فيزيولوجيا الجهاز التنفسي (The Respiratory System)

التنفس هو مجموعة من العمليات الحيوية التي تسمح بتبادل الغازات التنفسية مع الوسط الخارجي؛ حيث تؤمن تزويد الجسم بالأكسجين اللازم لمختلف العمليات الاستقلابية، وطرح غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2).

وظائف الجهاز التنفسي

1. **تأمين التبادل الغازي بين هواء الوسط الخارجي وهواء الرئتين:**
   - **توفير الأكسجين**: تزويد الجسم واحتياجات خلاياه الأساسية بغاز الأكسجين.
   - **طرح الفضلات**: التخلص من غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن عمليات الأيض في الجسم.
2. **المشاركة في تنظيم درجة الحموضة (pH):**

يساهم الجهاز التنفسي في الحفاظ على التوازن الحمضي القاعدي للسائل خارج الخلوي. عندما يذوب غاز ثاني أكسيد الكربون في الدم فإنه يشكل أحماضاً (مثل حمض الكربون)، لذا فإن زيادة أو نقص سرعة التنفس تؤدي إلى طرح كميات أكبر أو أقل من CO_2، مما يغير حموضة الدم (pH) و وتعمل الكليتان على تعديل ذلك تدريجيا بالتنسيق مع الجهاز التنفسي.

3. **تركيب المواد وإزالتها من الدوران:**

تمتلك الأوعية الدموية الرئوية القدرة على تركيب بعض المواد الكيميائية أو تعديلها، أو إزالة بعض المواد الأخرى جزئياً من الدم أثناء مروره عبر الرئتين.

المبحث الأول: تركيب الجهاز التنفسي عند الثدييات

يتألف الجهاز التنفسي من منظورين أساسيين:

تشريحياً: يتألف من الممرات الهوائية والرئتين.

وظيفياً: يتألف من الممرات الهوائية والرئتين، بالإضافة إلى العضلات التنفسية، والدوران الدموي الرئوي، ومراكز التنفس العصبية في البصلة السيسائية (المخ المستطيل).

●الرئتان (Lungs)

تتوضع الرئتان في القفص الصدري وتستندان إلى عضلة الحجاب الحاجز. يتألف نسيج الرئة من فصوص؛ للرئة اليمنى ثلاثة فصوص، أما اليسرى فتتكون من فصين.

يُغلف كلًا من الرئتين كيسٌ جنبيٌّ زلالي يتألف من غشاءين متصلين مع بعضهما البعض، وهما:

- الجنبة (الوريقة) الحشوية: التي تغلف أسطح كل من الرئتين.
- الجنبة (الوريقة) الجدارية: التي تلتصق بالجدار الداخلي للقفص الصدري وبالسطح العلوي للحجاب الحاجز.

ويفصل بين الوريقتين فراغٌ يُدعى التجويف الجنبي، والذي يكون مملوءاً عادةً بالسائل الجنبي؛ وهو سائل مصلي يحمي الرئتين من الاحتكاك أثناء الحركات التنفسية.

تتفرع القصبات الرئيسية داخل الرئتين تدريجياً إلى قصبات ثانوية ثم قصبات قطعية، والتي تنقسم بدورها إلى قصيبات أصغر فأصغر، وصولاً إلى القصيبات النهائية ثم القصيبات التنفسية.

- **الممرات الهوائية :**تنقسم الممرات الهوائية الى:

مجرى الهواء العلوي : التجويف الأنفي , البلعوم

السبيل التنفسي : الحنجرة , الرغامى , القصبات و القصيبات الهوائية , الأسناخ الرئوية

I. مجرى الهواء العلوي يشمل التجويف الأنفي والبلعوم:

التجويف الأنفي: يمتد من فتحتي الأنف من الأمام وحتى الفتحة الأنفية البلعومية من الخلف، وينقسم في الوسط إلى قسمين متماثلين بواسطة حاجز عظمي غضروفي يُدعى الحاجز الأنفي. يُبطن التجويف الأنفي بغشاء مخاطي رطب ولزج، يساعد في تنقية وتدفئة وترطيب الهواء الذي يدخل الممرات الهوائية في طريقه إلى الرئتين.

البلعوم:عبارة عن ممر مشترك لكل من الجهازين التنفسي والهضمي، كما أنه يتصل مع الأذن الوسطى عن طريق قناة أوستاش (نفير أوستاش).

آلية حماية المجاري التنفسية أثناء البلع

أثناء عملية البلع، تحدث سلسلة من الأفعال المنعكسة لحماية الجهاز التنفسي ومنع دخول الطعام أو السوائل إليه:

1. تثبيط الحركات التنفسية انعكاسياً: يتوقف التنفس تلقائياً أثناء عملية البلع لمنع استنشاق الطعام أو السوائل.
2. ارتفاع الحنك اللين (Soft Palate) يرتفع سقف الحلق الرخو (الحنك اللين) إلى الأعلى والخلف ليغلق الفتحة الأنفية البلعومية (الفتحة الخلفية للأنف).لمنع صعود الطعام أو السوائل إلى التجويف الأنفي تحت تأثير الضغط الناجم عن البلع.
3. إغلاق المجرى التنفسي السفلي: ترتفع الحنجرة ويتغطى مدخلها بواسطة لسان المزمار (Epiglottis) ليمنع دخول الطعام أو الشراب إلى الرئتين، موجهاً إياهما مباشرة نحو المريء.

السبيل التنفسي :جميع الممرات التي تنقل الهواء من الحنجرة ألى الأسناخ الرئوية

الحنجرة (Larynx):عضوٌ عضلي غضروفي يصل البلعوم بالرغامى. بالإضافة إلى وظيفتها التنفسية في تمرير الهواء إلى الرغامى، تحتوي الحنجرة على الحبال الصوتية التي يصدر عن اهتزازها الصوت. ويقوم لسان المزمار بإغلاق مدخل الحنجرة وحمايته أثناء عملية بلع الطعام؛ لكي يمنع دخول الطعام أو السوائل إلى القصبة الهوائية.

الرغامى (Trachea):أنبوبٌ عضلي غضروفي، تتكون جدرانه من حلقات غضروفية غير مكتملة الاستدارة في الثدييات (على شكل حرف C)، ترتبط فيما بينها بأربطة من نسيج ضام مرن. ويدخل في تركيب جدار الرغامى عضلات ملساء تشغل بشكل أساسي الفجوات التي تتركها الحلقات الغضروفية غير المكتملة.

أما **الغشاء المبطن للرغامى**، فيتألف من نسيج ظهاري مهدب غني بالغدد المخاطية:

-المفرزات المخاطية: تقوم بحجز واحتجاز الجزيئات الغريبة التي يحملها الهواء المستنشق

-الأهداب: تقوم بدفع وحركة هذه الجزيئات الملتصقة بالمخاط إلى الأعلى باتجاه البلعوم؛ حيث يُصار إلى بلعها أو طرحها (بصقها) للخارج.

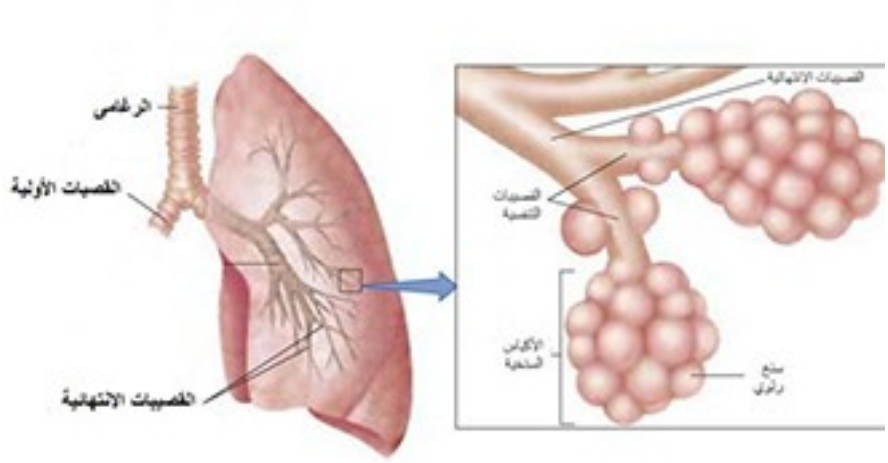
وتنقسم الرغامى إلى قسمين: القصبتين (قصبة يمنى وأخرى يسرى)، وكل واحدة منها تدخل رئة.

