الفصل الرابع

4. حركة الموائع

يدرس علم الميكانيك حركة الأجسام المادية بشكل عام، وتعد دراسة حركة الموائع من أصعب فروع علم الميكانيك، لأن كثافة المائع تتغير من نقطة لأخرى، كما أن سرعته تتغير من لحظة لأخرى، عند نفس النقطة بالإضافة إلى لزوجة المائع وهي عبارة عن قوى احتكاك تعوق حركة المائع، ففي البداية سنتجاهل هذه الحقائق ونعد المائع مثالياً.

4. 1. تعريف الموائع

هي مواد قابلة للانسياب، ولا تأخذ شكلاً محدداً مثل السوائل، وإنما تأخذ شكل الأواني الحاوية لها أما الغازات فتأخذ شكل وحجم الأواني الحاوية لها وتتميز بقدرتها على الانسياب، وتنقسم الموائع إلى قسمين:

1- موائع قابلة للانضغاط: وهي الموائع التي تتغير كثافتها بتغير الضغط الواقع عليها مثل الغازات.

2- موائع غير قابلة للانضغاط: وهي موائع لا تتغير كثافتها بتغير الضغط الواقع عليها مثل السوائل.

4. 2. انسياب الموائع

من الصعب وصف حركة مائع ينساب عند كل نقطة، لأنه يتألف من عدد كبير من الجزيئات، ولذلك سنصف حركة المائع بدلالة بعض المقادير الفيزيائية مثل الضغط، والكثافة، والسرعة بدلاً من متابعة حركة جزيئاته،

بالإضافة إلى ذلك، توجد بعض الصعوبات في دراسة حركة المائع، حيث أن المائع في أثناء حركته يقوم بحركة دورانية، إذا اعترض مسيره جسم، بالإضافة إلى حركته الانسحابية ولتسهيل دراسة حركة المائع، نفترض أن المائع غير قابل للإنضغاط، ولا يقوم بحركة دورانية، وأخيراً نفترض أن المائع ليس لزجاً.

نسمي المائع الذي يتمتع بهذه الصفات بالمائع المثالي.

- يوجد طريقتان لوصف انسياب المائع:

أ- الطريقة الأولى: نتبع ما يسمى مجال السرعة

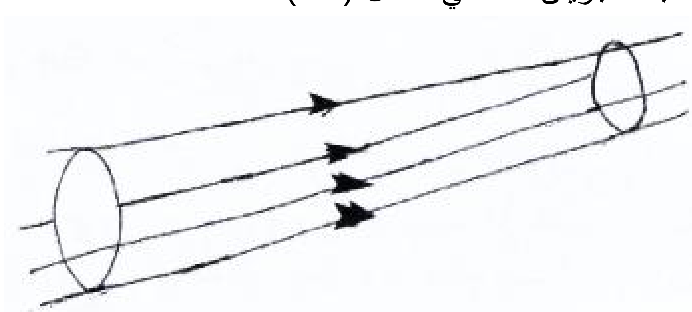
ب- الطريقة الثانية: نستخدم مفهوم خطوط الانسياب (الجريان)

4. 3. الجريان الانسيابي والجريان الدوّامي

في الجريان الانسيابي يكون لكل جزيء من المائع مسار محدد، ولا تتقاطع المسارات المختلفة، أما في الجريان الدوامي فتتقاطع المسارات.

4. 4. خط الجريان

خط الجريان هو خط وهمي داخل المائع ، بحيث يعطي المماس له عند أية نقطة اتجاه الجريان. كما في الشكل (4.1)



الشكل (4.1)

4. 5. أنبوبة الجريان

هي أنبوبة وهمية، جدرانها خطوط الجريان. ومن خواص أنبوبة الجريان أن المائع لا يخترق جدرانها لأن اتجاه الجدار عند أية نقطة هو اتجاه الجريان عند هذه النقطة، كما في الشكل (4.2).

الشكل (4.2)

4. 6. الجريان الثابت والجريان غير الثابت

يوجد نوعان من الجريان:

أ- الجريان الثابت:

تكون سرعة جريان المائع عند نقطة معينة ثابتة مع مرور الزمن، ويمكن أن تتغير هذه السرعة من نقطة لأخرى، حسب مقطع الأنبوبة.

ب- الجريان غير الثابت:

تتغير فيه سرعة جريان المائع عند النقطة نفسها من لحظة لأخرى، أي أن سرعة الجريان تكون ثابتة للزمن.

4. 7. معادلة الاستمرارية للجريان

لنأخذ أنبوبة جريان غير منتظمة المقطع كما في الشكل (4.3)، كثافة المائع الذي يجري في الأنبوبة (ρ)، وسرعته خلال المقطع A_1 هي V_1، وسرعته خلال المقطع A_2 هي V_2.

