الفصل 37

التهوية الرئوية

إن الهدف الاساسي للتنفس هو توفير الاكسجين للأنسجة وإزالة ثاني أكسيد الكربون منها. ولتحقيق ذلك يمكن تقسيم التنفس إلى أربع حوادث وظيفية رئيسية: (1) التهوية الرئوية التي تعني تدفق الهواء داخلاً وخارجاً بين الجو وأسناخ الرئتين، (2) وانتشار الاكسجين وثاني أكسيد الكربون بين الأسناخ والدم، (3) ونقل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون بالدم وبسوائل الجسم إلى الخلايا ومنها، (4) وتنظيم التهوية ووظائف التنفس الأخرى. ويعنى الفصل الحالي بدراسة التهوية الرئوية. وتغطي الفصول الخمسة التالية الوظائف التنفسية الأخرى وفيزيولوجيا المشكلات التنفسية الخاصة الأخرى.

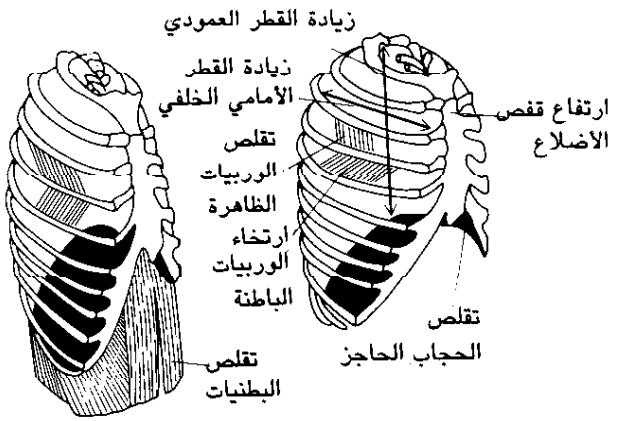
آليات التهوية الرئوية

العضلات التي تسبب توسّع الرئة وانقباضها

تتمكن الرئتان من الانقباض والتوسع بطريقتين: (1) بحركة الحجاب الحاجز للأسفل والأعلى لتطويل التجويف الصدري أو لتقصيره، (2) ورفع الأضلاع وخفضها لتزيد أو لتقلل القطر الأمامي الخلفي للتجويف الصدري. ويبين الشكل 37-1 هاتين الطريقتين.

ويتم التنفس الهادىء السوي بصورة كاملة تقريباً بالطريقة الأولى من هاتين الطريقتين، أي حركة الحجاب الحاجز، الذي يسحب بتقلصه أثناء الشهيق السطوح السفلية للرئتين ثم يرتخي عند الزفير مما يؤدي إلى الارتداد المرن elastic recoil للرئتين ولجدار الصدر وإلى انضغاط بنيات البطن. ولكن عند التنفس الشديد لا تكون قوى المرونة كافية لتوليد الزفير السريع الضروري، ولهذا تتولد قوة إضافية ضرورية للقيام بذلك، وبصورة رئيسية من تقلص عضلات البطن التي تدفع محتويات البطن للأعلى تجاه قاعدة الحجاب.

والطريقة الثانية لتوسيع الرئتين تتم برفع قفص الأضلاع. وتوسّع هذه الطريقة الرئتين لأنه في أوضاع الراحة الطبيعية تميل الأضلاع للأسفل، كما هو مبين في الجانب الأيسر من الشكل 37-1، فتسمح بذلك للقص sternum بالهبوط للخلف نحو العمود الفقري. ولكن عندما يرتفع القفص الضلعي تبرز الأضلاع إلى الأمام مباشرة فتحرك القص معها بعيداً عن العمود الفقري مولدة بعداً أمامياً خلفياً للصدر أكبر بحوالي 20% في حالة الشهيق القصوي مما هو عليه عند الزفير. ولذلك يمكن تصنيف العضلات التي ترفع القفص الصدري للأعلى كعضلات شهيقية وتلك التي تهبطه كعضلات زفيرية. وأهم العضلات التي ترفع القفص الضلعي العضلات الوربية الظاهرة external intercostals. أما العضلات الأخرى التي تساعد في ذلك لدرجة محدودة فهي (1) العضلتان القصيتان الترقويتان الخشائيتان sternocleidomastoid اللتان ترفعان القص للأعلى، (2) والمنشاريتان الأماميتان anterior serrati اللتان ترفعان العديد من الأضلاع، (3) والأخمعيتان scaleni اللتان ترفعان الضلعين الأولين.



الشكل 37-1. توسع القفص الصدري وتضيقه أثناء الشهيق والزفير مبيناً بصورة خاصة تقلص الحجاب وارتفاع القفص الضلعي ووظيفة العضلات الوربية.

أما العضلات التي تسحب القفص الضلعي للأسفل أثناء الزفير فهي (1) العضلتان المستقيمتان البطنيتان abdominal recti اللتان لهما تأثير قوي في سحب الأضلاع السفلية للأسفل، كما أنهما تتعاونان في نفس الوقت مع العضلات البطنية الأخرى للضغط على محتويات البطن للأعلى نحو الحجاب الحاجز (2) والعضلات الوربية الباطنة internal intercostals .

