الفصل الخامس

الجهاز التنفسي
The Respiratory System

التنفس والنفس والتهوية
Respiration, Breathing, Ventilation

يعرف التنفس بأنه العملية التي بواسطتها ينتج مركب ثالث فوسفات الاديبوسين (ATP) باستخدام الأكسجين . تحصل الكائنات وحيدة الخلية الصغيرة جداً على الأكسجين التي تحتاجه بواسطة عملية الانتشار الموجب ، ويحكم عمليات انتشار الأكسجين هذه في الكائنات التدرج في تركيز الأكسجين حيث يكون عالي التركيز خارج الخلية مقارنة مع داخلها مما يساعد في انتشار الأكسجين إلى الداخل. ويضبط ذلك الفرق في التركيز بين الداخل والخارج ، حيث معدل الانتشار أسرع كلما كان الفارق أكبر . ويشابه ذلك التخلص من ثاني أكسيد الكربون المنتج من عمليات الأكسدة الخلوية بطريقة الانتشار . فهي تتنفس ولكن لا تستنشق . وفي الحيوانات الراقية من الصعوبة بمكان فصل سطوح التبادل الغازي ومكان استعمال الأكسجين عن الغازات الحيوية لكي تتم عمليات الانتشار فقط . وتحتاج هذه الحيوانات لجلب الغازات من الجو إلى سطوح التبادل الغازي ، كالرئة ويتم هذا عن طريق الاستنشاق

. الاستنشاق هو العملية التي بواسطتها تجلب الغازات إلى السطوح التنفسية وتزال عنها بواسطة الانسياب الكلي . ويعني الانسياب الكلي أن جميع الغازات تتحرك بكتل . وهناك مصطلح آخر يصف حركة الهواء إلى ومن الرئتين ، وهو التهوية Ventilation .

يحتوي الهواء الجوي الجاف على ٢٠,٩٨ ٪ أكسجين ، و ٠,٠٤ ٪ ثاني أكسيد الكربون ، و٧٨,٠٦ ٪ نيتروجين ، و٠,٩٢ ٪ غازات أخرى ، وبالأخص غاز الأرجون . يحتوي الهواء الذي يتنفسه الحصان على كمية متفاوتة من بخار الماء بدرجة تشبع تدل عليها رطوبته النسبية . وحيثما كانت الرطوبة النسبية للجو ما بين ٥ ٪ و ٩٥ ٪ ، يدفأ الهواء المتنفس إلى درجة حرارة قريبة من درجة حرارة الجسم ويشبع بالرطوبة وهذا يعني أن نسبة الرطوبة النسبية قد تصل إلى ١٠٠ ٪ في المجاري الأنفية Nasal passages وقبل دخول الهواء إلى الرئتين . وسوف يأخذ الحصان الهواء والمحمل بكل الغازات والجزيئات الأخرى المرغوب فيها وغير المرغوب فيها (مثل الغبار والفطريات والفيروسات وحبوب اللقاح ، ... إلخ) والتي تتواجد عادة في الهواء الجوي المتاح . التنفس ليس اختيارياً ، من الضروري أخذ ما به من المواد الخشنة والناعمة على السواء . تؤخذ الغازات الجوية للداخل ويعمل لها بعض التعديلات عند خروجها بواسطة هواء الزفير . ويكون هواء الزفير (الهواء الخارج من الجسم) مشبعاً ببخار الماء وفي حالة الراحة تصل نسبة الأكسجين إلى ١٧ ٪ و ثاني أكسيد الكربون إلى ٣ ٪ . لذا نلاحظ أنه ليس جميع الأكسجين المأخوذ في هواء الشهيق يستهلك . ولو استهلك جميع الأكسجين فإن عملية الإنعاش من الإغماء بطريقة الفم – إلى– الفم ستكون غير مجدية .

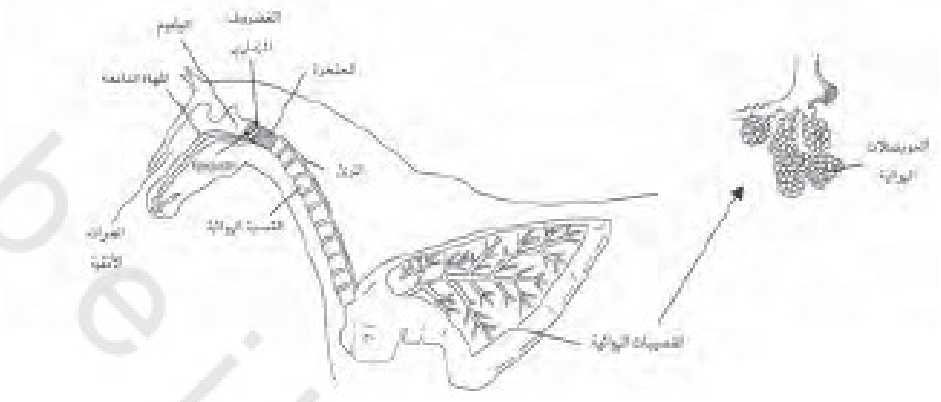
هناك فروق مهمة بين الجهاز التنفسي في الإنسان والخيول وفي الطريقة التي تتم بها غالباً الاستجابة للأمراض . وعلى سبيل المثال إذا أصيب شخص بأحد

أمراض الجهاز التنفسي كالبرد cold (هذا مرض ينجم عن إصابة معدية) أو حالة ربو Asthma (مرض حساسية) ، فإن أحد الأعراض البديهية والواضحة هو حدوث الكحة cough . إذا ما حدث أن بدأ أحدنا بالكحة ، فمن البديهي أن يكون هذا الشخص قد أصيب بعدوى أو مرض والعكس صحيح . وفي غياب الكحة هناك احتمالية أن تكون رئاتنا سليمة وجيدة . يختلف الأمر عند الخيول عن ذلك كثيراً . بالمقارنة بالإنسان فالخيول غالباً لا تكح ، حتى عندما تكون مصابة بمرض شديد . لقد أوضح بورل وزملائه Burell *et al.* (1996) ظهور الكحة في ٨٤ ٪ من الحالات عند الخيول ولكن ٣٦ ٪ منها تعود لأسباب مرض الجهاز التنفسي أو إصابته . ماذا يعني هذا ؟ يدل باختصار إذا كان الحصان يكح فهناك احتمالية كبيرة أن تكون المجاري التنفسية للخيل مصابة بأحد أمراض الجهاز التنفسي الأخرى (المحددة بالذات) ، ولكن إذا لم يكح الحصان فهناك احتمالية ضئيلة بأن يكون الحصان سليم Low sensitivity . من الشائع أن تسمع الناس يذكرون أن خيولهم قليلاً ما يصاب جهازها التنفسي بالرغم من وجود التبن والدريس المترب ، وأن كحة الحصان مرة أو اثنتين ربما تعني تدريب الحصان عليها وأن هذه الخيول ربما كانت مصابة بالأمراض التنفسية ولابد من فحصها والتأكد من ذلك .

تشريح الجهاز التنفسي

Anatomy of Respiratory System

إذا ما عملنا رحلة من الهواء الجوي إلى الممر الهوائي في الجهاز التنفسي ، فسوف نمر خلال التركيب الموضح بالشكل رقم (٥.١) : المنخران Nostrils ، الممرات الأنفية ، البلعوم ، الحنجرة ، القصبة الهوائية ، الكارينا carina ، الشعب الهوائية ، الشعيبات التنفسية ، قنوات الحويصلات الهوائية وأخيراً الحويصلات الهوائية .



الشكل رقم (٥,١). الجهاز التنفسي في الخيول .

يرتبط الجهاز التنفسي بشجرة تمثل فيها القصبة الهوائية جذع هذه الشجرة وبينما تتمثل الممرات الهوائية التالية في الفروع . يمكننا إعطاء رقماً لكل جيل من تفرعات الجهاز التنفسي ، فالقصبات تعتبر جيل الأساس (الصفر) ، القصيبات الهوائية والتي تتفرع من القصبة الهوائية بالجيل الأول وهكذا دواليك . في الحصان يوصف كل ممر هوائي على أنه أحادي القدم monopodial حيث كل فرع من الفروع يكون أصغر من أصله وتفرع منه . في الإنسان غالباً ما توصف تفرعات الممرات الهوائية بالمتماثلة Symmetric ، أي أن فرع الممر الهوائي يمكن أن يكون بنفس حجم القصبة الأم أو أصغر منها .

