المحاضرة الرابعة

فيزيولوجيا الجهاز القلبي الوعائي Cardiovascular Physiology

إنّ الوظيّفة الأساسيّة للجهاز القلبيّ الوعائيّ هي إيصال الدم إلى الأنسجة، بحيث يزوّد الخلايا بعناصر غذائيّة ضروريّة للاستقلاب وإزالة الفضلات المنتجة من قبل الخلايا. يعمل القلب بمثابة مضخّة (يحوي 7% من حجم الدم الكلي)، والتي عند تقلّصها ستولّد الضغط اللازم لتوجيه الدم خلال سلسلة من أوعية دمويّة. تُدعى الأوعية التي تنقل الدم من القلب إلى الأنسجة بالشرايين Arteries، والتي تكون معرّضةً لضغطٍ عالٍ وتحتوي على نسبة صغيرة نسبياً من حجم الدم الكلي (13%). بينما الأوردة Veins، فتلك تنقل الدم من الأنسجة عائدةً نحو القلب، وتكون معرّضةً لضغط منخفض وتحتوي على النسبة الأكبر من حجم الدم الكلّي (64%). يتداخل بين الأوردة والشرايين ضمن الأنسجة أوعية دمويّة رقيقة الجدران تُدعى الشعريّات الدمويّة Capillaries (تحوي 7% من حجم الدم الكلي)، حيث يتم تبادل العناصر المغذيّة، والفضلات، والسوائل عبر جدران هذه الشعريّات.

يشارك الجهاز القلبيّ الوعائيّ أيضاً في عديد من **الوظائف الاستتبابيّة** Homeostatic functions:

- حيث يساهم في تنظيم ضغط الدم الشريانيّ.
- يعمل على إيصال الهرمونات المنظّمة من غدد الصم إلى مواقع عملها في أنسجة الهدف.
- يساهم في تنظيم حرارة الجسم.
- يشارك في تعديلات استتبابيّة على حالات فيزيولوجيّة متغيّرة مثل: النزف، والتمرين، وتغيرات الوضعة (أو الجاذبية) posture.

دارات الجهاز القلبيّ الوعائيّ Circuitry of the Cardiovascular System

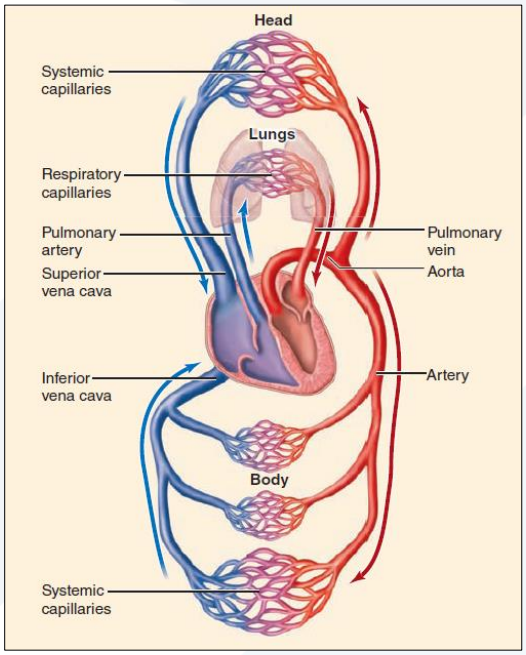
يمثّل الشكل (1)، رسماً تخطيطيّاً لدارات الجهاز القلبيّ الوعائيّ، حيث يظهر الجانبان الأيمن والأيسر من القلب والأوعية الدمويّة في علاقتهما مع بعضهما الآخر. يمتلك كلّ جانب من القلب حجرتن اثنتين وهما الأذينة Atrium والبطين Ventricle تتّصلان بواسطة **دسّامات (صمّامات) وحيدة الاتجاه**، تدعى بالدسّامات الأذينيّة البطينيّة Atrioventricular Valve (AV) صُممت دسامات AV ليتدفّق الدم وفق اتجاه واحد من الأذينة إلى البطين.

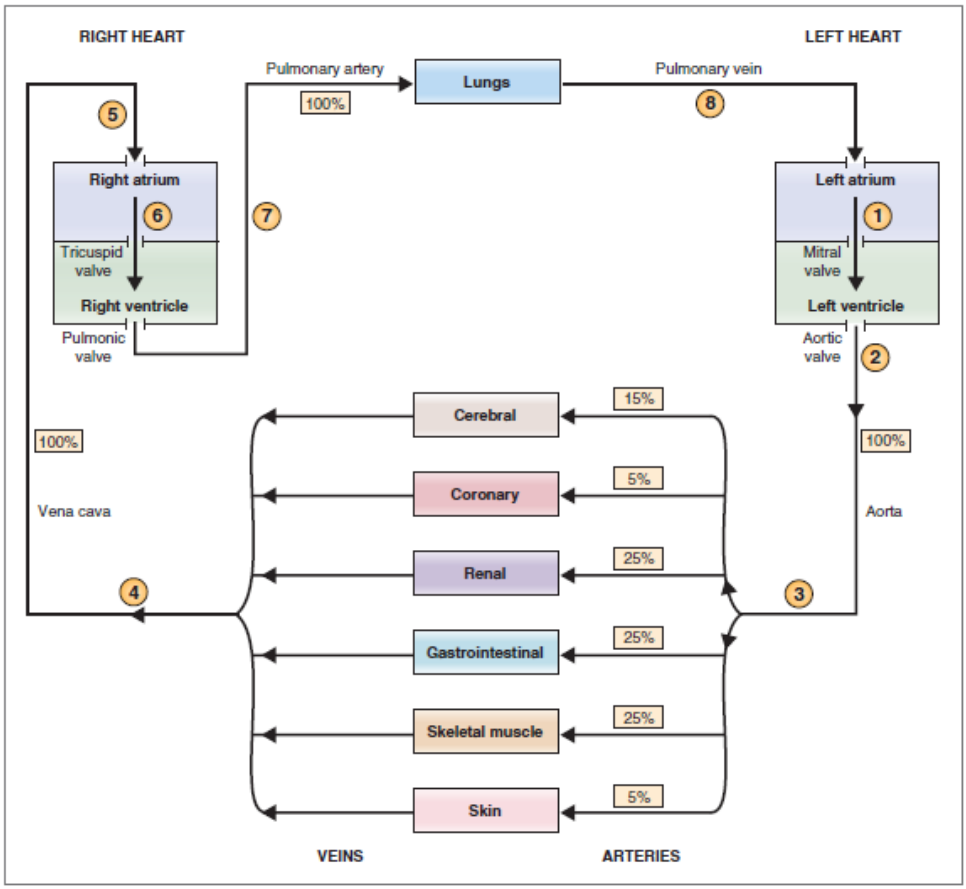
يُدعى كلّ من القلب الأيسر، والشرايين الجهازيّة، والشعريّات الدمويّة الجهازيّة، والأوردة الجهازيّة **بالدوران الجهازيّ Systemic circulation (أو الدوران المحيطي)**، حيث يضخّ البطين الأيسر الدم نحو جميع أعضاء الجسم باستثناء الرئتين. يدعى كلّ من القلب الأيمن والشرايين الرئويّة، والشعريّات الدمويّة الرئوية، والأوردة الرئوية **بالدوران الرئويّ Pulmonary circulation**، حيث يضخّ البطين الأيمن الدم نحو الرئتين.

يعمل كلّ من القلب الأيمن والأيسر **بشكل متسلسل** بحيث يتم ضخّ الدم بالتتّابع من القلب الأيسر إلى الدوران الجهازيّ، ثمّ إلى القلب الأيمن، فالدوران الرئويّ، وبعدها يعود إلى القلب الأيسر.

يدعى معدّل ضخ الدم من أيّ بطين **بنتاج القلب** Cardiac output. وفي الحالة المستقرّة، **يتساوى** نتاج القلب للبطين الأيسر مع مثيله في البطين الأيمن لأنّ كلا جانبي القلب يعملان بشكل متسلسل. يدعى معدّل الدم العائد من

الأوردة إلى الأذينة **بالعود الوريديّ** Venous return. ونجد أيضاً أنّ العود الوريديّ إلى القلب الأيسر يتساوى مع مثيله إلى القلب الأيمن في الحالة المستقرّة.





الشكل (1): الأوعية الدموية في الجسم، ودارات الجهاز القلبيّ الوعائيّ.

مراحل دارة واحدة كاملة خلال الجهاز القلبيّ الوعائيّ:

1- **يملأ الدم المؤكسج البطين الأيسر.** يعود الدم الذي تمّت أكسجته في الرئتن إلى الأذينة اليسرى عبر **الأوردة الرئويّة الأربعة**. ثمّ يتدّفق هذا الدم من الأذينة اليسرى إلى البطين الأيسر من خلال **الدسّام التاجيّ** (ثنائي الشرف) Mitral valve (دسّام AV للقلب الأيسر).

2- **يُقذف الدم من البطين الأيسر نحو الأبهر.** يُغادر الدم البطين الأيسر من خلال **الدسّام الأبهري** Aortic valve (الدسّام الهلالي Semilunar في الجانب الأيسر من القلب)، والذي يتوضّع بين البطين الأيسر والأبهر. عندما يتقلّص البطين الأيسر، سيزداد الضغط ضمنه مؤدّياً إلى انفتاح الدسّام الأبهري قاذفاً الدم عبره بقوة (يدعى حجم الدم المقذوف من البطين الأيسر خلال واحدة الزمن **بنتاج القلب**). يتدفّق الدم بعد ذلك خلال الجهاز الشريانيّ، مدفوعاً بالضغط الناتج عن تقلص البطين الأيسر.

3- **توزّع نتاج القلب بين الأعضاء المختلفة.** يُوزَّع كامل نتاج القلب من البطين الأيسر بين أجهزة الأعضاء عبر مجموعة من شرايين **متوازية**. وهكذا بشكل متزامن، يتم توصيل ما يقارب **15%** من نتاج القلب إلى **الدماغ** عبر الشرايين الدماغيّة، و**5%** إلى **القلب** عبر الشرايين الإكليليّة، و**25%** إلى **الكليتين** عبر الشرايين الكلويّة، **25%** للمعدة والأمعاء، **25%** للعضلات الهيكلية، **5%** للجلد. وبالنظر إلى هذا الترتيب المتوازي Parallel arrangement لأجهزة الجسم، فإنّ **مجمل الدم الجهازيّ المتدفّق يجب أن يعادل نتاج القلب.**

4- **تجمّع الدم المتدفّق من الأعضاء ضمن الأوردة.** يدعى الدم الخارج من الأعضاء **بالدم الوريديّ**، والذي يحتوي على **الفضلات** المنتجة من الاستقلاب، مثل ثاني أوكسيد الكربون CO_2. يُجمَّع هذا الدم الوريديّ المختلط في وريدات وأوردة متوسطة ذات حجم متزايد لتنتهي أخيراً في أكبر الأوردة، وهو الوريد الأجوف Vena cava (السفلي، والعلوي). ثم يحمل الوريدان الأجوفان الدم نحو القلب الأيمن.