القصبات والقصيبات الهوائية (Bronchi and Bronchioles) :

تتفرع الرغامى الى شعبتين رئيسيتين (قصبتين)، تنتهي كل واحدة منهما في رئة. وتتفرع القصبة داخل الرئة إلى عدد كبير من الفروع معطية **القصيبات**، التي تتشعب بدورها إلى فروع أصغر تُدعى **القصيبات النهائية**.

وتتفرع من كل قصيبة نهائية **قصيبات تنفسية**، تتفرع منها بدورها **قنوات سنخية**، تنشأ عنها **أكياس سنخية** تنفتح عليها **الأسناخ الرئوية** التي تنتظم على شكل عناقيد تشبه عناقيد العنب.

وعبر جدران الأسناخ الرئوية تتم جميع المبادلات الغازية بين الهواء في الأسناخ ودم الشعيرات الدموية الرئوية.



صورة توضح الأسناخ الرئوية

بنية وتشكيل الأسناخ الرئوية والحاجز الهوائي الدموي

يُعدّ السنخ الرئوي أصغر وحدة تشريحية ووظيفية في نسيج الرئتين. وتتميز جدرانه برقتها الشديدة، إذ يتألف من غشاء ظهاري يدعمه عدد من الألياف المرنة التي تسمح باتساع الأسناخ وتضيّقها أثناء عمليتي الشهيق والزفير.

أولاً: تركيب جدار الأسناخ الرئوية

يتألف جدار الأسناخ الرئوية من نسيج ظهاري رقيق، يتكون في معظمه من طبقة واحدة رقيقة جداً من الخلايا الظهارية الملتصقة بغشاء قاعدي يمتد نحو الشعيرات الدموية. ويتشكل هذا النسيج من نوعين رئيسيين من الخلايا:

1. خلايا النمط الأول (Type I): وهي خلايا ظهارية حرشفية رقيقة تمثل معظم المساحة الجدارية للسنخ، وتسمح بنفاذ وانتشار الغازات بسهولة وسرعة.

2. **خلايا النمط الثاني (Type II)**:

وهي خلايا حبيبية أكبر حجماً من خلايا النمط الأول، وتتلخص وظيفتها الرئيسية في إفراز مادة السرفاكتنت (Surfactant).

أهمية مادة السرفاكتنت

- توسيع السطح التنفسي: تساهم في تقليل التوتر السطحي، مما يساعد على توسيع السطح المخصص للتبادل الغازي.
- تحقيق التوازن الضغطي: تساعد في توحيد الموازنة الضغطية داخل الأسناخ الرئوية المتفاوتة الحجم لمنع انخماصها (التصاقها).عندما ينكمش السنخ ويصغر حجمه، تتقارب جزيئات السرفاكتنت معاً بشكل أكبر، فتقلل التوتر السطحي بشكل أكبر بكثير في الأسناخ الصغيرة مقارنة بالكبيرة.هذا الانخفاض المتناسب في التوتر السطحي يُعادل تأثير صغر نصف القطر، فيتساوى الضغط داخل الأسناخ المختلفة بغض النظر عن تفاوت أحجامها.

النتيجة. منع الانخماص : يمنع انكماش أو التصاق الأسناخ الصغيرة ببعضها أو تفريغ هوائها داخل الأسناخ الكبيرة, و استقرار واستمرار عملية التهوية والتبادل الغازي بكفاءة عالية في كل أجزاء الرئة.

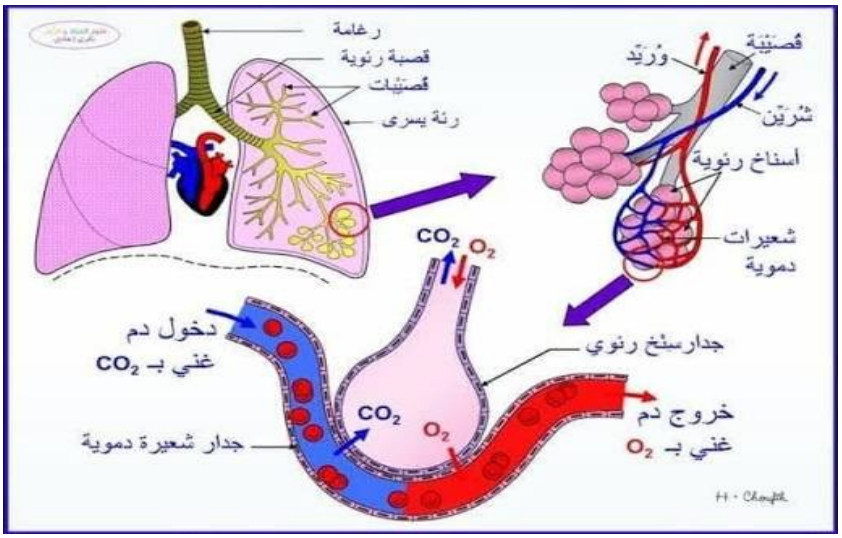
ثانياً: الحاجز الهوائي الدموي (الحاجز الغازي الدموي)

تستند الخلايا المبطنة للسنخ على غشاء قاعدي، ويحيط بكل سنخ رئوي شبكة رقيقة وكثيفة من الشعيرات الدموية تُشكل بتشابكها ما يشبه بحيرة صغيرة من الدم تحيط بالسنخ. وتتكامل الخلايا السنخية من النمط الأول مع الأغشية القاعدية و الطبقة البطانية للشعيرات الدموية لتشكيل ما يُعرف بـ الحاجز الهوائي الدموي.

يُعدّ هذا الحاجز رقيقاً جداً (تبلغ سماكته أقل من 0.5 ميكرون)، وعبره تتم جميع المبادلات الغازية بين هواء الأسناخ ودم الشعيرات الدموية الرئوية المحيطة بها.

ثالثاً: البنى المساعدة في الأسناخ

- البلعميات الكبيرة : تتواجد عادةً على السطح الداخلي للأسناخ الرئوية، وتتمثل وظيفتها في بلعمة الجزيئات الغريبة والأتربة التي قد تصل إلى الأسناخ وتخليص الرئتين منها.
- ثقوب كوهن : هي ثقوب صغيرة تربط الأسناخ المجاورة ببعضها لتأمين التهوية الجانبية، ويزداد عدد هذه الثقوب مع تقدم العمر.



السنخ الرئوي = الحويصل الرئوي = الحويصل الهوائي

● العضلات التنفسية الرئيسية :

تشارك مجموعة من العضلات الهيكلية لمنح الصدر القدرة على التمدد والتقلص لتسهيل حركات التنفس (الشهيق والزفير) :

1. عضلة الحجاب الحاجز (Diaphragm): تشكل عضلة الحجاب الحاجز صفيحة عضلية وترية تغلق الفتحة الصدرية السفلية، وتفصل تجويف الصدر عن تجويف البطن، وهي **عضلة الشهيق الرئيسية**.
2. العضلات الوربية: تشغل العضلات الوربية الفراغات بين الأضلاع، ونميز بين:

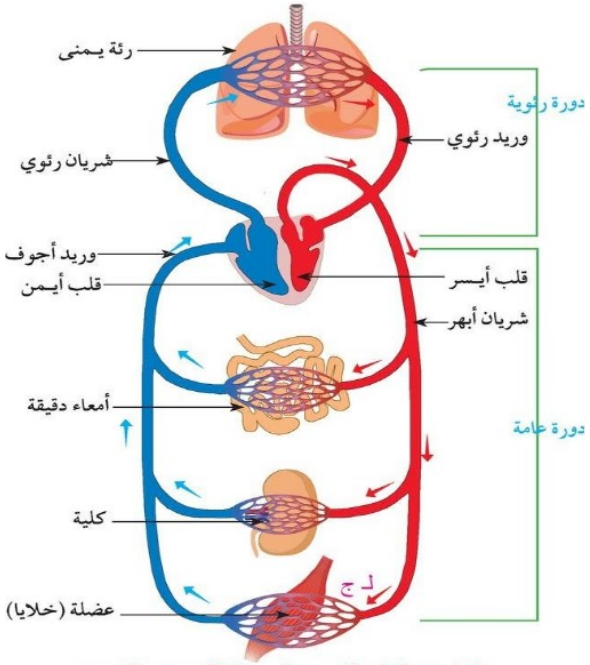
- العضلات الوربية الخارجية (11 زوجاً): ترفع العضلات الوربية الخارجية الأضلاع وتسمى عضلات الشهيق.
- العضلات الوربية الداخلية (11 زوجاً): تسير إلى العمق من العضلات الوربية الخارجية، وتعمل هذه العضلات عند الحاجة إلى زفير قسري.