يختلف عدد أجيال الممرات الهوائية من القصبات حتى قنوات الحويصلات الهوائية اختلافاً كبيراً بين الأنواع المختلفة . وعلى سبيل المثال تصل المجاري التنفسية في الإنسان إلى معدل ٢٣ فرع ، بينما عدد هذه المجاري في الخيول أكثر بكثير مما هو عليه الحال في الإنسان فقد تصل إلى ٣٨-٤٣ فرع . ونظراً لعدم وصف هذه الممرات جيداً في الخيول فسوف نستخدم رئات الإنسان كمثال . فعندما يكون عدد أجيال الممرات الهوائية ما بين صفر-١٦ تعتبر ممرات هوائية موصلة ؛ حيث لا يتم أي عمليات تبادل

غازي من خلال جدرها ووظيفتها هو توصيل الهواء حتى النهاية حيث سطوح التبادل الغازي . ولا يحدث تبادل غازي خلال جدر هذه الممرات؛ نظراً لسماكة جدرها . بينما الأجيال المكونة من ١٧–٢٣ من الممرات الهوائية التنفسية يتم من خلالها عمليات التبادل الغازي بواسطة عملية الانتشار Diffusion . جدر الممرات من صفر – ١٦ مبطنة بخلايا طلائية مهدبة (حركة هذه الأهداب تؤدي إلى تخلص الجهاز التنفسي من المواد المخاطية والمواد الأخرى غير المرغوب فيها خارج الممرات الهوائية) ، أما الممرات من ١٧–٢٠ فالهواء يمر عبر قنوات الحويصلات الهوائية ، بينما الأجيال من ٢٠– ٢٣ فتتكون من حويصلات هوائية . يصل في الإنسان معدل عدد الحويصلات الهوائية حوالي ٢٠٠–٦٠٠ مليون ويعتمد ذلك على الارتفاع (بمعنى آخر حجم الجسم) . يختلف متوسط قطر هذه الحويصلات حسب حجم الرئة ولكنها حوالي ٠,٢ ملم أو ٢٠٠ميكرومتر تبعاً للقدرة المتبقية الوظيفية. يبدو أن عدد الحويصلات في الخيول يتراح ما بين ١٠ ^{١٠}–١٠ ^{١١} كما تم حسابه من رئات مساحتها السطحية ٢٥٠٠ م^{٢} . ومعدل قطر هذه الحويصلات يتراوح ما بين ٧٠–١٨٠ميكرومتر وهذا سوف ينتج عنه معدل مساحة سطحية للحويصلات ما بين ١٥–١٠٠ ألف ميكرومتر مربع على أساس أن الحويصلات كروية تقريباً (الحقيقة أن الحويصلات متعددة الأضلاع) . مساحة السطح الفعلية للرئة حيث تتم عمليات التبادل الغازي هي حوالي ٨٥ م^{٢} في الإنسان وحوالي ٢٥٠٠ م^{٢} في الخيول . ويشكل هذا ٨٥ ٪ من حجم الرئة . وهذا يمثل ضعف مساحة ملعب التنس حوالي ٢٦١ م^{٢} (٢٨٠٨ قدم ^{٢}) ، ولذلك فإن مساحة سطوح التبادل الغازي في الخيول هي حوالي عشرة أضعاف مساحة ملعب التنس . بالمقارنة حسبت المساحة السطحية للتبادل الغازي للخيول فوجدت أنها تغطي حوالي ١٧٠٠ م^{٢} . تتميز رئات الخيول بتهوية عرضية جيدة ، مما يعني أن حركة الهواء تتم بين المناطق المختلفة للرئة عند

مستوى تركيب يعرف بالفصيص . الأبقار والخنازير ليس لهما وسائل تهوية عرضية بين فصيصات الرئات المتجاورة ، بينما لدى القطط والكلاب درجات عالية من التهوية العرضية .

الحجم الكلي للهواء الذي تحتويه الرئة (السعة الكلية للرئة) هو حوالي ٦-٧ لترات في الإنسان وحوالي ٤٠ لتر في حصان وزنه ٥٠٠ كجم . تعتمد السعة الرئوية على حجم الجسم ، فالأفراد الأكبر حجماً لديهم رئات سعتها أكبر . يوضح الشكل رقم (٥,٢) مكان موضع الرئات في الحصان . مع أنه قد لا يكون هناك بالضرورة علاقة بين حجم الرئة ووظيفتها في الحقيقة يعتقد خطأ بأن حجم صدر الحصان في أغلب الأحيان مرتبط بالأداء ، وليس هناك سبب للاعتقاد بأن الحصان ذي الصدر العميق والواسع له رئات أداؤها أفضل من ذلك الحصان الذي له صدر ضيق وغير سميك . لا توجد ميزة للحصان الذي لديه حجم صدري أكبر ، خاصة وأن ذلك يحتاج إلى عضلات صدرية أكثر والتي تحتاج هي الأخرى إلى إمداد بالأكسجين .

تكون المجاري التنفسية (الهوائية) في أقصى سعتها عندما تكون العضلات الملساء حولها في وضع استرخاء عندما تكون الرئة في أعلى حجم لها ، وعند مزاولة الجهد البدني ، وكذلك لا يكون هناك أمراض تنفسية . تتأثر الخيول كثيراً بانغلاق مجاريها الهوائية والذي كان معروفاً بمرض الإعاقة الرئوية المزمن للخيول Chronic Obstructive Pulmonary Disease (COPD) . ينتج عنه على سبيل المثال تضيق المجاري التنفسية مما يزيد من مقاومتها ونقص التزامها الديناميكي (زيادة تصلب الرئة) بسبب مجموعة من العوامل والتي تتضمن تضيق القصبات (أو تشنج قصبي Bronchospasm ، انقباض العضلات الملساء حول المجاري التنفسية) ، سماكة جدر المجاري التنفسية ينتج عنه صغر قطر هذه الممرات وانسداد المجاري بالمواد المخاطية .

الشكل رقم (٥,٢). الحدود الخارجية للرئة .

تمتلك الرئة دورتين دمويتين . الدورة الرئوية Pulmonary circulation وهي التي تجلب الدم الوريدي لكي يتلامس مع سطوح التبادل الغازي . وعلى كل حال ، لزم نسيج الرئة بنفسه أن يمد باحتياجاته من الدم والذي يجلب معه الأكسجين والمواد المغذية للخلايا . تسمى هذه بالدورة القصبية Bronchial circulation وهذا يشابه ما يحدث في القلب ، حيث توجد الدورة التاجيةCoronary circulation والتي تمد عضلات القلب بما تحتاجه من الأكسجين والمواد الغذائية .

ما مقدار الهواء الداخل والخارج ؟
How Much Air Goes in and Out ?

يمكن أن تقاس التهوية بتحديد حجم الهواء الداخل والخارج من الرئة . تعرف الكمية الكلية من الهواء الداخل أو الخارج من الرئة خلال دقيقة بالتهوية الدقيقية ويمكن حسابها كالآتي :

التهوية الدقيقية (لتر/ثانية) = الحجم المتبدل (لتر) × الحركة (الترددات) التنفسية (نفس/ثانية)

الحجم المتبدل (V_T) يعبر عن عمق النفس والحركة التنفسية، (Fr) هي عدد مرات الحركات التنفسية بالدقيقة . ويمكن أن يعبر عن ذلك بالمعادلة الآتية :

$$\dot{V}_E = V_T \times Fr$$

النقطة التي فوق حرف الـ V تدل على أن هذا معدل التهوية الدقيقية في وحدة الزمن (ففي هذه الحالة لترات/ثانية) . ولابد أن يقاس الحجم الرئوي والتهوية الدقيقية والحجم المتبدل تحت نفس الظروف . وذلك بسبب أن الحجم يتأثر بالضغط البارومتري ودرجة الحرارة والرطوبة . إن التعبير العالمي لحجم الرئة هو BTPS . ويبرز ذلك دور درجة حرارة الجسم والضغط المشبع . إن الشروط الدقيقة هي ٣٧ °م ، ١٠١,٣ KPa (٧٦٠مم . زئبق) و١٠٠٪ رطوبة نسبية (RH) عند درجة حرارة ٣٧ °م . هناك اتفاق مماثل استخدام لأحجام الأكسجين المأخوذ وأحجام ثاني أكسيد الكربون المنتج (زفير) ويعرف ذلك بـ (Standard Temprature and Pressure, Dry "STPD") (درجة الحرارة والضغط والجفاف القياسية ، ارجع للفصل الثامن عشر) . يحتاج حصان أصيل محسن وزنه (٥٠٠ كجم) عند الراحة إلى حوالي ٥٠–٦٠ لتر/دقيقة للتهوية الدقيقية ويتم ذلك بأخذ نفس مقداره ٥–٦ لتر في المرة الواحدة التي تتكرر عشر مرات في الدقيقة . ليس بالضرورة أن كل هذه الكمية من الغاز ٥٠–٦٠ لتر ستصل لسطح التبادل الغازي . وببساطة فإن نسبة كبيرة من الهواء تتحرك ذهاباً

وإياباً خلال المجاري الهوائية . يعرف الغاز الذي لم يُتبادل ولكنه تحرك قدوماً وذهاباً إلى الرئة بتهوية الحيز الضائع أو الميت (V_D) ويحتوي هذا الهواء الشهيقي Wasted or dead space ventilation على نفس نسبة الأكسجين في الجو (تقريباً ٢١ ٪) و (٠ ٪) ثاني أكسيد الكربون ويشكل هواء الحيز الميت في حصان معافي عند الراحة حوالي ٦٠ ٪ من هواء النفس المأخوذ . للحيز الميت مكونان هما : الأول هو الحيز الميت التشريحي ($V_{D\ anat}$) والذي يشير إلى نسبة الهواء المتنفس الذي يملأ الممرات الهوائية ولا يتمكن من الوصول إلى الأسطح التنفسية (الغشاء السنخي Alveolar " الحوصلي" الشعيري أو سطوح الشعيبات الهوائية) ، أما المكون الثاني فهو الحيز الميت الفسيولوجي ($V_{D\ phys}$) والذي يمثل الهواء الذي يلامس الأسطح التنفسية دون حدوث تبادل غازي وذلك بسبب عدم وصول أو إمدادها بالدم .