ويبين الشكل 37-1 أيضاً الآلية التي تعمل بها العضلات الوربية الظاهرة والباطنة في توليد الشهيق والزفير. فنرى إلى اليسار الأضلاع أثناء الزفير وهي مائلة للأسفل، والوربيات الظاهرة مطولة باتجاه أمامي سفلي. وعندما تتقلص فإنها تسحب الأضلاع العلوية إلى الأمام بالنسبة للأضلاع السفلية فيسبب ذلك دفعاً يرفع الأضلاع للأعلى فيولد الشهيق. كما تعمل الوربيات الباطنة بطريقة معاكسة تماماً، فهي تعمل كعضلات زفيرية لأنها تميل الأضلاع بالاتجاه المعاكس وتولد دفعاً معاكساً.

حركة الهواء إلى الرئتين ومنهما — والضغوط التي تولد ذلك

الرئة بنية مرنة تنكمش مثل النفاخة وتطرد كل هوائها خلال الرغامى عند عدم وجود قوة تحافظ على انتفاخها. كما أنه لا يوجد أي التصاق بين الرئة وجدران القفص الصدري ما عدا في موقع تدلّيها من المنصّف mediastinum عند نقيرها hilum. وعلى العكس من ذلك فالرئة في الواقع تطفو في التجويف الصدري وتحيط بها طبقة رقيقة من السائل الجنبوي الذي يزلق حركة الرئتين داخل القفص الصدري.

ولذلك يحافظ الضخ المستمر لهذا السائل إلى القنوات اللمفية على امتصاص قليل بين السطح الحشوي للجنبة الرئوية والسطح الجنبوي الجداري للتجويف الصدري. ولهذا تبقى الرئتان بتماس مع الجدار الصدري وكأنهما مغرّاتين به، ما عدا أنهما تتمكنان من الانزلاق عليه بحرية وكأنهما مزيتتان، عند توسع الصدر وهبوطه.

الضغط الجنبوي وتغيراته أثناء التنفس

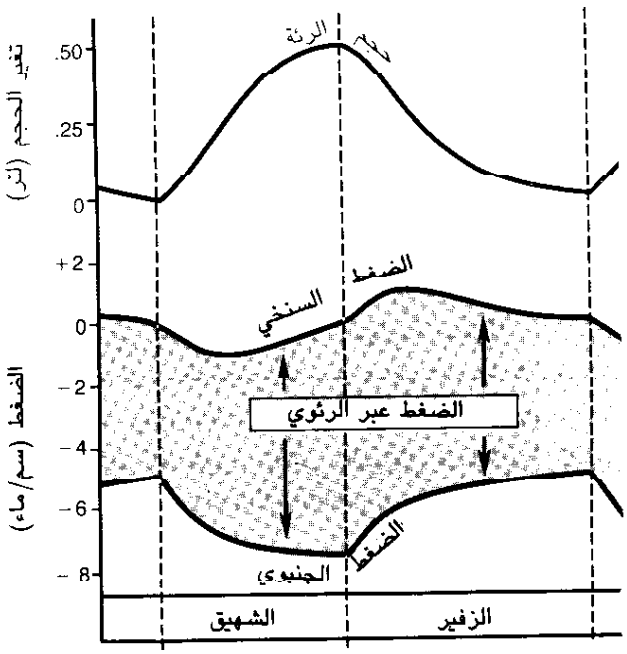
الضغط الجنبوي pleural pressure هو الضغط في الحيز الضيق بين جنبة الرئة وجنبة جدار الصدر. وكما لاحظنا أعلاه هناك مص قليل بينهما يولد ضغطاً سلبياً واطئاً. إذ يبلغ الضغط الجنبوي السوي عند بدء الشهيق حوالي −5 سنتيمترات من الماء، وهو يمثل كمية المص الضروري للاحتفاظ بالرئتين مفتوحتين عند مستوى راحتهما. ويسحب توسع القفص الصدري أثناء الشهيق السوي سطح الرئتين بقوة أكبر فيخلق ضغطاً سلبياً أكبر يصل إلى مستوى يبلغ −7.5 سنتيمترات من الماء.

ويبين الشكل 37-2 العلاقة بين الضغط الجنبوي وتغير حجم الرئة. فهو يبين في جزئه الأسفل زيادة سلبية للضغط الجنبوي من −5 إلى −7.5 سم أثناء الشهيق ويبين في جزئه العلوي زيادة حجم الرئة بمقدار 0.5 لتر. وتنعكس كل هذه الأحداث أثناء عملية الزفير.