5- **العود الوريديّ إلى الأذينة اليمنى.** تمتلئ الأذينة اليمنى بالدم، وذلك لأنّ ضغط الوريد الأجوف أعلى من الأذينة اليمنى، وهذا ما يدعى بالعود الوريديّ Venous return. في الحالة المستقرّة، **يعادل العود الوريديّ إلى الأُذينة اليمنى نتاج القلب من البطين الأيسر.**

6- **امتلاء البطين الأيمن بالدم الوريديّ المختلط.** يتدفّق الدم الوريدي المختلط من الأذينة اليمنى إلى البطين الأيمن عبر الدسّامAV في القلب الأيمن والذي يدعى **بالدسّام ثلاثي الشُّرف** Tricuspid valve.

7- **يُقذف الدم من البطين الأيمن إلى الشريان الرئويّ.** عندما ينقبض البطين الأيمن، يُقذَف الدم عبر **الدسّام الرئوي** Pulmonic valve (الدسّام الهلالي في الجانب الأيمن من القلب) إلى الشريان الرئويّ، والذي يحمل الدم إلى الرئتين. **لاحظ أنّ نتاج القلب المقذوف من البطين الأيمن مماثل لنتاج القلب الذي كان قد قذف من البطين الأيسر.** في الأسرّة الشعريّة ضمن الرئتين، يضاف الأكسجين O_2 إلى الدم من الغاز السنخيّ، ويزال CO_2 من الدم ويضاف للغاز السنخيّ. وهكذا، **يمتلك الدم الخارج من الرئتين O_2 أكثر و CO_2 أقل من الدم الداخل إلى الرئتين.**

8- **عودة الدم المتدفّق من الرئتين إلى القلب عبر الوريد الرئويّ.** يتم إرجاع الدم المؤكسج إلى الأذينة اليسرى عبر الأوردة الرئوية الأربعة لبدء دورة جديدة.

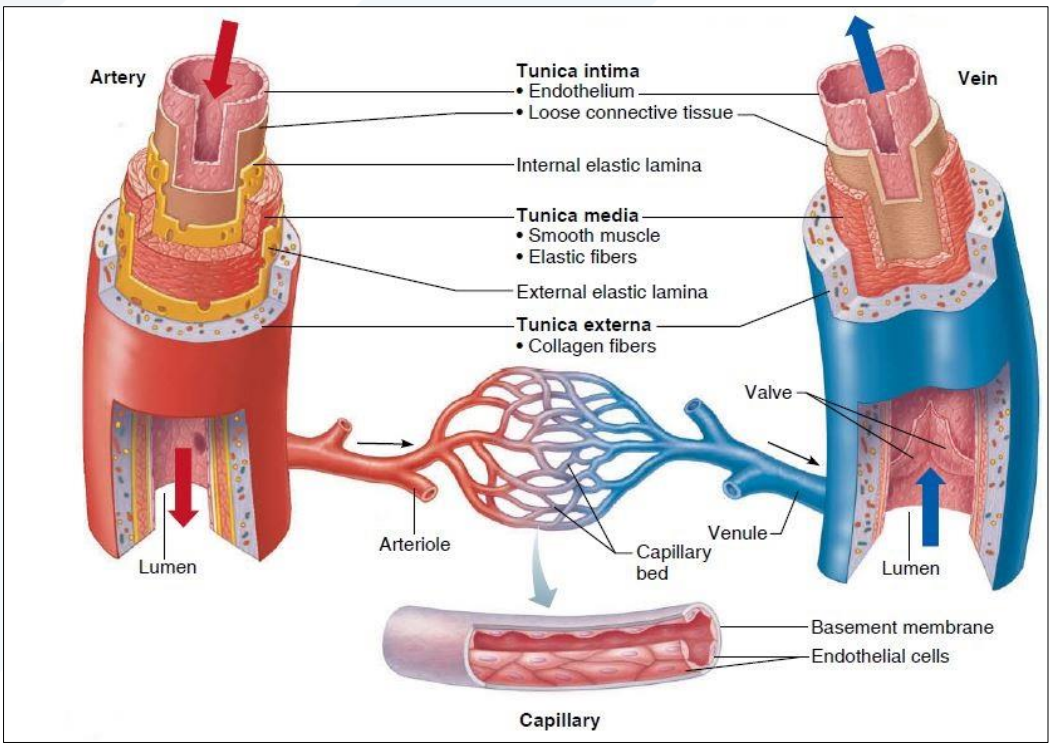
وبالنتيجة تشكل الأوعية الدموية في جسم الإنسان **جهازاً دورانياً مغلقاً** لاستلام المواد وتسليمها Closed Delivery System؛ إذ يبدأ بالقلب وينتهي به.

تذكّر: خصائص و أنواع الأوعية الدمويّة Characteristics and Types of Blood Vessels

تختلف الأنماط الثلاثة من الأوعية الدموية (الشرايين، والأوردة، والشعريات) بالطول، والقطر، وثخانة الجدار، والنسيج المكون لها.

تتكون جدر الأوعية الدموية من ثلاث طبقات (غلالات) تحيط بلمعة الوعاء **(باستثناء الشعريات الدموية)** ومرتبة من الداخل إلى الخارج على النحو الآتي، الشكل (2):

1. **الطبقة (غلالة) داخلية (باطنة) Tunica intima (intema) or interna:** تتألف من بطانة **ظهارية رصفية** (حرشفية) Endothelium ناعمة **ملساء** (تخفف كثيراً من احتكاك الدم مع جدر الوعاء) تغطيها طبقة رقيقة من النسيج **الضام الرخو** Loose connective tissue.
2. **الطبقة الوسطى (وسطانية) Tunica media:** تتألف من خلايا **عضلية ملساء** Smooth muscle **دائرية** التوضع يتخللها طبقات من **الألياف المرنة** (المرنين أو الإيلاستين) Elastic fibers، تسمح الألياف العضلية الملساء بتقبيض الوعاء وتوسيعه، بينما تسمح الألياف المرنة بتمدده (تمططه) وارتداده Stretch and Recoil **(نلاحظ أن هذه الطبقة تكون ثخينة في الشرايين الكبيرة مع وجود طبقتين من الألياف المرنة في مقارنة مع الأوردة الكبيرة).**
3. **الطبقة الخارجية (البرانية أو الظاهرة) Tunica externa or adventitia:** تتكون بصورة أساسية من ألياف **الكولاجين** Collagen fibers المحبوكة ضمن **نسيج ضام (رخو)** Connective tissue، وظيفتها حماية الوعاء الدموي ودعمه، وتثبيته على البنى المجاورة له.



الشكل (2): تركيب الجدار عند كل من الشريان Artery والوريد Vein والشعيرات Capillary.

أما **الشعيرات الدموية Capillaries** فهي أصغر الأوعية الدموية قطراً، تصل ما بين الشُرينات (التي تمدها بالدم) والوُريدات (التي ينزح منها الدم)، وتقتصر بنية جدارها على طبقة أو غلالة داخلية **بطانية رقيقة** يحيط بها **غشاء قاعدي** Basement membrane، تجعلها شديدة التلاؤم مع دورها الوظيفي المتمثل في تبادل المغذيات والشوارد والهرمونات وغيرها من المواد بين الدم والسائل الخلالي.

يمكن تصنيف الشرايين من حيث حجمها النسبي ووظيفتها الأساسية إلى، الشكل (3):

1. **الشرايين الكبيرة Large arteries المرنة (شرايين نقل الدم)**: وهي الشرايين الأقرب إلى القلب **(الأبهر وفروعه الرئيسة)**، تتميز بثخانة جدرها، وأقطارها الكبيرة، ومرونتها الفائقة مما يجعل منها الطريق **الأقل مقاومة** لنقل الدم من القلب إلى الشرايين المتوسطة القطر التالية لها (العضلية). تحوي جدر هذه الشرايين على كميات **كبيرة** من الألياف **المرنة** (المرنين) ولا سيّما في الطبقة الوسطى تفوق ما يوجد في أي نمط آخر من الأوعية الدموية؛ مما يسمح لها **بالتمدد** تحت تأثير الضغط المطبق عليها **والارتداد** إلى قطرها الأولي بعد زوال الضغط، وتتجلى أهمية هذه المرونة في تحويل نتاج القلب **المتقطع** إلى جريان **مستمر**، كما **توفر في إنفاق الطاقة**؛ إذ تمتص الطاقة الناجمة عن الدفقة الدموية في أثناء الانقباض القلبي ثم تعيدها خلال انبساطه.

