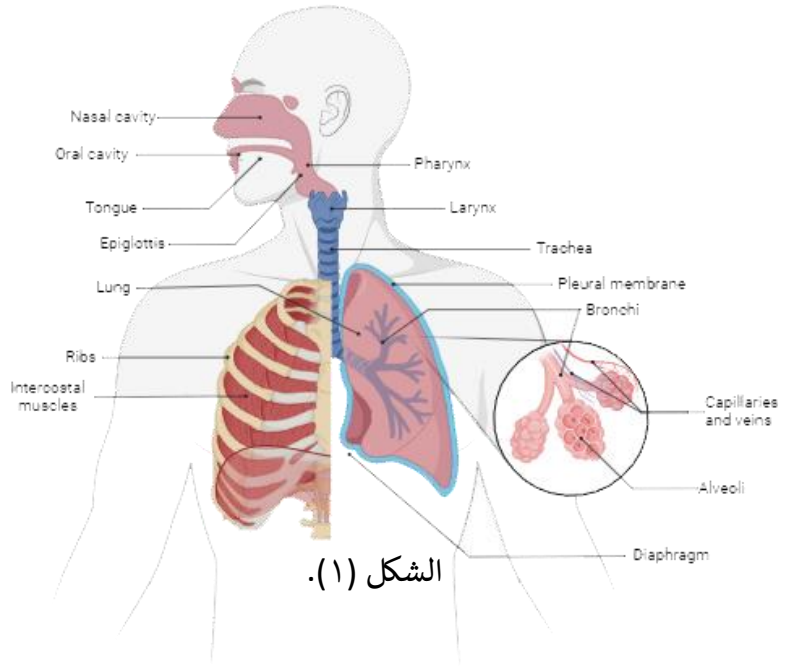
الجهاز التنفسي (التشريح والوظيفة) Respiratory System

يُعدّ الجهاز التنفسي من الأجهزة الحيوية الأساسية التي تسهم بصورة مباشرة في استمرار الحياة، إذ يتمثل دوره الرئيس في تزويد الجسم بالأوكسجين الضروري لعمليات إنتاج الطاقة داخل الخلايا، والتخلص من ثاني أوكسيد الكربون الناتج عن النشاط الأيضي جراء عملية التنفس الخارجي والداخلي، وتزداد أهمية هذا الجهاز بشكل خاص في المجال الرياضي، حيث يُعدّ أحد المحددات الرئيسة لكفاءة الأداء البدني، ولاسيما في الأنشطة التي تتطلب جهداً بدنياً مستمراً أو عالياً، من الناحية الفسلجية، يرتبط الجهاز التنفسي ارتباطاً وثيقاً بالجهاز العصبي والدوري والعضلي، إذ يعملون بشكل تكاملي لتأمين نقل الأوكسجين عبر الدم إلى العضلات العاملة، وهو ما يُسهم في دعم عمليات الأيض الخلوي الهوائي وإنتاج الطاقة (ATP)، وكلما كانت كفاءة الجهاز التنفسي أعلى، زادت قدرة الجسم على استهلاك الأوكسجين وتِحمله، وهو ما ينعكس إيجابياً على مستوى الإنجاز الرياضي، خصوصاً في فعاليات تحمل الأداء مثل الجري لمسافات طويلة، السباحة، وكرة القدم.

- **تعريف الجهاز التنفسي:** هو مجموعة من الأعضاء الحية التي تعمل بشكل متكامل لإدخال الهواء إلى الجسم (الشهيق) وإخراجه (الزفير)، إضافة إلى إتمام عملية تبادل الغازات بين الهواء والدم داخل الرئتين. كما موضح بالشكل (١).



الشكل (١).

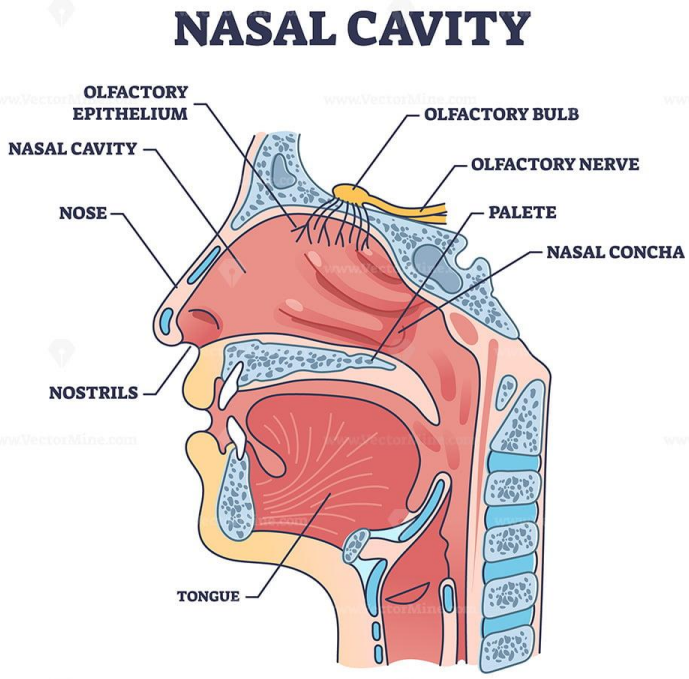
- **التركيب التشريحي والنسيجي للجهاز التنفسي:**

يتكوّن الجهاز التنفسي من مجموعة من الأعضاء المتكاملة، ويتميّز كل جزء بتركيب نسيجي خاص يتلاءم مع وظيفته الفسيولوجية.

أ. **الأنف والتجويف الأنفي (Nose & Nasal Cavity):**

يُعدّ الأنف البوابة الأولى لدخول الهواء إلى الجهاز التنفسي، ويؤدي دوراً مهماً في تهيئة الهواء قبل وصوله إلى الأجزاء العميقة من الرئتين.

- **التركيب النسيجي:** يتكون تشريحياً من نسيجين طلائي مهدب يحتوي على خلايا مخاطية وضام يحتوي على الاوعية الدموية، كما موضح بالشكل (٢).



الشكل (٢).