الضغط السنخي

الضغط السنخي هو الضغط داخل أسناخ الرئة. فعندما يكون المزمار glottis مفتوحاً ولا يجري أي هواء إلى داخل أو خارج الرئتين، يكون الضغط في كل أقسام الشجرة التنفسية وعلى طولها حتى الأسناخ مساوياً للضغط الجوي الذي يعتبر مساوياً لصفر سنتيمتر ضغط مائي. ولكي يتولد جريان هوائي إلى داخل الرئتين أثناء الشهيق لا بد وأن يهبط ضغط الأسناخ إلى حدٍ أوطأ قليلاً من الضغط الجوي. ويبين الخط الداكن الثاني من الشكل 37-2 نقصان ضغط الأسناخ أثناء الشهيق السوي إلى حوالي −1 سم ماء. وهذا الضغط السلبي البسيط كاف لتحريك حوالي 0.5 لتر من الهواء إلى الرئتين في الثانيتين اللازمتين للشهيق.

وتحدث تغيرات عكسية لذلك أثناء الزفير. إذ يرتفع الضغط السنخي إلى حوالي +1 سم ماء فيرفع ذلك كمية 0.5 لتر من هواء الشهيق إلى خارج الرئتين خلال الثانيتين أو الثلاث للزفير.



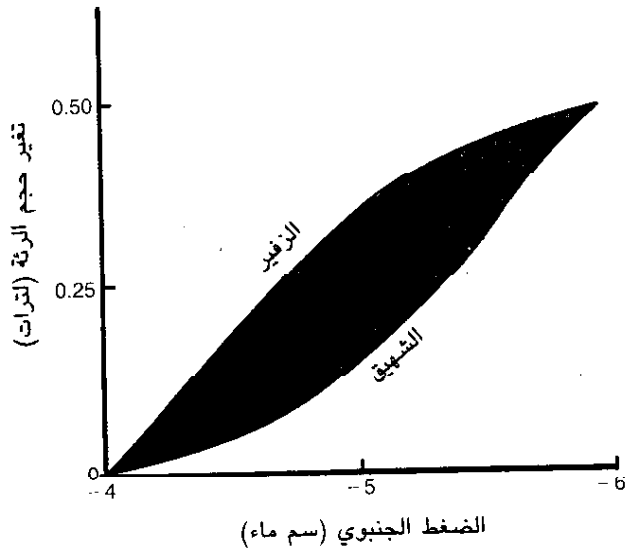
الشكل 37-2. تغيرات حجم الرئة والضغط السنخي والضغط الجنبوي والضغط عبر الرئة أثناء التنفس السوي.

الضغط عبر الرئة. وأخيراً يلاحظ في الشكل 37-2 فرق الضغط بين الضغطين السنخي والجنبوي والذي يسمى الضغط عبر الرئة transpulmonary pressure. هو الفرق بين ضغطي الأسناخ والسطوح الخارجية للرئتين، وهو في الواقع يمثل مقياس قوى المرونة في الرئتين التي تحاول خمصهما collapse عند كل نقطة من نقاط توسعهما، ويسمى لذلك ضغط الارتداد recoil pressure.

مطاوعة الرئتين

يسمى مدى توسع الرئتين لكل زيادة وحدة ضغط عبرهما مطاوعة الرئتين compliance of the lungs. ويبلغ معدل المطاوعة الكلية لدى الرجال البالغين حوالي 200 مل/سم ضغط مائي ولكنه يتغير تقريباً بالنسبة للشخص غير البدين. أي عند زيادة الضغط عبر الرئة بمقدار 1 سم ماء تتوسع الرئتان 200 مليلتر.

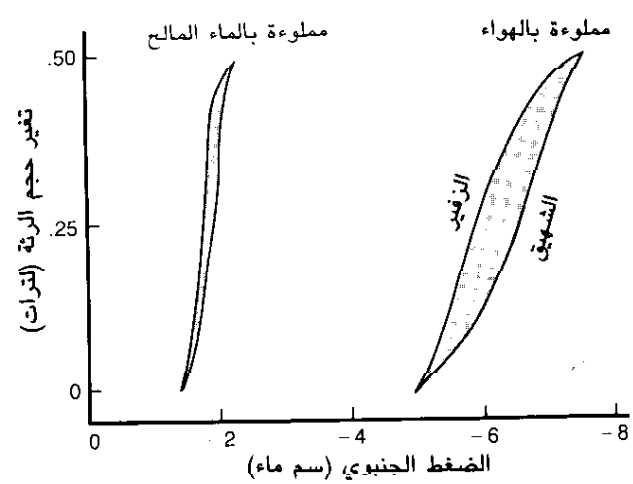
مخطط مطاوعة الرئتين. يبين الشكل 37-3 العلاقة بين تغيرات حجم الرئة وتغيرات الضغط عبرها. ويلاحظ بأن هذه العلاقة تختلف في الشهيق عما هي عليه في الزفير. ويتم تسجيل كل واحد من هذه المنحنيات بتغيير الضغط عبر الرئة بدرجات صغيرة والسماح لحجمها ليصل إلى مستوى ثابت بين كل درجتين متتاليتين. ويسمى هذان المنحنيان منحنى المطاوعة الشهيقية ومنحنى المطاوعة الزفيرية. ويسمى الشكل كله مخطط مطاوعة الرئتين.



