السلام عليكم ورحمة اللّه وبركاته *-*

زملاءنا الأعزاء:

نعود إليكم بمحاضرة جديدة من قسم الدكتور بركات شاهين "الجهاز التنفسي"، الذي سنتكلم فيه عن الآليات التنفسية السوية والمرضية،

يجب التنويه إلى أنّ الدكتور اكتفى بذكر الأفكار الأساسية ولكن لأهمية هذا البحث؛ قمنا بإضافة العديد من الشروحات الإثرائية لكي تكون عوناً لكم في تحقيق الفائدة المثلى منه...

لنبدأ بالتكلم عن الآليات السوية لعمل الجهاز التنفسي...

فهرس المحتويات

العنوان	رقم الصفحة
مقدمة	2
التهوية الرئوية	4
الحجوم والسعات الرئوية	15
التبادل الغازي	22
نقل الغازات	33
تنظيم التنفس	41
Overview *-*	46

alkamal
22320303

مقدمة

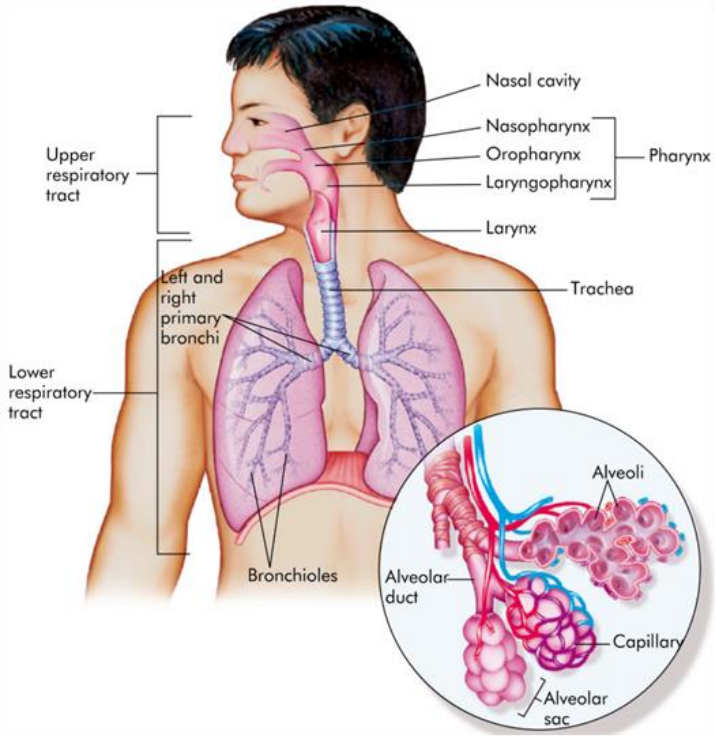
↙ يقسم جهاز التنفس تشريحياً إلى:

1. الطرق التنفسية العلوية Upper Respiratory Tract:

يضم التجويف الأنفي والأعضاء الملحقة به (مثل الجيوب المجاورة للأنف) والبلعوم.

2. الطرق التنفسية السفلية Lower Respiratory Tract:

يضم الحنجرة، الرغامى، القصبات والرئتين.



صورة توضّح الطرق التنفسية العلوية والسفلية

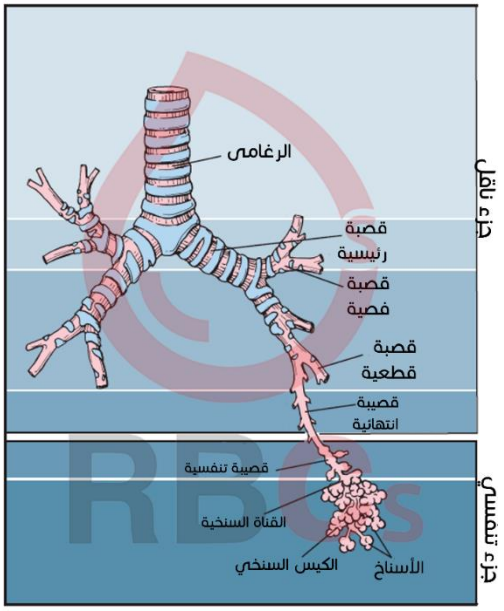
↙ كما أنّه يقسم وظيفياً إلى:

1. الجزء الناقل Conducting Portion:

- يضم التجويف الأنفي، البلعوم، الحنجرة، الرغامى، القصبات، القصيبات والقصيبات الانتهائية (أي كل الأجزاء التي تسبق القصيبات التنفسية).
- يعمل على تأمين ممر هوائي بالإضافة إلى تكييف الهواء المستنشق (تنقيته وترطيبه وتدفئته).

2. الجزء التنفسي Respiratory Portion:

- يضم القصيبات التنفسية، القنوات السنخية، الأكياس السنخية والأسناخ.
- هو المكان الذي يحصل فيه التبادل الغازي.



شكل يوضّح الجزء الناقل Conducting والجزء التنفسي Respiratory

ملاحظة:

يقسم التنفس إلى:

- التنفس الخارجي External Respiratory: تبادل الغازات بين الجو الخارجي والأسناخ.
- التنفس الداخلي Internal Respiratory: تبادل الغازات بين الخلايا والسائل المحيط بها.

إن الهدف الرئيس للتنفس هو تزويد النسج بـ O_2 وتخليصها من CO_2، ولها دور بالتوازن الحامضي القلوي ويتم تحقيق ذلك في أربع مراحل وظيفية رئيسية:

1. حركة الغازات (التهوية الرئوية) Movement of Gases:

وتعني جريان الهواء من الجو الخارجي باتجاه الأسناخ وبالعكس.

2. التبادل الغازي Gas Exchange:

وتعني انتشار O_2 وCO_2 بين الأسناخ والدم، وأيضاً بين الدّم وسوائل الجسم من جهة، والخلايا من جهة أخرى.

3. نقل الغازات Transport of Gases:

وتعني نقل O_2 وCO_2 في الدم وإيصاله إلى الأنسجة.

4. تنظيم التنفس Regulation of Respiration.

التهوية الرئوية (حركة الغازات) Pulmonary Ventilation

❖ تُدعى عملية دخول الهواء إلى الرّئتين بالشهيق، أما عملية خروجه فتُدعى بالزفير.

❖ قبل أن نتحدث عن آلية حدوث كل من الشهيق والزفير، علينا أن نسترجع بعض العوامل والقوانين المؤثرة فيهما.

العوامل والقوانين المؤثرة في عملية التنفس

➢ تؤثّر عدة عوامل على جريان الهواء إلى داخل أو خارج الرئتين وهي[1]:

- فروق الضغط.
- أقطار الطرق الهوائية ولا سيما القصيبات[2] Bronchioles.
- الجهاز العصبي الذاتي الودي ونظير الودي (وتأثيره هنا قليل الأهمية).

➢ القانون الذي يشرح عملية الشهيق والزفير لوصول الهواء إلى مناطق التبادل الغازي:

- قانون بويل BOYLE'S LAW (يهبط ضغط الغاز إذا اتسع الحيز الذي يوجد فيه والعكس صحيح؛ أيّ يوجد تناسب عكسي بين الحجم والضغط).

الشهيق Inspiration (Inhalation)

الشهيق (العفوي والقسري) هو عملية فاعلة، أي تحتاج إلى أمر دماغي ومن ثم تقلص عضلي.

العضلات الشهيقية:

- هي العضلات التي تساهم في توسيع جوف الصدر (ومن ثمّ توسيع الرئتين) من خلال زيادة:
  - ← القطر الطولاني (العلوي السفلي) لجوف الصدر (بتقلص الحجاب الحاجز).
  - ← القطر الأمامي الخلفي لجوف الصدر (برفع الأضلاع).
- تقسم العضلات الشهيقية إلى:

[1] F=P/R ذكرت السلايدات هذا القانون كأحد العوامل ولكن لم يتطرق لشرحه أو ذكر دلالات الرموز.

[2] ويُقصد هنا القصيبات التنفسية، وذلك لأن الممر من الرغامى وحتى القصيبات الانتهائية يتألف من حلقات غضروفية (فلا يحدث فيه تغيّر في القطر)، لأنه عند وجود الحلقات الغضروفية لا يحدث تغيير في الحجم والحلقات الغضروفية تنتهي في القصيبات الانتهائية.

1. عضلات شهيقية أساسية:

- **الحجاب الحاجز** Diaphragm.
- **العضلات الوربية (بين الأضلاع) الخارجية** External Intercostal.

2. عضلات شهيقية ثانوية:

- **الصدرية الصغيرة** Pectoralis Minor.
- **القترائية** Sternocleidomastoid.
- **العضلات الأخمعية** Scalenes.
- **المنشارية الأمامية**[3] Anterior Serratus.

يشارك في الشهيق العفوي العضلات الشهيقية الأساسية فقط، أما في الشهيق القسري تعمل العضلات الشهيقية الأساسية والثانوية معاً.

آلية حدوث الشهيق العفوي:

يتقلص الحجاب الحاجز مما يؤدّي إلى سحب السطوح السفلية للرئتين نحو الأسفل

ومن ثمّ زيادة القطر الطولاني (العلوي السفلي) لجوف الصدر

تتقلص العضلات الوربية الخارجية مما يؤدي إلى رفع الأضلاع وتحريكها إلى الأمام

ومن ثمّ زيادة القطر الأمامي الخلفي لجوف الصدر

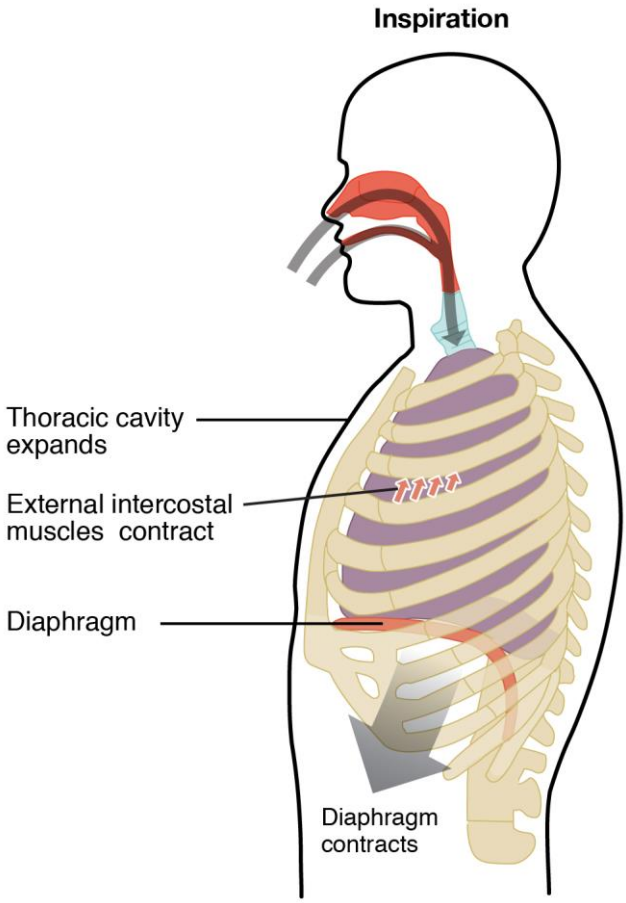
هذا كله يؤدي إلى زيادة في حجم جوف الصدر ومن ثم هبوط في الضغط داخله (حسب قانون بويل)

فيصبح الضغط داخل الأسناخ أقل من الضغط الجوي مما يسمح بدخول الهواء إلى الرئتين وفقاً لمدروج الضغط

[3] عند إسناد الظهر إلى كرسي نكون قد ثبتنا المرتكز، وبذلك يتحرّك المنشأ نحو المرتكز، فتعمل كعضلة شهيقية ثانوية؛ لذلك التنفس يكون أسهل في وضعية الجلوس.

ملاحظة:

- عندما يكون المزمار (الطيتان الصوتيتان والمسافة بينهما) مفتوحاً، وليس هناك هواء جارٍ من أو إلى الرئتين، يكون الضغط في كل أجزاء الشجرة التنفسية حتى الأسناخ مساوياً للضغط الجوي.
- ولإحداث جريان هوائي إلى داخل الأسناخ في أثناء الشهيق لابدّ من هبوط الضغط في الأسناخ إلى قيمة أقل من قيمة الضغط الجوي، ليتم الجريان الهوائي بعدها وفقاً لمدروج الضغط[4] حتى يتساوى الضغطان فيتوقف الجريان (يحدث عكس ذلك تماماً في أثناء الزفير).



صورة توضّح عملية الشهيق العفوي:

- ✦ تقلّص الحجاب الحاجز والعضلات الوربية الخارجية.
- ✦ زيادة القطر الأمامي الخلفي والعلوي السفلي لجوف الصدر.
- ✦ زيادة الحجم ترافقها نقصان بالضّغط.
- ✦ يجري الهواء بحسب مدروج الضغط لداخل الرئتين.

[4] أي من مكان الضغط المرتفع (الضغط الجوي) إلى مكان الضغط المنخفض (الضغط داخل الأسناخ).

الزفير Expiration (Exhalation)

- ♦ الزفير العفوي هو عملية منفعلة، أي لا تحتاج إلى أمر دماغي أو تقلّص عضلي.
- ♦ يصبح الزفير عملية فاعلة في حالتين:
  - ✓ الزفير القسري (كما يحدث أثناء التمارين الرياضية العنيفة).
  - ✓ عند وجود صعوبات في التنفس نتيجة تضيّق قصبي (كما في حالة الربو القصبي).

العضلات الزفيرية:

- هي العضلات التي تساهم في تضيق جوف الصدر (ومن ثم انخماص الرئتين) من خلال إنقاص كل من:
  - ← القطر الطولاني لجوف الصدر (بدفع أحشاء البطن ومعها الحجاب الحاجز نحو الأعلى).
  - ← القطر الأمامي الخلفي له (بخفض الأضلاع).
- تضم العضلات الزفيرية ما يلي:
  - a) المستقيمة البطنية Rectus Abdominis.
  - b) المائلة الخارجية External Oblique.
  - c) المائلة الداخلية Internal Oblique.
  - d) المستعرضة البطنية Transversus Abdominis.
  - e) العضلات الوربية الداخلية Internal Intercostal.

آلية حدوث الزفير العفوي:

1. تمارس الأحشاء في البطن (العضلات) قوة رد فعل نحو الأعلى (ردّاً على انخفاض الحجاب الحاجز في الشهيق على حسابها)، وتذكر بعض المراجع استرخاء العضلات الشهيقية التي تقلّصت سابقاً (الحجاب الحاجز والعضلات الوربية الخارجية)[5].
2. تقوم العضلات الوربية الداخلية بسحب الأضلاع نحو الداخل (أي إنقاص القطر الأمامي الخلفي).
3. يؤدي كل ما سبق إلى انخفاض الأضلاع وارتفاع الحجاب الحاجز وبالتالي عودتهما للوضع الطبيعي قبل الشهيق.
4. كما يساهم في ذلك قوة انخماص الرئتين أو ما يُدعى[6] Pulmonary Recoil.
5. هذا يؤدّي إلى نقص في حجم جوف الصدر؛ يرافقه ارتفاع في الضغط فيه (حسب قانون بويل).
6. يصبح الضغط داخل الأسناخ أكبر من الضغط الجوّي ← وهذا يسمح بخروج الهواء من الرئتين وفقاً لمدروج الضغط.

آلية حدوث الزفير القسري:

تتقلص العضلات البطنية (بالإضافة إلى استرخاء العضلات الشهيقية المتقلصة) مما يؤدي إلى دفع أحشاء البطن نحو الأعلى

← ومن ثم إنقاص القطر الطولاني لجوف الصدر

تتقلص العضلات الوربية الداخلية مما يؤدي إلى خفض الأضلاع وتحريكها إلى الخلف

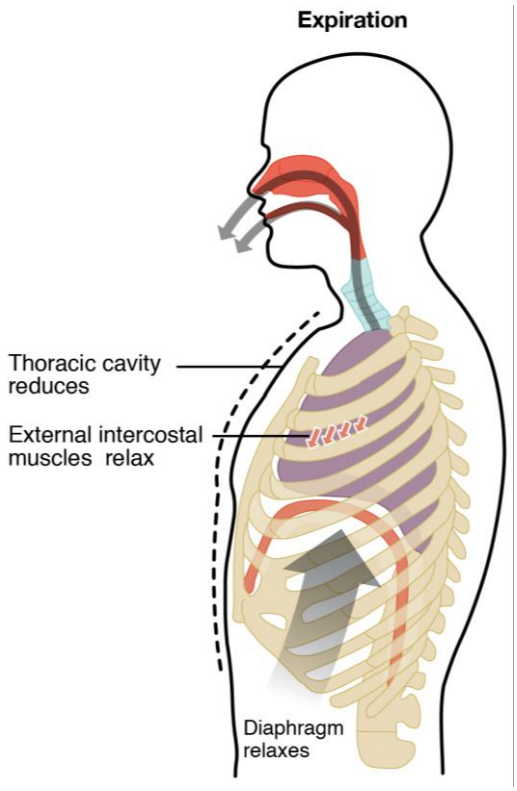
← ومن ثم إنقاص القطر الأمامي الخلفي لجوف الصدر

هذا كله (بالإضافة إلى قوة المرونة التي تساهم في انخماص الرئتين) يؤدي إلى نقص في حجم جوف الصدر؛ ومن ثم ارتفاع الضغط داخله (حسب قانون بويل).

← فيصبح الضغط داخل الأسناخ أكبر من الضغط الجوي ← مما يسمح بخروج الهواء من الرئتين وفقاً لمدروج الضغط

[5] أشار الدكتور إلى أنه من الأفضل أن نعتبر رد فعل أحشاء البطن السبب الرئيسي لرفع الحجاب الحاجز (وليس استرخاءه بعد الشهيق).

[6] وهو قدرة الرئتين على العودة لوضعها الطبيعي بعد انتهاء الشهيق أو الزفير وحسب مرجع غايتون Elastic Recoil.