3. **عضلات البطن**: عبارة عن سلسلة من العضلات الموجودة في البطن (العضلة المستقيمة البطنية، والعضلة المعترضة البطنية، والعضلتان المائلتان الخارجية والداخلية). هذه العضلات الوربية الداخلية وعضلات البطن تشارك في الزفير القسري، (مثلاً: أثناء ممارسة التمارين الرياضية الشديدة أو خلال نوبات الربو القصبي).

●الدوران الرئوي :

تعادل كميةُ الدم المتدفقة إلى الرئتين في الدقيقة كميةَ الدم المتدفقة عبر الدوران الجهازي. و يبلغ حجم الدم في الرئتين نحو 9% من كامل حجم الدم في جهاز الدوران.

يعود الدم قليل الأكسجة عبر الأوردة الجهازية إلى الأذين الأيمن، ومنه إلى البطين الأيمن الذي يضخه إلى الرئتين عبر الشريانين الرئويين؛ ليتم التبادل الغازي على مستوى الشعيرات الدموية الرئوية؛ فيكسب الدمُ الأكسجين ويخسر ثاني أكسيد الكربون، ثم يعود الدم المؤكسج عبر الأوردة الرئوية إلى الأذين الأيسر، لينضم مجدداً إلى الدوران الجهازي عبر البطين الأيسر.



تمثيل تخطيطي للدورة الدموية الكبرى و الصغرى

العلاقة بين تهوية الأسناخ وترويتها

توجد علاقة وثيقة بين نقص الأكسجين في الأسناخ وكفاءة الجريان الدموي في الشعيرات الرئوية المحيطة بها.

يُضبط هذا التنظيم عبر آلية تحكم ذاتي موضعية تنظم جريان الدم.

- **استجابة الأوعية**:

عندما ينقص تركيز الأكسجين (O_2) في الأسناخ إلى ما دون الطبيعي،تتضيق الأوعية الدموية المحيطة بالأسناخ سيئة التهوية ببطء وتزداد مقاومتها الوعائية، فيُعاد توجيه جزء من الدم نحو المناطق الأفضل تهوية حيث تكون فرصة أكسجته أعلى.

- **المقارنة مع الأوعية الجهازية**:

تختلف هذه الاستجابة عن استجابة الأوعية الدموية الجهازية, إذ يؤدي انخفاض الأكسجين في معظم الأنسجة الجهازية إلى توسّع الأوعية الدموية المحلية، بينما يؤدي انخفاضه في الأسناخ إلى تقبّض الأوعية الدموية الرئوية في المناطق منخفضة الأكسجة.

المبحث الثاني : ألية التنفس و تبادل الغازات

الهدف الرئيسي من التنفس هو تزويد الأنسجة بالأكسجين وتخليصها من غاز ثاني أكسيد الكربون. ولتحقيق ذلك، يمر التنفس في **خمس مراحل** وظيفية رئيسية.

مراحل العملية التنفسية

1. **التهوية الرئوية (Pulmonary Ventilation)**:هي عملية دخول الهواء وخروجه بين الوسط الخارجي و الأسناخ الرئوية (عبر الشهيق و الزفير).
2. **تبادل الغازات الرئوي (الانتشار)**: يحدث في هذه المرحلة عملية تبادل الغازات بين هواء الأسناخ الرئوية ودم الأوعية الشعرية الرئوية.
3. **نقل الغازات في الدم:** يتولى الدم مهمة نقل الأكسجين من الرئتين إلى الأنسجة، ونقل غاز ثاني أكسيد الكربون بالاتجاه المعاكس (من الأنسجة إلى الرئتين).
4. **تبادل الغازات بين الدم والنسج**:

يتم انتقال الأكسجين إلى الأنسجة وثاني أكسيد الكربون إلى الدم وفقاً لمدروج الضغط، حيث ينتقل الغاز طبيعياً من الوسط ذي الضغط المرتفع إلى الوسط ذي الضغط المنخفض.

5. **التنفس الداخلي (الخلوي)**:

هو الاستهلاك الفعلي للأكسجين من قبل الخلايا وطرح غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن العمليات الاستقلابية.

آلية التهوية الرئوية

تشترك في آلية التهوية الرئوية العناصر التالية. 1. العضلات التنفسية

2. الضغوط المؤثرة على حركة الهواء داخل الرئتين

3. المطاوعة الرئوية

1. العضلات التنفسية ....

2. الضغوط المؤثرة على حركة الهواء داخل الرئتين

☐ الضغط الجنبي وتغيراته أثناء التنفس

الرئة بنية مرنة تنكمش كالبالون وتطرد كل هوائها عبر الرغامى عند عدم وجود قوة تحافظ على انتفاخها، وتُحاط كل رئة بطبقة رقيقة من السائل الجنبي الذي يُسهّل حركتها داخل القفص الصدري.

يُطلق اسم **الضغط الجنبي** على الضغط الموجود في الفراغ الضيق الفاصل بين الجنبة الحشوية والجنبة الجدارية، وهو ضغط سلبي دائماً يُقدر بنحو (-5) **سم ماء** عند بدء الشهيق. تنشأ هذه السلبية نتيجة تعارض قوتين تتمثلان في ميل الرئة للانكماش للداخل مقابل ميل القفص الصدري للتوسع للخارج، مما يخلق "قوة شفط" في السائل الموجود ضمن

جوف الجنبة الضيق. يعمل هذا الضغط السلبي على إبقاء الوريقتين متلاصقتين طوال الوقت دون انفصال، ممّا يُجبر الرئة على التوسع تبعاً لتوسع القفص الصدري أثناء الشهيق.

وأثناء الشهيق السوي، يؤدي توسع القفص الصدري إلى سحب سطح الرئتين بقوة أكبر، مما يخلق ضغطاً سلبياً أكبر في الحيز الجنبي يصل إلى نحو (-7.5) **سم ماء.**

□ **الضغط السنخي وتغيراته أثناء التنفس**

الضغط السنخي هو الضغط الموجود داخل أسناخ الرئة، وعندما لا يجري أي هواء إلى داخل أو خارج الرئتين، يكون الضغط في كل أقسام الشجرة التنفسية وعلى طولها حتى الأسناخ مساوياً للضغط الجوي ((0) **سم ماء**).

وأثناء الشهيق، ولكي يتولد جريان هوائي إلى داخل الرئتين، لا بد أن يهبط ضغط الأسناخ إلى حد أقل من الضغط الجوي؛ إذ ينقص ضغط الأسناخ أثناء الشهيق السوي إلى حوالي (-1) **سم ماء**، وهذا الضغط السلبي البسيط كاف لتحريك حوالي 0.5 **لتر** من الهواء إلى الرئتين في الثواني اللازمة للشهيق.

أما أثناء الزفير، فتحدث تغيرات عكسية إذ يرتفع الضغط السنخي إلى حوالي (+1) **سم ماء**، فيدفع ذلك كمية 0.5 لتر من الهواء إلى خارج الرئتين خلال الثانيتين أو الثلاث للزفير.

□ **الضغط عبر الرئة:** هو فرق الضغط بين الضغطين السنخي والجنبي، أي هو الفرق بين ضغطي الأسناخ والسطوح الخارجية للرئتين. وهو في الواقع يمثل مقياس قوى المرونة في الرئتين التي تحاول انكماشها عند كل نقطة من نقاط توسعهما، ويسمى لذلك ضغط الارتداد.

3. المطاوعة الرئوية

تُعرف المطاوعة الرئوية بأنها مدى توسع الرئتين تحت تأثير كل زيادة بمقدار وحدة واحدة في الضغط عبر الرئوي (مقدرة بـ 1 سم ماء). تعني هذه القيمة لدى الإنسان البالِغ أن كل زيادة في الضغط عبر الرئوي بمقدار 1 **سم ماء** تؤدي إلى تمدد الرئتين بمقدار 200 ملي ليتر.

