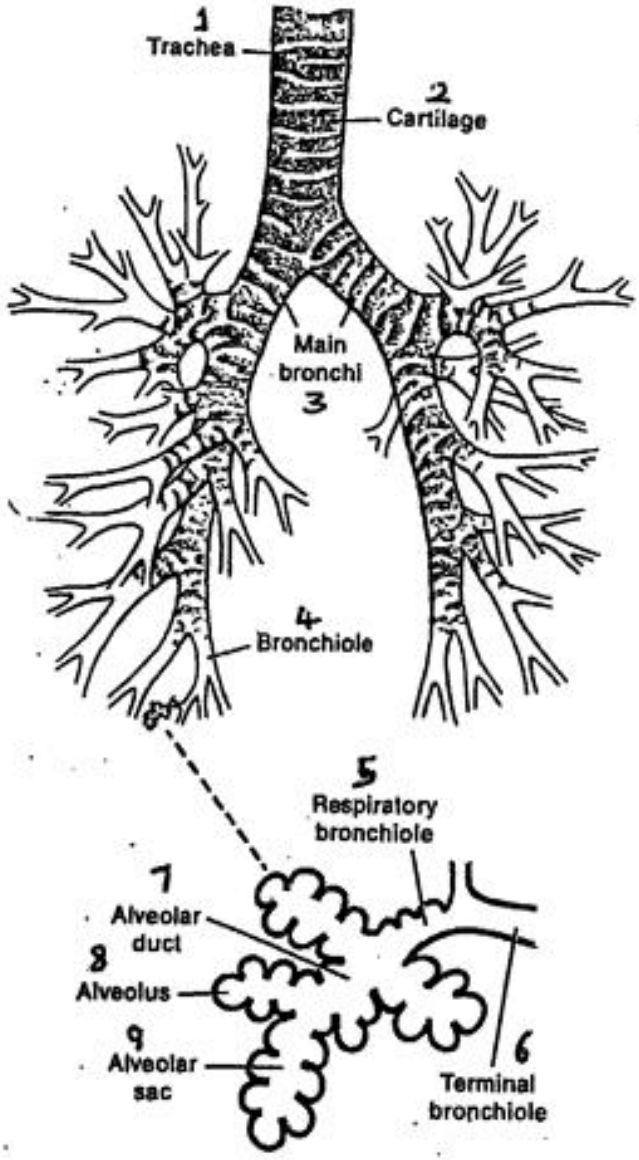
الشكل 5-10 العلاقة بين (A) مساحة السطح الكلية لحجيرات الرئة ومعدل استهلاك O_2 بالنسبة للثديات

تتكون الرئة عند الثديات من ملايين الأكياس المتصلة ببعضها وتعرف بحجيرات الرئة alveoli المفرد alveolus . هذا وتنقسم القصبة الهوائية trachea مكونة شعبتين هوائيتين bronchi المفرد شعبة هوائية bronchus والتي تتفرع مفضية في النهاية إلي شعب دقيقة. تنتهى كل واحدة من الشعب الدقيقة فى العديد من قنوات وحجيرات الرئة (الشكل 6-10).

يتم تبادل الغازات عبر طلائية حجيرات الرئة ولهذا السبب فقد زودت بجدر رفيعة (الشكل 7-10).

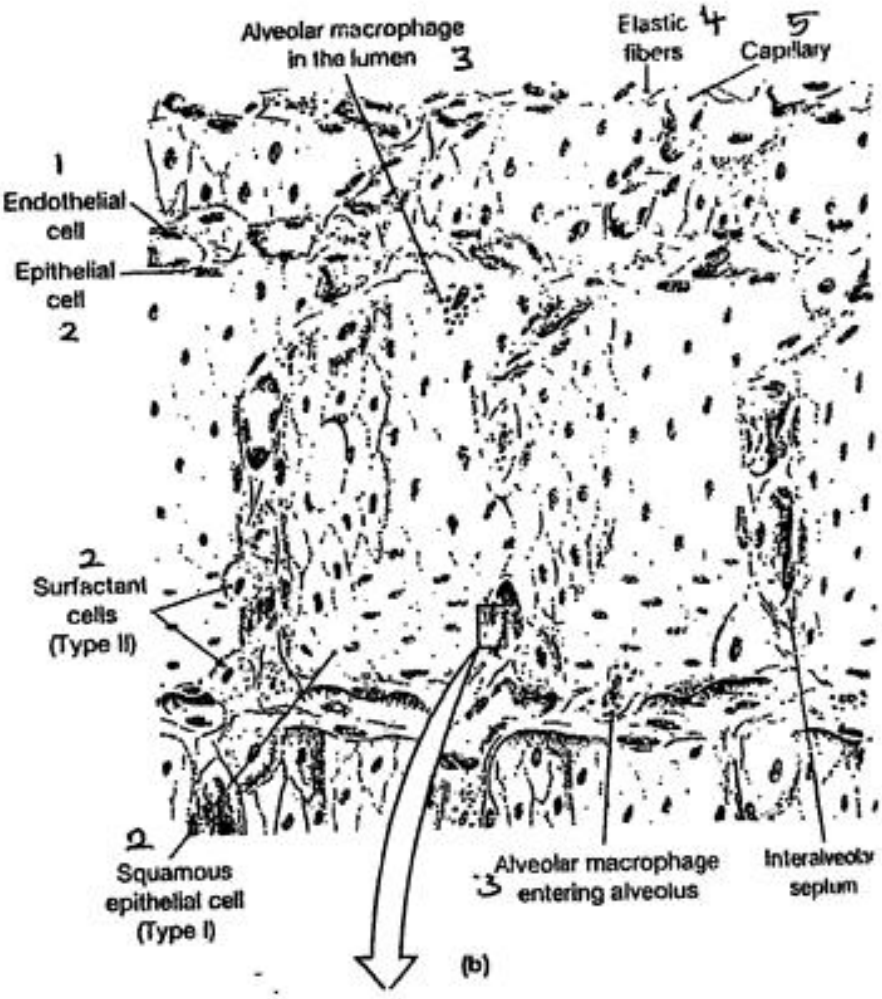
تحتوى القنوات الهوائية المؤدية للرئة علي مادة غضروفية وعضلات ملساء وتحدها الأهداب التى تساعد علي تحريك الحبيبات الغريبة نحو الفم. هذا ولا

يوجد غضروف داخل الجزء التنفسى للرئة. بينما تساعد العضلات الملساء فى تغيير حجم الممرات الهوائية داخل الرئة. يكون استهلاك O_2 فى الحيوانات الصغيرة أكبر منه فى الحيوانات كبيرة الحجم ويصاحبه ازدياد فى مساحة حجيرات الرئة لكل وحدة من وزن الجسم.



الشكل 6-10 التشريح الوظيفى للرئة عند الثدييات

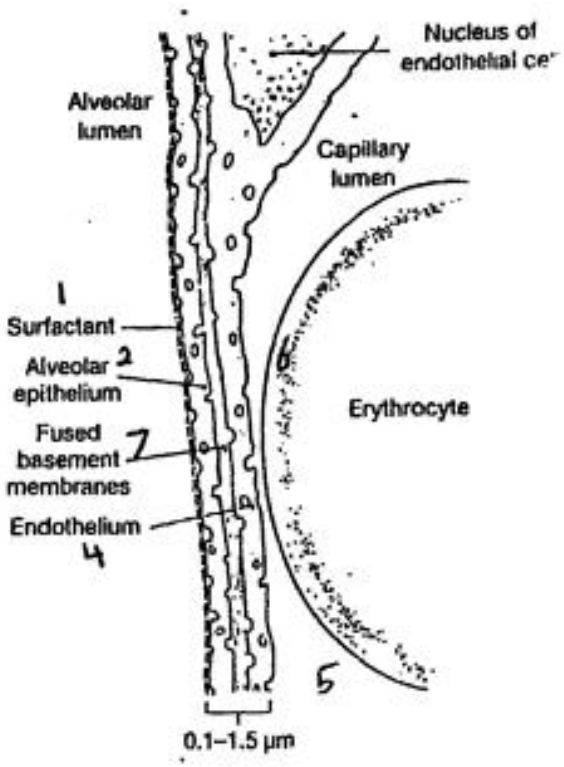
(1) القصبة الهوائية (2) غضروف (3) الشعب الرئيسية (4) الشعب الدقيقة (5) الشعب التنفسية (6) الشعب الطرفية (7) قناة الحجيرة (8) حجيرات الهواء (9) كيس الحجيرة



الشكل7-10الحاجز الرقيع الذى يفصل بين الهواء والدم داخل الحجيرات الهوائية للثديات
(1) خلايا بطانية (2) خلايا طلائية (3) خلايا بلعمية (4) ألياف (5) شعيرات دموية

يتكون حاجز الانتشار فى الثديات من (1) فيلم سطحى مائى، (2) الخلايا الطلائية للحجيرات، (3) المساحة البينية ، (4) الطبقة البطانية للشعيرات، (5) البلازما، (6) جدر الدم الحمراء (الشكل 8-10).

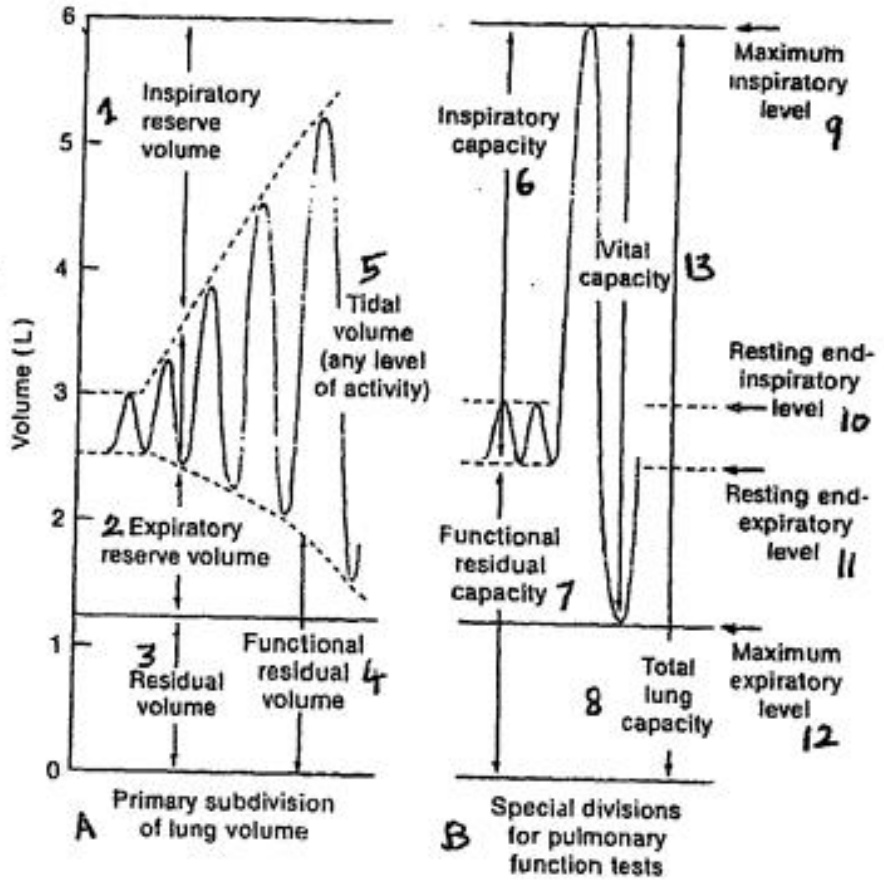
يمر الهواء من البيئة المحيطة بالعديد من الأنابيب (القصبة الهوائية، الشعب والشعب الدقيقة) قبل أن تصل إلى حجيرات الرئة. هذا ويعرف حجم الهواء الموجود داخل هذه الأنابيب المساحة الترشيحية الساكنة anatomical اختصاراً a.d.s. .



الشكل 8-10 يتكون حاجز الأنتشار عند الثديات من
(1) فيلم سطحى مائى(2) الخلايا الطلائية للحجيرات (3) المساحة البينية
(4) الطبقة البطانية للشعيرات (5) البلازما (6) جدر خلايا الدم الحمراء
(7) الغشاء المزدوج للحجيرة الهوائية والشعيرة الدموية

قد يدخل الهواء فى بعض الحجيرات «الغير عاملة» أو قد يتم تهوية بعض الحجيرات بمعدلات عالية مما يزيد من حجم الهواء الغير مستفاد منه فى التبادل. يعرف هذا الحجم المساحة الفزيولوجية الساكنة physiological dead space. ويكون مساويا أو أكبر من a.d.s. أما كمية الهواء التى تدخل وتخرج مع كل نفس فتعرفبالحجم الجزرى tidal volume اختصارا Vt يساوى حجم الهواء الذى يدخل ويخرج من حجيرات الرئة الـ Vt. ناقصا a.d.s ويعرف بحجم تهوية الحجيرات alveolar ventilation volume . هذا الجزء فقط من الهواء هو الذى يدخل مباشرة في عملية تبادل الغازات بين هذا ولا يترك افراغ الرئتين نهائيا

حتى عند الزفير العالى الذى يتم حجما مثبقيا residual volume اختصارا Vr داخل الرئتين. يعرف أقصى حجم من الهواء يمكن أن يدخل ويخرج من الرئتين بالسعة الحيوية للرئة vital capacity (الشكل9-10).

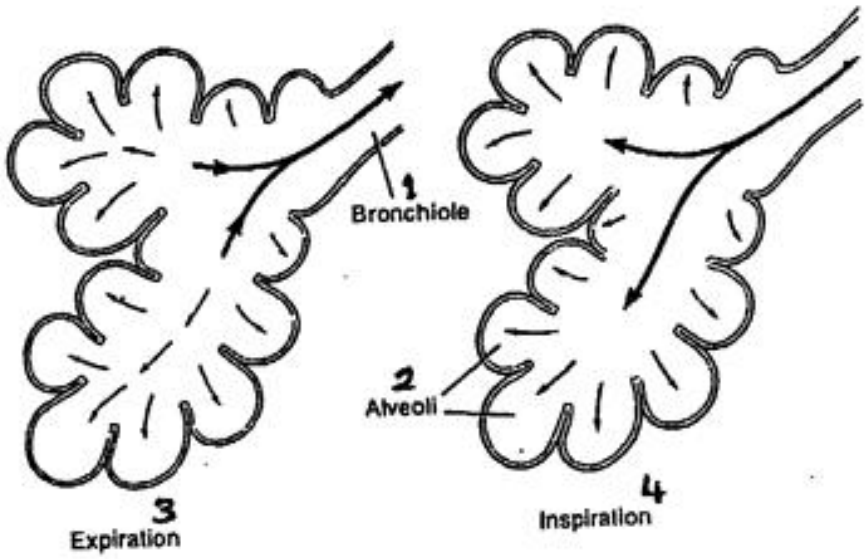


الشكل 9-10 حجم وسعة الرئة A التقسيمات الأولية لحجم الرئة B
تقسيمات خاصة لاختبار وظيفة الرئة اكلينيكيا

(1) حجم الشهيق الاحتياطى (2) حجم الزفير الاحتياطى (3) الحجم المتبقى (4) الحجم المتبقى الوظيفى (5) الحجم الجزرى (6) سعة الشهيق (7) السعة المتبقية الوظيفية(8) السعة الكلية للرئة (9) أعلى مستوى للشهيق (10) مستوى الشهيق عند الراحة (11) مستوى الزفير عند الراحة (12) أعلى مستوى للزفير (13) السعة الحيوية للرئة

يختلف تركيز كل من CO_2 ، O_2 ، فى الهواء داخل الحجيرات من الهواء المحيط بالحيوان ، تكون نسبة O_2 أقل ونسبة CO_2 أعلى داخل الحجيرات. يتم

اختلاط الهواء داخل القنوات والحجيرات بواسطة الانتشار وكذلك التيارات convection الناتجة عن التنفس (الشكل 10-10).



الشكل 10-10 اختلاف سريان الهواء (الاسهم السميكة) وانتشار O_2 (الاسهم الرفيعة) داخل (1) الشعب الدقيقة و (2) حجيرات الهواء اثناء عمليتى (3) الزفير و (4) الشهيق

هذا ويختلف معدل تهوية الرئة والحجم الـ Vt. فى الأنواع المختلفة للحيوان. معدل التنفس عند الإنسان هو 12 فى الدقيقة ويصل الحجم الـ Vt. واحد من عشرة من الحجم الكلى للرئة. يتم تحديد مستوى O_2, CO_2 داخل الحجيرات بواسطة عملية التهوية وكذلك معدل نقل الغازات. تؤثر العوامل التالية على حجم التراوح oscilation فى تركيز O_2, CO_2 فى الدم اثناء الدورة التنفسية وهى : معدل تهوية الطلائية ، الحجم الـ Vt. ، a.d.s، وأيضا طبيعة ودرجة التهوية.

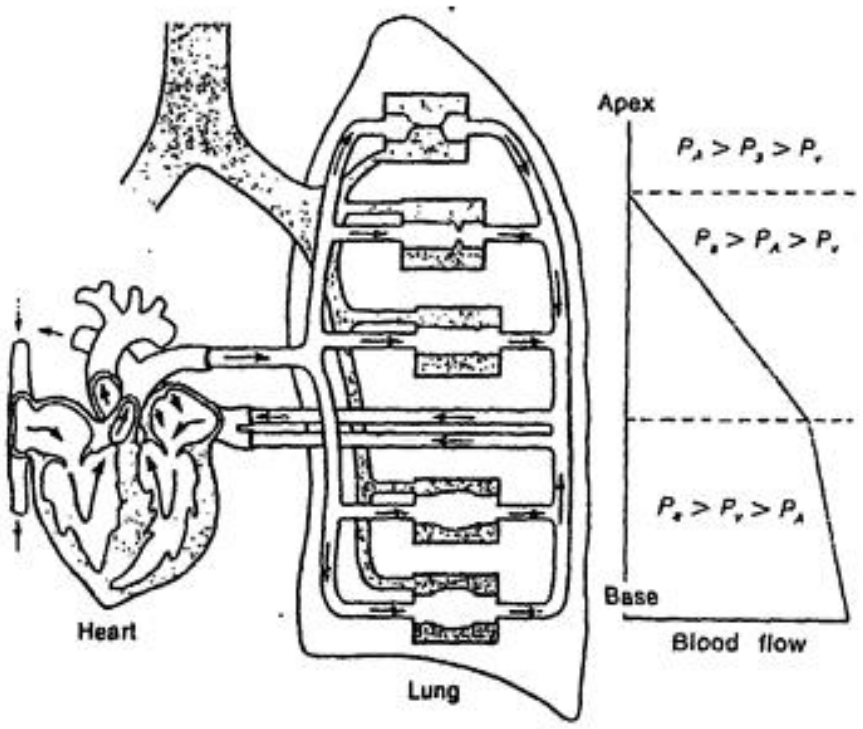
10-1-2 الدورة الدموية فى الرئة :

تتلقى الرئة ، مثل القلب، الدم من مصدرين . الجزء الرئيسى هو الدم الغير مؤكسج الوارد من الشريان الرئوى الذى ينتشر عبر الشعيرات التى تحد

حجيرات الرئة فتتم أكسدته فيأخذ O_2 ويمرر CO_2 (دورة الرئة) يغذى الرئة أيضا الدورة الشعبية bronchial circulation وهو يأتى من الدورة الدموية للجسم ويغذى النسيج الرئوى . سنناقش فيما يلى دورة الرئة .pulmonary cir

يأتى الدم إلى الرئة ، عند الثديات فى ضغط أقل من ضغط الدم لباقى الجسم. يقلل ضغط الدم المنخفض داخل الرئة من ترشيح الدم داخل النسيج الرئوى، إذ يزيد ذلك من مسافة الانتشار بين الدم والهواء وبذلك يقلل من كفاءة الرئة كعضو لتبادل الغازات. يساوى متوسط ضغط الدم داخل الرئة عند الانسان 1.7 kpa. عند الوضع العمودى للرئة، يكون الضغط كافيا لرفع الدم إلى قمة الرئة فحسب. بذلك يكون سريان الدم منخفضا فى الاجزاء العليا للرئة ويزداد ناحية القاعدة (الشكل 11-10). هذا ويتم توزيع الدم بالتساوي إلى الأجزاء المختلفة للرئة فى الحالة الأفقية (عند الاستلقاء). لنقصان O_2 أو pH تأثير واضح ومباشر على الأوعية الدموية داخل الرئة، حيث يتسببان فى انقباض موضعى للأوعية. هذه الاستجابة هامة لتوزيع الدم إلى المناطق الأكثر تهوية داخل الرئة.

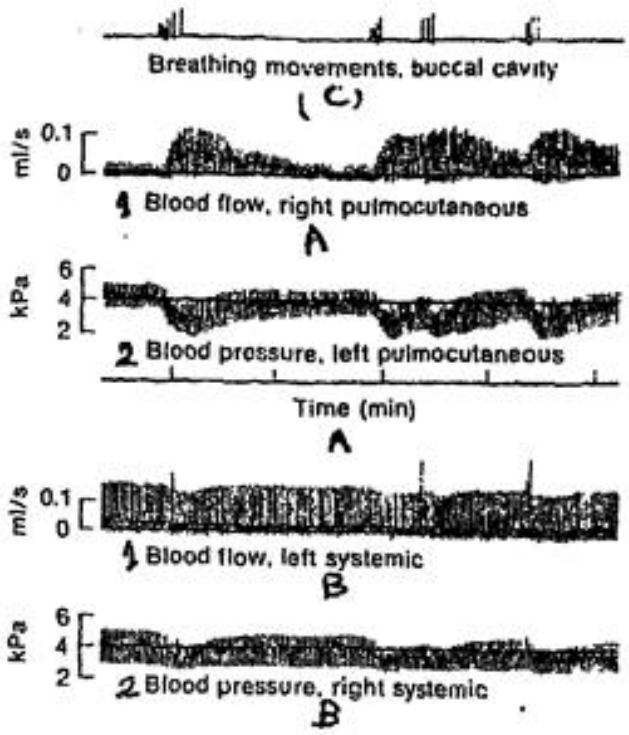
نتاج أو مردود القلب لدورة الرئة – شبيه بنتاج القلب لدورة الجسم عند الثديات والطيور (راجع كتاب علم وظائف الأعضاء العام، 1999). أما بالنسبة للبرمائيات والزواحف التى لها بطين وحيد أو مقسوم جزئيا، يدفع الدم فى كل من دورة الرئة ودورة الجسم، يمكن تغيير نسبة سريان الدم فى الدورتين. فى الضفادع والسلاحف، يكون هنالك ازدياد ملحوظ فى سريان الدم إلى الرئة بعد أخذ نفس. وينخفض سريان الدم إلي الرئتين فى الضفدع بين التنفس بينما لا يتغير سريان الدم للجسم (الشكل 12-10).



الشكل 11-10 نمط سريان الدم داخل رئة الإنسان اثناء وضع الوقوف
توضح المستطيلات داخل الرئية حال الأوعية داخل جدر الحجيرات فى الاجزاء المختلفة للرئة.
P_A ضغط الهواء داخل الحجيرات Pa ضغط الدم الشريانى Pv ضغط الدم الوريدى

10-1-3 آلية التهوية :

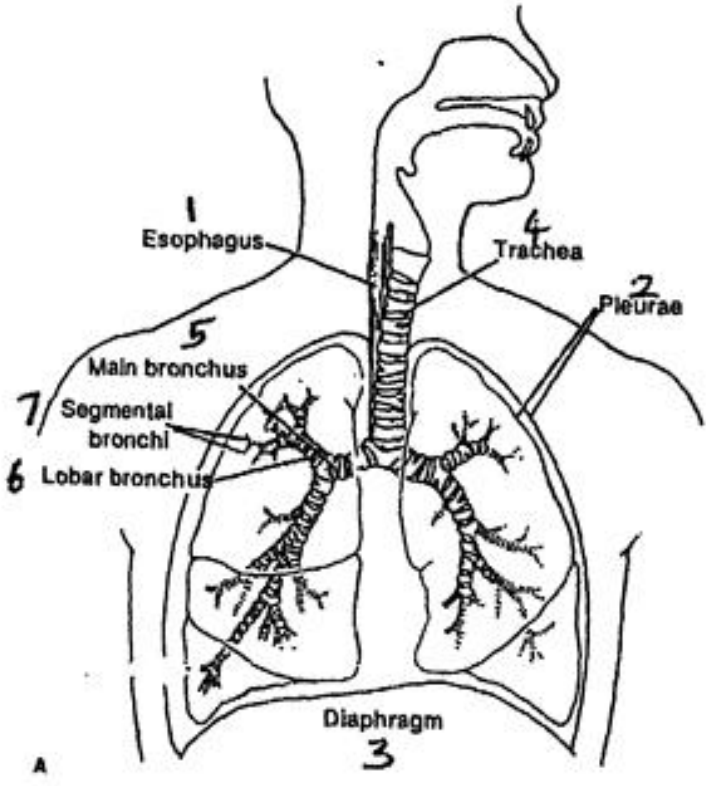
الرئة عند الثديات مرنة elastic، عديدة الحجرات ومعلقة داخل تجويف الصدر pleural cavity وتفتح للخارج بواسطة قناة وحيدة، القصبة الهوائية (الشكل 13-10). عادة يشار إلى التجويف الصدر بالقفص الصدرى- thoracic cage وتحده الضلوع والستار الحاجز. هذا وتكون المسافة بين الرئتين والقفص الصدرى صغيرة وممتلئة بالسائل الذى يوفر وسطا مرنا يصل بين السطح الخارجى للرئة والقفص الصدرى.



الشكل 12-10 ضغط سريان الدم داخل (A) شريان الجلد- رئوى
(B) شريان الجسم اثناء تنفس الضفدع xenopus
(C) (تحركات قاعدة تجويف الفم)

حينما يتغير حجم القفص الصدري يتغير حجم الرئتين الملئتين بالغاز أيضا وتبقى السوائل المبطنه كما هى لأنها غير قابلة للضغط.

إذا كان حجم الرئتين كبيراً، فبمجرد فتح الفم والبلعوم glotis يندفع الهواء خارجا من الرئة لأن وزن الضلوع سيقلل من حجم القفص الصدرى. عندما يكون حجم الرئتين وسطا فإن الضغط داخل الحجيرات يساوي الضغط الخارجى (الشكل 14-10).