وإذا كان المائع غير قابل للإنضغاط، فإن التدفق الحجمي D_v (حجم المائع الذي يجتاز أحد مقاطع الأنبوبة في واحدة الزمن) الذي يجتاز أي مقطع من الأنبوبة ثابت، أي أن:

$$r A_1 V_1 \Delta t = r A_2 V_2 \Delta t$$

وبما أن كثافة المائع نفسها عند أي مقطع، يكون:

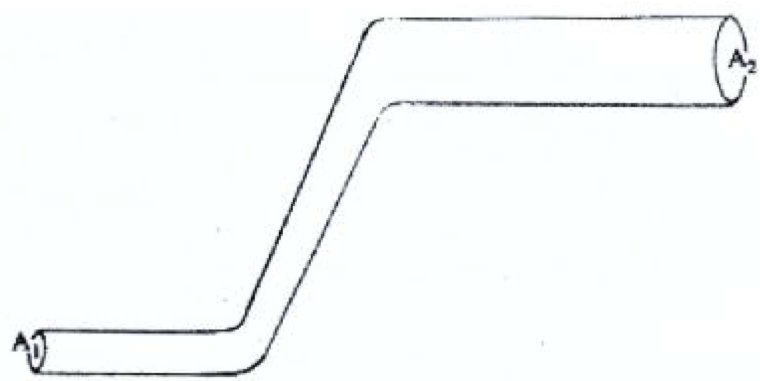
$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \qquad \textbf{(4.1)}$$

تدعى العلاقة (4.1) بمعادلة الاستمرارية للجريان.

أي أن حاصل ضرب المساحة A في السرعة يكون دائماً ثابتاً لأي أنبوبة جريان، ونسميه بمعدل الانسياب، ويرمز له بالرمز (Q)

$$Q = A V \qquad \textbf{(4.2)}$$

وواحداتها في الجملة الدولية m^3/s، كما توجد واحدة شائعة الاستخدام وهي ($Liter/s$) حيث $1\ Liter=1000\ cm^3$.



الشكل (4.3)

مثال (1)

ينساب ماء في أنبوبة ذات اختناق، مساحة مقطعها ($14\ cm^2$) بسرعة ($2m/s$). فإذا كانت مساحة مقطع الاختناق ($3\ cm^2$)، أوجد سرعة الماء أثناء مروره في الاختناق.

الحل:

لدينا معادلة الاستمرارية $A_1V_1 = A_2V_2$

إذا فرضنا أن (A_1) مساحة مقطع الأنبوبة (V_1) سرعة الماء خلال هذه المساحة وهي ($2\ m/s$) و(A_2) مساحة الاختناق وهي $3\ cm^2$ V_2 هي سرعة الماء عند مروره في الاختناق.

ويمكن حساب (V_2) كالتالي:

$$\left(14.10^{-4} m^2\right)\left(2m/s\right) = \left(3.10^{-4} m^2\right)V_2$$

$$V_2 = 9.33\ \text{m/s}$$

مثال (2):

أوجد معدل انسياب الدم في شريان قطره $18mm$ إذا كان متوسط سرعة انسياب الدم فيه $0.28\ m/s$

الحل:

من المعادلة $Q = AV$

حيث A مساحة مقطع الشريان وتساوي:

$$p\,r^2 = 3.14\times\left(9\times10^{-3}\right)^2$$

$$Q = 81\times0.28\times3.14\times10^{-6} = 71.22\times10^{-6} m^3/s$$

4 .8. معادلة برنولي

دانييل برنولي (*1700-1782*) عالم فيزيائي ورياضي، سويسري الأصل أهم اختراعاته كانت في مجال الهيدروديناميك، من أهم أعماله ما نشره عام *1738* في دراسة نظرية وتطبيقية على توازن السوائل وسرعتها في الأنابيب المختلفة المقاطع، افترض أن هنالك مائعاً مثالياً غير لزج ينساب خلال أنبوبة غير منتظمة المقطع الشكل (4.4) واقع تحت تأثير قوة ثابتة، (قوة الجاذبية الأرضية) ولتكن القوى السطحية الوحيدة التي يمكن أن تؤثر في هذا المائع، هي قوى الضغط الناظمية. لنطبق على جريان المائع قانون إنحفاظ الطاقة، وذلك بإهمال التبادل الحراري الذي يمكن أن يحصل بين جسيمات المائع والوسط الخارجي.

لتكن كثافة المائع (ρ)، وينساب انسياباً منتظماً ضمن الأنبوبة، فإنه عند النقطة (a)، حيث مساحة المقطع A_1 تكون سرعة جريان المائع (V_1)، والضغط (P_1)، والارتفاع (y_1)، أما عند النقطة (b)، حيث مساحة مقطع الأنبوبة (A_2) فتكون السرعة (V_2)، والضغط (P_2)، والارتفاع (y_2)، فإذا كانت كثافة المائع لا تتغير من نقطة لأخرى، لعدم قابلية المائع للانضغاط عند النقطة (a)، تكون القوة المؤثرة في المائع $F_1=P_1.A_1$

وهي في اتجاه انسياب المائع، ويكون العمل المبذول بواسطة هذه القوة موجباً

$$W_1=(P_1.A_1)dx_1 \qquad (4.3)$$

$$dx_1=v_1dt$$

أما عند النقطة (b)، فيكون مقدار القوة المؤثرة على المائع $F_2=P_2.A_2$ واتجاه تأثيرها في عكس انسياب المائع، أما العمل الذي تبذله هذه القوة فهو سالب، وقيمته تعطى بالعلاقة:

$$W_2 = (P_2.A_2)dx_2 \qquad \textbf{(4.4)}$$

$$dx_2 = v_2 dt$$

إن قوة الجاذبية تنجز عملاً لنقل الكتلة dm من المائع من ارتفاع y_1 إلى ارتفاع y_2، ويعطى بالعلاقة (4.1)

$$W_3 = gdm\,(y_1 - y_2) \qquad \textbf{(4.5)}$$

$$W = -\Delta U$$

وحيث أن:

$$dm = r A_1 V_1 dt = r A_2 V_2 dt \qquad \textbf{(4.6)}$$

بتعويض (4.6) في (4.5) نحصل على العمل الذي تنجزه قوة الجاذبية الأرضية، وتصبح العلاقة (4.6) على الشكل التالي:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \qquad \textbf{(4.7)}$$