تختلف قيمة مطاوعة الرئتين لدى الحيوانات اختلافا كبيراً، حيث تتناسب طرداً مع حجم الرئة والحجم الكلي للحيوان؛ فالقاعدة الفيزيولوجية الأساسية هي: كلما كَبُر حجم الحيوان ورئتاه، ازدادت قيمة المطاوعة (أي يتسع لحجم أكبر من الهواء مقابل كل زيادة بمقدار 1 سم ماء في الضغط)، والعكس صحيح. وتتوزع القيم كالتالي:

1. **الحيوانات الصغيرة (مثل القطط والكلاب):**

- القطط: تتراوح مطاوعة الرئتين لديها بين 10 إلى 20 مل / سم ماء تقريباً.
- الكلاب: تتراوح بين 30 إلى 120 مل / سم ماء (بحسب حجم وتنوع سلالة الكلب).

2. **الحيوانات الكبيرة (مثل الأحصنة والأبقار):**

- الأحصنة والأبقار: نظراً لحجم الرئتين الهائل لديهم، تصل مطاوعة الرئتين إلى قيم مرتفعة جداً تتراوح غالباً بين 1000 إلى 2000 مل / سم ماء (أي ما يعادل 1 إلى 2 لتر من الهواء لكل زيادة قدرها 1 سم ماء في الضغط عبر الرئوي).

- ترتبط المطاوعة بمرونة النسيج الرئوي (ألياف الكولاجين والمرنين) و قوى المرونة الرئوية المتولدة عن التوتر السطحي

أ- قوى مرونة النسيج الرئوي

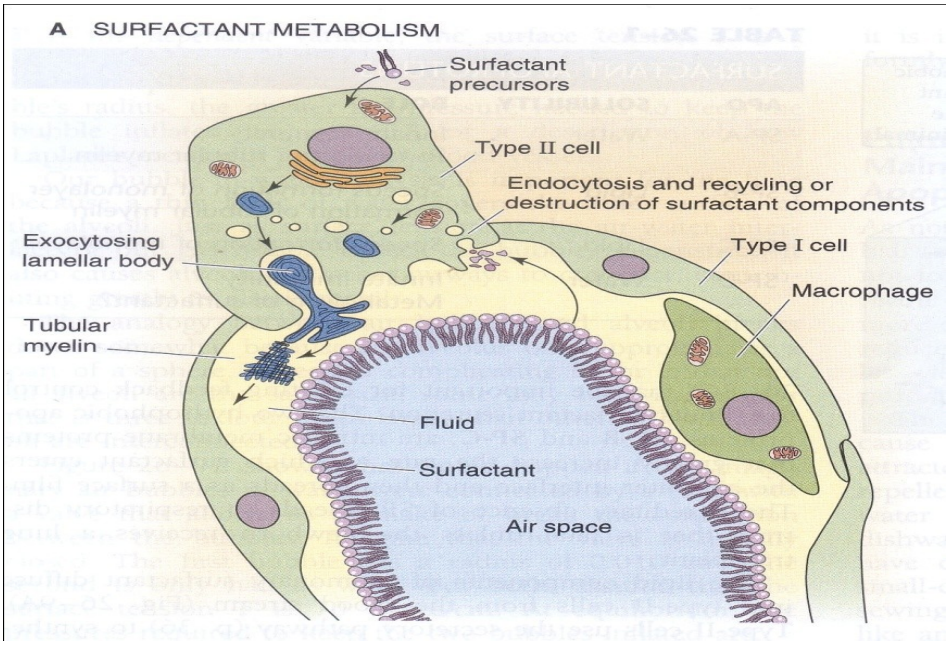
تتعين قوى مرونة النسيج الرئوي بصورة رئيسية بـالإيلاستين (المرنين) وألياف الكولاجين المتشابكة بين متن الرئة؛ إذ تكون هذه الألياف في الرئة المفرغة في حالة انكماش وملتوية، ولكنها أثناء توسع الرئة تصبح متمددة وغير ملتوية تقريباً، وبذلك تستمر في بذل قوة مرنة لتعود الرئة إلى حالتها الطبيعية.

ب- قوى المرونة الرئوية المتولدة عن التوتر السطحي

تكون القوى المرنة الناجمة عن التوتر السطحي أكثر تعقيداً، وهي مسؤولة عن نحو ثلثي المرونة في الرئة السوية. وتتغير قوى التوتر السطحي الرئوي بشكل كبير جداً في حال انعدام المادة الفعالة بالسطح (السرفاكتانت) في السائل السنخي:

1. **أسس التوتر السطحي**: عندما يلامس الماء الهواء، تكون لجزيئاته السطحية قوة جذب إضافية بعضها لبعض، ولذلك فإن لسطح الماء نزعة دائمة للتقلص. وهذا ما يؤدي لتماسك قطرات ماء المطر بوجود غشاء مشدود ومحكم مكون من جزيئات الماء حول سطح كل قطرة. وعلى السطوح الداخلية للأسناخ، يحاول سطح الماء أن يتقلص أيضاً، مما يؤدي إلى دفع الهواء خارج الأسناخ عبر القصبات، محاولةً من الأسناخ (والأحياز الهوائية الأخرى) أن تنكمش. ولأن ذلك يحدث في كل الأحياز الهوائية، ينتج عن ذلك قوة تقلصية مرنة في كامل الرئتين تسمى القوة المرنة للتوتر السطحي.

2. **الفعال بالسطح (السرفاكتانت) وتأثيره:السرفاكتانت (Surfactant)**: هو عامل فعال بالسطح، وهذا يعني أنه يقلل التوتر السطحي كثيراً جداً عند انتشاره على سطح السائل السنخي، وهو يُفرز من الخلايا الظهارية الإفرازية من **النمط الثاني (Type II)** الموجودة في جدر الأسناخ.



العامل السطحي ومكان توضعه في جوف الأسناخ

الشهيق والزفير

يعتمد المبدأ الفيزيائي للتهوية (قانون بويل) على وجود تناسب عكسي بين حجم الغاز وضغطه عند ثبات درجة الحرارة.

- القاعدة الأساسية: تتحرك الغازات دائماً من منطقة الضغط الأعلى إلى منطقة الضغط الأقل:

زيادة حجم التجويف الصدري ← انخفاض الضغط السنخي عن الضغط الجوي ← دخول الهواء (شهيق).

نقصان حجم التجويف الصدري ← ارتفاع الضغط السنخي فوق الضغط الجوي ← خروج الهواء (زفير).

آلية الشهيق (Inspiration / Inhalation)

عملية فاعلة تتطلب تنبيهاً عصباً دماغياً وتقلصاً عضلياً واستهلاكاً للطاقة.

الشهيق الهادئ

إن الآليات التي تساهم في زيادة حجم القفص الصدري والرئتين تساعد جميعها على إتمام عملية الشهيق. وأثناء التنفس العادي الهادئ، تتم عملية الشهيق بمؤازرة العوامل والآليات التالية.

1. انقباض الحجاب الحاجز: يتحرك باتجاه التجويف البطني، مما يزيد الطول المحوري للتجويف الصدري مما يؤدي الى توسع القفص الصدري.

2. انقباض العضلات الوربية الخارجية: تحريك الاضلاع نحو الخارج و الأمام, مما يساعد على توسع القفص الصدري.

3. تمدد غشاء الجنب :يؤدي توسع القفص الصدري إلى سحب الوريقة الجدارية لغشاء الجنب إلى الخارج. نظرًا لوجود الضغط السلبي في الجوف الجنبي، تُسحب معها الوريقة الحشوية ، مما يسبب تمدد الرئتين وزيادة الحجم داخلهما.

4. اندفاع الهواء:يساعد تمدد الرئتين على انخفاض الضغط السنخي ليصبح أقل من الضغط الجوي بمقدار (-1) سم ماء يُنشئ هذا الفارق في الضغط تدرجا يتسبب في اندفاع هواء الشهيق تلقائيًا عبر المجاري التنفسية إلى داخل الأسناخ الرئوية.

الشهيق الجهدي / القسري

يحدث الشهيق القسري (الجهدي) عندما يحتاج الجسم إلى كميات أكبر وأسرع من الأكسجين، أو عندما تكون عملية التنفس الطبيعية الهادئة غير كافية بمفردها لتلبية احتياجات الجسم.

1. الحالات التي يحدث فيها الشهيق القسري:

- أثناء المجهود البدني الشديد: مثل التمارين والأنشطة الرياضية القوية ، حيث تزداد حاجة العضلات للأكسجين لتلبية الطلب المرتفع على الطاقة.
- الحالات المرضية :أمراض الجهاز التنفسي: مثل هجمات الربو (*Asthma*).
- الاستجابات الانفعالية والنفسية: مثل التوتر الشديد.
- ردود الفعل الميكانيكية والجسمية:التثاؤب: يُعد شهيقاً قسرياً عميقاً لزيادة امتلاء الرئتين بالهواء.