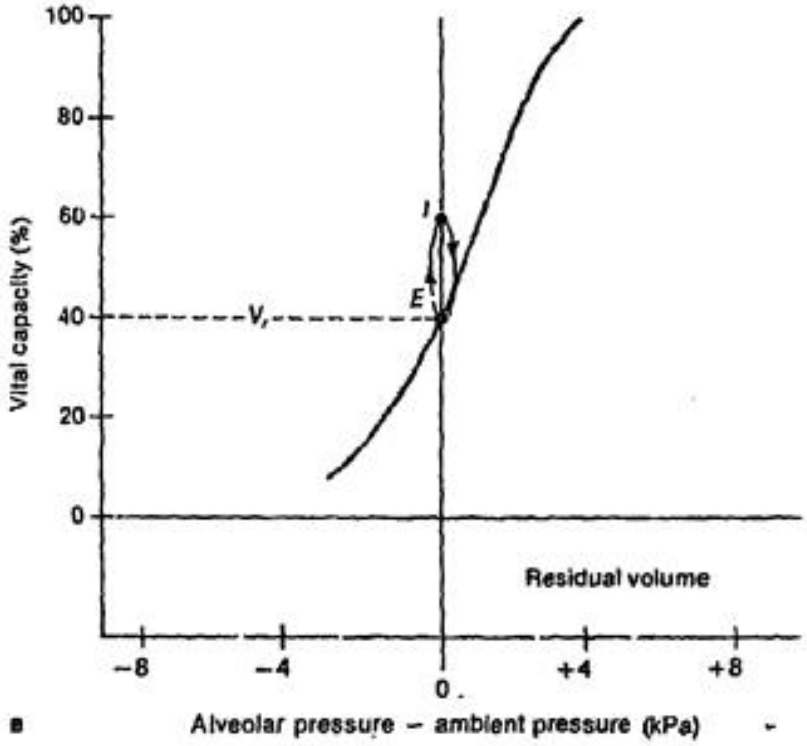


الشكل 13-10 القفص الصدرى والرئتين عند الإنسان
تحتوى الرئة اليمنى على 3 فصوص وتحتوى اليسرى على2 (1) المرئ (2) غشاء (3) الستار الحاجز
(4) القصبة الهوائية (5) شعبة هوائية رئيسية (6) شعبة هوائية للفص (7) شعبة هوائية جزئية

يتم اثناء عملية التنفس، اتساع القفص الصدرى وانقباضه بواسطة مجموعة من العضلات الهيكلية ، الستار الحاجز والعضلات بين الضلوع intercostal الخارجية والداخلية (الشكل 13-10). هذا ويتم تحديد تقلص هذه العضلات بواسطة نشاط الخلايا العصبية الحركية التى يتحكم فيها مركز التنفس داخل النخاع المستطيل.

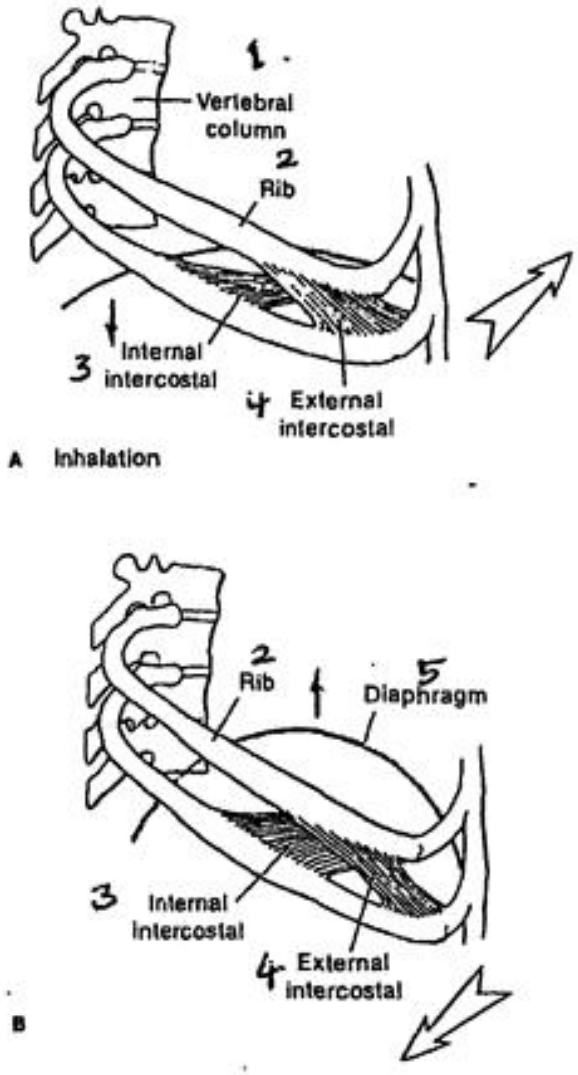
يقلل اتساع القفص الصدرى من ضغط الهواء داخل الحجيرات فيؤدى إلى جذب الهواء إلى الداخل. بينما يقلل ارتخاء الستار الحاجز والعضلات بين

الضلوع من حجم الصدر فيرفع الضغط داخل الحجيرات مما يدفع بالهواء إلى الخارج. عند التنفس الهادى يكون حجم الرئة عند VT (الشكل 14-10).



الشكل 14-10 العلاقة بين حجم الرئتين والضغط داخل الصدر عند ارتخاء العضلات Vr هو حجم الرئة عندما يكون الضغط داخل الحجيرات مسايا للضغط الخارجي. النقطة I تمثل ضغط وحجم الجهاز عند الشهيق وE عند الزفير وعند التنفس الهادى

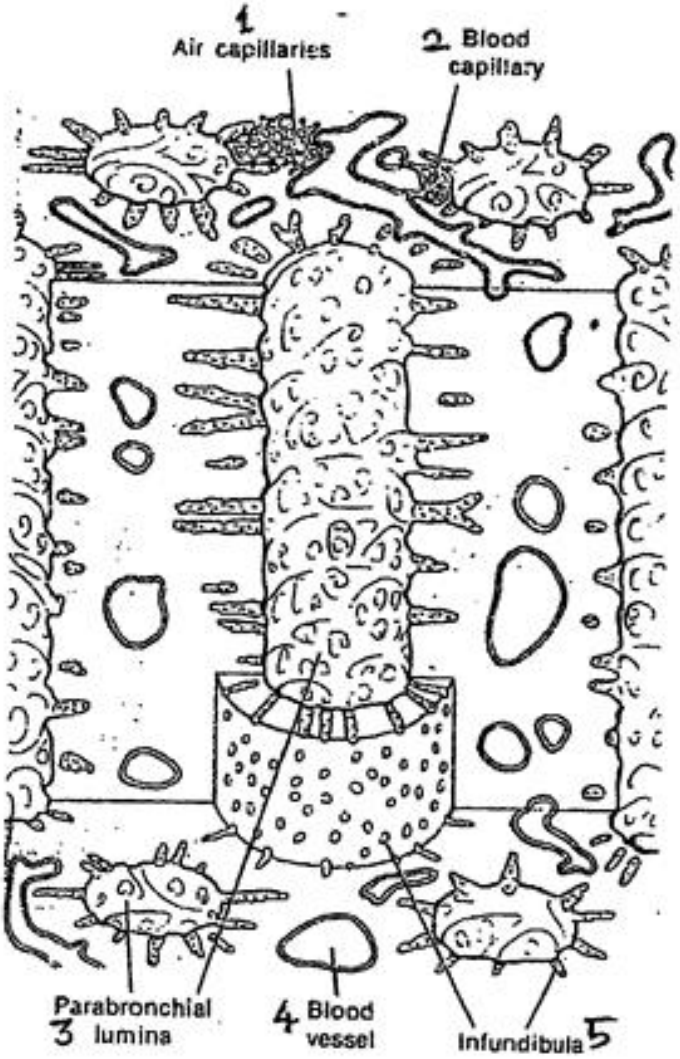
ويكون الزفير سلبيا نتيجة لارتخاء الستار الحاجز وعضلات بين الضلوع الخارجية. يصبح الزفير عملية نشطة مع ازدياد Vt ويحدث نتيجة إلى ما دون Vr عند انتهاء الزفير.



الشكل 15-10 الاختلافات فى وضع الضلوع والستار الحاجز أثناء (A) الشهيق (B) الزفير
(1) العمود الفقارى (2) الضلوع (3) العضلات بين الضلوع الداخلية
(4) العضلات بين الضلوع الخارجية (5) الستار الحاجز

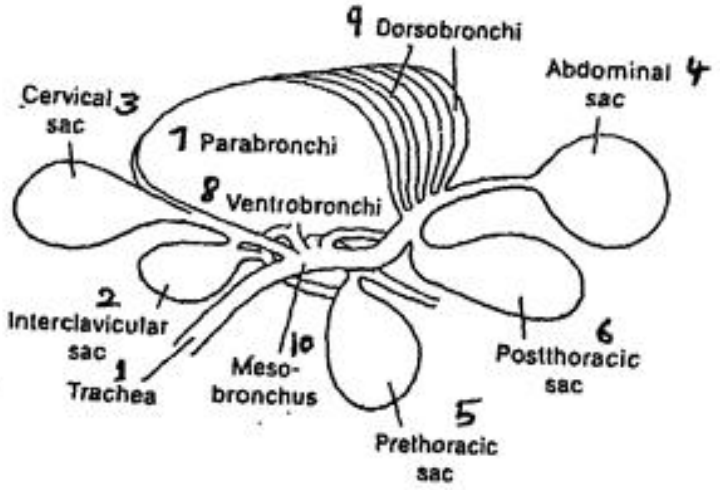
آلية التهوية عند الطيور

تختلف آلية تهوية الرئة إلي درجة كبيرة بين الحيوانات الفقارية. يتم تبادل الغازات عند الطيور، داخل شعيرات هوائية صغيرة (قطرها 10mm) والتى تتفرع من شعب هوائية parabronchi (الشكل 16-10) .



الشكل 16-10 رسم يوضح الشعب الهوائية عند الطيور المغردة يتم تبادل CO_2, O_2 داخل الشعيرات الهوائية المتفرعة من الشعب (1) شعيرات هوائية (2) شعيرات دموية (3) صفيحة الشعب (4) وعاء دموي

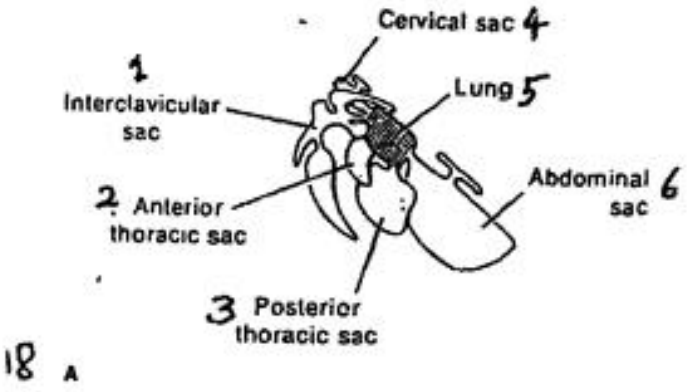
وهى تعادل حجيرات الهواء عند الثديات وظيفيا، وتتفرع بدورها من شعب هوائية خلفية dosobronchi وأخرى أمامية ventrobronchi واللتان تتفرعان بدورهما من mesobronchus التى تلتقى بالقصبة الهوائية عند مقدمتها (الشكل 17-10) تكون الشعب والأنابيب الموصلة والشعيرات الهوائية؛ الرئة وتوجد داخل القفص الصدري. هذا ويوجد غشاء يفصل الصدر عن البطن ولا يوجد ستار حاجز.



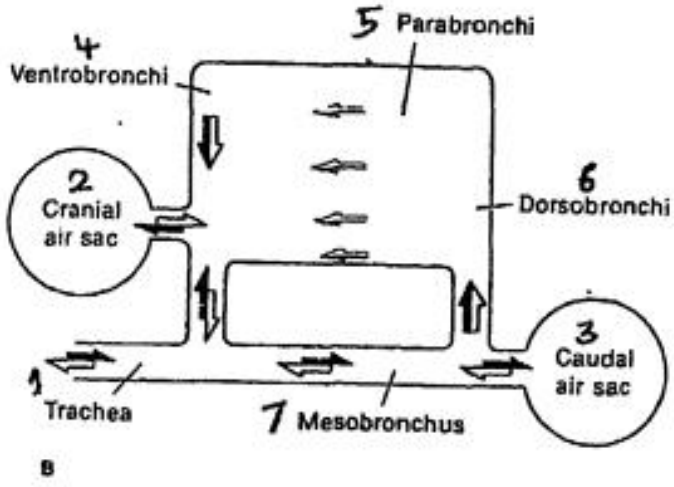
الشكل 17-10 رسم توضيحي للشعب الهوائية والاكياس المتفرعة منها
(1) القصبة الهوائية (2) كيس بين الترقوة (3) كيس عنقي (4) كيس بطني
(5) كيس صدري أمامي (6) كيس صدري خلفي (7) الشعب para (8) الشعب الأمامية
(9) الشعب الخلفية (10) الشعب meso

كيف تتم تهوية الرئة عند الطيور، علما بأن حجم الصدر والرئتين لا يختلفان كثيرا أثناء التنفس؟ تكمن الإجابة في وجود أكياس الهواء air cass المتصلة بالرئتين. تمتد الأكياس الهوائية بين الأعضاء وإلى داخل العظام المجاورة بذا تقلل من كثافة الطائر (الشكل 18-10). أثناء التنفس، يتغير فقط حجم الأكياس الهوائية الصدرية والبطنية. هذا ويمر الهواء في كلا الاتجاهين عبر .mesob ، ولكن يمر في اتجاه واحد عبر .parab (الشكل 19-10). أثناء الشهيق يندفع الهواء داخل الأكياس الهوائية البطنية عبر .mesob، أيضا يندفع الهواء داخل الأكياس الأمامية عبر الشعب الخلفية .

أثناء الزفير يترك الهواء الأكياس البطنية . مارا بالشعب الparab، وإلى درجة أقل، عبر .mesob من ثم القصبة الهوائية . أيضا يقل حجم الأكياس الرأسية، عن طريق مرور الهواء من هذه الأكياس عبر الشعب البطنية ومن ثم إلي القصبة الهوائية. من هنا نلاحظ أن مرور الهواء عبر الشعب يكون في اتجاه واحد اثناء كل من مرحلتي الشهيق والزفير.



الشكل 18-10 وضع الرئتين وأكياس الهواء بالنسبة لجسم الطائر (1) كيس بين الترقوة (2) كيس صدرى أمامى (3) كيس صدرى خلفى (4) كيس العنق (5) الرئة (6) كيس بطنى meso

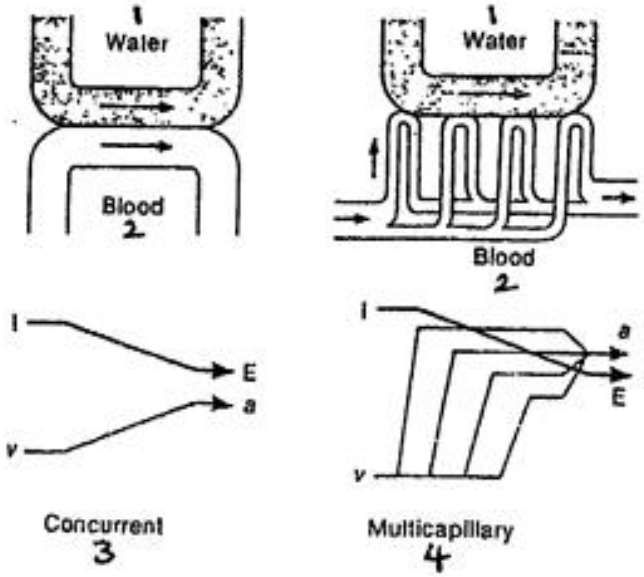


الشكل 19-10 رسم توضيحى للرئة عند الطيور تشير الأسم إلى اتجاه سريان الهواء ولا تشير لحجم الهواء (1) القصبة الهوائية (2) الكيس الهواء الرأسى (3) كيس الهواء الذيلى (4) الشعب الأمامية (5) الشعب para (6) الشعب الخلفية (7) الشعب meso

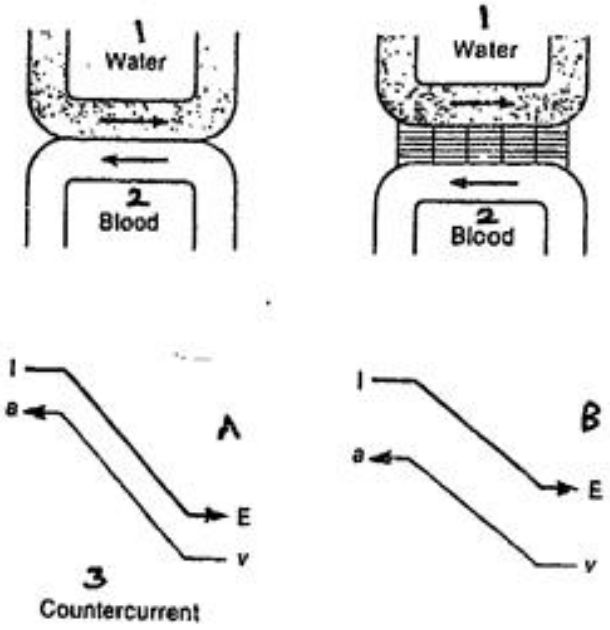
10-2 الخياشيم عند الحيوانات الفقارية التنفس المائى:

فى معظم أنواع الأسماك ، ينساب الماء عبر الخياشيم فى اتجاه واحد (راجع الشكل 3-10). وبما أن الماء أعلى كثافة ولزوجة من الهواء، لذا تصبح التهوية بطريقة المد والجزر، كما هو الحال بالنسبة للرئة، مكلفة أيضيا. يمر الدم عبر الخياشيم ويكون انسياب الدم بالنسبة لانسياب الماء أما فى نفس الاتجاه

concurrent وإما فى عكس الاتجاه counter current (الشكل 20-10، الشكل 21-10). أو بعض التوافقيات التى تجمع بين هاتين الآليتين.



الشكل 20-10 السريان الموحد للماء والدم عبر أسطح التنفس للحيوانات المائية (1) الماء (2) الدم (3) اتجاه موحد (4) اتجاه موحد بين الشعيرات I شهيق E زفير a شريان v وريد

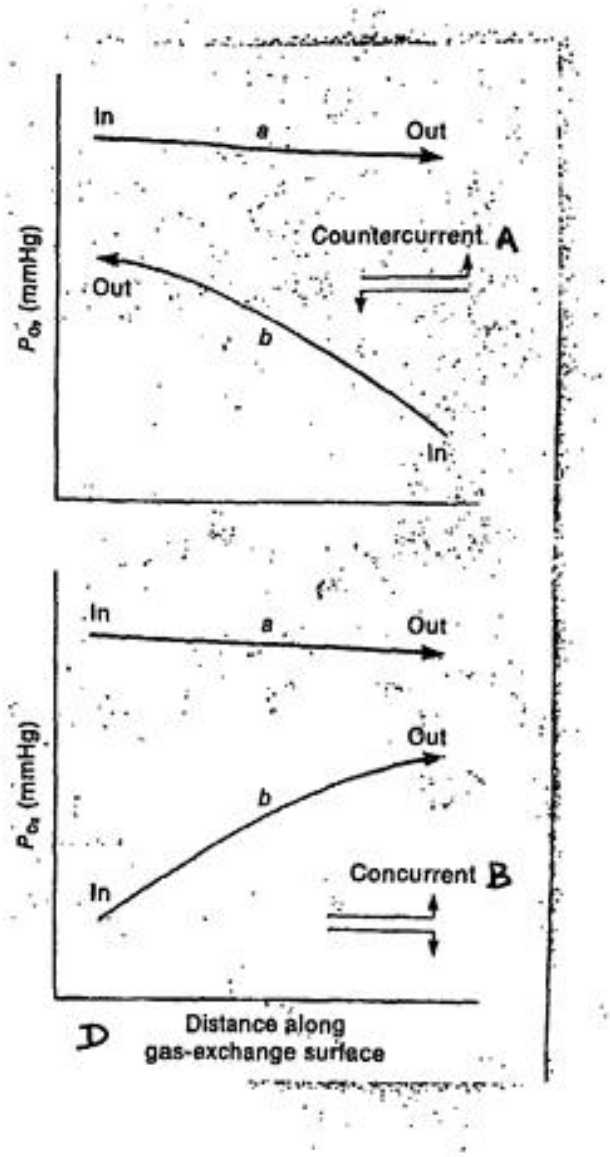


الشكل 21-10 السريان المضاد للماء فوق الدم وعبر أسطح التنفس للحيوانات المائية (1) الماء (2) الدم (3) تيار مضاد I شهيق E زفير a شريان v وريد A مقاومة منخفضة B مقاومة عالية

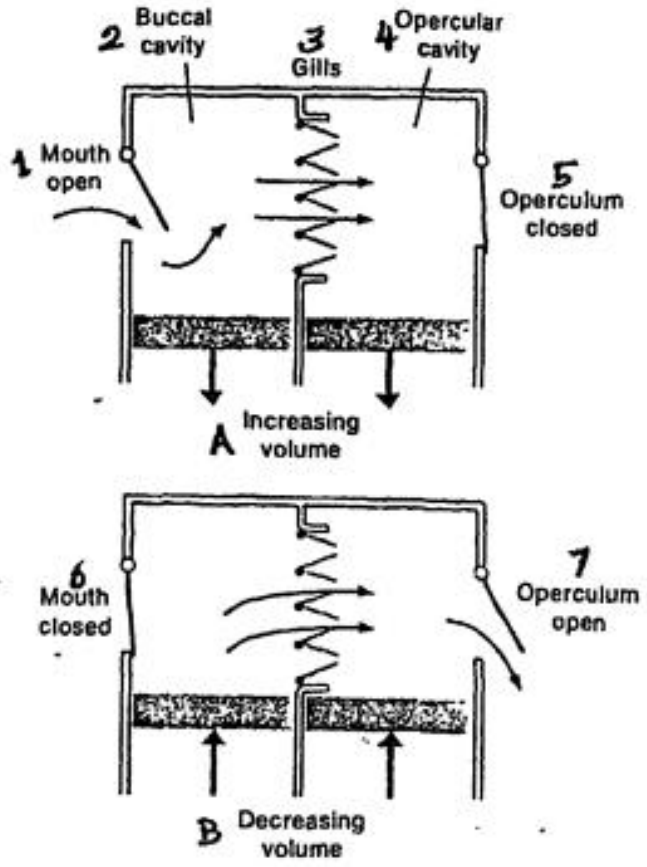
تكمن ميزة الاتجاه العكسى علي الاتجاه الموحد ، فى أنه يمكن الحصول علي فرق أكبر في الضغط النسبى للاكسجين PO_2 عبر سطح التنفس وهذا يسمح بالتالى بتبادل قدر أكبر من O_2 . كذلك يكون الاتجاه العكسى أفضل من الموحد عندما تكون نسبة تركيز O_2 لمعدل السريان متشابهة لكل من الدم الذى يمر عبر الخياشيم والماء الذى يمر من فوقها، أى تكون النسبة مساوية لواحد صحيح. أما إذا كانت هذه النسبة بعيدة عن واحد صحيح فلا يكون هناك أفضلية تذكر للانسياب العكسى على الانسياب الموحد. مثلا إذا كان انسياب الماء عالي جدا بالنسبة لانسياب الدم يكون هنالك تغيير طفيف فى PO_2 داخل الماء عند مروره فوق الخياشيم، وسيكون متوسط الفرق فى PO_2 عبر الخياشيم متشابه فى كل من الانسياب العكسى والانسياب الموجد (الشكل 22-10). لكن عادة تكون نسبة تركيز O_2 للانسياب متشابهة فى كل من الدم والماء. لذا نجد أن لمعظم الأسماك أنسياب عسكى بين الدم عبر الخياشيم والماء الذى يمر فوق الخياشيم. وبالرغم من أن PO_2 فى دم الأسماك يكون عموما قريبة من واحد صحيح وذلك لأن معدل انسياب الماء فوق الخياشيم أعلى بكثير من معدل انسياب الدم عبر الخياشيم.

يتم الحفاظ على انسياب الماء فوق الخياشيم فى الأسماك العظمية عن طريق مضخات قوامها العضلات الهيكلية فى كل من تجويف الفم وتجويف الخياشيم يتم جذب الماء إلي داخل الفم ماراً بالخياشيم ثم يخرج عبر فتحة الغطاء operculum (الشكل 23-10).

هذا وتوجد صمامات تسمح بمرور الماء فى اتجاه واحد. كذلك يكون الضغط داخل تجويف الخياشيم أقل منه داخل تجويف الفم مما يسمح بمرور الماء فى اتجاه واحد. هذا ويتغير حجم التجويف الفمى عن طريق خفض ورفع أسفل الفم – بينما يفتح ويقفل فيؤثر بذلك على حجم التجويف الخياشيم.