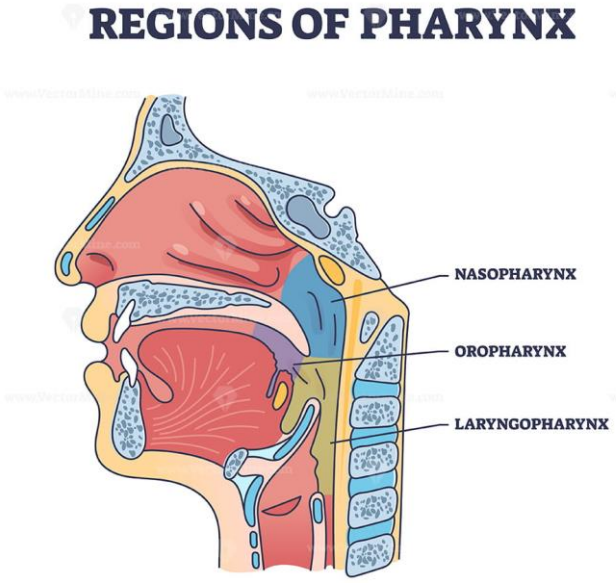
- **الوظيفة الفسلجية:**

١. تنقية الهواء (احتجاز الغبار بالمخاط)
٢. ترطيب الهواء الداخل للجهاز التنفسي.
٣. تدفئة الهواء الداخل للجهاز التنفسي.
٤. حماية الجهاز التنفسي السفلي.

ب. البلعوم (Pharynx):

يُعد البلعوم ممرّاً مشتركاً للهواء والغذاء، ويعمل كحلقة وصل بين الأنف والحنجرة ضمن المسار التنفسي.

- **التركيب النسيجي:** يتكون تشريحياً من نسيج طلائي متعدد الطبقات يوفر حماية كافية للبلعوم اثناء القيام بوظيفته كما موضح في الشكل (٣)



الشكل (٣)

- **الوظيفة الفسلجية:**

١. تمرير الهواء.

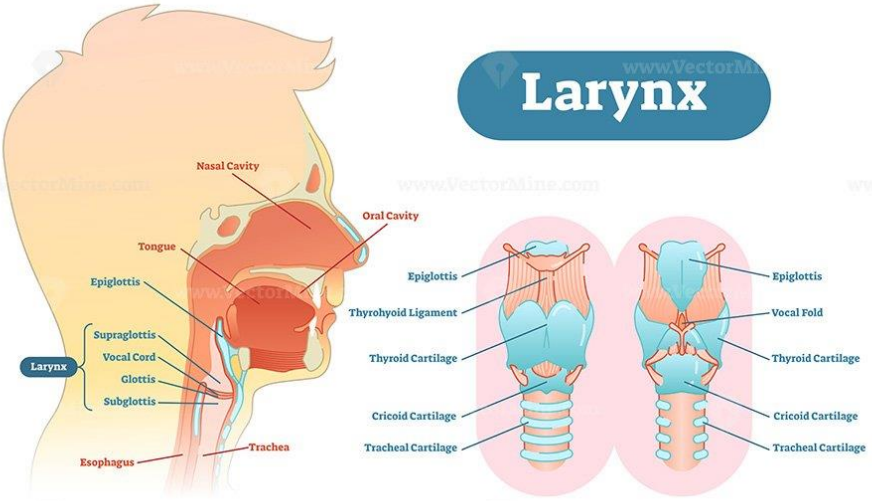
٢. حماية الأنسجة من الاحتكاك نتيجة حركة البلع او مرور الطعام الصلب كذلك اهتزاز الهواء اثناء التنفس.

ت. الحنجرة (Larynx):

تُعدّ الحنجرة عضواً مهماً يقع بين البلعوم والقصبة الهوائية، وتتميّز بدورها في إنتاج الصوت وحماية المجرى التنفسي.

- **التركيب النسيجي:** تتكون تشريحياً من نسيج طلائي مهدب يغطي جميع أجزاء الحنجرة عدا الحبال الصوتية التي تتكون من نسيج طلائي حرشفي لحماية تلك الحبال جراء الاهتزازات المتكررة لإنتاج

الصوت ويوفر لها هذا النسيج مقاومة الاحتكاك والاهتزاز، فضلاً عن ان الحنجرة تحتوي مجموعة من الغضاريف والعضلات تعمل غضاريف الحنجرة على دعم المجرى التنفسي وحمايته، بينما تقوم العضلات بالتحكم في حركة الأحبال الصوتية وتنظيم التنفس وإنتاج الصوت، انظر للشكل (٤).



الشكل (٤)

- **الوظيفة الفسلجية:**

١. إنتاج الصوت.

٢. منع دخول الطعام.

٣. تنظيم مرور الهواء.

ث. الشعب الهوائية(Bronchi) :

تُعدّ الشعب الهوائية امتداداً مباشراً للقصبة الهوائية داخل الرئتين، حيث تتفرع إلى شعب رئيسية ثم ثانوية وثالثية، مشكلةً ما يُعرف بالشجرة القصبية (Bronchial Tree) وتمثّل هذه البنية مرحلة انتقالية مهمة في الجهاز التنفسي، إذ تجمع بين وظيفة التوصيل (Conducting) وبداية التنظيم الديناميكي لتدفق الهواء نحو المناطق العميقة من الرئة، ومن الناحية الفسلجية، لا يقتصر دور الشعب الهوائية على نقل الهواء فقط، بل تشارك بشكل فعّال في تنظيم توزيعه داخل الرئتين، وتنقيته، والحفاظ على كفاءة وصوله إلى الحويصلات الهوائية. وهذا ما يفسّر تنوّع تركيبها النسيجي، حيث يحتوي جدارها على عدة أنواع من الأنسجة، لكل منها وظيفة محددة تسهم في تحقيق هذه المهام.