2 العضلات التنفسية المساعدة.

أثناء الشهيق القسري، تتدخل عضلات إضافية لتساعد على رفع القفص الصدري بقوة وزيادة سعة التجويف الصدري بشكل أكبر مثل تعمل العضلة القَصِّيّة الترقوية الخشائية على رفع عظم القَصّ، بينما تُساهم العضلة المنشارية الأمامية في رفع الأضلاع للأمام وللخارج.

آلية الزفير (Expiration / Exhalation)

الزفير الهادئ :عملية منفعلة, في الظروف الطبيعية لا تتطلب تقلصاً عضلياً ولا تستهلك طاقة.

- الآلية الفيزيولوجية: استرخاء عضلات الشهيق (خاصة عضلة الحجاب الحاجز والعضلات الوربية الخارجية). يتبعها ظاهرة الارتداد المرن لأنسجة الرئتين الممتدة وجدار الصدر لتعود إلى وضعها الأصلي.
- ديناميكية جريان الهواء أثناء الزفير: يعود الحجاب الحاجز وعضلات الشهيق إلى وضعها الطبيعي (حالة الاسترخاء)، مما يؤدي إلى صغر حجم التجويف الصدري و الأسناخ الرئوية. ونتيجة لذلك، ينضغط الهواء داخل الأسناخ، فيرتفع الضغط السنخي ليصبح أعلى من الضغط الجوي بمقدار (+1) سم ماء ، مما يدفع الهواء إلى الخارج. ويستمر خروج الهواء حتى يتساوى الضغط السنخي مجدداً مع الضغط الجوي (ليصل إلى الصفر مع نهاية مرحلة الزفير)

الزفير الجهدي/القسري:

على عكس الزفير الهادئ، يُعتبر الزفير القسري لدى الحيوانات عمليةً نشطة (فاعلة) تتطلب تقلصاً عضلياً واستهلاكاً للطاقة, حيث تتدخل عضلات خاصة لسحب القفص الصدري باتجاه عقبي (خلفي) وضغط الأحشاء البطنية لتسريع وتعميق خروج الهواء. وأبرز هذه العضلات:

العضلة المستقيمة البطنية: تسحب الأضلاع الخلفية (السفلى) باتجاه عقبي (خلفي)، وتضغط محتويات البطن باتجاه قحفي (أمامي) نحو الحجاب الحاجز لتقليل حجم التجويف الصدري.

العضلات الوربية الباطنة: تسحب الأضلاع باتجاه ظهري-عقبي لتضييق القطر العمودي والجانبي للقفص الصدري وتقليل حجمه.

العضلات المائلة (الداخلية والخارجية): تساهم مع باقي عضلات الجدار البطني في زيادة الضغط داخل البطن ودفع الأحشاء قحفياً (للأمام) نحو الصدر.

تواتر التنفس (معدل التنفس) والعوامل المؤثرة فيه:

يُقصد بـ **تواتر التنفس** (**Respiratory Rate**) عدد دورات التنفس الكاملة (شهيق وزفير) في الدقيقة الواحدة ، ويُعد من العلامات الحيوية الأساسية لتقييم الحالة الفيزيولوجية والصحية للحيوان. يتأثر هذا المعدل بالظروف المحيطة والحالة الفسيولوجية للجسم، وأبرز العوامل المؤثرة فيه هي:

1. **نوع الحيوان وحجمه**: يختلف تواتر التنفس الطبيعي بين الفصائل المختلفة، ويتناسب عموماً عكسياً مع حجم الجسم (الحيوانات الأصغر حجماً ذات معدل أيض أسرع وتواتر تنفس أعلى).

2. **العمر**: يكون تواتر التنفس مرتفعاً لدى صغار الحيوانات (حديثي الولادة والنامية) نتيجة ارتفاع معدل الأيض، وينخفض تدريجياً كلما تقدم الحيوان في العمر ليصل إلى المعدل الثابت لدى البالغين.

3. **الجهد البدني والنشاط**: يؤدي التمرين أو العمل المجهد إلى زيادة سريعة في تواتر التنفس لتلبية احتياجات الأنسجة والعضلات المتزايدة للأكسجين وطرح ثاني أكسيد الكربون.

4. **درجة حرارة الوسط (الإجهاد الحراري)**: يؤدي ارتفاع حرارة البيئة إلى زيادة تواتر التنفس (كآلية لتبديد الحرارة والتبريد التنفسي، خاصة في الفصائل التي لا تفرز العرق بكفاءة كالكلاب والطيور).

5. **الحالة النفسية والانفعالية**: تؤدي الخوف، الألم، والتهيج إلى تفعيل الجهاز العصبي الودّي (Sympathetic System)، مما يرفع تواتر التنفس.

6. **الحمل**: يزداد تواتر التنفس لدى الإناث الحوامل نتيجة زيادة احتياج الجنين للأكسجين وارتفاع الضغط الميكانيكي للأحشاء البطنية على الحجاب الحاجز.

7. **الحالة الهضمية (امتلاء المعدة والجوع)**:

- **امتلاء الكرش/المعدة**: يرفع تواتر التنفس نتيجة الضغط الميكانيكي للأحشاء على الحجاب الحاجز وتقليل حجم التجويف الصدري، بالإضافة إلى الحرارة الناتجة عن التخمر والهضم.
- **الجوع الشديد/الصيام الممتد**: يؤدي إلى انخفاض معدل الأيض الأساسي، مما يقلل من تواتر التنفس.

8. **الصحة العامة والحالات المرضية**: تتسبب معظم الحالات المرضية (مثل الحمى، الاضطرابات التنفسية، والالتهابات) في زيادة تواتر التنفس (تسرع التنفس) ، بينما قد تؤدي بعض حالات التسمم أو تثبيط الجهاز العصبي المركزي إلى انخفاضه (بطء التنفس).

جدول يوضح معدلات تواتر التنفس لدى بعض الحيوانات الأهلية وظروف قياسها

الحيوان	معدل توتر التنفس \د	المجال	الظروف التي تم القياس تحتها
الخيول	12	14-10	الوقوف في حالة الرحة
الأبقار الحلوب	29	35-26	الوقوف في حالة الرحة
الأبقار الحلوب	35	50-24	وضعية الاستلقاء
العجول عمر 3 أسابيع	20	22-18	الوقوف
الكلاب	21	25-18	وضعية النوم
الكلاب	24	34-20	الوقوف بحالة الراحة
القطط	22	25-16	وضعية النوم
الأغنام	19	22-16	واقفة في درجة حرارة 10درجة م
الجمال	8	12-5	وقوف حالة الراحة
الدجاج	22	30-15	أوضاع طبيعية

المبحث الثالث: أحجام التنفس الطبيعية و السعات الرئوية

تُعبر الحجوم الرئوية عن كميات الهواء الموجودة في الرئتين خلال مراحل مختلفة من دورة التنفس، بينما تُعرّف السعات الرئوية بأنها مجموع حجمين رئويين أو أكثر. يُستعمل لقياس الحجوم التنفسية والسعات الرئوية جهازٌ خاص يُدعى مقياس التنفس (Spirometer). وتفيد هذه الحجوم والسعات في فهم فيزيولوجيا التنفس، كما تُعطي فكرة دقيقة عن الحالة الصحية للرئتين.

●**أحجام التنفس الطبيعية**:

- **الحجم الجاري (هواء المد) :** هو حجم الهواء المستنشق أو المزفور في كل نفس سوي هادئ

القيم المقدرة: حيث يبلغ حوالي 500 مل عند الإنسان، وحوالي 5 لترات عند الحصان البالغ، و300-350 مل عند الكلاب الكبيرة (تتناسب طرداً مع وزن الجسم).

●**حجم الشهيق الاحتياطي :** وهو أقصى حجم هواء إضافي يمكن استنشاقه قسراً بعد نهاية شهيق سوي هادئ.

القيم المقدرة: تبلغ تقريباً 3000 مل عند الرجال و2100 مل عند النساء، ومن الصعب قياسه بدقة في الحيوانات.

●**حجم الزفير الاحتياطي :**هو كمية الهواء الإضافية التي يمكن إخراجها بزفير عميق وقسري بعد إتمام الزفير الطبيعي الهادئ.