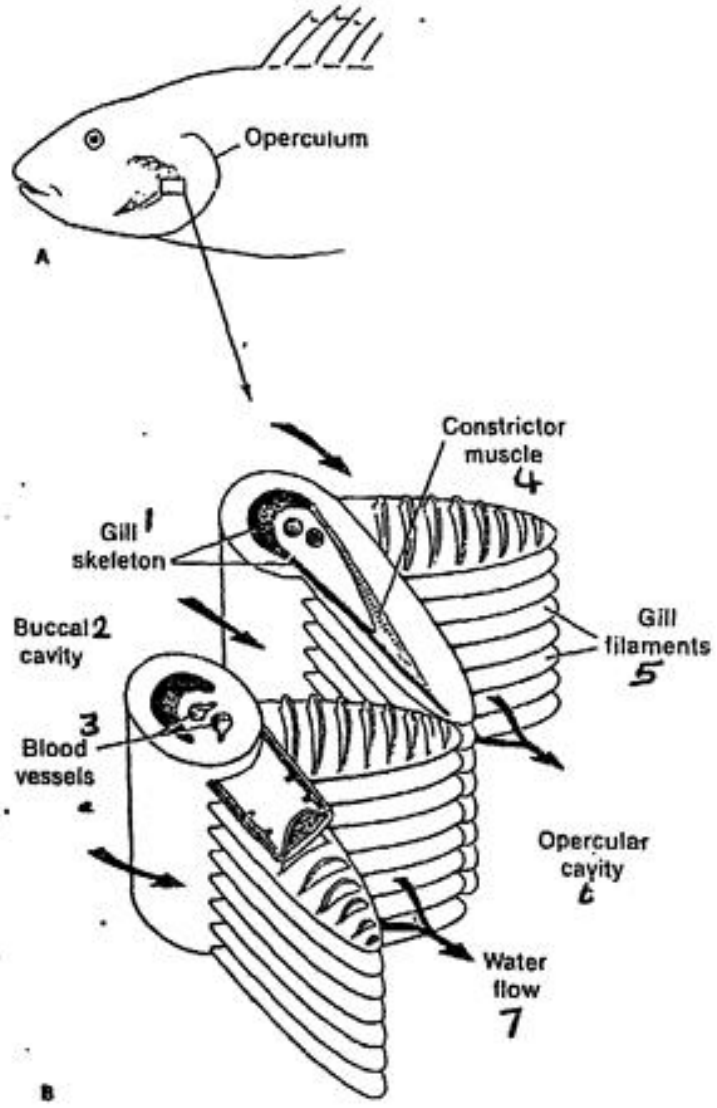


الشكل 22-10 يعتمد الاختلاف PO_2 على جانبي سطح التنفس على طبيعة سريان كل من الماء والدم أى (A) تيار مضاد (B) تيار موحد (D) المسافة على طول سطح التنفس

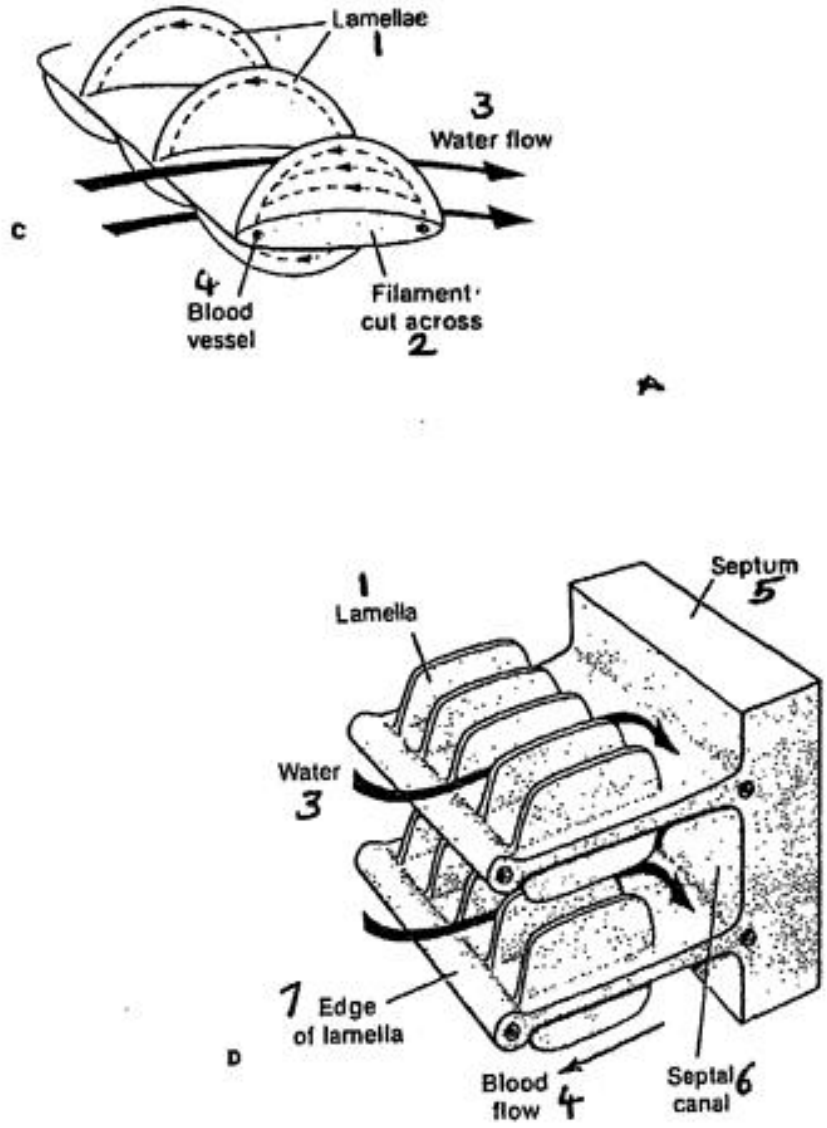


الشكل 23-10 رسم توضيحى لعملية تهوية الخياشيم عند الاسماك العظمية A
(1) الفم مفتوح ، يدخل الماء إلى (2) تجويف الفمى ، حيث يمر عبر (3) الخياشيم إلى
(4) تجويف الخياشيم ويكون اتساعها (5)غطاء الخياشيم (راجع النص)

تختلف التفاصيل التشريحية للخياشيم من نوع إلى آخر لكنها تتفق فى الشكل العام. تتكون الخياشيم فى الأسماك العظمية من 4 أقواس خيشومية gill arches على كل ناحية من الرأس وهى تفصل التجويف الفمى من التجويف الخياشيم (الشكل 24-10). لكل قوس صفين من الخيوط filaments. كل خيط مصطح ظهر – بطنى وله صف علوى وآخر سفلى من الرقائق lamallae (الشكل 25-10).



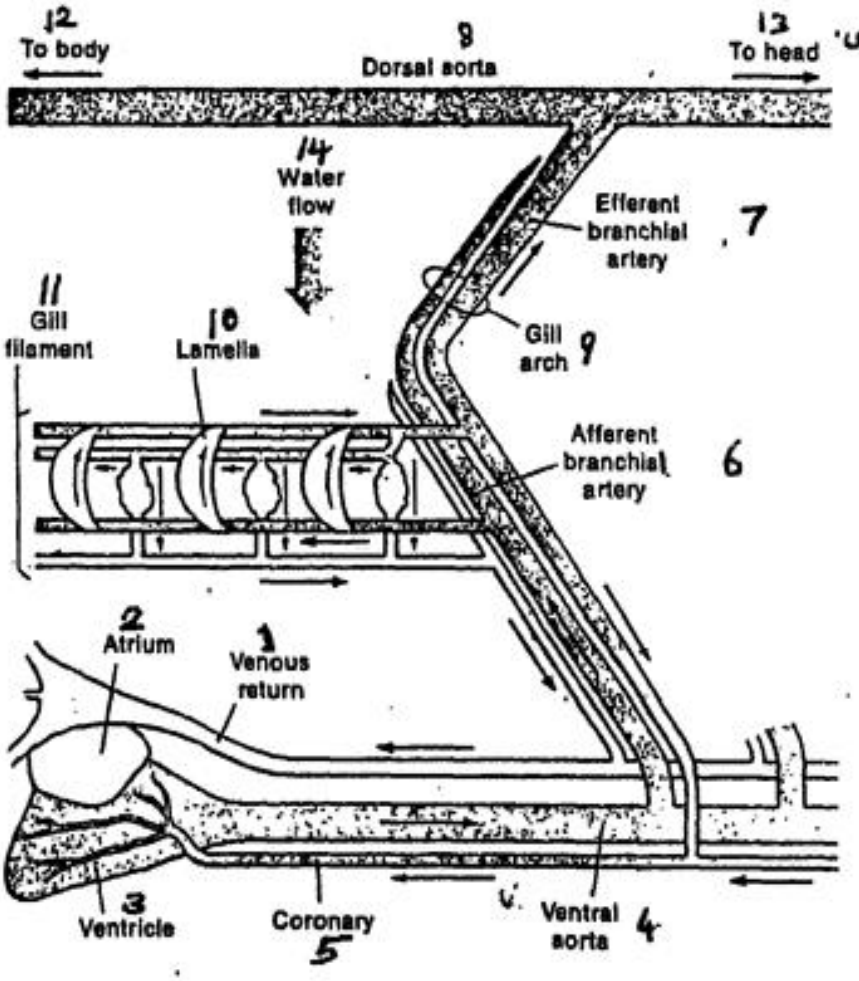
الشكل 24-10 A وضع الخياشيم تحت الغطاء عند الاسماك العظمية ،
B جزء من 2 من الخياشيم وتلامس رؤوس الخيوط المتجاورة بعضها
(1) هيكل الخياشيم (2) التجويف الفمي (3) أوعية دموية
(4) عضلة قابضة (5)خيوط (6) التجويف الخياشيم (7) سريان الماء



الشكل 25-10 A جزء من أحد خيوط الخياشيم – سريان الدم يكون عكس سريان الماء B جزء من خياشيم سمك القرش كما فى الأسماك العظمية يكون اتجاه سريان الدم عكس سريان الماء (آلية التيار المضاد (1) صفائح (2) خيوط تم قطعها عرضيا (3) سريان الماء (4) سريان الدم (5) فاصل (6) قناة (7) حافة lamella

تصطف الرقائق بالقرب من بعضها البعض بالنسبة للخيوط المتعاقبة فى أحد الصفوف . هذا وتلتصق أطراف الخيوط فى الأقواس المتقاربة بحيث تكون الخياشيم ما يشبه المصفاه، يمر من خلالها الماء.

تمثل الرقائق السطح التنفسى المعنى بتبادل الغازات وتكون مسافة الانتشار بين 0.01 ، 0.25 mm وهى نصف المسافة التى تفصل الرقائق المتجاورة على الخيوط، تتراوح المسافة الكلية للرقائق 1um . بين 1.5 إلى 15 cm^2/g من وزن الجسم اعتمادا على حجم السمكة وما إذا كانت من الأسماك النشطة أو الخاملة. هذا ويوضح الشكل (26-10) انسياب الدم والماء فى النظام العكسى.



الشكل 26-10 رسم توضيحي لجهاز الدورة الدموية
الذى يغذى الخياشيم والخيوط عند الاسماك العظمية
(1) الدم الوريدى (2) الأذين (3) البطين (4) الابهر الامامى (5) الشريان التاجى
(6) الشريان الوارد (7) الشريان الصادر (8) الأبهر الخلفى (9) قوس الخيشوم
(10) صفائح (11) خيط (12) الدم للجسم (13)الدم للرأس (14) سريان الماء

10-3 تنظيم عملية تبادل الغازات والتنفس :

لقد تمت دراسة عملية تبادل الغازات بتوسع في الثديات فقط. يتم تنظيم تحرك CO_2, O_2 بين الهواء والدم عن طريق تغيير تهوية الرئة وسريان وتوزيع الدم عبر الرئة.

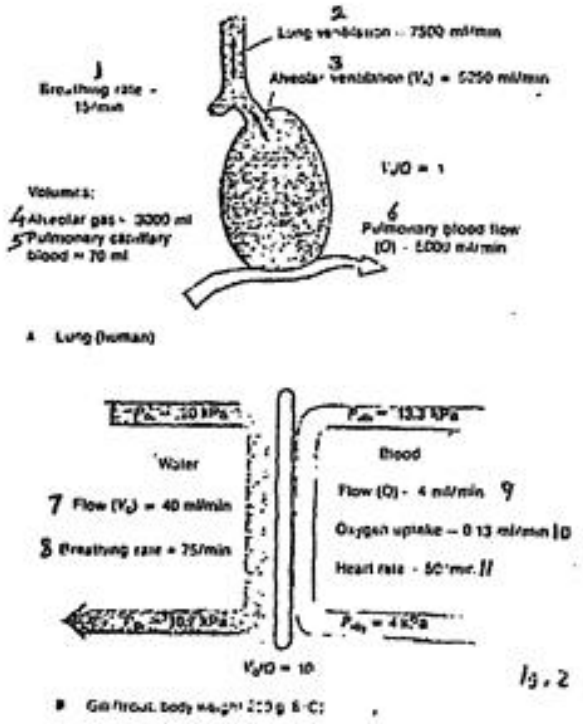
نسبة التهوية إلى التشبع بالدم

يتم استهلاك الطاقة عند تهوية أسطح التنفس بالهواء أو الماء وكذلك عند تشبع طلائية التنفس بالدم . من العصب تقدير التكلفة الكلية لهاتين العمليتين ، لكنها قد تصل 4 إلى 20 بالمئة من الطاقة الهوائية aerobic للحيوان اعتماداً على نوع الحيوان وحالته الفسيولوجية. هذا ويعتمد معدل تشبع طلائية التنفس بالدم على احتياج الأنسجة لنقل الغازات وكذلك علي سعة نقل الدم للغازات. وللتاكد من أنه قد تم توصيل O_2 إلى سطح التنفس بالقدر الكافى لتشبع الدم بالاكسجين، يجب تعديل معدل التهوية (VA) مع معدل التشبع Q).

تعتمد نسبة معدل التهوية إلى معدل التشبع (VA/Q) عند سطح التنفس ، علي الفرق فى محتوى الغاز بين الدم الشرياني والدم الوريدى وبين هواء الشهيق وهواء الزفير. محتوى الدم الشرياني من O_2 عند الانسان شبيه بالهواء لذلك فإن (VA/Q) ، عند الانسان، تساوى واحد صحيح (الشكل 27-10).

لكن يحتوى الماء علي جزء واحد من 30 من الاكسجين المذاب كما الهواء عند نفس PO_2 ونفس درجة الحرارة. إذن ، عند الأسماك تجد أن نسبة تحرك الماء(VG) فوق الخياشيم إلى نسبة سريان الدم يكون بين (10:1) إلى (20:1) وهو بذلك أعلى بكثير من نسبته عند الثديات التى تتنفس الهواء. جدير بالذكر أن هذه النسبة أى (VG/Q) عند الاسماك لا تصل (30:1) (كما يمكن أن نتوقع عند مقارنة نسبة O_2 المذاب فى الماء إلى نسبة O_2 فى الهواء)، ذلك لأن نسبة دم

الحيوانات الفقارية الدنيا للاكسجين يكون فقط نصف سعة دم الحيوانات الثديية. أيضا يؤثر الاختلاف فى PO_2 على نسبة (V_A/Q).

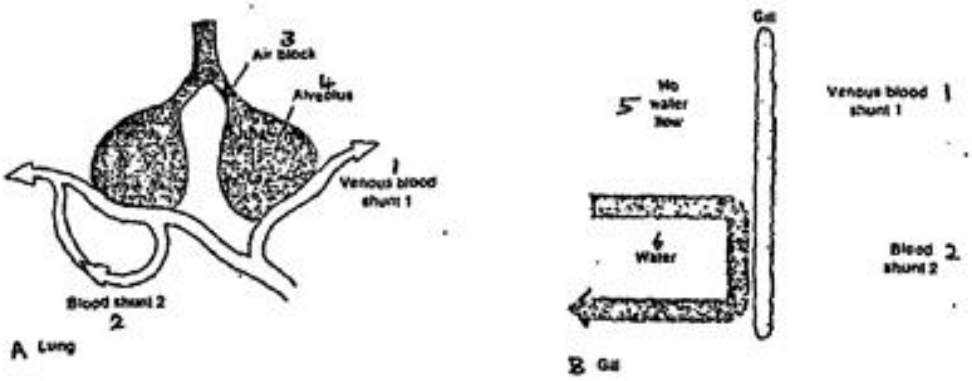


الشكل 27-10 A حجم وسريان الهواء والدم داخل رئة الإنسان $\frac{V_A}{Q}$ نسبة التهوية – إلى – التشبع تساوى 1.(B) حجم وسريان الماء والدم داخل جهاز الغياشيم عند سمكة trout نسبة التهوية – إلى – التشبع $\frac{V_G}{Q}$ تساوى 10

(1) معدل التنفس (2) تهوية الرئة (3) تهوية حجيرات الرئة (4) حجم الغاز داخل الحجيرات
(5) سريان الدم عبر الرئة (6) سريان الماء (7) معدل التنفس (8) سريام الدم
(9) معدل استهلاك O_2 (10) معدل نبض القلب

يجب أن يعكس توزيع الهواء أو الماء فوق سطح التنفس أيضا توزيع الدم لأنه من غير المجدد تهوية حجيرة هوائية من غير تشبع بالدم والعكس صحيح. وفى الحقيقة، وكما ذكرنا سابقا، ينتج عن نقصان O_2 انقباض للأوعية الدموية

للرئة وهذا يعكس توجيه الدم إلى المناطق جيدة التهوية. هذا وتقل كفاءة تبادل الغازات إذا كان بعض الدم الداخل للرئة، أما يتخطى سطح التنفس أو يقوم بتشبع منطقة ضعيفة التهوية (الشكل 28-10). لذلك يتم تنظيم سريان الدم والهواء أو الماء للحصول على نسبة (VA/Q) أقرب للأمثل فى الأوضاع والحالات المختلفة. عموما يتم تنظيم Q لتقابل احتياجات الأنسجة و VA للحفاظ على نقل كافى للأكسجين و CO_2.



الشكل 28-10 ينتج عدم كفاءة تبادل CO_2, O_2

(1) إذا تمت تغذية أحد أسطح التنفس التى تنعدم فيها التهوية أو (2) إذا مر الدم بعيدا عن أحد اسطح التنفس وذلك بالنسبة لكل من A الرئة (3) تم حجز الهواء من الدخول إلى (4) الحجيرة و B الخياشيم (5) توقف سريان الماء (6) فى حالة سريان الماء

10-4 التحكم فى تهوية الرئة بواسطة الجهاز العصبى.

تتم تهوية الرئة عن طريق تحريك الستار الحاجز والعضلات بين الضلوع. تتحكم فى نشاط هذه العضلات، خلايا عصبية حركية من النخاع المستطيل والعصب الخاص بالحجاب الحاجز والتى تتلقى إشارات من مجموعة خلايا

عصبية تكون مراكز التنفس في النخاع المستطيل. كما أن هذا التحكم على درجة عالية من الدقة بحيث يسمح بالتحكم فى سريان الهواء عند القيام بالغناء والصفير (والمخاطبة عند الإنسان) بالإضافة إلى مجرد التنفس.

هذا ويتم الحفاظ على النشاط التواترى بواسطة خلايا موجودة فى pons وفى مركز التهوية وكذلك فى النخاع المستطيل. يعتمد هذا النشاط على اشارات عصبية واردة من مستقبلات كيميائية طرفية ومركزية وكذلك مستقبلات ميكانية موجودة على الرئتين.

يتأثر معدل وعمق التنفس بالاختلاف فى CO_2, O_2 وH وكذلك بالعواطف وبالنوم . باختلاف درجة الضوء ودرجة الحرارة، بحساسية الرئة. باختلاف النشاط الرياضي ويمتطلبات التحدث أو اصدار الاصوات. أيضا يمكن التاثير على التنفس اراديا.

تستجيب معظم الحيوانات لاختلاف CO_2, O_2 بتغير فى الحجم الكلى للتهوية. يتم اكتشاف التغييرات فى تركيز CO_2, O_2 فى الدم بواسطة مستقبلات كيميائية توجد عند الثديات داخل الاجسام السباتية والأورطية arotic وداخل الجسم السباتى عند الطيور والـ carotid labyrinth عند البرمائيات. كذلك توجد مستقبلات كيميائية مركزية ، عند الثديات، علي النخاع المستطيل وهى تستجيب لانخفاض pH فى السائل الشوكى.

عند الحيوانات التى تتنفس الهواء مثل الثديات والفقاريات الأخرى، يتم التحكم في التنفس بواسطة المستقبلات الكيميائية كاستجابة للاختلاف فى تركيز CO_2 وليس O_2. أما في الفقاريات التى تستخلص O_2 من الماء، يمثل تركيز O_2 العامل الرئيسى للتحكم فى التنفس. وإذ يختلف تركيز O2 من مكان إلى آخر فى البيئة المائية. كذلك ولأن درجة ذوبان O_2 أقل بكثير من CO_2 بحيث أنه، إذا كان التنفس كافيا بالقدر الذى يسمح بتبادل O_2 إلى الخياشيم فهو حتما سيكون

كافيا لازالة CO_2. لذلك لا تحدد التهوية، في معظم الحالات، اخراج CO_2 بالنسبة للحيوانات المائية.

10-5 استجابة الجهاز التنفسي للاختلاف في تركيز الغازات :

10-5-1 نقص الاكسجين :

تتعرض الحيوانات التي تعيش داخل البيئة المائية إلى اختلافات في مستوى O_2 أكثر تكراراً وأسرع وقوعاً من الحيوانات التي تتنفس الهواء. قد يصاحب اختلاف تركيز O_2 في الماء اختلاف في تركيز CO_2 أو قد لا يصاحبه. هذا ويكون تركيز O_2, CO_2 في الهواء أكثر استقراراً وعادة تجنب الحيوانات المناطق التي بها انخفاض في تركيز O_2 أو ارتفاع في تركيز CO_2. بالطبع هناك نقصان تدريجي في PO_2 كلما ارتفعنا عن سطح البحر كما تختلف مقدرة الحيوانات على احتمال PO_2 . أعلى منطقة توجد بها مجتمعات انسانية مستقرة حوالي 5800 m فوق سطح البحر حيث يصل PO_2 حوالي 10.5 kpa مقارنة مع 20.7 kpa عند مستوى سطح البحر. تحلق الطيور عند هجرتها ، لمسافات طويلة، علي ارتفاع يزيد عن 6000 m فوق سطح البحر. وهو علو لا تستطيع العديد من الثديات أن تعيش فيه إلا «بمشقة الأنفس» ويراد هنا المعنى الحرفي لهذه العبارة. هذا ويصاحب العلو عن سطح البحر انخفاض في درجة الحرارة وذلك يؤثر سلباً على انتشار الحيوانات.

تستطيع معظم الحيوانات المائية تحمل فترات طويلة من نقص O_2 حيث تستخدم الحيوانات المائية، في هذه الحالة، العديد من مسارات الأيض اللاهوائية أو هي تعدل من وظيفة جهازي التنفس والدورة الدموية لتحصل على O_2 الكافي للأيض في مواجهة نقصان O_2 في البيئة. يؤدي تركيز O_2 في الهواء إلى انخفاض PO_2 في الدم ويتسبب ذلك في ازدياد تهوية الرئة (في الثديات)

كنتيجة لاثارة الجسم السباتى والأوراطى كيميائية. ينتج عن ازدياد تهوية الرئة ازدياد فى اخراج CO_2 وبالتالى انخفاض PCO_2 فى الدم. يتسبب انخفاض PCO_2 فى الدم فى انخفاض PCO_2 وبالتالى ارتفاع pH داخل السائل الشوكى cerebro spinal fluid. يؤدى انخفاض PCO_2 وازدياد pH فى CSF إلى خفض التهوية ويمكن أن يجهض ازدياد التهوية نتيجة لنقص O_2.

PO2 ----> V ----> PCO2 ------> pH (CSF) ----> V

ولكن إذا ما استمرت حالة نقصان O_2 كما يحدث عند ارتفاع عن سطح البحر يعود كل من PCO_2 في الدم و pH داخل الدم و CSF إلى الوضع الطبيعى تسود استجابة المستقبلات الكيميائية لنقصان O_2 وتكون النتيجة ازدياد تدريجى فى التهوية مع تأقلم الحيوان للعيش فى المرتفعات.

كما ذكرنا سابقاً، تكون الاستجابة لنقص O_2 بتقلص الأوعية الدموية موضعيا عند الثديات. لكن يقل هذه الاستجابة فى الثديات التى تأقلمت مع المرتفعات، ربما يتحدد ذلك وراثيا. عادة تتميز السلالات البشرية التى تسكن المرتفعات بقصر القامة، كبر حجم الرئتين (وبالتالى اتساع الصدر) وارتفاع ضغط الدم الذى يغذى الرئة وينتج عن ذلك تضخم في البطين الأيمن. ومن آثار التكيف بعيد المدى فى معظم الحيوانات الفقارية ازدياد في عدد كريات الدم الحمراء ونسبة الهيموجلوبين فى الدم وبذلك ازدياد سعة الدم للأكسجين. كما يزداد diphosphoglycerate اختصاراً DPG عند الانسان وتقل بذلك قابلية الهيموجلوبين للاكسجين .

10-5-2 ارتفاع تركيز ثانى أكسيد الكربون :

يصاحب ازدياد PCO_2 ، فى معظم الحيوانات، ازدياد فى الحجم الكلى للتهوية : عند الثديات ، يكون الازدياد متناسباً مع الارتفاع فى تركيز CO_2 فى الدم لكن يكون تاثير pH داخل CSF أكثر وضوحا.

10-6 الاستجابة للغطس تحت الماء

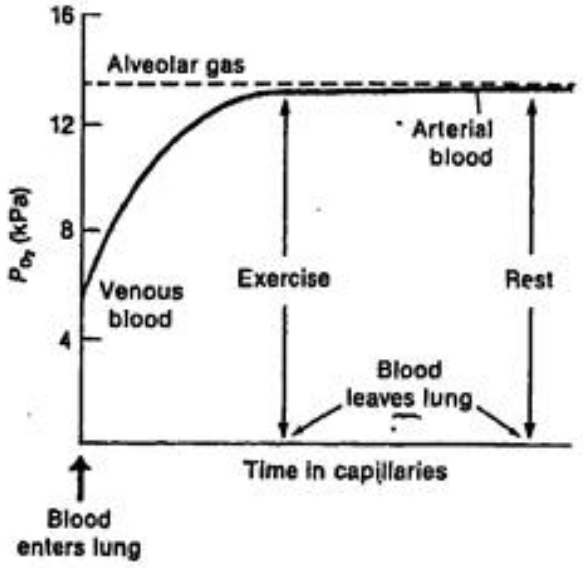
تتعرض الطيور والثديات التى تغطس إلى فترات من نقص O_2. لا يستطيع الجهاز العصبى المركزى ولا القلب تحمل نقص O_2 لذلك يجب تزويد هما بالكمية اللازمة طوال فترة الغطس. وهذا يحدث بالطبع على حساب الأنسجة الأخرى التى يقل انسياب الدم إليها وهى بذلك تلجأ للأيض اللاهوائى طوال فترة الغطس. هذا ويكون هنالك انخفاض ملحوظ فى معدل خفقان القلب وكذلك فى نتاج القلب.

توجد بالقرب من البلعوم ومن الفم والأنف (حسب النوع) مستقبلات تستجيب لوجود الماء وتقوم بتثبيط عملية الشهيق اثناء الغطس. لذلك لا يتسبب نقص O_2 أو ازدياد CO_2 فى تهوية الرئة حيث يتم تجاهل المدخل من هذه المؤثرات اثناء الغطس.

تقوم معظم الحيوانات بتفريغ الرئة من الهواء قبل الغطس. يؤدى ضغط الماء، اثناء الغطس إلى الأعماق، بتقليص حجم الرئة فيهرب الهواء إلى الشعب الهوائية والقصبة الهوائية. يؤدى وجود الهواء داخل حجيرات الرئة إلى أنتشار الغازات إلى داخل الدم مع ازدياد الضغط، فترتفع بذلك نسبة النيتروجين المذاب فى الدم. لذلك قد يتسبب الصعود السريع من الأعماق إلى سطح البحر فى تكوين فقاقيع داخل الدم وتكون لها آثار غير حميدة.

10-7 الاستجابة للتمارين الرياضية :

تزيد التمارين الرياضية من معدل استخدام O_2 وانتاج CO_2. وبالتالى يزداد مردود القلب ليلاقى ازدياد حاجة الأنسجة، ويقل وقت عبور الدم عبر شعيرات الرئة لكن ما يزال هناك وقتا كافيا لتبادل الغازات (الشكل 29-10).



الشكل 29-10 الطريقة التى يرتفع بها PO_2 عند سريان الدم عبر شعيرات الرئة

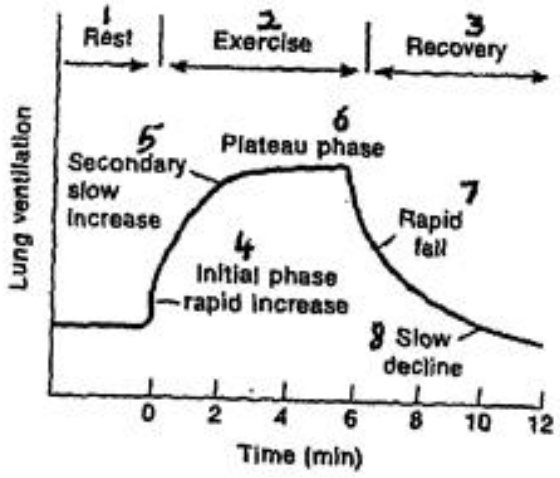
هذا ويزداد الحجم الكلى للتهوية في وجه الحفاظ على تركيز O_2 فى الدم بالرغم من الانسياب السريع للدم. يكون ازدياد التهوية عند الثديات سريعاً ويتزامن مع بداية التمرين الرياضى. هذا الازدياد الفجائى فى التهوية يعقبه ارتفاع أكثر تدرجا حتى يتم الوصول إلي حالة مستقرة لكل من حجم التهوية واخذ O_2 بواسطة الدم (الشكل 30-10). عند نهاية التمرين يحدث انخفاض مفاجئ فى التنفس يعقبة انخفاض متدرج فى حجم التهوية.