ما الذي يجعل الهواء يدخل إلى الرئة ويخرج منها ؟
What Makes the Air Go in and Out of the Lungs ?

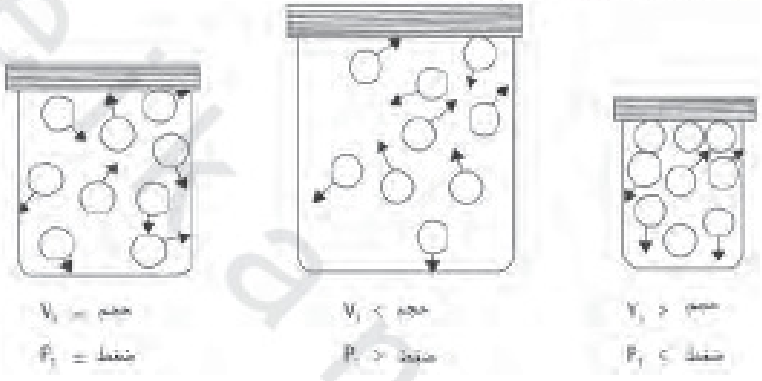
هناك مفهومان لابد من معرفتهما قبل أن نتمكن من الدراسة المباشرة لكيفية سلوك الغازات :

١ – تتحرك الغازات من مناطق ذات ضغط عالي إلى مناطق ذات ضغط منخفض ، كهروب الهواء من الإطار المثقوب .

٢ – قانون بويل Boyle's law : وينص على أن ضغط كتلة ثابتة من الغاز (للغاز كتلة مثلما للسوائل والمواد الصلبة) عند درجة حرارة ثابتة يتناسب عكسيا مع حجمه .

لفهم قانون بويل ، نتخيل كتلة معينة من الغاز محفوظة في وعاء (حاوية) . ويحدث أي غاز يحفظ في حاوية ضغطاً بسبب اصطدام جزيئات الغاز بجدران الحاوية . فإذا ما

وضعنا نفس الغاز في حاوية أصغر ، أي قللنا الحجم الذي يوجد فيه الغاز ، فإن جزيئات الغاز سوف تمارس ضغط أكبر على جدران الحاوية بسبب اصطدامات أكثر من جزيئات الغاز بجدران الحاوية ؛ أما إذا وضعنا نفس كمية الغاز في حاوية أكبر، حيث يكون هناك مجال أكبر للجزيئات ، وتقل نسبياً عدد اصطدامات جزيئات الغاز بجدران الحاوية ، مما ينتج عنه ضغط غازي منخفض (انظر الشكل رقم ٥,٣) .



الشكل رقم (٥,٣). قانون بويل : إن ضغط كتلة ثابته من الغاز عند درجة حرارة ثابته يتناسب عكسيا مع حجمها.

للحصول على الغاز الجوي ، وجعله يتحرك إلى الرئة في عملية الشهيق ، لابد من تدرج عمل لضغط الغاز لكي تتحرك بواسطة السريان الكتليBulk flow . لا نقدر على تغيير الضغط الجوي ، ولكن بالاستطاعة تغيير الضغط داخل الرئة من خلال تعديل حجمها . وعندما يزداد حجم الرئة خلال أخذ هواء الشهيق فإن ذلك يؤدي إلى خفض الضغط داخل الرئة (يصبح أكثر سلبية) .

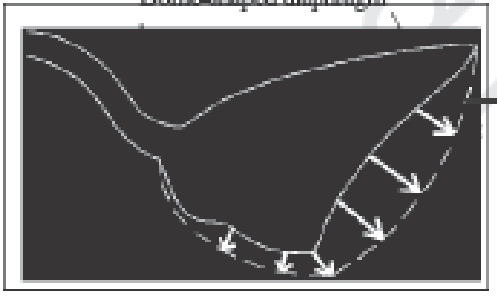
يزداد حجم الرئة خلال عمليات الشهيق عن طريق إنقباض الحجاب الحاجز وتوسع الصدر (انظر الشكل رقم ٥,٤) . نتيجة لذلك يصبح الضغط في الحويصلات الهوائية أكثر سلبية (أقل ايجابية ، والتي نرى أنها الأفضل) . يندفع الهواء للداخل من

الجو بسبب الفرق في الضغط بين المكانين والغازات سوف تندفع من منطقة الضغط العالي (الجو) إلى المنطقة الأقل ضغطاً (الرئة) حتى الوصول إلى اتزان في الضغط (تساوي الضغوط) . في الوضع الطبيعي والتنفس الهادئ والضغط الحويصلي الداخلي (ضغط الغاز ضمن الرئة) يتغير فقط بمقدار(1-2 cm H_2O) 0.1 – 0.2 KPa أعلى وأسفل الضغط الجوي .

يتلخص معدل حركة الهواء إلى الرئة بالمعادلة الآتية :

$$\text{معدل التدفق } (\dot{V}) = \frac{\text{الضغط الجوي} - \text{الضغط الحويصلي}}{\text{مقاومة الممرات الهوائية}}$$

تكون نسبة تدفق الهواء إلى الرئة أكبر إذا كان هناك اختلاف كبير بين الضغط الجوي والضغط الحويصلي ، وإذا كان هناك مقاومة أقل لتدفق الغاز وهذا يمكن حسابه بواسطة حجم الممرات الهوائية . وهناك مصطلحات ملائمة أكثر لحساب حجم الممرات الهوائية .



الشكل رقم (٥,٤). عندما يزايد حجم الرئة أثناء الشهيق ، يتناقص الضغط في الرئة (يصبح سلبياً) .

أفعال العضلات التنفسية

Actions of the Respiratory Muscles

تتمثل العضلات الشهيقية الرئيسة في عضلات الحجاب الحاجز والعضلات الوربية (بين الضلوع) الخارجية . خلال العمليات الشهيقية الخفيفة عند فترة الراحة ،

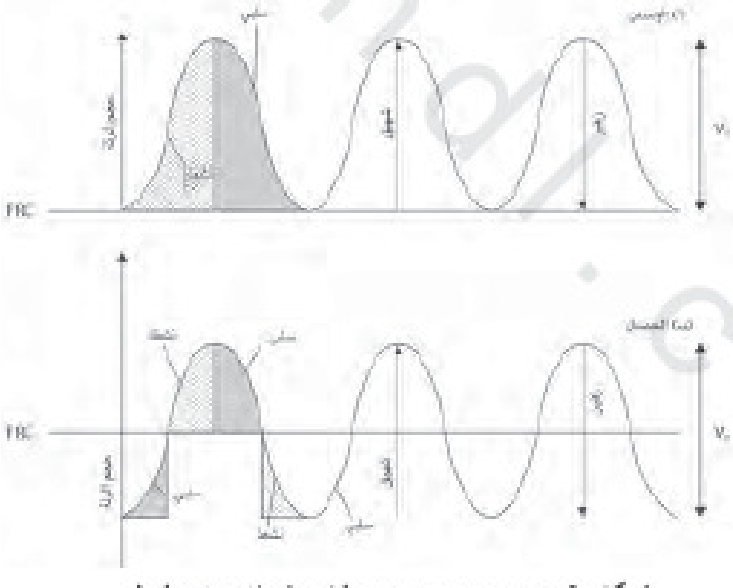
يقوم الحجاب الحاجز بـ ٨٠ ٪ من أعمال التنفس، و٢٠ ٪ للعضلات الوربية الخارجية . في الإنسان ، عملية الشهيق هي عملية موجبة صرفة وهذا يحتاج إلى طاقة . عندما تقوم بعمليات الشهيق وينقبض الحجاب الحاجز ويصبح مستو ينتج عن ذلك زيادة في حجم الرئة . وفي نفس الوقت ، تقوم العضلات الوربية الخارجية بحمل صندوق الأضلاع للأعلى وباتجاه الخارج مما ينتج عنه زيادة في حجم القفص الصدري (وكذلك الرئة) . وبتمدد الرئة تتمدد ألياف الحجاب الحاجز المرنة وتؤدي إلى خزن الطاقة . عند نهاية العملية الشهيقية ترتخي ، كلاً من عضلات الحجاب الحاجز والعضلات الوربية الخارجية وينجم عن ذلك الضغط على الهواء وطرده للخارج . ويعني هذا أن عملية الزفير غير نشطة (سلبية) حيث لا يوجد عمل عضلي لطرد الهواء خارجاً خلال عمليات التنفس الهادئة عند الراحة .

عند إخراج الهواء بقوة مثلاً عند السعال واللعب بآلة هوائية، تستعمل أيضاً العضلات بين الضلوع الداخلية بشكل نشط لتسحب الأضلاع للأسفل . لربما يساهم تقلص العضلات البطنية في إجبار الهواء للخروج من الرئة . فقط في هذه الحالات من الزفير الإجباري ، نرى زفيراً نشطاً في البشر بينما تتبنى الخيول إستراتيجية تنفسية مختلفة عن الإنسان . تتم في الخيول عمليات تعرف بالشهيق والزفير ثنائي الطور . يوضح الشكل رقم (٥,٥) تخطيطاً بيانياً عن كيفية اختلاف أفعال التنفس بين البشر والحصان .