القيم المقدرة: صحيحة (حوالي 1100 مل للرجل، 800 مل للمرأة، وبين 5 إلى 7 لترات عند الخيول).

●**الحجم المتبقي أو الثمالي** .وهو الهواء الباقي داخل الرئتين وحويصلاتها بعد أقصى زفير قسري، وهو المسؤول عن منع انخماص (انكماش) الرئتين ويُعد من الأحجام التي لا يمكن قياسها بجهاز مقياس التنفس العادي مباشرةً.

القيم المقدرة:(1200 مل للرجال، 1100 مل للنساء، و10 إلى 12 لتراً للحصان بوزن 500 كجم

نوع الحجم / السعة	المقدار عند الخيل (تقريباً)
الحجم الجاري المدي	5 ليترات (في الراحة) - يصل إلى 12-18 ليتر أثناء الجري الشديد
حجم الشهيق الاحتياطي	10 إلى 12 لتراً
حجم الزفير الاحتياطي	5 إلى 7 ليترات
الحجم المتبقي / الثمالي	10 إلى 12 ليتر
السعة الرئوية الكلية	40 إلى 50 ليتر

حجوم الرئة عند الحصان البالغ تقريبا (بوزن 500 كجم تقريباً)

●السعات التنفسية Respiratory Capacities :

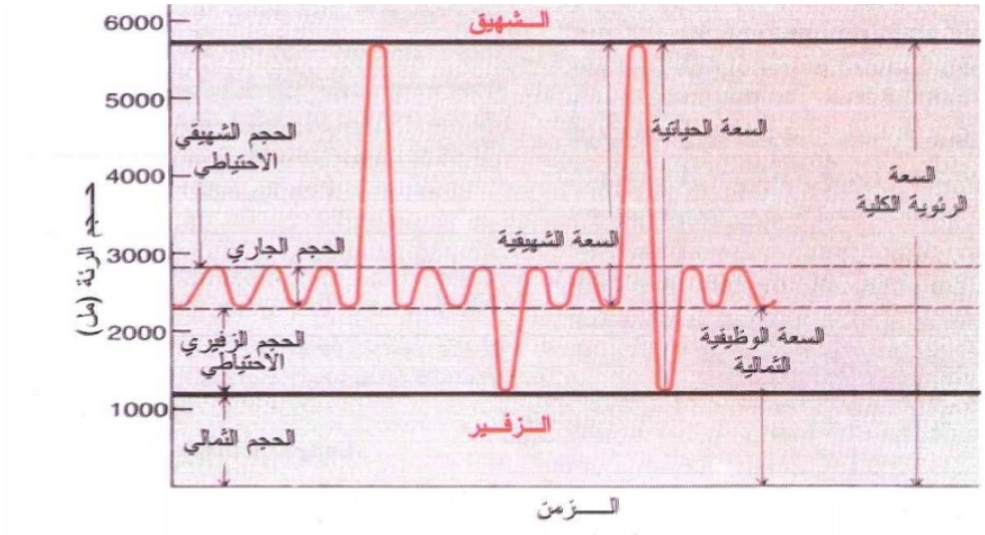
السعات الرئوية هي عبارة عن مجموع حجمين رئويين أو أكثر، وتنقسم إلى الآتي:

السعة الشهيقية: هي تساوي **الحجم الجاري** مضافاً إليه حجم **الشهيق الاحتياطي**، وهي أقصى كمية هواء يمكن استنشاقها ابتداءً من مستوى نهاية الزفير السوي.

السعة الوظيفية المدخرة: وتعادل **حجم الزفير الاحتياطي** مضافاً إليه **الحجم الثمالي (المتبقي)**، وهي كمية الهواء المتبقية في الرئتين عند نهاية الزفير السوي الهادئ .

السعة الحياتية (الحيوية): تعادل حاصل جمع **حجم الشهيق الاحتياطي** مع **الحجم الجاري** ومع **حجم الزفير الاحتياطي**

السعة الكلية للرئة:هي أكبر حجم يمكن أن تتمدد إليه الرئتان باستخدام أقصى جهد تنفسي ممكن، وهي تعادل **السعة الحيوية** مضافاً إليها **الحجم الثمالي**.



الحجم التنفسي في الدقيقة:هو الكمية الكلية للهواء الجديد الذي يمر خلال الممرات التنفسية في الدقيقة الواحدة ، يساوي حاصل ضرب الحجم الجاري في معدل التنفس (عدد الأنفاس في الدقيقة).

القيم الطبيعية في حال الراحة عند الحصان البالغ:

الحجم الجاري : حوالي 5 إلى 6 لترات.

معدل التنفس: يتراوح بين 10إلى 15 نَفَساً في الدقيقة.

حجم التنفس في الدقيقة: يبلغ في المتوسط حوالي 50 إلى 90 لتراً في الدقيقة

الحيز الخامد:

يشمل الحيز الخامد الهواءَ الموجود في الممرات التنفسية كافة التي لا تشترك في التبادل الغازي, أي الهواء الموجود في: التجويف الأنفي, البلعوم، والحنجرة، والرغامى، والقصبات، والقصيبات.

وعلى هذا، فإن:حجم الهواء الجديد الذي يدخل الأسناخ في كل شهيق = حجم الهواء الجاري – حجم هواء الحيز الخامد.

فإذا كان حجم الهواء الجاري في حيوان ما 500 مل، وحجم حيزه الخامد 150 مل؛ فإن حجم الهواء الطازج الذي يدخل الأسناخ الرئوية في كل شهيق هو 350 مل.

معدل التهوية السنخية

هو حجم الهواء الجديد الذي يدخل إلى الأسناخ الرئوية ومناطق التبادل الغازي خلال الدقيقة الواحدة.

يُحسب بضرب معدل التنفس في كمية الهواء الجديد التي تصل إلى الأسناخ في كل نفس.

معدل التهوية السنخية = معدل التنفس χ (الحجم الجاري - الحيز الخامد)

يُعد معدل التهوية السنخية أحد أهم العوامل الرئيسية التي تحدد تراكيز غازي الأكسجين (O_2) وثنائي أكسيد الكربون (CO_2) داخل الأسناخ الرئوية.

المبحث الرابع الأسس الفيزيائية للمبادلات الغازية

اولا : فيزياء الانتشار و ضغوط الغازات

حركة الجزيئات والانتشار الغازي:

إن الخطوة التي تلي دخول الهواء النقي الى الأسناخ هي انتشار الأكسجين من الأسناخ الى الدم في الشعيرات الرئوية و انتشار ثنائي أكسيد الكربون في الاتجاه المعاكس. و تتم عملية الانتشار بوساطة حركة الجزيئات العشوائية البسيطة في كلا الاتجاهين عبر الغشاء التنفسي وفق الألية الأساسية لحدوث الانتشار, إذ أن الانتشار النهائي للغاز يحدث من منطقة التركيز العالي الى منطقة التركيز المنخفض.

<u>ذوبان الغازات في السوائل وقانون هنري</u>

عندما يتلامس الغاز مع سائل (كالدم أو السوائل الخلوية)، تعتمد كمية الغاز التي تذوب فيه على عاملين أساسيين:

- الضغط الجزئي للغاز: كلما زاد ضغط الغاز فوق السائل، زاد ذوبانه فيه.
- معامل الذوبان : مدى قابليته الفيزيائية للذوبان في السائل.

تركيز الغاز المذاب= الضغط الجزئي χ معامل الذوبان

<u>الضغوط الجزئية للغازات</u>

- الضغط الكلي والجزئي: ينشأ ضغط الغاز من اصطدام جزيئاته بالسطح. في مزيج من الغازات (مثل الهواء)، يساهم كل غاز بضغط خاص به يسمى "الضغط الجزئي.
- حساب الضغط الجزئي (قانون دالتون): يتناسب الضغط الجزئي لأي غاز طردياً مع نسبته المئوية في المزيج الغازي من إجمالي الضغط الكلي.

مثلا يتركب الهواء الجوي الجاف من 79% نتروجين و 21% أكسخين و يبلغ الضغط الكلي للهواء 760 مم زئبقي . ويشارك كل غاز في الضغط الكلي بشكل يتناسب مباشرة مع نسبته المئوية في الخليط الغازي مثلا نسبة الأكسجين في الهواء تقريبا 21 ضغطها الجزئي (Po2 =160) مم زئبقي.الضغط الجزئي للنيتروجين: 600 مم زئبقي.