الشكل 37-3. مخطط المطاوعة لشخص سوي. ويظهر هذا المخطط مطاوعة الرئتين فقط.

وتتعين خواص مخطط المطاوعة هذا بقوى مرونة الرئتين التي يمكن تقسيمها إلى قسمين منفصلين: (1) قوى مرونة نسيج الرئة نفسها، (2) وقوى المرونة التي تتولد عن التوتر السطحي للسائل الذي يغطي الجدران الداخلية للأسناخ والأحياز الهوائية الأخرى.

وتتعين قوى مرونة أنسجة الرئة بصورة رئيسية بالإيلاستين elastin وبألياف الكلاجين المتناسجة بين متن الرئة، حيث تكون هذه الألياف في الرئة المفرغة في حالة تقلص جزئي وملتوية ولكنها تصبح عندما تتوسع



الشكل 37-4. مقارنة مطاوعة الرئتين عند امتلاءهما بالهواء، وعند امتلاءهما بالمحلول الملحي.

الرئة متمددة جزئياً وغير ملتوية تقريباً ولذلك تتمدّد ولكنها تستمر في بذل قوة مرنة لتعود إلى حالتها الطبيعية.

أما قوى المرونة التي تتولد من التوتر السطحي فهي أكثر تعقيداً ولكنها مسؤولة عن حوالي ثلثي مجموع قوى المرونة في الرئة السوية. ويبين الشكل 4-37 أهمية التوتر السطحي، إذ تقارن في هذا الشكل مطاوعة الرئتين عند امتلائهما بالهواء مع مطاوعتهما عند امتلائهما بالمحلول الملحي. فعند امتلائهما بالهواء يكون هناك سطح فاصل بين السائل المبطن للأسناخ والهواء الموجود فيها، أما عند امتلائهما بالمحلول الملحي فلن يكون هناك هذا السطح الفاصل بين الهواء والسائل ولذلك لن يكون هناك أي توتر سطحي ـ فلا توجد عند ذاك إلا قوى مرونة النسيج لتعمل لوحدها في الرئة المملوءة بالمحلول الملحي.

ويلاحظ أن ضغط عبر الرئة الذي يتطلبه توسيع الرئتين الممتلئتين بالهواء يبلغ حوالي ثلاثة أضعاف الضغوط المطلوبة لتوسيع الرئتين الممتلئتين بالسائل الملحي. ولهذا يمكننا أن نستنتج بأن قوى المرونة التي تحاول أن تخمص الرئة المملوءة بالهواء هي حوالي ثلث مجموع مرونة الرئة، بينما تمثل قوى التوتر السطحي ثلثيها الباقيين.

وكثيراً ما تتغير قوى التوتر السطحي للرئتين بصورة كبيرة عند غياب المادة المسماة الفعال بالسطح surfactant في السائل السنخي. ولهذا فلنبحث الفعّال بالسطح وعلاقته بقوى التوتر السطحي.

«الفعّال بالسطح» والتوتر السطحي وانخماص الرئتين

أسس التوتر السطحي. عندما يكوّن الماء سطحاً مع الهواء تكون لجزيئاته السطحية قوة جذب إضافية لبعضها البعض. ولذلك فإن لسطح الماء دائماً نزعة لأن يتقلص. وهذا هو الذي يؤدي إلى تماسك قطرات ماء المطر، وذلك بوجود غشاء قلوص محكم مكون من جزيئات الماء حول كل سطح قطرة مطر. ولنعكس الآن هذه الأسس لنرى ما يحدث على السطوح الداخلية للأسناخ. فهنا يحاول سطح الماء أن يتقلص أيضاً. ومن الواضح أن هذه المحاولة تؤدي إلى دفع الهواء إلى خارج الأسناخ خلال القصبات، وتحاول الأسناخ (والأحياز الهوائية الأخرى في الرئة) بعملها هذا أن تنخمص. ولما كان ذلك يحدث في كل الأحياز الهوائية للرئتين فيكون حاصل ذلك توليد قوة قلوصة مرنة في كامل الرئتين تسمى القوة المرنة للتوتر السطحي surface tension elastic force.

«الفعال بالسطح» وتأثيره على التوتر السطحي. الفعال بالسطح عامل فعال بالسطح surface acting agent. وهذا يعني أنه يقلل التوتر السطحي كثيراً جداً عند انتشاره على سطح السائل. وهو يُفرَز من الخلايا الظهارية الإفرازية للفعال بالسطح التي تكوّن حوالي 10% من المساحة السطحية للأسناخ. وهذه الخلايا هي ذات طبيعة حبيبية وتحوي مشتملات شحمية lipid inclusions، وهي تسمى الخلايا السنخية الظهارية نمط II.

