

Animal Ecophysiology – Lecture (4)

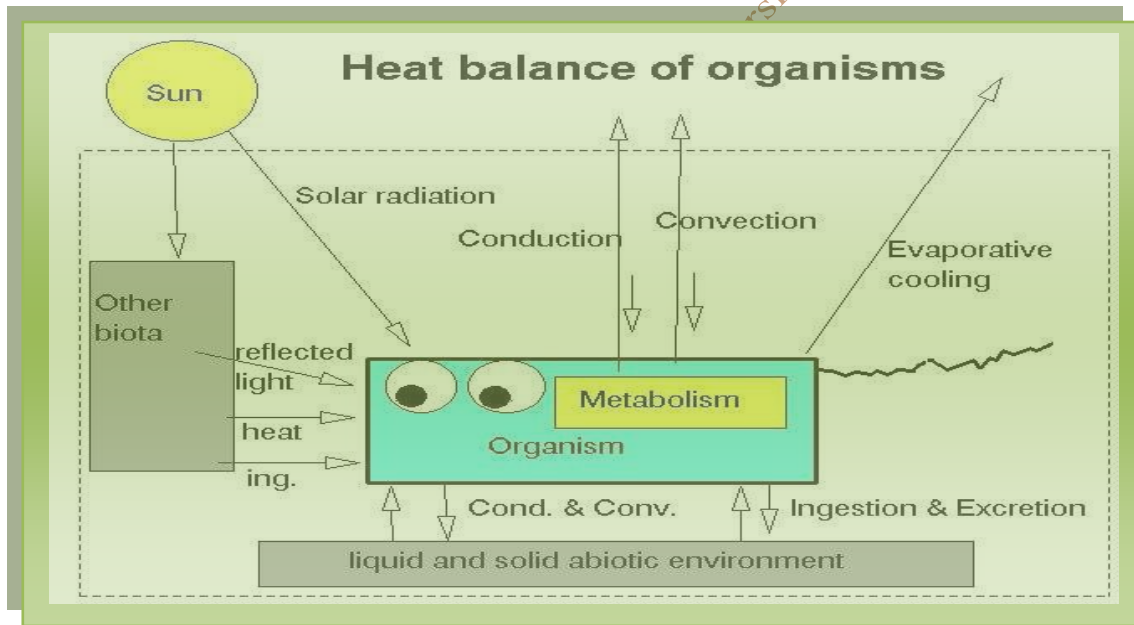
فسيولوجيا بيئة حيوان – محاضرة (4)

التوازن الحراري Head Balance

يعرف التوازن الحراري بأنه تحت الظروف الجوية الملائمة تكون الطاقة الناتجة مساوية للطاقة المفقودة مضافا إليها الطاقة المخزنة واللازمة للحفاظ على درجة حرارة الجسم ثابتة في حالة الحيوانات ذات الدم الحار.

$$\text{الطاقة الناتجة} = \text{الطاقة المفقودة} + \text{الطاقة المخزونة}$$

$$\text{Heat Production} = \text{Heat Loss} + \text{Heat Storage}$$



يتم تحديد التوازن الحراري لأي حيوان من خلال التبادل الحرارية الصافي عن طريق جميع الأساليب المذكورة في الشكل أعلاه ، جنباً إلى جنب مع إنتاج الحرارة الأيضية metabolic heat. يعد التوازن الحراري ضروري لأنه يحدد درجة حرارة الجسم (Tb)، وهذا بدوره يؤثر على جميع الوظائف الفسيولوجية. يتأثر الأتزان الحرارة بدرجة حرارة الهواء ودرجة حرارة الإشعاع والرطوبة وسرعة الرياح كمعايير مناخية، وكذلك بمعدل النشاط وعزل الملابس وقدرة العرق كمعايير شخصية. يمكن القول أن درجة الحرارة هي المتغير البيئي الأكثر شيوعاً الذي يؤثر على الحيوان، بسبب تأثيره على تركيب الجزيئات الكبيرة وعلى التفاعلات الكيميائية الحيوية، التي لها تأثيرات مذهلة على معدلات العمليات الفسيولوجية. يتم تحديد Tb من الحيوان من خلال التفاعل المعقد لطرق مختلفة للتبادل الحراري مع بيئته (التوصيل والحمل