أثناء التمرين الرياضى يقل PO_2 ويزداد PCO_2 و H^+ فى الدم الوريدى ، لكن لاتختلف هذه العوامل كثيراً فى الدم الشريانى ما عدا اثناء التمرين القاسى، ألعاب القوى . كما يكون هنال ازدياد فى تأرجح PO_2 و PCO_2 فى الدم الشريان مع كل شهيق وزفير، لكن يبقى المتوسط ثابتا.

هذا وتتراوح التمارين الرياضية بين الحركات البطيئة إلى التمارين القاسية. وبين هذين الحدين تكون التمارين فوق مستوى الراحة وتستمر الطاقة اثناءها هوائيا ويكون الحصول على الطاقة من المصادر اللاهوائية ضئيل جدا.

بينما يصل استهلاك O_2 إلى اقصاه اثناء التمارين القاسية لذا تستمد الطاقة ايضا من المصادر اللاهوائية.

يبدو أن هنالك العديد من نظم المستقبلات التي تشارك في الاستجابة للتمارين وربما لم يتم التعرف عليها جميعا. كما يبدو أن المستقبلات الكيميائية الطرفية (الجسم السباتي والأجسام الأورطية) وكذلك المستقبلات المركزية داخل النخاع المستطيل، غير مسئولة مباشرة عن استجابة الجهاز التنفسي للتمارين الرياضية، لأن متوسط PO_2, PCO_2 في الدم الشريانى لا يتغير كثيرا اثناء التمرين، لكن من المحتمل أن استجابة هذه المستقبلات تزيد اثناء التمرين ، في هذه الحالة نتيجة للازدياد الواضح في الكاتكولامينات catecholamines (مثل ابيتفرين) التى يتم تحريرها أثناء التمرين الرياضي.



الشكل 30-10 الاختلاف فى معدل تهوية من الرئة (1) المستوى عند الراحة ثم (2) التمرين الرياضي (3) بعد انتهاء التمرين (4) فى البداية ازدياد سريع فى معدل التنفس ، يعقبه (5) ازدياد بطئ، حتى يصل إلى (6) ذروة عند انتهاء التمرين (7) يهبط معدل التهوية فجأة وبعد ذلك (8) يتدرج الهبوط إلى أن يصل مستوى الراحة

كذلك توجد مستقبلات ميكانية على العضلات، الألياف الوترية والمفاصل تؤدى اثارتها إلى ازدياد التهوية وربما تكون هى المسئولة عن التغير المفاجئ في التهوية الذى يصاحب بداية التمرين الرياضى ونهايته . أيضا يعتقد أن اختلاف النشاط العصبى فى المخ والحبل الشوكي. المسئول عن انقباض العضلات، يؤثر أيضا على مركز التنفس فى النخاع المستطيل مما ينتج عنه ازدياد فى التهوية.

10-8 نظم أخرى لنقل الغازات :

جهاز القصبات الهوائية عند الحشرات

يختلف الجهاز التنفسى عند الحشرات كلية عن نظيره عند الفقاريات التى تتنفس الهواء . فهو يتكون من العديد من القصبات الهوائية trachacl system عند الحشرات.

جهاز القصبات الهوائية عبارة عن انابيب مملؤة بالهواء تخترق الجسم من السطح الخارجى إلى الخلايا وتعمل كمعبر للانتقال السريع لكل من CO2, O2 وبذلك تم تجنب الحاجة إلي جهاز دورى ينقل الغازات بين اسطح التنفس والأنسجة .

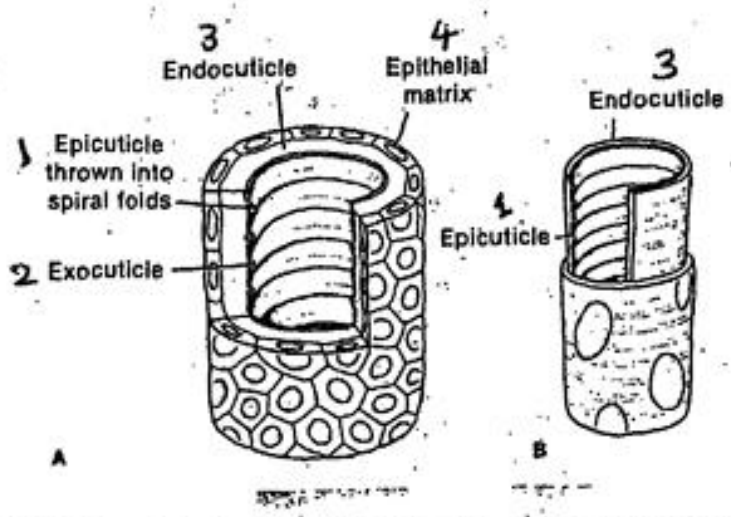
للقصبات الهوائية تشكيل جدارى شبيه بالجلد (الشكل 31-10) وهي عبارة عن انبعاج من سطح الجسم الخارجى تتفرع إلى كل موضع فى الأنسجة. هذا وتنتهى الأفرع الصغيرة لتلامس الخلايا وبذلك توصل الأكسجين إلى جوار الميتوكوندريا . وتظهر كفاءة هذا الجهاز إذا علمنا بأن الغازات تنتشر أسرع فى الهواء (10.000 ضعفا) عنه في الماء أو الأنسجة.

أيضا توجد أكياس هوائية علي بعد مسافات متراوحة تزيد من حجم الجهاز وتؤدى في بعض الأحيان إلي التقليل من كثافة الحشرة. توجد عند مدخل

القصبات الهوائية spiracles تتحكم فى انسياب الهواء، وبالتالى تنظيم فقدان الماء كما تمنع دخول الغبار.

تقوم بعض الحشرات كبيرة الحجم بتهوية الجهاز التنفسى والأكياس الهوائية عن طريق ضغط وتمديد جدار الجسم خاصة فى منطقة البطن وبذلك تزيد من عملية انتقال الغازات.

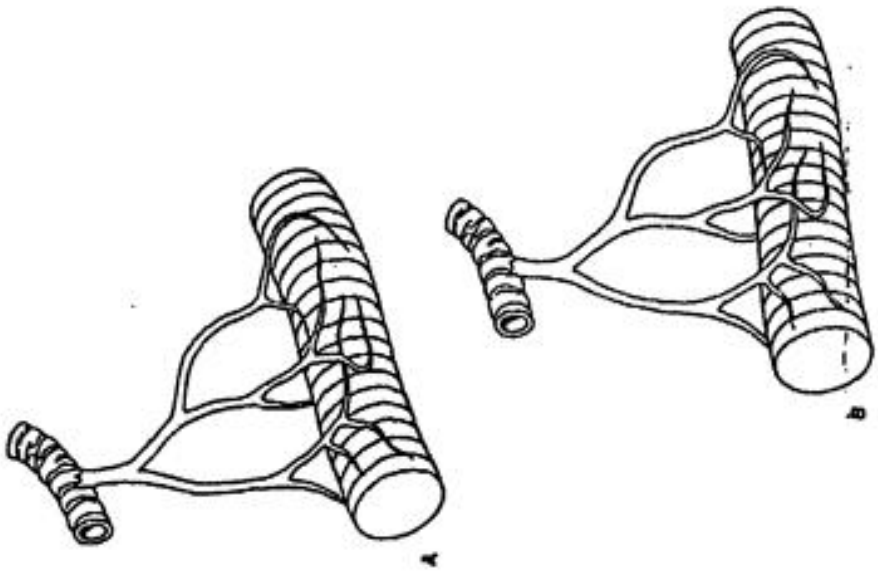
يختلف الحجم الكلى للقصبات الهوائية كثيراً فى الأنواع المختلفة من الحشرات. فهو يصل 40 بالمئة من حجم الجسم عند الخنفس melolontha ويصل 10 بالمئة من حجم الجسم عند يرقانه الخنفس الغطاس dysticus .



الشكل 10-31 شكل القصبة الهوائية عند الحشرات A بالقرب من فتحة التنفس B فرع صغير تم تكبيره (1) الجلد السطحى (2) الجلد الخارجى (3) الجلد الداخلى (4) خلايا طلائية

يتم تبادل الغازات عبر جدر القصبات الهوائية الدقيقة والتي يصل سمكها 40 إلى 70 nm . هذا وتمتلئ أطرافها بسائل ويتم تبادل الغازات عبر هذا السائل . ولكن يتم تغيير حجم هذا السائل في الأنسجة النشطة عن طريق ازدياد اسموزيتها. فينتج عنه تحرك الماء من القصبات الهوائية الدقيقة إلى الانسجة (الشكل 10-32). وبذلك يستطيع O_2 أن ينفذ بسرعة اكبر إلى الخلايا. هذا

ويزداد استخدام O_2 بواسطة عضلات الطيران عند الحشرات 10 إلى 100 ضعفا أثناء الطيران منه عند الراحة.

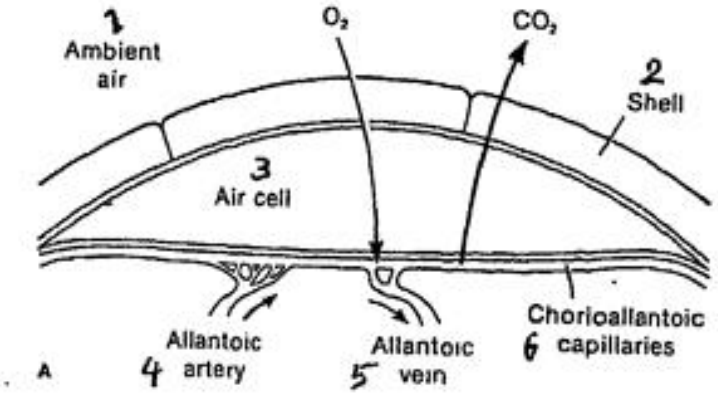


الشكل 32-10 الأفراع الدقيقة للقصبات الهوائية للحشرات
وهي تغذى احدى الألياف العضلية A عند الراحة تحتوى نهايات الأفرع على سائل
و B عند النشاط يختفى السائل ويمتد الهواء ليلامس الليفة ،،

10-9 كيف تتنفس البيضة

للقشرة الخارجية لبيضة الطيور أبعاد هندسية محددة (السمك، مساحة السطح، حجم وعدد المسامات ... الخ). وهى تحوى بداخلها الجنين الذى يزداد احتياجه لتبادل غازات التنفس 10^3 ضعفا بين وضع البيضة وعملية الفقس.

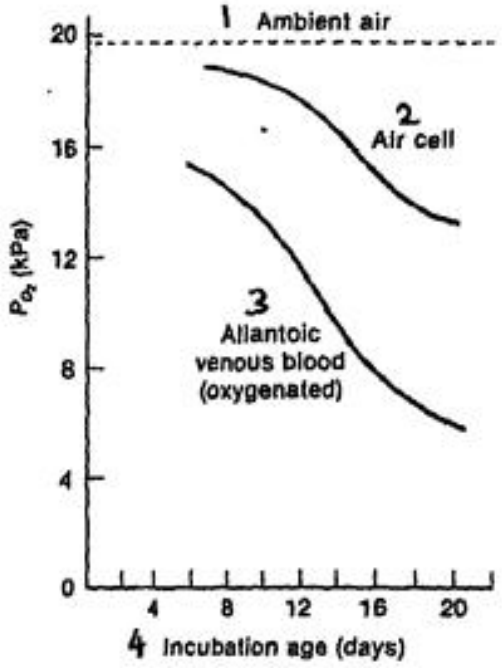
لذلك يزداد معدل نقل CO_2, O_2 عبر القشرة اثناء الطور الجنينى بينما تبقى أبعاد سطح النقل (قشرة البيضة) ثابتة لا تتغير . هذا وتنتشر الغزات عبر مسامات أو ثقوب صغيرة مليئة بالهواء موجودة على القشرة ومن ثم عبر الأغشية المبطنة بما فيها الغشاء المشيمى allantoic mem (الشكل 33-10).



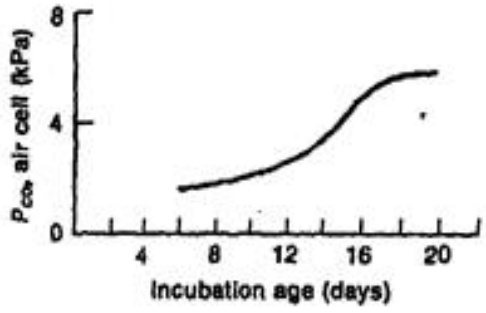
الشكل 33-10 رسم توضيح مسار انتشار الهواء عبر قشرة البيضة عند الطيور من الهواء المحيط إلى الدورة الدموية للجنين (1) الهواء (2) القشرة (3) حجرة هوائية (4) شريان (5) وريد (6) شعيرات دموية (مشيمية)

تكون الدورة المشيمة (الدورة الدموية التى يتنفس من خلالها الجنين) لصيقة بقشرة البيضة وتزداد مع نمو الجنين، ويتم تبادل O_2 , CO_2 بين هذه الدورة وبين الهواء الخارجى، عبر القشرة، مع انحدار تركيزها (الشكل 34-10).

يتم فقدان الماء من البيضة اثناء النمو وينتج عنه تكوين تدريجى لحجرة هوائية air cell داخل القشرة يصل حجمها 12ml عند الفقس فى بيضة الدجاجة والتى تزن حوالى 50g . قبل الفقس مباشرة، يدخل الجنين منقارة داخل هذه الحجرة، بذا يقوم بتهوية رئتيه لأول مرة. يكون PCO_2 داخل الدم منخفض فى المراحل الأولى للطور الجنينى لكنه يصل 40mm Hg قبل الفقس مباشرة (الشكل 35-10). يتم الحفاظ على هذا الضغط بعد الفقس بذا يتم تجنب حدوث اختلاف كبير في التوازن الحمضى -قلوى عندما يتحول الطائر من التنفس عبر القشرة إلى التنفس بواسطة الرئة.



الشكل 10-34 اختلاف PO_2 داخل الحجرة الهوائية والوريد المشيمى مع عمر الجنين
(1) الهواء الخارجى (2) حجرة الهواء (3) الدم الوريدى (مؤكسج) (4) فترة الحضانة (بالايام)



الشكل 10-35 اختلاف PCO_2 داخل الحجرة الهوائية الهوائية مع عمر الجنين فترة الحضانة بالايام و PCO_2 داخل الحجرة الهوائية يساوى PCO_2 داخل الدم الوريدى

10-10 تجمع الاكسجين داخل أكياس العوم أو العوامات

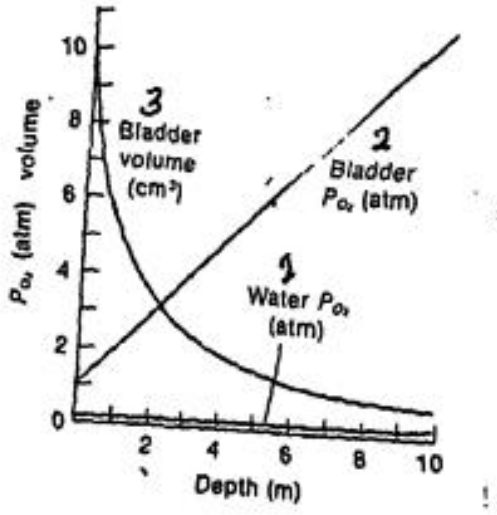
تحقق معظم الحيوانات المائية طفوا neutral buoyancy لتعوض عن الكثافة العالية لهياكلها العظمية، وذلك عن طريق احتواء مادة أخف وزنا داخل اعضاء متخصصة. قد تحتوى هذه الاعضاء علي محلول NH_4Cl (كما فى الحبار) ، طبقات دهنية (كما فى العديد من الحيوانات ومن بينها أسماك القرش) أو عوامات مليئة بالهواء (كما فى العديد من الأسماك). تمتاز الأجهزة التى تحتوي على NH_4Cl والدهون بأنها غير قابلة للضغط ولذلك لا يتغير حجمها مع تغير الضغط الذى يصاحب الحركة عموديا داخل الماء. أما العوامات فهى قابلة للضغط لذلك يختلف حجمها وعليه تختلف buoyancy الحيوان مع اختلاف عمق المياه. أحدي الطرق لمنع اختلاف حجم العوامة يكون عن طريق اضافة أو ازالة الهواء عند هبوط أو صعود الحيوان.

تقضى معظم الأسماك التى لها عوامات وقتها عند طبقة يصل عمقها 200m. هذا ويتراوح الضغط داخل العوامة من 1 atms عند السطح إلى 21 atms عند عمق 200 m . الماء في توازن مع الهواء ولا يختلف PO_2 داخل الماء مع العمق لأن الماء لا يقبل الضغط .

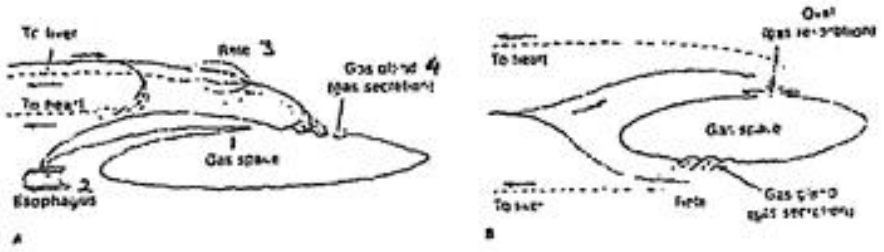
بينما يختلف PO_2 وتركيز باقى الغازات داخل العوامة مع العمق (الشكل 10-36). يتكون الهواء داخل العوامة فى معظم الأسماك من O_2 لكنه قد يحتوى علي CO_2 أو N_2. هذا ويزداد الفرق فى PO_2 بين العوامة والماء مع ازدياد عمق الماء (الشكل 10-36).

عندما تنتقل الأسماك إلى عمق 100 m يتم اضافة O_2 للعوامة. يكون مصدره من البيئة المحيطة وهى الماء. يتم نقل O_2 ضد انحدار تركيزه، في هذا المثال يكون PO_2 داخل العوامة حوالى10 atms بينما لا يتعدى PO_2 في داخل الماء 0.228 atms . لنفهم كيفية حدوث ذلك سنقوم باستعراض شكل العوامة

وهو فى الاسماك العظمية عبارة عن كيس نشأ من مقدمة المعي (الشكل 37-10). هذا وتوجد، فى بعض الأسماك، قناة بين العوامة والمرئ لكنها غير موجودة في معظم الأسماك الناضجة. جدار العوامة قوى ولا يسمح بتسرب الغازات حتى عند الضغط العالى جدا. لكن يتمدد الجدار بسهولة مع ازدياد الضغط. للأسماك التى تستطيع افراز O_2 داخل العوامة شبكة ، تتكون من العديد من حزم الشعيرات (شريانيه ووريدية) التى يسرى عبرها الدم وفق آلية التيار المضاد. مما يسمح بسريان الدم إلى جدار العوامة بدون فقدان كبير للغاز من العوامة، وهذا يقلل من فقدان O_2 من العوامة. لكن كيف يتم افراز O_2 داخل العوامة ؟



الشكل 36-10 الاختلاف في PO_2 داخل الماء مع اختلاف عمق المياه (2) الاختلاف فى PO_2 داخل العوامة مع اختلاف عمق المياه و (3) الاختلاف فى حجم العوامة مع اختلاف عمق المياه



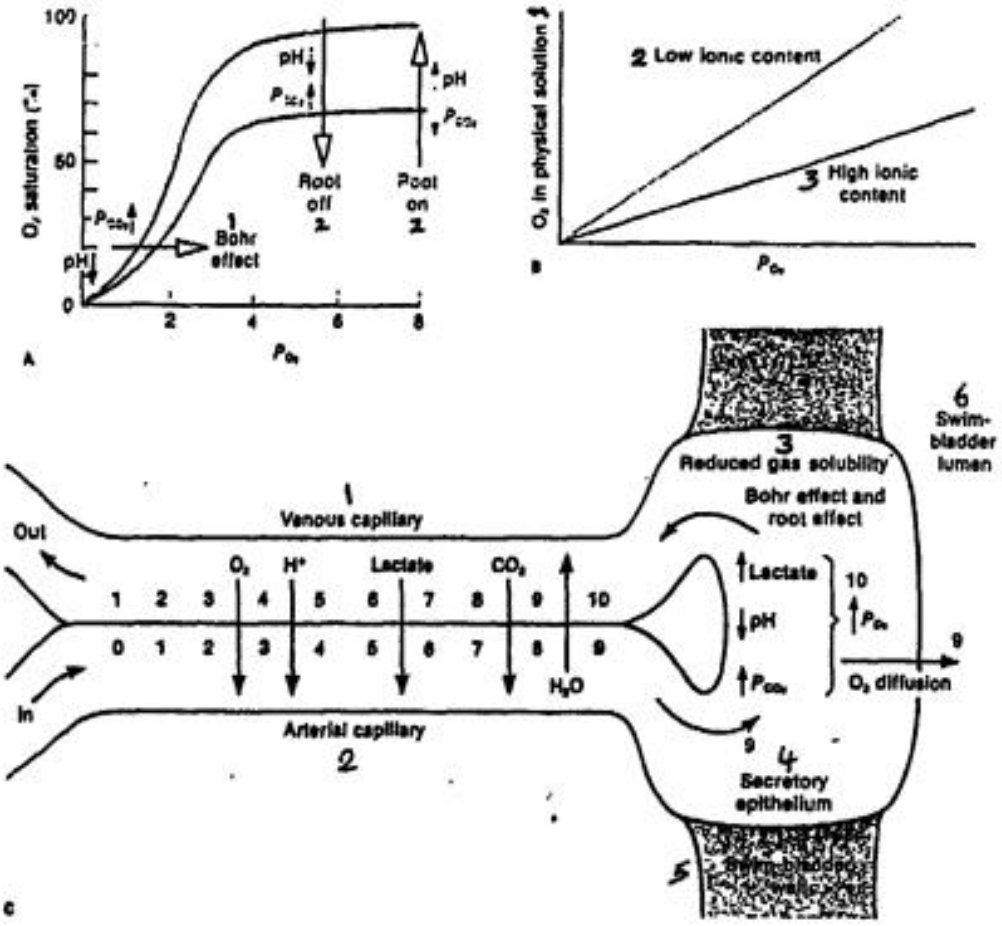
الشكل 37-10 شكل (1) العوامة عند سمك الـ eel توجد قناة تصلها مع (2) المرئ يمر الدم عبر الشبكة الدموية ليغذى (4) غدة الغاز (راجع النص)

أولا : لنأخذ العلاقة بين PO_2، ذوبان O_2 وتركيز أو محتوى O_2. ينتقل O_2 فى الدم مرتبطا بالهيموجلوبين وكذلك ذائبا فى البلازما. إذا تم تحرير O_2 من الهيموجلوبين ليذوب فى البلازما يرتفع PO_2 . يمكن تحرير O_2 من الهيموجلوبين عن طريق انخفاض pH (تأثير بور أو روت Bohr or Root) (الشكل 38-10).

أيضا يتسبب ازدياد التركيز الأيونى في ارتفاع PO_2. بذلك يمكن تحقيق ارتفاع في PO_2 في الدم بتحرير O_2 من الهيموجلوبين أو بازدياد التركيز الأيونى للدم .

يحدث هدم الجلوكوز glycolys فى الطلائية الافرازية للعوامة حتي عند توفر O_2، ينتج عن ذلك 2 جزئ lactate و 2 بروتون لكل جزئ جلوكوز. يؤدى ذلك إلى (1) انخفاض pH الذي يستتبب في تحرير O_2 من الهيموجلوبين و (2) ازدياد التركيز الأيونى. وبذلك انخفاض ذوبانية O_2 . يتسبب كل من هذين التأثيرين في ازدياد PO2 في الطلائية الافرازية أكثر منه داخل العوامة. ينتج عنه انتشار O_2 من الدم إلي داخل العوامة. أيضا يتسبب ازدياد التركيز الأيونى في خفض

نوبانية غازات أخرى مثل N_2 و CO_2 ربما يعلل ذلك التركيز العالى لهذه الغازات الذى تمت ملاحظته داخل العوامات.



الشكل 38-10

(A) تأثير الاختلاف فى PCO_2 و PA على منحنى تفكك الأكسجين عند الاسماك

(1) تأثير بور (2) تأثير روت

(B) تأثير ازدياد التركيز الأيونى على PO (1) وتركيز O_2 الذائب فى الماء

(2) تركيز أيونى منخفض (3) تركيز أيونى مرتفع

(C) رسم توضيحى لعملية افراز O_2 داخل العوامة بواسطة غدة الغاز والشبكة الدموية (1) وريد

(2) شريان (3) انخفاض درجة ذوبان O_2 (بور وروت)(4) طلائية افرازية

(5) جدار العوامة (6) داخل العوامة

الفصل الحادى عشر

أيض الطاقة

وتنظيم درجة حرارة الجسم

الفصل الحادى عشر

أيض الطاقة وتنظيم درجة حرارة الجسم

11-1 ما هو أيض الطاقة ؟

يشمل مصطلح أيض metabolism مجموعة التفاعلات الكيميائية التى تحدث داخل جسم الكائن الحى، وهي تنقسم إلى أيض بنائى anabolism ويتم فيه بناء مواد مركبة من مواد أبسط كيميائيا. مثال لذلك بناء البروتينات من الأحماض الأمينية. (2) أيض هدم catabolism ويتم فيه تكسير المواد المعقدة والجزئيات كبيرة الحجم إلى جزئيات أبسط وأصغر مثال لذلك عملية هدم البروتينات إلى أحماض أمينية.

يمكن قياس الأيض البنائى عن طريق توازن النيتروجين الموجب أى يأخذ الحيوان نيتروجيناً أكثر مما يفقد، وعندما يحدث العكس يكون الأيض هدمى. تصاحب عملية الهدم تحرير الطاقة الكيميائية التى يخزن جزء منها فى جزئ ATP الذي يستخدم بواسطة الخلايا عند تأدية وظائفها المختلفة عندما لا يؤدى الحيوان أى نشاط حركى خارجى ولا يقوم أيضا بتخزين الطاقة الكيميائية، تظهر كل الطاقة التى يتم تحريرها بواسطة العمليات الأيضية أنتاج الطاقة الحرارية كدالة لأيض الطاقة energy metabolism بشرط أن يكون الكائن فى حالة سبات أو ثبات بالنسبة للبيئة المحيطة به. يقاس تحويل الطاقة الكيميائية إلى حرارة فى شكل معدل أيض metabolic rate وتعريفه كالآتي: الطاقة الحرارية التى يتم تحريرها فى وحدة زمنية.