ثانيا: تغير الضغوط الجزئية للغازات عند مرور الهواء ضمن المجاري التنفسية

ترطيب الهواء في المجاري التنفسية:

بعد وصول الهواء إلى المجاري التنفسية, يتشبع هواء الشهيق ببخار الماء الذي يبلغ ضغطه الجزئي 47 مم زئبقي.

يؤدي هذا الترطيب إلى تغيير الضغوط الجزيئية للغازات الأخرى (الأزوت والأكسجين)، فتصبح الضغوط الجزئية لمكونات الهواء المستنشق قبل وصوله إلى الأسناخ الرئوية على النحو التالي:

- **بخار الماء**: 47 مم زئبقي
- الأكسجين (PO_2): 149,3 مم زئبقي ; الأزوت (النيتروجين PN_2 **):** 563.4 مم زئبقي

هواء الأسناخ الرئوية:

بمجرد وصول هواء الشهيق إلى داخل الأسناخ الرئوية، يختلط هواء الشهيق الرطب بغازات الأسناخ القديمة (المتبقية من عملية التبادل)، والتي تحتوي على غاز ثاني أكسيد الكربون بضغط جزئي ثابت تقريباً يساوي 40 مم زئبقي .

نتيجة لهذا الاختلاط والامتصاص المستمر للأكسجين وإطراح ثاني أكسيد الكربون، تصبح الضغوط الجزئية للغازات داخل الأسناخ الرئوية كالتالي:

- الأكسجين (PO_2): 104 مم زئبقي , ثاني أكسيد الكربون (PCO_2) : 40 مم زئبقي
- بخار الماء: 47 مم زئبقي , الأزوت (النيتروجين PN_2): 569 مم زئبقي

ثالثاً : آلية التبادل الغازي عبر الغشاء التنفسي

يحدث التبادل الغازي بين الأسناخ الرئوية والشعيرات الدموية اعتماداً بحتاً على **فارق الضغط (مدرج الضغط)**:

الأكسجين:ضغطه في الأسناخ الرئوية مرتفع (104 مم زئبقي) مقارنةً به في الدم القادم (40 مم زئبقي)، لذا ينتقل بقوة من الأسناخ إلى الدم.

ثاني أكسيد الكربون: ضغطه في الدم القادم (45 مم زئبقي) أعلى منه في الأسناخ (40 مم زئبقي)، لذا ينتقل بقوة من الدم باتجاه الأسناخ.

طبقات الغشاء التنفسي

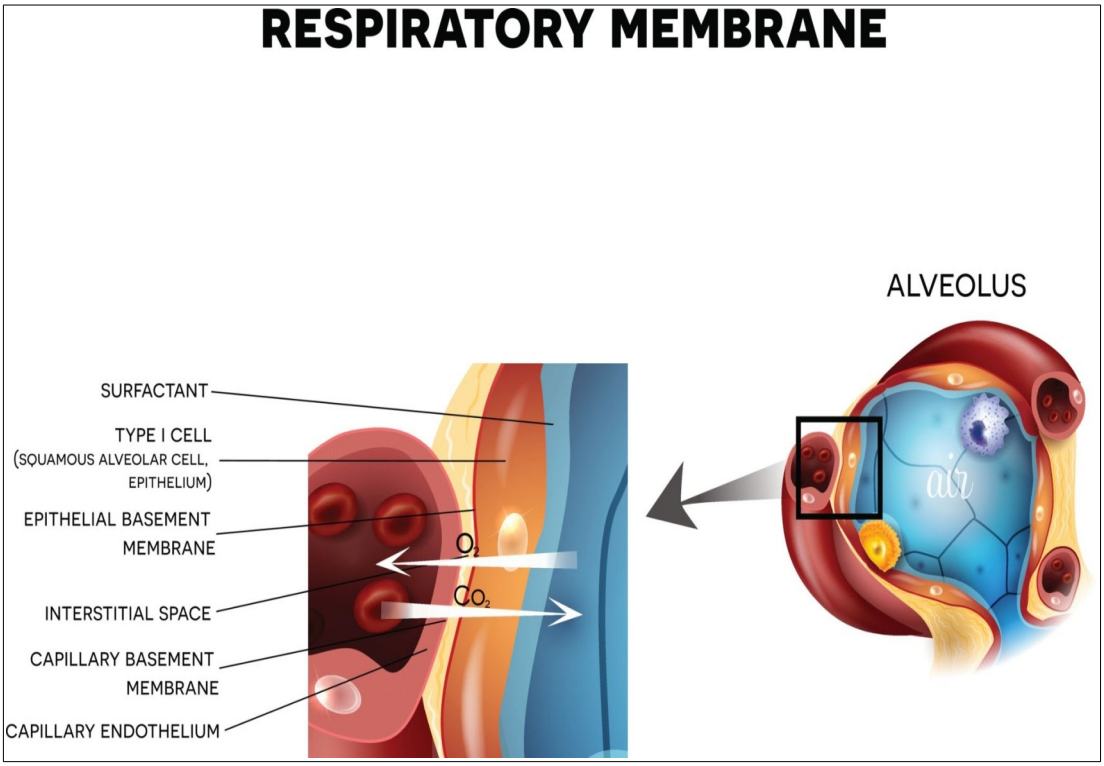
يتألف الغشاء التنفسي من عدة طبقات أساسية بالغة الرقة لتسهيل سرعة وكفاءة التبادل الغازي، وهي كالتالي:

1. طبقة السائل المبطن للسنخ (Fluid Layer): تحتوي على مادة السرفاكتنت (Surfactant) (المادة الفعالة سطحياً)، والتي تعمل على إنقاص التوتر السطحي للسائل السنخي، مما يمنع انكماش الأسناخ وانهيارها.
2. الظهارة السنخية (Alveolar Epithelium): مؤلفة من خلايا ظهارية رقيقة جداً .
3. الغشاء القاعدي الظهاري (Epithelial Basement Membrane): الغشاء الرقيق الذي تستند إليه خلايا الظهارة السنخية.

4. المسافة الخلالية الرقيقة (Interstitial Space): مسافة ضيقة وفاصلة تقع بين الظهارة السنخية وبطانة الشعيرات الدموية.

5. الغشاء القاعدي الشعري (Capillary Basement Membrane): الغشاء المحيط بالشعيرات الدموية، والذي يندمج في أماكن عديدة مع الغشاء القاعدي الظهاري لتقليل مسافة الانتشار إلى أدنى حد ممكن

6. الغشاء البطاني الشعيري(Capillary endothelium).



العوامل التي تؤثر في حجم التبادل الغازي عبر الغشاء التنفسي

هناك العديد من العوامل التي تؤثر على انتشار الغازات عبر الحاجز الهوائي الدموي (الغشاء التنفسي). و فيما يلي نعدد أهم هذه العوامل:

1. اختلاف الضغط الجزئي للغاز على طرفي حاجز الانتشار.

2. مساحة السطح الذي يتم عبره انتشار الغازات:يقصد بها مساحة سطوح الأسناخ الرئوية النشيطة.

الحالات المرضية: تنقص هذه المساحة بشكل كبير في بعض الحالات مثل: استئصال جزء من الرئة.

3. سمك الحاجز الهوائي-الدموي:تتناسب سرعة الانتشار خلال الحاجز عكسياً مع سُمْكه؛ فكلما زاد السُمْك، قلت سرعة الانتشار.

التأثير المرضي: تؤدي بعض الأمراض مثل تليف الرئة إلى زيادة سُمْك هذا الحاجز، مما ينعكس سلباً وبشكل كبير على كفاءة التبادل الغازي.

4. معامل انتشار الغاز وقابليته للذوبان:تختلف الغازات عن بعضها في قدرتها على العبور عبر الغشاء التنفسي اعتماداً على وزنها الجزيئي ومعامل ذوبانها في السائل.

مثال توضيحي: يتمتع غاز ثاني أكسيد الكربون بقدرة على الانتشار عبر الغشاء التنفسي تفوق قدرة غاز الأكسجين بحوالي 20 مرة؛ وذلك بسبب شدة ذوبانه العالية في السوائل.

5. الضغط الجوي (الارتفاعات):في المناطق الجبلية والارتفاعات الشاهقة، يكون الضغط الجزئي للأكسجين منخفضاً. يترتب على ذلك دخول كمية أقل من الأكسجين إلى الأسناخ الرئوية، وبالتالي تقل الكمية التي تستطيع عبور الحاجز الهوائي-الدموي إلى الدم.