بتعويض قيم W_1 وW_2 وW_3 من العلاقات (4.3) و(4.4) و(4.6) في العلاقة (4.7) نجد:

$$W = P_1 A_1 V_1 dt - P_2 A_2 V_2 dt + g\, r A_1 V_1 dt\,(y_1 - y_2) \qquad \textbf{(4.8)}$$

بتعويض معادلة الاستمرارية في العلاقة (4.8) نجد:

$$W = V_1 A_1 dt\left[P_1 - P_2 + r\,g\,(y_1 - y_2)\right] \qquad \textbf{(4.9)}$$

إن العمل المنجز والمعطى في العلاقة (4.9) يسبب تغير في الطاقة الحركية للمائع ويعطى التغير كما يلي:

$$\Delta E_K = E_K^2 - E_K^1 = \frac{1}{2} dm \left(V_2^{\,2} - V_1^{\,2}\right) \qquad \textbf{(4.10)}$$

ولكن $dm = PA_1V_1$ نعوض في العلاقة (4.10) نجد:

$$\Delta E_K = A_1 V_1 dt\left[\frac{1}{2} r \left(V_2^{\,2} - V_1^{\,2}\right)\right] \qquad \textbf{(4.11)}$$

وبما أن العمل يساوى التغير في الطاقة الحركية نجد:

$$P_1 - P_2 + r\,g\,(y_1 - y_2) = \frac{1}{2}\,r\left(V_2^{\,2} - V_1^{\,2}\right) \quad \mathbf{(4.12)}$$

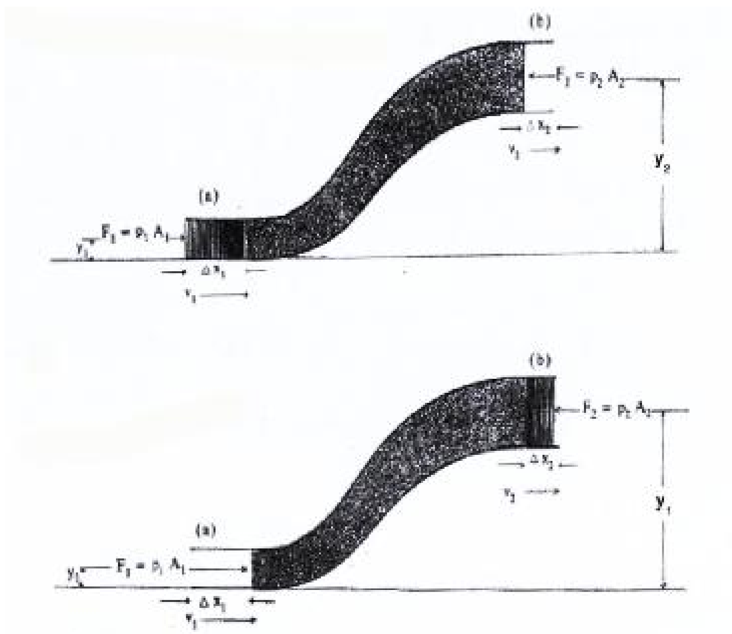
وبصفة عامة
$$P_1 + r\,gy_1 + \frac{1}{2}\,rV_1^{\,2} = P_2 + r\,gy_2 + \frac{1}{2}\,rV_2^{\,2} \quad \mathbf{(4.13)}$$

$$P + r\,gy + \frac{1}{2}\,rV^{\,2} = cte \quad \mathbf{(4.14)}$$

تدعى هذه المعادلة معادلة برنولي.

ومن أجل مائع ساكن ($V=0$)، أو مائع ينساب بسرعة ثابتة نحصل على:

$$P + r\,gy = cte \qquad \mathbf{(4.15)}$$



الشكل (4.4)

4. 9. تطبيقات معادلة برنولي

4. 9. 1. الأنبوبة ذات الاختناق

إذا انساب مائع في أنبوبة أفقية AB مختلفة المقاطع الشكل (4.5) فإن معادلة برنولي:

$$P_1 + \frac{1}{2} rV_1^2 + r\,gy_1 = P_2 + \frac{1}{2} rV_2^2 + r\,gy_2$$

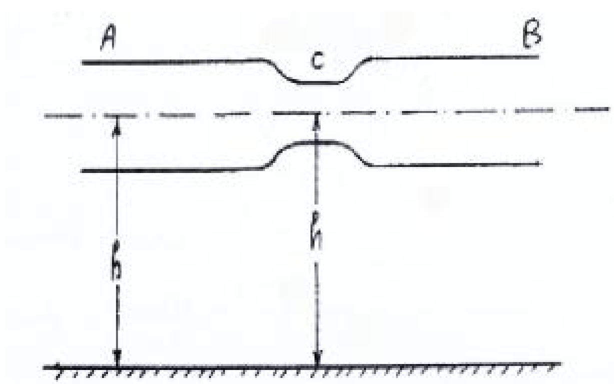
تصبح كما يلي:

$$P_1 + \frac{1}{2} rV_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} rV_2^2 \qquad \textbf{(4.16)}$$

حيث P_1 الضغط في المقطع الواسع (A)، وP_2 الضغط عند الاختناق (B)، من العلاقة (4.16)، نجد أن سرعة المائع عند (C)، تكون أكبر من سرعته عند (A)، أو (B)، أي أن ضغط المائع عند المقطع الواسع، يكون أكبر من ضغطه عند الاختناق، حيث (V_1, P_1, y_1) ارتفاع المائع عند A، وضغطه وسرعته على الترتيب و(V_2, P_2, y_2) ارتفاع المائع عند C، وضغطه وسرعته على الترتيب.