هذا ويختلف معدل الأيض باختلاف نشاط الحيوان. أيضا يتأثر معدل الأيض بدرجة حرارة الطقس، الوقت خلال اليوم، فصول السنة، السن، الجنس، الوزن، الحجم، التوتر، ونوع الطعام المتناول، وكذلك الحمل عند الأمهات. لذلك لا

يمكن أن نقارن بين معدل الأيض للحيوانات المختلفة إلا تحت ظروف معينة ومحكمة. وقد قاد ذلك إلى قياس معدل الأيض الأساسى basal metabolic rate اختصاراً BMR وهو يقاس بالنسبة للثديات والطيور تحت ظروف بيئية وفزيولوجية ثابتة بأقل أجهاد للحيوان.

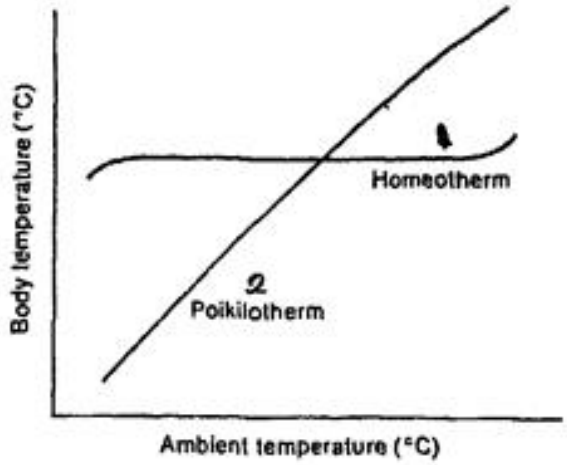
وكذلك معدل الأيض القياسى standard metabolic rate اختصاراً SMR وهو يقاس، بالنسبة للزواحف وغيرها من الحيوانات، فى الحيوان الصائم، عند الراحة وعند درجة حرارة محددة للجسم.

11-2 تصنيف الحيوانات حسب درجة حرارة الجسم

مبدئيا، تصنف الحيوانات حسب مقدرتها على الاحتفاظ بدرجة حرارة ثابتة إلى :

1- حيوانات ثابتة الحرارة homeotherm وهى التى تستطيع أن تحافظ علي درجة حرارة ثابتة للجسم ولا تتأثر كثيراً بدرجة حرارة الجو. إذ تستطيع ابقاء درجة حرارة الجسم عالية عن طريق توليد الطاقة الحرارية والتحكم فى انتاجها وكذلك التحكم في معدل فقدان الحرارة (الشكل 11-1). تستطيع الثديات الحفاظ على درجة حرارة الجسم الداخلية core temp عند 37° إلى 38°C بينما تكون درجة حرارة الجسم الداخلية عند الطيور 40°C . أيضا تستطيع بعض الحيوانات الفقارية الدنيا وبعض اللافقاريات التحكم فى درجة حرارة الجسم بهذه الطريقة. لكن يتم ذلك فيما يبدو أثناء فترات من النشاط أو النمو السريع فى هذه الحيوانات .

2- حيوانات متغيرة الحرارة poikilotherms فى هذه الحيوانات تميل درجة حرارة الجسم إلى التغير مع تغير درجة حرارة البيئة المحيطة.



الشكل 1-11 العلاقة بين درجة حرارة الجسم ودرجة حرارة الجو عند الحيوانات
(1) ثابتة درجة الحرارة(2) متراوحة درجة الحرار

ولكن هذا التصنيف إلى «ثابتة الحرارة» و «متغيرة الحرارة» يبدو غير ملائما ذلك لأن المصطلحين يشيران إلي ثبات درجة حرارة الجسم بينما نجد أن العديد من الحيوانات متغيرة الحرارة، مثل الزواحف، تستطيع تنظيم درجة حرارة جسمها عن طريق التحكم فى التبادل الحرارى مع البيئة.

كذلك نجد أن العديد من الطيور والثديات يسمح، فى بعض الأحيان، بتراوح فى درجة حرارة الجسم أو درجة حرارة أجزاء من الجسم يقود ذلك إلى تبنى أساس آخر للتصنيف يعتمد على تحديد مصدر الطاقة الحرارية. فالحيوانات ثابتة الحرارة صنفت إلى حيوانات يكون مصدر الطاقة الحرارية فيها، تستمد عن طريق توليد الحرارة أيضيا endothermic animals سنشير لها بمصطلح «ذوات الدم الحار» أما الحيوانات متغيرة الحرارة فقد صنفت إلى حيوانات يكون مصدر الطاقة الحرارية فيها مستمد من البيئة المحيطة أى من خارج الجسم ectothermic animals سنشير لها بمصطلح «ذوات الدم البارد»، تقوم الحيوانات ذات دم الحار بتوليد الطاقة الحرارية أيضياً فتدفع بذلك درجة حرارة

insulation جيداً مما يساعدها على الاحتفاظ بالحرارة بالرغم من انخفاض درجة حرارة الجو. عادة يكون معدل الأيض في الحيوان ذى الدم الحار 5 أضعاف الحيوان ذى الدم البارد الذى له نفس الحجم وعند درجة حرارة موحدة. تنتج ذوات الدم البارد الحرارة أيضيا بمعدلات منخفضة نسبيا لذلك يكون التبادل الحرارى مع البيئة أهم من الحرارة الأيضية فى تحديد درجة حرارة الجسم. لهذا السبب يكون عزلها الحرارى ضعيفا .

جدير بالذكر أن هناك نوع ثالث أسميناه «مختلف الحرارة» neterotherm وهي الحيوانات التى تستطيع انتاج الطاقة الحرارية أيضيا لكنها لا تقوم بتنظيم درجة حرارة الجسم فى نطاق ضيق، أى تسمح بترواح درجة حرارة الجسم .

وتشمل بعض الحشرات وبعض الزواحف والأسماك وكذلك بعض الطيور والثديات. وهى تسمح بتفاوت درجة الحرارة مع اختلاف التوقيت اليومى. مثال لذلك، فى الجو الحار، يستطيع حيوان كبير مثل الجمل أن يسمح بارتفاع فى درجة حرارة الجسم أثناء النهار ليفقد الحرارة بعد ذلك أثناء الليل، سنتعرض لذلك لاحقا.

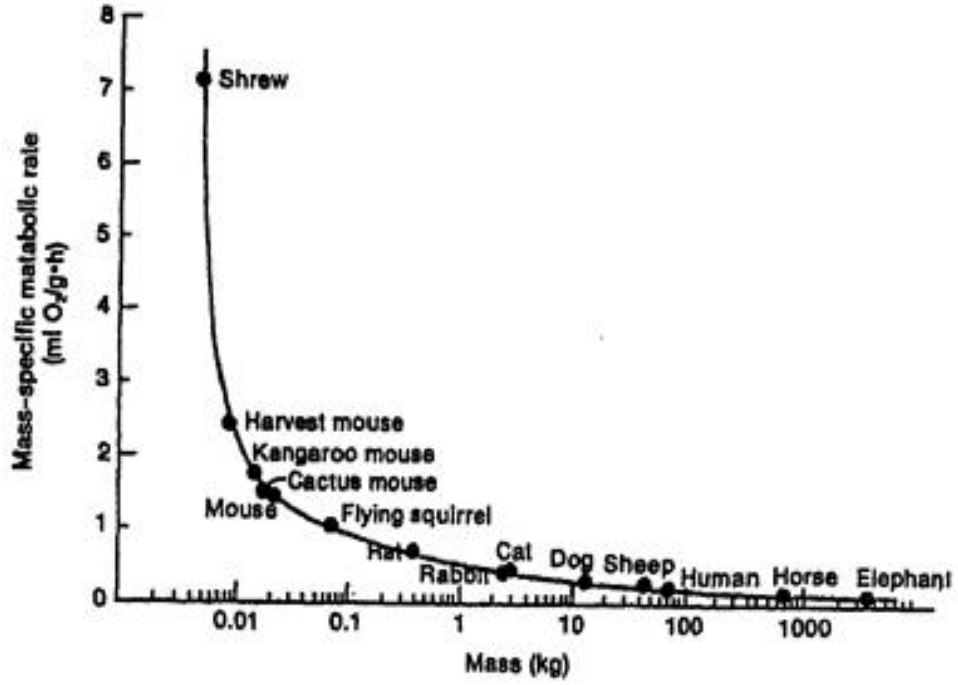
11-3 حجم الجسم ومعدل الأيض

أحد الخواص الهامة لأى حيوان هو حجمه. يحدث ازدياد الحجم اختلافات لاتتسم بالبساطة دائماً وغير متناسبة.

مثلا عند مضاعفة طول أحد الحيوانات التى تعيش على اليابسة تزداد مساحة السطح 4 أضعاف بينما تزداد الكتلة 8 أضعاف مما يترتب عليه نتائج وظيفية وتشريحية مباشرة للحيوان.

مثلا يختلف معدل الأيض مع اختلاف الحجم، وإذا أخذنا التنفس (معدل استهلاك O_2) كقياس لمعدل الأيض نجد أن هناك صلة عكسية بين معدل استهلاك O_2 لكل جرام من حجم الجسم والكتلة الكلية للجسم . بذا نجد أن حيوانا ثدييا يزن 100 g يستهلك طاقة (لوحدة الوزن الواحدة فى الوحدة الزمنية

(cal/g/s) أكثر من حيوان يزن 1000 g . يوضح الشكل (2-11) والجدول (1-11) عدم التناسب بين BMR وحجم الحيوان .



الشكل 2-11 العلاقة بين وزن الجسم (kg) ومعدل الأيض ($mlO_2/g.h$) عند الثدييات

الجدول 1-11 معدل استهلاك الاكسجين بواسطة الثدييات

الحيوان	الوزن g	الاستهلاك الكلى للاكسجين ml/h	الاستهلاك O_2 للجرام ml/g.h
الفأر	25	41.0	1.65
السنجاب	96	98.8	1.03
القط	2.500	1.700	0.68
الكلب	11.700	3.870	0.33
الغزال	42.700	9.590	0.22
الإنسان	70.000	14.760	0.21
الحصان	050.000	71.100	0.11
الفيل	3.833.000	268.000	0.07

يتضح الآن أن الأيض الكلى يزداد مع ازدياد كتلة الجسم بينما يقل معدل

الأيض بالنسبة للوحدة من كتلة النسيج مع ازدياد كتلة الجسم. كما أن معدل الأيض فى الحيوانات ذات الدم الحار يتناسب مع مساحة سطح الجسم ذلك لأن معدل انتقال الحرارة بين جسم الحيوان والبيئة المحيطة يتناسب مع سطح التلامس بينهما أى مساحة سطح الجسم. هذا وبالنسبة لأى جسم بكثافة محددة وبشكل متناسق نجد أن مساحة السطح تختلف مع الأس 0.6 للكتلة بينما تزيد الكتلة كمعب الضلع وتزيد المساحة كمربع الضلع فقط (يقصد بالضلع الأبعاد الخطية للجسم).

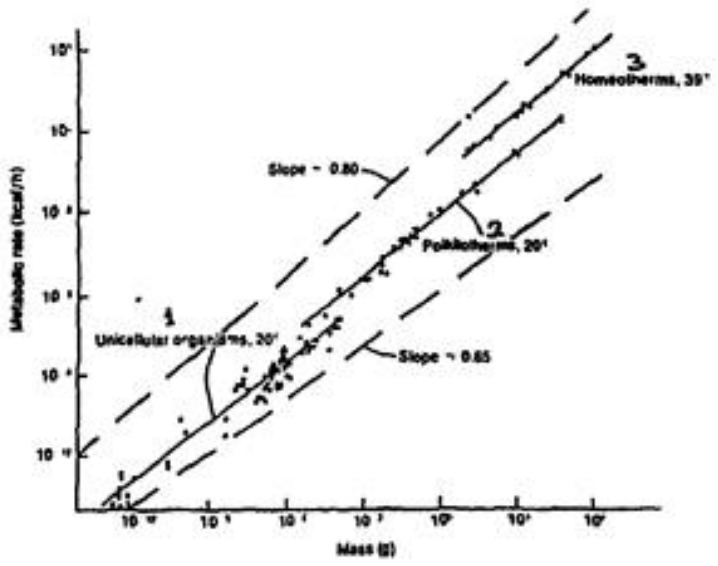
ولقد تم تدعيم هذه النظرية إذ وجد أن معدل الأيض فى الحيوانات ذات الدم الحار يتناسب مع مساحة السطح بذا يكون للحيوانات صغيرة الحجم معدل أيض أكبر للوحدة من الكتلة. لكن هذا لاينطبق عند مقارنة حيوانات من أنواع مختلفة.

هذا وقد تبلورت نظرية أخرى تقول بأن ما يتناسب مع معدل الأيض هو مساحة القطاع العرض وليس مساحة سطح الجسم. إذ تتناسب مساحة القطاع العرضى مع أس 0.75 من الكتلة. وقد أمكن إثبات ذلك فى عدد كبير من الحيوانات (الشكل 3-11). ربما تمت برمجة مساحة القطاع العرضى ومعدل الأيض وراثيا ، وكل على حدة، بحيث تكون كل منها مثالية بالنسبة لحجم الحيوان.

11-4 تأثير درجة الحرارة على الحيوان : اعتماد معدل الأيض على درجة الحرارة

يعتمد معدل التفاعلات الأنزيمية إلى درجة كبيرة على درجة الحرارة. لذلك فإن الأيض داخل أنسجة الإنسان وبالتالى حياته يعتمدان علي ابقاء درجة حرارة البيئة الداخلية للحيوان عند القيمة المناسبة.

هذا ولاختبار تأثير درجة الحرارة على معدل التفاعلات الانزيمية يكون من المفيد الحصول على معامل حرارى temperature quotient بمقارنة المعدل عند درجتى حرارة مختلفتين، تؤخذان بفارق10°C . ثم يحسب ما يعرف بواسطة Q_{10} باستخدام معادل فانت هوف Van't Haff



الشكل 3-11 العلاقة بين أدنى معدلات الأيض kcal / h ووزن الجسم g عند الحيوانات (1) وحيدة الخلية ، (2) متراوحة درجة الحرارة و (3) ثابتة درجة الحرارة بالنسبة للمجموعات الثلاث تكون العلاقة الأسية (4) حوالى

$$n = a M^b$$

حيث n تساوى BMR او SMR، M وزن الجسم، a معامل التناسب يختلف بالنسبة لنوع الحيوانات المختلفة ، b أس يعبر عن معدل التغير فى n مع التغير فى الوزن.

$$Q_{10} = \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^{10/(t2-t1)} \qquad (1)$$

K_2, K_1 ثوابت تعبران عن سرعة التفاعل الأنزيمى عند درجة حرارة t_2, t_1 . يتم تعديل المعادلة كما يلى لتكون أكثر مناسبة لنقاشنا الحالى :

$$Q_{10} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{10/(t2-t1)} \qquad (2)$$

n_2, n_1 عبارة عن معدل الأيض عند درجة حرارة t_1, t_2 . الحرارة t_2, t_1 وبما أن درجة حرارة تختلف بمقدار 10°C فنختصر المعادلة لتصبح .

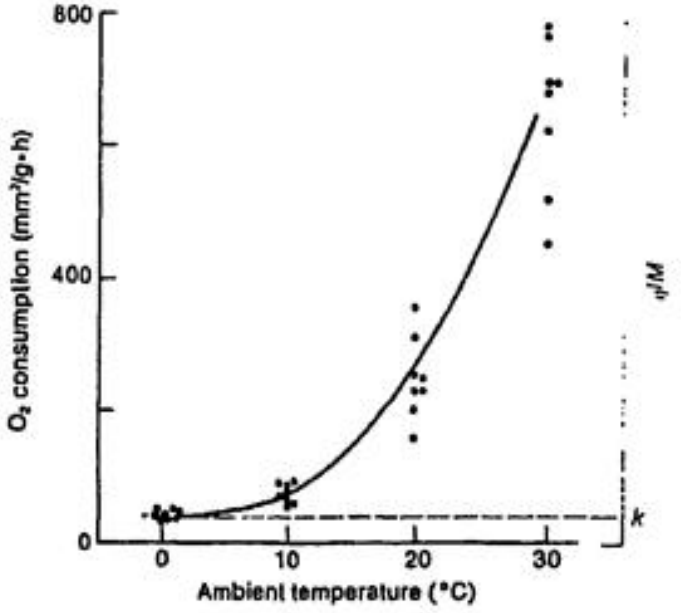
$$Q_{10} = \left(\frac{n\,(t+10)}{n_1}\right) \qquad (3)$$

حيث أن n_t هو معدل الأيض عند درجة الحرارة الصغرى و $n_{(t+10)}$ عند درجة الحرارة العظمى . تجدر هنا ملاحظة أن Q_{10} ليس لها أى أساس نظري بل هى قيمة تجريبية بحتة . كما أنها تختلف باختلاف مدى درجة الحرارة لذلك من المهم تسجيل قيمة t_1 و t_2 التى يتم عندها تحديد قيمة Q_{10} . عموما تكون قيمة Q_{10} للتفاعلات الكيميائية بين 2 و 3 بينما تكون قيمة Q_{10} للتفاعلات الفزيائية، مثل الانتشار ، أكثر انخفاضا حوالى 1.0 تسمح درجة الحرارة الطبيعية داخل الوسط المائى ببقاء البروتينيات فى حالة استقرار كما تسمح بدرجة الحرارة المثلى للتفاعلات الانزيمية (2° – إلى 4°C).

لذلك لا تمثل درجة حرارة البيئة المحيطة مشكلة كبيرة بالنسبة للحيوانات التى تعيش داخل الماء، والتى تعتمد على مصدر خارجى لاكتساب الحرارة. لكن بتوجب على نظيرتها التى تعيش علي ظهر اليابسة التعامل مع درجة حرارة تتراوح بين 65°C – إلى 70°C+ هذا ويزداد معدل الأيض أسياً مع درجة حرارة الجسم (الشكل 4-11) ، والمعادلة التالية :

$$\frac{n}{M} = K\,10^{\,b/t} \qquad (4)$$

n/M هى الكثافة الأيضية metabolic intensity وتقاس بواسطة (hr/kg/ kcal).
k و b ثوابت و t درجة الحرارة.

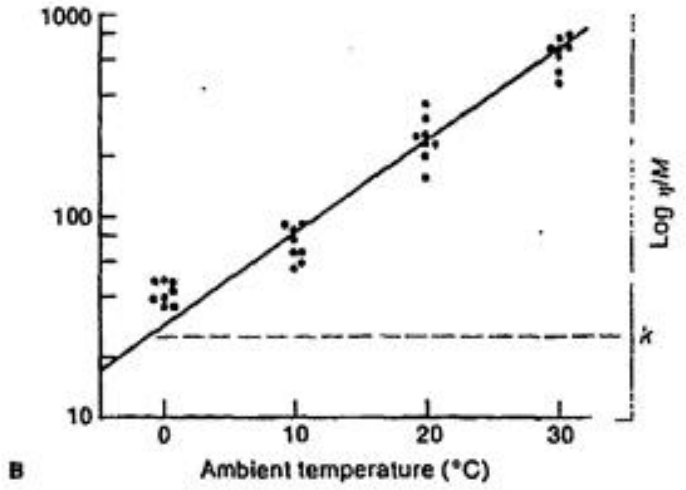


الشكل 4-11معدل استهلاك O2 (mm3/ g.h) عند درجات الحرارة المختلفة لبراقانة الفراش . يزداد معدل الأيض آسيا مع درجة الجسم (المعادة (4))

بتحويل المعادلة (4) إلى علاقة لوغاريثمية نحصل على ،

$$\log \frac{n}{M} = \log K + b_1 t \qquad (5)$$

في هذه الحالة يعطينا ميل الخط أى الأزدياد فى لوغاريثم n/m لدرجات الحرارة المختلفة (الشكل 5-11).



الشكل 5-11 العلاقة اللوغارثمية للرسم فى الشكل 4-11

$$\log n/m = \log k + b1t$$

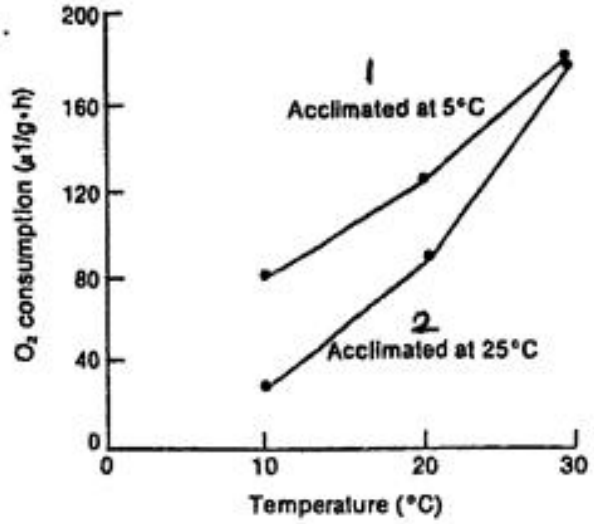
n/m الكثافة الايضية (kacl / kg/ hr) ، b, k ثوابت t درجة الحرارة b1 ميل الخط أى الازدياد في لوغاريتم n/m عند درجات الحرارة المختلفة

11-5 التكيف الحرارى

في العديد من أنواع الاجهاد الطبيعى من الحرارة أو البرودة فى البيئة، تظهر تغييرات تعوضية فى الفزيولوجى أو المورفولوجى للحيوان تساعده علي حمل هذا الاجهاد.

يسمى التغير الكلى الذى يحدث للحيوان acclimatization لكننا هنا سنحصر أنفسنا في مفهوم التكيف acclimation والذى يعني التغييرات الفزيولوجية التى تحدث مع الوقت داخل المعمل كاستجابة لتغيير حالة بيئية واحدة مثل درجة الحرارة.

لقد تم توضيح التكيف لكل نسيج علي حدة وكذلك بالنسبة للحيوان ككل. مثلاً وجد، عند درجة حرارة معينة، أن للنسيج العضلى للضفادع فى فصل الشتاء خواص تختلف عن النسيج العضلى للضفادع فى فصل الصيف. فى



الشكل (6-11).

الشكل 6-11معدل استهلاك O_2 عند درجات الحرارة المختلفة
(1) تكيف عند 5°C و (2) تكيف عند درجة حرارة 25°C

تم رسم استهلاك O_2 عند درجات الحرارة المختلفة بالنسبة للضفادع تاقلمت على 5°C و25°C.

يتضح أن للرسمين ميلين مختلفين . هذا يدل على وجود اختلاف فى تأثرية الأنزيم بدرجة الحرارة بين المجموعتين. فى بعض الحالات يكون الاختلاف مع التاقلم نتيجة لاختلاف فى تركيز الانزيم بين المجموعتين فى هذه الحالة نلاحظ فقط ازاحة displacement دون تغيير في ميل الرسم (الشكل 7-11).

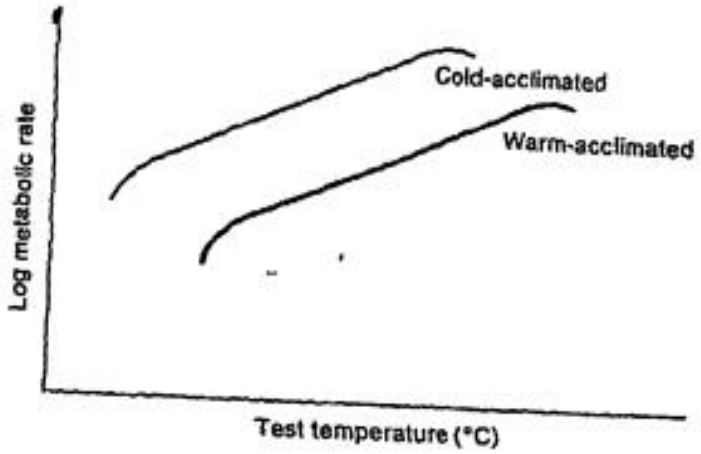
ما الذى يحدد درجة حرارة الجسم ؟

تعتمد درجة حرارة الجسم فى الحيوانات ذوات الدم البارد وذوات الدم الحار، علي كمية الحرارة (سعرات) للوحدة من وزن النسيج. يعتمد معدل التغيير

فى درجة الحرارة علي،(1) معدل توليد الحرارة أيضيا بواسطة الجسم، (2) معدل اكتساب الحرارة من البيئة و(3) معدل فقدان الحرارة أى

درجة حرارة الجسم = الحرارة الأيضية + الحرارة المكتسبة – الحرارة المفقودة.

= الحرارة الأيضية + الحرارة المتبادلة



الشكل 7-11 لوغاريثم معدل الأيض عند درجات الحرارة المختلفة بالنسبة إلي حيوان (1) تكيف على البرد و (2)تكيف على الحر يوضح تشابه ميدان الرسمين أن للحيوانين Q_{10} متشابه

هناك ثلاث آليات تؤثر في عملية انتاج الحرارة أيضيا وهى، (1) آليات سلوكية مثل التمارين أو النشاط العضلى، (2) آليات بواسطة الجهاز العصبى المستقل و(3) آليات نتيجة لتأقلم الحيوان مع البيئة وهى تأخذ زمنا أطول لتظهر عن سابقيتها.

هذا ويعتمد تبادل الحرارة مع البيئة علي،(1) مساحة سطح الجسم، (2) اختلاف درجة حرارة الجسم عن درجة حرارة البيئة المحيطة، (3) التوصيل الحرارى specific heat conductance لسطح الحيوان. يغطى جسم الحيوانات ذوات الدم الحار ريش ، فراء أو صوف ليزيد من العزل الحرارى.

11-6 الصفات الحرارية للحيوانات (أ) ذوات الدم البارد

11-6-1 فى البيئات الباردة

كما ذكرنا أعلاه، تعتمد درجة الحرارة في الحيوانات ذوات الدم البارد علي درجة حرارة البيئة المحيطة لذلك ربما تتجمد هذه الحيوانات إذا تعرضت لدرجات حرارة منخفضة جدا. عموما لا يستطيع أي حيوان أن يعيش إذا تجمد الماء كلية داخل أنسجته الحية. حيث أن تكوين بلورات الثلج داخل الخلايا يمزق الخلايا متسبباً فى موتها. وقد تغلبت بعض الحيوانات علي هذه المشكلة. مثلا تستطيع بعض الخنافس تحمل درجات حرارة منخفضة تحت الصفر، إذ تتكون بلورات الثلج خارج الخلايا أى فى السائل البينى، ساحبة الماء من الخلايا وتكون النتيجة ارتفاع تركيز السائل داخل الخلايا وبذا تنخفض درجة تجمده . كما أن بلورات الثلج الت تتكون فى السائل البينى لا تؤدى إلى تحطيم الخلايا.

مثال آخر، تمر بعض الحيوانات بحالة تبريد مفرطة " supercooling" أى يمكن تبريد سوائل الجسم إلي ما دون الصفر من غير أن تتجمد حيث لا توجد نواة لتكوين بلورات الثلج. وقد تمت ملاحظة ذلك فى بعض الأسماك التى تسكن قاع الخلجان العنيفة العميقة القطبية.