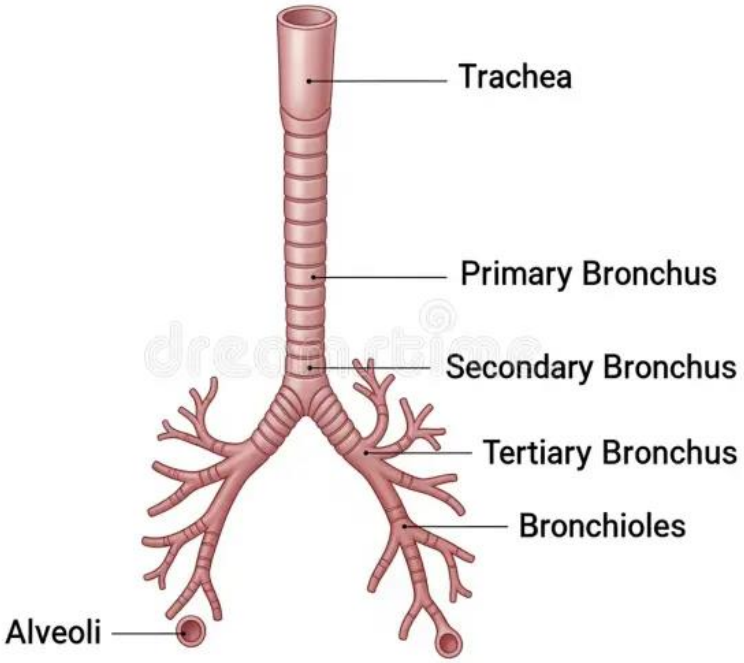
- **التركيب النسيجي:** تتميّز الشعب الهوائية بتركيب نسيجي متنوع يشمل نسيج طلائي مهدب والغضاريف والعضلات الملساء، حيث تعمل هذه المكونات معاً على تنقية الهواء، والحفاظ على انفتاح المجرى الهوائي، وتنظيم تدفق الهواء داخل الرئتين.
- **الوظيفة الفسلجية:**

١. نقل الهواء من القصبة الهوائية إلى داخل الرئتين.
٢. توزيع الهواء على أجزاء الرئة المختلفة (التفرعات القصبية).
٣. تنقية الهواء من الغبار والجراثيم بواسطة الأهداب والمخاط.
٤. ترطيب وتدفئة الهواء قبل وصوله إلى الحويصلات.
٥. تنظيم تدفق الهواء عبر التوسع والتضيق (بفعل العضلات الملساء).
٦. الحفاظ على بقاء المجرى الهوائي مفتوحاً (بواسطة الغضاريف).
٧. حماية الأجزاء العميقة من الرئة من الملوثات.

ج. القصيبات الهوائية (Bronchioles):

تُعدّ القصيبات الهوائية أصغر تفرعات الشعب داخل الرئتين، وتمثل المرحلة الأخيرة من المنطقة الناقلة قبل الوصول إلى الحويصلات الهوائية، لذلك فهي تلعب دوراً أساسياً في تنظيم تدفق الهواء وتوزيعه بدقة داخل الرئة.

- **التركيب النسيجي:** تتميّز القصيبات الهوائية بتركيب نسيجي يختلف عن الشعب الهوائية، حيث تقل فيها عناصر الدعم وتزداد العناصر التنظيمية، إذ تُبطن القصيبات بنسيج طلائي بسيط مما يسهّل مرور الهواء، كما تخلو القصيبات من الغضاريف، وهذا ما يمنحها مرونة أكبر، لكنها تعتمد بشكل رئيس على وجود طبقة واضحة من العضلات الملساء التي تحيط بجدارها وتُعد هذه العضلات المكوّن الأهم في القصيبات، حيث تكون أكثر بروزاً مقارنة بالشعب الهوائية وتحتوي القصيبات أيضاً على نسيج ضام يدعم بنيتها ويوفر لها المرونة، انظر الشكل (٥).



الشكل (٥)

١. الوظيفة الفسلجية:

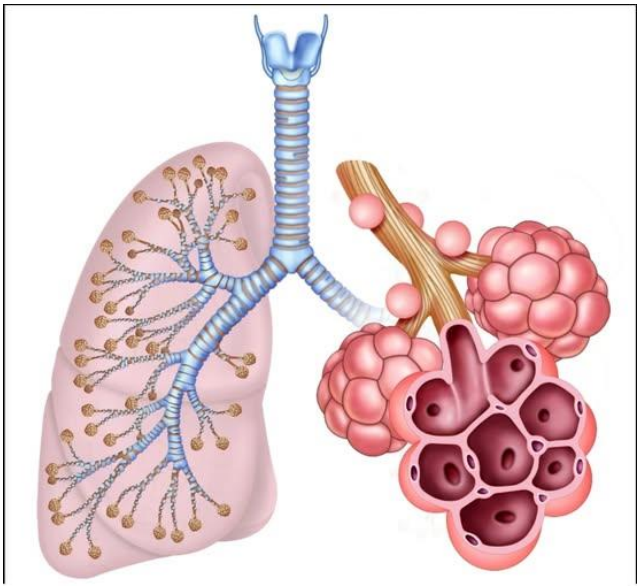
١. تنظيم تدفق الهواء إلى الحويصلات الهوائية
٢. التحكم في قطر المجرى الهوائي (توسع / تضيق) بواسطة العضلات الملساء
٣. توزيع الهواء بشكل دقيق داخل أجزاء الرئة
٤. تنظيم مقاومة المجرى التنفسي (Airway Resistance)
٥. الاستجابة للتغيرات الفسلجية مثل الجهد البدني (زيادة التهوية)
٦. المشاركة في تنظيم عملية التهوية الرئوية
٧. تلعب دوراً مهماً في الحالات المرضية مثل الربو (تضيق القصيبات)

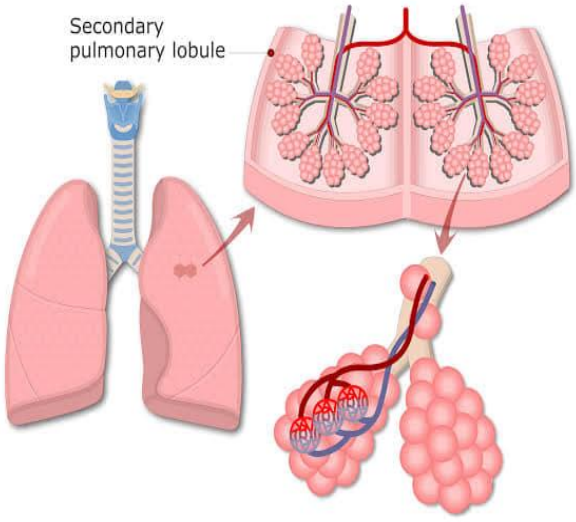
ح. الحويصلات الهوائية(Alveoli) :

تُعدّ الحويصلات الهوائية الوحدة الوظيفية الأساسية للجهاز التنفسي وهي **تسمى غالباً بالأسناخ،** حيث تمثل الموقع الحقيقي لعملية تبادل الغازات بين الهواء والدم. وتوجد هذه الحويصلات في نهاية القصيبات التنفسية على شكل أكياس صغيرة جداً ذات جدران رقيقة، وتُحاط بشبكة كثيفة من الشعيرات الدموية، مما يجعلها مهيأة بشكل مثالي لإتمام عملية الانتشار الغازي بكفاءة عالية.