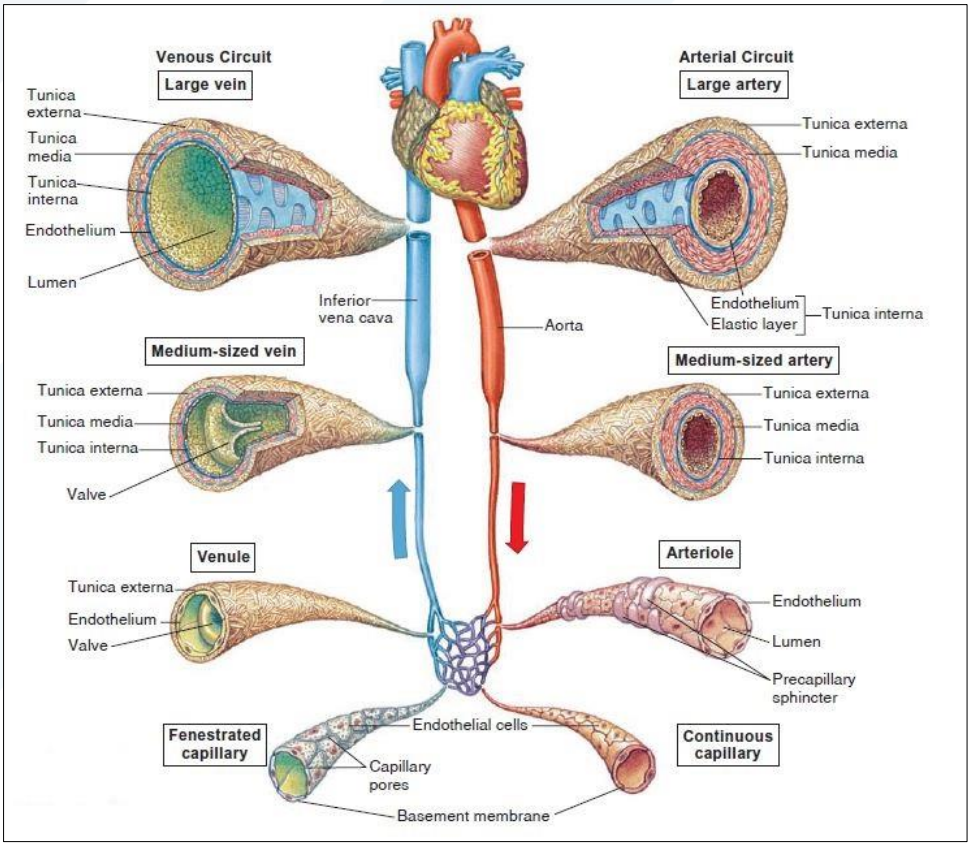
> **فكّر ثم أجب:**
>
> **يدعى حجم الدم الموجود في الشرايين بالحجم المُجهَد Stressed volume.**

2. **الشرايين المتوسطة Medium-sized arteries العضلية (شرايين توزيع الدم)**: وهي تلي الشرايين الكبيرة المرنة، وتتولى مهمة توزيع الدم إلى أعضاء الجسم، تتميز بوجود كمية **أقل** من الألياف المرنة بالمقارنة مع الشرايين الكبيرة، ولكن الألياف **العضلية الملساء** ضمن طبقتها الوسطى تكون **فعّالة أكثر**، فهذه الشرايين تكون قابلة للتقلص أكثر من قابليتها للتمدد.
3. **الشُرينات Arterioles**: وهي أصغر الشرايين (الفروع النهائية للشرايين)، تتألف طبقتها الوسطى بشكل رئيس من **الألياف العضلية الملساء** مع القليل من الألياف المرنة المتناثرة فيها، مما يجعلها تمتلك جدراً عضلية قوية تستطيع غلق هذه الشُرينات تماماً أو تسمح لها بالتوسع عدة أضعاف، وهي بذلك تعمل **كدسّامات تحكم** Control valves بمرور الدم إلى الشعيرات (السرير الشعيري)، وتملك قدرة كبيرة على تغير حجم الجريان الدموي (نتيجة مجموعة من المنبهات العصبية، والهرمونية والكيميائية) وذلك استجابة لحاجات النسج.

> **ادرس الحالة:**
>
> **الشُرينات ليست فقط موقع المقاومة الأعلى في الجملة الوعائيّة، ولكنّها أيضاً المكان الذي يمكن تغيير المقاومة فيه.**

كذلك الأمر بالنسبة للأوردة فيمكن تصنيفها من الأصغر إلى الأكبر، الشكل (3):

1. **الوُريدات Venules**: تتحد نهايات الشعيرات الدموية الوريدية، فتشكل **وُريدات الصغيرة** تنزح الدم مباشرة من الشعيرات الدموية وتتألف من طبقة **وعائية بطانية** فقط وتجمعات للخلايا، أما الوُريدات **الأكبر** فتمتلك جدرها طبقة (غلالة) خارجية رقيقة وطبقة وسطى مبعثرة وطبقة داخلية بطانية بالإضافة **لوجود الدسّامات** في لمعتها. وتجدر الإشارة إلى أن **ضغط** الدم يواصل **هبوطه** في الوُريدات نتيجة **لازدياد المقاومة** لجريانه فيها.
2. **الأوردة المتوسطة Medium-sized veins**: تتلاقى نهايات الوُريدات، وتتحد لتشكل أوردة متوسطة الحجم تتألف جدرها من الطبقات (الغلالات) الثلاث المذكورة سابقاً، ونتيجة **لهبوط ضغط** الدم المستمر والمتواصل في الأوردة **ترق جدرها** دون أن يتسبب ذلك بمخاطر أو حوادث تمزق وعائي، ويستدعى هذا الضغط الدموي المنخفض وجود تلاؤمات (آليات) خاصة تساعد وتحسن عودة الدم إلى القلب مثل: **الدسّامات الوريدية، والمضخة العضلية، والمضخة التنفسية.**
3. **الأوردة الكبيرة Large veins**: تتحد الأوردة المتوسطة لتشكل الأوردة الكبيرة (الوريدان الأجوفان العلوي والسفلي) التي تمتلك جدرها كذلك الطبقات الثلاث المعروفة (الطبقة **الخارجية** البرانية تكون **أثخن** هذه الطبقات)، إلا أن هذه الجدر تكون **أكثر رقة**، ولمعاتها **أشد اتساعاً** (مع **غياب** الصمامات الوريدية) بالمقارنة مع الشرايين.



الشكل (3): الأنماط المختلفة للأوعية الدموية في الجسم.

حركيّة الدم Hemodynamics

يشير مصطلح حركيّة الدم إلى المبادئ التي تحكم تدفّق الدم في الجهاز القلبيّ الوعائيّ. هذه المبادئ الفيزيائية الأساسيّة هي نفسها المطبّقة على حركيّة السوائل بشكل عام. تطبق مفاهيم التدفّق (الجريان)، والضغط، والمقاومة، والمطاوعة (السعة أو الوساعة) على تدفّق الدم من وإلى القلب وداخل الأوعية الدموية.

التدفق (الجريان) الدموي Blood Flow

يعني كمية الدم التي تجتاز نقطة معينة من الدوران خلال فترة زمنية محددة، ويعبر عنه عادة بالميليلتر أو الليتر في الدقيقة. يبلغ التدفق الدموي الإجمالي (الكلي) لشخص بالغ في حالة الراحة 5000 مل/د (5 ل/د) وهذا يعادل **النتاج القلبي** Cardiac output؛ لأنه يمثل كمية الدم التي يضخها القلب خلال فترة من الزمن وهي الدقيقة.

سرعة تدفّق (جريان) الدم Velocity of Blood Flow

إنّ سرعة تدفق الدم هي **معدّل إزاحة الدم خلال واحدة الزمن**. تختلف الأوعية الدمويّة في الجهاز القلبيّ الوعائيّ من حيث القطر ومساحة المقطع العرضيّ. تمتلك هذه الفروقات في القطر والمساحة بدورها تأثيرات عميقة على سرعة التدفّق، الشكل (4).

تتراوح مساحة المقاطع العرضية للأوعية الدموية على النحو الآتي:

- الأبهر: 2.5 سم^2.
- الشرايين الأصغر: 20 سم^2.
- الشرينات: 40 سم^2.
- الشعيرات: 2500 سم^2.
- الوريدات: 250 سم^2.
- الأوردة الأصغر: 80 سم^2.
- الوريدين الأجوفين: 8 سم^2.

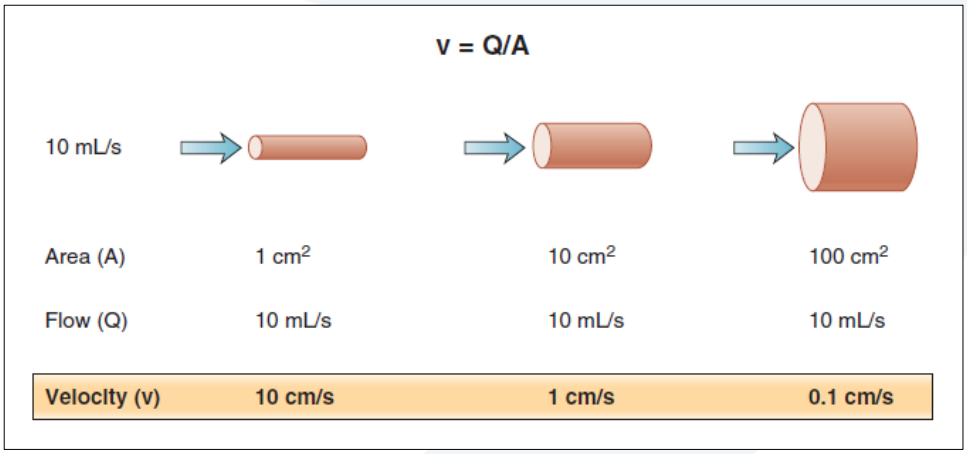
نلاحظ أن مساحة المقاطع العرضية للأوردة **أكبر** منها للشرايين وهذا يفسّر كبر حجم الدم في الجهاز الوريدي مقارنة مع الجهاز الشرياني.

وبما أن حجم الجريان الدموي هو نفسه في كل أقسام جهاز الدوران لذلك تتناسب سرعة هذا الجريان عكساً مع مساحة المقطع العرضي للوعاء الدموي، ويمكن التعبير عن سرعة التدفق الدموي بالمعادلة الآتية:

$$\nu = Q/A$$

حيث:

- ν (Velocity of blood flow) = سرعة التدفق الدموي وتقدّر بـ (سم/ثا).
- Q (Flow) = تدفق أو جريان الدم ويقدّر بـ (مل/ثا).
- A (Cross-sectional area) = مساحة المقطع العرضي ويقدّر بـ (سم^2).



الشكل (4): تأثير قطر الوعاء الدموي على سرعة جريان الدم.

كما نعلم أن الجريان الدموي = 5 ل/د

= 5000 مل/د

= 83.3 مل/ثا

وبالتالي تكون سرعة الجريان الدموي في الشعيرات = 2500/83.3 = 0.03 سم/ثا

= 0.3 مم/ثا

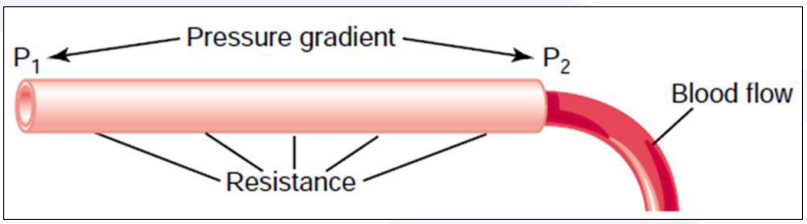
وبما أن **طول** الشعيرات النموذجي يتراوح بين **0.3 إلى 1 مم**، فإن الدم لا يبقى فيها إلا حوالي **1-3 ثانية** فقط، والمذهل في الأمر أن جميع عمليات الانتشار تتم عبر جدر الشعيرات الدموية خلال هذا الزمن القصير جداً.