والفعال بالسطح خليط معقد لعدة شحميات فسفورية وبروتينات وأيونات. وأهم ثلاثة مكونات له هي الشحم الفسفوري ثنائي بالميتول فسفاتيديل كولين dipalmitoylphosphatidylcholine وأبوبروتين (صميم بروتيني) الفعال بالسطح وأيونات الكالسيوم. وثنائي بالميتول فسفاتيديل كولين مسؤول مع العديد من الشحميات الفسفورية الأقل أهمية عن تقليل التوتر السطحي. وهذه كلها غير ذؤوبة بالسائل بل إنها تنتشر على السطح لأن أحد أقسام جزيء الشحم الفسفوري يكون أليفاً للماء فيذوب في الماء المبطِّن للأسناخ، بينما يبقى قسمه الشحمي كارهاً للماء ومعرضاً للهواء. ولهذا السطح توتر سطحي يساوي 1/12 – 1/2 التوتر السطحي للماء النقي. ويتوقف توتر السطح الصحيح على تركيز جزيئات الفعال بالسطح على السطح وتوجيهها. أما أهمية أبوبروتين الفعال بالسطح وأيونات الكالسيوم فهي تكمن في أن غيابهما يجعل ثنائي بالميتول فسفاتيديل كولين ينتشر ببطء شديد على سطح السائل مما يمنعه من القيام بوظيفته بكفاءة.

وبالتعابير الكمية فإن التوتر السطحي لمختلف السوائل المائية هو تقريباً كالآتي: للماء النقي 72 داين/سم، وللسوائل السوية التي تبطن الأسناخ من دون الفعال بالسطح 50 داين/سم، وللسوائل التي تبطن الأسناخ بوجود الفعال بالسطح بين 5 و 30 داين/سم.

الضغط الانخماصي للأسناخ المغلقة بسبب التوتر السطحي. يؤدي التوتر السطحي في حالة انغلاق الممرات الهوائية التي تفضي إلى الأحياز الهوائية للرئتين، والذي يسبب انخماصها، إلى توليد ضغط موجب في الأسناخ فيحاول دفع الهواء للخارج. ومن الممكن حساب مقدار الضغط الذي يتولد بهذه الطريقة في حيز هوائي كروي من القاعدة التالية:

$$\text{الضغط} = \frac{2 \times \text{التوتر السطحي}}{\text{نصف القطر}}$$

ويولد السنخ المعتدل الحجم بنصف قطر يبلغ حوالي 100 ميكرومتر ومبطن بالفعال بالسطح حوالي 4 سم من ضغط الماء (3 ملم ز). ولكن عندما يكون السنخ ممتلئاً بالماء يكون الضغط حوالي 18 سم ماء. وبهذا نرى أهمية الفعال بالسطح في تقليل كمية الضغط عبر الرئة اللازمة لإبقاء الرئتين متوسعتين.

تأثير حجم الأسناخ على ضغط الانخماص الناتج من التوتر السطحي. يلاحظ من القاعدة المذكورة أعلاه بأن ضغط الانخماص المولد في الأسناخ يتأثر عكسياً مع نصف قطر السنخ. وذلك يعني بأنه كلما كان السنخ أصغر كان ضغط الانخماص أعلى. ولذلك فإذا كانت للأسناخ أقطار تساوي نصف المعدل السوي، أي 50 ميكرومتراً بدلاً من 100 ميكرومتر، تتضاعف تماماً عند ذاك الضغوط الانخماصية المشار إليها أعلاه. ولهذا أهمية خاصة في الأطفال الخدّج صغيري الحجم جداً الذين لهم أسناخ ذات أقطار أقل من ربع السوي. وبالإضافة لذلك فإن الفعال بالسطح لا يبدأ بالإفراز إلى الأسناخ في العادة إلا عند الشهر السادس أو السابع من الحمل وفي بعض الإجنة إلى ما بعد ذلك. ولهذا لا يكون للأطفال الخدج إلا القليل من الفعال بالسطح أو لا يكون لديهم أية كمية منه أبداً، ولهذا تكون لرئات هؤلاء الأطفال نزعة للانخماص وأحياناً لحد 30 ملم ز وأكثر فيولّد ذلك الحالة التي تسمى متلازمة الضائقة التنفسية للوليد respiratory distress syndrome of the newborn، وهي حالة مميتة ما لم تعالج بوسائل فعالة.

دور الفعال بالسطح و«التواكل» والنسيج الليفي الرئوي في «تثبيت» حجوم الأسناخ. لنرى الآن ما كان سيحدث عندما يكون العديد من أسناخ الرئة صغيراً جداً وبعضها الآخر كبيراً جداً. فعند ذاك تكون نزعة انخماص الأسناخ الصغيرة أكبر كثيراً من تلك التي للأسناخ الكبيرة، ولذلك تنزع الأسناخ الصغيرة نظرياً إلى الانخماص والتقليل من حجمها في الرئتين. ويؤدي فقدان جزء من الرئتين إلى توسع الأسناخ الكبيرة، وتزداد نزعة انخماص الأسناخ الصغيرة كلما صغر حجمها بينما تقل نزعة انخماص الأسناخ الكبيرة المتوسعة، ولذلك تنخمص نظرياً كل الأسناخ الصغيرة في النهاية مما يؤدي إلى توسع الأسناخ الكبيرة إلى حجوم أكبر. وتسمى هذه ظاهرة عدم ثبات الأسناخ instability of the alveoli.