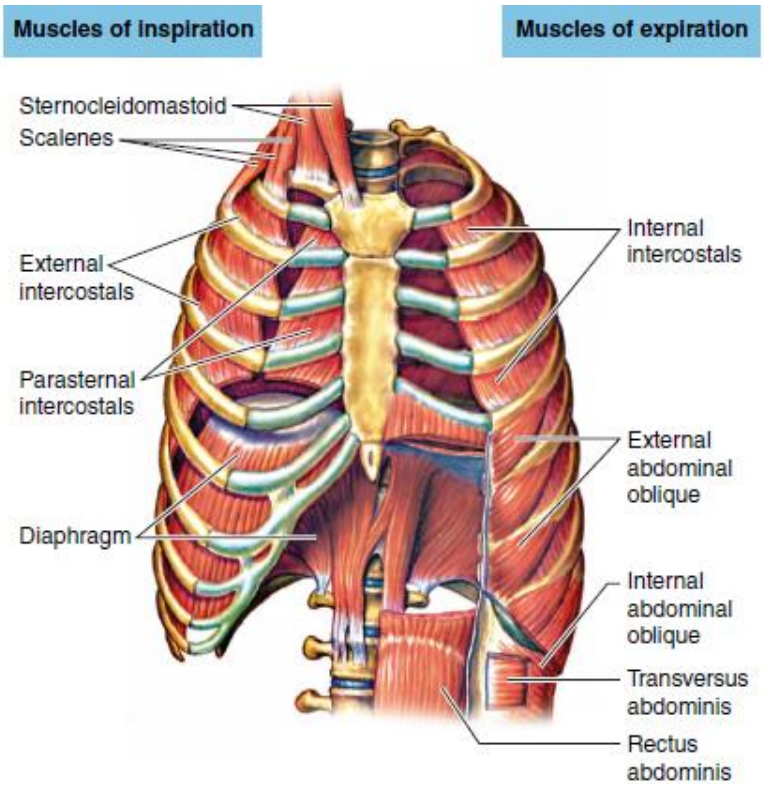


صورة توضّح عملية الزفير العفوي:

- استرخاء الحجاب الحاجز والعضلات الوربية الخارجية.
- نقصان القطر الأمامي الخلفي والعلوي السفلي لجوف الصدر.
- نقصان الحجم يرافقه زيادة بالضّغط.
- يجري الهواء بحسب مدروج الضغط إلى خارج الرئتين.

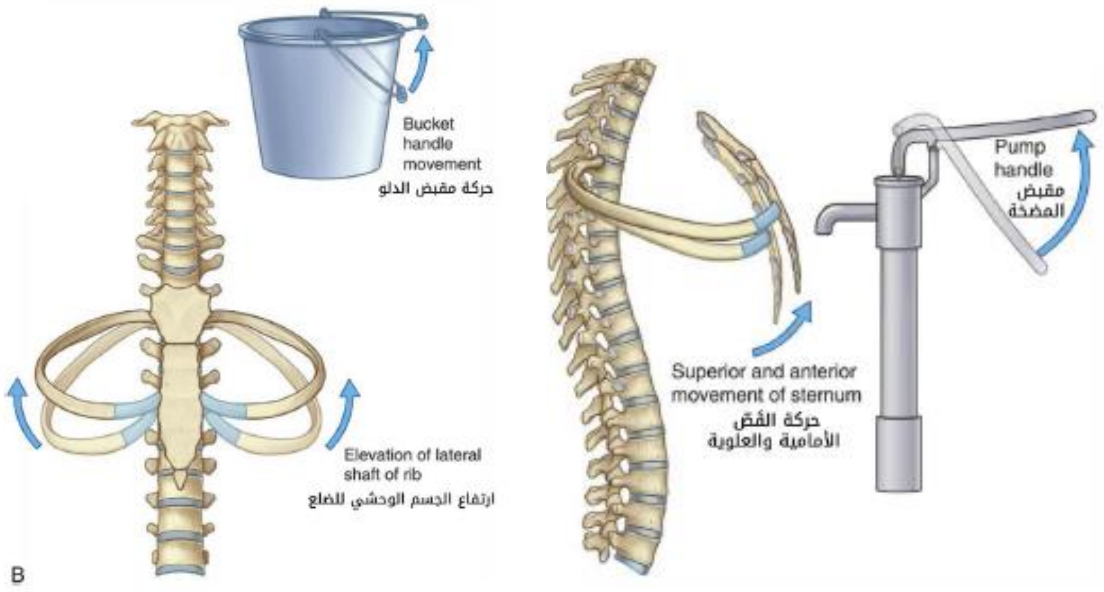
إذاً نستنتج أنّ:

- التنفس العفوي الهادئ يتمّ بصورة كاملة **تقريباً** من خلال حركة الحجاب الحاجز:
- في الشهيق العفوي يتقلّص الحجاب الحاجز.
- في الزفير العفوي يسترخي الحجاب الحاجز مما يؤدي إلى الارتداد المرن لكلّ من الرئتين وجدار الصدر وأحشاء البطن عائدين إلى الوضع الطبيعي.



صورة تشريحية تُظهر كلاً من العضلات الشهيقية والزفيرية

صورة توضّح حركات الأضلاع



تلخيص لما سبق *_*

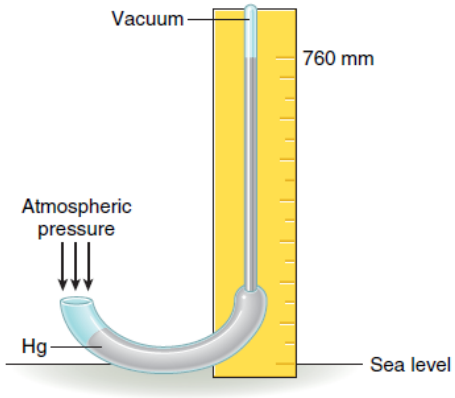
	الشهيق Inhalation		الزفير Exhalation	
	العفوي	القسري	العفوي	القسري
الأمر الدماغي	عملية فاعلة، أي تحتاج إلى أمر دماغي ومن ثم تقلص عضلي		عملية منفعلة، أي لا تحتاج إلى أمر دماغي أو تقلّص عضلي	عملية فاعلة، تحتاج لأمر دماغي وتقلص عضلي
العضلات المشاركة	- العضلات الشهيقية الأساسية (الحجاب الحاجز، العضلات الوربية الخارجية)	- العضلات الشهيقية الأساسية. - العضلات الشهيقية الثانوية	- عضلات البطن: 1. المستقيمة البطنية 2. المائلة الخارجية 3. المائلة الداخلية 4. المستعرضة البطنية - العضلات الوربية الداخلية	
القطر العلوي السفلي	يزداد (بانخفاض الحجاب الحاجز)		ينقص (ارتفاع الحجاب الحاجز)	
القطر الأمامي الخلفي	يزداد		ينقص	

الضغوط المتحكمة بحركة الهواء من وإلى الرئتين

- الضغط الجوي Atmospheric Pressure
- الضغط بين وريقتي الجنب (الجنبوي) Intrapleural Pressure
- الضغط داخل السنخ أو الرئة Intrapulmonary (Intra-alveolar) Pressure
- الضغط عبر الرئوي Transpulmonart Pressure

هذه الضغوط تُسهم في تحديد اتجاه حركة الهواء إلى داخل أو خارج الرئتين، وسنفصل بها واحداً تلو الآخر:

1. الضغط الجوي Atmospheric Pressure:



- يبلغ قيمة 760 mmHg عند سطح البحر[7]، وهذا يعني أن الضغط الجوي عند سطح البحر قادر على رفع عمود من الزئبق مساحة مقطعه $1\ cm^2$ مسافة قدرها 760mm.

2. الضغط بين وريقتي الجنب (الجنبوي) Intrapleural Pressure:

- هو الضغط في المسافة الضيقة الخالية من الهواء (في الحالة الطبيعية) بين الجنبة الحشوية Visceral Pleura والجنبة الجدارية[8] Parietal Pleura.
- حيث يوجد طبقة رقيقة جداً من السائل الجنبوي بين وريقتي الجنب والذي يسهّل حركة الرئتين.

[7] هذا الرقم للحفظ.

[8] ربط مع التشريح: الجنبة الجدارية هي التي تبطن جوف الصدر من الداخل، والجنبة الحشوية هي التي تغلف الرئتين، وتستمر الجنبتان معاً عند سرة الرئة.

- هو ضغط سلبي دائماً[9]، كما يمكن أن تزداد أو تقلّ سلبيته ولكنّه يبقى سلبياً في الحالة الطبيعية.
- يبلغ قيمة 756mmHg.
- بما أن الرئة بنية مرنة فيمكن أن تنخمص كالبالون وتطرد الهواء الموجود بداخلها إذا لم تتوفر لها القوة اللازمة لإبقائها منتفخة، وهنا يمثل الضغط الجنبوي السلبي هذه القوة التي تمنع الرئتين من الانخماص.

إثراء أربيسزي:

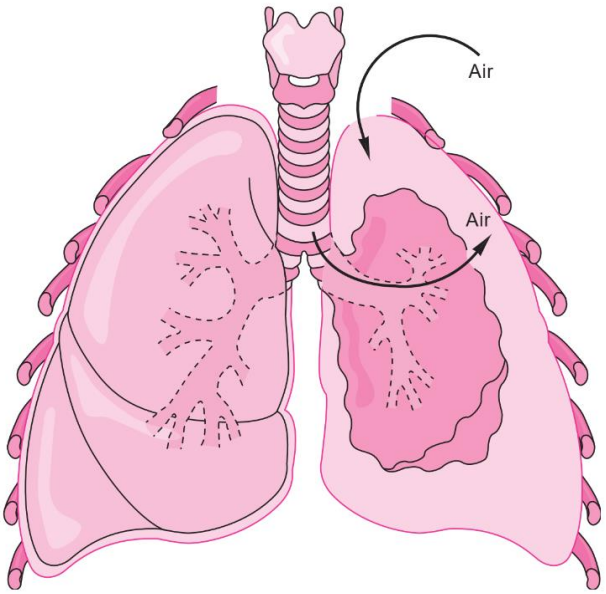
الأسباب وراء سلبية الضغط الجنبوي:

- ميل جدار الصدر للارتداد المرن نحو الخارج.
- ميل جدار الرئتين للارتداد المرن نحو الداخل.
- إن ما سبق يؤدي إلى تباعد وريقتي الجنب ← زيادة الحجم ← مما يؤدي إلى هبوط الضغط الجنبوي (حسب قانون بويل).
- الضخ المستمر لسائل الجنب إلى القنوات اللمفية.

تتزايد سلبية الضغط الجنبوي أثناء الشهيق:

- يتوسع الجوف الصدري ويسحب معه جدار الرئتين نحو الخارج.
- تزداد المسافة بين الجنبتين الجدارية والحشوية ← زيادة الحجم ← نقصان في الضغط.
- أي زيادة سلبية الضغط بين وريقتي الجنب (يحدث العكس عند الزفير، حيث تقل سلبية الضغط بين وريقتي الجنب ولكنّه يبقى سلبياً كما أشرنا سابقاً).
- لهذه الزيادة في السلبية أهمية كبيرة في مقاومة ميل الرئتين **المتزايد** للارتداد المرن نحو الداخل عند زيادة حجمهما.

[9] يُقصد بالضغط السلبي بأنّه ضغط أقل من الضغط الجوي، بينما الضغط الإيجابي هو ضغط أعلى من الضغط الجوي.



صورة توضّح انخماص الرئة في حال دخول هواء إلى الجوف الجنبي وارتفاع الضغط فيه

3. الضغط داخل السنخ أو الرئة Intrapulmonary (Intra-alveolar) Pressure:

- سنتحدث عن هذا الضغط في كل من حالتي الشهيق والزفير:
- **أثناء الشهيق:**

تكون قيمة الضغط داخل الأسناخ **أقل** من قيمة الضغط الجوي (ضغط سلبي داخل الأسناخ).

ومنه: يدخل الهواء إلى الرئتين وفقاً لمدروج الضغط.

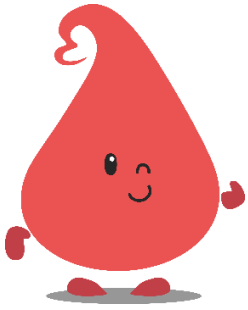
- **أثناء الزفير:**

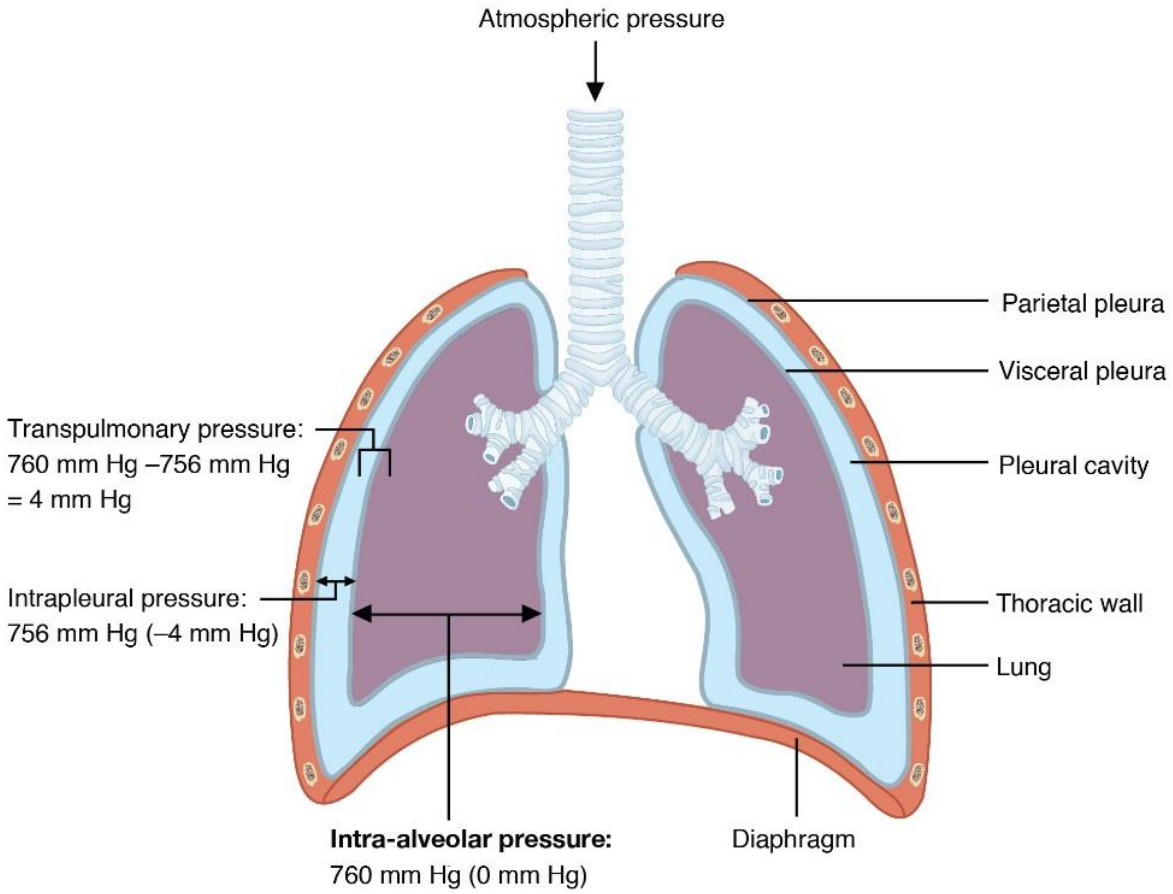
تكون قيمة الضغط داخل الأسناخ **أكبر** من قيمة الضغط الجوي (ضغط إيجابي داخل الأسناخ).

ومنه: يخرج الهواء من الرئتين وفقاً لمدروج الضغط.

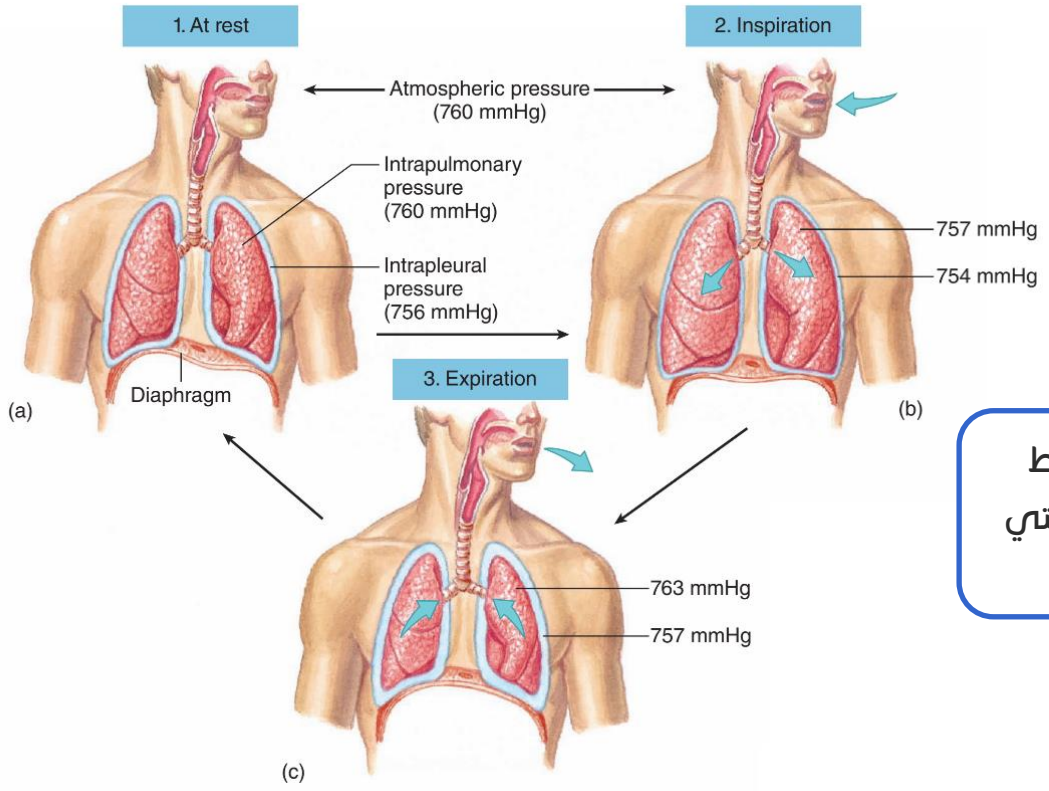
4. الضغط عبر الرئوي Transpulmonary Pressure:

- هو الفرق بالضغط بين الضغط داخل الأسناخ والضغط بين وريقتي الجنب.
- يعبّر عن قوى المرونة في الرئتين التي تساهم في انخماص الرئتين، وبالتالي هو ضغط معاكس للضغط بين وريقتي الجنب.

