# فيزيولوجيا الجهاز التنفسي

# Respiratory System Physiology

د. ماجد موسى

الجهاز التنفسي هو الجهاز الذي يعمل على تبادل الغازات بين الدم وهواء الوسط المحيط

التنفس هو مجموع العمليات المؤمنة لاستهلاك الـ O2 وطرح CO2 إلى الوسط الخارجي. الأكسجين وثاني أكسيد الكربون يعملان على تأمين استقلاب الطاقة.

تختلف طريقة التنفس باختلاف الكائنات الحية, فعند وحيدات الخلية يدعى يحدث التنفس بطريقة بالانتشار أي انتشار الغازات من خلال غشاء الخلية, أما عند الأحياء الدنيا عديدات الخلايا كالديدان والحشرات الدنيا فيحدث التبادل الغازي عن طريق الجلد ويدعى بالتنفس الجلدي. في الفقاريات الدنيا كالأسماك والبرمائيات فهي تمتلك أعضاء تنفس خاصة كالغلاصم في الأسماك ويدعى التنفس عندها بالتنفس الغلصمي.

أما في الحيوانات العليا فيحدث التبادل الغازي بالكامل في الرئتين فهي تمتلك جهاز تنفسي متطور, وعضلات تنفسية متطورة ومكتملة تشارك في عملية التنفس, والجملة العصبية المركزية التي تنظم التنفس وتكيفه مع ظروف الوسط المحيط.

## فيزيولوجيا التنفس عند الثديات

## Mammalia respiration physiology

يحدث التبادل الغازي عند الثديات في الحويصلات الرئوية الملاصقة للشعيرات الدموية والكريات الحمر. يؤمن الأكسجين عمليات الأكسدة الحيوية المحررة للطاقة فعند توقف عمليات الأكسدة هذه يموت الحيوان خلال بضع دقائق.

**للتنفس عدة أنواع:**

- التنفس الخارجي: ويحدث فيه تبادل الغازات بين الوسط المحيط والحويصلات الرئوية (تهوية الرئتين).
- التنفس الداخلي: يحدث تبادل الغازات بين الحويصلات الرئوية والدم.

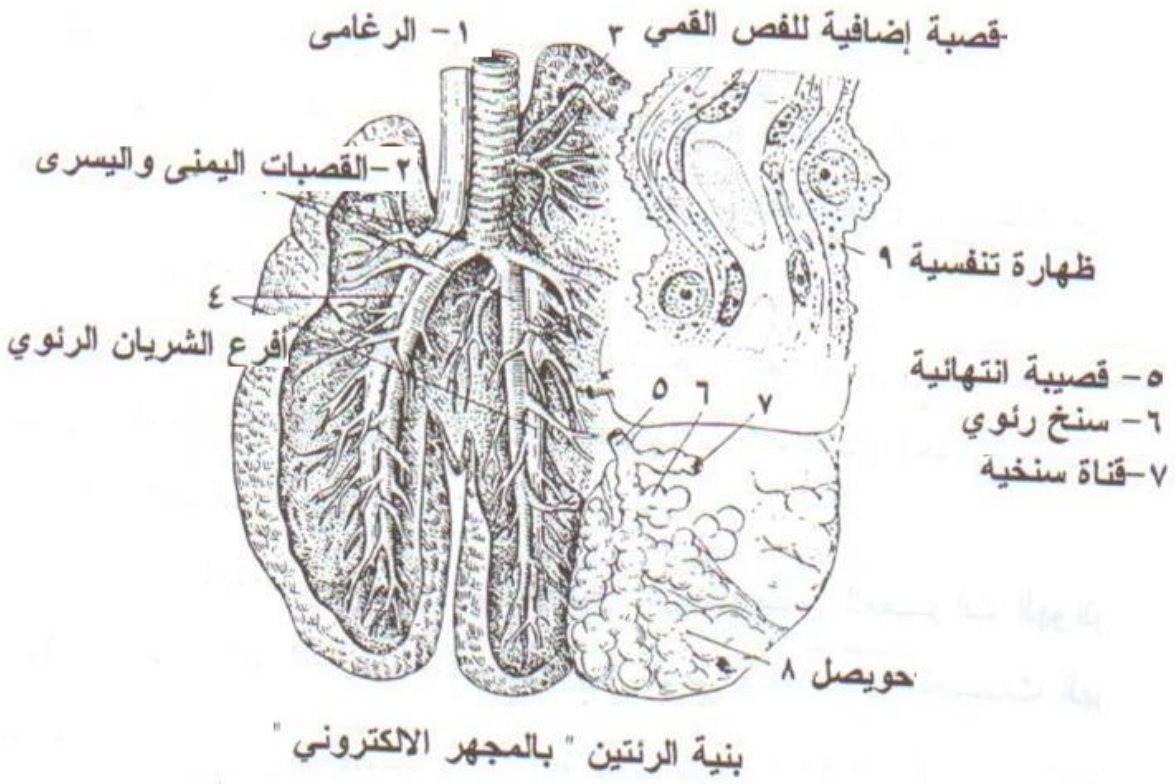
- التنفس الخلوي: يتم من خلاله إطلاق الطاقة داخل الخلايا الحية بعد أكسدة المواد الغذائية بواسطة الأكسجين.

## تركيب الجهاز التنفسي:

يتكون الجهاز التنفسي من الأجزاء (الطرق) الظاهرة والتي تتألف من: الأنف (المنخران) – بلعوم – حنجرة, ومن الطرق الباطنة والتي تتألف من: الرغامى – القصبات – القصيبات – الأسناخ الرئوية (الشكل 1) التي تتم فيها المبادلات الغازية.

تشكل الطرق الظاهرة والطرق الباطنة بمجموعها ما يسمى بالشجرة الهوائية.