وبما أن الأنبوبة أفقية $y_1=y_2$ فإن:

$$\frac{1}{2}\left(V_2^2 - V_1^2\right) = \frac{P_1 - P_2}{r} \qquad \textbf{(4.17)}$$



الشكل (4.5)

4. 9. 2. جهاز فانتوري لتقدير سرعة وكمية جريان المائع

الجهاز عبارة عن أنبوبة مختلفة المقاطع ذات اختناق عند (C)، يقاس فرق الضغط بين (A, C)، بواسطة مانومتر وبما أن:

$$\frac{1}{2}\left(V_2^{\,2} - V_1^{\,2}\right) = \frac{P_1 - P_2}{r}$$

و

$$s_1 V_1 = s_2 V_2$$

$$V_2 = \frac{s_1 V_1}{s_2}$$

$$\frac{1}{2} V_1^{\,2}\left(\frac{s_1^2}{s_2^2} - 1\right) = \frac{P_1 - P_2}{r}$$

$$V_1^{\,2} = \frac{2P_1 - P_2}{\left(s_1^2 - s_2^2\right)} s_2^2$$

$$V_1 = s_1 \sqrt{\frac{2\left(P_1 - P_2\right)}{r\left(s_1^2 - s_2^2\right)}} \qquad \textbf{(4.18)}$$

وحجم المائع المار في الثانية $Q = s_1 . V_1$

$$Q = s_1 s_2 \sqrt{\frac{2\left(P_1 - P_2\right)}{r\left(s_1^2 - s_2^2\right)}} \qquad \textbf{(4.19)}$$

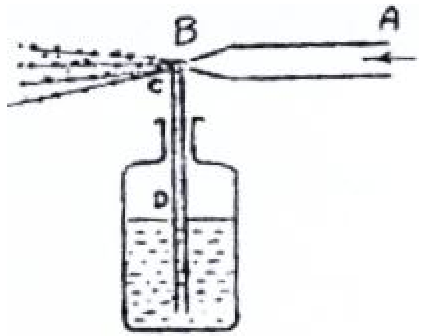
تعطي المعادلة (4.18) سرعة جريان المائع كما تعطي المعادلة (4.19) حجم المائع المار في الثانية الواحدة، خلال أي مقطع من مقاطع الأنبوبة. يمكن حساب P_1-P_2 من قراءة المانومتر.

$$P_1 - P_2 = y\left(r' - r\right) g \qquad \textbf{(4.20)}$$

حيث r' كثافة السائل في المانومتر.

4. 9. 3. البخاخة

إذا نفخ هواء في الأنبوبة (AB)، كما في الشكل (4.6) والتي مقطعها عند B صغيراً، فإن سرعة الهواء عند (B)، تكون كبيرة ويكون الضغط منخفضاً، ومن ثم يرتفع السائل في الأنبوبة (DC)، وينتشر عند المنطقة (B)، على شكل قطرات صغيرة.

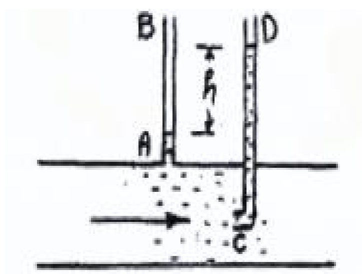


الشكل (4.6)

4. 9. 4. أنبوبة بيتون لقياس سرعة وكمية جريان السائل

يتركب الجهاز من أنبوبة (AB)، ذات فتحة ضيقة موازية لاتجاه جريان السائل، وأنبوبة أخرى (CD)، ذات فتحة عمودية على اتجاه الجريان، الشكل (4.7).

عند (C)، يقف جريان السائل، وتكون سرعته معدومة، أي تساوي صفر، لأن الفتحة رأسية، وتعدّ عائقاً.



الشكل (4.7)

باستخدام معادلة برنولي على الفتحتين (A,C).

$$\frac{P_1}{r}+\frac{1}{2}V_1^{\,2}+0=\frac{P_2}{r}+0+0 \qquad (4.21)$$

حيث V_1 سرعة السائل عند (A)، و(P_1) ضغطه عندها، (P_2) ضغط السائل عند (C)، و(ρ) كثافته:

$$\frac{P_2-P_1}{r}=\frac{1}{2}V_1^{\,2} \qquad (4.22)$$

$$V_1=\sqrt{\frac{2\left(P_2-P_1\right)}{r}} \qquad (4.23)$$

ويسمى P_2-P ضغط السرعة أو الضغط الديناميكي وهو مساوٍ لـــhgp

$$V_1=\sqrt{2gh} \qquad (4.24)$$

وإذا كانت (S) هي مساحة مقطع الأنبوبة الثانية. يكون حجم السائل المار فيها

$$Q=s_1V_1=s\sqrt{2gh} \qquad (4.25)$$

يحدث في حالات كثيرة اضطراب في الجريان مما يحدث تغيراً في مقدار، واتجاه وسرع جزيئات السائل، وينتج عن ذلك، أن قراءة الجهاز تكون أكبر من اللازم، وعلى ذلك يجب تعديل المعادلة السابقة إلى الشكل:

$$V_1=C\sqrt{2gh} \qquad (4.26)$$

حيث (C) ثابت، يسمى معامل أنبوبة بيتون، وهو أقل من الواحد وتتراوح قيمته بين (1) و(0.97).