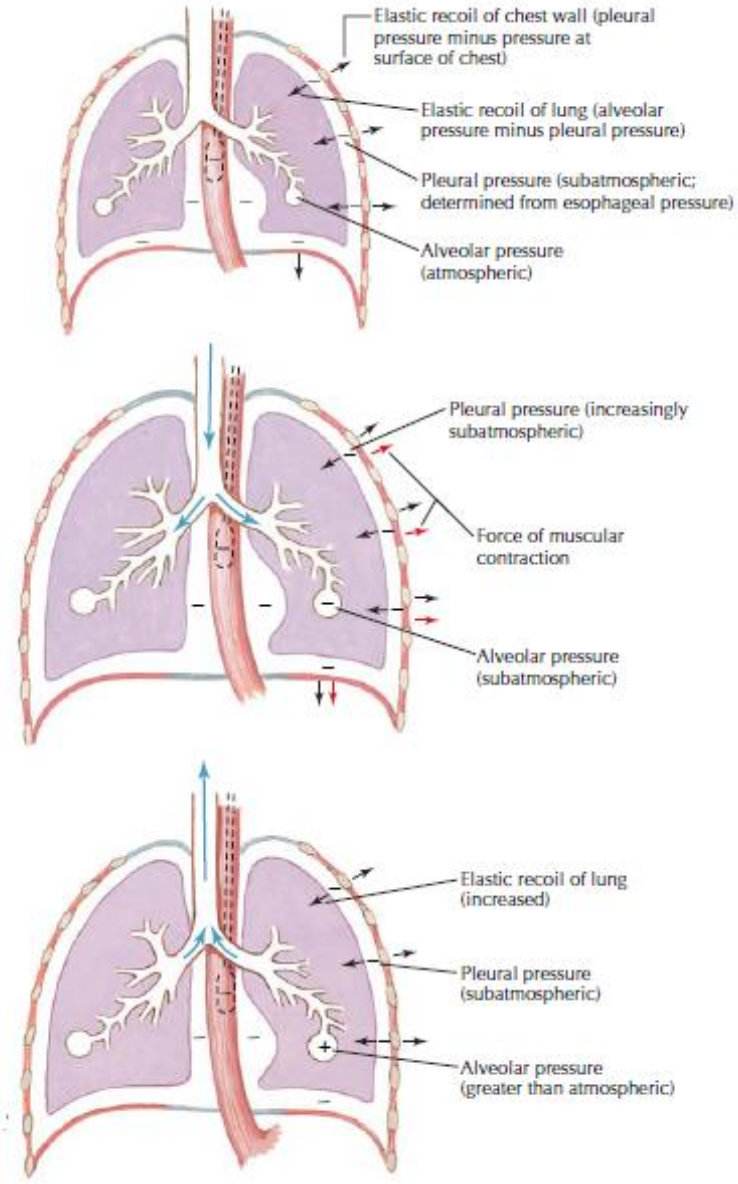




الصورة توضّح الضغوط التي تحدّثنا عنها



صورة توضّح الضغط السلبي ما بين وريقتي الجنب



شكل يوضّح اختلاف الضغوط الرئوية خلال الأطوار التنفسية:

أثناء الراحة: الضغط الجوي = الضغط داخل الأسناخ.

أثناء الشهيق: ينقص الضغط داخل الأسناخ (يصبح سلبياً) وتزداد سلبية الضغط بين وريقتي الجنب.

أثناء الزفير: يزداد الضغط داخل الأسناخ (يصبح إيجابياً) وتنقص سلبية الضغط بين وريقتي الجنب قليلاً.

الحجوم والسعات الرئوية Lung Volumes & Capacities [10]

❖ نقوم بقياس الحجوم والسعات الرئوية بواسطة جهاز متخصص يدعى مقياس النَّفَس Spirometry.

❖ يجب أن يكون الشخص بوضعية جلوس مريحة على كرسي[11].

❖ نقوم بإغلاق فتحتي أنف المريض بواسطة ملقط، ونضع أنبوب الجهاز على الفم (وذلك من أجل أن يكون هناك مصدر وحيد للهواء الداخل والخارج).

[10] نوه الدكتور أنه لا يحبذ حفظ الأرقام، لأنها تتغير بتغير العمر والجنس والعرق والبنية الجسدية.

[11] لا يكون الشخص بوضعية اضطجاع (استلقاء) لأن التنفس بها أصعب من وضعية الجلوس، ففيها تضغط أحشاء البطن على جوف الصدر.

قياس الحجوم
والسعات الرئوية
بواسطة جهاز
Spirometry، يجب أن
يكون الأنف مغلقاً
والمريض جالساً

الحجوم الرئوية Lung Volumes[12]

الحجم الجاري Tidal Volume (TV):

- حجم الهواء المستنشق أو المزفور في كل نفس سوي.
- يبلغ 500ml تقريباً.

حجم الشهيق المدخر Inspiratory Reserve Volume (IRV):

- أقصى كمية هواء يمكن استنشاقها **زيادة على** كمية الحجم الجاري السوية.
- يبلغ 3000ml تقريباً، وكما ورد في سلايدات الدكتور بين 2100 و3000.

حجم الزفير المدخر Expiratory Reserve Volume (ERV):

- أقصى كمية هواء يمكن إخراجها بزفير جهدي **بعد نهاية** الزفير الجاري السوي.
- يبلغ 1100ml تقريباً، وكما ورد في السلايدات بين 800 و1200.

[12] تابع مع الشكل في نهاية الفقرة.

الحجم الثمالي (Residual Volume (RV:

- حجم الهواء الذي يبقى في الرئتين بعد الزفير الجهدي الأقصى.
- يبلغ 1200ml تقريباً.
- وظيفته إبقاء هواء في الأسناخ لإبقائها مفتوحة ومنعها من الانخماص على نفسها.
- **لا يمكن قياسه بمقياس النفس**، بل يتم ذلك بواسطة جهاز يعتمد على غاز الهيليوم، حيث يستنشق المريض الهيليوم عدّة مرات، ونحسب الفرق بين حجم الغاز الكلي الذي دخل وحجم الغاز الذي خرج فنحصل على الحجم الثمالي.

تلخيص لما سبق ^_^

الحجم الرئوي	الحجم الجاري (TV)	حجم الشهيق المدخر (IRV)	حجم الزفير المدخر (ERV)	الحجم الثمالي (RV)
تعريفه	هو حجم الهواء المستنشق أو المزفور خلال نفس واحد سوي	هو أقصى كمية هواء يمكن استنشاقها زيادةً على كمية الحجم الجاري السوية	هو أقصى كمية هواء يمكن إخراجه بزفير جهدي بعد نهاية الزفير الجاري السوي	هو حجم الهواء الذي يبقى في الرئتين بعد الزفير الجهدي الأقصى
المعدل الوسطي	500 مل	3000 مل	1100 مل	1200 مل

السعات الرئوية Lung Capacities

❖ السعة الرئوية هي عبارة عن مجموع حجمين رئويين أو أكثر، وهي:

السعة الشهيقية Inspiratory Capacity (IC):

- وهي أقصى كمية هواء يمكن استنشاقها ابتداءً من مستوى الزَّفير السّوي إلى درجة تمدد الرئة إلى الحد الأقصى.
- الحجم الجاري TV + الحجم المُدَّخر الشّهيقي IRV = 3500ml

السعة الباقية الوظيفية Functional Residual Capacity (FRV):

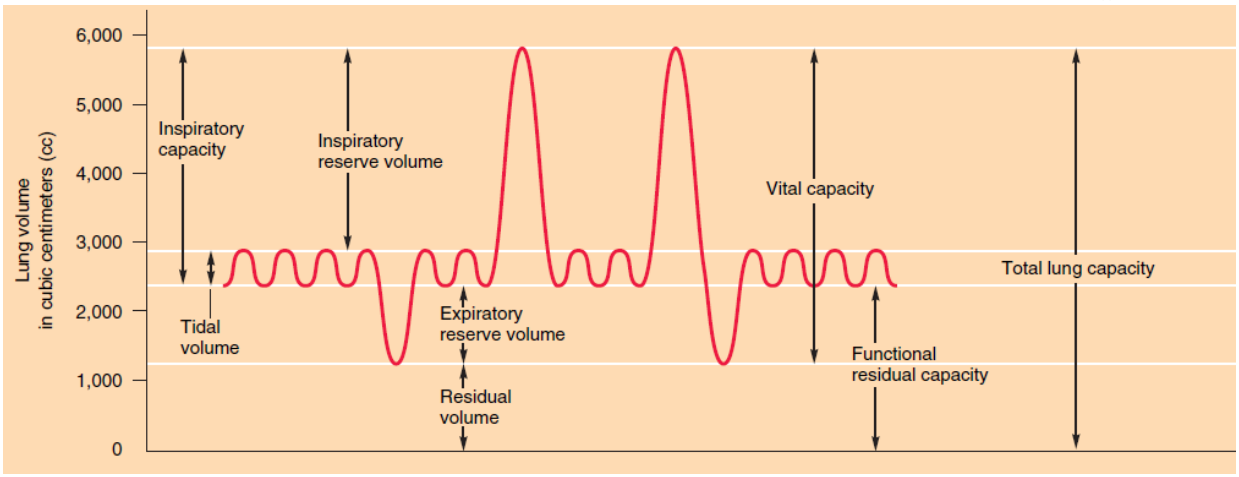
- كمية الهواء التي تبقى في الرئتين بعد نهاية زفير سوي.
- الحجم الباقي RV + الحجم المدخر الزفيري ERV = 2300ml

السعة الحيوية Vital Capacity (VC):

- أعظم كمية هواء تتحرك دخولاً وخروجاً من الرئتين.
- تمثل أكبر كمية هواء يمكن للشخص أن يزفرها بعد شهيق قسري أقصى.
- الحجم المدخر الزفيري ERV + الحجم المدخر الشهيقي IRV + الحجم الجاري TV = 4600ml[13].

السعة الكلية للرئة Total Lung Capacity (TLC):

- هي أكبر حجم يمكن أن تتمدد إليه الرئتان باستخدام أكبر جهد تنفسي ممكن.
- الحجم الباقي RV + السعة الحيوية VC = 5800ml.



[13] بين 3400-4700 حسب أرقام السلايدات.

ملاحظة:

- هذه السعات تساعدنا في التفريق بين الداء الرئوي الانسدادي والحاصر بناءً على وظائف الرئة[14].
- تنقص كافة هذه الحجوم والسعات عند النساء بمقدار 20 - 25 % منها عند الرجال، وهي أكبر بشكل ملحوظ عند الأشخاص الضخام والرياضيين مقارنةً بالنحيلين والواهنين وصغار القامة.
- لا يمكننا قياس الحجم الثمالي Residual Volume بمقياس النفس.

تلخيص لما سبق *_*

السعة الرئوية	السعة الشهيقية (IC) Inspiratory Capacity	السعة الوظيفية المدخرة (FRC) Functional Residual Capacity	السعة الحياتية (VC) Vital Capacity	السعة الكلية (TLC) للرئة Total Lung Capacity
تعريفها	أقصى كمية هواء يمكن استنشاقها ابتداء من مستوى الزفير السوي	كمية الهواء الباقية في الرئتين عند نهاية الزفير السوي	أكبر كمية هواء يمكن للشخص أن يخرجها من رئتيه بعد شهيق قسري	أكبر حجم يمكن أن تتمدد إليه الرئتان باستخدام أكبر جهد تنفسي ممكن
الحجوم المختارة	الحجم الجاري + حجم الشهيق المدخر	حجم الزفير المدخر+ الحجم الثمالي	حجم الشهيق المدخر + الحجم الجاري + حجم الزفير المدخر	السعة الحياتية + الحجم الثمالي
تعادل	3500 مل	2300 مل	4600 مل	5800 مل

[14] تفرض هذه الأمراض تغيّرات في السعات الرئوية، وإنّ اختلاف هذه التغيرات بين المرضين يساعدنا في التفريق بينهما، وسنتطرّق لهذه التفاصيل لاحقاً.

الحجم التنفسي في الدقيقة

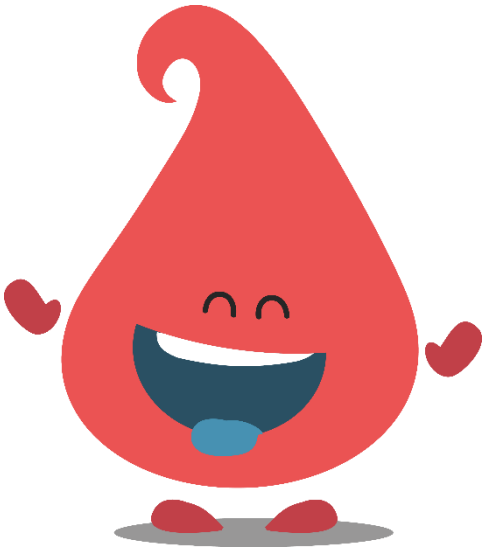
- هو الكمية الكلية للهواء الجديد الذي يمر خلال الممرات التنفسية في الدقيقة.
- وهو بذلك يعادل الحجم الجاري (500ml) مضروباً بمعدل التنفس (12 مرة في الدقيقة).
  - ← ليساوي 6 لتر في الدقيقة (أو 6000ml).

الحيز الميت Dead Space

- الحيز الميت هو المنطقة الممتدة من الأنف حتى القصيبات الانتهائية (أي الجزء الناقل من الجهاز التنفسي).
- لا يحدث فيه أي تبادل غازي، ويتم إخراج الهواء المزفور أولاً منه فهو غير مفيد أيضاً في إزالة الغازات الزفيرية من الرئتين.
- **مهمته:** تكييف الهواء (من ترطيب وتدفئة وتنقية).
- يعادل حجم هواء الحيز الميت Dead Space Air تقريباً 150ml.

معدل التهوية السنخية Alveolar Space Air Volume

- هو حجم الهواء الجديد الكلي الذي يدخل مناطق التبادل الغازي في الدقيقة.
- وهو بذلك يساوي معدل التنفس مضروباً بكمية الهواء الجديد الذي يدخل في كل نفس (والتي تمثل الحجم الجاري مطروحاً منه حجم هواء الحيز الميت).
- فيكون القانون $\mathrm{RR}(TV - DAV) = 4200$.
- أي 12 × (500-150) = 4200 مل في الدقيقة.
- إذا ضاعفنا RR ← AV=8400 mls/min[15].
- إذا ضاعفنا TV ← AV=10200 mls/min.



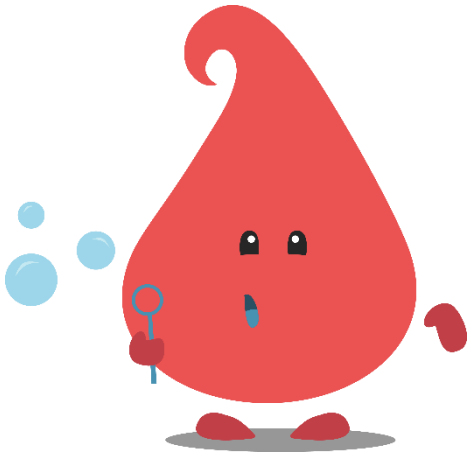
[15] Alveolar Ventilaion.

العلاقة بين تروية الأسناخ وتهويتها

- يوجد علاقة بين كمية O_2 في الأسناخ وكفاءة **الجريان الدموي في الشعيرات الدموية** المحيطة بها.
- فمثلاً عند نقص تركيز O_2 في السنخ (ومن ثم ضغطه) إلى ما دون السواء:
  - تتضيق الأوعية الدموية المجاورة وتزداد مقاومتها الوعائية.
  - فيتسبب ذلك بتحويل جريان الدم إلى أوعية الأسناخ ذات التهوية الأفضل.
  - ومن ثم عدم حدوث تروية أو تهوية ضائعة.
- كما يوجد علاقة بين كمية CO_2 في الدم وكفاءة **الجريان الهوائي في القصيبات** المؤدية إلى السنخ.
- فمثلاً عند ارتفاع تركيز CO_2 في السنخ (ومن ثم ضغطه):
  - تتوسع القصيبات المؤدية له.
  - مما يؤدي إلى تحسن تهوية السنخ.
  - ومن ثم عدم حدوث تروية ضائعة.

نستنتج مما سبق ما يلي:

- تقلبات الضغط الجزئي لـ O_2 في الأسناخ تؤثر حصراً في الأوعية الدموية الموضعية.
- تقلبات الضغط الجزئي لـ CO_2 في الأسناخ تؤثر حصراً في القصيبات.
- يوجد آلية تحكم ذاتي موضعية تنظم الجريان الدموي والهوائي من خلال تحكمها بأقطار الأوعية الدموية والقصيبات على التوالي هادفةً إلى عدم حدوث تروية أو تهوية ضائعة.



الآن سننتقل للتعرف على آلية التبادل الغازي، ولكن قبل الخوض في هذه الآلية سنتحدث عن بعض الأساسيات الهامة....

التبادل الغازي

وهو يعني تبادل الأوكسجين وثنائي أوكسيد الكربون بين الأسناخ والدّم والسائل الخلالي.