العلاقة بين تدفّق الدم، والضغط، والمقاومة Relationships Between Blood Flow, Pressure, and Resistance

يخضع تدفق الدم ضمن الأوعية الدموية الشكل (5)، لتأثير قوتين أساسيتين:

1. **فرق الضغط** بين طرفي الوعاء الدموي، وينجم عن الفعالية القلبية.
2. **مقاومة التدفق أو المقاومة الوعائية:** هي إعاقة (ممانعة) جريان (تدفق) الدم في الوعاء، وهي تقيس مقدار الاحتكاك الذي يواجهه الدم عندما يمر في الوعاء، وهناك مصطلحان: المقاومة المحيطية الكلية، والمقاومة الرئوية الكلية. تتعلق المقاومة الوعائية بـ:

- **نصف قطر الوعاء**؛ حيث تتناسب مقاومة الجريان عكساً مع نصف قطر الوعاء.
- **لزوجة الدم:** المقاومة الداخلية للتدفق، وهي خاصية موجودة في كل السوائل، وتتعلق بثخانة السائل. كلما زادت اللزوجة نقص انزلاق الجزيئات بالنسبة لبعضها البعض، وأصبحت حركة السائل أكثر صعوبة. إن الدم أكثر لزوجة من الماء؛ **لاحتوائه على العناصر الخلوية والبروتينات البلازمية**، لذا فهو يجري بشكل أبطأ تحت نفس الشروط. لزوجة الدم ثابتة تقريباً، ولكن احمرار الدم يزيد من اللزوجة وبالتالي من المقاومة، أما عند نقص الكريات الحمراء كما في فاقات الدم فتنخفض اللزوجة ومن ثم تنخفض المقاومة لجريان الدم (العلاقة طردية بين اللزوجة والمقاومة).



الشكل (5): العوامل المؤثرة على الجريان الدموي.

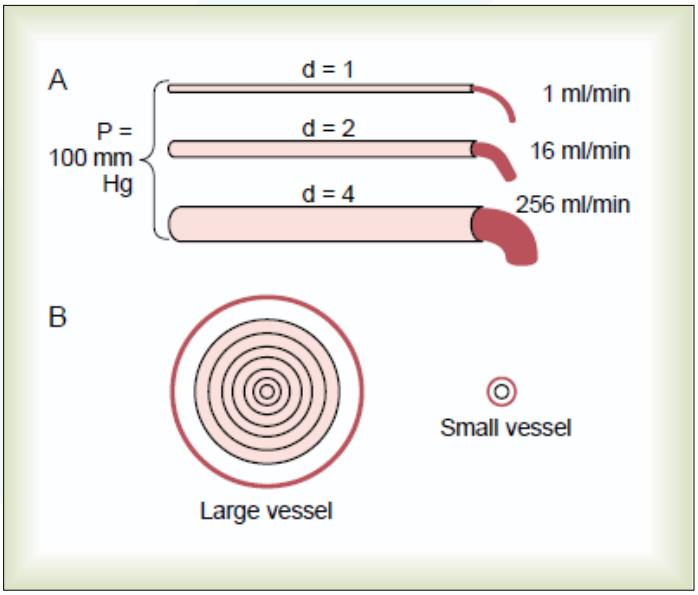
إيصالية الدم في الوعاء وعلاقتها بالمقاومة

يقصد **بالإيصالية** Conductance قياس **جريان** الدم عبر وعاء من أجل **فرق ضغط معين**، ويعبر عنها بـ (مل/ثا/مم زئبقي)، وهي **تعاكس المقاومة** وفقاً للمعادلة:

الإيصالية = 1/المقاومة

$$\text{Conductance} = \frac{1}{\text{Resistance}}$$

تسبب **التغيرات الطفيفة** في **قطر** الأوعية **اختلافات كبيرة** في القدرة على إيصال الدم عندما يكون الجريان **انسيابي**، كما هو موضّح الشكل (A - 6) الذي يظهر ثلاثة أوعية منفصلة ذات أقطار متناسبة (1 و 2 و 4) وفرق الضغط عند نهايتي كل منها يساوي 100 ملم زئبقي، وعلى الرغم من أن أقطار الأوعية تزداد بمقدار **أربعة أضعاف** فقط فإن الجريانات الخاصة بها تزداد بحيث تكون (1 و 16 و 256 مل/د) على الترتيب، أي بزيادة **256 ضعفاً** في الجريان. **أي أن الإيصالية تتناسب طرداً مع القوة الرابعة للقطر.**



الشكل (6): تأثير قطر الوعاء على جريان الدم A، حلقات الجريان الانسيابي للدم B.

ويمكن **إيضاح** سبب الزيادة الكبيرة في الإيصالية عند زيادة القطر كالآتي: يبيّن الشكل (B - 6) **مقطعاً عرضياً** في وعاء كبير وآخر صغير؛ إذ تشير الحلقات المتركزة داخل هذه الأوعية إلى أن سرعة الجريان **تختلف** حسب كل حلقة نتيجة الجريان الصفائحي أو الانسيابي؛ حيث أن الحلقة التي **تلامس الجدار** تجري **بصعوبة** بالغة بسبب التصاقها

بالبطانة الوعائية، والحلقة **الثانية** تنزلق متجاوزة الأولى لذلك تجري **بسرعة أكبر** وهكذا، لذلك فالدم القريب من الجدار يجري ببطء شديد بينما الموجود في المركز فإنه يجري بسرعة شديدة.

وبمكاملة سرعات جميع الحلقات، يمكن استنتاج المعادلة المعروفة **بقانون بويسل Poiseuille's law:**

$$F = \frac{\pi \Delta P r^4}{8 \eta l}$$

يلاحظ من هذه المعادلة أن سرعة جريان الدم **تتناسب طرداً** مع القوة الرابعة لنصف قطر الوعاء.

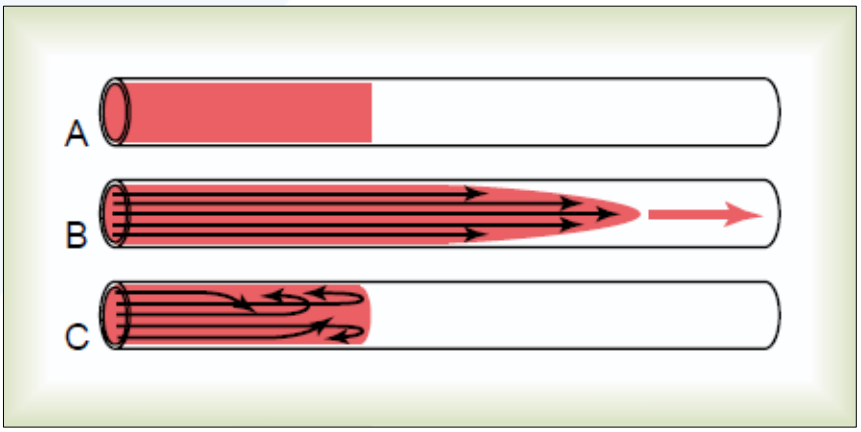
تسمح **الجدران القوية** للشُرينات الصغيرة (التي يتراوح قطرها بين 8 إلى 30 ميكرومتر) **بتغير أقطارها الداخلية (ثلثي المقاومة في الدوران الجهازي)** بشكل كبير قد يصل أحياناً إلى أربعة أضعاف مما يزيد الجريان نظرياً إلى 256 ضعفاً، لذلك تستطيع هذه **الشُرينات** وحسب قانون القوة الرابعة أن **توقف** الجريان الدموي.

الجريان الصفائحي (الانسيابي) Laminar Flow

عندما يجري الدم بسرعة ثابتة عبر وعاء أملس طويل فإنه يجري في خطوط انسيابية Streamlines بحيث تحافظ كل طبقة من الدم على المسافة نفسها بينها وبين جدار الوعاء، ويبقى القسم المركزي من الدم في مركز الوعاء، يدعى هذا النمط من الجريان **بالجريان الصفائحي** laminar flow أو الجريان **الانسيابي** وهذا يعاكس الجريان المضطرب Turbulent flow؛ حيث يجري الدم في جميع الاتجاهات ويمتزج بشكل مستمر داخل الوعاء.

توضّح التجربة المبيّنة في الشكل (7)، الوعاء A الذي يحتوي سائلان مختلفان ولكن بدون وجود لأي جريان فيه، ولكن عند إحداث الجريان يتشكل بعد ثانية بين السائلين سطح مشترك بشكل **قطع مكافئ** Parabolic كما يظهر في الوعاء B؛ حيث أن القسم القريب من جدار (المتاخم) الوعاء بالكاد قد تحرك، بينما القسم الأبعد عن الجدار قد قطع مسافة صغيرة، أما القسم الواقع في المركز فقد قطع مسافة طويلة.

وسبب هذا المظهر أن الجزيئات الملامسة **للجدار** تتحرك بصعوبة بسبب **احتكاكها** به (مقاومة جريان كبيرة)، بينما تنزلق فوقها الطبقة الثانية من الجزيئات، وتنزلق الثالثة فوق الثانية، والرابعة فوق الثالثة وهكذا، لذلك يتمكن السائل الموجود في **المركز** من أن يتحرك **بسرعة**.



الشكل (7): تجربة توضّح الجريان الصفائحي والمضطرب.

قد يصبح الجريان **مضطرباً** Turbulent كما في الوعاء C، عندما تصبح سرعة الجريان **كبيرة** جداً، أو عندما يجتاز **عائقاً** في الوعاء، أو عندما **يغيّر** اتجاهه بحدة، أو عندما يمر فوق سطح **خشن**، ويقصد بالجريان المضطرب أن الدم يجري بشكل عرضاني إضافة إلى جريانه على طول الوعاء، ويشكل عادة التفافات Whorls في الدم تدعى تيارات الدوامة Eddy currents.

فكّر ثم أجب:

كيف تؤثر لزوجة الدم على جريانه.

