الفصل الأول

الموائع والظواهر السطحية

Fluids & The Syrface Phenomena

1-1 مقدمة *Introduction*:

يشير المبدأ الأساسي في علم التحريك بأن الكتلة (m) الخاضعة لتأثير قوة خارجية $(\vec{F})$ تتحرك بتسارع $(\vec{a})$ وفق العلاقة التالية:

$$\vec{F}(N) = m(kg)\cdot \vec{a}\ \left(\frac{m}{s^2}\right)$$

وعندما يكون التسارع $(\vec{a})$ هو تسارع الجاذبية الارضية $(\vec{g})$ فإن المقدار المتجه $(m\vec{g})$ يعبر عن ثقل الكتلة (m).

وعند تطبيق القوة $(\vec{F})$ على مائع (سوائل وغازات) فإنها تتوزع على السطح (S). لذا نعرّف الضغط (P) على أنه حاصل قسمة القوة المؤثرة على مساحة السطح أي :

$$P = \frac{F(N)}{S(m^2)} \qquad \text{(تعريف الضغط)} \qquad (1\text{-}1)$$

وأن الضغط مرتبط بوجود المادة، فعند غيابها يكون الضغط معدوماً. ويتسبب ثقل المائع الساكن بضغط سكوني يخضع للقوانين التالية:

1- في أي نقطة من المائع، يكون لهذا الضغط نفس القيمة في جميع الإتجاهات.

2- في كل نقطة من نقاط نفس المستوي الأفقي، يكون لهذا الضغط القيمة نفسها.

3- يُعطى فرق الضغط (ΔP) ما بين مستويين ، فرق الارتفاع بينهما (Δh)، في مائع كتلته الحجمية (ρ)(كثافته). ويخضع لتسارع الجاذبية الارضية $(\vec{g})$ بالعلاقة التالية:

$$\Delta P\ (pascal) = -\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right) \vec{g} \left(\frac{m}{s^2}\right) \Delta\ h\ (m) \qquad (1\text{-}2)$$

حيث نلاحظ أنه عند إزدياد (h) فإن الضغط يتناقص. ويمكننا أن نستنتج من القوانين السابقة أن للضغط السكوني نفس القيمة في جميع المناحي (الاتجاهات)، لأنه عند ارتفاع معين يكون الضغط مستقلاً عن توجه السطح. وأن الغلاف الجوي يتسبب بضغط جوي قيمته متناقصة مع الارتفاع.

وهكذا فإن جميع الأشياء وجميع الكائنات الحية تخضع لهذا الضغط.

لذا يطلق اسم الضغط (P) لمائع داخل جملة (نظام) على فرق الضغط ما بين نقطة تقع داخل الجملة وأخرى تقع خارجها أي أن:

$$P(pascal) = P_{int} - P_{ext} \qquad (1\text{-}3)$$

فعندما نتكلم عن ضغط الهواء داخل إطار مطاطي، هذا يعني فرق الضغط بين نقطة تقع داخل الاطار والضغط الخارجي (الضغط الجوي). وكذلك فإن ضغط الدم في الأوعية الدموية هو في الحقيقة فرق الضغط ما بين نقطة تقع داخل الوعاء الدموي وأخرى تقع خارجه. وأنه أثناء الغوص في الماء (غير قابل للانضغاط) بمقدار عشرة أمتار يزداد الضغط بمقدار واحد جو ($1.0\ atm$) ويقاس الضغط في النظام الدولي بالباسكال ($Pascal$)، عندما تقاس القوة بالنيوتن ومساحة السطح بالمتر المربع.

وهناك وحدة مستخدمة في الطب لقياس الضغط الشرياني وهي ($mmHg$) وهي عبارة عن الضغط الذي ينتج فرقاً في الارتفاع مقداره ($1.0mm$) في مقياس الضغط الزئبقي حيث الكتلة الحجمية (الكثافة) للزئبق تساوي ($13600kg/m^3$). وبعد الرجوع الى العلاقة:

$$P = h\rho\ \vec{g}$$

نجد أن :

$$1mmHg = \left(10^{-3}m\right)\cdot\left(13600Kg/m^3\right)\cdot\left(9.81m/sec^2\right) = 133.4P_a$$

أما الضغط الجوي فهو عبارة عن قيمة ضغط الغلاف الجوي الشاقولي (العمودي) عند مستوى سطح البحر.

$$1atm = 1bar = 760mmHg = 760\times 133.4 \cong 10^5\,Pa$$

1-2 الظواهر السطحية *Surface Phenomena*:

توجد الظواهر السطحية على السطح الفاصل ما بين طورين *two phases* مختلفين (الطور هو عبارة عن جزء من جملة فيزيائية-كيميائية يبدو متجانساً) حيث تنشأ تأثيرات متبادلة مابين جزيئات هذين الطورين المختلفين.