4. 9. 5. انسياب سائل من مستودع في أسفله فتحة جانبية

نفرض أن لدينا مستودعاً بالسائل، وله فتحة جانبية عند (C)، كما في الشكل (4.8)، بفرض أن سرعة السائل عند (C) هي (V). إذا كان المستودع واسعاً تكون سرعة جريان السائل عند السطح (AB)، منعدمة تقريباً لأن مساحة

السطح كبيرة، والضغط عند (AB) = الضغط عند الفتحة (C) = الضغط الجوي وبالتعويض في معادلة برنولي، على السطح (AB) وعند الفتحة (C).

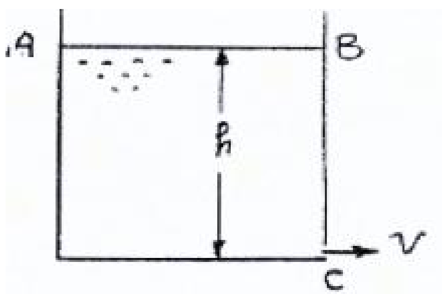
$$\frac{P}{r}+0+hg=\frac{P}{r}+\frac{1}{2}V^{2}+0$$

$$\frac{1}{2}V^{2}=hg \qquad \textbf{(4.27)}$$

$$V=\sqrt{2hg} \qquad \textbf{(4.28)}$$

تسمى هذه بمعادلة تورشيللي

ولكن لا يتأتى لأي سائل أن يكتسب هذه السرعة، لأننا أهملنا لزوجة السائل، كما أن خطوط مجرى الجريان تضيق عند الفتحة، ولا تكون متوازية مما يجعل للسرعة قيمة أكبر من هذه.



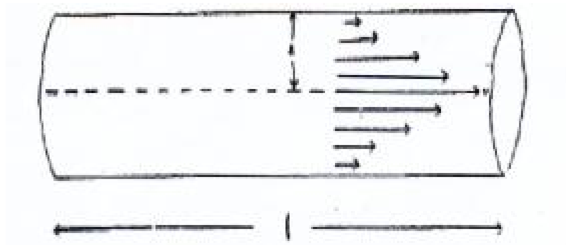
الشكل (4.8)

4. 10. الانسياب في الأنابيب الشعرية (قانون بوازوي)

وضع بوازوي الفرضيات التالية لحساب التدفق الحجمي لمائع في أنبوبة:

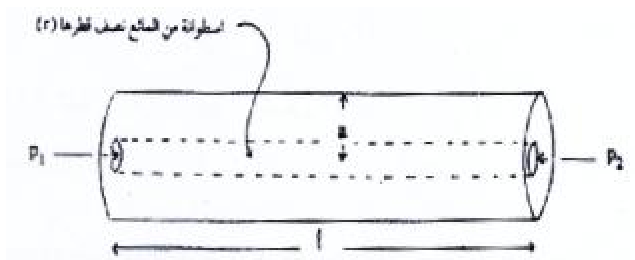
1- أن يكون انسياب المائع ثابتاً
2- أن يكون الضغط على مساحة مقطع الأنبوبة ثابتاً، وهذا لا يحدث إلا في الأنابيب الشعرية.
3- تكون طبقة المائع الملتصقة لجدار الأنبوبة ساكنة، ويحدث الالتصاق بالجدار نتيجة التوتر السطحي.

لندرس انسياب مائع لزج غير قابل للانضغاط في أنبوبة نصف قطرها (a)، وطولها (1) إن سرعة المائع المماس لجدار الأنبوبة تساوي صفراً، وتزداد هذه السرعة تدريجياً كلما ابتعدنا عن الجدار حتى تصل إلى أعلى سرعة (V)، عند مركز الأنبوبة، كما في الشكل (4.9).



الشكل (4.9)

لنتخيل اسطوانة من المائع نصف قطرها (r)، داخل الأنبوبة كما في الشكل (4.10)



الشكل (4.10)

فإذا كان لدينا اسطوانة من المائع نصف قطرها (r)، وطولها (1)، تتحرك داخل الأنبوبة الشعرية، التي نصف قطرها (a)، نتيجة لفرق في الضغط (P_1-P_2)، بين طرفيها، تتعادل قوة الضغط المحركة لاسطوانة الانسياب، مع قوة اللزوجة المقاومة لحركة الأنبوبة، لأن الجريان ثابت ومنتظم.

$$p\,r^2\left(P_1-P_2\right)=-h\left(2p\,r1\right)\frac{dV}{dr} \qquad \textbf{(4.29)}$$

وتدل الإشارة السالبة، أن السرعة تقل كلما ابتعدنا عن المحور. وبتكامل المعادلة (4.29) وبفرض أن $V=0$ عندما تكون $r=a$ و$V=v$ فإننا نحصل

$$\int_0^V V\,dv = -\frac{(P_1 - P_2)}{2\eta l}\int_a^0 r\,dr \qquad \textbf{(4.30)}$$

$$\left[V\right]_0^V = -\frac{(P_1 - P_2)}{2\eta l}\left[\frac{r^2}{2}\right]_a^0$$

ومنها نجد أن

$$V = \frac{(P_1 - P_2)}{2\eta l}a^2 \qquad \textbf{(4.31)}$$

نلاحظ من العلاقة السابقة، أن سرعة المائع تكون أعظم ما يمكن، عند مركز الأنبوبة.

