الفصل الأول

ميكانيك الموائع

لقد تم في هذا الفصل شرح النظريات الأساسية لسكون وتحريك الموائع بالإضافة لشرح مبسط للظواهر الفيزيولوجية دون التعرض لخواص انسياب الدم والأوعية الدموية.

فالموائع وعلى نقيض الأجسام الصلبة، سهلة التشوه فهي تأخذ شكل الوعاء الموجودة بداخله، كما أنها تستطيع الانسياب وتتضمن نوعين: السوائل والغازات.

وأنه أثناء انسياب الموائع الحقيقية (سائل وغاز) تخضع لاحتكاكات داخلية تؤدي إلى تحرير الطاقة، يسمى هذا الاحتكاك باللزوجة. لكن الفيزيائيين يحبون اعتبار الموائع بدون احتكاك؛ لذا تسمى هذه الموائع بالموائع المثالية وهي عبارة عن تصورات رياضية بحتة.

وأنه ما إن يبدأ المائع المثالي بالانسياب حتى يتابع حركته اللامتناهية دون إطلاق حرارة.

الصلب	المائع قابل للتشوه	
	غاز	سائل
حالة كثيفة	حالة مشتتة	حالة كثيفة
قليل التشوه		
قليل الانضغاط	قابل للانضغاط	قليل الانضغاط

I – سكون سائل غير قابل للانضغاط ومتساوي درجة الحرارة:

1 – قانون باسكال:

سندرس في هذه الفقرة القوانين الأساسية التي تخضع لها السوائل الساكنة دون المقارنة ما بين المائع المثالي والمائع الحقيقي.

مفترضين بأن السائل غير قابل للانضغاط ومتساوي درجة الحرارة وهذا بدوره يسمح بالتأكد من أن الكتلة الحجمية للمائع منتظمة في الحيز (المكان) والزمن.

يمكن تلخيص القوانين الفيزيائية لسكون الموائع العائدة إلى باسكال التالية التي تعبر عن الشرط الضروري والكافي لتوازن مائع ساكن.

$$P + Z\rho g = C^{te} \qquad (1)$$

حيث:

P : الضغط وهو حاصل قسمة القوة على السطح أي: dF/dS

Z : الارتفاع وفق منحى عمودي موجه نحو الأعلى

g : شدة الثقالة المفترضة أنها مستقلة عن الارتفاع

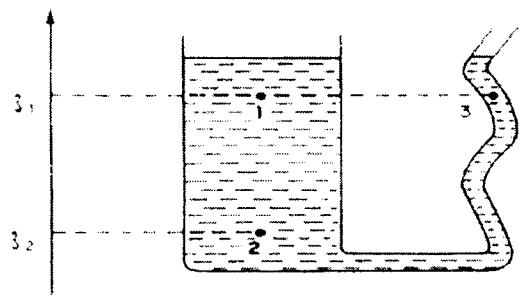
ρ : الكتلة الحجمية للسائل المفترضة أنها منتظمة

تعبر هذه العلاقة على أنه في كل نقطة من نقاط السائل يكون للكمية P + Zρg القيمة نفسها (الشكل1).

وبمقارنة النقاط 1و2 نجد:

$$P_1 + Z_1\rho g = P_2 + Z_2\rho g$$

وهذا يعني أن $p_2 > p_1$ عندما $Z_1 > Z_2$



الشكل 1

والنقاط 1و3 نجد:

$$P_1+Z_1\rho g=P_3+Z_3\rho g$$

وبما أن $Z_1=Z_2$ فإن $P_1=P_3$

وهذا يعني أن للضغط نفس القيمة في كافة نقاط السائل الواقعة على نفس الارتفاع. وهناك طريقة أخرى لكتابة القانون (1) هي :

$$\Delta P + \rho g \Delta Z = o \qquad (2)$$

يبين هذا القانون أننا نفقد بالارتفاع مانكسبه بالضغط والعكس صحيح.

2 – واحدات الضغط:

واحدة الضغط في الجملة الدولية هي الباسكال (Pa) وهي واحدة صغيرة وأن $1Pa = 1.Nm^{-2}$ (وهذا يعني الضغط الذي يطبقه ثقل قدره 100غرام على سطح قدره $1m^2$). وهي الواحدة الوحيدة الرسمية. وهناك واحدات أخرى مسموح بها:

- البار ويساوي 10^5Pa وهي واحدة مستخدمة بالأرصاد الجوية .

- الضغط الجوي النظامي ويساوي 1,013 بار أو 1013 ميلي بار أو تقريباً 10^5 باسكال.

- السنتيمتر المائي ويساوي 10^2 باسكال وتفيد هذه الواحدة في قياس الضغط الوريدي.

- الميليمتر زئبقي ويساوي 133,3 باسكال وتستخدم هذه الواحدة في قياسات الضغط الشرياني.

3 – بعض الضغوط الفيزيولوجية:

a – الضغط الشرياني:

يتغير الضغط الشرياني عند كل نبضة قلبية، ويجب قياسه على مريض وهو مستلقياً بغية تجنب تأثير الارتفاع (z#c[e])، أما إذا تم قياسه على مريض واقف أو جالس فيجب قياسه عند مستوى ارتفاع القلب.

- الضغط الانقباضي: تسمى القيمة العظمى بالضغط الانقباضي، وهي تساوي عند بالغ طبيعي 130mmHg أو 17KPa .

- الضغط الانبساطي: تسمى القيمة الصغرى بالضغط الانبساطي، وهي تساوي حوالي 80mmHg أو 10KPa.