- **التركيب النسيجي:**

* تتميّز الحويصلات الهوائية بتركيب نسيجي بسيط ودقيق يتلاءم مع وظيفتها الحيوية إذ تُبطن بنسيج طلائي بسيط ظهارة حرشفية بسيطة يتكون من خلايا تُعرف بـ الخلايا السنخية من النوع الأول (Type I pneumocytes)، وهي خلايا رقيقة جداً تسهم في تقليل المسافة اللازمة لانتشار الغازات.
* كما تحتوي الحويصلات على خلايا من النوع الثاني (Type II pneumocytes)، وهي خلايا مكعبة تقوم بإفراز مادة تُعرف بـ السيرفاكتانت (Surfactant)، والتي تعمل على تقليل التوتر السطحي داخل الحويصلات، مما يمنع انكماشها ويساعد على بقائها مفتوحة.
* يحيط بالحويصلات شبكة كثيفة من الشعيرات الدموية حيث يشكّل الجدار المشترك بين الحويصلة والشعيرة ما يُعرف بـ الغشاء التنفسي (Respiratory membrane)، وهو تركيب رقيق جداً يسمح بمرور الغازات بسهولة.
* كما يوجد ضمن الحويصلات خلايا بلعمية (Alveolar macrophages) تعمل على ابتلاع الجسيمات الغريبة والميكروبات، مما يسهم في حماية الرئة، انظر للشكل (٦)

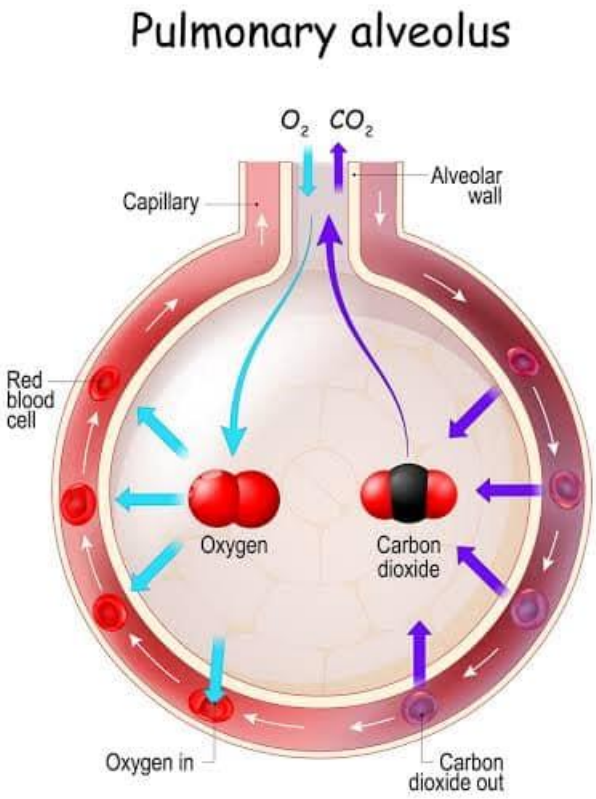




الشكل (٦)

- **الوظيفة الفسلجية:**

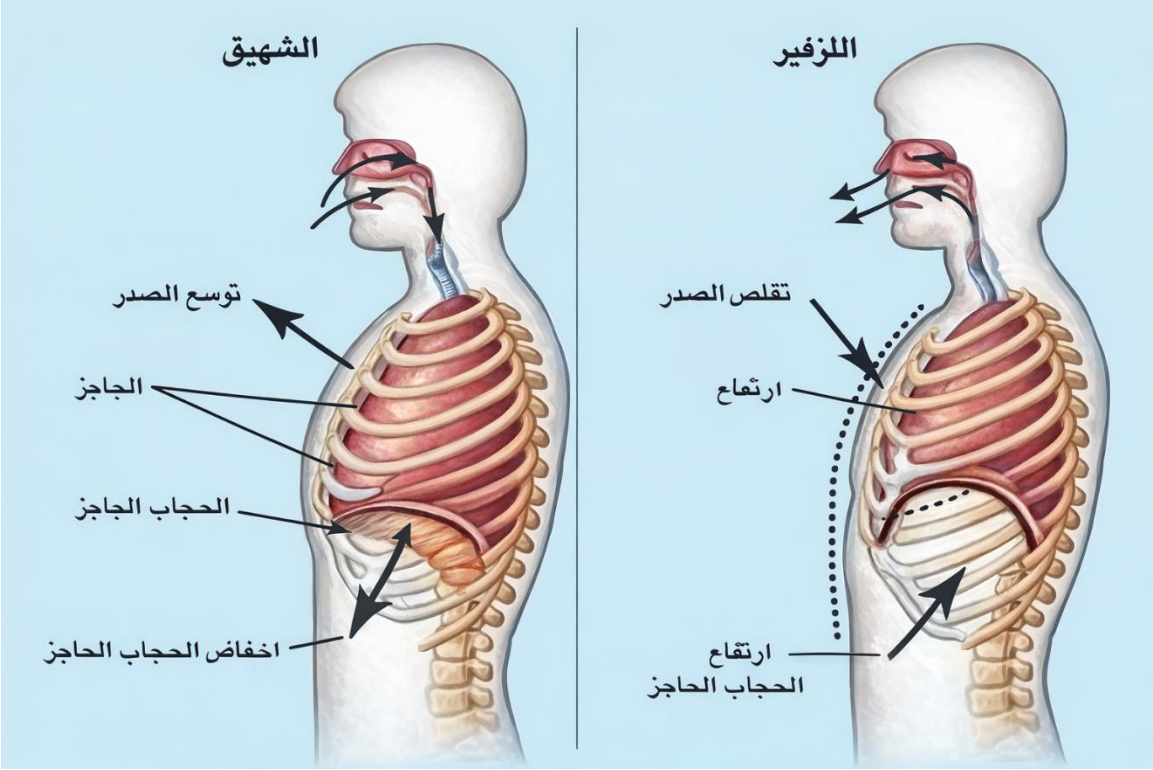
١. تبادل الغازات (O_2 و CO_2) بين الهواء والدم عن طريق الانتشار كما موضح بالشكل (٧).
٢. نقل الأوكسجين إلى الدم داخل الشعيرات الدموية.
٣. التخلص من ثاني أوكسيد الكربون من الدم إلى الحويصلات.
٤. توفير مساحة سطحية كبيرة لزيادة كفاءة التبادل الغازي.
٥. تقليل مسافة الانتشار بسبب رقة الجدار السنخي.
٦. منع انكماش الحويصلات بواسطة مادة السيرفاكتانت.
٧. المحافظة على استقرار الحويصلات أثناء الشهيق والزفير.
٨. الدفاع المناعي عبر الخلايا البلعمية (Macrophages).
٩. المساهمة في تحديد كفاءة استهلاك الأوكسجين (VO_2max).