كلتا الرئتان في الإنسان والحصان لهما نفس حجم الراحة العادي . ويعرف ذلك بالقدرة المتبقية الوظيفية Functional Residual Capacity (FRC) وأحياناً يطلق عليه اسم حجم الرئة الزفيري النهائي End Expiratory Lung Volume , (EELV)، وهذا يقابل حجم الرئة عندما تكون في حالة الراحة، وليس الشهيق أو الزفير . تتم تهوية الرئة في الإنسان ايجابياً وذلك بزيادة حجم الرئة عن السعة المتبقية الوظيفية ، بعد ذلك يسمح للرئة بشكل سلبي للعودة إلى قدرة السعة الوظيفية . يلاحظ من الشكل رقم (٥,٥) إذا ما عاد حجم الرئة إلى قدرة السعة الوظيفية ، فإن هذا الجزء من الدورة

التنفسية يكون سلبياً ، وإذا ما ابتعد حجـم الرئة عن قدرة السعة الوظيفية ، فإن هذا الجـزء من الدورة التنفسية يكون نشطاً . نقول هنا بأن البشر يتنفسون من أو فوق قدرة السعة الوظيفية عند الراحة . بينما نرى أن عمليتي الشهيق والزفير الطبيعية في الحصان لهما جزء سلبي وآخر إيجابي. يعود ذلك، لأن الخيول تتنفس عند الراحة قريباً من قدرة السعة الوظيفية (بمعنى آخر فوق وتحت القدرة المتبقية الوظيفية) وليس فوق مستواها كما هو الحال عليه في البشر. يعتقد أن ذلك يكون أقل استهلاكا للطـاقة للحصان أن يتنفس بسـبب صلابة جدران صدر الحصان والتي هي أصلب مما عليه في البشر. وبمعنى آخر قد تساعد هذه الإستراتيجية في تخفيض عمل التنفس .

يتحرك الهواء من وإلى الرئة نتيجة لحركة الحجاب الحاجز والأضلاع والذي ينجم عنها تغير في حجم القفص الصدري، ولكن ما هو الشيء الذي يجعل الرئة تتحرك سوية مع جدار الصدر ؟



الشكل رقم (٥,٥). استراتيجيات النفس في الإنسان والخيول .

الأغشية الجنبية (البللورا)
Pleural Membranes

يتغير حجم الرئة توافقاً مع حركة جدار الصدر بسبب وجود الأغشية الجنبية . هناك نوعان من الأغشية الجنبية :

- الجنبة الحشوية Visceral (الأقرب للرئة) .
- الجنبة الخارجية أو الجدارية Parietal (الأقرب لجدار الصدر) .

يملأ الحيز بين هذين الغشاءين بطبقة رقيقة للغاية من السائل البللوري . تملأ بضع ملليمترات من السائل البللوري المنطقة بين الغشاءين والتي تعرف بالتجويف الجنبوي (البللوري) . يعمل هذا السائل البللوري عمل زيوت التشحيم واللواصق . حيث يعمل على لصق جدار الصدر والرئة معاً .

عند الراحة أي عند دور قدرة السعة الوظيفية ، يعرف الضغط في التجويف الجنبوي بالضغط الجنبوي الداخلي Intrapleural pressure أو P_{pl} ، والذي يتراوح ما بين (-0.3 to- 0.5 KPa (-3 to – 5 cm H_2O بمعنى آخر ، يوجد ضغط سلبي بين الرئة وجدران الصدر. ولكل من جدار الصدر والرئة نفس الدرجة من المرونة ، لذا فهما دائماً يميلان إلى العودة إلى وضع قدرة السعة الوظيفية . وإذا ما زاد أو نقص حجم جدار الصدر إلى أقل من قدرة السعة الوظيفية ، فإنه سرعان ما يعود مرة أخرى إلى قدرة السعة الوظيفية . لذا فإن قدرة السعة الوظيفية تعبر عن الحجم المطلق للصدر، فإذا ما مال الصدر للاندفاع للخارج فسوف يعارض بميل انكماش الرئة إلى الداخل . ونظراً لزيادة حجم الرئة خلال الشهيق، يصبح (P_{pl}) أكثر سالبية، وهذا يعكس ميل الرئتين للابتعاد عن جدار الصدر. نظرا لخفض حجم الرئة أثناء الزفير، تصبح الـ P_{pl} أقل سالبية ، مما يعكس ميل جدران الصدر للتمدد والعودة إلى قدرة السعة الوظيفية وليس من السهولة بمكان قياس التغير في الضغط البللوري الداخلي مباشرة . وإذا ما حاولنا

ادخال قسطرة إلى التجويف البللوري فغالباً يحدث إدخال هواء إلى التجويف . ويؤدي ذلك إلى عدم التصاق الأغشية البللورية وحدوث انكماش للرئة من جراء دخول هذا الهواء . وهذا ما يعرف بالاسترواح الصدري Pneumothorax . الخطر الإضافي الآخر هو وصول البكتيريا إلى التجويف البللوري وحدوث ما يعرف بالاسترواح البللوري البكتيري Bacterial pleuro–pneumonia . على أية حال، وبالرغم من عدم قياس الضغط البللوري مباشرة، يسهل حسابه خاصة وأن الضغط في منتصف الصدر حيث يمر المريء مقارباً للغاية للضغط في التجويف البللوري . وذلك لأن المريء يمر من خلال التجويف الصدري حيث تتواجد الرئتين والقلب وغير مرتبط بالرئة وخاضع لنفس التغيرات في الضغط التي تحدث في الصدر أثناء التنفس . في الحقيقة ، يتأثر القلب بالتغيرات في الضغط الداخلي المصاحب لعمليات التنفس ومثال ذلك هو حدوث اضطراب في أحد جيوب التنفس والذي يمكن مشاهدته بشكل واضح في التخطيط القلبي Electrocardiogram (ECG) بعد القيام بتمرين ما . وغالباً ما يكون ذلك نتيجة التنفس معدل وجهد التنفس مرتفع ينجم عنه تأرجح كبير في الضغط الصدري الداخلي . يتسبب زيادة الضغط الصدري الداخلي خلال عمليات الزفير في انسياب الدم الوريدي إلى القلب مرة أخرى، ونتيجة لذلك يقوم القلب بخفض معدل نبضاته . يصبح الضغط الصدري الداخلي سالباً أثناء شهيق الحصان ، ويعيد هذا تخزين الدم الوريدي ولذا يرتفع معدل ضربات القلب . يرى هذا عند رافعي الأثقال من البشر ويشار إليه بمناورة فلسلفا Valsalva's manoeuvre ، وعندما يحاولون الزفير والفم والأنف وفتحة المزمار مقفلة ، يرتفع بشكل كبير الضغط الصدري الداخلي وينخفض معدل ضربات القلب . يمكن إظهار هذا التأثير بمراقبة جهاز تخطيط القلب أو ECG .

يقاس الضغط المريئي عادة بتسجيل التغير في الضغط بوضع عازل مطاطي Condom في النهاية الطرفية لقسطرة تدخل من خلال التجويف المنخري Nostrils ومن ثم إدخالها إلى المريء . يحدد طرف القسطرة أولاً بملئها رأسياً خارج الحصان ووضع علامة للطول في التجاويف المنخرية Nares .

يوضح الجدول رقم (٥,١) حسابات الضغط الجنبي الداخلي المصاحب لعمليتي الشهيق والزفير التقريبية . يتغير الضغط الجنبي الداخلي (المريئي) تغير نسبياً أثناء التنفس العادي عند الراحة في الخيول السليمة بمعدل (0.3- 0.5 KPa(3-5 cm H_2O وهو دائما سالب تقريباً (-0.1 to – 0.4 KPa = -1 to -4cm H_2O) . هناك تأرجح كبير أثناء القيام بأقصى جهد بدني مثل العدو بأقصى سرعة في الضغط البللوري ليصل إلى حدود ٦,٩ KPa المعادل لـ ٧ سم ماء ويصبح P_{pl} إيجابياً عند الزفير .

الجدول رقم (٥,١). الضغط الجنبي الداخلي التقريبي لعمليتي الشهيق والزفير.

	Kpa	cmH_2O
الشهيق (التنفس العادي)	٠,٤-	٤-
الزفير (التنفس العادي)	٠,١-	١-
الشهيق (المجهود الأقصى)	٣,٩-	٤٠-
الزفير (المجهود الأقصى)	٢,٩-	٣٠

تناغم وعدم تناغم إرواء التهوية

Ventilation–perfusion Matching and Mismatching

إن التهوية ومليء الرئة لا يتم بانتظام وكما أن انسياب الدم الرئوي الوريدي (ارتواء) بين قمة وقاعدة الرئة ليست متجانسة في الإنسان والخيول . لقد أوضح ذلك الباحث Amis وزملاؤه عام ١٩٨٤م في الخيول باستخدام جهاز التصوير الوماضاني

Scintigraphy . حيث كانت التهوية والإرواء أكبر في قاعدة الرئة منها عند قمتها . يحدث تدرج التهوية نتيجة لتدرج الضغط البلوري الداخلي . الضغط البلوري الداخلي أكثر سالبية في قمة الرئة عنها في القاعدة ، لذا فإن حويصلات السعة المتبقية الوظيفية عند القمة تتمدد ويصبح حجمها أكبر بكثير من تلك عند القاعدة ، تبعاً لذلك تصبح هذه الحويصلات أصلب من تلك الموجودة أسفل الرئة، وأقل طواعية وأكثر صلابة أثناء الشهيق مما يجعل عملية الارتواء صعبة . لذلك يقوم غالب الهواء بنفخ الحويصلات الأبعد باتجاه أسفل الرئة .