لكن من الناحية العملية لا تحدث ظاهرة عدم ثبات الأسناخ في الرئة السوية بالرغم من حدوثها فيها تحت ظروف خاصة أحياناً، مثلاً عند وجود كمية قليلة جداً من الفعال بالسطح في السائل السنخي في بعض الحالات مع نقص حجم الرئتين في ذات الوقت. وهناك عدة أسباب لعدم حدوث ظاهرة عدم ثبات الأسناخ في الرئة السوية. ومن هذه الأسباب الظاهرة التي تسمى «التواكل» interdependence بين الأسناخ المتجاورة والقنوات السنخية والأحياز الهوائية الأخرى. أي أن كلاً من هذه الأحياز يثبت الحيز الآخر المجاور له بطريقة لا تبقي سنخاً كبيراً بجنب آخر صغير لأنهما يشتركان بجدار حاجزي واحد، وهذه هي ظاهرة التواكل.

والسبب الثاني لعدم حصول ظاهرة عدم الثبات هو أن الرئة مكونة من 50000 وحدة وظيفية تحوي كل واحدة منها قناة سنخية أو بضع قنوات مع الأسناخ المرتبطة بها، وهذه كلها محاطة بحواجز ليفية تنفذ من سطح الرئة إلى متنها وتعمل هذه الحواجز الليفية كفواصل إضافية بين الوحدات الوظيفية.

وأخيراً يجب أن لا ننسى دور الفعال بالسطح في مقاومة عدم الثبات. فهو يقوم بذلك بطريقتين منفصلتين. فهو يقلل أولاً مجموع كمية التوتر السطحي مما يتيح لظاهرة التواكل والحواجز الليفية مقاومة تأثيرات التوتر السطحي. وثانياً، عندما يصغر السنخ تنكبس جزيئات الفعال بالسطح على السنخ على بعضها فيزداد تركيزها مما يقلل التوتر السطحي إلى درجة أخرى. ولهذا فكلما صغر حجم السنخ قلّ توتره السطحي مما يقاوم النزعة الإضافية لانخماص الأسناخ الصغيرة. وعلى العكس من ذلك إذا زاد حجم الأسناخ يقل تركيز جزيئات الفعال بالسطح ويزداد التوتر السطحي فيقاوم ذلك أية زيادة إضافية في حجم الأسناخ الكبيرة.

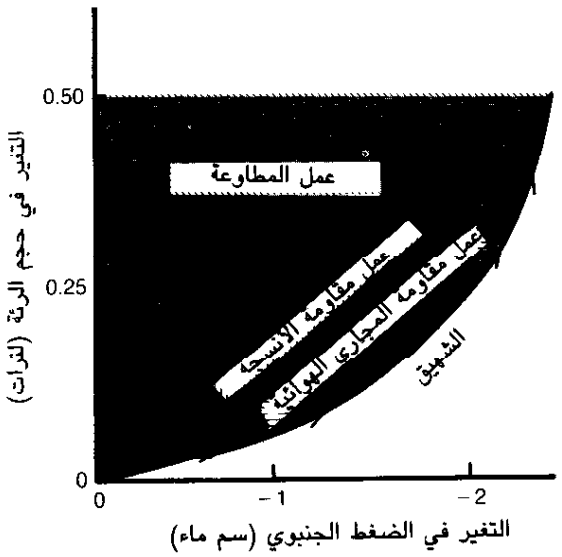
تأثير القفص الصدري على توسعيّة الرئة

لقد بحثنا لحد الآن توسعية الرئتين وحدهما من دون أي اعتبار للقفص الصدري، ولكن لهذا القفص أيضاً خواصه المرنة واللزجة الشبيهة بتلك التي في الرئتين، وحتى لو لم تكن الرئتان موجودتين في لقفص الصدري فلا بد من جهد عضلي كبير لتوسيعه.

المطاوعة المجتمعة للصدر والرئتين

تقاس مطاوعة compliance كل الجهاز التنفسي (الرئتان والقفص الصدري سوية) عادة أثناء توسع

الرئتين في شخص مرتخ تماماً أو مشلول. وللقيام بذلك يضخ قليل من الهواء إلى الرئتين في كل مرة أثناء تسجيل ضغوط الرئة وحجومها. ولقد ثَبُت أننا نحتاج لتنفيس كل الجهاز التنفسي ضعف الضغط الذي نحتاجه لتنفيس نفس رئتي هذا الجهاز بعد ازالتها من القفص الصدري. ولهذا فإن مطاوعة الجهاز الرئوي ـ الصدري المشترك هي أكثر قليلاً من نصف مطاوعة الرئتين وحدهما، −110 مليلترات من الحجم لكل سم ماء الجهاز المشترك مقارنة بـ 200 مل/سم ماء للرئتين وحدهما. وبالإضافة لذلك فعند توسع الرئتين إلى حجوم كبيرة جداً أو انضغاطهما إلى حجوم صغيرة جداً تصبح تحديدات الصدر كبيرة ويمكن أن تكون مطاوعة الجهاز الرئوي ـ الصدري المشترك قليلة لحد خمس مستواها في الرئتين وحدهما.