الشكل (٧)

- **العضلات الرئيسة في التنفس:**

١. **الحجاب الحاجز(Diaphragm) :** هو العضلة الرئيسة المسؤولة عن عملية الشهيق، وهو عضلة هيكلية تفصل بين التجويف الصدري والتجويف البطني عند انقباضه ينخفض إلى الأسفل، مما يؤدي إلى زيادة حجم التجويف الصدري وانخفاض الضغط داخل الرئتين، فيندفع الهواء إلى الداخل. أما عند ارتخائه فيعود إلى وضعه القوسي الطبيعي، مما يساهم في تقليل حجم الصدر وخروج الهواء وتكمن أهميته في كونه يساهم بالنصيب الأكبر من عملية التنفس، خاصة في حالة الراحة، انظر الشكل (٩).



الشكل (٩)

- **العضلات بين الضلعية الخارجية (External Intercostal Muscles):** تقع العضلات هذه العضلات بين الأضلاع من جهة الخارج، وتلعب دوراً مهماً في عملية الشهيق إذ تعمل عند انقباضها على رفع الأضلاع إلى الأعلى والخارج، مما يزيد من اتساع القفص الصدري في الاتجاهين الأمامي والجانبي مما يسهم هذا الاتساع في زيادة حجم التجويف الصدري، وبالتالي تسهيل دخول الهواء إلى الرئتين. وتعمل هذه العضلات بالتنسيق مع الحجاب الحاجز لتحقيق شهيق فعّال.

- **العضلات بين الضلعية الداخلية (Internal Intercostal Muscles)** تقع العضلات هذه العضلات بين الأضلاع من جهة الداخل، لكنها تؤدي دوراً معاكساً للعضلات الخارجية، حيث تشارك بشكل أساسي في عملية الزفير القسري فعند انقباضها تقوم بخفض الأضلاع إلى الأسفل والداخل، مما يؤدي إلى تقليل حجم التجويف الصدري وزيادة الضغط داخل الرئتين، وبالتالي دفع الهواء إلى الخارج وتبرز أهمية هذه العضلات بشكل خاص أثناء الجهد البدني أو التنفس القوي.
- **العضلات البطنية (Abdominal Muscles):** تسهم العضلات البطنية، مثل المستقيمة البطنية والعضلات المائلة، في عملية الزفير القسري، خاصة أثناء التمارين الرياضية أو السعال. إذ تعمل هذه العضلات عند انقباضها على الضغط على الأحشاء داخل التجويف البطني، مما يدفع الحجاب الحاجز إلى الأعلى، فيؤدي ذلك إلى تقليل حجم التجويف الصدري وزيادة قوة دفع الهواء إلى الخارج وتُعدّ هذه العضلات مهمة في الحالات التي تتطلب إخراج الهواء بسرعة وقوة.
- **العضلات المساعدة للتنفس (Accessory Muscles):** تشمل العضلات المساعدة للتنفس مجموعة من العضلات التي لا تشارك بشكل أساسي في التنفس أثناء الراحة، لكنها تنشط أثناء الجهد البدني أو في حالات زيادة الحاجة إلى الأوكسجين ومن أبرز هذه العضلات عضلات الرقبة مثل العضلة القصية الترقوية الخشائية، إضافة إلى بعض عضلات الصدر والكتف تعمل هذه العضلات على رفع القفص الصدري وزيادة سعته، مما يساهم في زيادة عمق وسرعة التنفس، وبالتالي تحسين التهوية الرئوية في الظروف التي تتطلب ذلك.

آلية التنفس (Mechanics of Breathing)

تُعدّ آلية التنفس إحدى العمليات الفسيولوجية الأساسية التي تضمن استمرارية الحياة، إذ تمثل المرحلة الأولى في سلسلة العمليات المسؤولة عن تزويد الجسم بالأوكسجين والتخلص من ثاني أوكسيد الكربون. وتعتمد هذه الآلية على تغيّرات ميكانيكية منتظمة في حجم وضغط التجويف الصدري، ناتجة عن انقباض وارتخاء مجموعة من العضلات التنفسية.

وتكمن أهمية هذه العملية في كونها الرابط المباشر بين البيئة الخارجية والجهاز التنفسي الداخلي، حيث يتم تحريك الهواء داخل الرئتين وخارجهما دون استهلاك مباشر للطاقة في عملية انتقال الغازات نفسها، بل اعتماداً على فروق الضغط.

ومن الناحية الرياضية، تزداد أهمية آلية التنفس بشكل كبير أثناء الجهد البدني، إذ ترتفع سرعة وعمق التنفس لتلبية الطلب المتزايد للأوكسجين في العضلات العاملة، مما يجعل كفاءة هذه الآلية عاملاً حاسماً في تحسين الأداء البدني والتحمل.

أ. **الشهيق (Inspiration) :** الشهيق هو عملية فسيولوجية نشطة يتم من خلالها إدخال الهواء إلى داخل الرئتين نتيجة انخفاض الضغط داخل الحويصلات الهوائية مقارنة بالضغط الجوي، ويحدث ذلك بفعل انقباض العضلات التنفسية وزيادة حجم التجويف الصدري.