تاريخياً، يعتقد أن علاقة معدل الارتواء بارتفاع الرئة العمودي هو أساساً بسبب تأثيرات الجاذبية. ربما يكون هذا صحيحاً في حالة الخيول المخدرة ، حيث أوضح Hlastala وزملاؤه (١٩٩٦م) بأن الجاذبية لا تلعب دوراً رئيساً في حساب سريان الدم عند ارتفاعات رأسية في رئة الخيول غير المخدرة والواعية . وعلى أية حال، يبدو أن الحصان لا يمكنه السيطرة حيث تذهب التهوية ضمن الرئة بسبب تأثرها بالعوامل الطبيعية ، فهو قادر على ذلك عندما لا تتم التهوية بتمدد وتقلص الأوعية الدموية المختلفة . وهذا له نتائج فسلجية هامة لإنجاز التبادل الغازي المثالي .

يجب أن تكون التهوية والإرواء للرئتين الكفؤتين (يقاس عند المنخرين $\dot{V}$ min/in 1) ، ($\dot{Q}$ in L/min) بمعنى آخر الضخ أو الناتج القلبي) عند أي منطقة في الرئة متقاربة للغاية . لا يوجد أي مؤشر على ضخ كمية كبيرة من الدم إلى منطقة قليلة التهوية. تجعل مثلاً أن نصف الدم المندفع من خلال الوريد الرئوي ، كالدم الوريدي المندفع من أيمن القلب خلال الشريان الرئوي ، يندفع إلى جزء الرئة قليل التهوية، فإذا ما اختلط هذا مع الدم الوارد من أجزاء جيدة التهوية، بدلا من أخذه أوكسجين متهيج وضغط الأكسجين بحوالي ضغط ١٠٠ ملم زئبق فإن النتيجة سوف تكون توتر شرياني أوطأ هذا سببه أن أي دم وريدي لا يأتي ويلامس بفاعلية سطوح تبادل غازي

جيدة التهوية فإنه سوف يبقى كما هو دم وريدي . فإذا ما كان الضغط الجزئي للأكسجين يساوي(٤٠ ملم زئبق) ويبقى حوالي نصف الدم دم وريدي ويزداد الضغط الجزئي في النصف الآخر إلى ١٠٠ ملم زئبق ، ويختلط كل الدم مع بعضه ويضخ خلال الأوردة الرئوية من وإلى الأذين الأيسر ، فسيكون متوسط تلك الضغوط الجزئية عبارة عن ١٣,٣ + ٩,٣ Kpa والمعادل لـ ٤٠ ملم زئبق + ١٠٠ ملم زئبق مقسوما على ٢ = ٧٠ ملم زئبق . وهذا ما يحدث بالحقيقة في حالات كثيرة من الأمراض التنفسية .

نظراً لكون الرئة ليس عندها المقدرة الميكانيكية التي تستطيع بها السيطرة على اتجاه انسياب الهواء ، فإنها تحاول جاهدة مجاراة ذلك بين المناطق ذات التهوية العالية والمنخفضة مع الإرواء العالي والمنخفض ، من خلال التحكم في الدم الوارد إلى هذه المناطق . تكون إرواء التهوية المثالي أو نسبة $\dot{V}/\dot{Q}$ لجميع الرئة وحدة واحدة (1) وعلى مستوى سطح الكرة الأرضية وإذا ما كانت التهوية الدقيقية مساوية للضخ القلبي . تتفاوت في الواقع نسبة $\dot{V}/\dot{Q}$ خلال كامل الرئة ما بين ٠,٨ و ١,٢ في الخيول الصحيحة عند الراحة ، وهذا قريب من متوسط يساوي = ١ . يمكننا أيضا حساب النسبة $\dot{V}/\dot{Q}$ على أساس كامل الرئة أو على أساس متساوي لمناطق منها . فعلى سبيل المثال فإن منطقة صغيرة من الرئة قد تكون ذات نسبة $\dot{V}/\dot{Q}$ منخفضة ولكن بقية مناطقها ذات نسبة $\dot{V}/\dot{Q}$ قريبة من الوحدة الواحدة .

إذا ما كانت النسبة $\dot{V}/\dot{Q}$ صفر فهذا يعني أنه لا توجد تهوية وبالرغم من ذلك حدوث بعض الإرواء ، بينما إذا كانت النسبة $\dot{V}/\dot{Q}$ مرتفعة لدرجة لا يمكن تجديدها فهذا يعني انعدام عمليات الإرواء بالرغم من حدوث بعض مستويات التهوية . أما إذا كانت النسبة $\dot{V}/\dot{Q}$ أقل من الوحدة الواحدة فالنتيجة خفض في معدل $\dot{V}$ بالرغم من

أن معدل $\dot{Q}$ طبيعي أو زيادة في معدل $\dot{Q}$ بالرغم من أن معدل $\dot{V}$ طبيعي . وشبيه لذلك عندما تصبح النسبة فوق الوحدة عن زيادة معدل $\dot{V}$ أو بنقص في $\dot{Q}$.

نظراً لوجود تدرجات متناغمة لزيادة التهوية والارتواء مع المناطق العمودية للرئة من قمتها إلى أسفلها فإن، نسبة $\dot{V}/\dot{Q}$ تكون متجانسة تقريباً بين أسفل الرئة وقمتها خلال التنفس الهادىء والعادي . لذا فعند قمة الرئة ، فإن هذه النسبة ستكون منخفضة بينما عند أسفل الرئة فإنها ستكون مرتفعة. عمليات التهوية والإرتواء في رئات الحصان في الحقيقة أفضل مما هو عليه في الإنسان . وبشكل عام ينظر إلى المجاراة الضعيفة بين التهوية والإرتواء كسبب رئيس للتبادل الغازي الضعيف كنتيجة للمرض التنفسي .

كيف يتم قوية الرئات بسهولة ؟

How Easy is it to Inflate the Lungs?

يتراوح الضغط خلال التنفس في وضع الراحة عند الخيول لنقل حوالي ٦ لترات من الغاز داخل وخارج الرئات ما بين ٠,٣–٠,٥ Kpa (تعادل ٥,٣ سم ماء) . يحتاج بالون إلى ضغط ٢٦,٥ Kpa (تعادل ٢٧٠ سم ماء) حتى ينتفخ إلى حجم مشابه للرئة . يقدر هذا بحوالي مائتين مرة ما تحتاجه الرئة لتهويتها بـ ٦ لترات . تعرف السهولة أو الصعوبة التي يتم بها تهيئة الرئة بالمطاوعة ompliance . يقصد بالمطاوعة هو سهولة أو صعوبة تهوية الرئات عند نزعها من الجسم أو خلال عمليات التخدير حيث عضلات الحيوان التنفسية مخدرة (في حالة شلل) وتتم تهويتها صناعياً . تعرف ديناميكية المطاوعة بنفس الطريقة أنها سهولة وصعوبة التهوية خلال عمليات التنفس العادية وعندما يكون الحيوان واعياً ومنوماً أو مخدراً (ولكن ليس مشلولاً) . كلما كانت التهوية في الرئات أسهل كلما زاد كل من مطاوعة وحجم الرئات لأي تغير في

الضغط البللوري (P_{pl}) . ويمكن أن ترتبط المطاوعة بالتدرج في الضغط الذي عمل لكي يزداد حجم الرئة وهذا موضح في المعادلة التالية :

$$\text{المطاوعة} = \frac{\text{التغير في حجم الرئة (لتر)}}{\text{التغير في الضغط البللوري الداخلي } cmH_2O \text{ or } Kpa}$$

أو $\frac{\Delta V}{\Delta P_{pl}}$ (حيث Δ تعني " التغير في ")

لذا فوحدة قياس المطاوعة هي عادة إما L/cm H_2O or liters/kilopascal (l/kPa) . تكـــون قـــيم المطـاوعـة للخـــيول المتعافيـة عند الراحـــة ما بين 0.1- 0.2 l/kPa (1- 2liters/cmH2o) بينما قيم المطاوعة في رئات البشر عند الراحة حوالي ٠,٢ لتر/سم ماء لذا فإن رئتي الحصان أكثر مطاوعة من رئتي الإنسان أثناء النفس عند وضع الراحة الطبيعية . وكما أن مطاوعة الرئة ليست متساوية تحت كل الظروف . فعلى سبيل المثال ، فعندما يكون حجم الرئة صغيراً للغاية ، فإن المطاوعة تكون منخفضة وأنها تحتاج إلى طاقة أكثر لنفخ المناطق الرئوية المنقبضة حتى تقوم بمواصلة التهوية ووصول الهواء إليها . عند أحجام الرئة الكبير للغاية ، تصبح الرئة أكثر صلابة حيث الألياف المرنة لجدران الرئة تصل إلى أقصى طولها ، تقل أيضاً المطاوعة عند الأحجام الرئوية الكبيرة . غالباً تكون الرئتان في حصان ذي RAO (Recurrent airway obstruction الانسداد الهوائي المتردد) معتدل إلى حاد غالباً أقل مطاوعة من الخيول الســـليمة وربما تقـــل المطاوعة إلى درجـــة ٠,٠٠١١ KPa (٠,١١ / سم ماء) في مثل هـــذه الحالات لذا تتطلب رئتي الحصـان RAO إنسداد هوائي متكرر Recurrent airway obstruction عشر أضعاف من مقدار التغير في الضغط لتلك الخيول السليمة لتحريك نفس الحجم من الهواء .