الشكل 37-5. التمثيل التخطيطي للأنماط الثلاثة المختلفة للشغل الذي ينجز أثناء التنفس (1) شغل المطاوعة، (2) شغل مقاومة الأنسجة، (3) شغل مقاومة المجاري الهوائية.

«شغل» التنفس

أشرنا سابقاً بأنه أثناء التنفس الهادىء السوي تتقلص عضلات التنفس أثناء الشهيق فقط، بينما يكون الزفير عملية لافاعلة تماماً وتتولد من الارتداد المرن للرئة وللبنيات الصدرية. ولهذا تقوم العضلات التنفسية من الحالة السوية بأداء «شغل» في توليد الشهيق فقط وليس في توليد الزفير.

ومن الممكن تقسيم الشهيق إلى ثلاثة أجزاء مختلفة: (1) الجزء الذي يتطلبه توسيع الرئتين ضد القوى المرنة والذي يسمى شغل المطاوعة compliance work أو الشغل المرن elastic work، (2) الجزء المطلوب للتغلب على لزوجية الرئتين وبنيات جدار الصدر، ويسمى ذلك شغل مقاومة الأنسجة tissue resistance work، (3) والجزء المطلوب للتغلب على مقاومة المجاري الهوائية أثناء حركة الهواء إلى الرئتين ويسمى ذلك شغل مقاومة المجاري الهوائية airway resistanse work. ويبين الشكل 37-5 تخطيطاً لهذه الأنواع الثلاثة من الشغل بواسطة المناطق المظللة الثلاث فيه. ويبين العمل الموسوم «الشهيق» في هذا الشكل التغير التدريجي في الضغط الجنبوي وحجم الرئة أثناء الشهيق. وتمثل الباحة المظللة في الشكل بكاملها الشغل الكلي الذي تقوم به العضلات التنفسية على الرئتين أثناء عملية الشهيق. وتنقسم الباحة المظللة بدورها إلى ثلاث شدف مختلفة تمثل الأنماط الثلاثة للشغل الذي ينجز أثناء الشهيق. ومن الممكن توضيح ذلك بما يلي:

شغل المطاوعة. تمثل الباحة المنقطة عمل المطاوعة اللازم لتوسيع الرئتين ضد قوى المرونة. ومن الممكن حساب ذلك بضرب حجم التوسع بمعدل الضغط اللازم للتوسيع ويساوي ذلك الباحة المنقطة بالشكل، أي:

$$\text{شغل المطاوعة} = \frac{\Delta P \cdot \Delta V}{2}$$

حيث ΔV= الزيادة في الحجم و ΔP= الزيادة في الضغط داخل الجنبوي.

شغل مقاومة الأنسجة. أما المنطقة الممثلة بالخطوط الأفقية فهي تتناسب مع بذل الشغل اللازم للتغلب على لزوجة الرئتين.

شغل مقاومة المجاري الهوائية. وأخيراً تمثل الباحة ذات الخطوط الأفقية في الشكل 37-5 الشغل اللازم للتغلب على مقاومة جريان الهواء خلال المجاري الهوائية التنفسية.

الشغل الإضافي اللازم لتوسيع القفص الصدري وتقليصه. ينطبق حساب شغل التنفس في الشكل 37-5 على الرئتين فقط ولا ينطبق على القفص الصدري. ولكننا لاحظنا سابقاً أن مطاوعة الجهاز الرئوي ـ الصدري الكلية هي أكثر قليلاً فقط من نصف تلك التي للرئتين وحدهما. ولهذا يَتطلَّب ضعف كمية الطاقة للتوسع والتقلص السويين للجهاز الرئوي الصدري الكلي مما يتطلبها توسع الرئتين وحده فقط.

المقارنة بين مختلف أنماط الشغل. يتضح من الشكل 37-5 بأن معظم الشغل الذي تولده العضلات التنفسية أثناء التنفس السوي الهادىء يستعمل عادة لتوسيع الرئتين. وتستعمل في الحالة السوية نسبة قليلة من الشغل الكلي في التغلب على مقاومة الأنسجة (لزوجية الأنسجة). وتستعمل أحياناً نسبة أكبر من ذلك للتغلب على مقاومة المجاري

الهوائية. ومن الناحية الأخرى يستعمل معظم الشغل أثناء التنفس الشديد عندما يجري الهواء في المجاري التنفسية بسرعة عالية للتغلب على مقاومة المجاري الهوائية.

وغالباً ما تزداد الأنماط الثلاثة للشغل كثيراً في الأمراض الرئوية. ويزداد شغل المطاوعة وعامل مقاومة الأنسجة بصورة خاصة في الأمراض التي تولد تليف الرئة. كما يزداد شغل مقاومة المجاري الهوائية وبصورة خاصة في الأمراض التي تؤدي إلى غلقها.