* **الآلية الفسلجية للشهيق:**

١. يبدأ الشهيق بـ انقباض الحجاب الحاجز، وهو العضلة الرئيسة في التنفس، حيث يتحرك إلى الأسفل، مما يزيد من البعد العمودي للتجويف الصدري.
٢. بالتزامن، تنقبض العضلات بين الضلعية الخارجية، فتعمل على رفع الأضلاع للأعلى والخارج، مما يؤدي إلى زيادة القطرين الأمامي والخلفي والجانبي للصدر.
٣. نتيجة لهذه الحركات، يزداد حجم التجويف الصدري، وبالتالي يزداد حجم الرئتين بسبب ارتباطهما بالغشاء البلوري.
٤. مع زيادة الحجم، يحدث انخفاض في الضغط داخل الرئتين (Intrapulmonary Pressure) ليصبح أقل من الضغط الجوي.
٥. هذا الفرق في الضغط يؤدي إلى اندفاع الهواء من الخارج إلى داخل الرئتين حتى يتعادل الضغط.

- **الأهمية الفسلجية للشهيق:**

١. إدخال الأوكسجين اللازم لعمليات الأيض
٢. تهيئة الحويصلات لعملية تبادل الغازات
٣. زيادة التهوية أثناء الجهد البدني

ب. **الزفير (Expiration):** الزفير هو عملية فسيولوجية يتم خلالها إخراج الهواء من الرئتين نتيجة ارتفاع الضغط داخلها مقارنة بالضغط الجوي، ويحدث غالباً بصورة سلبية نتيجة ارتخاء العضلات التنفسية.

* **الآلية الفسلجية للزفير :**

١. يبدأ الزفير بـ ارتخاء الحجاب الحاجز وعودته إلى وضعه القوسي الطبيعي.
٢. يحدث أيضاً ارتخاء في العضلات بين الضلعية الخارجية، مما يؤدي إلى انخفاض الأضلاع نحو الأسفل والداخل.

٣. نتيجة لذلك، ينخفض حجم التجويف الصدري، وبالتالي ينخفض حجم الرئتين.
٤. يؤدي هذا الانخفاض في الحجم إلى زيادة الضغط داخل الرئتين ليصبح أعلى من الضغط الجوي.
٥. نتيجة فرق الضغط، يتم دفع الهواء إلى الخارج من الرئتين.

* **الأهمية الفسلجية للزفير:**

١. التخلص من ثاني أوكسيد الكربون .
٢. الحفاظ على التوازن الحمضي القاعدي (pH) .
٣. إعادة الرئتين إلى وضعهما الطبيعي .

- **التهوية الرئوية (Pulmonary Ventilation)**

تُعدّ التهوية الرئوية الامتداد الفسيولوجي لآلية التنفس، إذ تمثل العملية التي يتم من خلالها تجديد الهواء داخل الرئتين بشكل مستمر، مما يضمن توفير الأوكسجين للحويصلات الهوائية والتخلص من ثاني أوكسيد الكربون. ولا تقتصر التهوية على مجرد دخول وخروج الهواء، بل تعتمد على تنظيم دقيق لمعدل وعمق التنفس بما يتناسب مع احتياجات الجسم في حالات الراحة أو أثناء الجهد البدني.

ومن الناحية الرياضية، تُعدّ التهوية الرئوية مؤشراً مهماً على كفاءة الجهاز التنفسي، حيث تزداد بشكل ملحوظ أثناء التمارين لتلبية الطلب المتزايد على الأوكسجين، مما يجعلها عاملاً أساسياً في تحسين التحمل والأداء البدني.

- **تعريف التهوية الرئوية:** هي كمية الهواء التي تدخل وتخرج من الرئتين خلال فترة زمنية معينة (عادة دقيقة واحدة).
- **مكونات التهوية الرئوية:**

١. **حجم النفس (Tidal Volume - TV):** هو كمية الهواء التي يتم استنشاقها أو زفيرها في نفس واحد خلال التنفس الطبيعي.

* **القيمة التقريبية:** حوالي ٥٠٠ مل عند الشخص البالغ في حالة الراحة، يزداد اثناء ممارسة الجهد البدني الى ٢ – ٣ لتر عند الأشخاص العاديين ٣ – ٤ لتر عند الرياضيين المُدربين.
* **الدلالة الفسلجية:** يمثل عمق التنفس ويزداد أثناء ممارسة أي جهد بدني.

٢. **معدل التنفس (Respiratory Rate - RR):** عدد مرات التنفس في الدقيقة الواحدة.

* **القيمة التقريبية:** بين ١٢ – ١٦ مرة/دقيقة في حالة الراحة، واثناء ممارسة الجهد البدني تتراوح من ٣٠ – ٤٠ مرة/دقيقة (جهد متوسط)، ٤٠ – ٦٠ مرة/دقيقة (جهد عالي / رياضيين).
* **الدلالة الفسلجية:**

١. يمثل سرعة التنفس.

٢. يزداد أثناء التمارين.

- **السيطرة العصبية لعملية التنفس (Neural Control of Breathing):**

تُعدّ عملية التنفس من العمليات الحيوية التي تتم بصورة تلقائية ومنتظمة دون تدخل إرادي مباشر في معظم الأحيان، إلا أنها في الوقت نفسه قابلة للتعديل الإرادي عند الحاجة، كما في الكلام أو أثناء التمارين الرياضية ويعكس ذلك وجود نظام عصبي متكامل يعمل على تنظيم هذه العملية بدقة، بحيث يتلاءم معدل وعمق التنفس مع متطلبات الجسم الفسيولوجية.

وتتحقق السيطرة العصبية للتنفس من خلال تفاعل منسق بين مراكز التنفس في الدماغ، والأعصاب المحركة للعضلات التنفسية، إضافة إلى المستقبلات الحسية التي تنقل المعلومات حول حالة الجسم، كما موضح بالشكل (٨).

* **مراكز التنفس في الدماغ:** تقع مراكز التحكم الرئيسة في التنفس في جذع الدماغ، وتحديداً في النخاع المستطيل والجسر.

١. **النخاع المستطيل (Medulla Oblongata):** يُعد المركز الأساسي المسؤول عن توليد الإيقاع التنفسي، حيث يحتوي على مجموعات من الخلايا العصبية التي تنظم عمليتي الشهيق والزفير بصورة تلقائية.

➢ **الوظيفة الفسلجية:**

أ. توليد الإشارات العصبية المنتظمة للتنفس.

ب. التحكم في إيقاع الشهيق والزفير.

ت. تنظيم التنفس اللاإرادي.

٢. **الجسر (Pons):** يقع فوق النخاع المستطيل، ويعمل على تعديل وتنظيم الإيقاع التنفسي.

- **الوظيفة الفسلجية:**

أ. تنسيق مدة الشهيق والزفير.