تتفاوت مقدار المطاوعة طبقاً لمرونة الرئة . تكون الرئات العادية مرنة للغاية . عندما يكون حجم الرئة كبيراً عند قمة الشهيق مع ارتداد نسيج الرئة لإرجاع الرئتين إلى حجمهما الأصلي . ففي شخص يعاني من الانتفاخ Emphysema وهذا المرض غالباً ما يسببه التدخين ، تفقد الرئتان مرونتها ، وهؤلاء الناس تصعب عملية الزفير عندهم . وبالنسبة للذين يعانون من الانتفاخ ، عمليات الزفير خلال التنفس الطبيعي عندهم لم تعد عملية سلبية تماماً . قد تحتاج بالمثل الخيول ذات الـ RAO إلى أن تعمل بكفاءة أكبر للقيام بعملية الزفير ، هذا ينجم عن خاصية ربو الخيول Heave line والتي توجد في أولئك الأشد تأثراً والذي يرجع إلى الإفراط في تنمية العضلات البطنية المستعملة في الزفير . الـ Heave مصطلح شائع لـ RAO ويستعمل بكثرة في أمريكا الشمالية . أما في المملكة المتحدة فالتعبير تجشأ Broken winded هو التعبير العامي الأكثر شيوعاً .

اعتمد مصطلح الـ RAO لتفادي التشويش عند مناقشة الـ COPD للإنسان والحصان حيث تختلف الظروف الداخلية لهما كلية ، حيث يتأثر عند الإنسان بواسطة التدخين بينما للحصان هو أساسياً مرض حساسية بسبب التعرض للفطريات Moulds والشبيهة في العديد من الخصائص للربو في الإنسان .

تتعلق المطاوعة العالية للرئة أيضاً بمادة يطلق عليها فاعل السطح Surfactant والتي تساعد على بقاء الحويصلات الهوائية مفتوحة . والحويصلات الهوائية صغيرة وذات شكل كروي ومبطنة بالسوائل . تشابه السوائل المبطنة للحويصلات الهوائية تلك السوائل خارج الخلايا (السوائل المحيطة بالخلايا) وتتكون في الغالب من الماء والملح . تتجاذب جزيئات الماء مع بعضها على السطوح الداخلية للحويصلة الهوائية مما ينتج عنه شد سطحي عبر الحويصلات (انظر الشكل

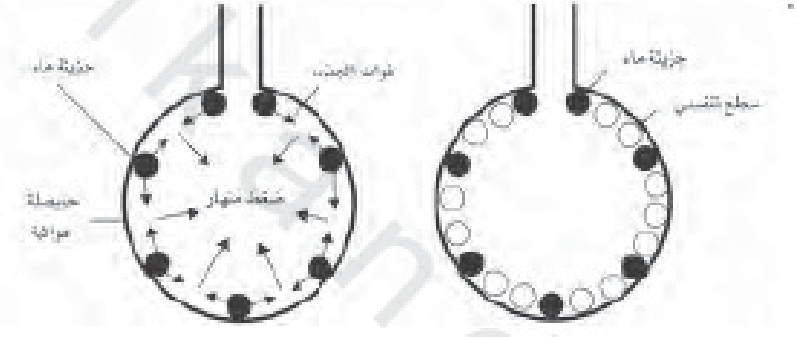
رقم ٥,٦) . القوة الناتجة من تجاذب كثير من جزيئات الماء مع بعضها تجعلها تتوجه نحو مركز الحويصلات مما يولد ضغطاً انخماصياً (ارتخائياً) Collapsing pressure والذي يعتمد على التوتر السطحي (T) ونصف قطر الحويصلة (C) وبحسب تبعاً لما يلي :

$$(P)=\frac{2T}{r}$$

الضغط الانخماصي (P) = ٢ × التوتر السطحي / نصف قطر الكرة

هذا يعرف بقانون لابلاس Law of Laplace . ويعتبر انهيار الحويصلات وانكماشها للداخل عند الحجوم المنخفضة من الأمور السيئة . الحويصلات الصغيرة والمبطنة بالماء ، تكون عرضة لضغط الخماصي كبير . الشكر لله ، فإن كل من رئتي الإنسان والحصان لهما ميكانيكية تقلل بكفاءة من تأثير التوتر السطحي الكبير الحاصل في الحويصلات الهوائية من خلال إنتاج مادة داخل الرئة تعرف بفاعل السطح . يتكون فاعل السطح من حوالي ٩٠ ٪ فسفوليبيدات وكمية صغيرة من البروتين . الفسفوليبيدات الأكثر شيوعاً هما : Dipalmitoyl Phosphatidyl Choline أو اختصار DPPC و Phosphatidylcholine (PC) واللذان يحتويان على رؤوس محبة للماء (قابلة للذوبان في الماء) وذيول غير محبة للماء (غير قابلة للذوبان في الماء) . تدخل جزيئات فاعل السطح هذة بين جزيئات الماء مما ينجم عنه خفض تأثيرات التوتر السطحي من جراء خفض التجاذب بين جزيئات الماء المتجاورة . ينتج عن ذلك انكماش الحويصلات والمجاري التنفسية الصغيرة عند الحجوم المنخفضة مما يزيد من المطاوعة ويقلل من عمل التنفس . تخزن جزيئات فاعل السطح في النوع الثاني من خلايا الرئة بـ Type II pneumocytes وتفرز إلى المسالك الهوائية . يفقد كل يوم ما بين ١٠–١٥ ٪ من جزيئات فاعل السطح

المبطنة لحويصلات الرئتين إلى المجاري التنفسية الصغيرة ومن ثم القصبة الهوائية حيث تبتلع سوية مع المخاط ومخلفات أخرى . لذا فلابد من أن يفرز فاعل السطح باستمرار على سطوح الحويصلات الرئوية . ففي الإنسان ، عملية التنهد Sighing (الشهيق العميق) التي تزيد من حجم الرئة هو من المحفزات القوية على إفراز فاعل السطح . وبالرغم من أن الحصان لا يتنهد بحد ذاته ، لكن غالباً ما تأخذ الخيول ضعف الحجم المتبدل Tidal volume عند التنفس خلال القيام بتمارين مما يساعد في زيادة إفراز هذه المادة .



الشكل رقم (٥,٦). تأثير الشد أو التوتر السطحي داخل الحويصلات الهوائية .

الحصول على الغازات عبر الغشاء الحويصلي الشعري
Getting Gases Across the Alveolar-Capillary Membrane

ينتقل الهواء من الجو إلى الحويصلات بطريقة التدفق الكتلي خلال العملية النشطة للتهوية . يجب عند دخول الهواء إلى الحويصلات أن يدخل الدم عبر الغشاء الحويصلي الشعري الذي يطلق عليه أحياناً حاجز غاز الدم Blood-gas barrier . وفي نفس الوقت يجب أن ينتشر ثاني أكسيد الكربون في الدم (المتكون من جراء الأيض) إلى وعبر الحويصلات الهوائية لكي يطرد للخارج عن طريق هواء الزفير . في الظروف العادية يطرد كل غاز النيتروجين المأخوذ من هواء

الشهيق للخارج مع هواء الزفير . خلال الجهد البدني الأكبر يكل نفس يحتاج إلى ربع ثانية لحدوث عملية التبادل الغازي . النقطة الرئيسة حول الانتشار بأنه عملية سلبية . ولا يتطلب استهلاك طاقة ، وإن كانت هذه ميزة له معيبة أن الحيوان لا يستطيع عمل أي شيء لتسريع الانتشار .

هناك عدة عوامل تؤثر على معدل انتشار الغازات عبر الغشاء الحويصلي الشعري . وصفت علاقة نسبة الانتشار في قانون فيك للانتشار Fick's law of diffusion والذي يمكن أن يعبر عنه بالمعادلة التالية :

$$\text{معدل الانتشار } (\dot{V}) = D \times \Delta P \times \frac{\text{المساحة}}{\text{السمك}}$$

لنأخذ كل من هذه العوامل تباعاً ، ونناقش تأثيرها على نسبة معدل انتشار غاز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون .

المساحة Area

معدل انتشار غاز ما يتناسب مع المساحة (المتاحة) للتبادل الغازي .