تمهيد

الأسناخ[16] Alveoli:

- **الأسناخ هي جيوب صغيرة (توسعات كيسية) مفتوحة من جانب واحد إمّا على القنوات السنخية أو على الأكياس السنخية وتحاط بوعاء دموي وهي وحدة التبادل الغازي.**
- **يفصل بين الأسناخ المتجاورة نسيج ضام يدعى الحاجز بين السنخي.**
- **تحوي البنية النسيجية للأسناخ ثلاث أنماط خلوية:**

1. الخلايا الرئوية (السنخية) من النمط I Type I Pneumocytes:

تعدّ المكوّن الأساسي لبنية جدار السنخ، وتعمل على تأمين حاجز بسماكة قليلة جداً لعبور الغازات بسهولة.

2. الخلايا الرئوية (السنخية) من النمط II Type II Pneumocytes:[17]

تفرز العامل الفعّال في السطح أو ما يدعى بالـ سورفاكتانت Surface Active Agent (Surfactant).

3. البالعات السنخية Macrophage:

تعمل على بلعمة المواد الدقائقية والعوامل الممرضة التي تصل إلى الأسناخ.

[16] أرشيف.

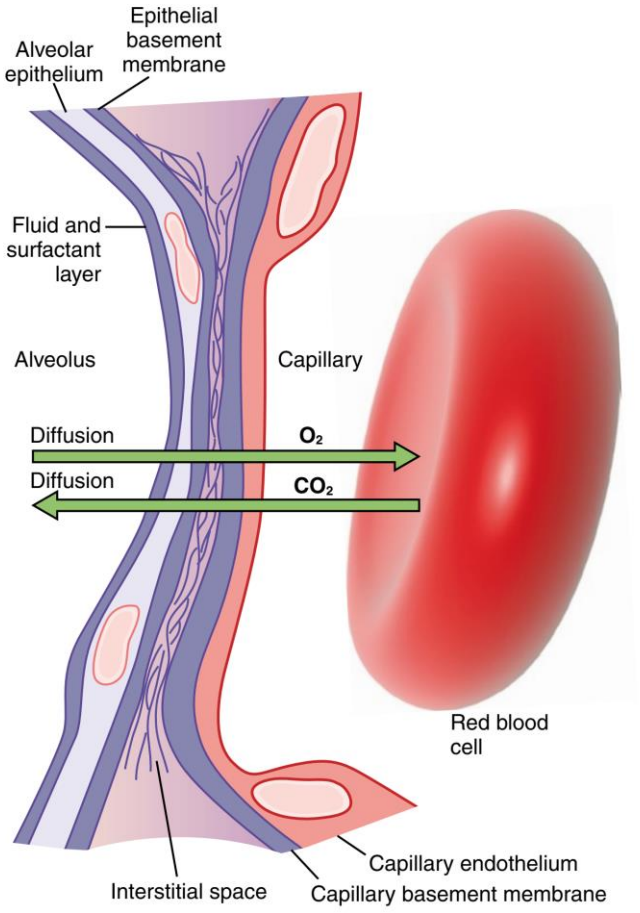
[17] هام جداً.

الغشاء (الحاجز) التنفسي Respiratory Membrane:

- الغشاء التنفسي هو مجموع الطبقات التي تفصل الهواء الموجود في الأسناخ عن الدم الموجود في الأوعية الشعرية المجاورة.
- يتميز بسماكة رقيقة جداً لا تتجاوز 0.3 – 0.5 ميكرون.
- يتكون من:

1. طبقة السائل السنخي Alveolar Fluid: تبطن جدار السنخ وتحوي على السورفاكتانت.
2. الظهارة السنخية Alveolar Epithelium: تتألف من خلايا رئوية من النمط 1.
3. الغشاء القاعدي Basement Membrane: يتبع للظهارة السنخية.
4. مسافة خلالية Interstitial Space: بين الجدار السنخي والجدار الوعائي.
5. الغشاء القاعدي Basement Membrane: يتبع للظهارة الشعيرية.
6. الظهارة الشعيرية Capillary Endothelium: تتألف من خلايا بطانية.

يحدث اندماج بين الغشاءين القاعديين السنخي والوعائي في أماكن عديدة مما يقلل من السماكة ويسهل عبور الغازات بشكل أكبر.



صورة تظهر فيها طبقات الغشاء التنفسي
Respiratory Membrane

التوتر السطحي Surface Tension:

- عندما يكون الماء على تماس مباشر مع الهواء تكون لجزيئاته السطحية قوة جذب إضافية بعضها مع بعض.
- وبسبب التوتر السطحي فإن لسطح الماء دائماً نزعة لأن يتقلص.
- إن تقلص سطح الماء بسبب التوتر السطحي يؤدي إلى تماسك قطرات ماء المطر، ويبدو ذلك بوجود غشاء قلوص محكم مكوّن من جزيئات الماء حول كل قطرة مطر.
- وبسبب كون السطوح الداخلية للأسناخ مبطنة بطبقة سائلة مائية، سيحاول سطح الماء في هذه الطبقة أن يتقلص أيضاً مما يؤدي إلى دفع الهواء إلى خارج الأسناخ، ومن ثم تنخمص وتنطبق جدرانها.
- يسمى ذلك بالانخماص الرئوي (Lung Collapse) الذي يحدث خصوصاً عند نهاية الزفير وذلك نتيجة عدم توافر هواء كافٍ لفتح الأسناخ بالإضافة إلى غياب عامل السورفاكتانت.

ملاحظات:

- إن القوة التي يمارسها سطح الماء تخلق ضغطاً يسمى الضغط أو التوتر السطحي Surface Tension.
- إن لبخار الماء الداخل مع الهواء إلى الأسناخ الرؤية دوراً مهماً في تشكيل الطبقة السائلة المائية المبطنة للأسناخ الرؤية.

العامل الفعال في السطح (السورفاكتانت Surfactant)

- هو عامل فوسفوليبيدي بروتيني يتكوّن من خليط من الشحوم الفوسفورية والكوليسترول والبروتينات والشوارد (المواد الدسمة لها النسبة الأعظم وخصوصاً الشحوم الفوسفورية).
- يفرز من الخلايا السنخية ذات النمط II.
- يعمل على خفض التوتر السطحي بشكل كبير عند انتشاره فوق الطبقة المائية[18]، ومن ثم الحفاظ على السنخ مفتوحاً ومنعه من الانخماص على نفسه.

متلازمة الضائقة (العسرة) التنفسية

[18] نعلم أن الشحوم الفوسفورية غير ذوابة في الماء عموماً، حيث أن أحد أجزاء الشحم الفوسفوري محب للماء ويذوب فيه، بينما يكون الجزء الآخر الشحمي كارهاً للماء ومعرضاً لهواء السنخ، إن هذه الخواص تمنع جزيئات الماء من توليد توتر سطحي فعال.

- اضطراب رئوي يحدث بشكل أساسي لدى الخدّج[19].
- ينجم عن عوز العامل الفعال في السطح، وذلك لأن إفرازه يبدأ في الأسابيع الأخيرة من الحمل[20].
  - فتكون الرئات لديهم لها نزعة للانخماص بشكل كبير.
- هذه الحالة مميتة ما لم تعالج بوسائل فعالة كالأدوية التي تعمل على تحفيز نضج الخلايا المفرزة للسورفاكتانت وتصنيعه مثل الكورتيزون (من الستيروئيدات القشرية).

الفيديو الذي عرضه الدكتور في المحاضرة والذي يشرح فيه التوتر السطحي والسورفاكتانت

قانون هنري Henry's Law:

- تمارس الغازات المنحلة في الماء وسوائل الجسم ضغطاً جزئياً Partial Pressure يتعلق بالتركيز بالإضافة إلى معامل ذوبان هذا الغاز.
- يتم انتقال O_2 وCO_2 من منطقة إلى أخرى عن طريق الانتشار Diffusion بواسطة الحركة العشوائية البسيطة لجزيئات الغاز.
- يتم هذا الانتشار بتأثير مدروجين هما:
  - ✓ مدروج التركيز: من منطقة التركيز المرتفع إلى منطقة التركيز المنخفض.
  - ✓ مدروج الضغط: إذ يستمر الانتشار حتى يتساوى الضغطان في الطرفين.

قانون دالتون Dalton's law:

- الضغط الكلي لخليط من الغازات يساوي مجموع الضغوط الجزئية لكل غاز في هذا الخليط.

[19] الخدج هم الأطفال الذين ولدوا قبل أوانهم في الشهر السابع أو الثامن من الحمل.

[20] لا يمارس الجنين في الرحم وظيفة التنفس، وتبدأ هذه الوظيفة مع الشهيق الأول عند الصراخ بعد الولادة.

- يتركب الهواء الجوي من 79% نتروجين و21% أوكسجين و0.04% ثنائي أوكسيد الكربون.
- وبالتالي يشارك كل غاز في الضغط الكلي بشكل يتناسب مع نسبته المئوية في المزيج.
- عندما يدخل الهواء الطرق التنفسية يتبخر الماء من سطوح هذه الطرق ويرطبه (ينتقل الماء وفقاً لمدروج تركيزه)، وبذلك يصبح ضغط بخار الماء جزءاً من الضغط الكلي للهواء الجوي الداخل.

الضغط الجوي عند سطح البحر:

- إن الضغط الجوي عند سطح البحر يساوي 760 mmHg.[21]

انتشار O_2 وCO_2 بين الأسناخ الرئوية والأوعية الدموية والنسج

الضغوط الجزيئية لكل من O_2 وCO_2 في الهواء الجوي والأسناخ

الضغط الجزئي لغاز الأوكسجين P_{O2}:

- الضغط الجزئي للهواء عند سطح البحر هو 760 mmHg.
- نسبة الأوكسجين من الهواء العام هي 21%.
  - ✓ بالجداء بينهما نتوصل إلى الضغط الجزئي لـ O_2 والذي يساوي تقريباً[22] 160 mmHg.
- سينقص هذا الضغط بدخول الهواء الجوي إلى الحيز الميت بسبب:
  1. اختلاطه مع هواء الزفير الغني بـ CO_2.
  2. تسخينه وترطيبه (إشباعه ببخار الماء).
- تصبح قيمة الضغط الجزئي لـ O_2 عند وصوله للأسناخ مساوية لـ 104 mmHg.

الضغط الجزئي لغاز ثنائي أوكسيد الكربون P_{CO2}:

- الضغط الجزئي للهواء عند سطح البحر هو 760 mmHg.

[21] تحدثنا عنه سابقا في فقرة الضغوط...

[22] هي تساوي 159 لكن للسهولة يتم تقريبها إلى 160 ميليمتر زئبقي.

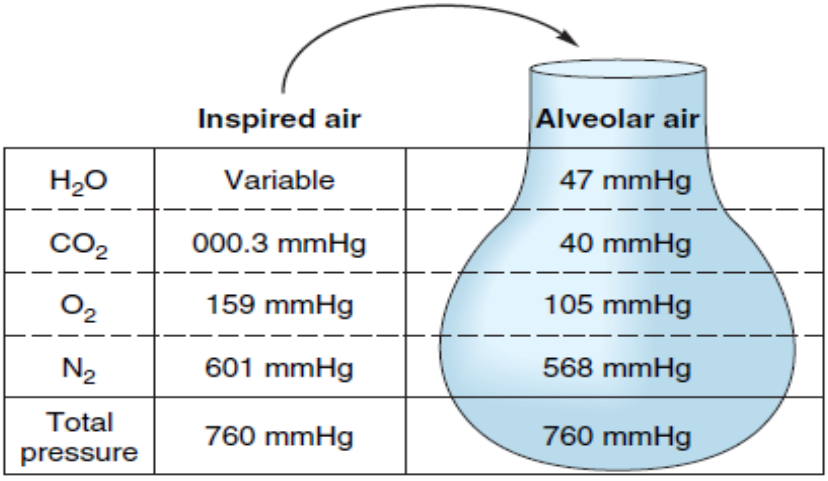
- نسبة CO_2 من الهواء العام هي 0.04%.

  ⇦ بالجداء بينهما نتوصل إلى الضغط الجزئي لـ CO_2 والذي يساوي تقريباً 0.3 mmHg.

- سيرتفع هذا الضغط بدخول الهواء الجوي إلى الأسناخ بسبب:

  ⇦ اختلاطه مع هواء الحجم الثمالي (RV) الحاوي على نسب عالية من CO_2.

- تصبح قيمة الضغط الجزئي لـCO_2 عند وصوله للأسناخ مساوية لـ 40 mmHg.



H_2O	Variable	47 mmHg
CO_2	000.3 mmHg	40 mmHg
O_2	159 mmHg	105 mmHg
N_2	601 mmHg	568 mmHg
Total pressure	760 mmHg	760 mmHg

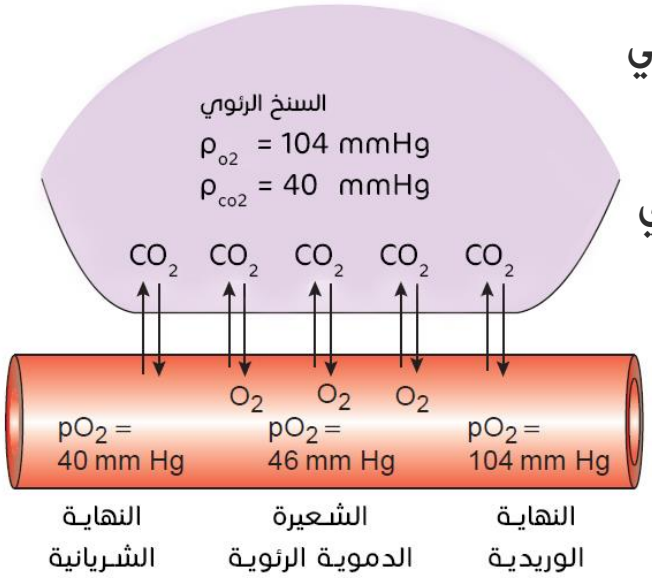
- ✦ شكل يوضّح الفروقات في الضغوط الجزئية بين الهواء المستنشق والهواء السنخي (الأرقام تقريبية)
- ✦ لاحظ انخفاض الضغط الجزئي للأوكسجين وارتفاع الضغط الجزئي لثنائي أوكسيد الكربون
- ✦ كما نرى إشباع الهواء السنخي ببخار الماء
- ✦ الضغط الكلي يبقى نفسه ولكن الضغوط الجزئية للغازات هي التي تتغير

آلية التبادل الغازي[23]

يتم هذا التبادل في مستويين:

في مستوى السنخ الرئوي (التنفس الخارجي)

1. بالنسبة لغاز الأوكسجين O_2:



- الضغط الجزئي للأوكسجين داخل الجوف السنخي يساوي 104 mmHg.
- الضغط الجزئي للأوكسجين داخل الوعاء الشعري يساوي 40 mmHg.
- وبالتالي لدينا مدروج ضغط يسمح بدخول الأوكسجين من السنخ الرئوي إلى الوعاء الشعري حتى يتساوى الضغطان.

نتيجة: يصبح ضغط الـ O_2 في الوريد الرئوي 104 mmHg فور حدوث التبادل الغازي في السنخ الرئوي (كسب لـ O_2).

2. بالنسبة لغاز ثنائي أوكسيد الكربون CO_2:

- الضغط الجزئي لثنائي أوكسيد الكربون داخل الجوف السنخي يساوي 40 mmHg.
- الضغط الجزئي لثنائي أوكسيد الكربون داخل الوعاء الشعري يساوي 45 mmHg.
- وبالتالي لدينا مدروج ضغط يسمح بخروج ثنائي أوكسيد الكربون من الوعاء الشعري إلى السنخ الرئوي حتى يتساوى الضغطان.

نتيجة: يصبح ضغط CO_2 في الوريد الرئوي 40 mmHg فور حدوث التبادل الغازي في السنخ الرئوي (خسارة CO_2).

[23] تابع مع الشكل في الصفحة 30.

ملاحظات:

- نلاحظ أن فروق الضغط التي تسبب انتشار CO_2 هي دائماً **أقل** بكثير من الفروق المطلوبة لإحداث انتشار الأوكسجين، والسبب في ذلك هو أن سرعة انتشار CO_2 **أكبر** بـ 20 ضعف من سرعة انتشار الأوكسجين.
- يتساوى P_{O2} في الشعيرات الرئوية مع مثيله في السنخ خلال قطع الدم ثلث المسافة عبر الوعاء الشعري (وكذلك P_{CO2})، أي أن الدم يبقى في الشعيرات الرئوية **ثلاثة أضعاف** المدة اللازمة لأكسجته بشكل تام، ومنه فإن الدم قادر على أن يتأكسج بشكل تام عند تعرضه للأوكسجين لفترة قصيرة (كما في التمارين الرياضية العنيفة).

في مستوى الأنسجة (التنفس الداخلي)

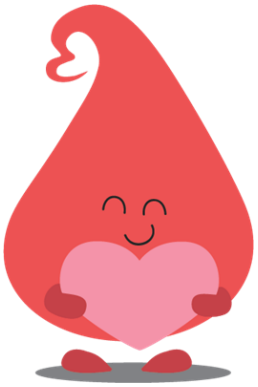
1. بالنسبة لغاز الأوكسجين O_2:

- الضغط الجزئي للأوكسجين في السائل الخلالي يساوي 40 mmHg.
- الضغط الجزئي للأوكسجين في الوعاء الشعري يساوي 95 mmHg.
  - وبالتالي لدينا مدروج ضغط يسمح بدخول الأوكسجين إلى السائل الخلالي ومنه إلى الخلايا.

ينقص الأوكسجين من 104 mmHg إلى 95 mmHg ويعود ذلك إلى خسارة الكريات الحمر للأوكسجين أثناء اتجاهها للأوعية الدموية المحيطية.