وحيث أن مقدار هذه السرعة، يقل تدريجياً حتى ينعدم عند جدار الأنبوبة، فإننا نستطيع أن نعتبر أن المائع ينساب بسرعة وسطية، قيمتها:

$$\bar{V} = \frac{V+0}{2} = \frac{1}{2}V$$

حيث $\bar{V}$ السرعة الوسطية للمائع وV أعلى قيمة للسرعة

وبالتعويض عن (V) من المعادلة (4.31)، وحيث أن ($A = \pi a^2$) فإنه يمكن حساب معدل الانسياب Q بالشكل التالي:

$$Q = \frac{(P_1 - P_2)\pi a^4}{8\eta l} \qquad \textbf{(4.32)}$$

وتمثل هذه العلاقة قانون بوازوي ويمكن كتابتها بالشكل:

$$Q = \frac{(P_1 - P_2)}{R} \qquad \textbf{(4.33)}$$

حيث

$$R = \frac{8\eta l}{\pi a^4}$$

تمثل R الممانعة لجريان المائع على غرار المقاومة الكهربائية.

مثال (3)

أوجد الفرق في ضغط الدم عند مروره خلال شعيرة دموية طولها (2 mm) وقطرها (4 mm) إذا علمت أن سرعة انسياب الدم عند محورها (0.57 mm/s) وعامل اللزوجة للدم $h = 4.10^{-3} N.s/m^2$

الحل

باستخدام المعادلة $V = \frac{(P_1 - P_2)a^4}{4hl}$

أو

$$\begin{aligned}(P_1 - P_2) &= \frac{1}{a^2} 4hlV \\ &= \frac{1}{(2.10^{-6} m)^2} .4.(4.10^{-3} N.s/m^3) \\ &= (2.10^{-3} m)(0.57.10^{-3} m/s) \\ &= 4.56.10^3 N/m^2 \\ &= 34.2 \text{ mmHg}\end{aligned}$$

مثال (4)

استخدم معطيات المثال السابق، وأوجد معدل انسياب الدم في الشعيرة الدموية.

الحل

باستخدام المعادلة $Q = \frac{(P_1 - P_2)}{R}$

و $R = \frac{8hl}{pa^4}$

$$R = \frac{8(4.10^{-3} N.s/m^2)(2.10^{-3} m)}{p(2.10^{-6} m)^4} = 1.274.10^{18} N.s/m^5$$

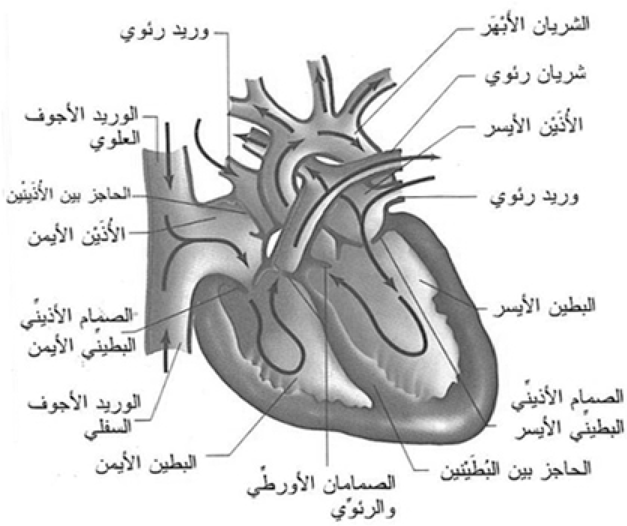
ومنها

$$Q = \frac{\left(4.56.10^{3} N \ / m^{2}\right)}{\left(1.274.10^{18} N .s \ / m^{5}\right)} = 3.58.10^{-15} m^{3} / s$$

وإذا شبهنا جريان السائل في الأنابيب بسريان التيار الكهربائي بالأسلاك فإن ΔP يمثل فرق الكمون، وQ التيار، فتكون R مقابلة للمقاومة الكهربائية وتمثل مقاومة الجريان.

4. 11. انسياب الدم في جسم الإنسان

قلب الإنسان عضلة حمراء مخططة غير إرادية، شكله مخروطي قاعدته إلى الأعلى، وذروته إلى الأسفل واليسار قليلاً، يسكن جوف الصدر، بين الرئتين للقلب أربعة أجواف، أذينان في الأعلى وبطينان في الأسفل، كما في الشكل (4.11)



الشكل (4.11)

يخرج الدم القاتم من البطين الأيمن إلى الشريان الرئوي فالرئتين، ويتوزع داخلهما بشبكة من الأوعية الشعرية، فيفقد قسماً كبيراً من CO_2 ويأخذ من هواء الرئتين الأكسجين فيتحول لونه إلى دم أحمر قانئ، يعود بوساطة الأوردة الرئوية الأربع إلى الأذينة اليمنى.

يندفع الدم الأحمر القانئ من البطين الأيسر، إلى الشريان الأبهر حيث يتفرع إلى فروع كثيرة، ثم إلى أوعية شعرية دموية دقيقة تنتشر بين خلايا الجسم حيث يعطي الدم الخلايا الأكسجين، والمواد الغذائية ويأخذ منها غاز CO_2 والفضلات فيتحول لونه إلى دم قاتم، يعود إلى الأذينة اليمنى بوساطة الوريدين الأجوفين العلوي والسفلي.