الحراري والإشعاع والتبخر)، فضلا عن إنتاج الإنتاج الداخلي الخاص بها، والذي لا يكاد يذكر بالنسبة للحيوانات خارجية الحرارة ectotherm animals ولكن يعد كبير بالنسبة للحيوانات داخلية الحرارة كالنحبيات والطيور. تطور الإنسان الحديث في مناخ معتدل، ولكن من خلال الاستجابات للتنظيمات الحرارية السلوكية والذاتية، مدعومةً بنظام معقد من المستقبلات، والمدمجات المركزية، والمسارات الواردة والصادرة، والأعضاء الفعالة، ويمتلك البشر القدرة على تحمل كل من البيئات الباردة والحارة. تختلف الاستجابات التنظيم الحراري بين الأفراد وتتأثر بعدة عوامل مثل الجنس والعمر ومحتويات الجسم والتمارين وحالة التكيف. ومع ذلك، يمكن للإجهاد البارد أن يطغى بسرعة على نظام التنظيم الحراري البشري، ويمكن أن يؤدي التراجع المفاجئ في درجة حرارة الجلد المرتبط بالغمر بالماء البارد إلى استجابات صدمة باردة "cold shock" شديدة. ومع فترات التعرض الطويل لدرجات الحرارة الباردة، فإن العضلات والأعصاب والأنسجة العميقة تكون باردة بشكل مفرط، مما يضعف أداء المؤثرات الحرارية والحرارية، وتعرض إلى الانخفاض في درجة الحرارة الجسم hypothermia والعجز والموت. ينتمي البشر إلى مجموعة من الحيوانات المسماة "homeotherms". لضمان أفضل وظيفة فسيولوجية وبقاء على قيد الحياة، يجب على هذه الحيوانات تنظيم درجة حرارة الجسم العميقة ضمن نطاق ضيق على الرغم من التغيرات الكبيرة في درجات الحرارة البيئية. للقيام بذلك يجب أن تكون هناك توازن بين فقدان الحرارة وإنتاج الحرارة. إذا لم يفعلوا ذلك سيتعرضون إلى ارتفاع في درجة حرارة الجسم hyperthermia (الحر) أو انخفاض في درجة حرارة الجسم (البرد)، مع عواقب تتراوح بين ضعف معتدل من الأداء إلى الموت.

Heat balance equation

معادلة التوازن الحراري

$$H_m \pm = \pm H_r \pm H_c - H_e$$

تمثل M الحرارة الناتجة من التفاعلات الكيميائية في الجسم و R الحرارة المفقودة أو المكتسبة بطريقة الإشعاع و C الحرارة المفقودة أو المكتسبة بطريقة الحمل والتوصيل و E الحرارة المفقودة بطريقة التبخر (بالطبع لا يمكن للجسم أن يكتسب الحرارة بطريقة التبخر). وفي حالة اختلال التوازن في المعادلة السابقة عندئذ قد تنخفض درجة حرارة الجسم تحت المستوى الطبيعي وتدعى هذه الحالة بهايوثرميا Hypothermia أو ترتفع درجة حرارة الجسم وتدعى هذه الحالة بـ هايبرثرميا Hyperthermia، وما الحمى إلا نوع من هذه الحالة الأخيرة. فإذا كانت Tb أكبر من Ta تكون القيمة M موجبة أي أن الحرارة تفقد إلى الخارج R و C و E لكن إذا كانت Tb أصغر من Ta فإن الجسم يكتسب حرارة فتكون قيمة M سالبة. عندما يتبخر الماء يأخذ حرارة من الأجسام والسطوح الملامسة مقدار هذه الحرارة هي حرارة التبخير الكامنة Latent Heat Evaporation ومقدارها 540 سعره/غم وهذا يفسر القيمة الموجبة. أما القيمة السالبة فيمكن اكتساب الحرارة بالعملية المعاكسة للتبخير وهي التكثيف Condensation أي تحول بخار الماء في سطح الجسم إلى ماء وهي يحدث في الحيوانات الصحراوية التي تكون درجة حرارة سطح جسمها أقل من درجة حرارة الجسم.

تعتمد قيمة كل من (R) و (C) في المعادلة أعلاه على:

1- درجة حرارة الجلد التي تعتمد بدورها على كمية الدم المار خلال الجلد والطبقة السطحية من العضلات بناء على توسع أو انقباض الأوعية الدموية السطحية.