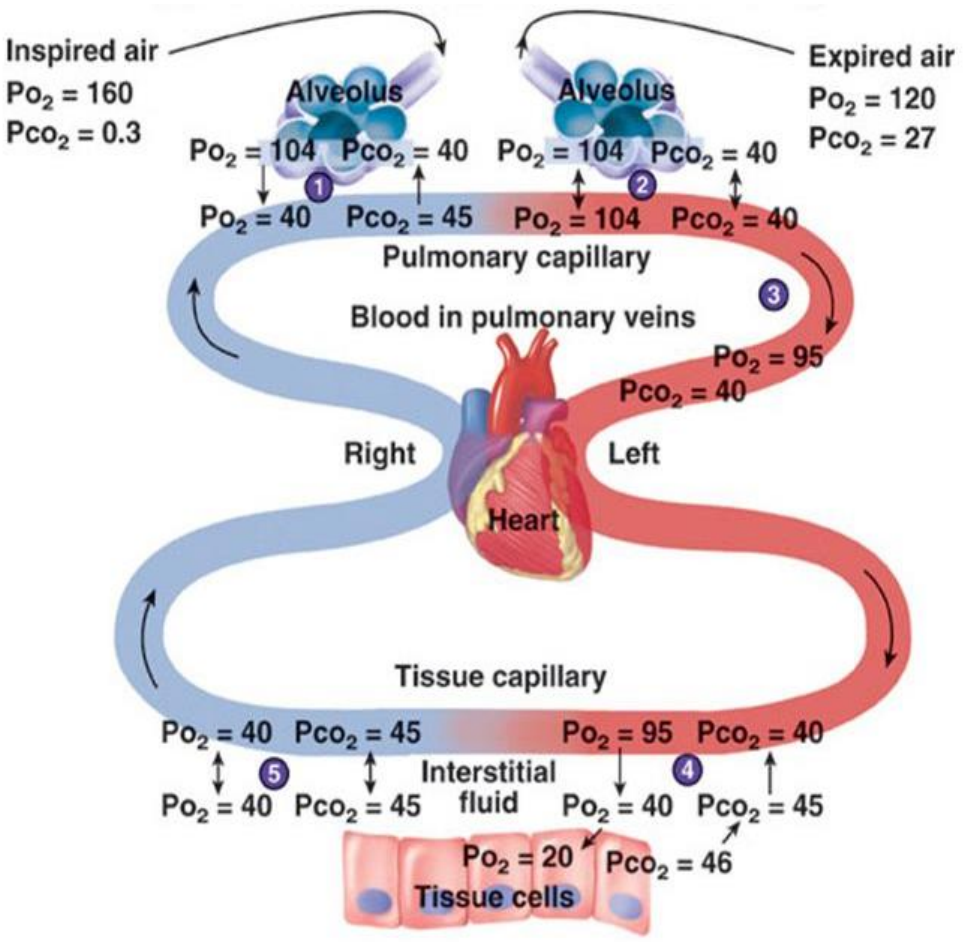
2. بالنسبة لغاز ثنائي أوكسيد الكربون CO_2:

- الضغط الجزئي لثنائي أوكسيد الكربون في السائل الخلالي يساوي 45 mmHg.
- الضغط الجزئي لثنائي أوكسيد الكربون داخل الوعاء الشعري يساوي 40 mmHg.
  - وبالتالي لدينا مدروج ضغط يسمح بخروج ثنائي أوكسيد الكربون من السائل الخلالي إلى الوعاء الشعري.



ملاحظات:

- يقوم السائل الخللالي بالتبادل الغازي مع الخلايا وفقاً لمدروج التركيز أيضاً.
- التنفس الخلوي: استخدام الخلية للأوكسجين لإنتاج الطاقة (ATP) من خلال المتقدرات.



الشكل الذي عرضه الدكتور بالمحاضرة

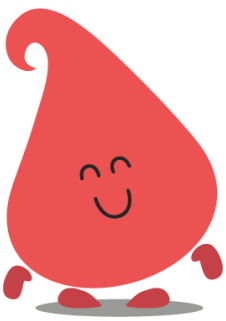
يظهر فيه تبدلات الضغوط الجزئية للأوكسجين ولثنائي أوكسيد الكربون في الدم:

- ✦ في مستوى الأسناخ نلاحظ انتشار الأوكسجين من الأسناخ إلى الشعريات بينما ينتشر ثنائي أوكسيد الكربون بالاتجاه المعاكس
- ✦ أما في مستوى الأنسجة نلاحظ انتشار الأوكسجين من الشعريات الجهازية باتجاه السائل الخللالي بينما ينتشر ثنائي أوكسيد الكربون بالاتجاه المعاكس وكل ذلك يحصل بفضل مدروج الضغط

Overview

جدول يوضح ضغوط الأوكسجين الجزئية وكيفية انتشاره:

	ضغط الأوكسجين بـmmHg	توضيح
الهواء المستنشق	160	سينقص هذا الضغط الى 104 بسبب: • اختلاطه مع هواء الزفير الغني بـ CO_2. • تسخينه وترطيبه (إشباعه ببخار الماء).
عند الوصول للأسناخ	104	يخلق ممال ضغط يجعل الاوكسجين ينتشر للأوعية الدموية
في الأوعية قرب الأسناخ (قبل التبادل الغازي)	40	
الأوعية قرب الأسناخ (بعد التبادل الغازي)	104	ينقص إلى 95 عند وصوله للأنسجة بسبب خسارة الكريات الحمر للأوكسجين أثناء اتجاهها للأوعية الدموية المحيطية
الأوعية قرب الأنسجة	95	يخلق ممال ضغط يجعل الأوكسجين ينتشر للخلايا
بالسائل الخلالي	40	
بالخلايا	20	



جدول يوضح ضغوط ثنائي أوكسيد الكربون الجزئية وكيفية انتشاره:

	ضغط CO_2 بـ mmHg	توضيح
الهواء المستنشق	0.3	سيرتفع هذا الضغط إلى 45 بدخول الهواء الجوي إلى الأسناخ بسبب: • اختلاطه مع هواء الحجم الثمالي (RV) الحاوي على نسب عالية من CO_2.
عند الوصول للأسناخ	45	يخلق ممال ضغط يجعل ثنائي أوكسيد الكربون ينتشر للأوعية الدموية
في الأوعية قرب الأسناخ (قبل التبادل الغازي)	40	
الأوعية قرب الأسناخ (بعد التبادل الغازي)	40	–
الأوعية قرب الأنسجة	40	يخلق ممال ضغط يجعل ثنائي أوكسيد الكربون ينتشر للخلايا
بالسائل الخلالي	45	
بالخلايا	46	

نقل الغازات Gas Transport

نقل الأوكسجين في الدم

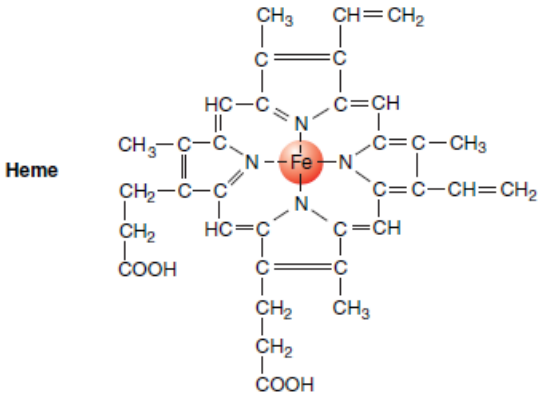
❖ يتم نقل الأوكسجين بطريقتين[24]:

☜ يُنقل 98 – 98.5% من الأوكسجين محمولاً بارتباط كيميائي عكوس مع جزيء الهيم في الخضاب في الكريات الحمر.

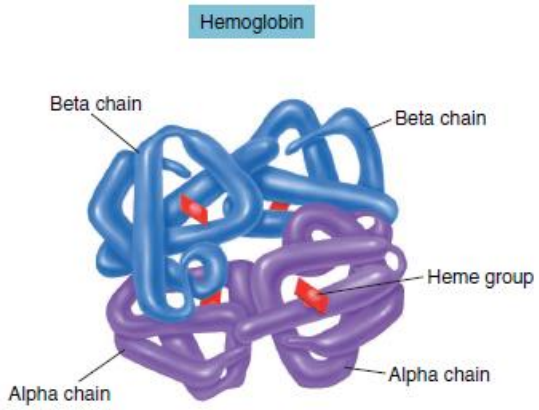
☜ يُنقل 1.5 – 2% منه بشكل منحل في البلازما.

❖ الكرية الدموية الحمراء تحوي على 250 مليون جزيئة هيموغلوبين.

❖ ترتبط مجموعات الهيم الأربع في الهيموغلوبين مع أربع جزيئات أوكسجين (في حالة الإشباع ولكن قد ترتبط بعدد جزيئات أوكسجين أقل من 4 في حالات عدم الإشباع الكامل).



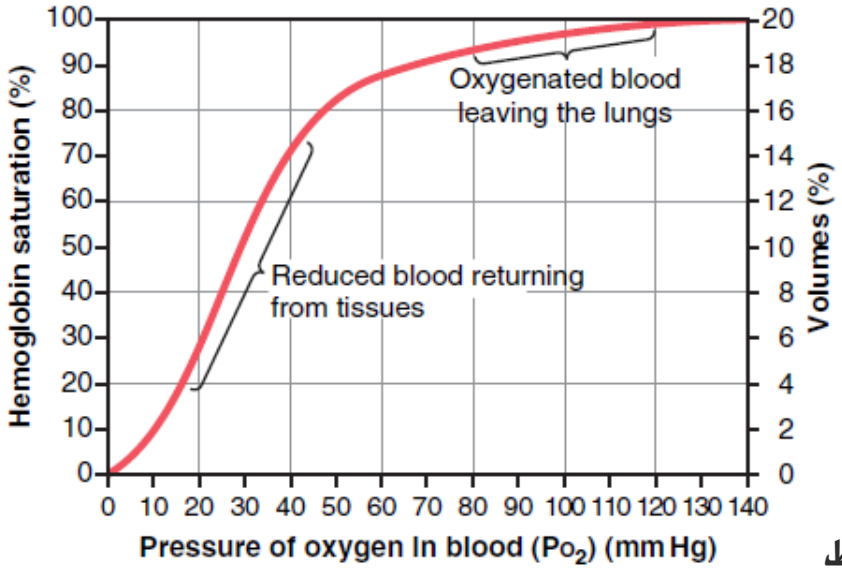
شكل يوضح بنية الهيم وهو عبارة عن 4 حلقات بيرولية (Protoporphyrin IX) مرتبطة بـ Fe^{+2}



شكل يوضح بنية الهيموغلوبين والذي يتكون من هيم (الجزء الصباغي)، والغلوبين (الجزء البروتيني) هو عبارة عن 4 سلاسل عديدة ببتيد

[24] هناك اختلاف بين المراجع في النسب لكن جميع المراجع كانت متفقة على أن نسبة الأوكسجين المنقول بالهيموغلوبين هي أكثر من 95%.

منحنى تفارق الأوكسجين - خضاب الدم



- هو مخطط يوضح علاقة الضغط الجزئي للأوكسجين بنسبة إشباع الخضاب بالأوكسجين.
- تزداد النسبة المئوية لخضاب الدم المرتبط بالأوكسجين بشكل تدريجي عند زيادة P_{O2}، وتسمى هذه النسبة المئوية بـ **نسبة الإشباع المئوية لخضاب الدم**.
- أي أن العامل الأساسي المحدد لارتباط الأوكسجين بالخضاب أو تفارقهما (أي المحدد لإشباع الخضاب بالأوكسجين) هو **الضغط الجزئي للأوكسجين P_{O2}**.
- **شكل المنحنى:** غير مستقيم، وله **شكل حرف S**.

الشكل أعلاه يوضّح منحنى تفارق أوكسجين - خضاب:
حيث أن المحور الأفقي يوضح تغيرات P_{O2}، بينما المحور العمودي يوضّح نسبة إشباع الخضاب بالأوكسجين.
لاحظ أنه عند نقصان P_{O2} إلى 60mmHg مثلاً تبقى نسبة إشباع الخضاب بالأوكسجين حوالي 85%

- **أهمية المنحنى:** يوضّح أن إشباع الخضاب بالأوكسجين (النسبة المئوية لخضاب الدم المرتبط بالأوكسجين) **لا يتأثر بشكل خطر أو ملحوظ** مع التغيرات الكبيرة في كمية الأوكسجين في الدم، فنجد على سبيل المثال:
  - إن P_{O2} في الدم الشرياني يساوي 95mmHg ونسبة الإشباع المئوية الموافقة تساوي 97%.
  - ولكن P_{O2} في الدم الوريدي يساوي 40mmHg أما نسبة الإشباع المئوية الموافقة فتكون 75%.

نتيجة: الانخفاض الكبير في كمية O_2 (ومن ثم في ضغطه) لم يترافق بانخفاض كبير في نسبة الإشباع المئوية الموافقة.

مثال إثرائي للتوضيح:

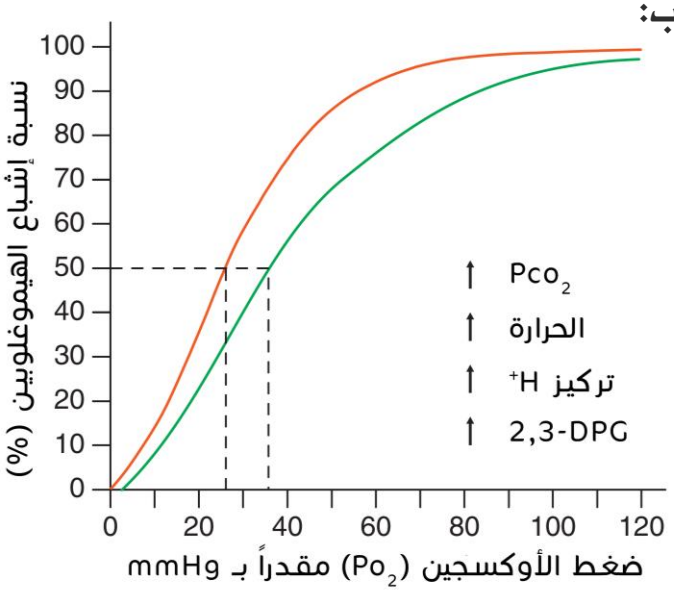
- تتجلى أهمية هذه الظاهرة عند صعود المرء لجبل أو ركوبه طائرة، يحصل في ذلك المستوى المرتفع انخفاض P_{O2} داخل الأسناخ من 105 إلى 60 mmHg.
- بالرغم من هذا الانخفاض نتيجة قلة كمية O_2 في المرتفعات بالمقارنة مع كميته عند سطح البحر إلا أنّ نسبة الإشباع المئوية لخضاب الدم الموافقة تكون 89% أي أقل بـ 8% فقط من النسبة السوية (97 %).
- وهنا تستمر النسج باستخلاص نفس كمية الأوكسجين اللازمة لها دون تأثر، ويبقى P_{O2} في النسج دون تغير يُذكر.
- إن السبب في ذلك هو حقيقة أن المهم في العمليات الاستقلابية في الجسم هو عدم هبوط كمية الأوكسجين المرتبطة بالخضاب عن حدّ معيّن، وليس كمية الأوكسجين الكلية المتأثرة بضغط الأوكسجين الجزئي في الأسناخ.

نتيجة: قد ينقص الضغط الجزئي للأوكسجين في الأسناخ؛ ومن ثم في الدم الشرياني، ولكنه يبقى ثابتاً في مستوى السائل الخلالي والخلايا.[25]

تغيرات منحنى تفارق أوكسجين - خضاب الدم

➢ قد يحدث انزياح لمخطط التفارق **نحو اليمين** بسبب:

- ارتفاع H^+ (أو انخفاض PH).
- ارتفاع درجة الحرارة.
- ارتفاع (CO_2).
- ارتفاع (DPG).

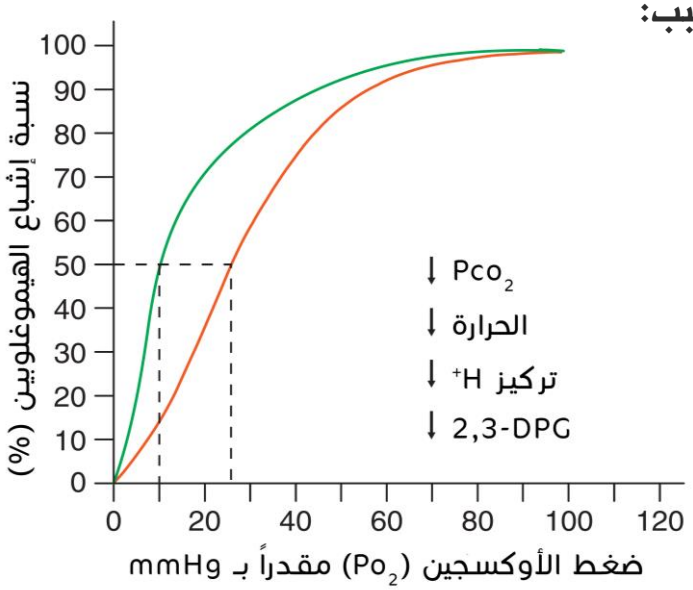


لاحظ المخطط (الخط الأساسي الأحمر والمنزاح نحو اليمين هو الأخضر) من أجل قيمة معينة لـ Po_2 (تقريباً 25 mmHg) نرى انخفاض نسبة الاشباع 20% تقريباً

[25] الكلام السابق صحيح حتى حد معين، وهو 60mmHg بالنسبة لـ P_{O2} الشرياني.

إن الانزياح نحو اليمين حقيقةً يعني **انخفاض** نسبة اشباع الهيموغلوبين بالأوكسجين من أجل الـ Po_2 نفسه وهو يزيد تحرير الأوكسجين عند الأنسجة ويحدث أيضاً عند ارتفاع الحرارة في الالتهابات ليزيد تأمين الأوكسجين للنسج بزيادة الاستقلاب.

- قد يحدث انزياح لمخطط التفارق **نحو اليسار** بسبب:
  - نقص H^+ (ازدياد PH).
  - نقص درجة الحرارة.
  - نقص (CO_2).
  - نقص (DPG).