إن متوسط ضغط الدم في الأوردة والشرايين، حوالي *100 mmHg* وينخفض إلى حوالي *30 mmHg* في الشعيرات الدموية، ويستمر ضغط الدم في الانخفاض، حيث يتلاشى عند وصوله إلى الأذينة اليمنى.

كيف نفسر ضغط الدم من جزء لآخر في الدورة الدموية؟

إذا رجعنا إلى قانون بوازوي $Q = \frac{\Delta P p a^4}{8hl} = \frac{\Delta P}{R}$

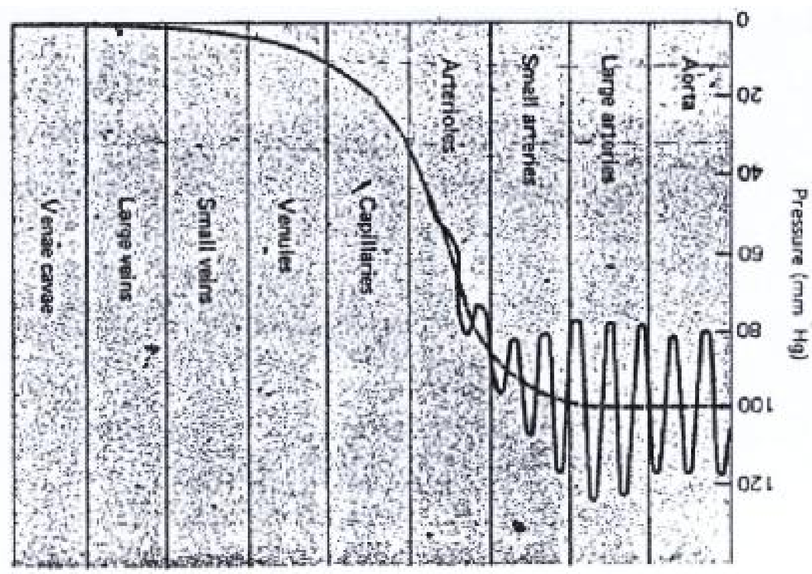
حيث $\Delta P = P_1 - P_2$

نلاحظ أن $\Delta P \ \mu \ \frac{1}{a^4}$

$$\Delta P \ \mu \ R$$

وهذا يعني أن الفرق في الضغط يتناسب عكسياً، مع نصف القطر مرفوعاً إلى الأس (4)، كما أنه يتناسب طردياً مع المقاومة، ولذلك فإن الانخفاض في الضغط في كل جزء من أجزاء الدورة الدموية، يتناسب طردياً مع مقاومة الأوعية الدموية في ذلك الجزء.

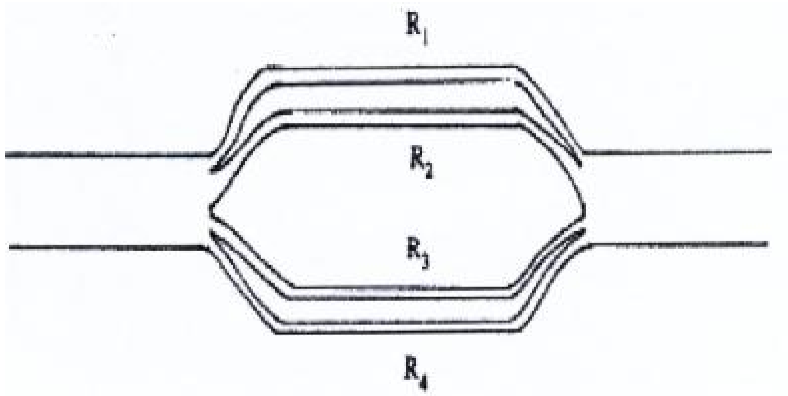
فالانخفاض في ضغط الدم في الأوردة، حيث نصف القطر يساوي (*9 mm*) يكون صغيراً جداً، لدرجة أن هذا الانخفاض لا يكاد يلاحظ، ولذلك فإن الفرق في الضغط في نهايتها يكون تقريباً كالضغط في بدايتها، أي (*100 mmHg*)، وكذلك الحال في الشرايين الرئيسية، ثم تبدأ المقاومة في الزيادة عند الشرايين الفرعية، فينقص فرق ضغط الدم في نهايتها إلى حوالي (*85 mmHg*). تعد مقاومة الشرايين الدقيقة هي الأكبر مقاومة في الجهاز الدوري، ولذلك فإن ضغط الدم سينخفض عند مروره فيها بمقدار (*55 mmHg*)، أي أن الدم يدخل الشعيرات الدموية بضغط قدره (*30 mmHg*) فقط. انظر الشكل (4.12)



الشكل (4.12)

عند مرور الدم في الشعيرات الدموية فإن ضغطه ينخفض - فقط - بمقدار (*20 mmHg*)، بالرغم من أن نصف قطر الشعيرات الدموية أصغر بكثير من الشرايين الدقيقة ويعزى ذلك إلى أن عدد الشعيرات الدموية كبير جداً،

علاوة على أن هذه الشعيرات متصلة على التوازي كما في الشكل (4.13)، وهذه الطريقة في التوصيل كما نعلم عند دراستنا لتوصيل المقاومات في الدوائر الكهربائية تكون فيها المقاومة أصغر من أي مقاومة على حده، فعند دخول الدم إلى العروق يكون ضغطه حوالي (*10 mmHg*)، ثم يبدأ في الانخفاض حتى يصل إلى الصفر عند رجوعه للأذين الأيمن.