- الضغط الشرياني المتوسط: وهو من مرتبة 100mmHg أو 13KPa .

b – الضغط الوريدي:

يقاس الضغط الوريدي على مريض مستلقٍ وغالباً عند ثنية المرفق ويجب ألا يتجاوز 10 سنتيمتر ماء أو 1KPa.

c – ضغط سائل سيسائية الرأس (LCR):

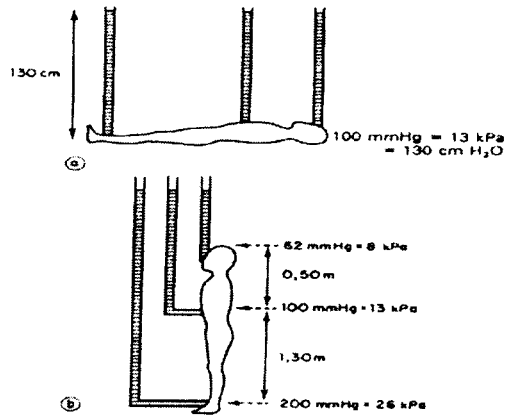
يغمر LCR المحتوى في الحيز تحت العنكبوتي الدماغ والنخاع الشوكي وهو يخضع لضغط من (10-15) سنتيمتر ماء أي Kpa (1-1,5) وذلك في مستوى الدملغ. ويزداد هذا الضغط عند ضغط الوريد الحلقي بغية إيقاف تسرب LCR ويمكن أن يصل إلى حوالي 50 سنتيمتر ماء. وينجم عن سوء تسرب LCR ارتفاع مستمر للضغط داخل الجمجمة يتسبب بارتشاح وذمي للنسيج العصبي وخاصة العصب الضوئي (وذمة الحلمة المرئية في قعر العين). وأن تخفيف الانضغاط داخل العمود الفقري يتسبب بحدوث جذع مخي في الثقب القفوي. وهذا بدوره يضغط على البصلة السيسائية وقد يتسبب بالموت .

d – الضغط داخل العين:

تخضع السوائل داخل حجرة العين إلى ضغط أقل من 20mmHg أو 2,6KPa وأنه في حالة زرق العين يكون الضغط داخل العين مرتفعاً، أما في حالة زرق العين الحاد جداً والمؤلم جداً يمكن أن يتراوح ما بين (13-16)KPa أو (100-120)mmHg .

4 – تغير الضغوط الدورانية حسب الوضعية:

يوضح (الشكل 2) الرسومات المقابلة للضغط الشرياني المتوسط وأن الأرقـــام هي تقريبية وذلك عند اعتبار الكتلة الدموية ساكنة.



الشكل 2

فعندما يكون الجسم مستلقياً (الشكل 1a) (Z تقريباً ثابتة في كل نقطة مـــن الجسم) يأخذ الضغط الشرياني المتوسط قيمة هي نفسها في كل نقطة مـــن نقـــاط الجسم وتساوي إلى 13KPa أو 100mmHg. وهو عبارة عن الضغط الزائد (فـــرق الضغط) المتوسط المنتشر عن البطين الأيسر بالنسبة للضغط الجوي.

أما عندما يكون الجسم واقفاً (الشكل 2b) فالضغط عند مستوى القلب وهـذا يعني عند مخرج الدم من البطين الأيسر هو دائماً 13KPa وهو يســـاوي إلى 8KPa عند مستوى الرأس أي على ارتفاع 0,5m من القلب، ويصل إلى 26KPa في شـريان القدم أي على انخفاض 1,3m من القلب.

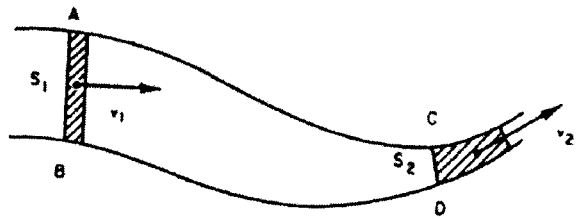
وليكون ممكناً الاعادة والمقارنة ما بين شخص وآخر، يجب أن يقاس الضغط الشرياني على مريض مستلقٍ.

أما ما يخص الضغط الوريدي فهو تقريباً معدوماً في الأذينة اليمنى وبالتالي فهو سالب (-5KPa) عند مستوى الرأس، وهو يساوي 13KPa عند مستوى القدم.

أما في حالة التغير المفاجئ للوضعية (انتقال سريع من الوضعية المستلقية إلى وضعية الوقوف) فيظهر تزايد مفاجئ للضغط في الأطراف السفلية مما يؤدي إلى اتساع الأوعية الدموية. وأن عودة دم الأوردة إلى القلب يحدث ألماً وتتوقف المضخة القلبية وينتج عن ذلك انخفاض في الدوران المخي، وبالتالي فإن نقص الأكسجين الناتج يتسبب في الإغماء؛ لذا يجب عدم رفع المريض بقوة، كما يجب تركه مستلقياً وإعطاؤه مركبات ضد الجاذبية (anti-g) المحاصرة للبطين والأطراف السفلية.

II – تحريك الموائع الغير قابلة للانضغاط:

عندما يكون السائل غير قابل للانضغاط، فإن الكمية التي تدخل حجماً محدداً هي عند كل لحظة مساوية وبدقة للكمية التي تخرج منه (الشكل3).



الشكل 3

وبالتالي خلال الـــزمن Δt فالكمية التي تدخل الحجم ABCD تساوي إلى S_1 $V_1 \Delta t$، أما التي تخرج منه فتساوي $S_2 V_2 \Delta t$ حيث V و S هما على الترتيب ســـطح المقطع والسرعة المتوسطة للمائع في النقطة المعتبرة ومنه:

$$S_1V_1=S_2V_2$$

وبالتالي يمكننا القول بأنه من أجل مائع غير قابل للانضغاط ينســـاب ضمـــن أنبوب قطره متغير يكون الجداء SV لسطح المقطع بالسرعة المتوسطة للانسياب ثابتـاً على طول الأنبوب:

$$SV=C^{te} \qquad (3)$$

إنها معادلة الاستمرارية التي تعبر عن انحفاظ المادة.

1 – نظرية برنولي:

سنقتصر على حالة الحركة المستمرة وهذا يعني بأن التدفق ثابت مـــع الزمـــن وسنفترض أيضاً بأن المائع مثالي وهذا يعني أنه مجرد من الاحتكاك مما يقودنـــا إلى نتيجتين:

- نظام الانسياب صفائحي وهذا يعني أنه مجرد من الاضطرابات التي لا يمكـــن أن تحدث إلا بالاحتكاكات.
- الطاقة الكلية لكمية محددة من المائع ثابتة مع الزمن على طول الأنبوب. أي أن:

الطاقة الكمونية + الطاقة الحركية = ثابت

وأن الطاقة الكمونية تتحلل إلى حدود مرتبطة بالضغط والثقالة ومنه فإن:

طاقة الضغط الكمونية + طاقة الثقالة الكمونية + الطاقة الحركية = ثابت

وبإرجاع هذه العلاقة إلى واحدة الحجم نكتب:

$$p + \rho g z + \frac{1}{2}\rho v^2 = c^{te} \qquad (4)$$

تعبر هذه العلاقة عن نظرية برنولي حيث:

p: الضغط السكوني.