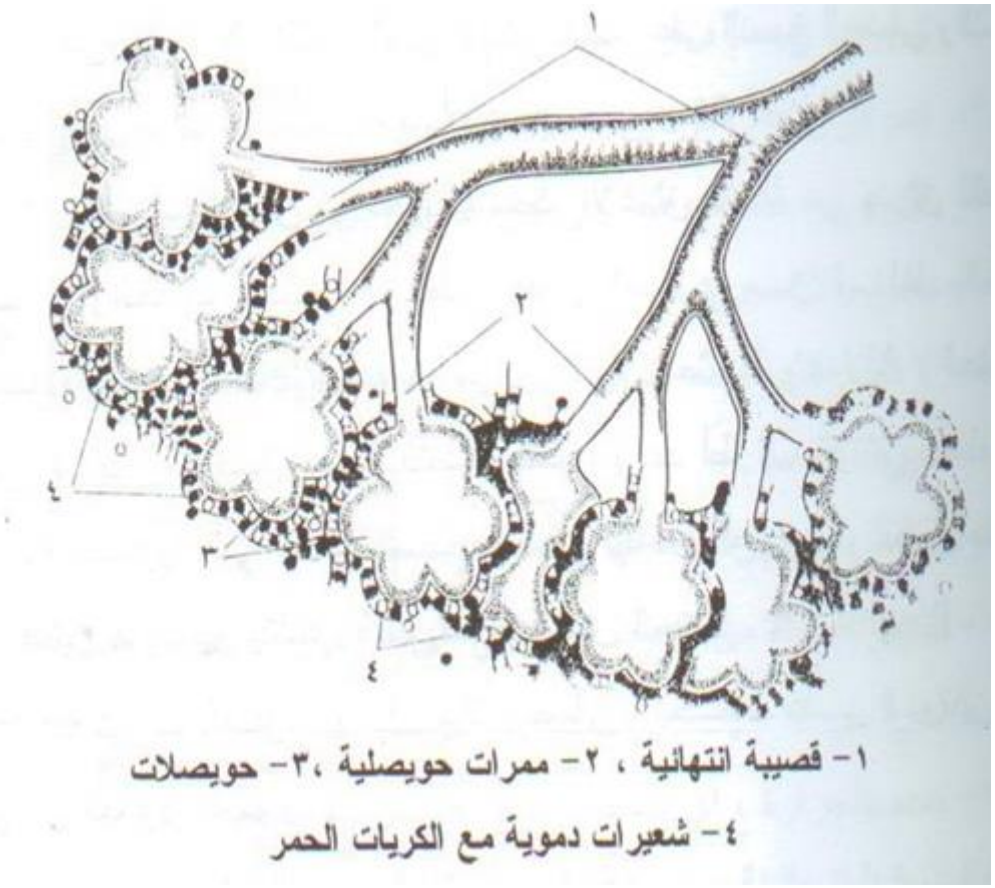
يساعد بعملية التنفس كل من 1- القفص الصدري (الأضلاع والعضلات), 2- غشاء الجنب أو الجنبة Pleura, 3- الحجاب الحاجز.




الشكل (1): بنية الرئتين بالمجهر الألكتروني

يصل الهواء الخارجي للرئتين عن طريق الممرات الهوائية (أنف, فم, بلعوم, حنجرة, رغامى, القصبة والقصيبات الهوائية).

تدخل القصيبات الهوائية الرئتين ثم تنقسم إلى قصيبات أصغر قطراً, وبحسب القطر يوجد قصيبات أولية وثانوية وثالثية وقصيبات انتهائية التي تشكل بداية القنوات السنخية التي تنتهي بالجيوب السنخية وهي جيوب نصف كروية تنفتح فيها الحويصلات التي يحدث فيها تبادل الغازات (الشكل 2).




الشكل (2): جزء من الرئتين مع الشعيرات الدموية – تكبير شديد

## أقسام جهاز التنفس:

**1- الحنجرة Larynx:** وهي عبارة عن عضو عضلي غضروفي, يقوم بدور صمام, يوجد بداخله الحبال الصوتية.

**2- الرغامى Trachea:**

عبارة عن انبوب مفتوح دائماً لوجود حلقات غضروفية غير كاملة الاستدارة من الجهة الظهرية حيث يوجد المريء الذي يتمدد داخلها أثناء البلع.

ترتبط هذه الحلقات الغضروفية مع بعضها بأربطة مكونة من نسيج ليفي مرن, تتوضع أليافه بشكل متموج نتيجة لذلك فهي تزيد من إمكانية استطالة الرغامى. يبطن جدار الرغامى من الداخل غشاء مخاطي يحوي خلايا طلائية ذات أهداب.

**3- القصبات:**

توجد خارج الرئتين وهي مشابهة للرغامى من حيث البنية, لكن عند دخولها للرئتين تصبح الحلقات الغضروفية قطع منفصلة, وتتوضع هنا الطبقة العضلية.

**4- القصيبات:**

لا يحتوي جدارها على غضاريف, يحتوي على نسيج عضلي ناعم.

**5- القنوات السنخية:**

تحتوي القنوات السنخية على كميات من الألياف العضلية الناعمة الملمس, ولها خاصية المطاطية تجعلها تتمدد أثناء الشهيق وتعود لطبيعتها أثناء الزفير.

يرافق الجيوب السنخية:

- شرينات.
- وريدات.

كما توجد حول الأسناخ شعيرات دموية ولمفية وألياف عصبية تسهل عملية تبادل الغازات.

**جدار الحويصلات الرئوية:**

يتألف جدار الحويصلات الرئوية من طبقة واحدة من نسيج طلائي تنفسي محاط بشبكة كثيفة من من الشعيرات الدموية الحاوية على طبقة واحدة من الخلايا البطانية, وهكذا فإن الهواء (الموجود في الحويصلات الرئوية) مفصول عن الدم (الموجود في الشعيرات) بطبقتين من الخلايا فقط والتي يحدث من خلالهما تبادل الغازات بسهولة.

السطح الذي يحدث عليه التبادل الغازي عظيم جداً لأنه يحوي الملايين من الحويصلات الرئوية بالإضافة لألياف شبكية وألياف مرنة وخلايا بلعمية طليقة Macrophages تسمى خلايا الغبار (Dust cells) كما يوجد خلايا حاجزية Spetal cells متناثرة تفرز مادة دهنية فوسفورية فعالة على السطح تخفض التوتر السطحي. السطح الكلي للحويصلات الرئوية في الأغنام 50 – 80 $م^2$.

## الدوران الدموي الرئوي:

يتميز الدوران الرئوي بما يلي:

1- ضغط الدم في الأوعية الدموية الرئوية أدنى بكثير منه في الدوران المحيطي, وينخفض في فترة الشهيق ويرتفع في فترة الزفير.
2- وجود تماس مباشر بين جدران شبكة الشعيرات الدموية الرئوية وجدران الحويصلات الرئوية المملوءة بالهواء الجوي, أما باقي شعيرات الجسم فتكون بتماس مع السوائل الخلالية.
3- الدم الوارد إلى الرئتين (عن طريق الشرايين الرئوية) يكون مشبع بـ $CO_2$ , أما الدم الصادر عن الرئتين (عن طريق الأوردة الرئوية) إلى القلب فهو مشبع بـ $O_2$.
4- لا تتأثر كثيراً هذه الشعيرات بالدفعات العصبية كما هو الحال في باقي أجزاء الجسم.