2 - الفرق الحراري Temperature Gradient بين الجلد والمحيط الخارجي وبما أن الخلايا الحية تنتج باستمرار كمية من الحرارة فإن هناك في العادة فرقا حراريا من الجسم إلى المحيط الخارجي إلا إذا كانت درجة حرارة المحيط أعلى من درجة حرارة الجسم.

إن إحدى وظائف الدم أنه يعمل على تنظيم حرارة الجسم بالاشتراك مع بعض الأجزاء والأجهزة الداخلية مثل الجهاز الهضمي (إنتاج حرارة) والعضلات (استهلاك الحرارة) والجهاز العصبي وبالتالي نجد أن الجسم يحتفظ بدرجة حرارة ثابتة نتيجة للتوازن بين الحرارة المكتسبة والحرارة المفقودة، لكي يؤدي إلى ثبات أو اتزان حرارة الجسم، بحيث أن أي تغير يحدث في أحدهما يلزم تغير في الآخر. وهاتين الكميتين تتأثران بالظروف البيئية المحيطة بالحيوان والظروف المناخية سلبيا وإيجابيا. وإذا لم يكون هنالك فقد في حرارة الجسم فإن كمية الحرارة المنتجة من العمليات الحيوية ولو على مستوى معدل الأيض القاعدي تكون كافية لرفع درجة حرارة الجسم.

الحرارة المكتسبة Heat Gained:

الحرارة المكتسبة في الجسم ليس مصدرها الوحيد هو عمليات التمثيل الغذائي Internal Metabolism ولكن أيضا تكتسب من البيئة المحيطة بالحيوان. بالإضافة إلى ذلك فلو كانت الحرارة المنتجة Heat Production غير كافية للمحافظة على حرارة الجسم فإنه هناك عدة عمليات تمثيلية Metabolic Processes تحدث عن طريق الانقباضات اللاإرادية للعضلات الهيكلية كما يحدث في حالة الرعدة Shivering، كما أن هناك زيادة للإنتاج الحراري نتيجة لأثر الهرمونات ومن أمثلة هذه الهرمونات Epinephrine وهرمون Norepinephrine وهرمونات الغدة الدرقية T4 و T3 وهرمونات قشرة الغدة الادرينالية وأهمها هرمون الكورتيسول Cortisol، فعند تعرض الثدييات للبرودة تكون قادرة على إنتاج حرارة بصرف النظر عن انقباض العضلات أو دون الاعتماد على انقباض العضلات حيث يمكن بذلك وضع بعض الثدييات في حجرة حرارتها 5°م وتكون قادرة على المحافظة على درجة حرارة جسمها إلى أن هذه الثدييات تقوم بزيادة إفراز عدة هرمونات منتجة للطاقة Calorigenic Hormones وهذه الهرمونات تسبب زيادة الإنتاج الحراري عن طريق زيادة معدلات التمثيل الغذائي Metabolic Rates. ويعتقد البعض أن البرد Cold يسبب زيادة هرمون محفز الدرقية Thyroid Stimulating Hormone من الفص الأمامي للغدة النخامية وتعرض الحيوان للبرد لعدة أسابيع زيادة إفراز هرمونات الدرقية لأكثر من 100% من إفرازها الطبيعي وهذه الكميات من T4 و T3 تسبب زيادة معدل التمثيل القاعدي Basal Metabolic Rate لحوالي 30% عن معدلات الطبيعية، وأيضا بعض مصادر الحرارة المكتسبة للحيوان هو الغذاء الذي يمد الحيوان بالطاقة. يتم تحديد إنتاج الحرارة، من خلال النشاط الأيضي. عند الراحة، تكون هذه الكمية الضرورية لوظائف الجسم الأساسية، على سبيل المثال فأن وظيفة التنفس القلب هو تزويد خلايا الجسم بالأكسجين والمواد المغذية. أثناء العمل ومع ذلك، فإن حاجة العضلات للنشطة للأكسجين والمواد الغذائية تزداد كما هو الحال في النشاط الأيضي. عندما تحرق العضلات هذه العناصر الغذائية للنشاط الميكانيكي،

يتم إطلاق جزء من الطاقة التي تحتويها خارج الجسم كنشاط خارجي، ولكن معظمها يتم إطلاقه في العضلات على هيئة حرارة. وتسمى النسبة بين النشاط الخارجي والطاقة المستهلكة بالكفاءة التي يستخدمها الجسم لإنجاز العمل.