المساحة السطحية المتوفرة للتبادل الغازي في رئة الحصان ، هي حوالي ٢٥٠٠م^2 . في (الإنسان) الذي يدخن وفي الخيول ذات الـ RAO ، ربما تقل المساحة المتوفرة للانتشار وذلك بسبب الضرر الذي قد يصيب أنسجة الرئة والممرات الهوائية والذي قد يغلق بالمخاط. يمكن لأكسجين أقل في هذه الحالات أن ينتشر عبر الأغشية الحويصلية الشعرية، يعني هذا بأن الضغط الجزيئي للأكسجين (والذي يعرف أيضاً بتوتر الأكسجين) في الدم الشرياني سوف يكون أقل من الوضع الطبيعي. الضغط الجزيئي للأكسجين الطبيعي في الدم الشرياني للخيول عند الراحة هو ١٢ KPa (١٠٠ ملم زئبق) وحتى ١٤,٧ KPa (١١٠ ملم زئبق) فمثلاً حصان بمعدل معتدل

إلى حاد من الـ RAO عادة يكون لديه ضغط شرياني جزئي للأكسجين عند الراحة أقل من ١١,٣ KPa (٨٥ ملم زئبق) . تعرف هذه الحالة من توتر الأكسجين الشرياني المنخفض بنقص الأكسجين الشرياني Hypoxaemia . وعندما يحدث هذا يحاول الجسم التعويض بسبب أن هناك أكسجين أقل في المجرى الدموي بإنتاج خلايا دم حمراء أكثر ، مما يزيد من عدد هذه الخلايا في الدورة الدموية وزيادة عدد الكريات الحمراء Polycythaemia . ربما يزداد معدل التنفس ومعدل نبضات القلب بعض الشيء فوق الوضع الطبيعي للتعويض عن النقص في التنفس لـ Pa_{O_2} .

المساحة السطحية المتوفرة للانتشار في الرئة السليمة لا تحدد معدل انتشار الغازات من خلالها . فالمساحة السطحية الكلية المتوفرة للانتشار في الحصان السليم هي ٢٥٠٠م^{٢} وحجم الهواء الذي يجلب للرئة بكل نفس أثناء الراحة هو حوالي ٦ لترات . حوالي نصف هذه الكمية من الهواء سوف يعمل فعلياً لسطوح التبادل الغازي التنفسية لذا ٣ لترات من الهواء تصل إلى هذه السطوح والتي تقدر بـ٢٥٠٠ م^{٢} — ليست هناك مشكلة !

السُمك Thickness

معدل انتشار غاز ما يتناسب عكسياً مع سمك سطح التبادل الغازي . كلما كان المسطح الذي يتم من خلاله الانتشار أسمك كلما كان معدل الانتشار أقل . قد يزداد سمك الغشاء الحويصلي الشعري إذا وجد كمية وفيرة من المخاط داخل الرئة ، كما في حالة الاستسقاء Oedema الرئوي(تسرب السوائل بين الخلوية الى الحويصلات أو المجاري الهوائية أو إذا وجد سوائل دموية في المجارى التنفسية نتيجة القيام بتمارين صعبة تؤدي إلى النزف الرئوي) . سمك الغشاء الحويصلي الشعري في رئة الحصان السليم لا يزيد عن ٠,٥ ميكرومتر (أو ٠,٠٠٠٥ ملم) ولايحدد نسبة الانتشار بشكل

ملحوظ . ولتوضيح مدى رقة أو خفة حاجزغاز الدم ، فإن طول قطر كريات الدم الحمراء للحصان هو حوالي ٥ ميكرومتر ، ويعني هذا أنها عشرة أضعاف حجم الحاجز الذي يحمل الخلايا على الجانب الدموي من حاجز غاز الدم . كل من الإنسان والحصان لهما حاجز غازي دموي رقيق أو غشاء حويصلي شعري بسماكة حوالي ٠,٢– ٠,٥ ميكرومتر عند أرق مناطقه . هذا أخف تقريباً ٢٠٠مرة من شعرة الإنسان . الانتشار يعزز رقة الحاجز الغازي الدموي، قد يوضح هذا جزئياً قدرة الحصان العالية على استعمال الأكسجين أثناء الجهد البدني ولكن قد يفسر لماذا الحصان يتعرض إلى النزف الدموي بسبب التمارين الصعبة .

ثابت الانتشار Diffusion Constant

معدل انتشار غاز ما يتناسب مع ثابت الانتشار (D) . كل غاز بمفرده له ثابت انتشار ، كلما كان ثابت الانتشار أعلى ، كلما كان معدل الانتشار أكبر . أما D فهي القيمة التي تصف كل من عملية ذوبان الغاز في الوسط المبطن لسطح التبادل الغازى (تذكر أن الرئة دائماً تبقى رطبة) وحجم جزيئى الغاز .

$$\text{ثابت الانتشار يتناسب مع } \frac{\text{الذوبان}}{\text{الوزن الجزيئي .}}$$

الوزن الجزيئي للأكسجين هو ٣٢ ووزن ثاني أكسيد الكربون هو ٤٤

على أساس أوزانهم الجزيئية فإنه يجب أن يكون انتشار ثاني أكسيد الكربون أبطأ من O_2 ؛ لأن جزيئه أكبر . مع ذلك فإن قابلية ذوبان ثاني أكسيد الكربون تقريباً يفوق تلك للأكسجين بـ ٢٢مرة وثابت انتشاره أكبر بكثير منه في الأكسجين . معامل ذوبان الأكسجين في الدم عند درجة ٣٧°م هو 0.023 ml O2 (STPD)/100ml blood/ KPa(0.0031 ml O2 (STPD)/100ml blood / mmHg).

بينما معدل ذوبان ثاني أكسيد الكربون في الدم عند درجة ٣٧°م فهو

0.519 ml CO_2 (STPD)/100 ml blood/kPa(0.0692 ml CO_2(STPD) / 100 ml blood / mm Hg) (0.519 / 0.023 or 0.0692/ 0.0031 = 22.3) .

تعني (STPD) درجة حرارة قياسية (0°C) وضغط ١٠١,٣Kpa المعادل ٧٦٠ ملم زئبق، وجفاف (رطوبة نسبية صفر ٪ وضغط بخار مشبع يساوي صفراً ، وهذه علاقة مقبولة لإظهار حجوم الغازات . تذكر بأن حجم غاز ما يعتمد على الضغط ودرجة الحرارة والرطوبة (SVP) أما المعدل STPD فهو الآخر يستعمل للتعبير عن الأكسجين المأخوذ وثاني أكسيد الكربون المنتج (ارجع إلى الفصل الثامن عشر) .

بالرجوع إلى قانون فيك وإذا ما كانت جميع العوامل الأخرى متساوية ، يجب أن ينتشر ثاني أكسيد الكربون عبر الأغشية أسرع من الأكسجين وسوف نرى هل هذه هي الحالة القائمة أم ماذا بعد لحظات .

تدرج الضغط Pressure Gradient

كلما كان تدرج الضغط بين الغاز داخل الحويصلات والدم الشرياني الرئوي أكبر كلما كان معدل الانتشار أكبر . في هذه الحالة ، يتحول الغاز إلى سائل ما ، لذا نحتاج لاستعمال قياس ما يسمح لنا للتعبير عن تركيزه بغض النظر إذا ما كان خليط غازي أو سائل لهذا نحن نتحدث عن الغاز بمصطلح ضغطه الجزئي .

إن الضغط الجزئي لغاز ما في خليط غاز أو في محلول هو النسبة لضغط الغاز الكلي الذي يقابل النسبة المئوية لحجم ذلك الغاز المعين . قد يبدو هذا معقداً لكن في الحقيقة أنه بسيط للغاية عند التطبيق .

يوضح المثال التالي كيف تتم عملية حساب الضغط الجزئي :

الضغط الجوي نسبة الأكسجين Atmospheric pressure=101.3 KPa (760mmHg) بالحجم = ٢١٪ تقريباً .

الضغط الجزئي للأكسجين= 101.3 X(21/100)=21.3KPa or (760X(21/100)=160mmHg)

يتم تطبيق ذلك في حالة الهواء الجاف . فإذا ما احتوى الهواء رطوبة فلابد من حساب ذلك قبل القيام بحساب الضغط الجزئي للأكسجين . مثال ذلك الضغط المتولد عن الرطوبة في الهواء من الهواء المشبع ببخار الماء عند درجة ٣٧° م هو (٦,٣ KPa

ملم زئبق) ويعرف هذا ضغط بخار الماء المشبع . ولحساب الضغط الجزئي للأكسجين في هواء مستنشق مشبع ببخار الماء (RH 100 %) وعند درجة حرارة الجسم ٣٧°م وعند ضغط جوي

101.3KPa(760 mmHg)
101.3 KPa-6.3 KPa=95 KPaX(21/100)=20.0KPa
(760mmHg-47mmHg=713mmHgx(21/100)=150mmHg)

في الجدول رقم (٥,٢) هناك فرق واضح بين الضغط الجزئي للأكسجين في الهواء الجوي وفي الهواء الحويصلي . يبدو ذلك في البداية مدهشاً . ومع ذلك فالهواء الحويصلي في أي وقت هو في الحقيقة خليط من الغاز المستنشق وغاز الحيز الميت ولذا يمكن أن نتوقع أن يكون الضغط الجزئي للأكسجين أقل من الهواء الجوى ، وبسبب أن الهواء الداخل لحد ما يخفف بواسطة غاز الحيز الميت . من الجدول رقم (٥,٢) نستطيع حساب منحنى تدرج الضغط لانتشار الغاز :