## فوائد الممرات الهوائية:

للمرات العديد من الفوائد من أهمها:

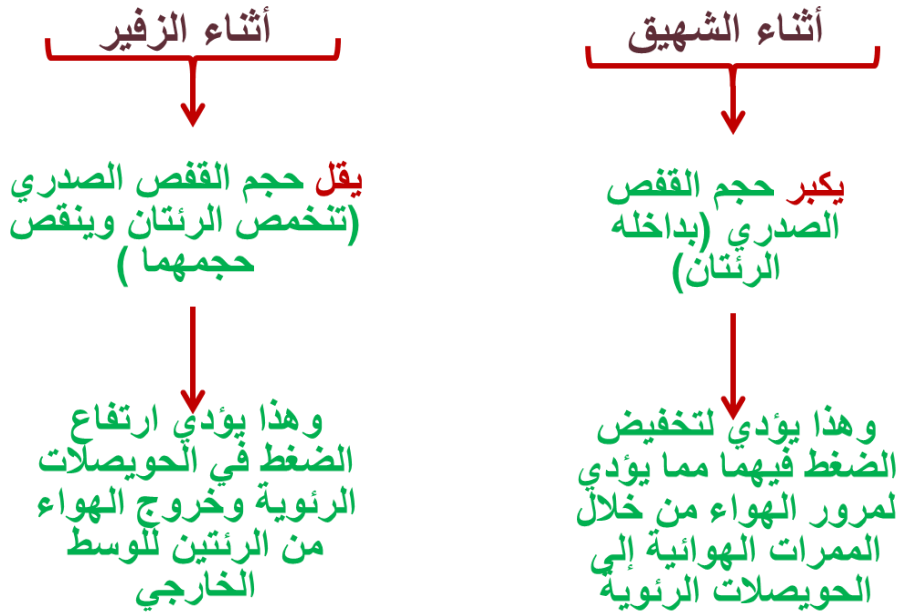
- إيصال الهواء الخارجي للرئتين.
- تنقية الهواء المستنشق من ذرات الغبار.
- تمد الهواء بالحرارة لتصل إلى درجة حرارة الجسم.
- تمده بالرطوبة أثناء مروره فيها (حوالي 75% فيها بينما حوالي 25% يحدث في الأسناخ الرئوية).
- يتم تمييز الهواء الصالح للتنفس من خلال عصب الشم في مؤخر الغشاء المخاطي لتجويف الأنف.
- يوجد في الطبقة المخاطية للطرق التنفسية العليا خلايا مصلية – مخاطية وطلائية, حيث يصطاد المخاط المفرز الغبار ويرطب الطرق التنفسية. أما الحركة الومضانية السريعة لأهداب الخلايا الظهارية فتساعد على دفع المخاط مع جزيئات الغبار والجراثيم وغيرها نحو البلعوم والفم.
- تتم تدفئة الهواء المستنشق نتيجة للمدد الدموي الغزير للطبقة المخاطية للمجاري التنفسية والحنجرة والرغامى.

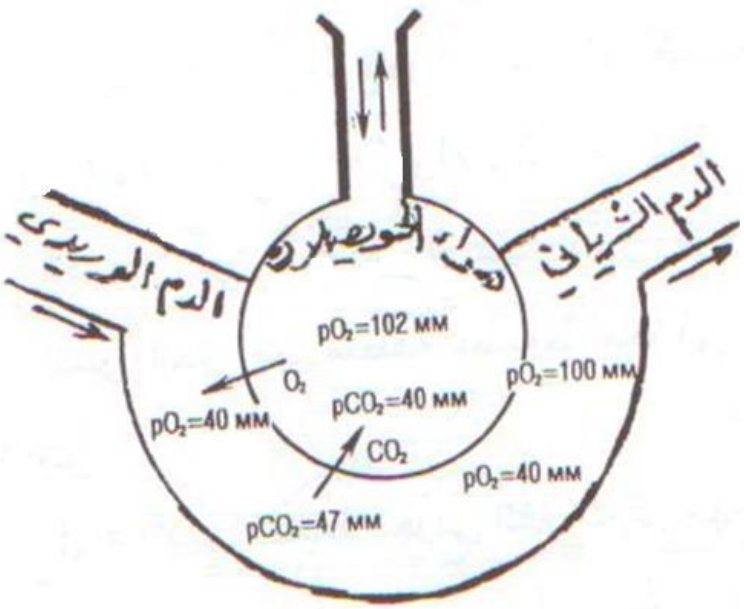
- يوجد في الطرق التنفسية العليا مستقبلات حسية والتي تسبب إثارتها المنعكسات الدفاعية كالسعال والعطاس.

## التنفس الخارجي External respiration:

هو عبارة عن تبادل الغازات بين الحويصلات الرئوية والوسط الخارجي, ويحدث نتيجة للحركات التنفسية للقفص الصدري.

ويحدث أثناء الشهيق وأثناء الزفير مايلي:






الشكل (3): تبادل الغازات خلال جدران الحويصلات الرئوية.

يتم تبادل الغازات عند الثديات بشكل كامل في الرئتين بينما من خلال الجلد والجهاز الهضمي فقط بحدود 1 – 2 %. ويزداد التنفس الجلدي عند الخيول أثناء العمل المجهد إلى 8 %.

## آلية التنفس Mechanism of respiration:

- **آلية الشهيق:**

تتم نتيجة لتوسع القفص الصدري لثلاث اتجاهات:

1- تبدأ بتقلص العضلات الشهيقية (العضلات الوربية ) الخارجية بين الأضلاع, والعضلات بين الغضاريف.

2- يحدث تحرك أو انخفاض عظم القص إلى الأسفل والأمام مما يساعد بتوسع القفص الصدري.

3- تتقلص ألياف عضلات الحجاب الحاجز وتصبح قبته على شكل مخروط يضغط على الأحشاء الباطنية إلى الخلف.

4- كما تتقلص العضلة المحيطية للحجاب الحاجز والعضلة المنشارية التي تسحب أضلاع المؤخرة للخلف وهذا يؤدي لتوسع القفص الصدري بالاتجاه الأمامي الخلفي.

- **آلية الزفير:**

تتم نتيجة لتقلص القفص الصدري وصغر حجمه (توقف الشهيق شرط أساسي لحدوث الزفير):

1- يبدأ باسترخاء العضلات الشهيقية والحجاب الحاجز الذي يعود عن تحدبه إلى وضعه الأصلي باتجاه القفص الصدري ويساعد على ذلك دفع أعضاء البطن للحجاب إلى الأمام.

2- تتم عودة أضلاع القفص الصدري إلى وضعها السابق نتيجة لمرونة الغضاريف ولثقله الخاص.

هذا يؤدي لانخماص القفص الصدري وصغر حجمه وارتفاع الضغط في الجوف الصدري وبذلك يخرج الهواء من الرئتين (أي الزفير).

يدعى ما سبق بالزفير المنفعل Passive: نتيجة لاسترخاء العضلات المذكورة سابقاً, ولكن أثناء الزفير الفعال الإيجابي (زفير بجهد Forced expiration): تتقلص العضلات الوربية الداخلية والعضلة المنشارية الخلفية السفلية وكذلك عضلات البطن.