ρ: الكتلة الحجمية التي يفترض بأنها منتظمة (غيرقابلة للانضغاط ومتساوية درجة الحرارة).

z: الارتفاع ويحسب موجباً نحو الأعلى.

g: شدة الثقالة الأرضية (منتظمة).

v: سرعة المائع.

يمكن اعتبار كل حد من الحدود الثلاثة في نظرية برنولي إما كضغط وإما كطاقة خلال واحدة الحجم (لهذين المقدارين نفس الأبعاد).

P: الضغط السكوني، طاقة الضغط الكمونية.

ρgz: ضغط الثقالة، طاقة الثقالة الكمونية.

$\frac{1}{2}\rho v^2$: ضغط حركي، طاقة حركية.

كما يمكننا أن نطلق اسم شحنة المائع على المجموع

$$p + \rho g z + \frac{1}{2}\rho v^2$$

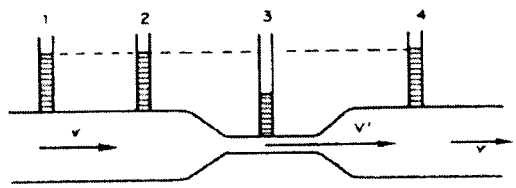
وبالتالي تصاغ نظرية برنولي على الشكل التالي:

في مائع مثالي غير قابل للانضغاط وهذا يعني بدون احتكـــاك وذات حركـــة مستمرة، تكون الشحنة ثابتة على طول القناة.

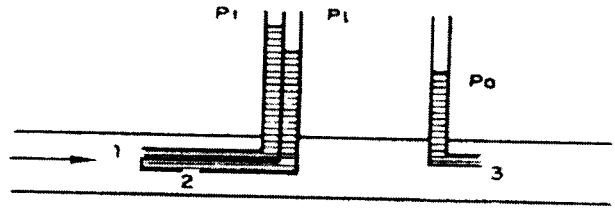
2 – نتائج نظرية برنولي:

ـــ عندما $v = o$ نعود إلى الحالة السكونية ونجد العلاقة (1) وهـــــذا يعـــني نظريـــة باسكال.

ـــ يمثل (الشكل4) أنبوباً أفقياً مقطعه متغير، ولنقيس الضغط السكوني في النقـــــاط 1و2و3و4. ففي النقاط 1و2و4 يكون للسرعة v نفس القيمة لأن المقطع هو نفسه وكذلك يكون للضغط نفس القيمة وهذا ما يشير إليه ارتفاع السائل في مقـــاييس الضغط الثلاثة.



الشكل 4



الشكل 5

أما في النقطة 3 فالمقطع أصغر وبالتالي فالسرعة أكبر؛ ولهذا فالحد $\frac{1}{2}\rho v^2$ أكبر، وبما أن Z لم تتغير فإن p أصغر؛ ولهذا يمكننا القول إنه في مناطق اختناقات الأنبوب يكون الضغط السكوني أصغرياً وهذا هو فعل فنتوري.

- أنبوب بيتو:

لنضع في مائع متحرك مقياسي ضغط كما في (الشكل 5) ففي الحالة رقم 1 يكون مقياس الضغط مواجهاً للتدفق السائلي، وبالتالي فالضغط المقاس يسمى بالضغط النهائي، أما في الحالة رقم 2 فيكون مقياس الضغط جانبياً والغشاء موازياً للتدفق ويسمى الضغط المقاس بالضغط الجانبي. وتبين التجربة مطابقة للنظري، بأن الضغط الجانبي أصغر من الضغط النهائي وأن الفرق يساوي إلى: $\frac{1}{2}\rho v^2$

إذاً: الضغط النهائي= الضغط الجانبي + $\frac{1}{2}\rho v^2$

وبنفس الطريقة فالضغط الخلفي (في 3على الشكل 5) أصغر من الضغط الجانبي. كما تبين التجربة بأن الفرق هو من مرتبة $0{,}8\ \rho v^2$ وأن هذه الاعتبارات تمكننا من استنتاج المفاهيم التالية:

- الضغط المقاس في وعاء دموي، يمكن أن يتغير حسب توجه غشاء مقياس الضغط بالنسبة لتدفق الدم.ويجب معرفته عندما نقيس الضغط باستعمال مقياس ضغط موجود في قثطر مرن وأنه بموجب انحنائه لا نعلم فيما إذا كنا نقيس الضغط النهائي أو الضغط الخلفي أو قيمة وسطية لا على التعيين.
- ومن جهة أخرى فإن القياس المتزامن للضغط النهائي والضغط الجانبي شبيه بالذي يطبق في الطائرة، يسمح بقياس السرعة النسبية للهواء بالنسبة للطائرة. وهذا هو مبدأ أنبوب بيتو. واستناداً إلى نفس المبدأ، يسمح قثطر مزدوج موجه بقياس سرعة الدم(الشكل 5).

لنتفحص الآن أهمية الخطأ الذي نرتكبه في حركية الدم غير آخذين بعين الاعتبار للضغط الحركي $\frac{1}{2}\rho v^2$.

فعند السكون يكون الخطأ صغيراً. ففي الأبهر مثلاً حيث الضغط المتوسط $\overline{P}$ يساوي إلى 13KPa (100mmHg) والسرعة المتوسطة $\overline{V}$ تساوي إلى $30Cm.S^{-1}$، والضغط الحركي يساوي إلى 0,053KPa (0,4mmHg) أو 0,4% مفترضين بأننا نستطيع تطبيق العلاقة من أجل الضغط الانقباضي 16KPa (120mmHg) وسرعة عظمى $100ms^{-1}$، وضغط حركي يساوي 0,53KPa وبخطأ قدره 3% تقريباً.