مثال آخير، توجد، فى بعض المفصليات ، مادة ضمن مكونات سوائل الجسم مضادة للتجمد antifreeze مثل مادة الجليسرول glycerol التى تقوم بخفض درجة التجمد إلى -17°C . كذلك تتحمل Brachon larvae درجة حرارة تعمل -47°C دون أن تتجمد نسبة إلى وجود مادة مضادة للتجمد.

11-6-2 فى البيئات الحارة :

بما أن تبادل الحرارة مع البيئة المحيطة نو صلة وثيقة بسطح الجسم

فسنجد أن درجة حرارة الجسم، في ذوات الدم البارد، ترتفع وتنخفض بسرعة مع التغير فى درجة حرارة البيئة المحيطة.

تقوم بعض الزواحف بتنظيم درجة الحرارة عن طريق تنظيم معدل خفقان القلب ومعدل سريان الدم لسطح الجسم.

11-6-3 مزايا المصدر الخارجى للحرارة

(1) بما أن درجة حرارة الحيوان قريبة جداً من درجة حرارة البيئة المحيطة بذلك يستهلك الحيوان طاقة أقل في انتاج الحرارة وعامة تعيش مثل هذه الحيوانات بمعدل أيضي منخفض. لذلك فهى توجه القسم الأكبر من الطاقة للنمو والتوالد.

(2) أيضا يستهلك الحيوان ماء أقل لأنه يفقد القليل منه عن طريق التبخر. كما لا يحتاج الحيوان لأنه يكون ذو حجم كبير ليقلل من نسبة السطح إلى الحجم.

(3) كذلك لا تحتاج الحيوان لتناول كميات كبيرة من الطعام لكن من سلبيات هذه الآلية هو أن فترة النشاط تكون قصيرة جدا نتيجة «لدين الأكسجين».

كما لا يعتبر الحيوان ذا الدم البارد أقل تعقيداً فى آلياته من ذى الدم الحار فلكل من آليات «المصدر الداخلى» و «المصدر الخارجى» للحرارة قوتها وضعفها . حيث توفر كل منها مزايا مختلفة عند الأحوال البيئة والمناخية المختلفة. ففى المناطق المدارية، تتنافس الحيوانات خارجية المصدر مع الحيوانات داخلية المصدر بنجاح وأحياناً تفوق الثديات فى كل من تنوعها وعددها. يعتقد أن هذا النجاح نتيجة للعوامل التالية (1) يتيح الجو الدافئ فى المناطق المدارية للزواحف أن تنشط اثناء الليل بينما يكون نشاط معظم الثديات المدارية أثناء النهار .

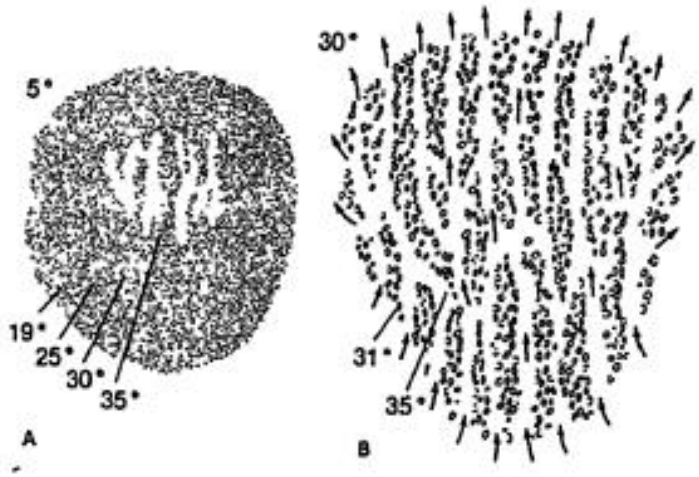
(2) توفير الطاقة الكبير حيث لا تحتاج فى الجو الدافئ أن تستهلك طاقة لكى ترفع درجة حرارة الجسم.

هذا وتتفوق الحيوانات داخلية المصدر علي الحيوانات خارجية فى المناخات الباردة حيث تكون الزواحف اكثر خمولا وأقل نجاحا فى افتراس الحيوانات، هذا ويرجع تفوق الثديات لمقدرتها على ابقاء حرارة الجسم مرتفعة عن طريق التوليد الأيضى للحرارة. وعموما كلما بعدنا عن خط الاستواء كلما زادت حيوانات اليابسة داخلية المصدر الحرارى. فمثلا لا توجد فى المناطق القطبية زواحف أو حشرات. كما لا تقطن المناطق شبه القطبية سوى أنواع بسيطة من البرمائيات والحشرات.

11-7 الاستراتيجيات الحرارية للحيوانات مختلفة الحرارة .

تقع بين الحيوانات داخلية المصدر الحرارى وخارجية المصدر الحرارى الأنواع التي يمكننا أن نطلق عليها مختلفة المصدر وهى تشمل بعض الحشرات والأسماك مثال هام وربما غريب لهذا النوع نجده فى أسراب النحل honeybee swarms . تقوم النحلة بتنظيم درجة حرارة جسمها عن طريق حركات ارتعاشية وكذلك عن طريق تغيير شكل السرب (الشكل 8-11). يصبح السرب أقل حجماً عندما تكون درجة حرارة البيئة المحيطة منخفضة (مثلاً 5°C) بذلك تعدل من معدل مرور الهواء داخل السرب، وعندما يقرب من 35°C ، وعلى العكس من ذلك ، فى الجو الدافئ، يتمدد السرب سامحا لمزيد من الهواء أن يتخلله ، بذلك تزيد درجة الحرارة داخل السرب عن الدرجة المحيطة بدرجات قليلة فقط.

تستطيع بعض الأسماك ، مثل سمك التونا، رفع درجة حرارة الجسم أعلى من البيئة المحيطة. وهى تحافظ علي عضلات العوم عند درجة حرارة تسمح بالنشاط العضلى وذلك عن طريق ، (1) توجد هذه العضلات فى الطبقات العميقة من الجسم، (2) يمكن منع تدفق الحرارة المتولد فى هذه الانسجة عن طريق آلية التيار المضاد لتدفق الدم بين سطح الجسم وهذه العضلات، (3) تعوم هذه الأسماك باستمرار بذلك لا تهبط درجة حرارة العوم إلى مستوى درجة الحرارة المحيطة بالجسم.



الشكل 8-11توليد الحرارة وتنظيم درجة الحرارة بواسطة سرب swarm من النحل (A) فى الجو البارد (5°C) يتم توليد الحرارة بتجمع النحل (أى منع سريان الهواء) والقيام بالحركات الارتعاشية (B) فى الجو الساخن (30°C) يبعد النحل عن بعض سامحا بتخلل الهواء ويقلل من توليد الحرار

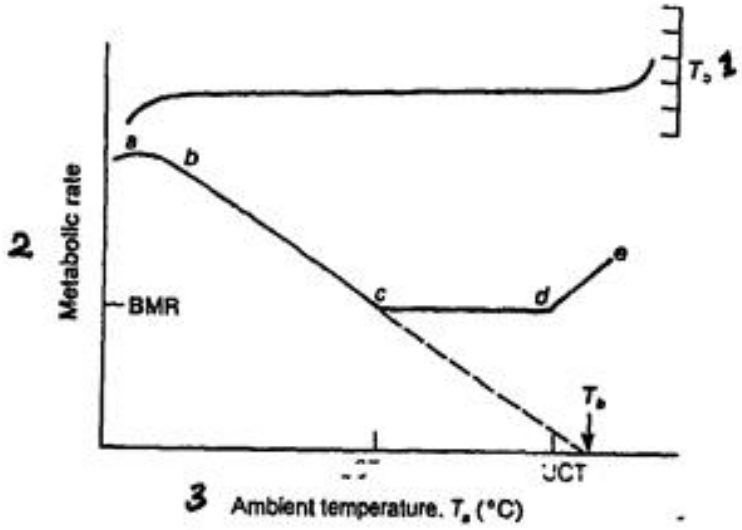
11-8 الصفات الحرارية عند الحيوانات داخلية المصدر الحرارى

عند الحيوانات ذوات الدم الحار والتى تولد الحرارة أيضيا، وتشمل معظم الثديات والطيور، يتم تنظم درجة حرارة الجسم بواسطة آليات تنظيم معدل انتاج وفقدان الحرارة بحيث يحافظ الجسم علي درجة حرارة ثابتة ومستقلة عن درجة حرارة البيئة المحيطة. فى الثديات تكون درجة حرارة الجسم الداخلية ثابتة عند 37°C إلى 40°C وفى الطيور عند 37°C إلى 41°C ولكن تكون درجة حرارة الأطرف أقل ثباتاً، ربما تصل فى بعض الأحيان درجة حرارة البيئة المحيطة. هذا ويتساوى BMR عند الحيوانات داخلية المصدر الحرارى بنفس الحجم. ويصل 3 إلى 10 أضعاف SMR عند الحيوانات خارجية المصدر الحرارى وعند نفس درجة حرارة الجسم.

11-8-1 النطاق الحرارى المحايد

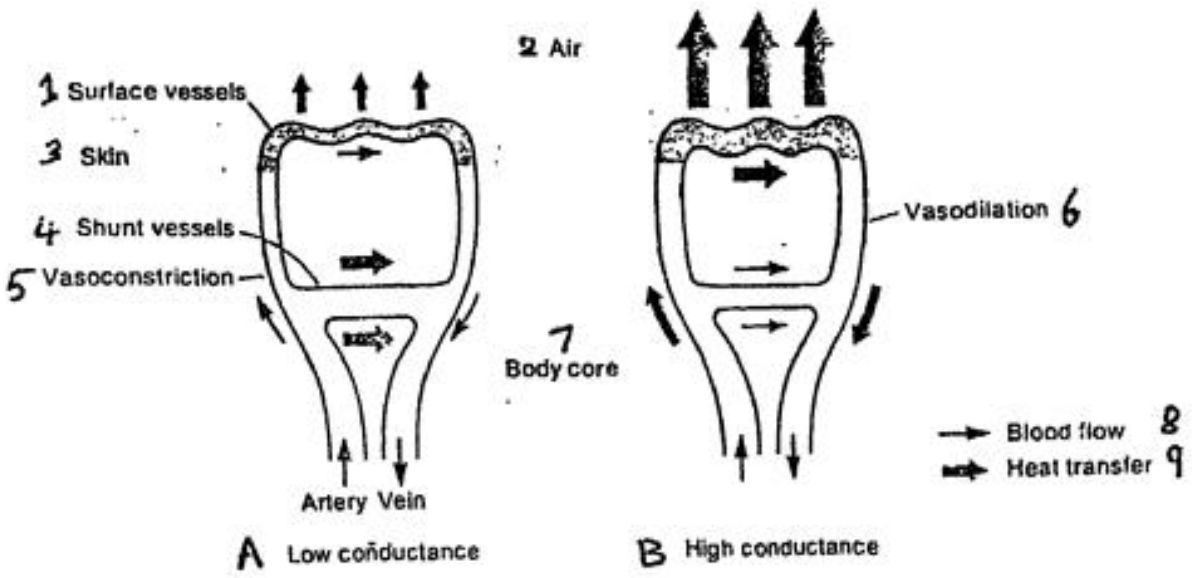
كلما اقتربت درجة حرارة البيئة من النهايات القصوى كلما ازداد النشاط

الأيضى أو خلافه الذى يقوم به الحيوان داخلى المصدر للحفاظ على درجة حرارة ثابتة للجسم. هذا ويكفى انتاج الحرارة الأساسى ليعوض الحرارة المفقودة للبيئة عندما تكون درجة الحرارة وسطا. فى هذا المدى من درجة الحرارة والذى يعرف بالنطاق الحرارى المحايد thermoneutral zone أختصارا TZN (الشكل 9-11) (الخط Cd).

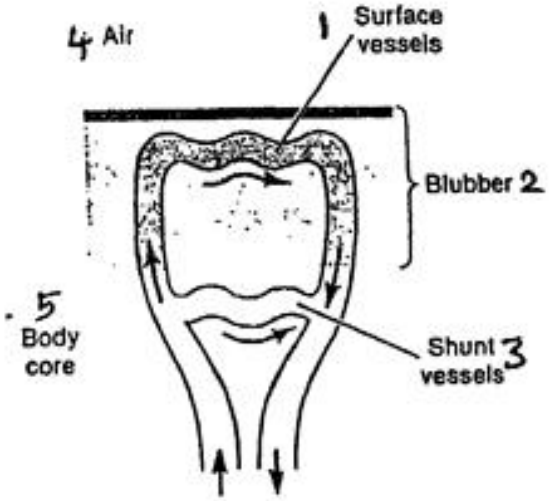


الشكل 9-11 درجة حرارة الجسم (الرسم العلوى) (2) ومعدل الأيض (الرسم السفلى) حيوان داخلى مصدر الحرارة وثابت الحرارة عند (3) درجات الحرارة المختلفة للجو

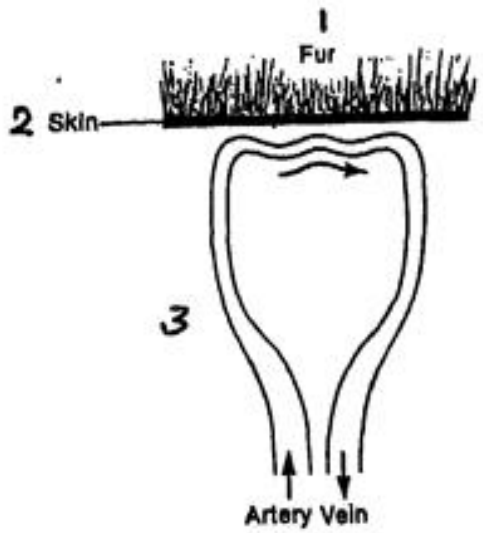
يمكن للحيوان أن يحافظ على ثبات درجة الحرارة عن طريق تغيير توصيل سطح الجسم، تشمل هذه الآلية استجابات الأوعية الدموية (الشكل10-11 والشكل11-11)، تغيير وضع الجسم لتغيير المناطق المكشوفة من سطح الجسم. كذلك نشاط العضلات التى تتحكم فى شعر الجسم أو الصوف وخلافة فتزيد من كفاءة هذا الغطاء (الشكل 12-11). عندما تنخفض درجة حرارة البيئة، تصل إلى درجة حرارة حرجة the lower critical temp . أختصاراً LCT (الشكل 9-11) لا يستطيع عندها الحيوان داخلى مصدر الحرارة تعويض فاقد الحرارة عن طريق BMR والآليات المذكورة أعلاه.



الشكل 10-11 توصيل سطح الجسم للحرارة عن طريق تنظيم سريان الدم للجلد (1) أوعية سطحية
* A توصيل ضعيف B توصيل عالى (2) الهواء (3) الجلد (4) تحويل سريان الدم
(5) انقباض الأوعية (6) اتساع الأوعية (7) سريان الدم (8) توصيل الحرارة



الشكل11-11 وجود طبقة من الشحم تحت الجلد تعمل كعازل حرارى خاصة عند تحويل سريان الدم يبدأ عن الجلد (1) أوعية سطحية (2) طبقة الشحم (3) تحويل سريان الدم (4) الهواء (5) داخل الجسم تشير الأسهم إلي سريان الدم



الشكل 12-11 وجود الشعر الكثيف (الفراء) كعازل حرارى على الجلد (1) الفراء (2) الجلد (3) داخل الجسم تشير الأسهم إلى سريان الدم

على الحيوان ، عند درجة حرارة أقل من LCT أن يزيد انتاج الحرارة فوق المعدل الأساسى وذلك عن طريق التوليد الحرارى thermogensis (سنتعرض له لاحقا). يزداد انتاج الحرارة خطيا مع انخفاض درجة الحرارة عن LCT فيما يعرف بـ zone of metabolic regulation اختصاراً ZMR (الشكل 9-11) (الخط cb). هذا وإذا انخفضت درجة حرارة البيئة عن ZMR، (1) فشل آليات تعويض الحرارة المفقودة، (2) تنخفض درجة حرارة الجسم.، (3) ينخفض معدل الأيض، (4) يدخل الحيوان فى حالة فقدان حرارة hypothermia (الشكل 9-11) (5) إذا استمرت الحالة يستمر الحيوان فى فقدان المزيد من الحرارة إلى أن يموت .

نلاحظ من الرسم فى الشكل (9-11) أن TNZ يقع تحت درجة حرارة الجسم الاعتيادية Tb (37° إلى 40°C). لماذا هذا الوضع ؟ لنأخذ فى الاعتبار أن فقدان الحرارة بواسطة الآليات السلبية لا يمكن أن يتحقق عند درجة حرارة أعلى من درجة الحرارة المفقودة .upper enitical temp أختصارا UCT وذلك لأن عـزل السطح يكون فى أقله (أى لا يمكن أن يكون أقل من ذلك). إذن أى

ازدياد فى درجة حرارة الجسم ، ما لم توظف آلياته للتخلص من الحرارة. بدون هذه الآليات يتسبب فى ارتفاع درجة الحرارة عن TNZ فى ارتفاع درجة حرارة الجسم hyperthermia، وذلك لأن الحرارة التي يتم انتاجها بواسطة معدل الأيض الأساسى لا تتشتت إلى خارج الجسم بنفس السرعة التى تتولد بها.

2-8-11 توليد الحرارة

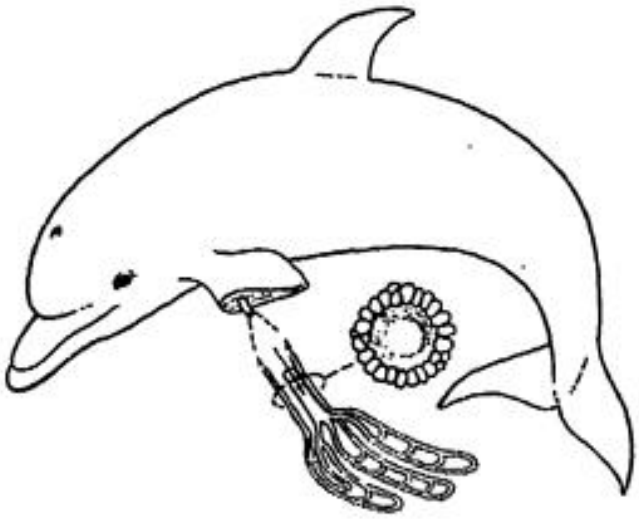
عندما تهبط درجة حرارة البيئة عن LCT يستجيب الحيوان الداخلى عن طريق توليد المزيد من الحرارة من مخزون الطاقة لديه بذلك يحول دون انخفاض درجة حرارة الجسم. هنالك طريقتان رئيسيتان لتوليد الحرارة بخلاف التمارين الرياضية وهى . (1) توليد الحرارة الارتعاشى shivering thermogonsis و (2) توليد الحرارة اللارتعاشى non-shivering thermogonsis. يتم فى كلتيهما تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة حرارية.

عند الارتعاش ، يتم استخدام عملية انقباض العضل لتوليد الحرارة عن طريق تنشيطها بواسطة الجهاز العصبي السمبتاوى. توجد هذه الآلية فى كل من الحشرات والفقاريات. في النوع الثانى اللارتعاشى، يتم تنشيط نظم انزيمية لتكسير الدهون، خاصة الدهون البنية ، داخل الجسم وأكسدتها محررة بذلك الطاقة الحرارية. توجد الدهون البنية فى منطقة العنق وبين الكتفين ويعزى لونها إلى كثره وجود أحد الانزيمات المرتبطة بالميتوكوندريا mitochondrial chrome oxidaze. للدهون البنية تغذية دموية عالية. هذا وتتم أكسدة هذه الدهون داخل الخلايا الدهنية بخلاف الدهون العادية التى يتم هدمها أولا إلي أحماض دهنية، يتم تحريرها فى الدورة الدموية ، ومن ثم تأخذها الأنسجة الأخرى حيث تتم أكسدتها هنالك.

ترتفع درجة حرارة الدهون البنية ، أثناء عملية الأكسدة، ويتم توزيع هذه الحرارة لباقى الجسم بواسطة الدورة الدموية. يوجد هذا النوع من التوليد الحرارى عند الثديات التى تمر بفترة بيات شتوى أو سكون حيث يساعد فى إعادة الدفء سريعا للجسم اثناء عملية القيام من السبات arousal. كذلك توجد الدهون البنية فى الأطفال حديثى الولادة حيث يوفر طريقة لتدفئة الجسم إذا ما تعرض الطفل لانخفاض فى درجة الحرارة.

11-8-3 الحيوانات داخلية المصدر الحرارى فى الجو البارد لقد طورت

الحيوانات داخلية المصدر الحرارى التى تعيش فى الجو البارد العديد من الآليات الوقتية والدائمة لتساعدها فى الاحتفاظ بالطاقة الحرارية داخل الجسم. من الآليات الوقتية (1) نفش الفراء ، (2) الاحتماء بالأماكن المحمية مما يقلل من فقدان الحرارة عن طريق الحمل الحرارى convection والتشتيت بواسطة الرياح.من التطورات طويلة الأمد، وجو طبقة سميكة فى شكل دهون تحت الجلد. كذلك الفراء أو الريش السميك أحد أهم التكيفات للمناخ البارد عند الثديات، هو كبر حجم الجسم حيث تقل نسبة مساحة السطح للحجم فيقل بذلك فقدان الحرارة عن طريق الجلد. كذلك يتم التحكم فى فقدان الحرارة فى كل من الحيوانات داخلية المصدر الحرارى وخارجية المصدر عن طريق تحويل سريان الدم بعيدا عن الجلد (الشكل 10-11). كذلك الاستفادة من آلية التيار المضاد بين الدم الذى يغذى الجلد والأطراف والدم الذى يغذى داخل الجسم حيث يتم فقدان الحرارة من الدم الشريانى الدافئ الوارد إلى الجلد ليحملها الدم الوريدى الصادر من الجلد، فتعود بذلك الحرارة إلى داخل الجسم مرة أخرى (الشكل 11-13).



الشكل 13-11آلية التيار المضاد عند الطرف الأمامى للدلفين وهى تحفظ درجة حرارة الجسم الداخلية من الفقدان (راجع النص)

وكنتيجة لانخفاض درجة الحرارة فى المناطق القطبية والشبة قطبية تواجه أرجل وأقدام الثديات والطيور درجة حرارة تقرب من درجة التجمد. هذا قد يؤدى إلى تغيير صفات «سيولة الطبقة الدهنية المزدوجة للخلايا تفاديا لهذه المشكلة نجد أن الدهون فى الأطراف، عند الثديات، أقل تشبعا من الدهون داخل الجسم. ولذلك فهى تذوب ، أى تظل سائلة، عند درجة حرارة أكثر انخفاضا.

11-8-4 تشتيت حرارة الجسم

فى المناخ الحار الجاف ، تكون للحيوانات كبيرة الحجم مزايا على الحيوانات الصغيرة نسبة إلى انخفاض نسبة مساحة السطح إلى الكتلة . وكذلك السعة الحرارية الواسعة للحيوانات الكبيرة. فإذا أخذنا الجمل كمثال لحيوان كبير الحجم نجح فى غزو الصحراء حيث ترتفع درجة الحرارة اثناء النهار مع شح المياه. يستطيع الجمل وغيره من الثديات الكبيرة، امتصاص قدر من الحرارة اثناء النهار تاركاً بذلك درجة حرارة الجسم لترتفع بحوالى 3 إلى 4°C أثناء النهار.

ثم يفقد هذه الحرارة اثناء الليل حيث يكون الجو معتدلا بل يسمح الحل بانخفاض درجة حرارة الجسم الداخلية العديد من الدرجات تحت المعدل الطبيعى بذلك يبدأ اليوم بنقص حرارى يسمح له بامتصاص المزيد من الحرارة اثناء النهار. بممارسة هذا القدر المحدود من الاستراتيجية المختلطة يستطيع الجمل لتحمل درجة الحرارة المرتفعة فى الصحراء دون الحاجة إلى تشتيت الحرارة عن طريق تبخر الماء وهو كما نعلم نادر الوجود فى الصحراء.

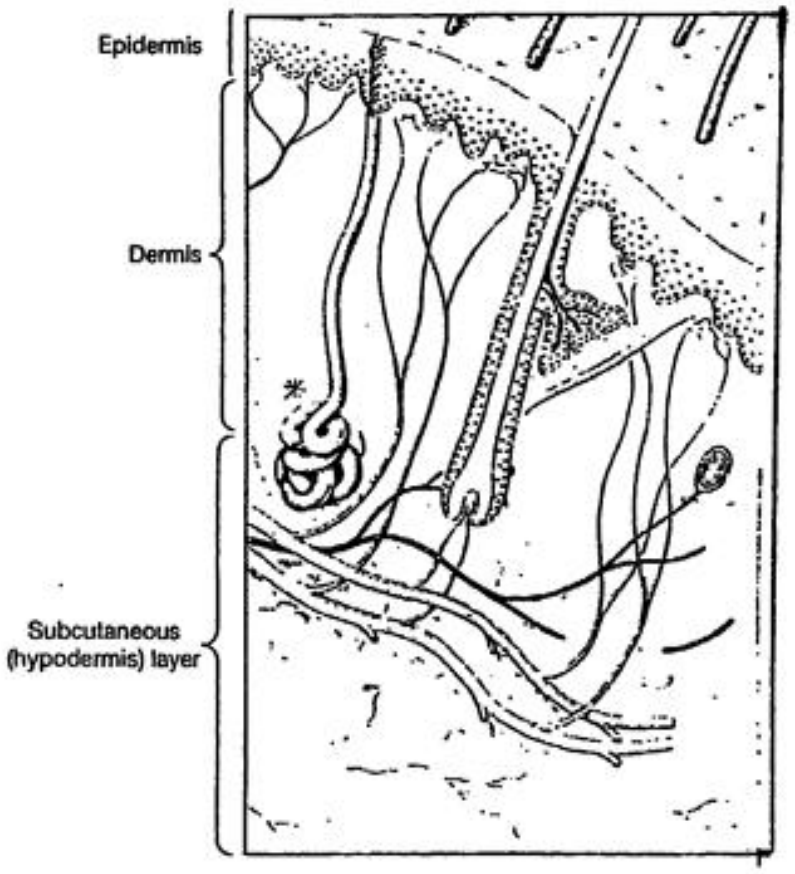
تمتلك بعض الثديات التى تعيش فى مناخ ترتفع فيه درجة الحرارة، بعض المناطق في جسمها يكون فيها الغطاء (الشعر أو الوبر) أقل كثافة بل قد ينعدم ليسمح بتشتيت الحرارة عن طريق الاشعاع أو التبخر أو التوصيل .

أيضا يعدل الحيوان من وضع جسمه أو وجهته بالنسبة للشمس بحيث يؤثر على معدل امتصاص أو فقدان الحرارة.

التبريد عن طريق تبخر الماء

أكثر الطرق كفاءة لتشتيت الحرارة الزائدة هى عن طريق تبخر الماء الذي يمتص 585 cal لكل جرام من الماء. تنشر بعض أنواع الزواحف والطيور وبعض الثديات الماء المتاح (فى شكل لعاب، بول أو المياه الرائدة) على اجزاء عديدة من سطح الجسم لتبخر هذا الماء عن طريق امتصاص الحرارة من الجسم. لكن تستخدم بعض الحيوانات الفقارية الأخرى العرق أو اللهث تكية للتبريد عن طريق تبخر الماء.