يتم الشهيق بسرعة أكبر من الزفير (فعند الأبقار يكون التناسب الزمني للشهيق إلى الزفير 1 : 1.2).

## مرونة الرئتين Elasticity of Lungus:

تمتلك الرئتين المرونة نتيجة لـما يلي:

1- وجود كمية كبيرة من الألياف المرنة في جدران الحويصلات الرئوية.

2- التوتر السطحي للغلالة السائلة الرقيقة المغطية للسطح الداخلي لجدران الحويصلات الرئوية (تقدر بـ 2/3 القوة المرنة المحركة للرئتين).

تتكون هذه الغلالة من: شحميات سائلة (فوسفولبيدات) غير منحلة بالماء فعالة بالسطح تفرزها الخلايا الحاجزية في الأسناخ الرئوية والتي تثبت التوتر السطحي.

أثناء الشهيق: تتوزع جزيئات المادة الفوسفورية الفعالة بالسطح بالقرب من بعضها البعض بأقل كثافة وهذا يؤدي لتقوية التوتر السطحي وعلى العكس أثناء الزفير تتوضع هذه الجزيئات بكثافة أكبر وهذا يخفض التوتر السطحي ويمنع التصاق الحويصلات وانخماص الرئتين.

## النماذج التنفسية عند الحيوانات:

**1- نموذج التنفس الضلعي (أو الصدري):** تتم بشكل أساسي على حساب حركة الأضلاع (كما في الكلاب).

**2- نموذج التنفس البطني (أو الحجابي):** يحدث فيه توسع القفص الصدري بشكل أساسي على حساب تقلص الحجاب الحاجز.

**3- نموذج التنفس الضلعي البطني:** تشارك في الشهيق بشكل متساو العضلات بين الاضلاع والحجاب الحاجز والعضلات البطنية (كما في الحيوانات الزراعية).

## سرعة (تواتر) التنفس Respiratory frequency:

تختلف باختلاف الحيوان, وحتى في الحيوان الواحد تختلف باختلاف الجنس, العمر, الحجم, الوزن, الجهد, المرض, درجة امتلاء الجهاز الهضمي, البيئة المحيطة بالحيوان (من حرارة وضغط جوي ... إلخ). تبلغ سرعة التنفس عند الأبقار 18 – 28 مرة/د, وعند الأغنام والماعز 10 – 20 مرة/د, وعند الخيول 10 – 14 مرة/د, أما عند الدجاج فتبلغ 15 – 30 مرة/د, وعند الأرانب 50 – 60 مرة/د أما في الإنسان فتبلغ 16 – 20 مرة/د.

تتأثر سرعة التنفس بالعديد من العوامل من أهمها:

1- حجم الحيوان: تتناسب سرعة التنفس عكسياً مع حجم الحيوان (يلاحظ قلة سرعة التنفس عند الحيوانات ذات الحجم الكبير والعكس بالعكس).

2- إنتاج الحيوان: تزداد سرعة التنفس عند الحيوانات المنتجة وذات الاستقلاب النشيط.

3- الجنس: سرعة التنفس أعلى عند الإناث مما هو عليه عند الذكور.

4- العمر: تتناقص مع تقدم العمر.

5- درجة حرارة الوسط المحيط: تزداد عند ارتفاع الحرارة (للتخلص من الحرارة الزائدة).

6- الحمل: تزداد أثناء الحمل.

7- التغذية وامتلاء المعدة: تزداد بعد الغذاء وامتلاء المعدة خاصة عند المجترات.

8- حرارة الجسم: تزداد سرعة التنفس عند ارتفاع حرارة الجسم الداخلية.

## تهوية الرئتين:

وهي عبارة عن كمية الهواء المستنشقة أو المارة خلال الرئتين في دقيقة واحدة وتسمى حجم التهوية الرئوية في دقيقة. وهو مقدار متغير تابع لنظم التنفس والسعة الحيوية للرئتين وشدة العمل وخواص العليقة والوضع الصحي للرئتين وعوامل أخرى.

**أما تهوية الحويصلات الرئوية =** تهوية الرئتين - تهوية الحيز الميت (البلعوم والحنجرة والرغامى والقصبة والقصيبات).

لذلك فإن حوالي 70% من الهواء المستنشق يصل مباشرة للرئتين والجزء الباقي 25 – 30 % لا يشارك في التبادل الغازي حيث يبقى في الحيز الميت.

مثال: إذا علمنا أن حجم الحويصلات عند الخيول 22 ليتر, وأن الحصان يستنشق أثناء الراحة 5 ل هواء

إذاً الـ 70 % التي تصل للحويصلات تساوي 3.5 لتر

معامل التهوية الرئوية: وهو عبارة عن تناسب كمية الهواء المستنشق إلى هواء الحويصلات (مثال 5: 3.5).

## تركيب هواء الشهيق والزفير وهواء الحويصلات:

يختلف تركيب هواء الشهيق والزفير وهواء الحويصلات من حيث نسبة احتواءه على الغازات المكونة للهواء كما يلي:

**1- تركيب هواء الشهيق (الهواء الجوي):**

ويتكون هواء الشهيق مما يلي:

20.82 % أكسجين

$Co_2$ % 0.03

79.03 % أزوت.

إنّ هواء الحظائر يحوي نسبة أكبر من الـ $Co_2$ من وبخار ماء وأمونيا وغيرها.

**2- تركيب هواء الزفير:**

وهو خليط من هواء الأسناخ الرئوية بعد عملية التبادل الغازي.

يحتوي الهواء الموجود في الممرات التنفسية في نهاية عملية الشهيق على النسب التالية:

16.3 % أكسجين

$Co_2$ % 4

79.7 % أزوت.

هذه المؤشرات حسبت على أساس الهواء الجاف بعد طرح نسبة بخار الماء المشبع به هواء الزفير

**3- تركيب هواء الحويصلات:**

يختلف هواء الحويصلات عن هواء الزفير باحتوائه على نسبة أكبر من $Co_2$ و نسبة أقل من الأكسجين, فهو يحوي:

14.2- 14.6 % أكسجين

$Co_2$ % 5.62

80.48 % أزوت.

من الجدير ذكره أنّ تركيب هواء الزفير غير ثابت ويتبع للعديد من العوامل وهي:

1) نشاط استقلاب المواد في الجسم.
2) حجم التهوية الرئوية.
3) درجة حرارة الهواء المحيط وغير ذلك.

## التنفس الداخلي Internal respiration:

يحدث التبادل الغازي عبر الحاجز الهوائي الدموي عن طريق البنية الخاصة لجدران الحويصلات والشعيرات الدموية, حيث تتكون جدران الأسناخ من ظهارة مسطحة مكونة من طبقة واحدة من الخلايا, يلاصق هذه الطبقة شعيرات دموية كثيفة جدارها مكون من صف واحد من الخلايا البطانية, يسير فيها الدم ببطء يمكن من من تبادل الغازات مع الهواء الموجود في الأسناخ تحت فرق الضغط الجزيئي لهذه الغازات.