أما في الشريان الرئوي- دائماً في حالة سكون - فإن الأرقام المتوسطة الموافقة هي :

$$(12mmHg)\overline{p} = 1,6KPa$$

$\overline{V} = 25Cm.S^{-1}$ والضغط الحركي يساوي إلى 2% من الضغط المقاس وأن الأرقام الانقباضية هي $p = 2,7KPa$ و $V = 90Cm.S^{-1}$ والخطأ النسبي هو 13% للضغط الحركي. وأنه عند بذل جهد وذلك عندما يكون التدفق مضروباً بـ 4 مثلاً

فالمقدار $\frac{1}{2}\rho v^2$ يكون مضروباً بـ 16ومن ثم فإن نتائج قياس الضغط تتعلق كثيراً بتوجه مقياس الضغط.

3 – حالة مائع حقيقي:

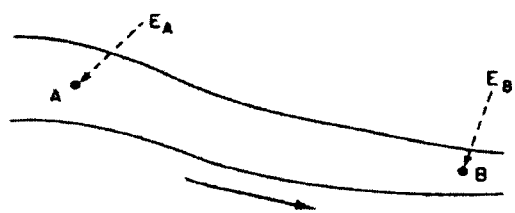
لنعد الآن إلى الحركة المستمرة لمائع حقيقي غير قابل للانضغاط وهذا يعني وجود احتكاك داخلي. أي أن جزءاً من طاقة المائع تتبدد على شكل حرارة ومنه:

طاقة الضغط الكمونية + طاقة الثقالة الكمونية+طاقة حركية+حرارة منطلقة = ثابت

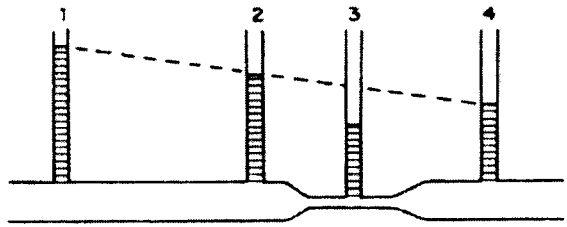
وبمعنى آخر فالشحنة:

$$E = P + \rho g z + \frac{1}{2}\rho v^2$$

ليست ثابتة بل تتناقص تدريجياً على طول القناة، وأن ضياع الشحنة E_A-E_B يساوي إلى كمية الحرارة المتبددة خلال واحدة حجم المائع ما بين النقطتين AوB (الشكل 6) في هذه الحالة فإن (الشكل 4) يتغير إلى (الشكل 7).



الشكل 6



الشكل 7

ويمكننا ملاحظة التشابه ما بين الانسياب المستمر لمائع حقيقي وانسياب التيار المستمر في الكهرباء. وأن هذا التشابه موضح في الجدول I وأن السطر الأخير من هذا الجدول يأخذ شكلاً خاصاً عندما يكون مقطع القناة الأفقية ثابتاً $P=(P_A-P_B)\,Q$

الكهرباء	حركية الدم
شدة (شحنة منسابة خلال ثانية) I	تدفق حجمي (حجم خلال ثانية) Q
كمون طاقة/واحدة كمية الكهرباء V	شحنة طاقة/واحدة الحجم $E = P + \rho gz + \frac{1}{2}\rho v^2$
الاستطاعة المستهلكة $P = (V_A - V_B)I$	الاستطاعة المستهلكة $P = (E_A - E_B)Q$

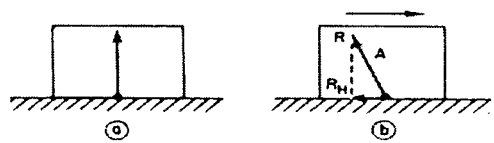
جدول I

III – اللزوجة، عامل مقاومة الانسياب:

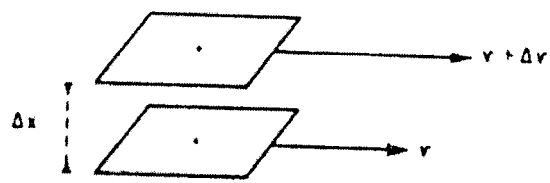
تمثل المقاومة الكهربائية الاحتكاك ما بين الإلكترونات أو الأيونات المتحركة في الناقل وبنفس الطريقة نلاحظ في مائع حقيقي أن الجزيئات المتحركة داخله تطبق على بعضها البعض احتكاكا. لكن بفحص ظاهرة الاحتكاك بشكل مفصل نرى بأننا لا نستطيع تعميم قوانين الكهرباء على انسياب الموائع في جميع الحالات.

1 – تعريف اللزوجة:

إن وجود الاحتكاك المتبادل ما بين جسمين متحركين لا يمكن أن يتم بدون ظهور قوة، موازية ومعاكسة للانتقال (الشكل 8).



الشكل 8



الشكل 9

يمثل (الشكل 9) صفيحتي مائع متوازيتين تنـــزلقان على بعضـــــهما البعـــض بسرعة نسبية ΔV وبغية الأخذ بالحسبان لقوة الاحتكاك F التي تطبقها كل صفيحـــة على الأخرى، اقترح نيوتن العلاقة التالية:

$$F = \eta S \frac{\Delta V}{\Delta X}$$

حيث:

S: السطح المشترك للصفيحتين

ΔX: البعد الفاصل ما بين الصفيحتين

ΔV: تدرج السرعة

η: معامل اللزوجة

وتقاس اللزوجة في الجملة الدولية $Kg.m^{-1}S^{-1}$ أو جداء الضغـــــط بـــالزمن، وبالتالي فإن واحدة اللزوجة في الجملة الدولية هي باسكال X ثانية (Pa.S) (أحيانـــاً يستخدم البواز Po والذي يساوي 10^{-1}Pa.S) ونميز نوعين من السوائل.

- **موائع نيوتونية:**

تسمى السوائل التي يمكن تطبيق العلاقات الواردة سابقاً عليها بشكل مرضـــي، وهذا يعني السوائل التي يكون معامل لزوجتها η مستقلاً عن تدرج السرعة، بـــللوائع النيوتونية كالماء مثلاً.