معدل التمثيل الغذائي القاعدي (Basal Metabolic Rate (BMR): وهو الطاقة الناتجة عندما يكون الحيوان تحت أنسب درجة حرارة ملائمة Thermo-neutral Zone وبعد الهضم والامتصاص (بعد الأكل بحوالي 48-72 ساعة في المجترات) وفي حالة راحة تامة (الوقوف يزيد من الطاقة الناتجة). من أهم العوامل التي تؤثر على معدل التمثيل هو حجم الجسم، والعمر، والوقت، ودرجة حرارة الجو، وتناول الطعام والعزل الحراري.

1- حجم الجسم Body Size: تحت نفس الظروف، الحيوانات الكبيرة في الحجم تنتج كمية حرارة في كل ساعة أكبر من الحيوانات الصغيرة، والحيوانات البالغة أكثر من الحيوانات الرضع، وهذا صحيح بشكل عام ولكن إذا أخذنا بالاعتبار الإنتاج الحراري لكل واحد كيلو غرام من جسم الحيوان فهذه الطريقة يمكن المقارنة بين الحيوانات المختلفة. ولهذا قد يفترض أن وزن الجسم يمكن أن يكون قاعدة جيدة للمقارنة بين الحيوانات الصغيرة والكبيرة الحجم، ويمكن أن نعبر عن الإنتاج الحراري أو معدل التمثيل بالواط (Watts) أو كيلو سعرة حرارية/ساعة (KJ/Hour) أو كيلو جول/ساعة (K J/Hour) لكل غم أو كيلو غرام من وزن الجسم، في الحيوانات ذوات الدم الحار Homeotherms يتناسب معدل التمثيل مع معدل الفقد الحراري، ومعدل الفقد الحراري يعتمد على مساحة السطح Surface Area والعزل الحراري للسطح والتي من خلالها تفقد الحرارة. الحيوانات الكبيرة الحجم (الفيل مثلاً) لها مساحة سطح أصغر مقارنة بحجمها أو وزنها مقارنة بالحيوانات الصغيرة (الفأر مثلاً) ولهذا فإن معدل التمثيل يعبر عنه بالواط (Wait)/مساحة السطح المربع ولكن المشكلة أن قياس مساحة السطح ليست بالسهل ولكن يمكن حسابه بمعادلة بسيطة: **مساحة السطح:-**

$$M^2 = 0.1 \quad W^{0.67}$$

جدول يوضح العلاقة بين وزن الجسم والإنتاج الحراري

الحيوان	وزن الجسم كغم	الإنتاج الحراري Kcal/day
الفأر	٠,٠٢١	٣,٦
خنزير غينيا	٠,٤١	٣٥,١
أرنب	١,٥٢	٨٣
قط	٣	١٥٢
كلب	٦,٦	٢٨٨
كلب	٢٤	٨٧٥
ماعز	٣٦	٨٠٠
إنسان (أنثى) بقرة	٥٨	١٣٢٠
	٤٣٥	٨١٦٦

2- العمر Age: الحيوانات الصغيرة في العمر أصغر حجماً من الحيوانات البالغة (لنفس النوع) ولكن العمر بحد ذاته له تأثير على معدل التمثيل بجانب الاختلاف في الحجم. في جميع الأنواع والإنسان منها معدل التمثيل يزداد بسرعة مقارنة بوزن الجسم ثم بمعدل أقل.

3- الوقت The Time: الإنسان من الكائنات التي لها نشاط يومي Diurnal ويزداد نشاطه خلال النهار والراحة خلال الليل (فترة الراحة والنوم) ومعدل التمثيل يكون أعلى في النهار وهذا عكس الحيوانات التي تتميز بالنشاط في الليل مثل الفأر أو القوارض بشكل عام.

في حالة تعرض الحيوان للإجهاد الحراري المستمر قد يحدث تغير في هذا النمط في الإنتاج الحراري وفي درجة حرارة الجسم، فقد وجد مثلاً أن درجة حرارة جسم البقر عند تعرضها لإجهاد حراري مستمر 31 م لمدة 24 ساعة تكون أعلى Maximum في منتصف الليل وأقل Minimum خلال منتصف النهار وقد يكون الارتفاع في درجة حرارة الجسم راجع للتغير في معدل التمثيل أو في الفقد الحراري من الجسم.