**كيفية ربط الأكسجين بالدم ونقله:**

ينحل الـ O2 الواصل للدم في المصورة الدموية بكمية بسيطة لاتزيد عن 3% (أي 0.03 مل / 100 مل دم) وذلك لصعوبة ذوبان الأكسجين في المصورة. أما الجزء المتبقي منه 97% فيمر لداخل الكريات الحمر, حيث يرتبط مع خضاب الدم (Hb) مشكلاً خضاب الدم المؤكسج. عند زيادة الضغط الجزئي يزداد تشبع الخضاب بالأكسجين حتى تشبع كل جزيئات الخضاب (نقطة التشبع الكامل). تكون درجة تشبع الدم الواصل من الرئتين إلى الأذين الأيسر في الظروف السوية من 96-98 % (وهي أقصى درجة تشبع للدم الشرياني في الضغط الجزيئي للأكسجين في الشرايين), أما في الأنسجة فتنخفض درجة تشبع الدم إلى 70% عندما يكون الضغط الجزيئي للأكسجين **40 مم زئبق** (وهو الضغط الجزيئي للأكسجين في الدم الوريدي في الأنسجة, لذا ينفك الأكسجين عن الخضاب).

**كيفية ربط الدم لثاني أكسيد الكربون ونقله:**

يوجد في الدم الوريدي 50 – 58 حجم % $CO_2$, القسم الأكبر منه يوجد في المصورة الدموية والكريات الحمر على شكل حمض الكربونيك وحوالي 2.5 حجم % بشكل ذائب و 4 – 5 % مرتبط مع الخضاب على شكل خضاب الدم المكربن (كربوكسي هيموغلوبين).

ينتشر $CO_2$ المتشكل في الأنسجة بسهولة في دم شعيرات الدوران الدموي المحيطي (لأن توتره في الأنسجة أعلى بكثير منه في دم الشعيرات الدموية).

بعد ذلك يتغلغل الـ $CO_2$ المنحل في المصورة لداخل الكريات الحمر حيث يتحول تحت تأثير أنزيم Carbonic anhydrase إلى حمض الكربونيك.

بما أن كل ثاني أكسيد الكربون في مصورة الكريات الحمراء يتحول إلى حمض الكربونيك فإن توتر الـ $CO_2$ داخل الكريات الحمر ينخفض للصفر نتيجة لذلك: يصل باستمرار دفعات جديدة من الـ $CO_2$ إلى الكريات الحمر.

يتشكل في شعيرات الأنسجة كمية إضافية من بيكربونات البوتاسيوم وكذلك خضاب الدم المكربن, أما في مصورة الدم فتزداد كمية بيكربونات الصوديوم, بعد ذلك تصل البيكربونات مع الدم إلى شعيرات الدوران الدموي الرئوي, حيث يحدث في الكريات الحمر العملية المعاكسة ويمر ثنائي أكسيد الكربون المتحرر من الدم إلى هواء الحويصلات بحسب قانون الانتشار (من التركيز المرتفع إلى المنخفض).

## سعة الدم الأكسجينية:

وهي كمية الأكسجين التي يمكن أن يربطها 100 مل دم عند التحول الكامل لخضاب الدم (Hb) إلى خضاب الدم المؤكسج ($HbO_2$).

كل 1 غ خضاب يمكن أن يربط 1.34 مل أكسجين وبالتالي إذا احتوى الدم على 14 % خضاب فبإمكانه ربط 19 مل أكسجين. السعة الأكسجينية للدم عند أغلب الحيوانات بين 14.2 – 19.8 حجم %

## تبادل الغازات في الرئتين:

يتم انتشار الغازات بحسب قانون الانتشار الفيزيائية أي ينتقل من التركيز المرتفع إلى التركيز المنخفض.

اتجاه حركة الـ $O_2$ و $CO_2$ بين الهواء والرئتين أو بين الرئتين والدم أو بين الدم والخلايا فتحدده الضغوط الجزيئية لغازات التنفس ($O_2$ و $CO_2$) والأزوت في الهواء والدم والخلايا حيث ينتشر الغاز من منطقة الضغط الجزيئي المرتفع إلى منطقة الضغط الجزيئي المنخفض.

يتم الانتشار في الرئة الطبيعية السليمة عبر الأغشية بسرعة كبيرة جداً إذ يحدث التوازن بأقل من ثانية

هناك مجموعة من العوامل تؤثر في حجم التبادل التبادل الغازي عبر الحاجز "الهوائي – الدموي" وهي:

**1-** الحاجز الهوائي الدموي رقيق جداً (1-4 ميكرون) مما يساعد على تبادل الغازا ت. فإذا زادت ثخانته (أثناء الوذمة الرئوية أو تليف الحاجز أو النفاخ) مما يصعب تبادل الغازات ويزداد تراكم CO2 في الجسم وتنخفض كمية الـ O2.

**2-** قابلية ذوبان الغازات في السوائل: قابلية ذوبان CO2 أكثر بـ 20 مرة من O2.

**3-** اختلاف الضغوط الجزيئية للغازات على طرفي الحاجز الهوائي الدموي (في الدم والأسناخ).

**4-** الضغط في تجويف الجنبة (*غشائين أحدهما يحيط بالرئة والثاني يلتصق بالأضلاع*): وهو سلبي دائماً وأقل من الضغط الجوي.

**5-** مساحة السطح التنفسي: وهي كبيرة جداً بالأحوال العادية وأكبر من مساحة الجلد بمرات عديدة وهذا تابع للمساحة الكلية للأسناخ الرئوية الفعالة (هذه المساحة عند الإنسان تعادل 50 ضعفاً لمساحة الجلد).

**6-** السرعة البطيئة لجريان الدم في الأوعية الشعرية المحيطة بالأسناخ الرئوية التي تمكن من انتشار الغازات بأقل من ثانية.

**7-** الضغط الجوي: يتأثر الضغط الجزيئي بتغيرات الضغط الجوي, ففي المناطق المرتفعة ينخفض الضغط الجوي مما يؤدي لانخفاض الضغط الجزيئي للـ O2 داخل الحويصلات الرئوية فيقل معدل انتقاله عبر الحاجز الهوائي الدموي إلى الدم وبالتالي تحدث صعوبة في التنفس وتتسارع عملية التنفس.

**8-** معدل التنفس في الدقيقة.

## تبادل الغازات في النسيج:

يتخلى الدم عن الأكسجين في الأنسجة ويربط ثاني أكسيد الكربون , وبما أن توتر CO2 في الأنسجة 60 – 70 مم زئبق وفي الدم الوريدي فقط 46 مم زئبق وبالتالي فإنه ينتشر من الأنسجة إلى الدم عبر السائل الخلالي ليحوله إلى دم وريدي.