- **موائع لانيوتونية:**

تسمى السوائل التي قيم معامل لزوجتها η متغير مع قيم $\frac{\Delta V}{\Delta X}$ بالموائع اللانيوتونية، وأن محاليل الجزيئات الكبيرة هي غالباً لانيوتونية.

وبشكل عام فإن معامل لزوجة المائع يتناقص بازدياد درجة الحرارة مشيرين إلى أن معامل لزوجة الماء عند درجة الحرارة $20\ ^{\circ}C$ هي:

$$\eta = 10^{-3} Pa.S$$

2 – أنظمة انسياب سائل لزج :

تبين التجربة اليومية بأن للمائع اللزج نظاماً انسيابياً في نفس القناة وعندما يكون التدفق ضعيفاً، يكون لجميع جسيمات السوائل سرعة موازية للجهة العامة للانسياب. وأن صفائح السوائل تنزلق على بعضها البعض ويسمى نظام الانسياب حينئذٍ بالنظام الصفائحي (الشكل10)

الشكل 10

أما عندما يكون التدفق قوياً فتظهر عندئذ دوامات (اضطرابات) ويكون لجسيمات السائل عند لحظة محددة متجهة سرعة غير موازية للجهة العامة للانسياب، فهي تجتاز مساراً أكثر طولاً من الانتقال الكلي للمائع ويسمى نظام الانسياب حينئذ بالنظام المضطرب (الشكل 10b). وبغية تحديد هذين النظامين، أظهر الفيزيائي

الإنكليزي رينولدز الفائدة من وجود عدد صحيح R بدون أبعاد (يسمى عدد رينولدز) ويعرف بالشكل التالي:

يتميز المائع الذي كتلته الحجمية ρ ومعامل لزوجته η المنساب في أنبوب قطره dبسرعة متوسطة $\overline{V}$ بالعدد

$$R = \frac{\rho \overline{V} d}{\eta}$$

فإذا كانت R < 2400 وهذا يعني بأن

$$\overline{V} < \frac{2400}{\rho d} = Vc$$

(Vc سرعة حرجة) فالنظام دائماً صفائحي. أما إذا كانت R >10000 فالنظام دائماً مضطرب بينما فيما يتعلق بالقيم الوسطية، فنظام الانسياب غير مستقر ويتعلق كثيراً بالشروط التجريبية.

وبدراسة أكثر تفصيلاً لهذين النظامين متفحصين خواص كل واحد منهما نرى وبشكل خاص بأن النظام الصفائحي هو الوحيد الشبيه بالنظام الكهربائي وأن تعريف وحساب المقاومة الميكانيكية للانسياب مشابه للمقاومة الكهربائية.

a – النظام الصفائحي:

– **قانون بوازويل:** تعود دراسة هذه الظاهرة إلى بوازويل. فقد أظهر من أجل بعض السوائل النيوتونية كالماء مثلاً بأن الانسياب الصفائحي يكون بحيث إن السرعة

عظمى على محور القناة وتتناقص حتى تنعدم على الجدران(الشكل11) وأن مظـــــهر السرعات هو عبارة عن قطع مكافئ. وأن السرعة المحورية تعطى بالعلاقة التالية:

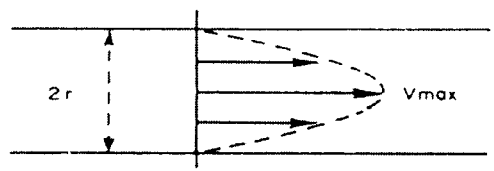
$$V_{\max} = \frac{r^2}{4\eta} . \frac{\Delta E}{\Delta L}$$

حيث:

r: نصف قطر الأنبوب الأسطواني

η: معامل اللزوجة

$\frac{\Delta E}{\Delta L}$: ضياع الشحنة خلال واحدة الطول ($= \frac{\Delta P}{\Delta L}$ إذا كان الأنبوب أفقياً)



الشكل 11

وأنه يمكن الحصول على التدفق الحجمي بالتكامل:

$$Q = \frac{\pi}{8\eta} r^4 . \frac{\Delta E}{\Delta L}$$

تعرف هذه العلاقة تحت اسم قانون بوازويل. وأنه عندما نقسم r على 2 فـــإن التدفق يقسم على 16

أما السرعة المتوسطة $\overline{V}$ (معرفة بـــ $\frac{Q}{\pi r^2}$) فتساوي إلى :

$$\frac{V_{\max}}{2} = \frac{r^2}{8\eta} . \frac{\Delta E}{\Delta L}$$

- **قانون أوم:**

نستنتج من قانون بوازويل قيمة ضياع الشحنة ΔE ما بين طرفي أنبوب نصف قطره r وطوله L يجتازه مائع بنظام صفائحي وبتدفق Q.

$$\Delta E = \frac{8\eta}{\pi r^4}.\Delta L.Q$$

إن هذه العلاقة التي تعبر عن تناسب ضياع الشحنة بالتدفق تكافئ بدقة قانون أوم في الكهرباء (V=RI) وهي تسمح بتحديد المقاومة الميكانيكية للانسياب في النظام الصفائحي.

$$\text{ميكانيك} \quad R = \frac{8\eta}{\pi r^4}.\Delta L$$

فإذا قارنا ما بين العلاقات R كهرباء وR ميكانيك – نرى بأن:

- المقاومة الأولى والثانية تتغيران مع تغير طول الناقل (أو الانبوب).
- Rكهرباء تتغير عكساً مع سطح المقطع بينما Rميكانيك تتغير عكساً مع مربع سطح المقطع.
- يلعب معامل لزوجة المائع η دوراً مشابهاً للمقاومة النوعية للناقل. إن لوجود قانون أوم في الانسياب الصفائحي نتائج بسيطة وهامة.
- تكتب الاستطاعة المستهلكة بالانسياب (كما في الكهرباء RI^2)

$$\text{ميكانيك} \quad P = \Delta E.Q = RQ^2$$

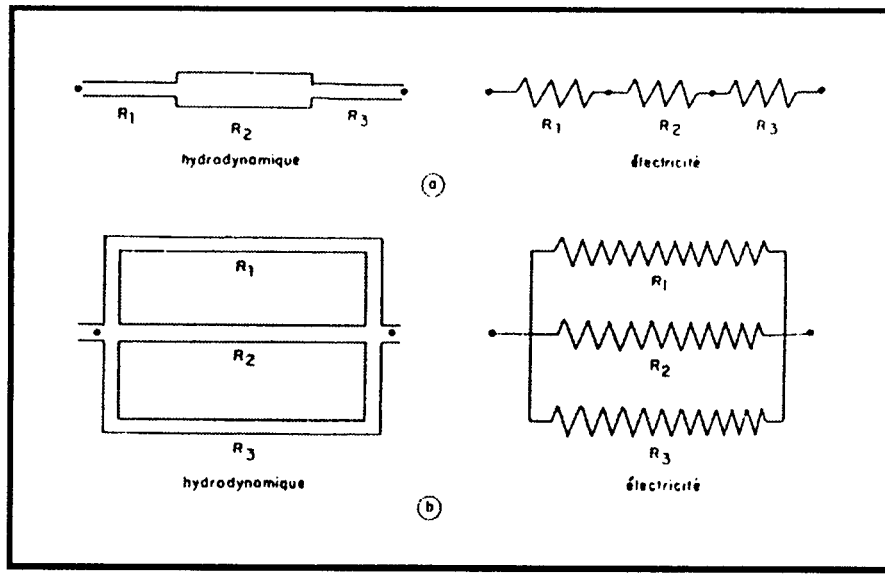
- المقاومة الميكانيكية لمجموعة أقنية عل التسلسل تساوي إلى مجموع المقاومات الميكانيكية (الشكل a 12)

$$\text{ميكانيك} \quad R = R_1 + R_2 + ... + R_n$$

- المقاومة الميكانيكية لمجموعة أقنية على التوازي هي بحيث إن (الشكل 12b)

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\ldots+\frac{1}{R_n} \quad \text{ميكانيك}$$

إن العلاقتين الأخيرتين مفيدتان جدا في حركية الدم، حيث إن النظام الفـــيزيولوجي للانسياب هو تقريبا في كل مكان وتقريبا دائما صفائحيا (انظر إلى الأسفل)



(الشكل 12)

b - النظام المضطرب:

يظهر النظام المضطرب مع النظام الصفائحي سلسلة من الاختلافات الهامة.

- مظهر السرعات المتوسطة ليس قطعا مكافئا بل هو مسطح ويزداد هذا التســـطح بازدياد R (عدد رينولدز).
- لا يتناسب ضياع الشحنة مع التدفق، بمعنى آخر فإن قانون أوم غير قابل للتطبيـــق وليس للمقدار $\frac{\Delta E}{Q}$ جهة محددة.

وبالتالي لا نستطيع تحديد مقاومة ميكانيكية لا تتعلق إلا بهندسة القناة ولزوجة السائل، ومن ثم لا يوجد أي قاعدة بسيطة للأقنية الموصولة على التسلسل أو على التوازي.

- النظام المضطرب أكثر ضياعاً للطاقة من النظام الصفائحي (بدء دوران الأعاصير يفرض على المائع مسارات طويلة واحتكاكات إضافية)؛ لذا يجب تجنبه أكثر ما يمكن، وهذا ما تقوم به الطبيعة من أجل انسياب الدم.
- النظام المضطرب صاخب وبالتالي فالأعاصير مولدة لاهتزازات ذات ترددات سمعية. بينما النظام الصفائحي صامت (نسمع الريح ولكن لانسمع النسيم) إن هذا الاختلاف أساسي في الإصغاء للأوعية الدموية.

3 ــ نظام الانسياب في الأوعية الدموية

- **الشروط الفيزيولوجية للسكون (راحة):**

السرعة المتوسطة في الأبهر هي ضمن الشروط الفيزيولوجية للسكون من مرتبة $Cm.s^{-1}$ (30 – 25) وأن السرعة الحرجة هي من مرتبة

$48Cms^{-1}$ (نأخذ $d = 2Cm$ و $\rho \approx 1gr.Cm^{-3}$ و $\eta = 4.10^{-3} Pa.S$)

فيكون النظام صفائحياً في هذا الوعاء الدموي وبالتالي فبالأحرى أن يكون هذا النظام صفائحياً في الأوعية الدموية الأخرى حيث تكون السرعة أقل. وأن الاصغاء للأوعية الدموية يكون صامتاً ضمن الشروط الفيزيولوجية. وبالعكس أثناء التمرين العنيف يزداد التدفق القلبي ومن ثم يتبعه زيادة في سرعة الدم. وبالتالي لا يكون نادراً

ضمن هذه الشروط سماع نفخات انقباضية غير مرضية عند الأشخاص الطبيعيين وخاصة عند الأطفال.

- **في حالة فقر الدم :**

في حالة فقر دم كبير تنخفض لزوجة الدم كثيراً وبالتالي تنخفض السرعة الحرجة، ومن جهة أخرى وبغية تأمين أكسجة النسج يزيد القلب من تدفقه؛ ولهذا توجد في شروط ملائمة لظهور اضطرابات ومن ثم نفخة انقباضية وهذا ما يظهر غالباً عند سماع قلب شخص فقير بالدم. وتختفي نفخة فقر الدم هذه عند إزالة فقر الدم وذلك بنقل الدم مثلاً.

- **في حالة ناسور شرياني وريدي واستمرارية القناة الشريانية:**

هناك شرط آخر من خلاله نسمع نفخة مصدرها وعائي، وهو وجود اتصال مستمر مرضي ما بين الجهاز الشرياني المجموعي (الأبهر والملحقات) المرتفع الضغط والجهاز المنخفض الضغط (جهاز وريدي أو جهاز شرياني رئوي). إنه حالة الناسور الشرياني الوريدي (أو تفرغ شرياني وريدي أو أيضاً انتفاخ شرياني وريدي) العائد إلى إصابة (رصاصة، طعنة سكين..) تضع الشريان والوريد في اتصال بنفس الجذع الوعائي (شريان ووريد فخذيين). إنه أيضاً حالة استمرار القناة الشريانية، التشوه الخلقي الذي يحافظ بعد الولادة على انتقال الدم من الأبهر نحو الشريان الرئوي اليساري. في جميع هذه الحالات، يوجد انتقال سريع للدم من منطقة الضغط المرتفع إلى منطقة الضغط المنخفض مع ازدياد في سرعة القذف أثناء الطور الانقباضي حيث يكون فرق الضغط أكبر ما يمكن. ويظهر الإصغاء نفخة مستمرة بالقوة الانقباضية.