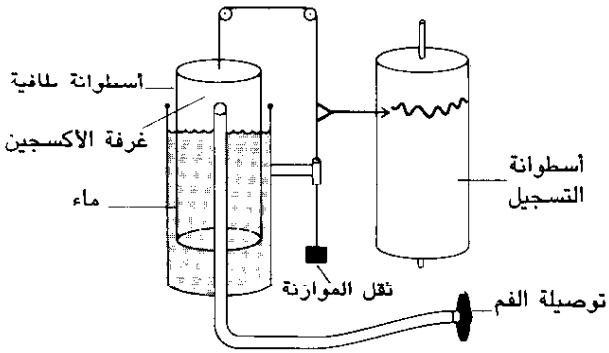
ولا ينجز أي «شغل» عضلي أثناء التنفس الهادىء في عملية الزفير لأن هذا يتولد من الارتداد المرن للرئتين والصدر. ولكن في التنفس الشديد أو عندما تكون مقاومة المجاري الهوائية ومقاومة الأنسجة عالية يحتاج ذلك طبعاً إلى شغل زفيري قد يكون أحياناً أكثر من الشغل الشهيقي. ويصدق ذلك بصورة خاصة في الربو الذي يزيد ضغط المجاري الهوائية عدة أضعاف أثناء الزفير ولكن لدرجة أقل جداً أثناء الشهيق لأسباب سنوضحها لاحقاً.

الطاقة اللازمة للتنفس. يحتاج الجسم أثناء التنفسي السوي الهادىء إلى صرف طاقة لعملية التهوية الرئوية تساوي 3-5% من مجموع الطاقة الكلية التي يصرفها الجسم. ولكن يمكن أن ترتفع كمية الطاقة المطلوبة أثناء التمارين الرياضية الشديدة إلى حد 50 ضعفاً، وخاصة إذا كانت لدى الشخص أية زيادة في درجة مقاومة المجاري الهوائية، أو أي انخفاض في المطاوعة الرئوية. ولهذا فإن أحد الأمور الرئيسية المحددة لشدة الرياضة البدنية التي يمكن أن يقوم بها الشخص هي مقدرته على تجهيز الطاقة العضلية اللازمة لعملية التنفس وحدها.

الحجوم الرئوية وساعاتها

تسجيل تغيرات حجم الرئة — قياس النفس

إن إحدى الطرق البسيطة المستعملة لدراسة التهوية الرئوية هي تسجيل حركة حجم الهواء الداخل إلى الرئتين والخارج منهما، والتي تسمى قياس النفس spirometry. ويبين الشكل 37-6 مقياس نفس نموذجي يتكون من أسطوانة مقلوبة على غرفة مائية وتتوازن بثقل موضوع على جهتها الآخرى. ويوضع في الأسطوانة غاز تنفسي هو في العادة الهواء أو الأكسجين. كما يحوي الجهاز أنبوباً يوصل بين الفم وغرفة الغاز. وعندما يتنفس الشخص من وإلى غرفة الغاز تهبط الأسطوانة وترتفع مسجلة بذلك حركاتها



الشكل 37-6. مقياس النفس.

التنفسية على ورقة متحركة على أسطوانة التسجيل.

ويبين الشكل 37-7 مخطط النفس وهو يظهر تغيرات حجم الرئة في مختلف حالات التنفس. ولتسهيل وصف حوادث التهوية الرئوية، يقسم الهواء في الرئتين عند النقاط المختلفة على هذا الشكل إلى أربعة حجوم وأربع سعات مختلفة وهي كما يلي.

«الحجوم» الرئوية

سجلت إلى اليسار من الشكل 37-7 أربعة «حجوم» رئوية مختلفة. وعند إضافة هذه الحجوم إلى بعضها تبلغ عند ذاك الحجم القصوي الذي يمكن أن تتوسع له الرئتان. وأهمية كل من هذه الحجوم هي الآتية:

1. **الحجم المدي (tidal volume (V_T)** . وهو حجم الهواء الذي يستنشق أو يزفر في كل نَفَس سوي، وهو يبلغ حوالي 500 مليلتر في الرجل البالغ المعتدل.

2. **حجم المدّخر الشهيقي inspiratory reserve volume (IRV)**. وهو حجم الهواء الإضافي الذي يمكن استنشاقه بالإضافة للحجم المدي السوي. وهو يبلغ عادة حوالي 3000 مليلتر.

3. **حجم المدّخر الزفيري expiratory reserve volume (ERV)**. وهو حجم الهواء الإضافي الذي يمكن زفره بزفير شديد جداً بعد نهاية زفير مدي ويبلغ حجمه في الحالة السوية حوالي 1100 مليلتر تقريباً.

4. **الحجم الثُمالي residual volume (RV)**. وهو حجم الهواء الذي يتبقى في الرئتين بعد أقوى وأشد زفير ممكن ويبلغ معدل حجمه حوالي 1200 مليلتر تقريباً.