ب. جعل التنفس أكثر انتظاماً وانسيابية.

ت. تعديل النمط التنفسي حسب الحاجة.

٣. الاعصاب المجهزة: تنقل الإشارات العصبية من مراكز التنفس إلى العضلات المسؤولة عن عملية التنفس.

- **الوظيفة الفسلجية:**

أ. **العصب الحجابي (Phrenic nerve):** يغذي الحجاب الحاجز مسؤول عن انقباضه أثناء الشهيق.

ب. **الأعصاب بين الضلعية (Intercostal nerves):** تغذي العضلات بين الضلعية تساعد في حركة القفص الصدري.

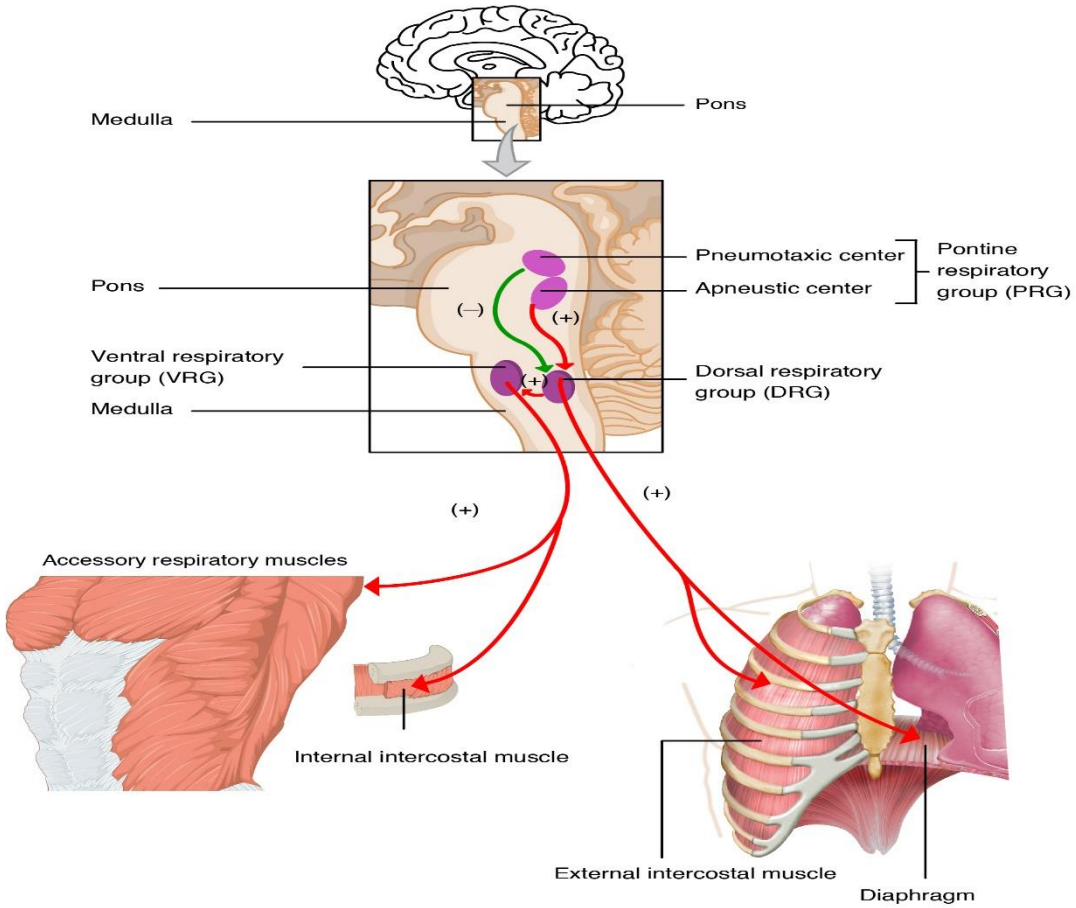
٤. **المستقبلات المنظمة:** مهامها الفسلجية استشعار التغيرات في غازات الدم للتنفس إرسال إشارات لمراكز التنفس لزيادة أو تقليل التهوية وتنقسم الى:

أ. **المستقبلات الكيميائية (Chemoreceptors) وتنقسم الى:**

A. **المستقبلات الكيميائية المركزية:** تقع في النخاع المستطيل تستجيب لزيادة CO_2 وانخفاضpH .

B. **المستقبلات الكيميائية الطرفية:** تقع في الجسم السباتي والأبهري تستجيب لانخفاض O_2 وزيادةCO_2 .

ب. **المستقبلات الميكانيكية:** تتواجد في الرئتين والعضلات ووظيفتها تنظيم عمق التنفس منع التمدد الزائد للرئتين التكيف مع حركة الجسم.



الشكل (٨)

- **تبادل الغازات (Gas Exchange):**

تُعدّ عملية تبادل الغازات المرحلة الأساسية التي تتحقق فيها الوظيفة الحقيقية للجهاز التنفسي، إذ يتم خلالها انتقال الأوكسجين من الهواء داخل الحويصلات الهوائية إلى الدم، وانتقال ثاني أوكسيد الكربون من الدم إلى الهواء داخل الرئتين. وتعتمد هذه العملية على مبدأ فيزيائي بسيط هو الانتشار (Diffusion)، والذي يحدث نتيجة فرق الضغوط الجزئية للغازات بين الوسطين.

وتكمن أهمية هذه العملية في أنها تمثّل الحلقة التي تربط بين الجهاز التنفسي والجهاز الدوري، حيث يتم تزويد الدم بالأوكسجين اللازم لإنتاج الطاقة، والتخلص من الفضلات الغازية الناتجة عن النشاط الأيضي، وهو ما يزداد وضوحاً أثناء الجهد البدني.

* **آلية تبادل الغازات(Mechanism of Gas Exchange) :**

١. **انتقال الأوكسجين:(O_2) :** يكون تركيز (الضغط الجزئي) للأوكسجين أعلى داخل الحويصلات الهوائية وأقل في الدم الوريدي القادم إلى الرئتين لذلك ينتقل الأوكسجين من الحويصلات إلى الدم عبر الانتشار.

٢. **انتقال ثاني أوكسيد الكربون (CO_2):** يكون تركيز ثاني أوكسيد الكربون (CO_2) أعلى في الدم وأقل داخل الحويصلات لذلك ينتقل من الدم إلى الحويصلات ثم يُطرح مع الزفير.