4- الإنتاج الحراري في الجسم يتم بطريقتين:

١ - زيادة النشاط العضلي؛ الرجفان أو الارتعاش Shivering

٢ - وسائل غير الارتعاش؛ Non- Shivering Thermogenesis (NST)

زيادة النشاط العضلي:

انخفاض درجة حرارة الجسم عند التعرض للجو البارد يؤدي إلى زيادة معدل الإنتاج الحراري بواسطة انقباض وانبساط سريع في العضلات الهيكلية، هذا الانقباض لا إرادي ويؤدي إلى زيادة ٤٠ % في استهلاك الأوكسجين. وتتحكم درجة حرارة الأجزاء الخارجية Peripheral والمركزية Central من الجسم في بدء الرجفان وفي معدل هذه الوسيلة تستخدمها الحيوانات الكبيرة في العمر. بينما لا تعتمد الحيوانات الرضيعة والصغيرة في العمر عليها لأنها وسيلة غير اقتصادية وذلك بسبب:

- ✚ جزء من الطاقة تستهلك لحركة العضلات نفسها.
- ✚ موقع الرجفان عادة قرب سطح الجسم وبالتالي نسبة من الإنتاج الحراري تفقد للخارج بدلاً من الاستفادة منها داخل الجسم.
- ✚ عملية الرجفان (الحركة السريعة للعضلات) تزيل طبقة الهواء الساكن حول الجسم وهذا يزيد من سرعة الفقد الحراري.
- ✚ الرجفان وسيلة جيدة للدفاع عند الجسم عند التعرض للجو البارد المفاجئ ولكن ليست اقتصادية على المدى البعيد.

وسائل غير الارتعاش: تستطيع الحيوانات المتكيفة Acclimated Animals على الجو البارد زيادة إنتاجها الحراري إلى الضعف تقريباً دون الاعتماد على الرجفان وعلى حركة العضلات ويرجع الجزء الأكبر منها إلى التأثير الحراري Caloregenic Effect لهرموني الانفرن والنورابنفزن اللذان يفرزان من نخاع غدة

الادرينال Adrenal Gland أثناء التعرض للجو البارد، وكذلك الزيادة في إفراز هرمونات الغدة الدرقية والتي تفرز هرموني T_3 و T_4 ويعتقد أن هذان الهرمونان لهما تأثير غير مباشر في زيادة معدل التمثيل وذلك عن طريق زيادتهما لتأثير وفعالية هرموني غدة الادرينال.

5- النسيج الدهني البني (Brown Adipose Tissue (BAT): هناك طريقة أخرى لزيادة معدل التمثيل وبطريقة غير الرجفان في الثدييات الصغيرة الحجم مثل الفأر، وفي هذه الثدييات توجد كمية من الدهن البني والذي يمتاز بإنتاج حراري عالي. جميع الثدييات بعد الولادة يوجد بها كمية من الدهن البني ولكن هذا يختفي مع التقدم بالعمر ما عدا الفأر، وبعض الحيوانات الصغيرة. وتوجد هذه الأنسجة حول وبين العضلات وفي العنق والظهر وفي التجويف البطني، والجزء الأكبر محيط بالكلية والغدة فوق الكلوية، هذه الخلايا تتميز بوجود أعداد كبيرة من الميتوكوندريا وإمداد دموي كبير واللون البني هو الغالب لهذا تسمى الدهن البني.

6- الطاقة الناتجة من الهضم والامتصاص (Specific Dynamic Action of Food (SDA): وهي الطاقة الناتجة من الهضم والامتصاص وتزيد في حالة تناول علائق تحتوي على نسبة عالية من الألياف.

7- الصفات الشكلية الملائمة للمناخ: يعتبر سطح جسم الحيوان هو الوسيط بين الجسم والبيئة المحيطة وبالتالي فإن صفات هذا السطح هي التي تتحكم في مقدار الفقد الحراري بحيث تزيد العزل الحراري في الجو البارد وعلى العكس تقلل العزل في الجو الحار وذلك حتي يتناسب مقدار الإنتاج الحراري والفقد الحراري مع تغير ظروف البيئة المحيطة بالحيوان. لذلك فإن حيوانات المناطق الحارة تتميز ببعض الصفات الشكلية عن حيوانات المناطق الباردة والتي تساعد على الحياة والإنتاج تحت ظروف هذه المناطق دون إجهاد أو تعب. وأهم هذه الصفات الشكلية هي السطح الخارجي النسبي (نسبة سطح الجسم إلي وزن الحيوان) و صفات غطاء الجسم.