مطاوعة الأوعية الدمويّة Compliance of Blood Vessels

تعبّر مطاوعة أو سعة capacitance وعاء دمويّ عن **حجم الدم الممكن احتواءه عند ضغط معيّن**. وتتعلق المطاوعة بقابليّة التمدد والتي تعطى بالمعادلة الآتية:

$$C = V / P$$

حيث:

C = المطاوعة أو السعة $(mL/mm\ Hg)$

V = الحجم (mL)

P = الضغط $(mm\ Hg)$

إنّ مطاوعة الأوردة **عالية**؛ بعبارة أخرى تحتوي الأوردة حجماً كبيراً من الدم عند ضغوط منخفضة. أمّا مطاوعة الشرايين فهي **أقل** بكثير من تلك الموجودة في الأوردة نتيجة الضغط المرتفع.

فكّر ثم أجب:

هل يؤثر التقدم بالعمر (الشيخوخة) على مطاوعة الشرايين؟

الضغط الشرياني

يعرّف ضغط الدم بأنه **القوة** التي يمارسها **الدم** على كل وحدة **مساحة** من جدار الوعاء، ويقاس بالميليمتر زئبقي mm HG، فعندما يقال أن الضغط في الوعاء هو 120 ملم زئبقي فهذا يعني أن القوة المطبقة كافية لدفع عمود الزئبق حتى مستوى 120 مم زئبقي.

الضغط الشرياني هو **الضغط** الذي يمارسه الدم على **جدار** الشرايين المرنة أثناء مروره فيها، ويتأثر بعدة عوامل وهي:

- **الفعالية القلبية التقلصية** (نتاج القلب).
- **المقاومة الوعائية** (قطر الوعاء وطوله ولزوجة الدم).
- **مرونة الأوعية**.

ويعد مستوى الضغط الشرياني مؤشراً تشخيصياً مهماً لصحة القلب والأوعية الدموية.

كما **يتأثر** الضغط الشرياني بالانفعالات، والنوم، ونوع الغذاء، وممارسة الرياضة، ويتعلق نسبياً بالعمر والوزن والجنس (ذكر أم أنثى).

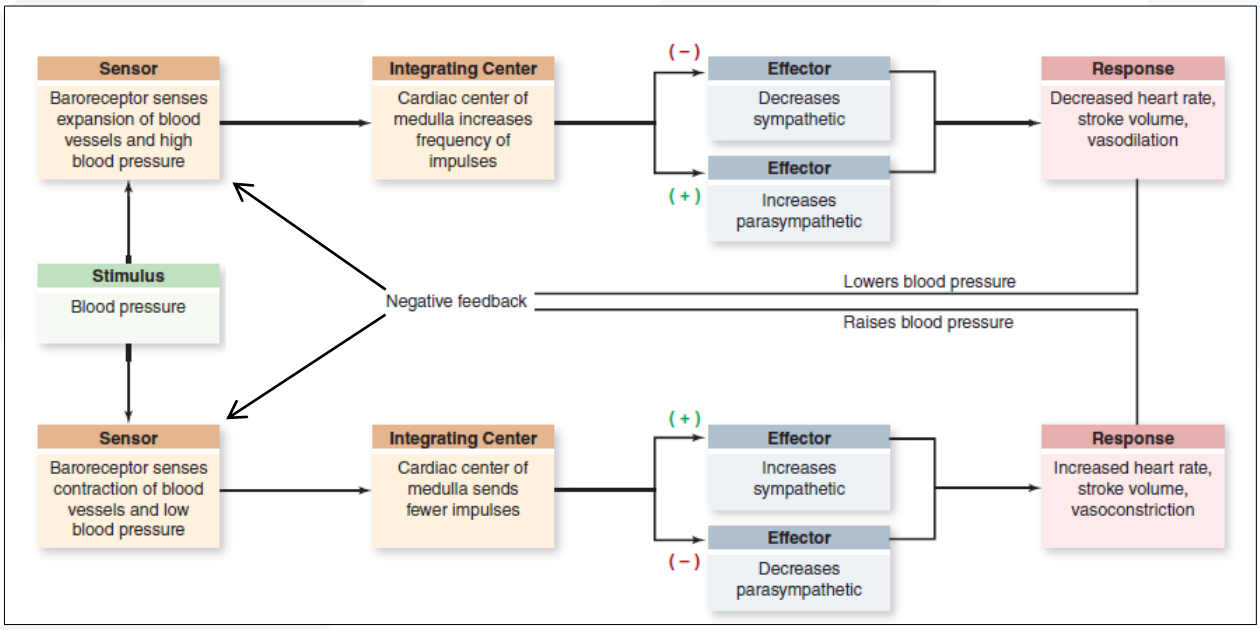
يتغير الضغط في الدورة القلبية بين **ضغط أعظمي** (الانقباضي) ويبلغ **120** ملم زئبقي ويمكن أن يتراوح في الحالة الطبيعية بين **90 – 130 ملم زئبقي**، أما الضغط الأصغري (الانبساطي) فيبلغ **80** ملم زئبقي (في بعض المراجع تبلغ قيمته **70** ملم زئبقي) ويتراوح بين **60 – 90 ملم زئبقي**.

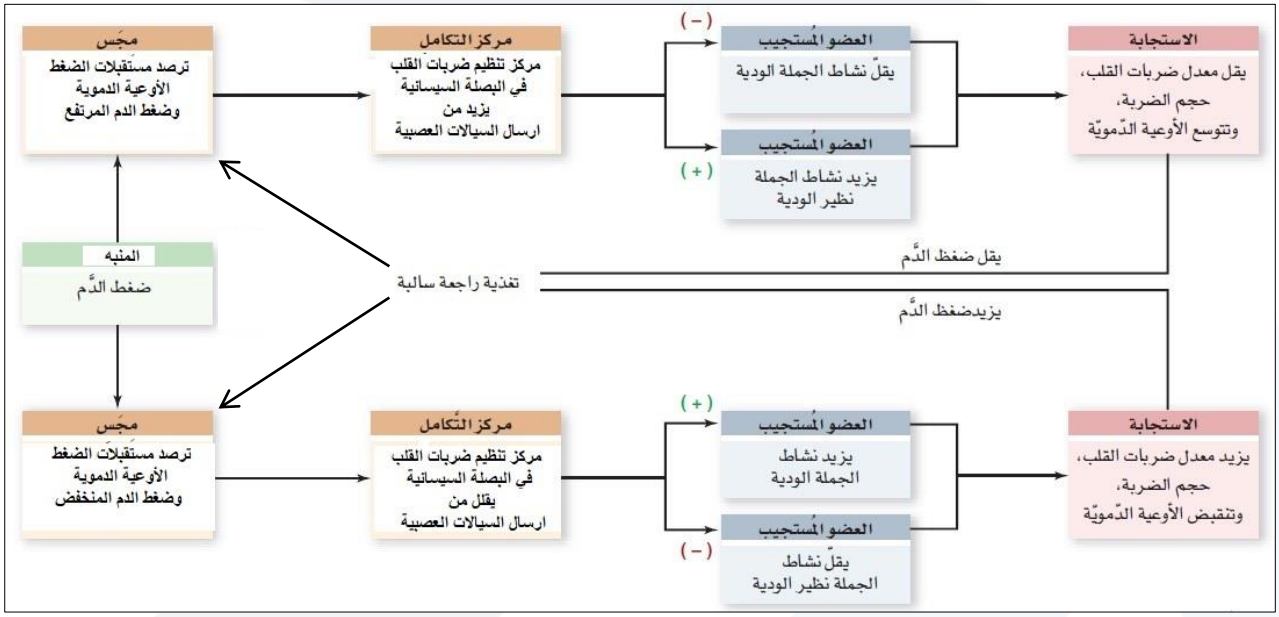
تنظيم الضغط الشرياني

يعتمد بشكل رئيس على **الناتج القلبي**، و**المقاومة الوعائية**، فتغير أي من هذه العوامل زيادة أو نقصاناً سيغير ضغط الدم.

وبشكل عام، عند **انخفاض (هبوط)** الضغط الشرياني، يتم **تفعيل القسم الودي** الذي **يقبّض** الأوعية، فيرفع المقاومة الوعائية المحيطية، ويزيد معدل وقلوصية القلب، فيزداد الناتج القلبي ويرتفع الضغط الشرياني.

وبالعكس عند **زيادة** الضغط الشرياني فإن المركز العصبي المحرك **يثبّط** عمل الجهاز الودي **فتتوسع** الأوعية، و**يتحرّض** بنفس الوقت القسم **نظير الودي** الذي ينقص معدل القلب وقلوصيته، بالنتيجة ينقص الضغط الشرياني، الشكل (8).





الشكل (8): التنظيم العصبي للضغط الشرياني

أما من الناحية التفصيلية، فيشمل تنظيم الضغط الشرياني:

أولاً: التنظيم العصبي قصير الأمد للضغط الشرياني

هو فعل **انعكاسي** مركزه **البصلة السيسائية** (المركز القلبي الوعائي)، وأحياناً تؤثر السيالات العصبية من المستقبلات **الكيميائية** والمراكز الدماغية **الأعلى**، في آليات التنظيم العصبية.

- **دور المركز الوعائي القلبي Cardiovascular Center**

يتألف من: مراكز قلبية (**مسرعة، وناهية أو مبطئة**)، ومركز **محرك وعائي** يتحكم بأقطار الأوعية الدموية. ينقل المركز المحرك الوعائي الأوامر الحركية **باعتدال وبمعدل ثابت** عبر الألياف **الودية** والمسماة الألياف الوعائية الحركية، تخرج هذه الألياف من القطعة الصدرية **الأولى** وحتى القطنية **الثانية** من النخاع الشوكي (المراكز العصبية الودية)، وتعصب العضلات الملساء للأوعية الدموية ولاسيّما **الشُرينات**، ونتيجة لذلك تكون الشُرينات بحالة **شبه دائمة من التقبض المعتدل**، وهذا ما يسمى **بالمقوية الوعائية المحركة**.

تختلف درجة المقوية الوعائية من عضو لآخر، وبشكل عام تتلقى الشُرينات في **الجلد والجهاز الهضمي** الأوامر الوعائية الحركية بمعدل **أكبر**، **وتتقبض** بشكل أقوى من تلك التي في العضلات **الهيكلية**.

تسبب **زيادة الفعالية الودية** تقبضاً وعائياً عاماً، وترفع ضغط الدم، أما **انخفاض هذه الفعالية** فيسمح للعضلات الوعائية بالارتخاء نوعاً ما أي التوسع الوعائي، **ويخفض** ضغط الدم.