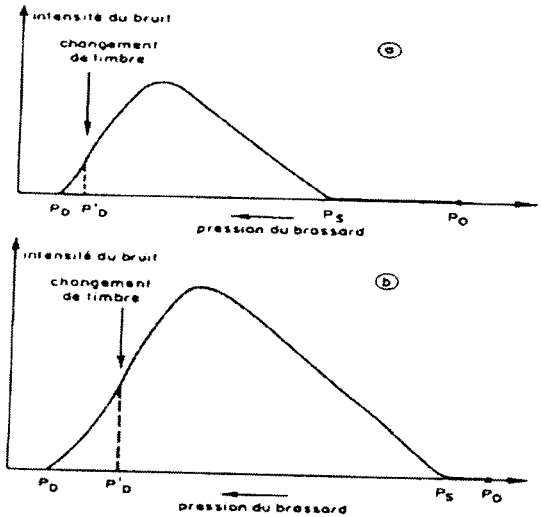
- **في حالة التضيقات الوعائية:**

إن القيمة الحرجة 2400 لعدد رينولدز تصلح لأنبوب أسطواني طويل وتبين التجربة أنه عند وجود تضيق موضعي في الوعاء الدموي فإن ذلك يترافق بتزايد موضعي لسرعة الانسياب وبالتالي فإن القيمة الحرجة Rهي أقل من 2400 ويمكن أن تهبط حتى (800-6) وهذا يعني ولادة سهلة لاضطراب في مستوى التضيق. ويولد هذا الاضطراب نفخة انقباضية تكون أحياناً مصحوبة برجفة واضحة (مرتبطة باهتزازات جدران الشريان) وهذا ما يحدث مثلاً في التطبيقات العصدية للشريان السباتي، بحيث يمكن أن تكون النتيجة هي تليين الدماغ.

- **القياس اللامباشر للضغط الشرياني:**

يستند القياس اللامباشر للضغط الشرياني على إحداث تضيق وذلك بعصر الشريان (يتم إجراء هذا القياس على جسم متسطح والذراع ممدودة على طول الجسم). يتم عصر الذراع ومن ثم الشريان العضدي باستخدام ساعدة قماشية عريضة تحتوي على محفظة مرنة يمكن نفخها بضغوط مختلفة.

فعندما يكون الضغط في الساعدة أكبر من الضغط الانقباضي، ينغلق الشريان باستمرار ويتوقف التدفق الدموي ولهذا فالاصغاء الدقيق عند أسفل الساعدة يكون صامتاً.وبعد ذلك يتم تفريغ تدريجي للساعدة وعندما يصبح الضغط أصغر من الضغط الانقباضي، توجد عند كل انقباض لحظة قصيرة بحيث لايكون انغلاق الشريان تماماً وأن القذف القصير للدم يكون مضطرباً ويولد ضجيجاً. وهنا نقبل بأن ضغط الساعدة الذي من أجله يظهر هذا الضجيج يساوي إلى الضغط الانقباضي P_s في الشريان العضدي (الشكل 13).



الشكل 13

ننطلق من ضغط P_0

a) عند سكون أكبر من P_s وتفريغ تدريجي **b**) عند الحركة والفرق بين P'_D و P_D كبير

وعندما يصبح ضغط المحفظة أكثر انخفاضاً تزداد شدة الضجيج ومدته ومن ثم تنخفض الشدة وإنه لحظة اختفاء الضجيج تترجم باختفاء الاضطراب، يختفي التضيق كلياً، وأن ضغط الساعدة الغير قادر على إغلاق الشريان يساوي إلى الضغط الأصغري السائد داخل الوعاء الدموي. وهذا يعني الضغط الانبساطي P_D (الشكل13).

وعند مقارنة الأرقام التي وجدناها مع أرقام القياسات المباشرة (لاقطة ضغط موجودة في الشريان) نرى بأن التوافق جيد من أجل الضغط الانقباضي {اختلاف من KPa (0,7 إلى 1,3) أو من mmHg (5 إلى 10) ومهما كان التدفق القلبي}.

وبالعكس من أجل الضغط الانبساطي فالقياس اللامباشر يعطي بانتظام أرقاماً أصغر من القياس المباشر. وأن الفرق صغير لتدفق طبيعي (1KPa تقريباً) ويمكن أن يكون معتبراً (5KPa) لتدفق أكبر (بعد تمرين فيزيائي شديد).

ويا ترى هل الطريقة اللامباشرة غير صالحة؟ كلا لأن الاصغاء الحذر يبين أنه قبل اختفاء الضجيج يغير هذا الضجيج صوته (خفوت). إن هذا التغيير في الصوت هو أفضل مؤشر للضغط الانبساطي الحقيقي، كالمقاس بالطريقة المباشرة، وإنه لمن المناسب اعتبار P'_D بدلاً من P_D.

مسائل غير محلولة

- ما هي قيمة الضغط المطبق على مكبس إبرة لحقن الماء تحت الجلد علماً بأن طول الإبرة 2cm وقطرها 0,3mm وبتدفق $1cm^3/s$ علماً بأن لزوجة الماء هي: $10^{-3}Kg$ $.m^{-1}S^{-1}$

- شريان أفقي قطره الداخلي $d_1 = 2,5cm$ يظهر انتفاخاً قطره الداخلي $d_2 = 5cm$ فإذا كانت السرعة المتوسطة للدم في الجزء السليم هي:

$$V_1 = 30Cm/Sec$$

والضغط الدموي: $P_1 = 120mmHg$

احسب الضغط P_2 في منطقة الانتفاخ ثم بين كيف يتطور هذا الانتفاخ معتبرين الدم شبيه بالماء (الكتلة الحجمية $10^3Kg/m^3$).