ينخفض توتر الأكسجين في الجبلة الخلوية Protoplasm ويمكن أن يصبح صفراً, ونتيجة لذلك يتغلغل الأكسجين بسرعة من دم شعيرات الدم المحيطي (حيث توتره يساوي 100 مم زئبق وأكثر) إلى السائل الخلالي (حيث ضغطه 20 – 37 مم زئبق).

تستهلك الأنسجة حوالي 40 % من الدم كل الأكسجين الموجود في الدم الشرياني, ولكن أثناء العمل العضلي الشديد يصل استهلاك الأكسجين إلى 50 – 60 %.

تدعى النسبة المئوية للأكسجين المستهلك في الأنسجة من المحتوى العام للأكسجين في الدم الشرياني بـ معامل استهلاك الأكسجين ويمكن حسابه بتحديد الفرق في محتوى الأكسجين في الدم الشرياني والوريدي.

يساعد ارتفاع معامل استهلاك الأكسجين على:

1- التشكل الكبير لحمض اللبن وحمض الكربونيك في أثناء العمل العضلي الشديد.
2- فتح الشعيرات غير الفعالة في النسيج العامل.

## التنفس الخلوي:

هو سلسلة العمليات الاستقلابية الحادثة داخل الخلايا والتي ينتج عنها تحرير طاقة بعد الأكسدة الفيزيولوجية.

تشمل هذه الأكسدة :

1- إعطاء أو نزع الأكسجين.

2- ربط الأكسجين.

3- نقل الالكترون أو تبديل التكافؤ.

- تبدأ الأكسدة بنزع الهيدرجين, حيث تقوم أنزيمات ديهيدراز بتنشيط الهيدرجين الداخل بتركيب المادة المؤكسدة, بعد ذلك يتحد الأكسجين بالهيدرجين ويتشكل الماء, وتحدث هذه العملية بمشاركة الإنزيمات التنفسية. وتشارك في عمليات الأكسدة إنزيمات البيروكسيداز والأوكسيداز.
- يساهم في التنفس الخلوي مجموعة السيتوكروم (سيتوكروم و السيتوكروم أوكسيداز) وكذلك نواقل مجموعات الأمينين والفوسفات. ((السيتوكروم والفلافوبروتينات هي نواقل الهيدرجين)).
- شدة التنفس الخلوي تابعة لنوع الحيوان وإنتاجيته.
- يصاحب هذه العمليات: 1- إنتاج $CO_2$ و ماء. 2- تبادل غازيَ التنفس بين الخلايا والشعيرات الدموية بسبب فروق الضغوط الجزيئية.
- الضغط الجزيئي للأكسجين في الأنسجة حوالي 40 مم زئبق وفي الدم حوالي 1.2 مم زئبق لذا ينتقل الأكسجين من الشعيرات الدموية عبر السائل الخلالي إلى داخل الخلايا,
- أما الضغط الجزيئي لـ $CO_2$ داخل الخلايا 47 مم زئبق وفي الدم 40 مم زئبق لذا يكون انتقاله بالعكس من الخلايا إلى الشعيرات الدموية عبر السائل الخلالي.

- يتم خزن الطاقة الناتجة عن عمليات الاستقلاب على شكل ثالث فسفات الأدينوزين ATP و فسفات الكرياتين لحين استعمالها في العمليات الاستقلابية أو النشاطات العضلية والنقل الفعال للمواد الغذائية مثل الغلوكوز عبر الأغشية الخلوية.

## التنفس الجنيني (الشهيق الأول):

يحدث التبادل الغازي أثناء التطور الجنيني من خلال الأوعية الدموية السرية المتصلة بشكل وثيق مع دم الأم في المشيمة, هذا الارتباط ينقطع أثناء الولادة ويؤدي إلى:

1- الانخفاض الحاد لتوتر الأكسجين.

2- التجمع السريع لثاني أكسيد الكربون. ← كل ذلك يحدث في دم الجنين

3- تراكم نواتج الاستقلاب الأخرى.

↓

لذلك تتنبه عصبونات المركز التنفسي للجنين, وهذا ما يسبب حدوث الشهيق الأول

يجب أن ينقطع تنفس الجنين من خلال دم الأم بسرعة وفجأة, لا يؤدي لإثارة وتنبيه المركز التنفسي ويمكن للفالضغط البطيء على أوعية السرة جنين أن يموت دون حدوث الشهيق.

## تنظيم عملية التنفس Regulation of respiration:

التنفس: هو فعل انعكاسي لا إرادي منظم ذاتياً, وهو مجموعة العمليات التي يتم بنتيجتها التبادل الغازي بين الجسم والوسط المحيط.

يشرف الجهاز العصبي المركزي على عمليات التنفس, والدور الأساسي في هذا يعود للمركز التنفسي Respiratory center المتوضع في التكوين الشبكي على جانبي ساق الدماغ في البصلة وجسر فارول.

يتكون هذا المركز من ثلاث مجموعات من العصبونات هي:

1- المجموعة التنفسية الظهرية: الممتدة على طول القسم الظهري للبصلة, وتسبب الشهيق بصورة رئيسية.

2- مركز تنظيم التنفس (المنظم الرئوي): يقع في القسم العلوي من ظهر الجسر, ويساعد بالتحكم بمدة الشهيق ويزيد سرعة التنفس.
3- المجموعة التنفسية البطنية: توجد في القسم البطني الوحشي من البصلة في النواة الملتبسة Nucleus ambiguous باتجاه الرأس وفي النواة خلف الملتبسة باتجاه الذنب, وتسبب الزفير أو الشهيق وذلك اعتماداً على العصبونات المنبهة في هذه المجموعة.
4- مركز قطع التنفس Pneustic center: من المحتمل وجوده في القسم السفلي من الجسر, وظائفه غير معروفة حتى الأن ولكن يعتقد بأنه يتعاون مع المركز المنظم للتنفس للتحكم في عمق الشهيق.
5- قشرة المخ: هي المركز المنظم والملائم للتنفس للأوضاع المتغيرة للجسم وإلى تبدلات شروط الوسط الخارجي, بحيث تتناسب كمية التهوية الرئوية مع الأنشطة الحيوية للحيوان, فخلايا قشرة المخ ترسل دفعات عصبية إلى مركز التنفس في البصلة تحثه فيها على زيادة معدل التنفس أو خفضه تبعاً لزيادة تركيز $CO_2$ أو نقص تركيز $O_2$.