- **تعديل فعالية المركز القلبي الوعائي**

يمكن تعديل الفعالية بوساطة سيالات عصبية قادمة:

1. **مستقبلات الضغط:** حساسة لتغيرات الضغط الشرياني والتمدد.
2. **مستقبلات كيميائية:** حساسة لتغيرات المستوى الدموي من ثنائي أكسيد الكربون، والأوكسجين، وشوارد الهيدروجين.

3. **مراكز دماغية أعلى** (التشكيلات الشبكية في الجسر والدماغ المتوسط والدماغ البيني).

الآليـة: يـؤدي زيـادة الضـغط الشـرياني

- **العوامل الخلطية الخافضة للضغط الشرياني**

مركبات مثل **البراديكينين** و**الهستامين** و**البروستلاغلاندينات**، تخفض الضغط الشرياني لتأثيرها الموسّع للأوعية، وكذلك لفضلات الاستقلاب مثل **حمض اللبن** و**حمض الكربون**، وبعض الشوارد **كالبوتاسيوم** و**المغنزيوم** تأثير خافض للضغط الشرياني بسبب تأثيرها الموسع للأوعية الدموية، كذلك **الببتيد الأذيني ANP** (Atrial Natriuretic Peptide) المعاكس لعمل الألدوستيرون.

الدوران الشعيري

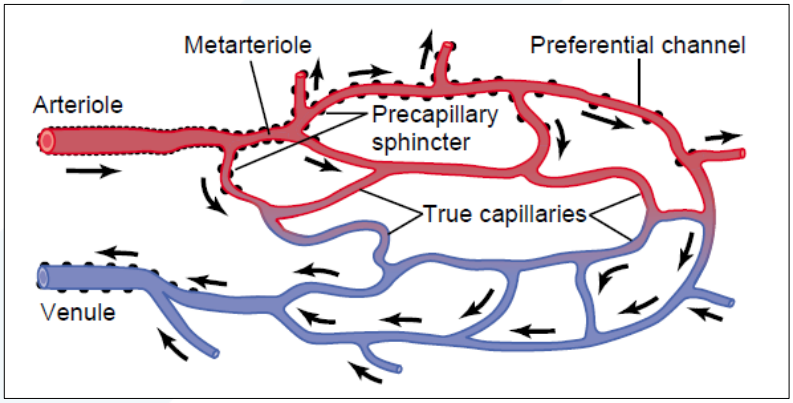
يتحقق الهدف من **الدوران (التبادل)** في مستوى الشعيرات الدموية، وهو **إمداد** الأنسجة بالأكسجين والمغذيات الضرورية، **وتخليصها** من فضلات الاستقلاب وذلك بسبب **النفوذية العالية** للشعيرات.

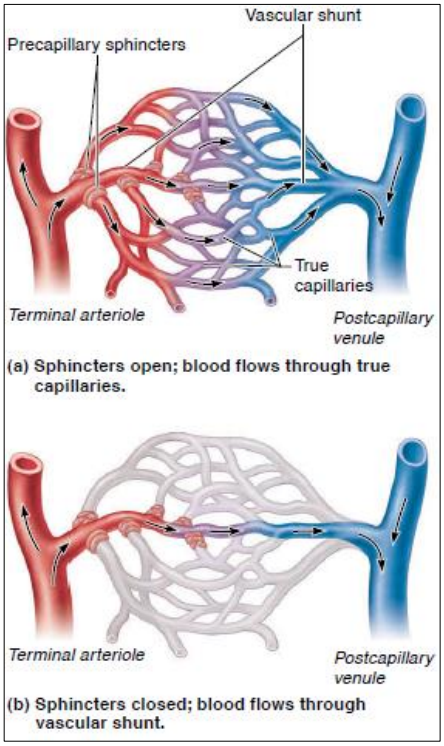
تنشأ الشعيرات الدموية من فروع الشُرينات، ويتكون جدارها من طبقة من **الخلايا البطانية** (ظهارة رصفية) ذات نفوذية عالية، محاطة من الخارج **بغشاء قاعدي من ألياف الكولاجين**، كما يحاط الوعاء الشعري في بدايته بعضلة تدعى **المصرة (المعصرة) قبل الشعرية** Precapillary sphincter، ينتهي الوعاء الشعري في وُرَيد **دون** مصرة عضلية لذلك يمكن للتبدلات الهيموديناميكية الوريدية أن تنعكس على الشعيرات، الشكل (9).

تعمل **ربع** الأوعية الشعرية في حالة **الراحة** وتزداد أثناء الجهد، وتختلف **كثافة** الشبكة الشعرية من **عضو لآخر** بشكل يتناسب **طرداً** مع **فعالية** العضو، ويبلغ حجم الدم في الشعيرات الدموية **7%** من الحجم الكلي للدم في الجهاز الدوراني.

يوجد نوعان للدوران الشعري:

1. **دوران شعيري تغذوي**: يؤمن فقط تغذية العضو، وهذا ينخفض كثيراً في حالة الراحة ليزداد في حالة الجهد، والعلاقة بين النتاج والاستقلاب علاقة وثيقة.
2. **دوران شعيري وظيفي**: ويؤمن، بالإضافة إلى التغذية، وظيفة هامة للعضوية ككل مثل الرئة والكلية والكبد.





الشكل (9): بنية الشعيرات الدموية (السرير الشعيري).

المقاومة الشعيرية

تتعلق **بالغشاء القاعدي** المدعم بشبكة من ألياف الكولاجين، ولكن في بعض الحالات مثل **فرط** الضغط الشعري أو **نقص مقاومة** الجدار **ينقطع** الوعاء الدموي، وتحدث نزوف غير غزيرة، قد تنتج عن بعض الأمراض الوراثية أو الانتانات أو السموم، وكذلك نقص فيتامين C.

تبادل الأغذية والمواد بين الدم والسائل الخلالي

يشكل **الانتشار** الطريقة الأكثر أهمية لانتقال المواد بين البلازما والسائل الخلالي؛ إذ أن جدار الوعاء الشعيري **نصف نفوذ**.

تنتشر جزيئات الماء والجزيئات المنحلة في الماء عبر **الثقوب** في جدار الوعاء الشعيري، أما المواد الذوابة في الدسم **كالأوكسجين وثاني أكسيد الكربون**، فتستطيع الانتشار **مباشرة** من خلال أغشية الخلايا البطانية للوعاء الشعيري، وبالتالي هي تنفذ من كل مساحات الجدار الوعائي، لذلك فإن معدلاتها بالنقل **أسرع** من المواد غير الذوابة.

يختلف معدل **الانتشار** باختلاف **تراكيز** المواد على جانبي الغشاء، أما **النفوذية** الشعيرية فإنها تتأثر بكثير من العوامل:

- **تزداد** بتأثير الهيستامين، والحموضة (انخفاض الـ pH)، وعوز فيتامين C.
- وبالمقابل فإن مضادات الهيستامين، والستيروئيدات القشرية، وشوارد الكالسيوم، والقلوية **تنقص** من هذه النفوذية.

حركة السائل عبر جدار الوعاء الشعيري

يدفع السائل عبر الجدار الشعريّ بواسطة ضغوط ستارلينغ عبر الجدار وتُوصَف معادلة ستارلينغ Starling equation كالآتي:

$$J_v = K_f [(P_c - P_i) - (\pi_c - \pi_i)]$$

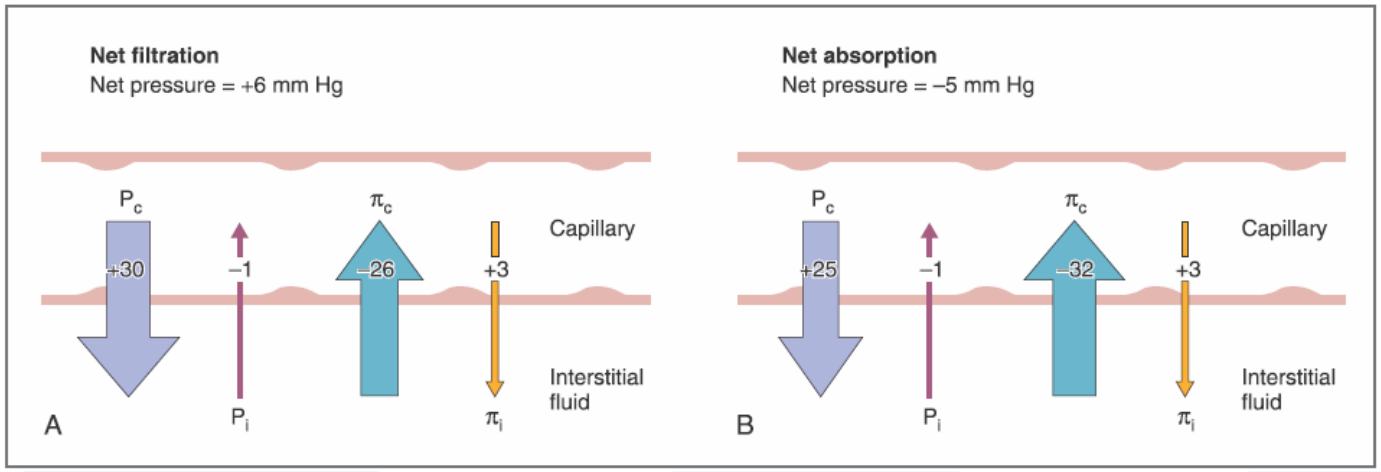
حيث:

J_v = حركة السائل (mL/min).
K_f = الناقليّة الهيدروليكيّة (mL/min per mm Hg).
P_c = الضغط المائيّ السكونيّ الشعريّ (mm Hg).
P_i = الضغط المائيّ السكونيّ الخلاليّ (mm Hg).
π_c = الضغط الجرميّ الشعريّ (mm Hg).
π_i = الضغط الجرميّ الخلاليّ (mm Hg).

تنصّ معادلة ستارلينغ على أنّه يتمّ تحديد حركة السوائل Jv عبر الجدار الشعريّ بواسطة الضغط الإجماليّ عبر الجدار، والذي هو مجموع الضغط المائيّ السكونيّ والضغط الجرميّ (أو الضغط التناضحي الغرواني). فيمكن أن يكون **اتجاه حركة السوائل** إمّا إلى داخل أو خارج الشعريّات الدمويّة. تدعى حركة السوائل الإجماليّة إلى خارج الشعريّات الدمويّة نحو السائل الخلاليّ **بالترشيح filtration**؛ بينما تدعى حركة السوائل الإجماليّة من السائل الخلالي إلى داخل

الشعيرات الدمويّة **بالامتصاص** . **absorption** يُحدَّد **مقدار حركة السوائل** بواسطة الناقليّة الهيدروليكيّة K_f (نفوذيّة الماء)، للجدار الشعريّ. تحدّد الناقليّة الهيدروليكيّة مقدار حركة السوائل التي سيتمّ إنتاجها بفرق الضغط المعيّن، الشكل (10).