عند افراز العرق، عند الثديات، تقوم غدد العرق (الشكل 14-11) بافراز الماء عبر ثقوب موجودة على سطح الجلد. هذا ويخضع افراز العرق للتنظيم بواسطة الجهاز العصبى المستقل. جدير بالذكر العرق لا يتبخر عندما تكون درجة رطوبة الجو عالية.



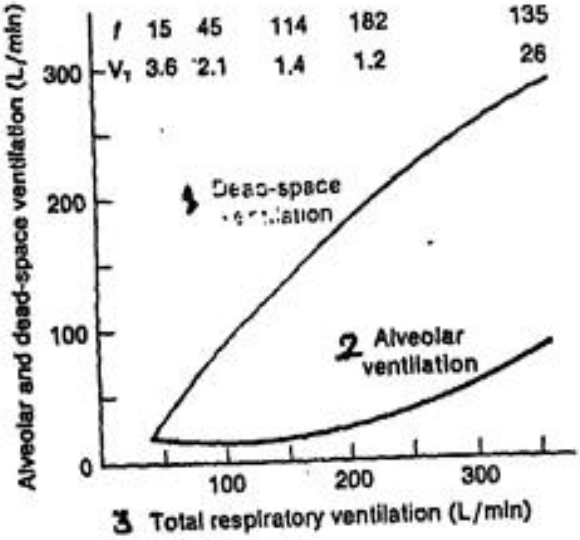
الشكل 14-11 غدد العرق ومكونات طبقة الجلد عند الثديات وتظهر فيها الغدد العرقية *

أيضا تستخدم الثديات والطيور تبخير الماء من الجهاز التنفسى كآلية للتبريد (للمزيد من فقدان الحرارة) تقوم الثديات بالتنفس عبر الفم بدلا عن الأنف حيث يمر الهواء سريعا وبذا لا يفقد الحرارة التى اكتسبها داخل الرئتين. أيضا تقوم الثديات بزيادة معدل تهوية الرئة hyperventialation لكى تفقد المزيد من الحرارة. لكن ينتج عن تغيير معدل التهوية تغيير فى PCO_2 و pH في الدم. لتجنب ذلك يزيد الحيوان من تهوية المساحة الساكنة dead space ، أى مرور الهواء عبر الفم والقصبة الهوائية دون ازدياد فى تهوية الحجيرات (الشكل 15-11).

بذا يقل الحجم الجذرى وفي ذات الوقت يزداد المعدل. وهذا بالفعل ما

يحدث عند اللهث panting. يلهث الكلب فى الجو الحار، حيث يمر هواء الشهيق عبر الأنف وهواء الزفير عبر الفم ويخرج كذلك لسانه ليزيد من عملية التبخر الماء. هذا وتكون الطاقة المتطلبة لعملية اللهث قليلة جدا حيث يقل المجهود العضلى. يصاحب عملية اللهث ازدياد افراز اللعاب بواسطة الفم والأنف. هذا ويقوم الكلب بابتلاع الماء الزائد حتى لا يفقده.

لأن تبخر الماء عر طريق افراز العرق أو من طلائية التنفس هى أكثر طرق تشتيت الحرارة الزائدة كفاءة ، لذلك نجد فى الجو الحار صلة وثيقة بين الأتزان المائى والتحكم فى درجة حرارة الجسم. إذ تواجه الحيوانات التى تعيش فى الصحراء جوا حارا جافا تكون فيه عرضة لارتفاع درجة الحرارة أو للجفاف.

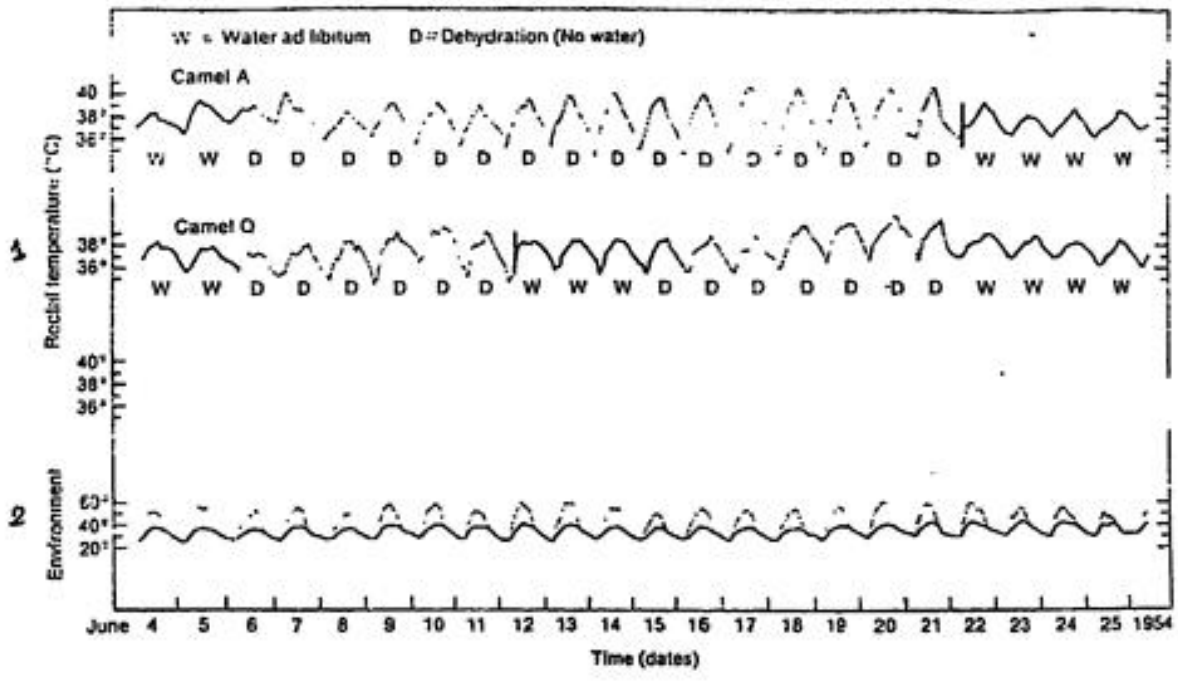


الشكل 15-11 اختلاف (1) التهوية المساحة الساكنة و (2) التهوية حجيرات الرئة مقارنة مع (3) التهوية الكلية أثناء اللهث عند الثور. يزداد (1) مع ازدياد (3) sterdiy (1) سريان عبر الفم والقصبة الهوائية عند ازدياد اللهث ينخفض معدل التهوية f ويزداد حجم Vt (الارقام أعلى الرسم)

يتم توضيح العلاقة التبادلية reciprocul بين الاقتصاد فى الماء وتشتيت الحرارة في حيوان صحراوى صغير الحجم هو D.M ليحافظ على الماء.

يستخدم هذا الحيوان آلية تيار مضاد تسمح بتكثيف الماء المحمول مع هواء الزفير، علي الممرات الأنفية (راجع الشكل 18-9 والشكل 19-9). لكن تبقى هذه الطريقة أيضا درجة حرارة الجسم في حالة اعادة دوران وتتطلب أن يكون هواء الشهيق عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة الجسم. لذلك يبقي هذا الحيوان داخل جحره، الأقل حرارة، فى باطن الأرض اثناء فترة النهار، ويحصر نشاطه إلى فترة المساء فقط (راجع الفصل 9).

يتم توضيح أهمية الماء فى التحكم فى درجة حرارة الجسم في حيوان كبير الحجم مثل الجمل (الشكل 16-11).



الشكل 16-11 اختلاف درجة حرارة الجسم الداخلية مع اختلاف درجة حرارة الجو (نهار وليل)
عند الجمل فى حالة W شرب الماء و D تعرضه للجفاف (منع من شرب الماء)
(1) درجة حرارة الجسم الداخلية (تقاس من المستقيم)(2) درجة حرارة الجو

عند تدوين هذه الملاحظات سمح للجمل بشرب الماء كما يشاء adlibitum أو تم اخضاعه إلى فترة من الجفاف منع اثناءها من شرب الماء لأيام عديدة. وجد أن درجة حرارة الجسم الداخلية تتراوح بين درجة عليا اثناء النهار وأخرى صغرى أثناء الليل. تكون هذه الاختلافات قليلة حينما يسمح للجمل بشرب الماء لكنها تصبح أكثر حدة فى الحيوان الجاف أى حينما يقل محتوى المياه داخل الجسم، بذا يقتصد الحيوان في فقدان الماء عن طريق العرق الشئ الذى يسمح به فى حالة توفر الماء.

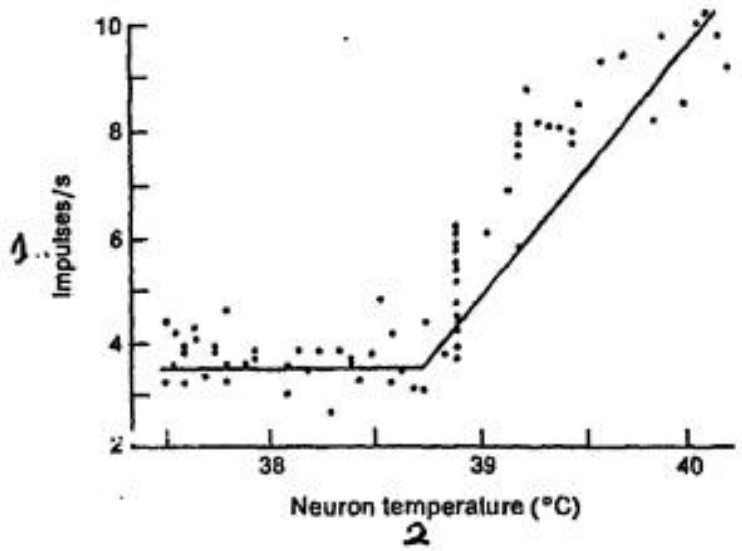
11-9 المنظم الحرارى للثدييات :

توجد خلايا عصبية أو نهايات عصبية تعمل كمستقبلات للاحساس بدرجة الحرارة داخل المخ، الحبل الشوكي، الجلد ومواقع أخرى من الجسم. توفر هذه المستقبلات مدخلات للمراكز التى تقوم بتنظيم درجة حرارة الجسم. بالرغم من احتمال وجود العديد من مراكز تنظيم الحرارة داخل الجسم إلا أن أهم مركز لتنظيم درجة الحرارة عند الثديات يوجد داخل تحت المهاد hypothalamus وهو بمثابة منظم حرارى thermostat .

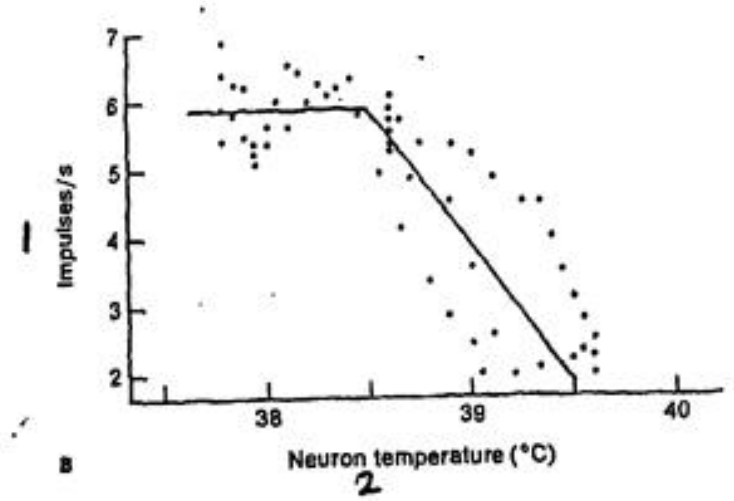
توجد داخل تحت المهاد خلايا عصبية تظهر حساسية عالية لاختلاف درجة الحرارة وهى تستجيب لتغير درجة الحرارة داخل تحت المهاد (الشكل 17-11). تساعد فى تثبيت الحرارة مثل اتساع الأوعية الدموية فى الجلد وافراز العرق. هذا وتظهر بعض الخلايا العصبية داخل تحت المهاد انخفاض فى معدل السيال العصبى مع ارتفاع درجة الحرارة (الشكل 18-11).

كذلك توجد داخل تحت المهاد، بعض الخلايا العصبية التى تنشط عند انخفاض درجة حرارة المخ تحت درجة معينة set-point حيث تقوم بتنشيط آليات توليد الحرارة مثل الارتعاش وأيض الدهون البنية وآليات الاحتفاظ

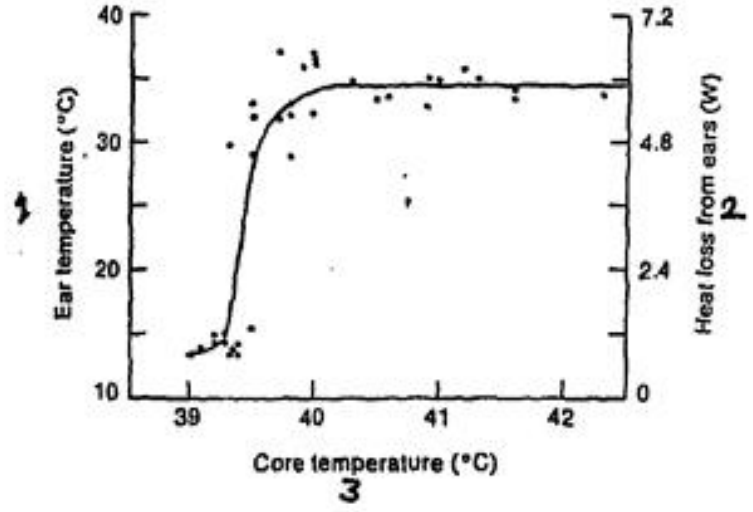
بالحرارة مثل «وقوف» شعر الجسم. بالاضافة للمدخلات التي يتلقاها تحت المهاد من خلايا الحس الحراري، المذكورة اعلاه، والتى هى موجودة بداخله، يستقبل تحت المهاد أيضا مدخلات من خلايا الحس الحرارى الموجودة خارج تحت المهاد. إن ارتفاع فى درجة حرارة داخل الجسم فقط 0.5°C يتسبب فى اتساع الأوعية الدموية التى تغذى الجلد 7 أضعاف الحجم الطبيعى. يتم توضيح هذا التأثير بواسطة الشكل (19-11). حيث ترتفع درجة حرارة الأذن فى الأرنب من 15° إلى 35°C حينما تتجاوز درجة الحرارة داخل الجسم 39.4 °C. بما أن درجة حرارة الأذن قد وصلت قيمة قصوى فنستنتج أن الأوعية الدموية فيها قد اتسعت كلية حينما تخطت درجة حرارة الجسم الداخلية هذا الحد.



الشكل 17-11 درجة ارسال (1) النبض العصبى مع اختلاف (2) درجة حرارة الخلايا العصبية الحسية الحرارية داخل تحت المهاد فى الارنب يزداد معدل النبض خطيا مع ازدياد درجة الحرارة عن 38.7 عكس الوضع فى الشكل (18-11) استجابة موجبة



الشكل 18-11درجة ارسال (1) النبض العصبى مع اختلاف (2) درجة حرارة الخلايا العصبية الحسية الحرارية داخل تحت المهاد فى الارنب يقل معدل النبض خطيا مع ازدياد درجة الحرارة عن 38.4°C عكس الوضع فى الشكل (17-11) استجابة سالبة



الشكل19-11 (1) درجة حرارة صوان الأذن (2) معدل فقدان الحرارة عبر صوان الأذن عند اختلاف (3) درجة حرارة الجسم الداخلية فى الأرنب سجلت عند درجة حرارة الجو 10°C تم رفع درجة حرارة الجسم عن طريق اجبار الأرنب على الجرى، عندما ترتفع درجة حرارة الجسم عن 39.5°C ترتفع درجة حرارة الأذن ومعدل فقدان الحرارة عبر الأذن وتصل قيمة قصوى عند 40°C

ظاهرة الحمى

إحدى الخواص الهامة لمركز تنظيم درجة حرارة الجسم داخل تحت المهاد، تعكسه حساسية هذا المركز لبعض انمواد الكيميائية التى تسبب الحمى pyrogens. هنالك نوعان من هذه المواد نوع خارجى المنشأ تسببه بعض أنواع البكتيريا ولها فعالية عالية يمكن لجرعة مقدارها 10^{-6}g أن تسبب الحمي عند حقنه فى أحد الثديات كبيرة الحجم. ونوع داخل المنشأ ينتجه جسم الحيوان. تفرز خلايا الدم البيضاء النوع الثاني كاستجابة لوجود للنوع الأول داخل الجسم والذى عادة ما يحدث نتيجة لعدوى بكتيرية.

بذلك يبدو أن المواد المسببة للحمى خارجية المنشأ تعمل بطريق غير مباشر عن طريق تنشيط المواد داخلية المنشأ والتى تعمل مباشرة علي تحت المهاد فتسبب فى ارتفاع درجة حرارة الجسم وتصيب الحيوان بما يعرف بالحمى fever. يعكس المواد التى تسبب الحمى ، تؤدى مواد التخدير anesthetics والمواد الأفيونية مثل المورفين إلي خفض درجة حرارة الجسم.

قد يساعد الارتفاع في درجة الحرارة فى مكافحة البكتيريا ولكن الحمى نفسها تضر بالجسم وقد تسبب الموت أحياناً.

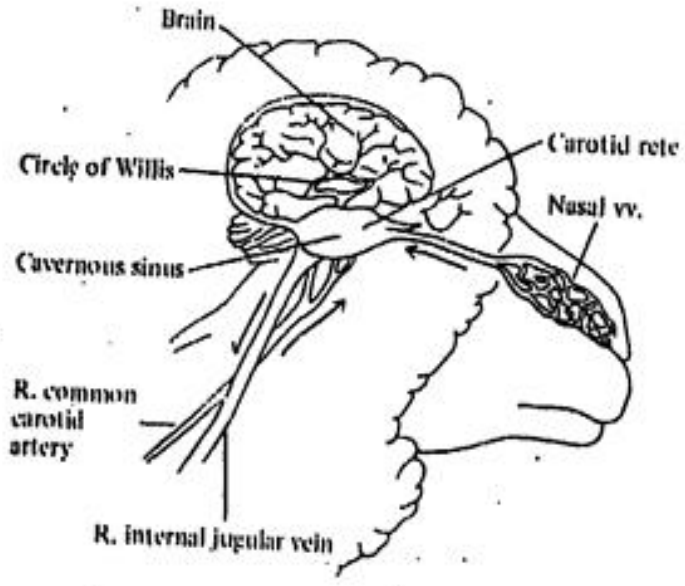
11-10 تنظيم درجة حرارة الجسم اثناء التمرين الرياضى

تصل درجة كفاءة الانقباض العضلى 25 بالمئة . بمعنى أنه فى مقابل كل سعر يتم تحويله من طاقة كيميائية إلي طاقة ميكانية تفقد 3 سعرات فى شكل حرارة، ينتج عن ذلك ارتفاع درجة الحرارة اثناء التمرين الرياضى ما لم يتم فقدان الحرارة للبيئة المحيطة وبنفس معدل تكونها.

بالفعل يتم فقدان بعض الحرارة ويفيد الارتفاع المعقول في درجة الحرارة

اثناء التمرين الجسم من ناحيتين ، (1) تزيد من الفرق بين درجة حرارة الجسم Tb ودرجة حرارة البيئة المحيطة Ta. وبذلك تزيد من كفاءة آليات فقدان الحرارة و (2) تؤدى إلى ازدياد معدل التفاعلات الكيميائية بما فيها تلك التي تدعم المجهود البدنى. تمنع بعض أنواع الثديات ذات الحوافر (مثل الخرفان، الأغنام والغزلان) وأكلات اللحوم (مثل القطط والكلاب) ارتفاع درجة حرارة المخ عن طريق آلية التيار المضاد لسريان الدم داخل جهاز الشبكة السباتية carotid rete حيث يستخدم الدم الوريدى البارد القادم من الجهاز التنفسى فى خفض درجة حرارة الدم الشريانى الذى يغذى المخ.

يأتى معظم الدم الذى يغذى المخ فى هذه الحيوانات من الشريان السباتى الذى يتفرع إلى مئات الأفرع عند قاعدة الجمجمة مكونا الشبكة الوعائية vascular rete، ثم تتحد هذه الأوعية قبل ذهابها إلى المخ (الشكل 20-11).



الشكل 20-11تبريد الدم الشريانى الذاهب للمخ عن طريق آلية التيار المضاد بواسطة الدم الوريدى القادم من مجرى الأنف عند الخروف

تمر هذه الشرايين عبر الجيب الكهفى cavemous sinus الوريدى، يكون الدم فيه أقل حرارة من الدم الشريانى لأنه يأتى من الممرات الأنفية حيث تم تبريدها بواسطة سريانالهواء اثناء التنفس. نتيجة لذلك تكون درجة حرارة المخ ° 2 إلى 3°C أقل من درجة حرارة الجسم بذلك يتجنب الحيوان اختلال وظيفة المخ اثناء الجرى فى الأجواء الساخنة.

11-11 السكون Dormancy

نوع عام من تبنى استراتيجية مختلطة للتعامل مع درجة الحرارة فى البيئة المحيطة هو السكون dormancy تقوم اثناءه بعض الحيوانات بخفض درجة حرارة الجسم بما فى ذلك BMR. تم التعرف على 5 أنواع من السكون فى عالم الحيوان، (1) النوم (2) , السبات ، خدار torpor، (3) البيات الشتوى، سبات شتوى hiberntion، (4) النوم الشتوى winter sleep، (5) التصيف (قضاء وقت والصيف فى حالة سبات estivation

(1) النوم

النوم نوع من السلوك تحدث خلاله العديد من التغيرات فى وظيفة المخ، تنخفض اثناءه درجة حرارة الجسم وكذلك حساسية تحت المهاد لاختلاف درجة الحرارة. هذا وتتجمع بعض المواد التى تحفز النوم اثناء فترة اليقظة ومن ثم تتراكم داخل السائل البينى للجهاز العصبى المركزى مؤدية إلى ظاهرة النوم التى ما تزال قيد البحث.

(2) خدار

كلما قربت درجة حرارة الجسم من درجة حرارة الجو كل ما قل فقدان الحرارة للجو

$$Q = C (Tb-Ta)$$

كلما قلت Tb كلما قل معدل تحويل مخزون الطاقة داخل الجسم إلى حرارة لذلك وفيما عدا حينما يكون الحيوان تحت الاجهاد الأسموزى أو الحرارى فمن الأفيد أن تنخفض درجة حرارة الجسم أثناء فترات عدم الطعام.

تتعرض الحيوانات داخلية المصدر الحرارى صغيرة الحجم إلى فتراه من الجوع starvation بين فتراه الطعام تيجة لارتفاع معدل الأيض لديها. بعض هذه الحيوانات تدخل في فترة سكون (أثناء عدم الطعام) سامحة بدرجة حرارة الجسم و BMR بالانخفاض . ثم قبل أن تصبح نشطة تحدث ذروة من النشاط الأيضى خاصة نتيجة أكسدة الدهون البنية. هذا وتمارس العديد من الطيور والثديات الصغيرة السكون يوميا.

(4,3) البيات والنوم الشتوي

تقوم بعض الثديات متوسطة الحجم بتخزين الطاقة في شكل دهون قبل أن تدخل فى فترة بيات شتوي hibernation وهى فترة سكون عميق وطويل الأمد قد يمتد لأسابيع أو حتى شهور عديدة أثناء فصل الشتاء. قد يصحو الحيوان خلالها من وقت لآخر لتحقيق بعض المطالب مثل إفراغ كيس البول .

يتم ضبط المنظم الحرارى داخل تحت المهاد، أثناء عملية البيات الشتوى ، إلى درجة جديدة 20°C أو أكثر تحت المعدل الطبيعى. عندما تصل درجة حرارة الجو 5°C إلى 15°C يحافظ الحيوان على درجة حرارة جسمه 1°C أعلى من البيئة المحيطة. إذا انخفضت درجة حرارة الجو إلى درجة خطرة ، يقوم الحيوان بتوليد الحرارة أيضيا ليحافظ على درجة حرارة جسمة أو يصحو الحيوان. إذن لا يتم الغاء المنظم الحرارى داخل تحت المهاد، أثناء السكون أو البيات الشتوي ، إنما يتم ضبطه عند درجة حرارة منخفضة.

ينخفض معدل الأيض في حيوان صغير مثل السنجاب إلى 7 بالمئة من المعدل الطبيعي حينما تنخفض درجة حرارة الجسم إلى 8°C.

يؤدى انخفاض التنفس ، نتيجة لانخفاض معدل الأيض الأساسى، إلى انخفاض pH لتصل 7.4 قد تسبب هذه الحمضية المزيد من انخفاض النشاط الانزيمى نتيجة لاختلاف pH عن القيمة المثلى للنشاط الانزيمى.

بالرغم من أن العديد من الحيوانات داخلية المصدر الحرارى صغيرة الحجم تمر بفترة سكون خلال اليوم إلا أنها لا تستطيع الدخول في فترة بيات شتوى. لأنها سوف تستنذف بذلك مخزون الطاقة سريعا حتى وهى في حالة البيات.

الحيوانات التى تمارس البيات الشتوي الحقيقى هى ثديات متوسطة الحجم، لأنها من الكبر بحيث يتكون لديها مخزون طاقة يكفيها فترة البيات الشتوى الطويلة. هذا ولا يوجد بيات شتوى حقيقى بين الثديات الكبيرة الحجم. فالدب، الذى كان يعتقد في الماضى أنه يدخل فى نوم شتوى ، لا يفعل ذلك بل يدخل فى نوم شتوى بدون أن تنخفض درجة حرارة جسمه إلى درجة كبيرة. بل يبقى ملفوفا حول نفسه داخل مخبأ مثل أحد الكهوف. ويصحو بين الحين والآخر ليمارس نشاطه سريعا خلال فصل الشتاء الطويل.

لكن لماذا لا تمارس الحيوانات كبيرة الحجم البيات الشتوى ؟ تكمن الاجابة فى أن،(1) الحيوانات الكبيرة أقل حاجة لتوفير الطاقة لأن BMR منخفض بالنسبة لما لديها من مخزون للطاقة. (2) نسبة لحجمها الكبير فتحتاج إلى مجهود أيضى كبير لترفع درجة حرارة جسمها من مستوى الجو إلى المستوى الطبيعى اثناء فترة الصحيان.

وقد قدر للدب بأنه يحتاج يوما كاملا على الأقل ليرفع درجة حرارة الجسم

من 5°C (درجة حرارة الجو) إلى 37°C ، درجة حرارة الجسم الطبيعية.

(5) **سبات صيفى** aestivation

توجد ظاهرة البيات الصيفى عند كل من الفقاريات واللافقاريات وتشير حالة السبات التى يدخل فيها الحيوان كاستجابة لدرجة حرارة مرتفعة أو خوفا من الجفاف. مثال بعض الحلزونات الذى يقضى فترة انخفاض رطوبة الجو داخل القشرة وذلك بعد فقدان الماء عن طريق التبخر.