لاحظ المخطط (الخط الأساسي هو الأحمر والمنزاح نحو اليسار هو الأخضر) من أجل قيمة معينة لـ Po_2 (تقريباً 105 mmHg) نرى ارتفاع في نسبة الاشباع (من 97% إلى 99% تقريباً)

إن الانزياح نحو اليسار يعني **ارتفاع** نسبة اشباع الخضاب بالـ O_2 من أجل الـ Po_2 نفسه يحدث عند زيادة امتصاص O_2 من الرئتين وعند الجو البارد تخف التفاعلات الاستقلابية ولن نحتاج إلى كمية كبيرة من O_2 فينزاح لليسار ويبقى الـ O_2 مرتبطاً بالخضاب.

ثنائي فوسفوغليسيريدات (2,3-DPG) (إثراء)

- إن 2,3-DPG أو ثنائي فوسفوغليسيريدات مركب ينتج عن **التحلل اللاهوائي للسكر (Glycolysis)** داخل الكريات الحمراء.
- يرتبط بين سلسلتي بيتا في الهيموغلوبين غير المؤكسج.
- وهو يعمل على تقليل ألفة الهيموغلوبين للأوكسجين حيث أن الكرية الحمراء ذات النسبة المنخفضة منه تملك قدرة عالية على الارتباط بالأوكسجين.
- وظيفته الأساسية في الجسم هي **تنظيم مرور الأوكسجين** من الجهاز التنفسي إلى أنسجة الجسم.

تركيز 2,3-DPG

- يرتفع في الأنسجة
  - يؤدي إلى التنافس مع الأوكسجين على الارتباط بالخضاب وبالتالي زيادة في طرح الأوكسجين من الكريات إلى الأنسجة
- ينخفض بالقرب من الجهاز التنفسي
  - يسمح للهيموغلوبين بزيادة ارتباطه مع الأوكسجين حتى يتم نقله إلى جميع أنحاء الجسم

نقل ثنائي أوكسيد الكربون في الدم

نقل CO_2

- 7% منه ينتقل منحلاً بالبلازما
- 23% منه على شكل مركب كاربامينو هيموغلوبين Carbamino HG
  - وهو حمل CO_2 بارتباط كيميائي عكوس مع الغلوبين في الهيموغلوبين
- 70% منه ينقل على شكل بيكربونات

ملاحظات:

- يكون ارتباط الـ CO بالخضاب **أقوى** من ارتباط O_2 بالخضاب بـ 200 مرة ومن ارتباط CO_2.
- يكون ارتباط CO_2 أقوى من ارتباط الأوكسجين بالخضاب أي يصبح ($CO>CO_2>O_2$).
- ينجم CO عن الاحتراق **غير الكامل** وبما أن ارتباطه قوي جداً فان وجوده بنسب قد تكون قليلة ستؤدي إلى حالات اختناق وتسمم بـ CO ويكون ذلك شائع الحدوث عند الأشخاص الذين يستخدمون وسيلة تدفئة ذات احتراق غير كامل.
- إن الانسمام بالـ CO يحول الخضاب إلى خضاب مكربن غير فعّال وتتجلى أعراضه بداية بصداع ثم ضيق تنفس ومن ثم فقدان الوعي وأخيراً الموت.

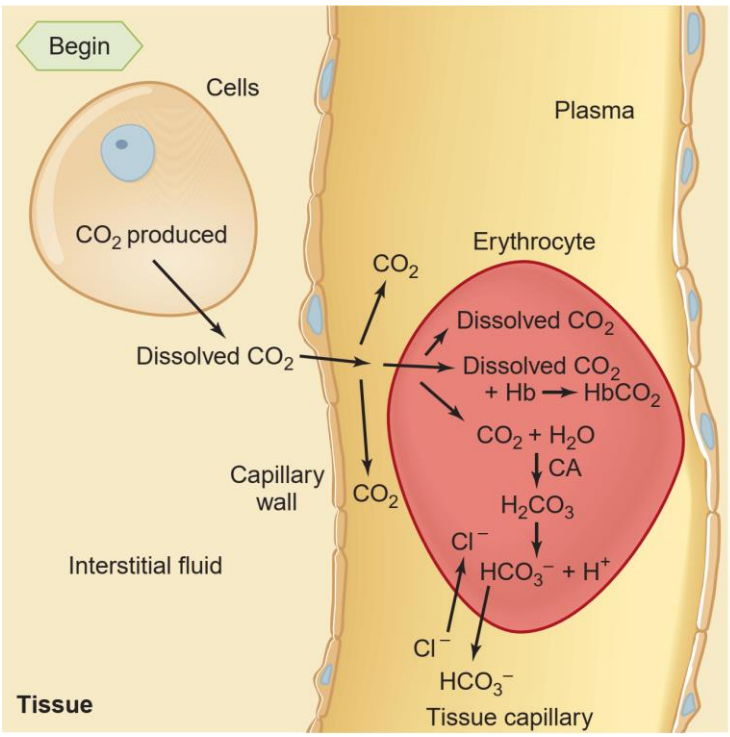
انتقال ثنائي أوكسيد الكربون على شكل بيكربونات

- يتم انتقال CO2 في مستوى الأنسجة والأسناخ عن طريق التفاعل الكيميائي العكوس التالي:

$$CO_2 + H_2O \Leftrightarrow H_2CO_3 \Leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$$

- يتواسط هذا التفاعل أنزيم أنهيدراز الكربوني Carbonic Anhydrase.

1. في مستوى الأنسجة:



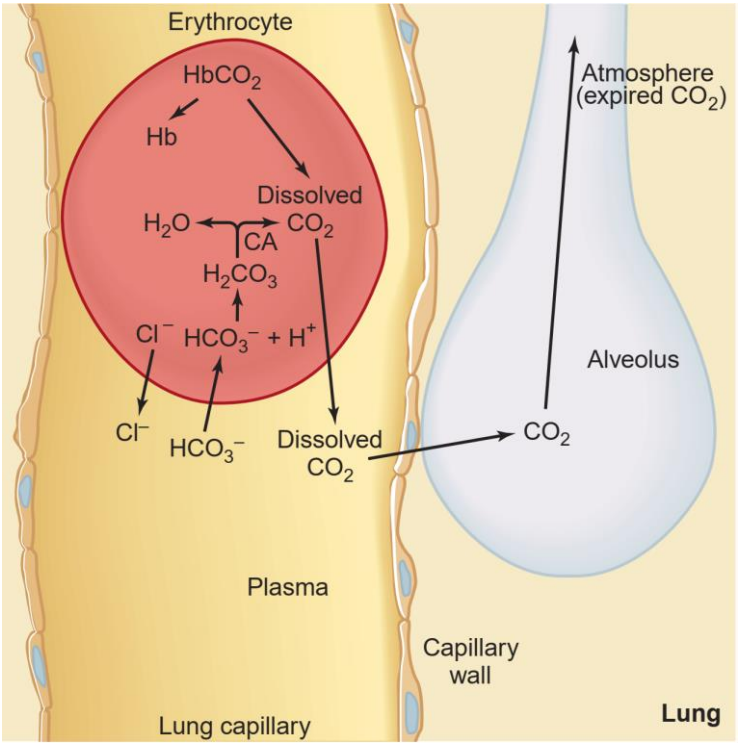
- تنتج الخلايا في الأنسجة CO_2.
- قسم منه ينحل في البلازما وقسم يدخل إلى الكريات الحمراء.
- يرتبط جزء منه داخل كريات الدم الحمراء بالهيموغلوبين مشكلاً كاربامينو هيموغلوبين.
- يتفاعل الجزء الأكبر منه بشكل عكوس مع الماء بتواسط أنزيم أنهيدراز الكربوني Carbonic Anhydrase كالتالي:

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

- يتفكك حمض الكربون (الضعيف) الناتج في الكرية ليعطي شاردتي الهيدروجين والبيكربونات: $H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$
- ترتبط شاردة الهيدروجين مع الخضاب، بينما تنتشر شاردة البيكربونات إلى البلازما بالتبادل مع شاردة كلور (للحفاظ على شحنة الكرية الحمراء-شحنة سالبة مقابل شحنة سالبة)، تدعى عملية التبادل هذه **بانزياح الكلور Chloride Shift**.

إن للخضاب وظيفة دارئة؛ فمن خلال ارتباطه بشوارد الهيدروجين، يسهم بالحدّ من تغيرات الـ PH.

2. في مستوى الأسناخ:



- تصل الكرية الحمراء إلى الرئتين.
- نقص تركيز CO_2 في الأسناخ الرئوية يحفز التفاعل العكوس السابق بالاتجاه المعاكس.
- لذلك يتم فك الارتباط بين شاردة الهيدروجين والخضاب، بالإضافة إلى دخول شاردة البيكربونات بالتبادل مع شاردة الكلور (لنفس الغاية)، ومن ثم حدوث التفاعل:

$$H^+ + HCO_3^- \rightarrow H_2CO_3$$

- ينتج حمض الكربون الذي يتفكك إلى جزيء ماء وCO_2:

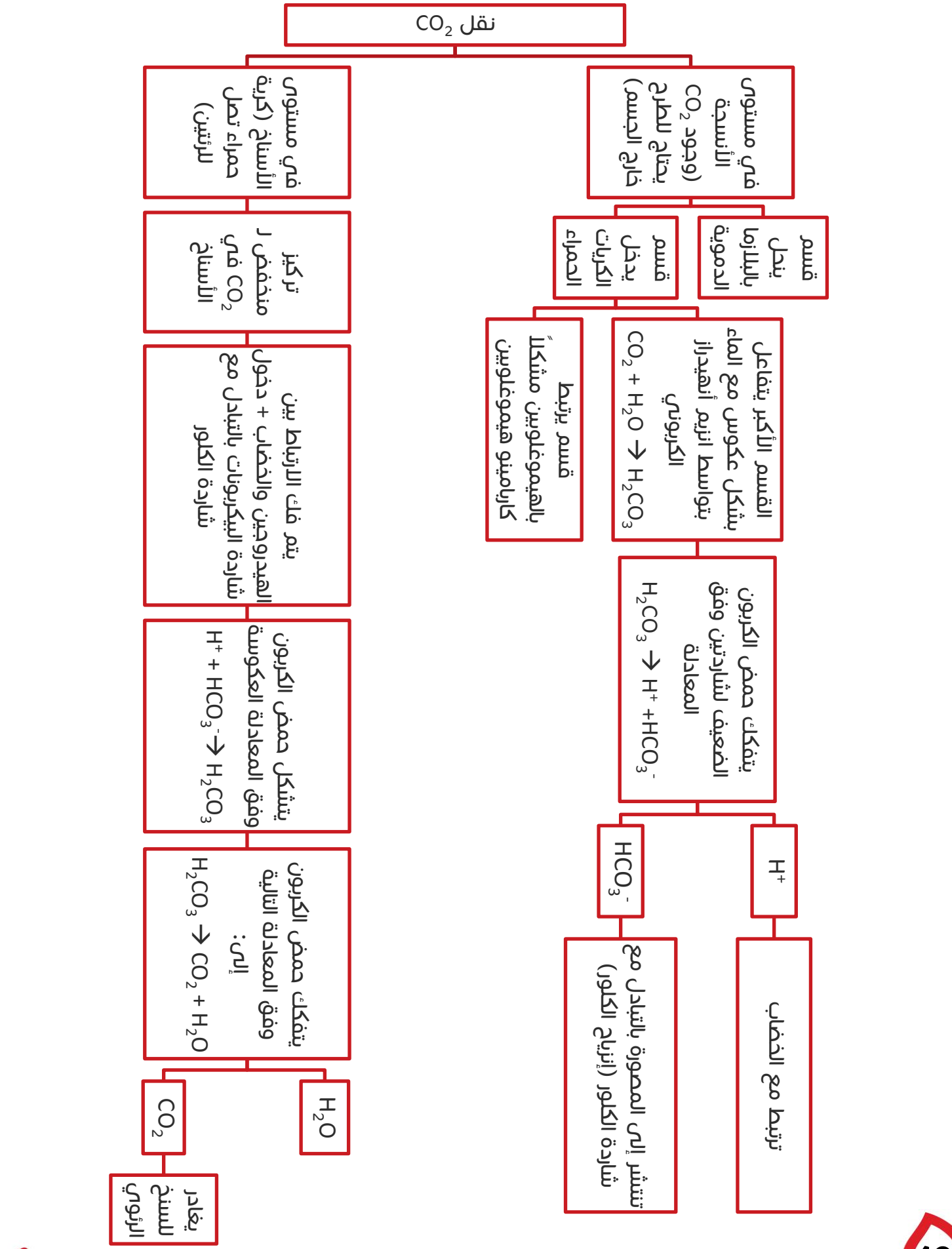
$$H_2CO_3 \rightarrow CO_2 + H_2O$$

- يغادر ثنائي أوكسيد الكربون الكرية إلى السنخ الرئوي.

ملاحظة:

- للجهاز التنفسي دور في المحافظة على التوازن الحمضي القلوي (وظيفة دارئة) لأنه يخلّص الجسم من شوارد البيكربونات أحياناً، فعند حدوث تسرع في التنفس يزداد إخراج CO_2، أي يزداد اتحاد شوارد البيكربونات مع شوارد الهيدروجين لتشكيل CO_2 وفق التفاعل العكوس السابق.
- الجهاز الأكثر أهمية في المحافظة على التوازن الحامضي القلوي هو **الجهاز البولي** (الكليتان).

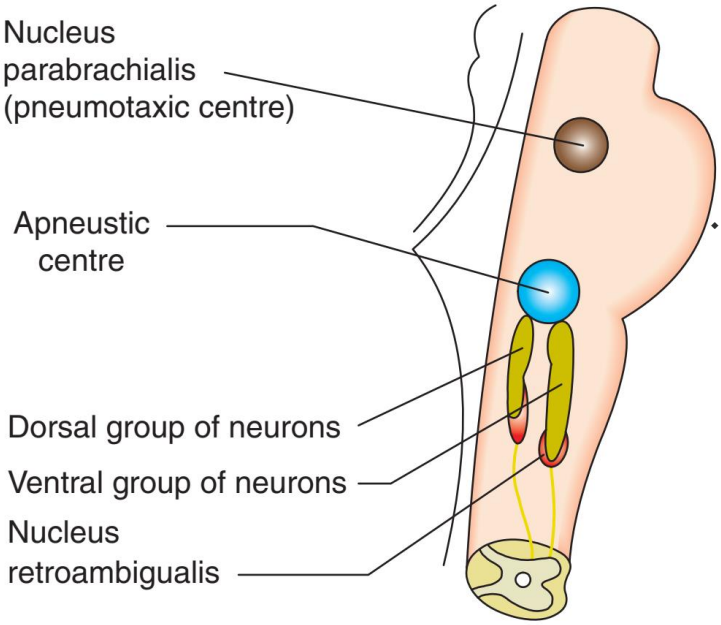
مخطط يلخص ما سبق *_*



تنظيم التنفس Respiratory Regulation

يقوم الجهاز العصبي بضبط معدل التهوية السنخية تبعاً لمتطلبات الجسم، ويتم ذلك من خلال:

- مجموعتان من المراكز التنفسية:
  1. مجموعة في البصلة السيسائية.
  2. مجموعة في جسر الدماغ.
- مجموعة من المستقبلات العصبية الكيميائية.



صورة توضّح المراكز العصبية التنفسية

مجموعة البصلة السيسائية Medullary Rhythmicity Aria

تمثل المجموعة الرئيسية في تنظيم التنفس، وتشمل مجموعتين هما:

المجموعة الظهرية Dorsal Group:

- مركز شهيقي، حيث أنّ كل العصبونات فيها شهيقية Inspiratory Neurons.
- يتولّد فيها إيقاعات نظمية ذاتية تحدث من خلالها (وبشكل مباشر) الشهيق العفوي من خلال إرسال أمر عصبي إلى العضلات الشهيقية الأساسية.

المجموعة البطنية Ventral Group:

- كانت تعتبر مركز زفيري حتى اكتشاف أنّها تحتوي على عصبونات شهيقية وزفيرية Inspiratory & Expiratory Neurons.
- تعمل فقط عند القيام بتمارين رياضية أو عند الزفير القسري، حيث أن بالزفير العفوي تبقى عصبونات المجموعة البطنية غير فعّالة (غير منبّهة) فهو يحدث بإشارة تثبيط للشهيق من قبل عصبونات هذه المجموعة، بينما بالزفير القسري فتتنبه العصبونات البطنية لكي يحدث الزفير قسراً.

- فهي مسؤولة عن كل من:[26]

☜ الزفير العفوي من خلال إيقاف مركز الشهيق من دون إرسال أوامر دماغية للعضلات الزفيرية (أي بشكل غير مباشر).

☜ الزفير القسري من خلال إرسال أوامر دماغية للعضلات الزفيرية (أي بشكل مباشر).

مجموعة جسر الدماغ Pons Neurons

Pneumotaxic Area:[27]

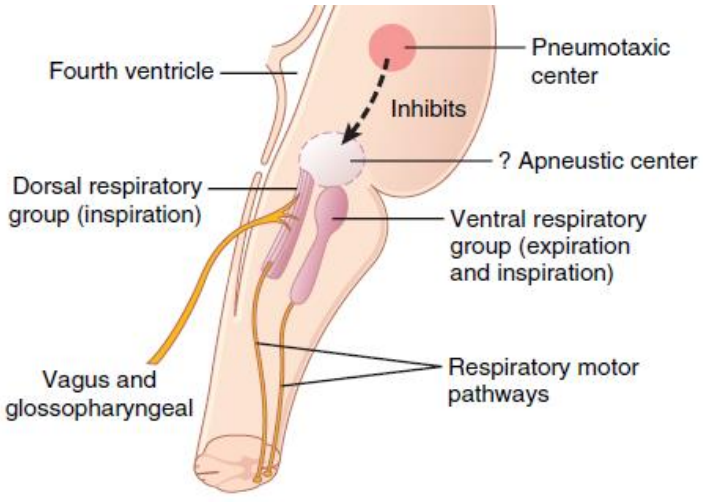
- مسؤولة عن تثبيط الشهيق Limiting Inspiration.

Apneustic Area:

- مسؤولة عن الشهيق القسري المطوّل Prolonging Inspiration.