ترتبط النتيجة النهائية **بمحصلة** هذه القوى، فيحدث **خروج** سوائل في الجزء الداني (القريب) من الوعاء الشعيري الشرياني، وتبادل **متعادل** في وسطه، مع **إعادة امتصاص** في الجزء القاصي (البعيد) الوريدي، الشكل (10).



الشكل (10): A. الضغط الإجماليّ لصالح الترشيح، B. الضغط الإجاليّ لصالح الامتصاص.

إنّ الشكل (10) هو رسم تخطيطي لضغوط ستارلينغ. تمثل كلّ من ضغوط ستارلينغ الأربعة بسهم. يشير **اتجاه** السهم فيما إذا كان الضغط لصالح **الترشيح** إلى خارج الشعريّات الدمويّة (كما في الشعيرات الشريانية) أو إلى **الامتصاص** إلى داخل الشعريّات الدمويّة (كما في الشعيرات الوريدية). ويظهر حجم السهم المقدار النسبيّ للضغط. إنّ القيمة العدديّة للضغط هي بالـ mm Hg، وتأخذ علامة زائد **(+)** إذا كان الضغط لصالح **الترشيح** وعلامة ناقص **(-)** إذا كان الضغط لصالح **الامتصاص**.

الضغط الإجماليّ net pressure، هو القوّة الدافعة الإجماليّة، ويمثّل المجموع الجبريّ للضغوط الأربعة. في المثال الوارد في الشكل (10، A): فإنّ مجموع ضغوط ستارلينغ الأربعة هو ضغط إجماليّ قدره **+6 mm Hg**، ممّا يشير إلى أنّه سيحدث **ترشيح** إجماليّ إلى **خارج** الشعريّات الدمويّة. وفي المثال الوارد في الشكل (10، B): فإنّ مجموع ضغوط ستارلينغ الأربعة هو ضغط إجماليّ قدره **-5 mm Hg**، ممّا يشير إلى أنّه سيحدث امتصاص إجماليّ إلى داخل الشعريّات الدمويّة.

من خلال فهم كيفيّة تأثير كلّ متغيّر في معادلة ستارلينج على حركة السوائل عبر الجدار الشعريّ، يمكن التنبّؤ بآثار اختلاف هذه المتغيّرات. يُوصَف كلّ متغيّر في معادلة ستارلينغ كالآتي:

- **الناقليّة الهيدروليكيّة K_f:** وهي نفوذية الماء للجدار الشعريّ، وتختلف باختلاف أنواع الأنسجة، معتمدةً على الخصائص التشريحية للجدار الشعريّ، مثال: حجم الشقوق بين الخلايا البطانيّة؛ إذا كانت الشعيرات الدمويّة مُثقَّبةً.
- **الضغط المائيّ السكونيّ الشعريّ P_c:** هو قوة لصالح الترشيح إلى خارج الشعريّات الدمويّة.

- **الضغط المائيّ السكونيّ الخلاليّ P_i:** هو قوة معاكسة للترشيح.
- **الضغط الجرميّ (أو التناضحي الغرواني) الشعريّ π_c:** هو قوة معاكسة للترشيح. هو الضغط التناضحيّ الفعّال للدم الشعريّ بسبب وجود بروتينات البلازما.
- **الضغط الجرميّ الخلاليّ π_i:** هو قوة لصالح الترشيح. يتم تحديده من خلال تركيز بروتين السائل الخلاليّ.

يبقى نسبة ضئيلة جداً من السوائل **المرتشحة لا تعود إلى الشعيرات**، وإنما تعود إلى الدم عبر الدوران **اللمفاوي**.

الدوران الوريدي

تحمل الأوردة الدم الذي **خضع للتبادل** من الشعيرات الدموية (الأسرة الشعيرية) في الأنسجة إلى القلب **الأيمن**، ويزداد قطرها وثخانة جدرها تدريجياً، وتتميز بأنها قادرة على **الانقباض والتوسع**، فتختزن كميات صغيرة أو كبيرة من الدم (**مستودعات للدم**)، وتجعل الدم متوفراً بحسب الطلب عليه. تدفع الأوردة المحيطية الدم وتساعد على **تنظيم** نتاج القلب.

خصائصه

1. حجم الدم في الأوردة حوالي **64 %** من حجم الدم الإجمالي بسبب **المطاوعة** الكبيرة لجدر الأوردة، ويتبدل حسب الظروف، ويختلف من عضو إلى آخر.
2. **الضغوط** في الدوران الوريدي **أقل** بكثير من الضغوط في الشرايين، فهي **16 ملم زئبقي** في الوريدات، و تصل حتى الصفر في الأوردة الكبيرة قرب القلب، عد إلى الشكل (4).
3. هناك مخازن نوعية للدم كالطحال والكبد والأوردة البطنية الكبيرة.

العود الوريدي

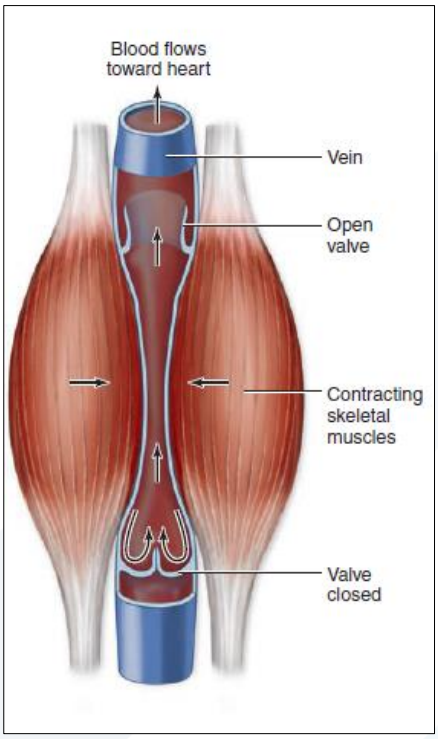
هو كمية الدم المتدفقة من الأوردة إلى الأذينة **اليمنى** كل **دقيقة**، وهو يعادل **نتاج القلب الأيمن** تماماً.

<u>تذكّر</u>: العوامل التي تؤمن عودة الدم إلى القلب

1. **فرق الضغط الدموي الديناميّ** (الهيموديناميكي) بين نهايتي الدوران الوريدي وهذا يعود للفعالية القلبية، وهو كافٍ في حالة الراحة والاستلقاء.
2. **الحركات التنفسية:** يزداد العود الوريدي أثناء الشهيق؛ إذ يتقلص الحجاب الحاجز فيرفع الضغط داخل البطن، ويساعد على تحريك الدم من الأحشاء باتجاه القلب.
3. **التقلص العضلي:** يرفع تقلص العضلات الهيكلية الضغط داخل أوردة العضلات والأوردة المجاورة، وتعمل الصمامات الوريدية بشكل أفضل، لذلك يعتبر المشي والرياضة من العوامل المهمة لتنشيط الدوران الوريدي الشكل (11).
4. **الصمامات (الدسامات الوريدية):** تعمل هذه الصمامات على جعل جريان الدم في أوردة الطرف السفلي باتجاه واحد نحو القلب، وتمنع عودته إلى الخلف (باتجاه الجاذبية الأرضية)، كما لها دور فيزيولوجي مهم جداً، يتمثّل بتجزئة الضغط الناجم عن تراكم الدم في أوعية الطرف السفلي أثناء الوقوف بتأثير الجاذبية،

مما يسمح بتبادل طبيعي في مستوى الشعيرات وعود طبيعي للدم. إن اضطراب وظيفة هذه الصمامات يترافق مع ظهور الدوالي وما ينجم عنها من اضطراب دوراني ووذمات Edema وتقرحات.

5. **النبض الشرياني:** يعمل مرور الموجة النبضية في الشريان كقوة دافعة عندما يكون الوريد على تماس مباشر مع الشريان.



الشكل (11): تدفق الدم داخل الوريد باتجاه واحد نحو القلب.

الدوران اللمفاوي

يمثل الجهاز اللمفاوي وسيلة **إضافية** لنضح السائل من الحيز الخلالي إلى الدم، وذلك **لأن معدل ترشيح** السائل في الوعاء الشعيري **يتجاوز** بنسبة **ضئيلة معدل عودة امتصاصه**، وهذا يعني أن قسماً من السوائل لا يعود بالدوران الوريدي، وإنما بالدوران اللمفاوي أو البلغمي والذي في النهاية ينضم إلى الدوران **الوريدي**.

تركيب اللمف

يشتق اللمف من **السائل الخلالي**، فهو يشبهه في التركيب، وهو **قابل للتخثر** لاحتوائه على **مولد الليفين**. يقدر تركيز **البروتين** في السوائل الخلالية **لمعظم** النسج بنحو **2 غ/دل**، لذلك يكون تركيز البروتين في اللمف الجاري من هذه النسج **قريب** من هذه القيمة، بينما يكون تركيز البروتينات في اللمف المتشكل في **الكبد مرتفعاً** حتى 6 غ/دل، وتركيزها في اللمف المتشكل في **الامعاء** بين 3-4 غ/دل. ويختلف تركيب اللمف حسب العضو الذي يأتي منه، فاللمف القادم من الأمعاء مثلاً غني **بالدسم** الممتص من قبل الزغابات المعوية. كما يمكن لبعض الجسيمات الكبيرة مثل **الجراثيم** أن تشق طريقها بين الخلايا البطانية للشعيرات اللمفية، وتدخل بهذه الطريقة إلى اللمف، ولكن عندما يمر اللمف عبر **العقد اللمفاوية** تتم إزالة هذه الجسيمات وتحطيمها.

وظائف اللمف

1. نقل **السوائل** والمواد المنحلة **المرتشحة** إلى النسج من الدم إلى الدوران اللمفاوي ثم الوريدي.
2. هو الممر الوحيد لعودة **البروتينات** (التي خرجت من الأوعية الدموية إلى النسج) إلى الدم.
3. ينقل العناصر **الغذائية** الممتصة في جهاز الهضم، ولاسيّما **الدسم** (الدقائق الكيلوسية: القطيرات الدسمة أو الشحمية المغلفة بالبروتين) إلى الدم.
4. للمف دور **دفاعي** مهم جداً؛ إذ أن المواد السامة والجراثيم تزال في العقد اللمفاوية الموجودة على مسير الأوعية اللمفاوية لاحتوائها على البلاعم والخلايا اللمفاوية المناعية، لذا فهي تؤدي دور **المصفاة**.