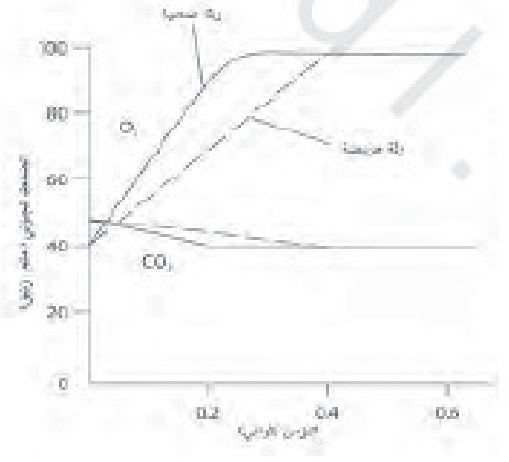
For O_2: 13.3 Kpa-5.3 KPa = 8.0 KPa
(100mmHg-40 mmHg=60 mmHg)
For CO_2:6.1 KPa-5.3 KPa=0.8 KPa
(46mmHg-40mmHg=6mmHg)

الجدول رقم (٥,٢). الضغط الجزئي للأكسجين وثاني أكسيد الكربون من الهواء الجوى وعلى جانبي الغشاء الحويصلي الشعري .

	الجو Atmosphere		الحويصلات الهوائية Alveoli		الشريان الرئوي Pulmonary artery	
	كيلوباسكال	ملم زئبق	كيلوباسكال	ملم زئبق	كيلوباسكال	ملم زئبق
أكسجين O_2	٢١,٣	١٦٠	١٣,٣	١٠٠	٥,٣	٤٠
ثاني أكسيد الكربون CO_2	٠,٠٤	٠,٣	٥,٣	٤٠	٦,١	٤٦

تم التنبؤ فيما سبق بأن غاز ثاني أكسيد الكربون سوف ينتشر أسرع من الأكسجين إذا ما كانت جميع العوامل متساوية ولكن الحقيقة هي ليست كذلك فالضغط الدافع Driving pressure لانتشار غاز ثاني أكسيد الكربون عبر الغشاء الحويصلي الشعري أكبر منه لهذا الغاز . في الواقع ينتشر كلا الغازين بنسب متشابهة . لا تأخذ عملية انتشار هذه الغازات أكثر من نصف ثانية تصل الغازات بعدها إلى الاتزان عبر حاجز غاز الدم .

تدوم الدورة التنفسية أثناء التنفس الهادئ الطبيعي في الخيول حوالي ٦ ثواني ويظهر هنا أن هناك وقت أكثر من اللازم لحدوث انتشار الغازات . وعلى أية حال إذا كان لسبب أو لآخر معدل الانتشار متوافق بسبب المرض أو طلب من الحصان القيام بتمارين ، قد لا يصل معدل انتشار الغازات إلى حالة اتزان في زمن قصير والتي تكون الغازات على اتصال لسطوح التبادل الغازى (الشكل رقم ٥,٧) .



الشكل رقم (٥,٧). انتشار الغازات عبر سطوح التبادل الغازي مع الزمن .

يبدو أن الرئة قد بنيت على هامش أمان كاف . ففي الرئة الطبيعية يتوفر وقت كاف لحدوث الانتشار أحياناً . يمكن فقط تشخيص الاضطرابات التنفسية ، عندما يمارس الحصان التمارين بأعلى ما يمكن في طاحونة الدوس Treadmill ، وفي حالة كون النظام مناوئ بما فيه الكفاية لأي تقييد تظهر فيه عملية التبادل الغازي .

ينطبق نفس الشيء على رئة الإنسان والتي هي عرضة هي الأخرى (ولسوء الحظ) للإنهاك Abuse . فالمدخنون لا يدركون أن وظيفة رئتهم تتدنى عند محاولتهم تأدية أي تمرين مجهد أو ربما عندما يتعرضون أيضاً للمرض ، عندئذ يكون الوقت متأخراً جداً للقيام بالعلاج .

نقاط مفتاحية **KEY POINTS**

- التنفس هو العملية التي بواسطتها يعاد تجديد ثلاثي فوسفات الأدينوسين (ATP) من جزيئات ثنائي فوسفات الأدينوسين (ADP) باستخدام الأكسجين.
- الكائنات وحيدة الخلية (ذات الخلية المفردة) كائنات حية تتنفس ولا تمتلك جهازاً تنفسياً .
- التنفس هو تلك العملية الإيجابية التي تنقل الغازات من الهواء الجوى إلى سطح التبادل الغازي .
- الهواء المستنشق هو ذلك الهواء الذي تتم تدفئته لمستوى درجة حرارة الجسم في المجاري التنفسية العليا .
- السعال مؤشر جيد لمرض تنفسي ما في الحصان ولكن غياب السعال ليس مؤشراً على الصحة .
- المساحة السطحية الكلية المتوفرة لعملية التبادل الغازي في رئات الخيول مساوية لحوالي عشرة أمثال مساحة ملعبي تنس .

تابع نقاط مفتاحية

- الحجم الرئوي الكلي لحصان وزن ٥٠٠ كجم هو حوالي ٤٠ لتر .
- الرئات لها دورتين دمويتين مفصولتين . الدوران الرئوي والدوران الشعيبي .
- التهوية الدقيقية هي عبارة عن الحجم الرئوي مضروباً في معدل التنفس وهو حوالي ٥٠–٦٠ لتر/الدقيقة في حصان وزنه ٥٠٠ كجم في حالة الراحة .
- عندما يصبح الحجاب الحاجز منبسطاً و/أو العضلات التنفسية ، يكون الصدر أوسع ، يصبح الضغط داخل المجارى الهوائية والحويصلات أكثر سلبية من خارج رئات الحصان مما يمكن الهواء من التحرك إلى الرئة .
- الغاز الذي يدخل ويخرج من الجهاز التنفسي دون أن يشارك في عملية التبادل الغازي يعرف بتهوية الحيز الميت ويشتمل على حيز ميت تشريحياً وفسيولوجياً .
- الحصان له مراحل نشطة (تتطلب جهد عضلي) لكل من عمليتي الشهيق والزفير بخلاف الإنسان .
- يدعى حجم الراحة للجهاز التنفسى بالقدرة المتبقية الوظيفية (قدرة السعة الوظيفية) أو حجم الرئة الزفيرى النهائى (EELV) .
- عند الراحة تتنفس الخيول حول السعة المتبقية الوظيفية بينما يتنفس الإنسان منها .
- تغطى الرئة خارجياً بالغشاء الحشوى الجنبوي ويكون قريباً من غشاء الجنبوي الجداري والذي يبطن داخل الصدر . السطحان الجنبويان لا يتصلان اتصالاً فعلياً ولكن يرتبطان معاً بواسطة حجم صغير من السائل الجنبوي . أثناء التنفس اللطيف وعند الراحة ، يتراوح الضغط في التجويف الجنبوي (الفراغ بين السطوح الجنبوية) ما بين ٠,٣–٠,٥ kpa (٣–٥ سم ماء) .
- قياس الضغط المريئ جيد ويقرب من قيمة الضغط الجنبوي .

تابع نقاط مفتاحية

- يزداد كل من مستوى التهوية والإرواء من أعلى الرئة إلى اسفلها .
- تحاول الرئة مجاراة مستوى الإرواء في منطقة ما إلى مستوى التهوية . تعرف هذه ($\dot{V}/\dot{Q}$) بالمجاراة وقد تختل هذه أو تتغير عند المرض (عدم المجاراة $\dot{V}/\dot{Q}$ mismatsh) .
- تعتبر الرئة مطاوعة للغاية فهي تحتاج لتحريك ٦ لترات من الغاز جيئة وذهاباً تغير في الضغط من 0.3-0.5 KPa (3-5 cm H_2O) في حين يحتاج بالون للقيام بنفس العمل لحوالي ٢٦,٥٠ KPa (٢٧٠سم ماء) لنفس التغير في الحجم .
- تبطن السطوح الداخلية للمجارى التنفسية والحويصلات الهوائية بفاعل السطح Surfactant والذي يحمي الرئة ويقلل من امتلاء المجاري التنفسية الصغيرة والحويصلات الهوائية من الإنهيار في حجوم الرئة المنخفضة .
- يتكون فاعل السطح من حوالي ٩٠ ٪ من الدهون الفوسفاتية .
- التهوية (حركة الهواء من والى الرئتين) هي عملية نشطة وتتطلب طاقة . تبادل الغازات عبر حاجز غاز الدم يحث بالعملية السلبية للانتشار .
- نسبة انتشار غاز ما يحكمه كل من المساحة السطحية المتوفرة للتبادل الغازي وسمك حاجز غاز الدم ، الوزن الجزيئي لجزيء الغاز والاختلاف في ضغط الغاز (يحدث الانتشار من مناطق ذات الضغط المرتفع إلى المنخفض) .
- يمتلك الحصان رئة سعتها كبيرة ويفسر هذا حجمها وهذا أمر ضروري للقيام بتمارين عالية الكثافة .