توضيح (من مرجع Medical Physiology For Undergraduate Students):

- إن Apneustic Area تزيد من عمق الشهيق وتطوّله من خلال تنبيه العصبونات الشهيقية الموجودة في المجموعة الظهرية بالبصلة (كما في الصورة أدناه).
- أمّا Pneumotaxic Area فتثبط Apneustic Area وبالتالي يتوقف تنبيه العصبونات الشهيقية في المجموعة الظهرية؛ مما يؤدي لإنقاص وقت الشهيق وبدء الزفير.
- وبالتالي فإن لل Pneumotaxic Area دور مهم بالتناوب الحاصل بين الشهيق والزفير.



شكل يوضّح تثبيط

ال Pneumotaxic Area

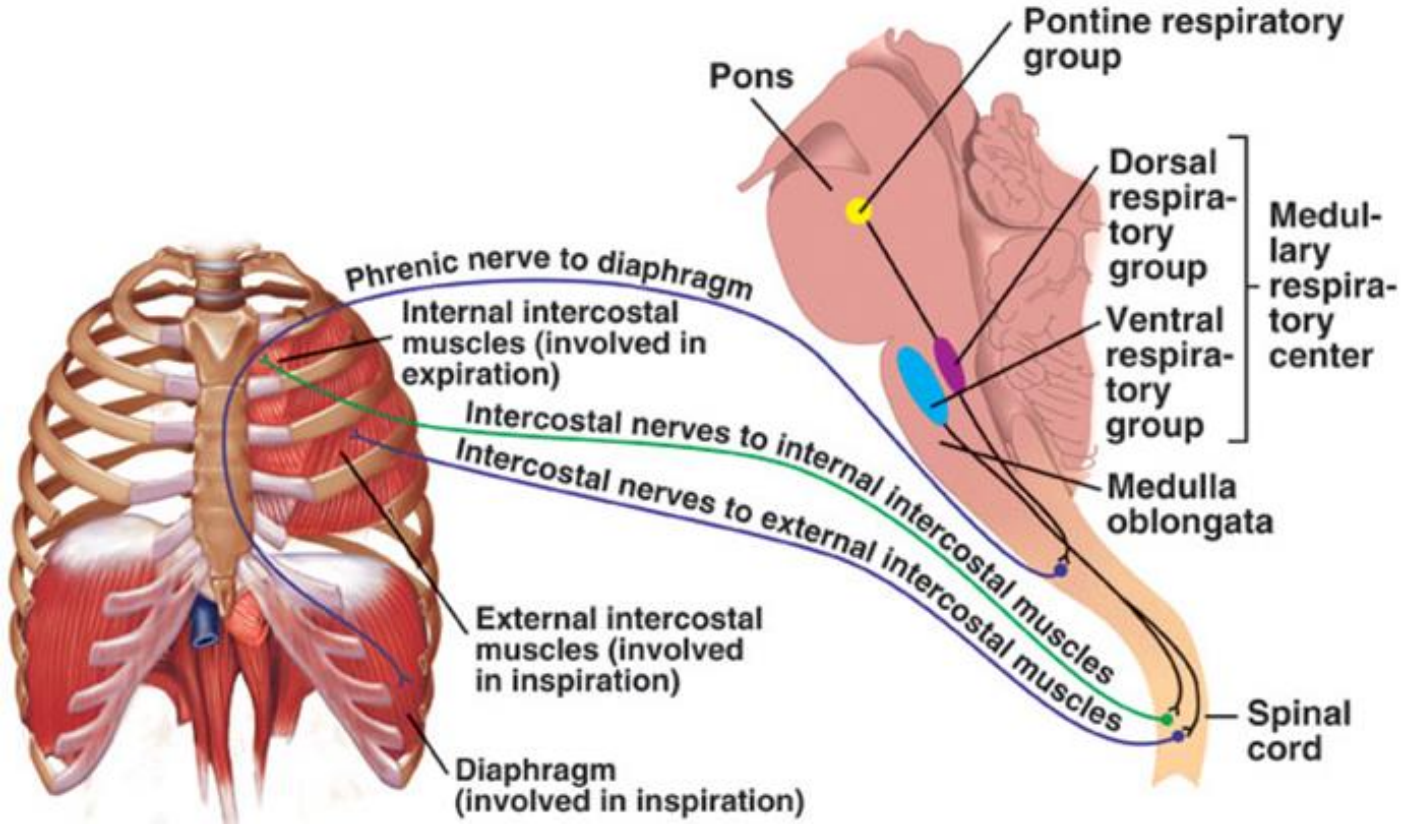
لـ Apneustic Area

[26] هكذا ذكر في المحاضرة، ولكن حسب مرجع Medical Physiology For Undergraduate Students المجموعة البطنية ليس لها علاقة بالتنفس العفوي، وتتفعل فقط في التنفس القسري.

[27] ذكر الدكتور أننا مطالبين بأسماء مجموعة جسر الدماغ باللغة الإنكليزية فقط.

ملاحظة:

يوجد مستقبلات موجودة قرب الأسناخ تدعى بمستقبلات تمدد الرئتين Lung Stretch Receptors، تتنبه عند زيادة توسّع الأسناخ، فترسل إشارات إلى المراكز المثبطة للشهيق (Pneumotaxic Area) فتوقفه.



صورة وردت في السلايدات نلاحظ فيها:

المجموعة الظهرية ترسل محاوير فقط إلى العضلات الشهيقية (الحجاب الحاجز هنا)

أما المجموعة البطنية فترسل محاوير إلى عضلات شهيقية وزفيرية (العضلات الوربية الداخلية والخارجية)

المراكز السابقة ترسل محاوير عصبية إلى عضلات تنفسية أخرى بالإضافة إلى العضلات الموجودة في الصورة

المراكز في جسر الدماغ تعمل من خلال تأثيرها على المراكز في البصلة

المستقبلات الكيميائية Chemoreceptors

تدعى المستقبلات التي تتحسّس تغيّر التركيب الكيميائي بالمستقبلات الكيميائيّة Chemoreceptors، وتقسم إلى:

مستقبلات محيطية Peripheral:

- توجد في الأجسام الأبهرية (حول قوس الأبهر) والجسمين السباتيين.
- تتحسس لنقص P_{O2} بشكل رئيسي وزيادة P_{CO2} و H^+ بشكل ثانوي في الدم الشرياني.
- آلية تنبيهها:

عندما تتحس لنقص P_{O2} بشكل رئيسي أو زيادة P_{CO2} و H^+ بشكل ثانوي

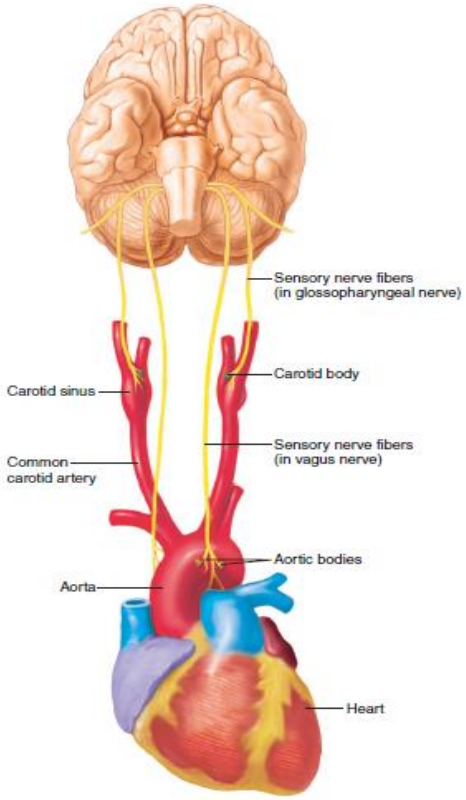
تقوم بتوليد سيالات عصبية وترسلها إلى العصبونات الموجودة في المجموعة الظهرية في البصلة (بالإضافة إلى المركز المحرّك الوعائي) وذلك من خلال ألياف واردة Afferent عبر:

العصب المبهم (إذا كان التنبيه من الأجسام الأبهرية).

العصب البلعومي اللساني (إذا كان التنبيه من الجسمين السباتيين)

هذا يؤدي إلى زيادة معدّل التنفس وزيادة عمق النّفَس بالإضافة إلى التنبيه الودّي للقلب

إنّ المستقبلات الكيميائية المحيطية هي الوحيدة التي تتحسّس نقص الـ P_{O2}.



شكل يوضّح المستقبلات المحيطية بالإضافة إلى الألياف الواردة عبر العصبين المبهم والبلعومي اللساني

مستقبلات مركزية Central:

- توجد في جذع الدماغ (في مناطق عميقة من البصلة) بالقرب من عصبونات المجموعة الظهرية.
- تتحس لزيادة H^+ المركزي (وذلك عند حالة حماض مثلاً) بشكل خاص الذي ينجم عن زيادة P_{CO2} المحيطي، حيث أنَّ وجود الحاجز الدماغي الدموي[28] يمنع شوارد الهيدروجين المحيطية من الوصول للمستقبلات المركزية.
- آلية تنبيهها:
  - ☜ زيادة CO_2 في الدّم.
  - ☜ يعبر CO_2 الحاجز الدماغي الدموي بسهولة من خلال الانتشار.
  - ☜ يصل CO_2 إلى السائل الدماغي الشوكي CSF والسائل الخلالي المحيط المستقبلات.
  - ☜ هذا يؤدي إلى زيادة H^+ المركزي من خلال التفاعل:

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-$$

  - ☜ وبالتالي تنبيه المستقبلات الكيميائية المركزية وزيادة عمق التنفس ومعدّله.

[28] يفصل بين الدم المحيطي والدم الموجود في الجملة العصبية المركزية، ولا يسمح لكل المواد بالمرور حمايةً للدماغ.

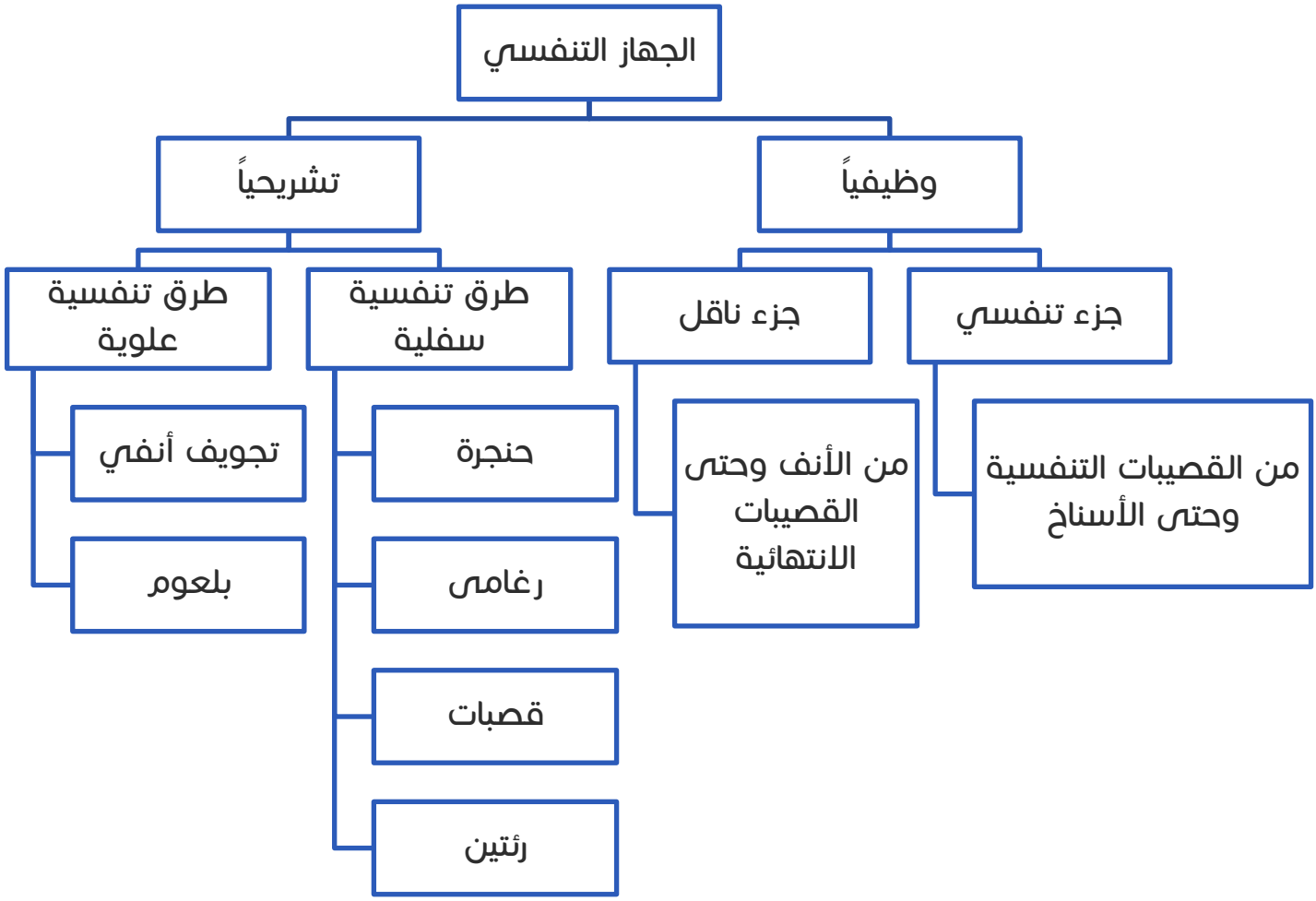
نستنتج أنّ ثنائي أوكسيد الكربون يؤثر على نوعي المستقبلات وبشكل خاص المستقبلات المركزية (إنذار مضاعف).

لذلك ترافق الزيادة (ولو كانت طفيفة) في PCO2 مع زيادة سريعة في عمق التنفس وعدد مرآته بشكل كبير.

ملاحظات:

- زيادة CO_2أو CO[29] أخطر على الجسم من نقص الأكسجين لأن درجة محبته (إلفته) للخضاب أكثر بـ 100 أو 200 مرة من الأكسجين، وبالتالي عند ازدياد نسبة CO_2بشكل كبير يصبح الخضاب مكربن ولا نستفيد منه في نقل الأكسجين.

Overview *-*

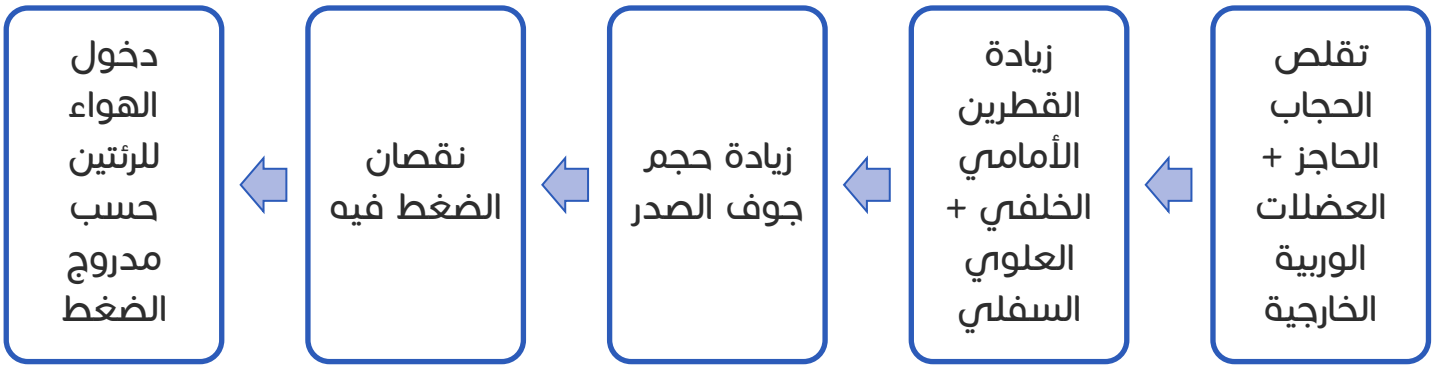


[29] CO هو الأخطر، يليه CO_2 ومن ثم O_2.

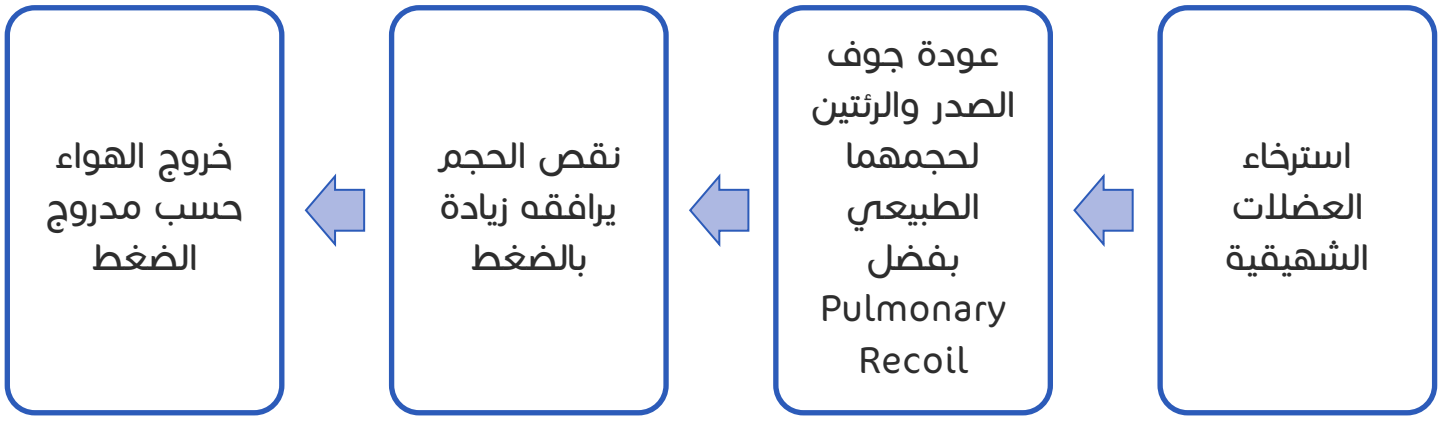
✓ الشهيق عملية فاعلة قسرياً كان أم عفوياً.