التشريح الوظيفي

تتجمع خلايا بطانية لتشكل شبكة من **الشعيرات اللمفاوية** أو البلغمية lymph capillaries مشابهة للشعيرات الدموية، تتجمع الشعيرات اللمفاوية لتشكل أوعية **جامعة** Lymphatic collecting vessels تحوي **صمامات** أو دسامات Valves تسمح بحركة اللمف (البلغم) باتجاه واحد نحو الأوعية الأكبر، يشاهد على مسير هذه الأوعية **العقد اللمفاوية** Lymph nodes، بعدها تتلاقى الأوعية الجامعة لتشكل **جذوعاً** بلغمية Lymph trunks، الشكل (12)، تصب في **القناة البلغمية اليمنى** Right lymphatic duct (الجانب الأيمن للرأس والعنق والصدر والذراع اليمنى) و**القناة الصدرية** Thoracic duct (بقية أنحاء الجسم)، ومنها إلى الوريد الأجوف العلوي، الشكل (13).

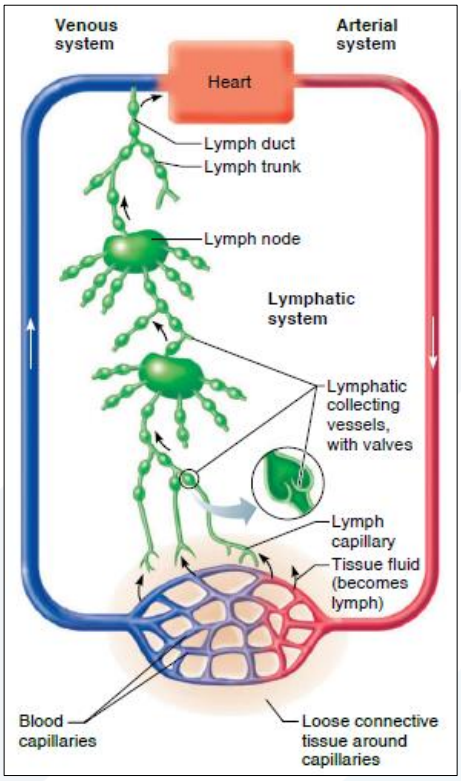
العود اللمفاوي

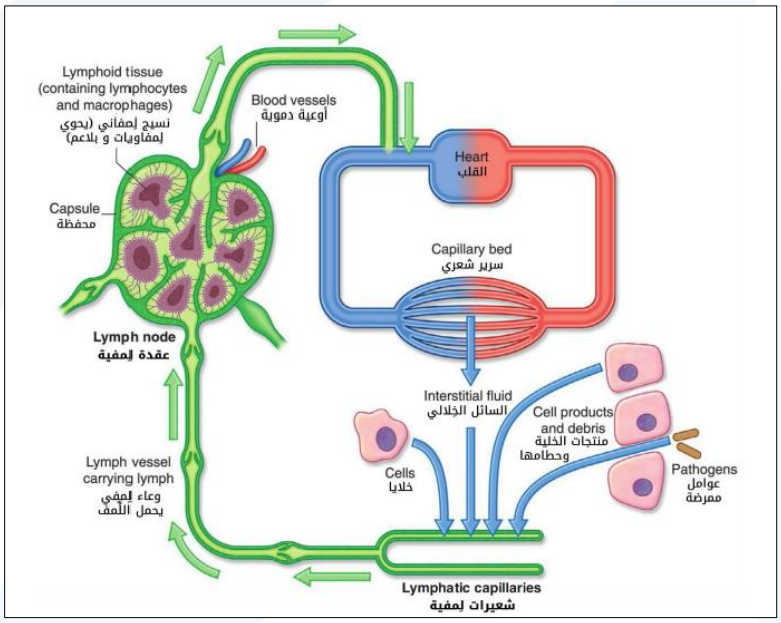
يكون **جريان** اللمف بطيئاً وضغطه **منخفضاً**، كما يكون الفرق بين ضغط السائل الخلالي والضغط داخل الوعاء البلغمي معدوماً في حالة الراحة، لذلك تتدخل عدة عوامل في تأمين العود البلغمي أهمها:

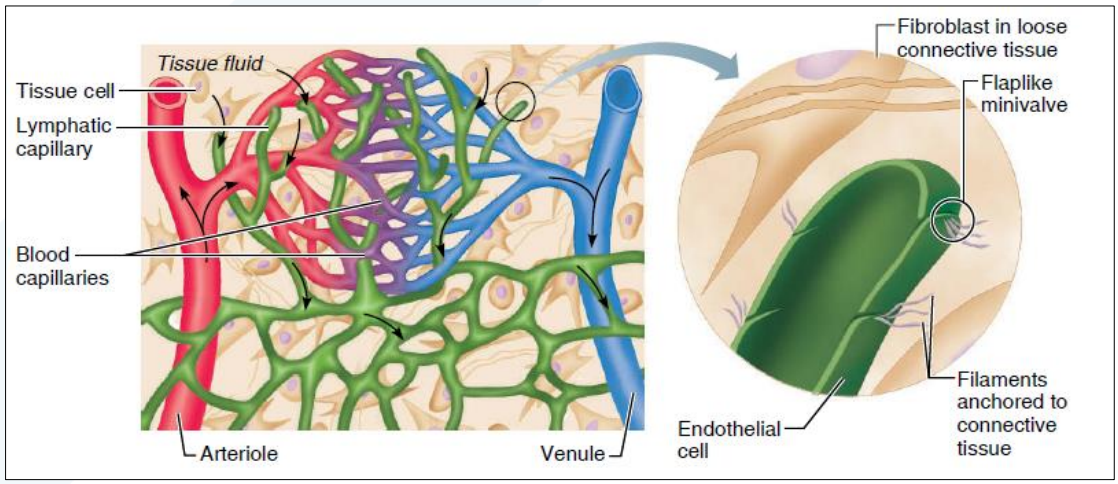
1. **ضغط السائل الخلالي:** تبين أن تدفق اللمف يكون قليلاً جداً عندما تكون ضغوط السائل الخلالي **سلبية**، وبارتفاع الضغط إلى قيم أعلى من 0 ملم زئبقي يزداد تدفق اللمف، لذلك فإن أي عامل يرفع ضغط السائل الخلالي يرفع أيضاً تدفق اللمف، ومن هذه العوامل:
   - ارتفاع ضغط الوعاء الشعيري.
   - انخفاض الضغط التناضحي الغرواني لمصورة الدم.
   - ارتفاع الضغط التناضحي الغرواني للسائل الخلالي (زيادة تركيز البروتينات).
   - ازدياد نفوذية الأوعية الشعيرية.
2. **فعالية المضخة اللمفاوية:** عندما تمتلئ الأوعية اللمفاوية يتقلص جدار الوعاء بشكل آلي تلقائي، وكل قطعة بين صمامين متعاقبين تقوم بوظيفة مضخة آلية منفصلة، وتستمر هذه العملية على طول الوعاء اللمفاوي حتى يتم تفريغ السائل.
3. **الانضغاط الخارجي المتقطع للأوعية اللمفاوية:** يؤدي أي عامل خارجي يضغط على الوعاء اللمفاوي بشكل متقطع إلى تقوية عملية الضخ، ومن هذه العوامل نذكر:

- **تقلص** العضلات الهيكلية المحيطية، ووجود **الصمامات** في الأوعية اللمفاوية تمنع عودة اللمف.
- **تحريك** أجزاء الجسم.
- **نبضان** الشرايين المحاذية للأوعية اللمفية.

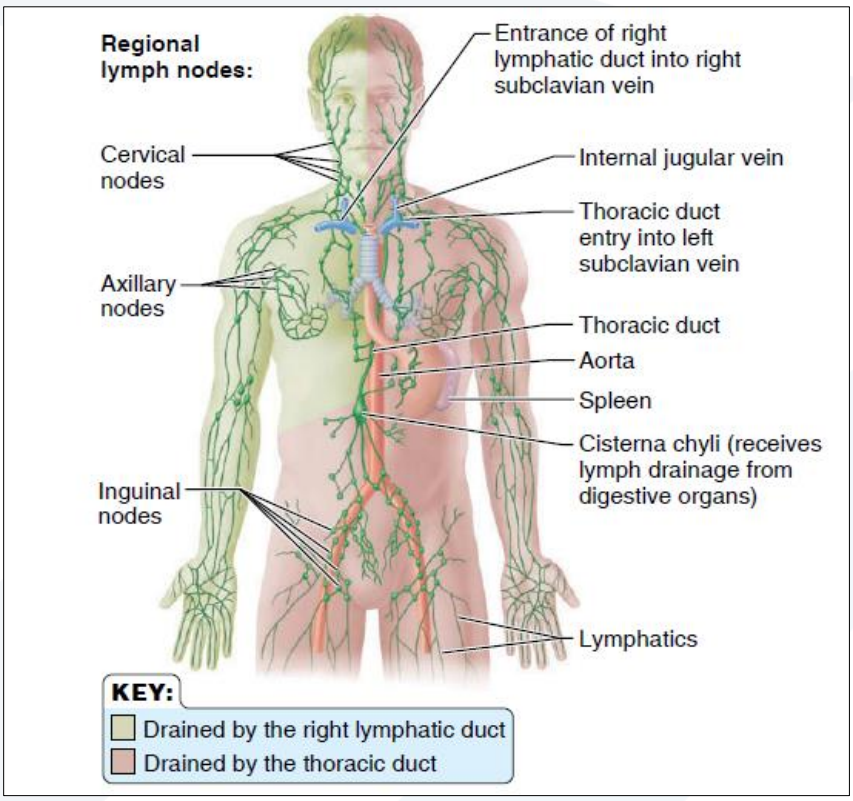
4. كما يلعب **التنفس** دوراً بتأمين العود البلغمي، كما في تأمين العود الوريدي.







الشكل (12): التشريح الوظيفي للجهاز اللمفاوي.



الشكل (13): الجهاز اللمفاوي (القناة الصدرية والقناة البلغمية اليمنى).

انتهت المحاضرة ... بالتوفيق للجميع