الشكل (4.13)

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}}$$

مسائل الفصل الرابع

1- أنبوبة شعرية أفقية طولها $3000\ m$ وقطرها $0.70\ mm$ يجري من خلالها الماء بمعدل 20 ليتر في الثانية فإذا علمت أن لزوجة الماء ($0.001\ pa.s$) فاحسب فرق الضغط اللازم لهذا الجريان.

2- استنتج معادلة بوازوي لجريان السوائل في الأنابيب الشعرية.

3- ينساب ماء في أنبوبة أفقية غير منتظمة المقطع، فإذا كانت سرعة الماء ($7m/s$) عند نقطة ما حيث الضغط ($1.6.10^5pa$)، أوجد سرعة الماء عند نقطة أخرى حيث الضغط ($1.8.10^5pa$).

4- ينساب سائل كثافته النوعية (0.8) في أنبوبة غير منتظمة المقطع فإذا كانت مساحة مقطع الأنبوبة عند طرفها (a) هي ($11\ cm^2$) ومساحة المقطع عند الطرف الآخر (b) الذي ارتفاعه ($3\ m$) عن المقطع (a) هي ($45\ cm^2$) وكان معدل الانسياب ($0.09\ m^3/s$) أوجد الفرق في الضغط يبن المقطعين أهمل لزوجة السائل.

5- إذا كانت سرعة انسياب الماء في أنبوبة أفقية عند المقطع (a) هي ($1.6\ m/s$) وسرعته عند المقطع (b) هي ($3.4\ m/s$) أوجد الفرق في الضغط بين المقطعين أهمل لزوجة الماء.

6- اشرح معادلة برنولي.

7- سائل ينساب بسرعة V_0 خلال أنبوبة اسطوانية نصف قطرها (r) ما هي سرعة هذا السائل عند نقطة تضيق فيها الأنبوبة ويصبح نصف قطرها $r/4$ علماً بأن الأنبوبة تكون مفتوحة عند هذه النقطة.

8- ينساب الماء بانتظام خلال أنبوبة مغلقة فإذا كانت سرعة الماء عند نقطة

معينة هي $3\ m/s$، وكانت سرعة السائل عند نقطة أخرى، أعلى من الأولى بمقدار ($1\ m$)، هي ($4\ m/s$) وإذا كان الضغط عند النقطة السفلى ($20Kpa$) فما هو الضغط عند النقطة العليا؟ وكيف ستصبح قيمة الضغط عند النقطة العليا إذا أوقف سريان السائل وكانت قيمة الضغط عند النقطة السفلى ($18\ Kpa$)؟.

9- ينساب الماء خارجاً من أنبوبة بمعدل ($3\ cm^3/s$) أوجد سرعة الماء عند نقطة بالأنبوبة قطرها مساوياً.

أ- $0.5\ cm$ ب- $0.80\ cm$

10- إذا كان مقياس فانتوري يصنع اختناقاً مساحة مقطعه a_2 في أنبوبة مساحة مقطعها a_1، وإذا كان المقياس يسجل فرق الضغط P_1-P_2 بين الضغط الطبيعي للسائل P_1 والضغط عند الاختناق P_2 اشتق تعبيراً لسرعة السائل داخل الأنبوبة بعيداً عن الاختناق بدلالة البيانات السابقة.

11- باستخدام المسألة السابقة أوجد حجم السائل لوحدة الزمن المار عبر مقطع الأنبوبة.

12- برميل مملوء بالماء موضوع على منضدة ارتفاعها h فإذا كان هنالك ثقب في جانب البرميل بالقرب من قاعه ووجد أن الماء المندفع من الثقب يصطدم بالأرض على بعد (أفقي) مقداره R من البرميل فما هو عمق الماء بالبرميل؟

13- ثقب مساحته $1\ mm^2$ موجود في نهاية أنبوبة رفيعة بالقرب من قاع إناء كبير به ماء، فإذا كان الماء يندفع من ذلك الثقب وكان ارتفاع مستوى السطح العلوي للماء بالإناء هو $20m$ أعلى نقطة خروج الماء من الثقب، ما هي كمية الماء المندفع بالثانية؟.

14- أنبوبة أفقية تصل بين أنبوبتين أخريتين مساحة مقطعيهما A_1 وA_2 على التوالي والنهاية الأخرى للأنبوبة الأخيرة مفتوحة على الهواء، فإذا كان الضغط الجوي هو P_0 وبإهمال أثر اللزوجة فما هي قيمة الضغط داخل الأنبوبة الأولى واللازمة لجعل الماء يخرج بسرعة قدرها V_2 من النهاية المفتوحة؟ ما هي سرعة الماء في الأنبوبة الأولى؟ ما هو حجم الماء المنساب خارج الأنبوبة خلال الفترة Δt، عبر عن إجابتك بدلالة $\Delta t, A_2, A_1, V_2, P_0$.

15- ما هي معادلة الاستمرارية.

16- يتدفق الماء بهدوء من مجموعة أنابيب مغلقة، سرعة الماء عند إحدى النقاط $3m/s$ وسرعته عند نقطة أخرى تعلو الأولى بمتر واحد هي $4m/s$، إذا كان الضغط عند النقطة السفلى $20Kpa$ كم يكون الضغط عند النقطة العليا؟ ما الذي يؤول إليه الضغط عند النقطة العليا إذا توقف الماء عن الجريان وكان الضغط عند النقطة السفلى $18Kpa$؟