✓ الزفير العفوي منفعل، أما القسري فهو فاعل.

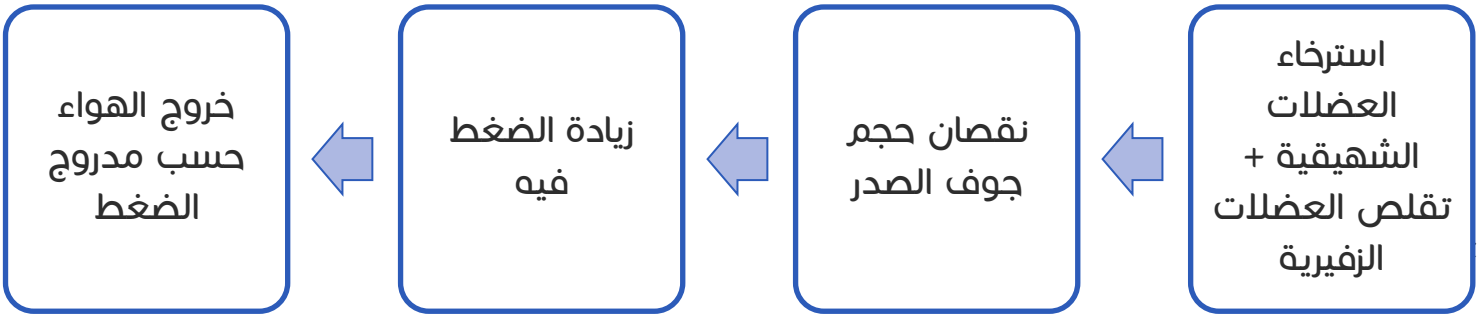
↙ آلية الشهيق العفوي:



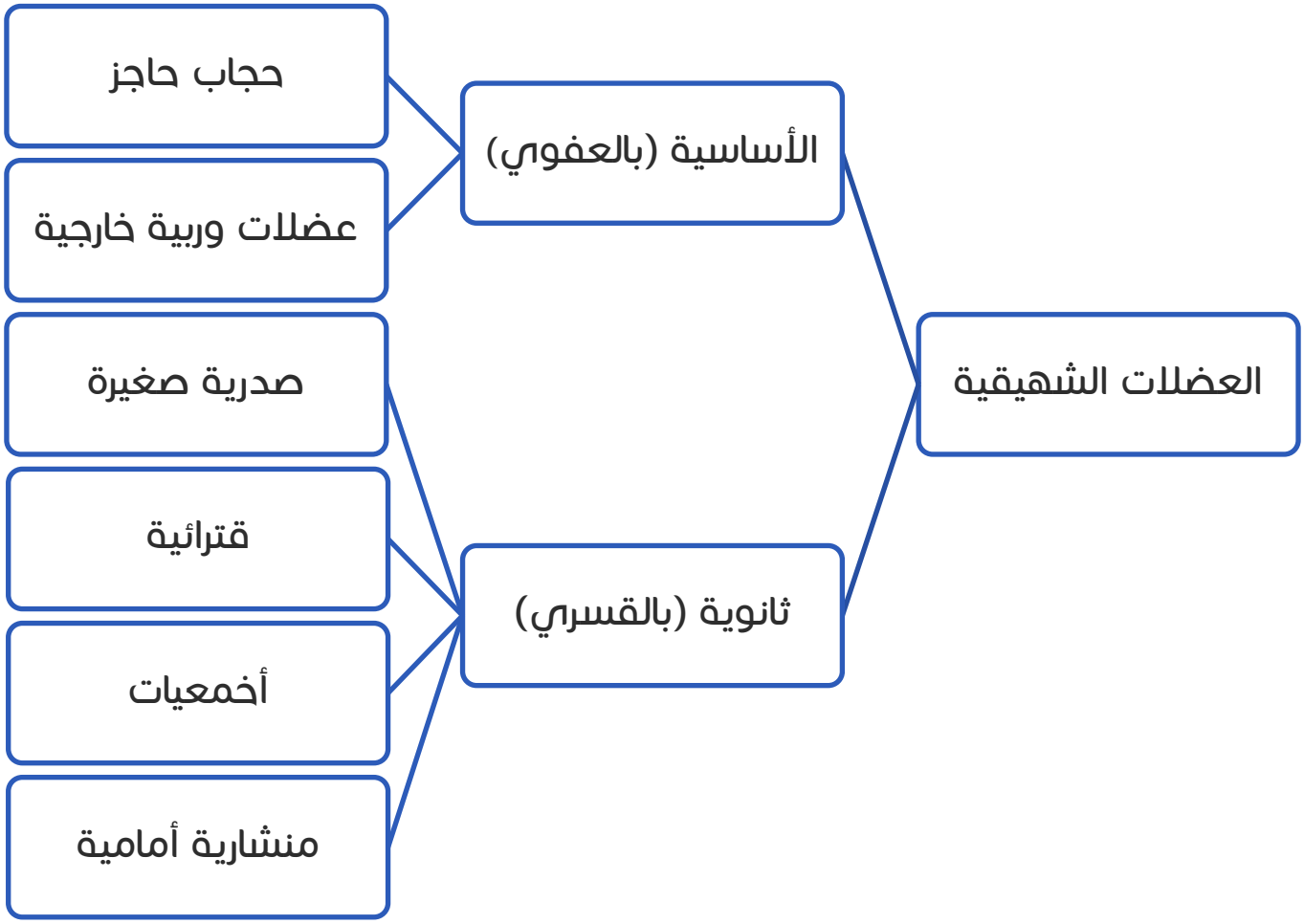
↙ آلية الزفير العفوي:



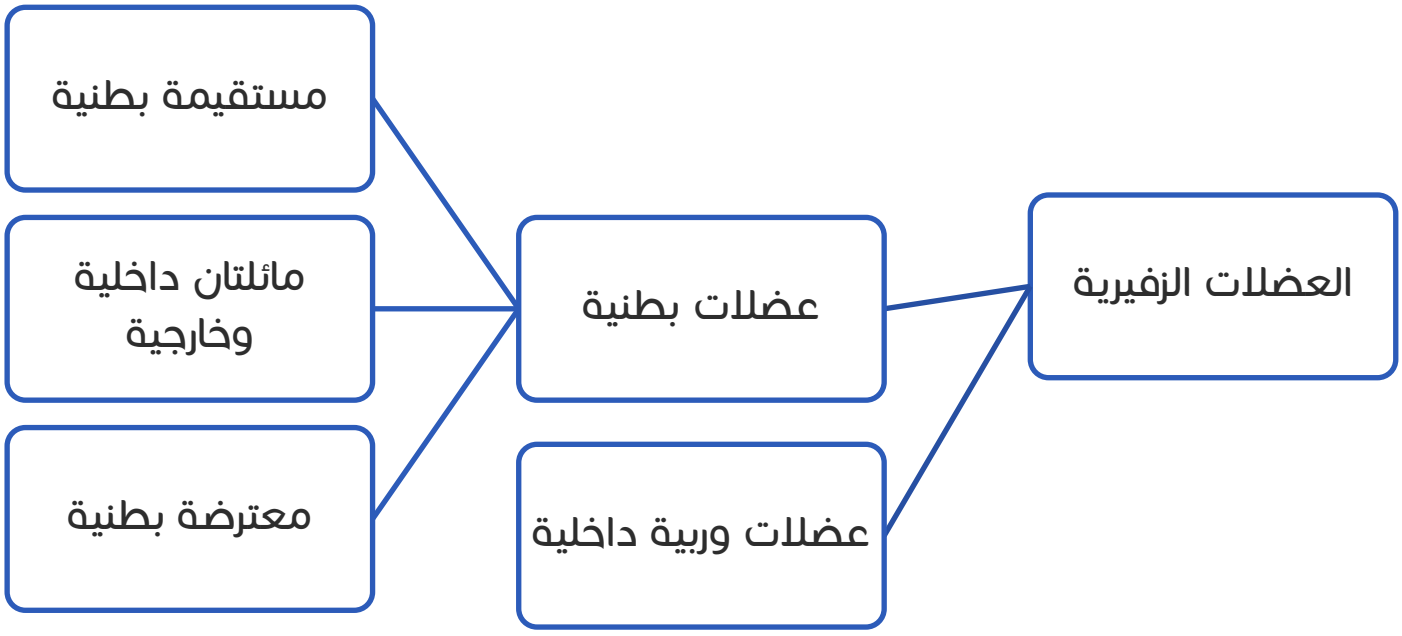
↙ آلية الزفير القسري:



العضلات الشهيقية:



العضلات الزفيرية:



↙ الضغوط المتحكمة بحركة الهواء:

ضغط جوي	ضغط جنبوي	ضغط داخل الأسناخ	ضغط عبر رئوي
ثابت 760 mmHg	سلبي دائماً 756 mmHg	متغيّر أثناء الشهيق يكون سلبي وأثناء الزفير إيجابي	الفرق بالضغط بين الضغط داخل الأسناخ والضغط بين وريقتي الجنب

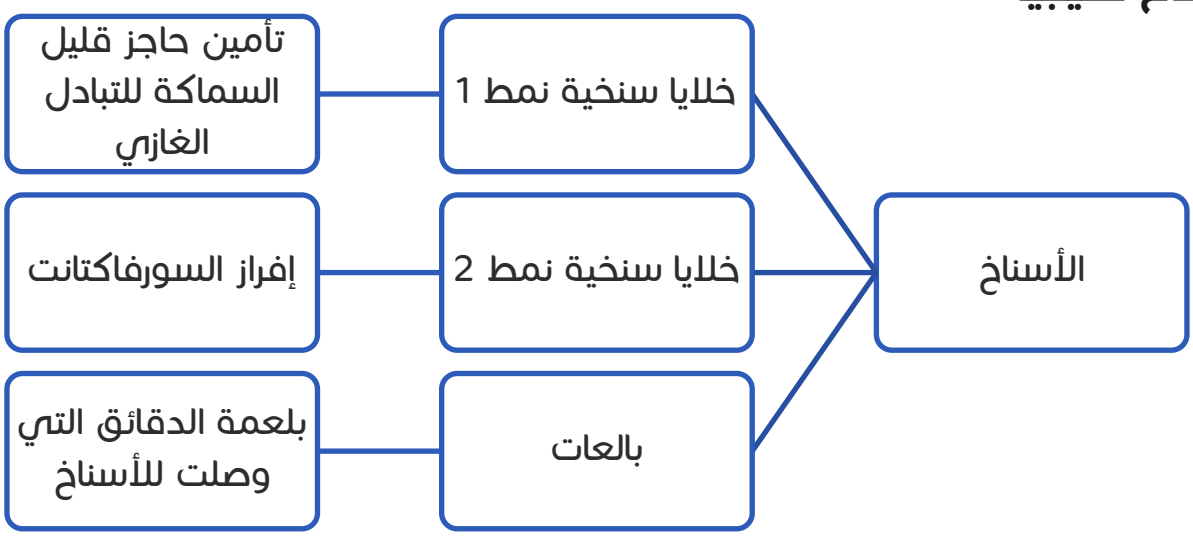
↙ الحجوم والسعات الرئوية:

الحجم الجاري TV	حجم الشهيق المدّخر IRV	حجم الزفير المدّخر ERV	الحجم الثمالي RV
الهواء المستنشق أو المزفور في كل نفس سوي	أقصى كمية يمكن استنشاقها زيادة على الحجم الجاري	أقصى كمية يمكن إخراجها من الرئتين بعد زفير سوي	الحجم الذي يبقى في الرئتين بعد زفير جهدي أقصى
		السعة الحيوية VC	
	السعة الشهيقية IC		السعة الوظيفية FVR
	السعة الكلية للرئة TLC		

نقص O2 في الأسناخ ← تضيق الأوعية الشعرية المجاورة للسنخ.

زيادة CO2في الأسناخ ← توسّع القصيبات المؤدية للسنخ.

↙ الأسناخ نسيجياً:



السورفاكتانت:

- ✓ مكوّن بشكل أساسي من شحميات فوسفورية.
- ✓ يخفّض التوتر السطحي للسائل السنخي.
- ✓ عوزه عند الخدّج يسبّب متلازمة الضائقة التنفسية.

نقل الأوكسجين في الدّم:

- ✓ 97% مع الهيموغلوبين في الكريات الحمراء.
- ✓ 3% بشكل منحل في البلازما.

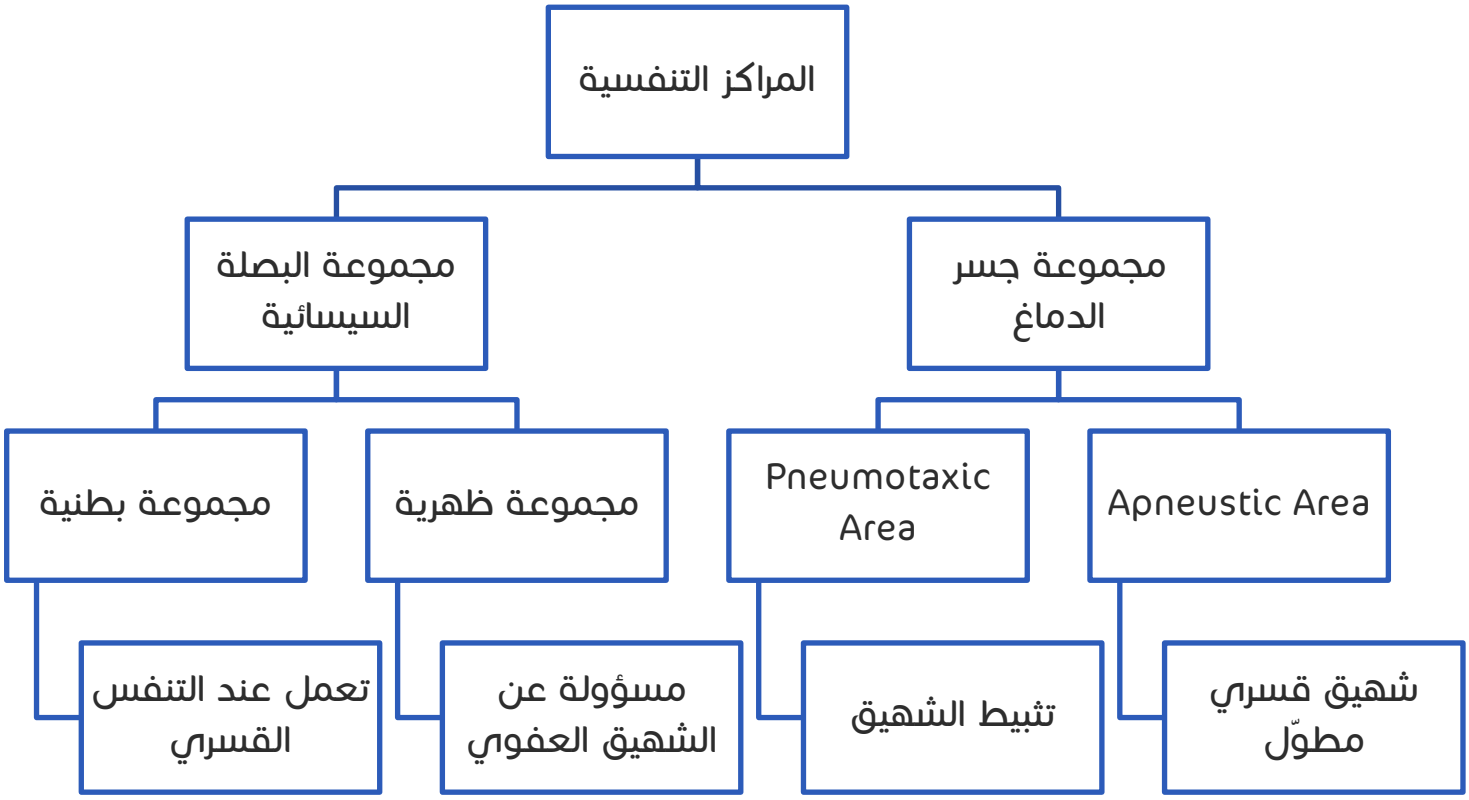
نقل ثنائي أكسيد الكربون في الدم:

- ✓ 70% على شكل بيكربونات.
- ✓ 23% مرتبطاً بالغلوبين في جزيء الهيموغلوبين.
- ✓ 7% بشكل منحل في البلازما.

انزياح منحنى تفارق أوكسجين – خضاب الدم:

نحو اليمين	نحو اليسار
ارتفاع كلاً من: درجة الحرارة، H^+، CO_2، DPG	انخفاض كلاً من: درجة الحرارة، H^+، CO_2

المراكز العصبية التنفسية:



↙ المستقبلات الكيميائية:

- ✓ المستقبلات المحيطية تتحسس لنقصان P_{O2} بشكل أساسي، وزيادة P_{CO2} وH^+ بشكل ثانوي.
- ✓ المستقبلات المركزية تتحسس زيادة H^+ المركزي فقط الذي ينجم عن زيادة P_{CO2} المحيطي.

وقبل ختام محاضرتنا ننتقل معكم إلى تصويبات في محاضرة فيزيولوجيا الدم 1 (الكريات الحمراء):

الصفحة/ السطر	الخطأ	التصويب
19/7	نسبة المكونات العضوية %1.5-0.9	المكونات غير العضوية %1.5-0.9
1/19	عند الصغار	عند الرضّع (إلى حد عمر السنة)
9/19	الهيموغلوبين هو الجزء البروتيني من الهيموغلوبين	الغلوبين هو الجزء البروتيني من الهيموغلوبين

تصويب في محاضرة فيزيولوجيا الدم 2 (الكريات البيض والصفيحات الدموية):

الصفحة/ السطر	الخطأ	التصويب
8/الثاني من الأسفل	فالعدلات تخفف الحساسية	فالحمضات تخفف الحساسية

وإلى هنا نصل لختام محاضرتنا

مع تمنياتنا لكم بالتوفيق والنجاح

لا تنسونا من صالح دعائكم *-*

RBCs