## التنظيم الكيميائي للتنفس:

يعد التركيب الكيميائي للدم من العوامل المهمة جداً في تنظيم التنفس وبخاصة تراكيز الأكسجين و ثاني أكسيد الكربون والهيدرجين, لذلك يعد الهدف الرئيسي للتنفس هو المحافظة على تراكيز مناسبة لهذه الغازات في النسج.

إنَّ زيادة تركيز $CO_2$ أو شوارد الهيدرجين تثير المركز التنفسي نفسه لذلك تزداد الاشارات الشهيقية والزفيرية الصادرة إلى العضلات التنفسية كثيراً. أما الـ $O_2$ فلا يملك أي تأثير مهم مباشر على المركز التنفسي في الدماغ لتنظيم التنفس ولكنه يؤثر بشكل كامل تقريباً في المستقبلات الكيميائية المحيطية المتوضعة في الأجسام السباتية والأبهرية التي تصدر بدورها إشارات عصبية مناسبة إلى المركز التنفسي لتنظيم التنفس.

تختلف سرعة وتردد الحركات التنفسية باختلاف الحيوان وهي تتبع للعمر ونوع الحيوان و ومستوى استقلاب المواد في الجسم وحرارة الوسط المحيط والضغط الجوي وعوامل أخرى عديدة.

مثلاً: يبلغ تردد التنفس عند الخيول 8 – 12 مرة/ د, الأبقار 10 – 30 مرة/د, الأغنام 8 – 20, الأرانب 10 – 15, الخنازير 8 – 18, الماعز 10 – 18, الفأر 200 مرة/دقيقة.

أمّا سرعة التنفس عند حديثي الولادة فيكون أكثر سرعة وتنخفض مع التقدم بالعمر تدريجياً. عند العجول تنخفض من 67 عند الولادة إلى 22 في الشهر الـ 11 من العمر.

تتتبع سرعة التنفس لنشاط استقلاب المواد, فمثلاً عند الأبقار عالية الإنتاج تكون سرعة التنفس 30 أما عند متوسطة الإنتاج 15 – 20 حركة تنفسية بالدقيقة.

عند ارتفاع حرارة الوسط المحيط من 20 – 40 مْ تزداد سرعة التنفس عند العجول بعمر 6 أشهر من 29 إلى 86 حركة تنفسية / د, وعند الابقار بنفس الظروف من 16 إلى 32 حركة تنفسية / د.

أما عند انخفاض حرارة هواء الوسط المحيط تنخفض سرعة التنفس أما عمق التنفس فيزداد.

يصبح التنفس أكثر سرعة أثناء العمل العضلي والتهيج العاطفي والهضم, ويصبح نادراً وأقل سرعة وقت النوم, وعند زيادة سرعة التنفس ينخفض عمقه.

كذلك الضغط الجوي المنخفض (كما في المرتفعات) يؤدي لانخفاض الضغط الجزيئي للأكسجين في هواء الحويصلات إلى 55 – 60 مم زئبق وأقل, لذلك يهبط تشبع الدم بالأكسجين (يدعى عوز الأكسجين) (يمكن أن يحصل عوز الاكسجين أيضاً أثناء التهوية غير الكافية للرئتين أو تشوش وظائف المركز التنفسي أثناء تسمم الحيوان وغيرها).

يؤدي انخفاض تشبع الدم بالأكسجين إلى 14 – 35 % إلى:

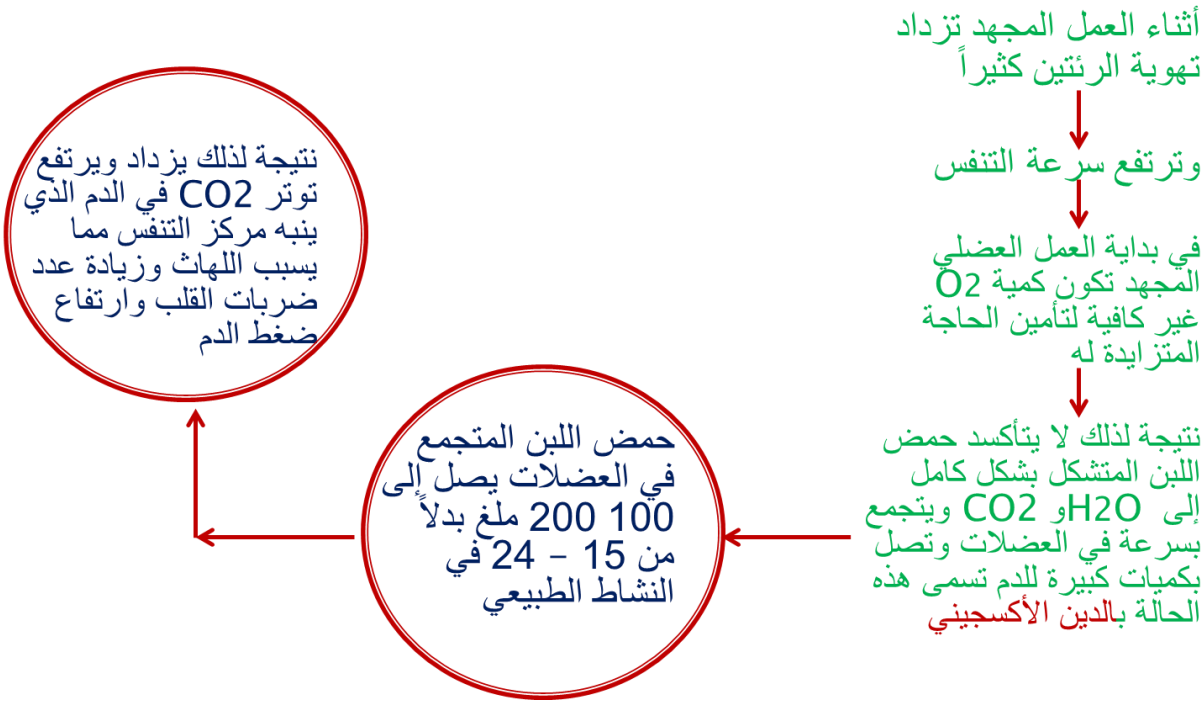
1- تشنج الأوعية الدموية.
2- توقف النشاط الكهربي الحيوي لعصبونات الدماغ.

بعض سلالات الماعز الجبلية المتكيفة مع ظروف نقص الأكسجين في المرتفعات لوحظ لديها: 1- المحتوى المرتفع للكريات الحمر في الدم. 2- الاحساس المنخفض لعصبونات الدماغ لنقص الأكسجين. 3- المحتوى العالي للخضاب في الدم.