٣. **الغشاء التنفسي (Respiratory Membrane):** يُشكّل الغشاء التنفسي الحاجز الفاصل بين الهواء داخل الحويصلات الهوائية والدم الجاري في الشعيرات الدموية، ويتكوّن من جدار الحويصلة الهوائية من نسيج طلائي بسيط، يليه الغشاء القاعدي، ثم جدار الشعيرة الدموية المبطن أيضاً نسيج طلائي بسيط ويتميّز هذا الغشاء بكونه رقيقاً جداً، إذ لا تتجاوز سماكته أجزاءً من الميكرون، مما يوفّر مسافة قصيرة للغاية لانتقال الغازات، **وتكمن الأهمية الفسلجية** لهذا التركيب في تسهيل عملية الانتشار السريع للأوكسجين وثاني أوكسيد الكربون بين الهواء والدم، حيث ينتقل الأوكسجين من الحويصلات إلى الدم نتيجة فرق الضغط الجزئي، بينما ينتقل ثاني أوكسيد الكربون بالعكس.

أن رقة الغشاء واتساع مساحة سطح الحويصلات يسهمان في زيادة كفاءة التبادل الغازي، الأمر الذي يضمن تزويد الجسم بالأوكسجين والتخلص من الفضلات الغازية بصورة مستمرة، خاصة أثناء الجهد البدني حيث تزداد الحاجة إلى هذه العملية بشكل كبير.

- **التحكم أثناء الجهد البدني:**

١. يحدث تنشيط مباشر لمراكز التنفس من الدماغ.
٢. تزداد الإشارات العصبية للعضلات التنفسية .
٣. ترتفع سرعة وعمق التنفس .
٤. ثم يتم ضبط التنفس لاحقاً حسب:
   أ. مستوى CO_2 .
   ب. الحموضة (pH) .
   ت. حاجة العضلات للأوكسجين.

- **المؤشرات الفسلجية المهمة عمل الجهاز التنفسي:**

١. **الحد الأقصى لاستهلاك الأوكسجين(VO_2max) :** هو أقصى كمية من الأوكسجين يستطيع الجسم استهلاكها أثناء الجهد البدني الأقصى، يُعدّ أهم مؤشر على اللياقة القلبية التنفسية ويعكس كفاءة الجهاز التنفسي والدوري والعضلي، يزداد مع التدريب الهوائي.

* **الأهمية الرياضية:** يحدد مستوى التحمل البدني يرتبط مباشرة بالأداء في الرياضات الهوائية.

- **تشبع الأوكسجين في الدم (SpO_2 - Oxygen Saturation):** هو نسبة الهيموغلوبين المرتبط بالأوكسجين في الدم يعكس كفاءة نقل الأوكسجين في الدم ويدل على كفاءة تبادل الغازات في الرئتين القيم الطبيعية ٩٥٪ – ١٠٠٪ .

* **الأهمية الرياضية:** الحفاظ عليه ضمن الطبيعي ضروري للأداء انخفاضه يؤثر على القدرة البدنية والتحمل.

- **عتبة اللاكتات (Lactate Threshold):** هي النقطة التي يبدأ عندها تراكم اللاكتات في الدم بشكل أسرع من قدرة الجسم على التخلص منها وتشير إلى التحول نحو الأيض اللاهوائي وترتبط بزيادة الحموضة (انخفاض pH) يصاحبها زيادة في التهوية.

* **الأهمية الرياضية:** مؤشر مهم لتحمل الأداء، يساعد في تحديد شدة التدريب، كلما تأخرت كان الأداء أفضل.

- **التكامل الوظيفي لنقل وخزن الأوكسجين بين الجهاز التنفسي والدوري والعضلي:**

تعتمد كفاءة الأداء البدني بشكل كبير على قدرة الجسم على إيصال الأوكسجين من الرئتين إلى الأنسجة العضلية واستخدامه في إنتاج الطاقة، وتتحقق هذه العملية عبر تكامل وظيفي دقيق بين الجهاز التنفسي والجهاز الدوري والنسيج العضلي. إذ يقوم الجهاز التنفسي بإدخال الأوكسجين إلى الرئتين وتهيئته للانتقال إلى الدم، بينما يتولى الجهاز الدوري نقله عبر كريات الدم الحمراء التي تحتوي على **الهيموغلوبين،** وهو البروتين المسؤول عن حمل الأوكسجين والارتباط به في الرئتين ثم تحريره في الأنسجة حسب الحاجة وعند وصول الأوكسجين إلى العضلات، يظهر دور النسيج العضلي بشكل أكثر تخصصاً من خلال **بروتين المايوغلوبين،** الذي يوجد داخل الألياف العضلية ويشبه الهيموغلوبين في تركيبه، إلا أنه يمتاز بوظيفة مختلفة تتمثل في خزن الأوكسجين داخل العضلة وتسهيل نقله إلى الميتوكوندريا لاستخدامه في إنتاج الطاقة. وبهذا الشكل، يُمثّل المايوغلوبين نقطة الالتقاء الوظيفي بين

الأجهزة الثلاثة، حيث يعكس كفاءة الجهاز التنفسي في تزويد الأوكسجين، وكفاءة الجهاز الدوري في نقله، وكفاءة العضلات في استخدامه وخزنه، مما يسهم في تحسين الأداء البدني وتأخير ظهور التعب، خاصة أثناء الجهد العالي.

- **تأثير التدريب الرياضي على الجهاز التنفسي:** يُعدّ التدريب الرياضي من أهم العوامل التي تؤدي إلى تحسين كفاءة الجهاز التنفسي، حيث يفرض الجهد البدني المتكرر متطلبات متزايدة على عملية التهوية وتبادل الغازات، مما يدفع الجسم إلى إحداث تكيفات فسيولوجية تهدف إلى رفع كفاءة إدخال الأوكسجين ونقله واستخدامه وتظهر هذه التكيفات بصورة أوضح لدى الرياضيين، خاصة في الأنشطة التي تعتمد على التحمل الهوائي **وان من اهم تلك التكيفات هي الاتي**:
    ١. زيادة كفاءة التهوية الرئوية.
    ٢. تحسين عملية تبادل الغازات في الحويصلات.
    ٣. تقوية العضلات التنفسية.
    ٤. تقليل الجهد المبذول أثناء التنفس.
    ٥. تحسين استهلاك الأوكسجين.