وبين الجدول التالي الصفات الشكلية المميزة لحيوانات المناطق الحارة والباردة

م	الصفة	حيوانات المناطق الحارة	حيوانات المناطق الباردة
1	المسطح النسبي	كبير	صغير
2	كثافة الغطاء	قليل الكثافة	كثيف
3	طول الغطاء	قصير	طويل
4	تلبد الغطاء	غير ملبد	ملبد
5	لون الشعر أو الصوف	داكن	فاتح
6	لون الجلد (الصبغة)	داكن (مصبوغ)	فاتح (غير مصبوغ)
7	اللمعان	لامع	غير لامع
8	العزل الحراري	ضعيف	جيد

تمتلك الحيوانات القطبية آليات خاصة تقاوم بها البرد القارس. مثل وجود طبقات شحمية كثيفة تحت الجلد تحفظ به الحرارة الداخلية وتمنعها من الانتشار والضياع. كذلك تقوم الأطراف بدور كبير في التنظيم الحراري لديها، فأطراف الثدييات القطبية أقصر من أطراف مثيلاتها في المناطق المعتدلة وأثن منها، لكن حرارة هذه الأطراف أقل بكثير من حرارة بقية الجسم بالرغم من غزارة الدم الوارد إليها. والواقع أن أطراف

هذه الحيوانات تستطيع مقاومة البرد أكثر من أي عضو آخر في الجسم، بسبب وجود ترتيب وعائي خاص فيها يسمى الشبكة الخارقة Rete Mirabile تتمثل بتوازي الشرايين الذاهبة إلى هذه الأطراف والأوردة الآتية منها وتلامس بعضها مع بعض. فالشرايين التي تحمل الدم الحار إلى الأطراف تمر موازية وملاصقة للأوردة التي تغادر الأطراف باتجاه القلب، الأمر الذي يؤدي إلى انتقال حرارة الدم الشرياني إلى الدم الوريدي، وهكذا يقوم الدم الشرياني الساخن بتسخين الدم الوريدي البارد الآتي من المحيط، وبالتالي لا يتسنى لحرارة الدم (الحرارة الداخلية) الوصول إلى نهاية الأطراف، ومن ثم لا يضيع في الوسط البارد إلا القليل من الحرارة. وهكذا تبقى نهايات هذه الأعضاء منخفضة الحرارة، الأمر الذي يشار إليه فيزيولوجيا بـ«التيار المضاد» أو «التيار المتعاكس» Counter Current. توجد مثل هذه الترتيبات الوعائية أيضا في زعانف وأذناب الحيتان وعجول البحر، وكذلك في أجنحة طيور البطريق وأطرافه السفلية، وأطراف الحيوانات التي تخوض في الماء مثل اللقلق ومالك الحزين. وتجدر الإشارة إلى أن الترتيبات الوعائية اللازمة لحدوث التيار المضاد لا يقتصر وجودها على حيوانات المناطق الباردة. فبعض الثدييات الاستوائية مثل الكسلان والمدرع وأكل النمل حساسة جدا لتغيرات حرارة الوسط، فهي ترتجف عندما تنخفض درجة حرارة الوسط الذي تعيش فيه، ويعمل أيضا عندها مبدأ التيار المضاد لحفظ حرارة الحيوان دون حاجة كبيرة إلى زيادة الإستقلاب لديه. ويذكر كذلك أن هناك آلية عزل فعالة لدى بعض الحيوانات تتمثل بوجود الوبر والريش والشعر الغزير التي تؤمن العزل والحماية، فتنتصب هذه العناصر بسبب القشعريرة التي تقوم بها عضلات هذه الأعضاء، فتتشكل طبقة عازلة من الهواء تمنع ضياع الحرارة عبر الجلد. حتى أن أحد القوارض وهو جرد الماسك Musk Rat (يعيش قرب الماء ويمضي بعضا من الوقت منغمرا فيه) يحتفظ في فرائه بطبقة رقيقة من الهواء أثناء انغماره في الماء، تقوم بدور طبقة عازلة بينه وبين الماء الذي يسبح فيه. وتمتاز أعماق المحيطات بدرجات منخفضة من الحرارة، لذا تقاوم الحيوانات التي تغطس إلى تلك الأعماق البرودة بإيقاف الدوران الجلدي لديها، كما تحول دورانها الدموي إلى الأعضاء المهمة في الجسم كالدماع.