رابعاً: نقل الغازات

يتم نقل الأكسجين من الرئتين إلى الأنسجة عبر طريقتين رئيسيتين:

- **النقل منحلاً في البلازما**: تُنقل نسبة ضئيلة جداً تقدر بحوالي 2 %من الأكسجين منحلة بشكل مباشر في البلازما.

- **النقل مرتبطاً بالهيموغلوبين (الخضاب)**: تُنقل النسبة الكبرى وهي 98\% مرتبطة بشكل كيميائي عكوس مع حديد جزيء الهيم في كريات الدم الحمراء، لتشكيل الخضاب المؤكسج.

- **آلية ارتباط وتحرر الأكسجين**:

- في الشعيرات الرئوية (تحيط مباشرة بالحويصلات الهوائية داخل الرئتين):يبلغ الضغط الجزئي للأكسجين (PO2) في الأسناخ 104 ملم زئبقي وفي الشعيرات الرئوية 40 ملم زئبقي ،فيندفع الأكسجين من الأسناخ نحو الشعيرات الرئوية بفرق الضغط ويرتبط مع الخضاب ليشكل الخضاب المؤكسج.

- في الشعيرات النسيحية :يبلغ الضغط الجزئي للأكسجين في الدم القادم عبر الشرايين إلى الأنسجة (PO2) 94 ملم زئبقي وقيمته في الخلال أقل من 40 ملم زئبقي ، يتحرر الأكسجين من الهيموغلوبين لينتقل من الدم إلى الخلال ثم نحو الخلايا.

تزداد نسبة إشباع الخضاب بالأكسجين وتتحسّن قدرته على الارتباط به عند توفر العوامل التالية:

1. زيادة الضغط الجزئي للأكسجين.
2. نقص الضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون.
3. نقص تركيز شوارد الهيدروجين.
4. نقص درجة الحرارة.

نقل ثاني أكسيد الكربون (CO_2) في الدم

يُنقل ثاني أكسيد الكربون الناتج عن عمليات الأيض والاحتراق الخلوي من الأنسجة إلى الرئتين عبر ثلاث طرق رئيسية:

1. **النقل منحلاً في البلازما**: تُنقل نسبة ضئيلة تقدر بحوالي7% منه منحلة بشكل مباشر في البلازما.

2. **الارتباط بالهيموغلوبين (الخضاب)**: تُنقل حوالي 23 % منه عبر ارتباط عكوس مع الهيموغلوبين لتشكيل مركب يُسمى الكاربامينوهيموغلوبين .

3. على شكل شوارد البيكربونات: تُنقل النسبة الأكبر والتي تبلغ حوالي 70 %على شكل شوارد بيكربونات وفق الآلية الكيميائية التالية داخل كريات الدم الحمراء.

- يتفاعل غاز ثاني أكسيد الكربون مع الماء داخل كريات الدم الحمراء بوجود إنزيم أنهيدراز الكربونيك ليتشكل حمض الكربون ,يتفارق حمض الكربون سريعاً إلى شوارد هيدروجين وشوارد بيكربونات.ترتبط بعد ذلك معظم شوارد الهيدروجين بالخضاب بينما تنتقل شوارد البيكربونات إلى المصورة بالتبادل مع شوارد الكلوريد تدعى هذه الظاهرة زيحان الكلوريد.

المبحث الخامس: تنظيم التنفس

- تعد عملية التنفس لدى جميع الحيوانات فعلا عصبيا انعكاسيا ذاتيا.واستمرار عملية التنفس يخضع للحركات الآلية للتنفس التي تنشأ من الانقباضات المنتظمة لعضلات الصدر و الحجاب الحاجز.

يتطلب بقاء واستمرار هذا الانتظام وجود مراكز ناظمة تتحكم في عملية التنفس و تشرف على انسجام حركات العضلات المشتركة في الشهيق و الزفير و شدة تقلصها.

يتم التحكم بتلقائية حركات التنفس بوساطة آليات متعددة تضم: التحكم العصبي و التحكم الكيميائي

أولاً: التحكم العصبي بالمراكز التنفسية

تتألف المراكز المسؤولة عن تنظيم عملية التنفس من مجموعات عصبية تتوضع في كل من البصلة السيسائية وجسر الدماغ . وتنقسم إلى الآتي:

1. المجموعة التنفسية الظهرية :

- تتموضع عصبونات هذه المجموعة تحديداً ضمن نواة السبيل المفرد في البصلة السيسائية, وهي المسؤولة عن عملية الشهيق

2. المجموعة التنفسية البطنية :

- تتواجد في البصلة السيسائية بالقرب من النواة الملتبسة, تتألف بنيتها من منطقتين رئيسيتين للعصبونات

الزفيرية، ومنطقة رئيسية مخصصة للعصبونات الشهيقية.

•تقوم العصبونات الزفيرية في هذه المجموعة بتحفيز العضلات الزفيرية أثناء حالات الزفير القسري.

3. مركز التنفس الجسري (Pneumotaxic Center):

• يقع في المنطقة الظهرية العلوية لجسر الدماغ.

• يضم عصبونات شهيقية وزفيرية ومختلطة، ويُعتقد أن دوره الرئيسي يكمن في تنظيم وتسهيل الانتقال بين الشهيق والزفير

4. مولد النسق المركزي :هو شبكة من العصبونات تولد أنماط منتظمة ومتكررة من الأنشطة العصبية تدعى الإيقاع (النظم) التنفسي.

ثانياً: التحكم الكيميائي (الخلطي)

1. جملة المستقبلات الكيميائية المركزية:

لا تتأثر عصبونات المركز التنفسي بشكل مباشر بتغيرات غاز ثاني أكسيد الكربون وشوارد الهيدروجين في الدم؛ ولكن عوضاً عن ذلك، توجد منطقة عصبية إضافية حساسة كيميائياً بدرجة عالية، تقع تحت السطح البطني للنخاع المستطيل (البصلة السيسائية) قريبة جداً من مركز التنفس. هذه المنطقة حساسة للتغيرات في تركيز شوارد الهيدروجين والضغط الجزئي لغاز ثاني أكسيد الكربون ، وهي بدورها تنظم عمل المركز التنفسي.

يُعتقد أن المنبه المباشر لهذه العصبونات هو شوارد الهيدروجين ، ولكن هذه الشوارد لا تستطيع اجتياز الحاجز الدموي الدماغي بسهولة، في حين يعبر غاز ثاني أكسيد الكربون بسهولة بالغة.

عندما يرتفع الضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون في الدم، يرتفع كذلك في السائل الخلالي للنخاع المستطيل والسائل الدماغي الشوكي، حيث يتفاعل فوراً مع الماء لتشكيل حمض الكربون، والذي يتفكك بدوره إلى بيكربونات وشوارد هيدروجين تُنبّه العصبونات الحساسة كيميائياً.

2. جملة المستقبلات الكيميائية المحيطية:

توجد مستقبلات عصبية كيميائية محيطية تسهم في التحكم بالتنفس، وهي حساسة بالدرجة الأولى لتغيرات تركيز الأكسجين في الدم، وتستجيب بدرجة أقل لتغيرات تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون و شوارد الهيدروجين. ترسل هذه المستقبلات إشارات عصبية منتظمة إلى مركز التنفس. تنقسم إلى نوعين رئيسيين:

•**الأجسام السباتية** : يقع معظم المستقبلات الكيميائية فيها عند تفرع الشريان السباتي الأصلي، وتمر الأعصاب الصادرة عنها عبر عصب هيرنغ إلى العصب البلعومي اللساني، ومن ثم إلى المنطقة التنفسية الظهرية في البصلة.

•**الأجسام الأبهرية** : يوجد بعضها على طول قوس الأبهر، وتمر الألياف العصبية الصادرة عنها عبر العصب المبهم ومن ثم إلى المنطقة التنفسية الظهرية أيضاً.

يؤدي **انخفاض PO_2 في الدم الشرياني** إلى دون المقدار السوي (خاصة إذا انخفض إلى أقل من 60 ملم زئبقي) إلى تنبيه هذه المستقبلات، لتنتقل سيالاتها العصبية عبر العصبين البلعومي اللساني والمبهم إلى مركز التنفس، فيزداد معدل وعمق التنفس