<u>في حالة الضغط الجوي المرتفع:</u>

عند ارتفاع الضغط الجوي (كالغوص في الأعماق حيث ينخفض ضغط الهواء إلى 8 – 10 ضغط جوي) يمر أزوت الهواء إلى الدم (ينحل) بكمية تتناسب مع الضغط. وعند التحول السريع من الضغط المرتفع إلى الضغط المنخفض يخرج الأزوت بسرعة من الدم مشكلاً فيه فقاعات يمكن أن تسد الأوعية الدموية (الانصمام الهوائي) يمكن أن يؤدي للموت. لذا يجب خفض الضغط تدريجياً وهنا يبدأ الأزوت بالخروج تدريجياً من الدم إلى هواء الرئتين.

## العلاقة بين التنفس والعمل العضلي:




## خواص التنفس عند الطيور:

يختلف التنفس عند الطيور من الناحية الشكلية والوظيفية عن التنفس عند الحيوانات الثدية بالعديد من النقاط من أهمها:

1- عند الطيور يكون عظم القص نام بشكل جيد وأكبر مما هو عليه عند الثديات فهو يمتد كثيراً للخلف ويغطي قسماً كبيراً من البطن.

2- الأضلاع الصادرة عن العمود الفقري عند الطيور لا تصل إلى عظم القص, بل تخرج من عظم القص زوائد باتجاه الأضلاع وترتبط معها بالغضاريف (لذا لقفص الصدري عندها قابل للحركة أكثر من القفص الصدري عند الثديات).

3- تكون الرغامى عند الطيور طويلة نسبياً والرئتين صغيرتي الحجم.

4- في الطيور تلتصق الرئتان مع الأضلاع ولهذا فهي تتمدد وتنبسط مع تمدد وانبساط القفص الصدري.

5- لا تستطيع الرئتان عند الطيور العودة لما كانت عليه بمرونة كما يحدث عند الثديات لالتصاقها مع الأضلاع.

6- يختفي الحجاب الحاجز عند الطيور.

7- تمتلك الطيور أكياس هوائية.

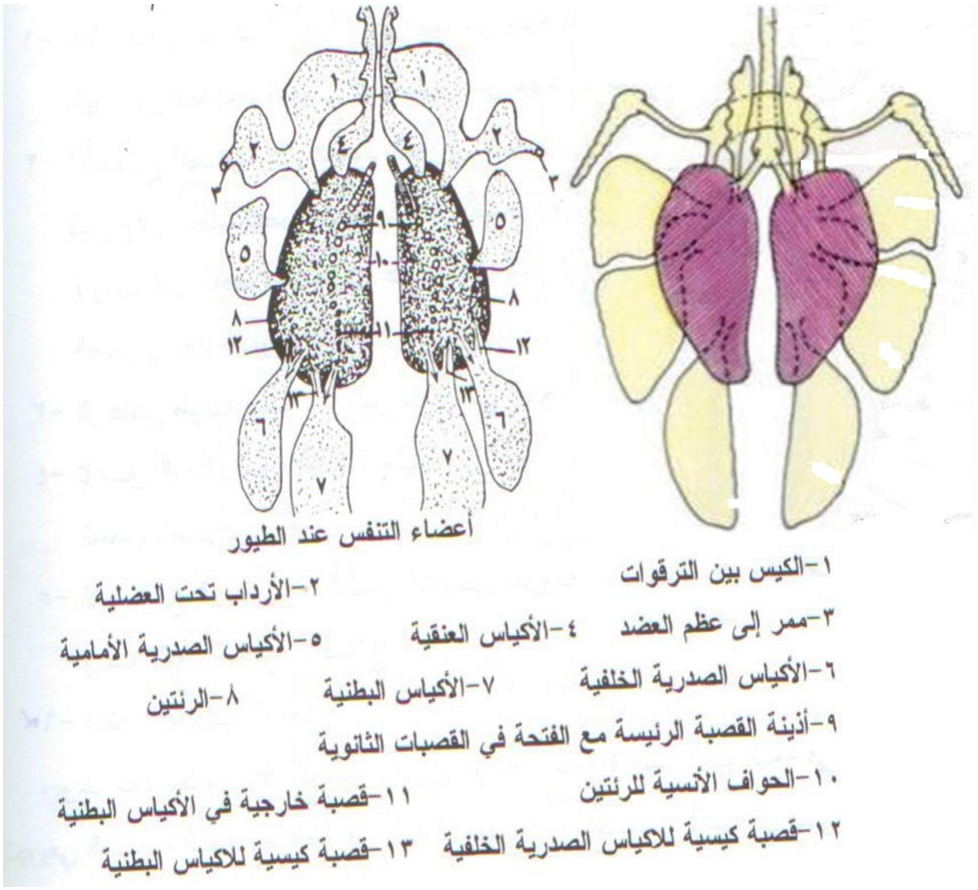
الأكياس الهوائية عند الطيور متطورة ومتوضعة في تجويفي الصدر والبطن ومتغلغلة في العظام الطويلة (الشكل 4), ولا يحدث فيها التبادل الغازي ولكنها تقوم بما يلي:

**1-** خزانات احتياطية للهواء.

**2-** تسهل طيران الطيور وتجعله مريحاً.

**3-** تحفظ الطيور من فرط التسخين.

**4-** تساعد الطيور المائية على الطفو فوق سطح الماء.




الشكل (4): توضع وتوزع الأكياس الهوائية عند الطيور.

## ألية التنفس عند الطيور (الشهيق والزفير):

- أثناء الشهيق يتحرك الجدار الضلعي إلى الأسفل والخلف ويتسع الجزء الأمامي للتجويف الصدري البطني, يصل الهواء المستنشق للرئتين ومن ثم يصل للأكياس الهوائية عن طريق القصيبات الصغيرة.
- أثناء الزفير ينخمص القفص الصدري فيتجه هواء الأكياس الهوائية إلى الرئتين ويمر من خلالهما في الاتجاه المعاكس.
- وهكذا يمر الهواء من خلال الحويصلات الرئوية في وقت الشهيق وفي وقت الزفير مرتين معطياً الاكسجين للدم.

تؤدي الأكياس الهوائية دوراً مهماً في تهوية الرئتين التي تتوسع مع حركة الأجنحة لتمتص الهواء الجوي ومن ثم تتقلص طاردة الهواء إلى الرئتين والرغامى. تختلف سرعة التنفس باختلاف الطيور فمثلاً: عند الدجاج 20 – 40 مرة / د, البط 50 – 70 , الإوز 15 – 25, الحبش 12 – 14, الحمام 40 – 60, الكنار 100.

إنّ الطيور حساسة لنقص الأكسجين حيث يظهر اللهث الشديد عند البط عند انخفاض محتواه في الهواء بـ 1 – 2%.

إنّ تنظيم التنفس عند الطيور مشابه لما هو عليه عند الثديات ولكنه غير مدروس بشكل جيد, فإذا قطع العصب المبهم عند الطيور يبطؤ التنفس بشدة, وعند تنبيه طرفه المركزي يمكن أن يتوقف التنفس.

---

**انتهت المحاضرة**