- شريان أفقي مسدود جزئياً (اختناق) متوسط قطره الداخلي $d_1 = 1cm$ ينساب فيه دم بسرعة متوسطة $v_1 = 20cm/Sec$ فإذا اعتبرنا الدم كالماء (الكتلة الحجمية $10^3Kg/m^3$) وإذا كان الضغط الزائد في الشريان وفي مكان غير مسدود قطره d_1 هو:

$$\Delta P = P_1 - P_0 = 10^2 mmHg$$

(حيث P_0 يمثل الضغط الخارجي المطبق على الشريان من قبل الغلاف الجوي والعضلات..الخ).

1 – ما هو مقدار القطر الأصغري d_2 الذي يبقى ملائماً لانسياب دم صفائحي مستمر.

2 – ماذا يحدث إذا أصبح قطر الشريان أصغر من d_2.

– إذا كان تدفق قلب انساب وهو مرتاح (5) ليتر/دقيقة أما عند الانقباض فيصبح أكبر بثلاث مرات.

1 ــ هل يكون انسياب الدم في الشريان الأبهري (قطره 2cm) صفائحاً أم مضطرباً.

2 ــ نفس السؤال بالنسبة للوريد الذي قطره 0,5 cm والذي يتلقى 1%من الدم المتدفق مع العلم بأن: $\rho = 1{,}05 \frac{gr}{Cm^3}$ و $\eta = 4.10^{-3}\, pl$ (بوازويل)

– يتألف الشكل من قارورة تحتوي على سائل (سيروم) كتلته الحجمية $2.10^3 Kgr/m^3$ ومن أنبوبتين A وB ذات مقاطع ثابتة ولكل واحدة منهما طرف يقع داخل السائل وطرف آخر يكون مفتوحاً على الوسط الخارجي ($P_0 = 10^5 Pa$) تفيد الأنبوبة A بجعل الضغط في النقطة P تقريباً مساوياً للضغط الجوي.

أما الانبوبة B فتستخدم لنقل السائل وأن:

$$PQ = h_0 = 10Cm$$

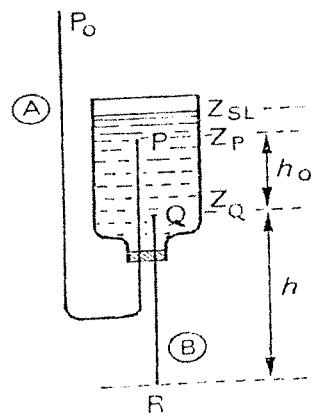
و

$$QR = h = 1m$$

1 ــ احسب الضغط في النقطة Q وسرعة الانسياب في R ثم بين أن التدفق يبقى ثابتاً.

2 ــ نضع في الطرف R إبرة مقطعها $S = 0,5mm^2$ تدخل في وريد مريض حيث يكون الضغط المتوسط فيه مساوياً إلى 770mmHg . احسب سرعة انسياب السائل، ثم احسب حجم السائل المنقول خلال ساعة واحدة مع المناقشة.

3 ــ إذا كان مقطع الأنبوبة RQ صغير ويساوي إلى $0,5mm^2$ وكانت لزوجة السائل المنساب (بوازويل) 4.10^{-3}. فما هو حجم السائل المحقون خلال ساعة.



- منطاد كروي نصف قطره r منفوخ بالهيدروجين بحيث إن:

الكتلة الحجمية للهواء $\rho_a = 1,5Kgrm^{-3}$

الكتلة الحجمية للهيدروجين $\rho = 0,09Kgm^{-3}$

1 ــ ما مقدار الكتلة M التي يجب تعليقها بالمنطاد ليتوازن في الهواء إذا كانت $m=0,037Kgr$ كتلة غلاف المنطاد.

2 ـــ إذا كانت الكتلة الحجمية الجديدة للهواء هي:

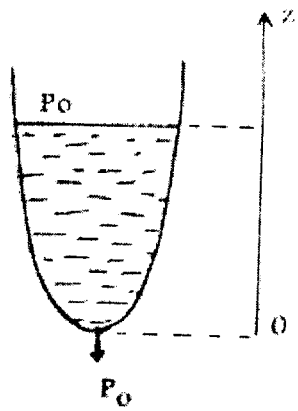
$$\rho'_a = 0{,}752 \text{Kgrm}^{-3}$$

فما هو نصف القطر الجديد r' للمنطاد ليصبح متوازناً في الهواء وذلك عندما نعلق فيه نفس الكتلة السابقة M.

- يمثل الشكل ساعة مائية عند القدماء.مكونة من خزان مقطعه دائري ومزود بثقب في أسفله بحيث إن ارتفاع الماء يتناقص تدريجياً مع الزمن فإذا رمزنا S(Z) إلى مقطع الخزان عند الارتفاع Z محسوباً ابتداءً من ارتفاع ثقب خروج الماء. وبالرمز s لمقطع الثقب مفترضين بأن $S(z) > s$ والمطلوب:

1 - أوجد سرعة خروج السائل v(z) ابتداءً من علاقة برنولي.

2 - اكتب علاقتي التدفق الحجمي ابتداءً من s, v(z) أو ابتداءً من S(z) وسرعة تحرك السطح الحر: $\frac{dz}{dt}$



3 - بمساواة علاقتي التدفق تحصل على معادلة تسمح بإيجاد Z(t) إذا أعطيت S(z).

بين أنه إذا طبقت الفرضية $S(z) = a\sqrt{z}$ تحصل على تابع خطي للزمن.

أوجد هذا التابع مع العلم أنه عند اللحظة t=0 يكون ارتفاع السائل h.

4 - أوجد علاقة الزمن T الضروري كي يصل السطح الحر للسائل إلى الارتفاع $Z = \frac{h}{2}$

5 - أوجد a عندما T يساوي ثلاث ساعات

و $h = 0,5m$ و $s = 1mm^2$ و $g = 10m/Sec^2$

6 - أوجد قيمة d قطر السطح الحر للساعة المائية عند الارتفاع الذي يوافق $t = 0$