يعيش السمك الرئوى الافريقى فتراة الجفاف، حيث تجف البرك التى يوجد بداخلها ، عن طريق البيات داخل القاع الشبه جاف، وذلك حتى موسم الأمطار القادم. يختفى نشاط بعض الثديات صغيرة الحجم في فصل الصيف حيث تظل داخل جحورها وتسمح لدرجة حرارة جسمها أن تنخفض إلى درجة حرارة الجحر. هذا وقد تكون هذه الحالة شبيهة بظاهرة البيات الشتوى مع اختلاف التوقيت من السنة.

11-12 طاقة الحركة

تناولنا فى بداية هذا الفصل معدل الأيض الأساسى BMR حينما يكون الحيوان في حالة راحة. يتم استهلاك طاقة اضافية عندما يكون الحيوان نشطا (أى يقوم بتحريك عضلاته). أحد أهم الأعمال الروتينية لأى حيوان هو الانتقال من مكان إلى آخر بحثا عن الطعام أو الشريك أو للهرب من الأعداء أو الحيوانات المفترسة . لذلك سنتناول فى ما تبقى من هذا الفصل ما تتطلبه الحركة من مجهود أيضى.

11-12-1 حجم الحيوان، سرعته وتكلفة الحركة

يمكن تعريف الجهد الأيضى للنشاط الحركى علي أنه ، كمية الطاقة

المتطلبة لتحريك وحدة وزن من حيوان وحدة مسافة وعادة ما تميز بواسطة كيلو سعر للكيلو جرام للكيلو متر (kcal / kg/ km) وذلك بعد حساب قيمة BMR.

يتم تجريبيا قياس استهلاك O2 واخراج CO_2 ، الذين يعطيان قياسا للأيض ، للحيوان وهو يجرى على طاحون الدوس treadmill، يسبح داخل حوض flow tank أو يطير داخل نفق wind turnel . ثم يتم ترجمة معدل استهلاك O_2 واخراج CO_2 إلى معدل تحويل الطاقة.

جدير بالذكر أن قسما كبيرا من الجهد الفعلى اثناء التحرك لا يساهم فى دفع الحيوان للأمام. إذا يستخدم بعض المجهود العضلي فى حمل المفاصل فى الوضع الصحيح للمفاصل articulation كما يصرف جزء كبير من الجهد العضلى لمقاومة الجاذبية الأرضية، امتصاص الصدمات وتنسيق تحرك العضلات.

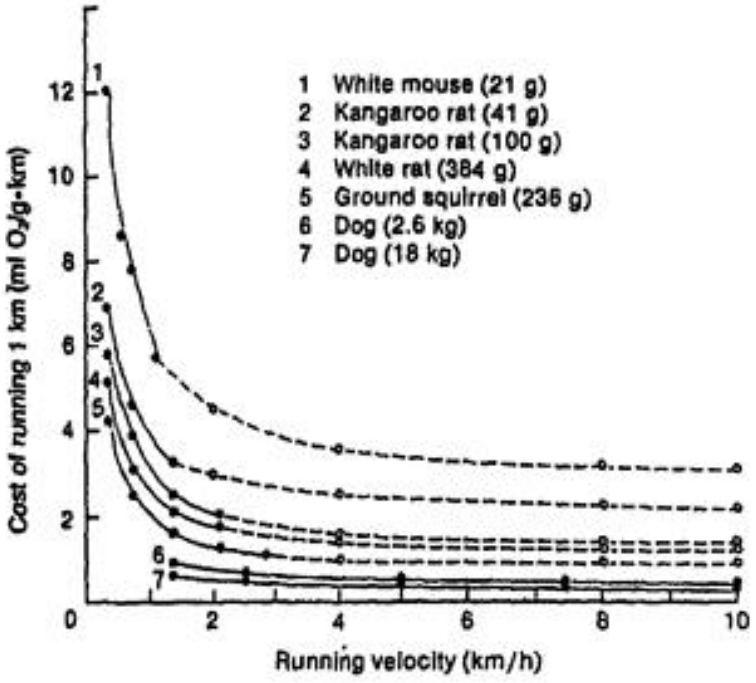
هذا وتتضح العديد من التصميمات عند مقارنة التكلفة الكلية للحركة مع حجم وسرعة أى حيوان. فمثلا كلما زادت سرعة الجرى كلما قلت الطاقة المتطلبة لقطع مسافة ما (الشكل 21-11). من ناحية أخرى يزداد معدل استهلاك O_2 فوق BMR خطيا مع السرعة (الشكل 22-11).

جدير بالذكر أن الزيادة فى استهلاك الطاقة، عند الحركة، بالنسبة لوحدة الوزن يكون أقل في الحيوانات الكبيرة عن الحيوانات صغيرة الحجم.

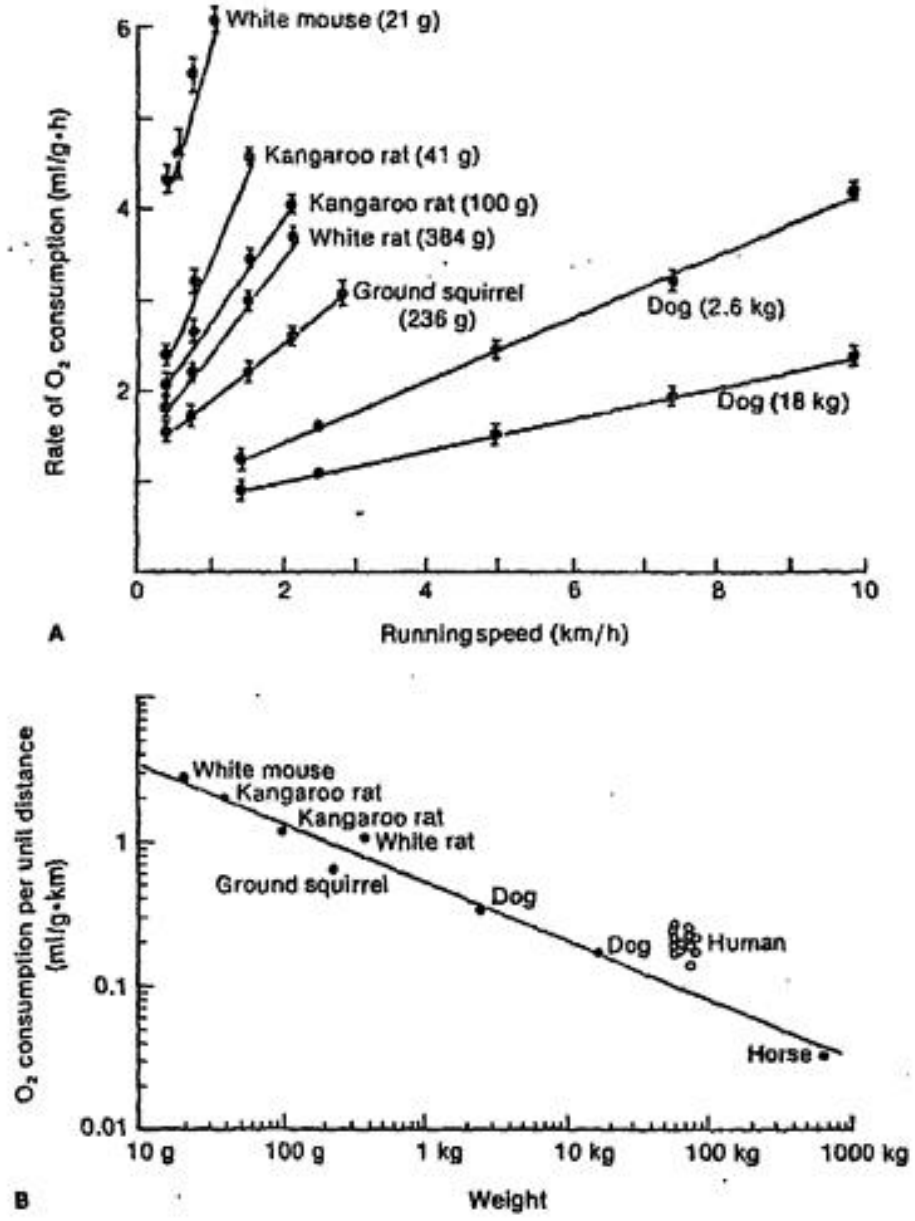
يمكن ملاحظة ذلك فى الشكل (21-11) وفى الميل المختلف للرسومات فى الشكل (22-11).

كذلك عند رسم تكلفة الحركة كمعدل استهلاك الطاقة للجرام مع وزن الجسم يتضح مرة أخرى أن استهلاك الحيوانات كبيرة الحجم للطاقة يكون أقل

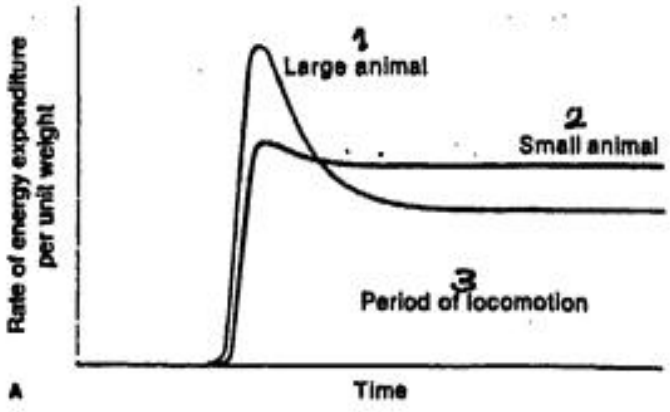
من الحيوانات صغيرة الحجم (الشكل 23-11). قد يكون انخفاض الكفاءة فى الحيوانات صغيرة الحجم نتيجة للمقاومة السحب drag (سنتعرض له لاحقاً)، لا ينطبق هذا بالطبع على حيوانات اليابسة التى تتحرك بسرعة منخفضة أو معتدلة خلال الهواء حيث يمكن تجاهل قوة المقاومة .



الشكل 21-11 تكلفة الحركة من الطاقة لقطع مسافة ما عند مختلفة سرعات الجرى بالنسبة للثيات تختلف عن بعضها فى حجم الجسم (يظهر داخل الأقواس وزن الحيوان)



الشكل 22-11 العلاقة بين معدل استهلاك O_2 والسرعة A كلما زادت السرعة كلما زاد استهلاك O_2 ويكون الاستهلاك أعلى فى الحيوانات الصغيرة الحجم (B) العلاقة اللوغارثيمية بعد خصم قيمة BMR



الشكل 11-23 تاثير كتلة الجسم على معدل استهلاك الطاقة (cal/g) عند الحركة بالنسبة للحيوانات (1) الكبيرة الحجم (2) صغيرة الحجم مع (3) امتداد زمن الحركة

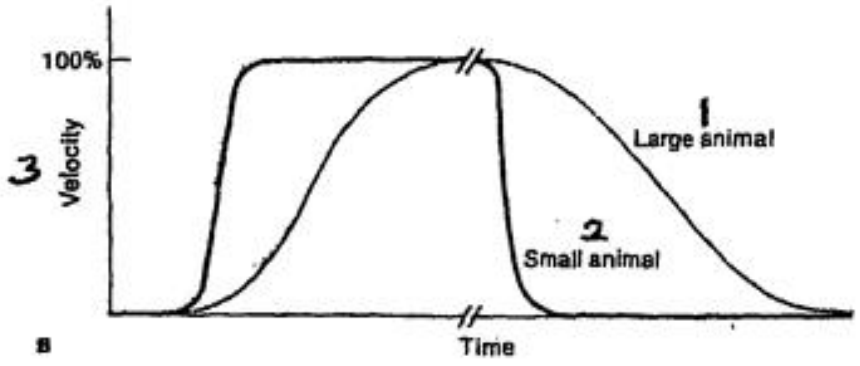
11-12-2 العوامل الطبيعية التى تؤثر فى الحركة:

تعتمد الطاقة المستهلكة لتحريك كتلة من جسم الحيوان علي العديد من العوامل الطبيعية وتشمل، (1) ميل الحيوان إلى مقاومة التسارع أى القصور الذاتى intertia والذى يكون أكبر بالنسبة للحيوانات كبيرة الحجم لذلك فهى تستخدم طاقة أكبر للتغلب على هذه الظاهرة (الشكل 11-24). بينما الحيوان صغير الحجم كمثل السيارة صغيرة الحجم، يحتاج إلى طاقة أقل للتسارع إلى سرعة معينة. كذلك تقل سرعة تباطؤ الحيوان كبير الحجم عند نهاية الحركة (الشكل 11-24).

(2) ميل الحيوان المتحرك للحفاظ على سرعته وعلى قوة الدفع momentum يكون أيضا أكبر بالنسبة للحيوانات الكبيرة.

(3) بما أن الحيوانات لا تتحرك داخل فراغ، يؤثر الغاز أو السائل الذى تتحرك خلالة الحيوانات على كمية طاقة الحركة. تسبب لزوجة وكثافة الهواء أو الماء قوة مضادة لحركة الحيوان تعرف بقوة السحب drag force وهى تتناسب مع

مساحة سطح الجسم بالنسبة للأجسام ذات الشكل الموحد. بما أن نسبة المساحة إلى الكتلة أقل عند الحيوانات الكبيرة لذلك تكون قوة المقاومة لوحدة الوزن أقل بالنسبة للحيوانات كبيرة الحجم. وبناء عليه تستهلك الحيوانات كبيرة الحجم قدراً أقل من الطاقة للتغلب على مقاومة الوسط.



الشكل 24-11 ميل الحيوان إلى مقاومة التسارع يكون أكبر في الحيوانات (1) كبيرة الحجم تصل السرعة القصوى بسهولة بينما تقل مقاومة التسارع في (2) الحيوانات صغيرة الحجم (3)السرعة . كذلك يتم التباطؤ عن نهاية الحركة في زمن قليل بالنسبة للحيوانات صغيرة الحجم بينما تأخذ الحيوانات كبيرة الحجم زمنا أطول

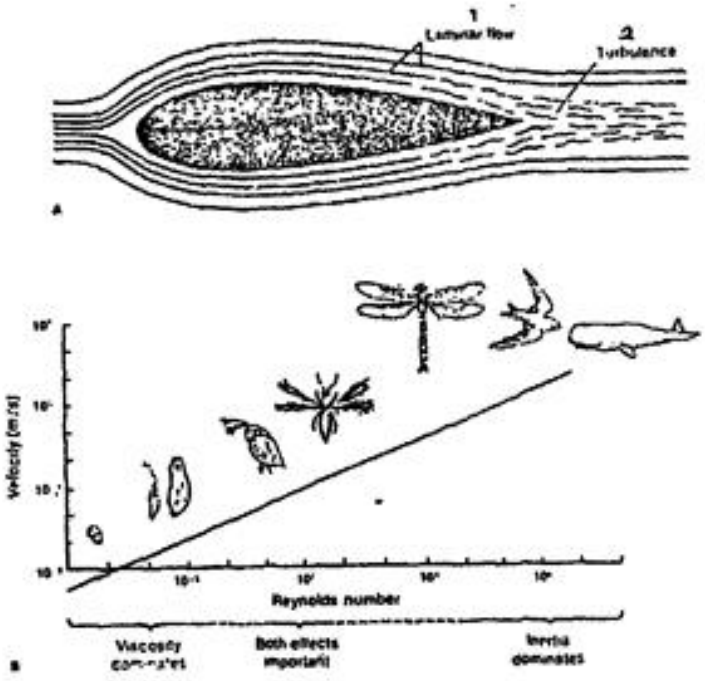
بما أن لزوجة وكثافة الماء أعلي بكثير من لزوجة وكثافة الهواء لذلك تكون لهذه الظاهرة أهمية أكبر بالنسبة للحيوانات التى تتحرك داخل الماء. كذلك تظهر أهمية المقاومة عند الطيران نتيجة للسرعة العالية عند الطيران. هذا وتكون المقاومة أقل أهمية عند الجرى نسبة لانخفاض السرعة عند الجرى كما أن لزوجة الهواء تكاد تنعدم.

11-12-3 أنواع الحركة : (1) السباحة

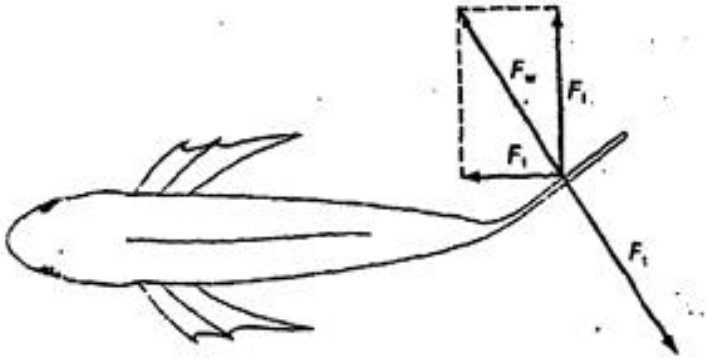
تحتاج الحيوانات التي تسبح داخل الماء إلى قوة أقل لتدعم وزنها داخل الماء. كما أن للحيوانات المائية تراكيب أو هياكل تساعدها على الطفو (مثل أكياس الهواء).

وهى بذلك تستطيع التواجد عند عمق معين بأقل مجهود أيضى. ولكن بالرغمم من أن لزوجة الماء تدعم وزن الحيوان إلا أنه ينتج عنها مقاومة عالى للتغلب على هذه العقبة فقد أصبح شكل الجسم بين الأسماك والثديات المائية انسيابى streamlined، ويتجلى ذلك فى أحسنى صوره عند أسماك القرش، الأسماك العظمية والدلافين. سنوضح فيما يلى كيف ساعد هذا الشكل الأسماك والثديات على التحرك بسهولة أكبر داخل الماء.

هناك نوعان من سريان الوسط أو الماء الذى يتحرك الحيوان بداخله الأول يعرف بالاندفاق الصفحى laminarflow (الشكل 25-11) وفيه يقل سرعة السائل تدريجياً smoothly عندما يتحرك السائل مبتعداً عن سطح الجسم المتحرك. ويعرف النوع الثاني بالمضطرب turbulent flow وهو يقلل من كفاءة تحويل الطاقة الأيضية إلى حركة دافعة بالنسبة للحيوان. هذا ويشجع شكل المستطيل والانسيابى علي تكوين التدفق الصفحة ويقلل من التدفق المضطرب يوضح الشكل (26-11) القوة الدافعة والقوة المعاكسة لها اللتين تعملان على سمكة سابحة. تتناسب سرعة الحيوان السابح مع نسبة المقاومة . هذا وتتناسب القوة مباشرة مع كتلة العضل وبما أن كتلة العضل تزيد بازدياد كتلة الجسم لذلك فإن القوة تزداد بازدياد كتلة الجسم (التى تحدد القوة المتاحة) بالنسبة لمكعب القطر. لذلك يستطيع الحيوان كبير الحجم أن ينتج قوة تفوق نسبة قوة المقاومة وبذلك يستطيع التوصل إلى سرعة غالية عند السباحة من الحيوانات صغيرة الحجم بنفس الشكل.



الشكل 25-11 سريان الوسط (هواء أو ماء) حول جسم متحرك (1) تدفق صفحي
(2) تدفق مضطرب (راجع النص)

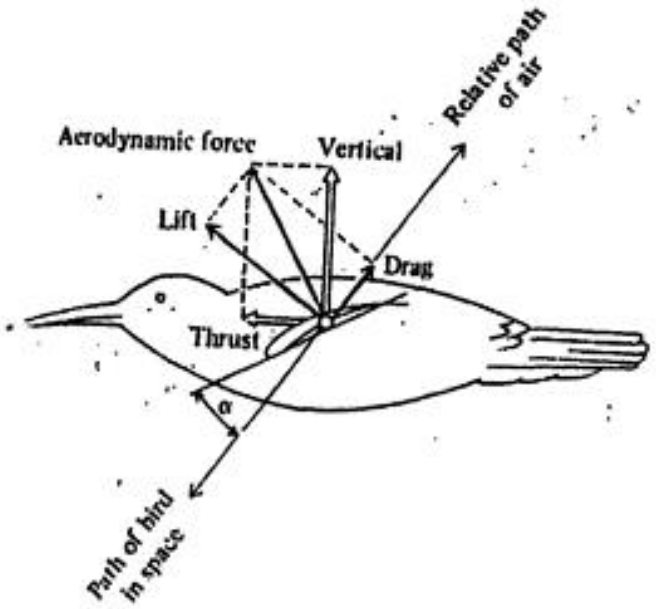


الشكل 26-11 القوى التي تعمل على سمكة متحركة Fc قوة تحريك الذيل تضادها Fw مقاومة الماء
ينتج من Ft قوتان Ff في الاتجاه الأمامي و Fl في الاتجاه الجانبي

هذا ويمكن للحيوانات المائية أن تصل سرعتها عند السباحة سرعة الطائر عند الطيران فقط إذا كان حجمها أكبر بكثير من حجم الطائر وأكثر قوة منه.

(2) الطيران :

الهواء، ليس كمثل الماء، فهو لا يوفر دعماً لوزن الحيوان. لذلك على الطيور أن تتغلب على الجاذبية لكى تحلق وذلك عن طريقة استخدام نظريات الديناميكية الهوائية هذا ونسبة لقوة المقاومة المنخفضة فى الهواء تستطيع الطيور أن تحقق سرعات عالية عند الطيران من غير الحاجة إلى جسم انسيابى الشكل بالقدر الموجود عند الأسماك. يتم انتاج القوة الدافعة للأمام والحركة للأمام والقوة الرافعة للأعلى (التحليق) آنياً أثناء الضربة الخافضة downstroke لجناح الطائر (الشكل 27-11).

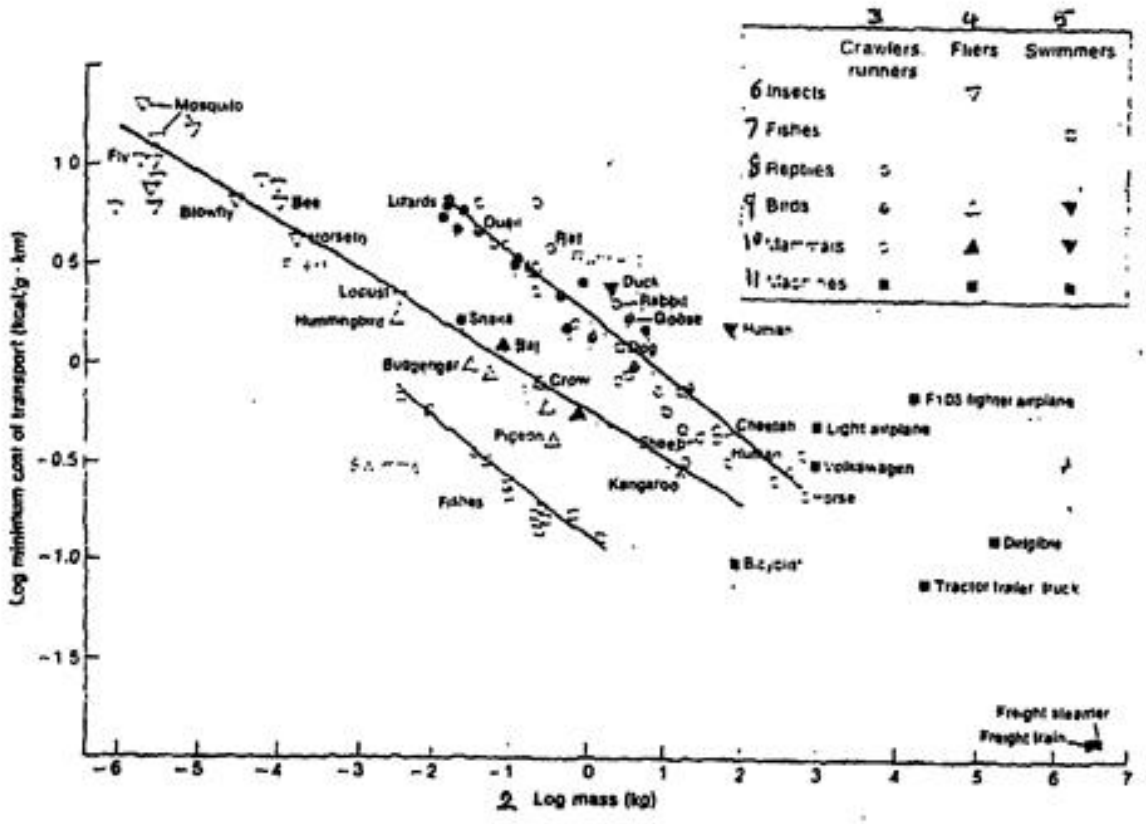


الشكل 27-11 القوة الناتجة عن الضربة السلفى (إلى أسفل) لجناح طائر.الرسم الأعلي يوضح الجناح فى المرحلة 3 (موضحة تحت . a زاوية الضرب stroke. L القوة الرافعةD قوة المقاومة، Di (راجع النص).

يتحرك الجناح إلى تحت وإلى الأمام بزاوية استهلال تدفع الهواء إلى تحت وإلى الخلف خالقة بذلك قوة دافعة إلى أعلى وإلى الأمام. يؤدى ذلك إلى تحليق الطائر ودفعه للأمام وهو ما يحتاجة للتغلب على الجاذبية والمقاومة الوسط.

(3) الجرى:

عند مقارنة السباحة، الطيران والجرى بالنسبة إلى تكلفة الطاقة وجد أن الجرى أكثر تكلفة لوحدة الكتلة عند سرعة معينة (الشكل 28-11) بينما السباحة أقل تكلفة.



الشكل 28-11 (1) تكلفة الحركة مع (2) وزن الجسم للأنواع الحركة المختلفة (3)المشى أو الجرى (4) الطيران (5) السباحة (6) الحشرات (7) الأسماك (8) الزواحف (9) الطيور (10) الثديات (11) الآلة (الدراجة - الخ)

تأتى عدم كفاءة الجرى للطريقة التى تستخدم بواسطتها العضلات عند الجرى والاختلاف «الدورى» فى وضع مركز كتلة الجسم بالنسبة للجاذبية الأرضية. تقنياً تقوم العضلات باستهلاك طاقة للتغلب على الجاذبية (مجهود سلبى). هذا ولا تستخدم الحيوانات عند السباحة أو الطيران طاقة العضل لتبطئ الناتج عن كتلة الجسم مثلما يحدث عند الجري أو المشى.

تبدو عملية تخزين الطاقة داخل العناصر المرنة مثل الليفة الوترية هامة جداً عند الجرى إذ تساعد فى دفع الحيوان للأمام كما تساعد فى اختيار المشية gait الأمثل للحركة.

المراجع

المراجع

Eckert R.E., Randall, D. & Augustine G Animal Physiology.

Guyton, A.C.: Textbook of Medical Physiology, Saunders.

Keele, C. A; Neil, E & Joels N: Sampson Right's applied physiology.

Journal of physiology

Journal of Comparative Physiology & Biochemistry

Nature

Physiological Reviews

Science

Scientific American

رقم الإيداع :	٢٠٠٨/١٠٤٠٩
الترقيم الدولي :	I.S.B.N
	977-212-145-X

Bibliotheca Alexandrina
0945227