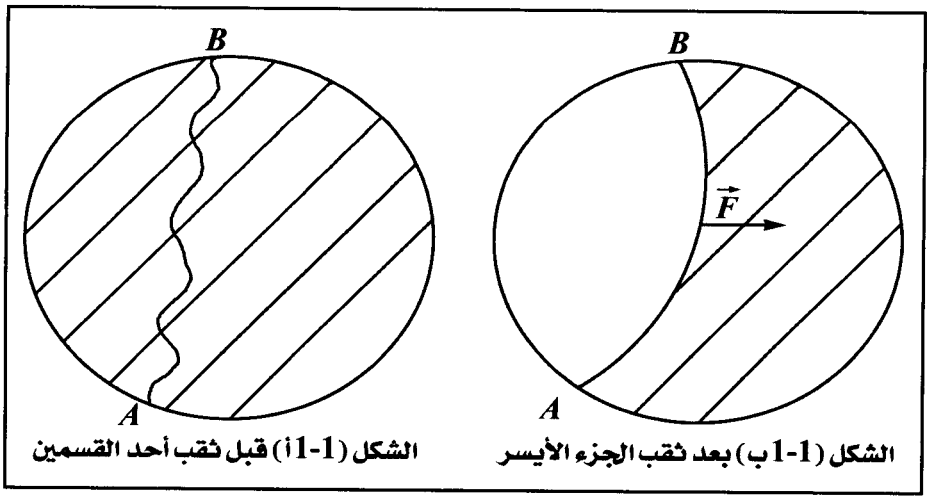
وتكون هذه التأثيرات مهملة عندما تكون السطوح المعنية صغيرة بالنسبة للحجوم الموافقة لها. ويمكن أن تصبح هامة عندما تكون هذه السطوح كبيرة نسبياً وهذا يعني أن يكون الطور في حالة انتشار كبيرة.

ففي حالة المكعبات التي طول ضلعها (a) وبالتالي حجمها (a^3) ومساحة سطحها $(6a^2)$ تكون النسبة (سطح/حجم) مساوية إلى $(6a^{-1})$ أما بالنسبة للكرات التي أنصاف آقطارها (r) وحجومها $(\frac{4}{3}\pi\ r^3)$ ومساحة سطوحها $(4\pi\ r^2)$ فتكون النسبة (سطح/حجم) مساوية الى $(3r^{-1})$ وأنه كلما كانت المادة منتشرة (a أو r صغيرة) كلما كانت النسبة (سطح/حجم) كبيرة، مثلاً: من أجل كرة حجمها لتراً واحداً (نصف قطرها $0.062m$) فإن النسبة (سطح/حجم) تساوي $(48.4m^{-1})$. بينما من أجل قطرة أو خلية يفترض أنها كروية نصف قطرها $(1.0\mu m)$ فإن النسبة تساوي الى $(3.10^6\,m^{-1})$.

مما سبق نرى أنه إذا كانت الظواهر السطحية لكرة حجمها لتراً واحداً مهملة أمام العوامل الفيزيائية (الجاذبية الأرضية، تأثير المجال الكهربائي ... الخ)، فإنها لا تكون مهملة من أجل الكرات الميكروية (الكرات التي أنصاف أقطارها من رتبة الميكرون) ومن جهة أخرى فإنة من أجل حجم وحيد محدد، نستطيع أن نبرهن أن النسبة (سطح/حجم) يكون لها أقل قيمة عندما يكون الحجم كروياً.

1-2-1 السطح الفاصل مابين سائل وغاز- التوتر السطحي *Surface Tension*:

عندما نغمر في ماء الصابون حلقة معدنية ثُبِّت عليها خيط مرن غير مشدود ثم نخرج هذه الحلقة من ماء الصابون نحصل على طبقة رقيقة ملتصقة على حواف الحلقة، ويبقى الخيط غير مشدود داخل هذه الطبقة الرقيقة من السائل، ويقسم هذه الطبقة الى جزئين كمافي الشكل(أ 1-1).



الشكل (1-1أ) قبل ثقب أحد القسمين

الشكل (1-1ب) بعد ثقب الجزء الأيسر

الشكل (1-1) ظاهرة الشد السطحي

فإذا ثقبنا أحد هذين الجزئين فإن الخيط يُجذب من قبل الجزء الآخر للطبقة كما في الشكل (ب 1-1).

أي أن السطح الفاصل مابين الطبقة الرقيقة من السائل والهواء يميل ليكون أصغر مايمكن ولهذا إذا أثرت قوة مقدارها $(\vec{F})$ على سلك طوله (L) يمكننا أن نعرف التوتر السطحي (A) على أنه القوة المطبقة على وحدة الطول أي أن:

$$A\left(\frac{N}{m}\right)=\frac{F}{L} \qquad (1\text{-}4)$$

وبالتالي فإن وحدة التوتر السطحي في الجملة (النظام) الدولي هي (نيوتن/متر) ويمكن تفسير ذلك إذا اعتبرنا أن كل جزيء من السائل يخضع لقوة جذب من قبل الجزيئات المحيطة به أما الجزيئات السطحية فتخضع فقط إلى جذب جزيئات السائل الواقعة إلى جوارها وأسفلها (سطح،عمق) ولذلك يكون تركيزها أقل ما يمكن على السطح، وبما أن الحجم ثابت (لأن الجزيئات في السائل تكون ملتصقة مع بعضها البعض) فإن السطح يميل ليكون أصغر ما يمكن. وأنه لزيادة هذا السطح يجب تطبيق قوة وهذا يعني تقديم طاقة. «يميل سطح التماس مابين سائل وغاز بشكل تلقائي ليكون أصغر مايمكن» وأنه بمقدار ماتكون قوة الترابط مابين الجزيئات كبيرة بمقدار ماتكون قيمة التوتر السطحي كبيرة ومن جهة أخرى فإن زيادة درجة الحرارة تزيد من التهيج الحراري المعاكس لقوة التجاذب ولهذا فإن التوتر السطحي يتناقص. كما يمكننا استنتاج مايلي:

1- عندما يكون التوتر السطحي هو العنصر الوحيد الذي يلعب دوراً بين طورين مختلفين فإن الحجم يأخذ الشكل الكروي الموافق لحجم محدد بالسطح الأصغري (قطرة ماء في الهواء، فقاعة هواء في الماء) وبالتالي فإن سطح كرة وحيدة يكون من أجل نفس الحجم أصغر من مجموع سطحين كرويين (اندماج قطرتين أوفقاعتين عند تصادمهما مع بعضها البعض).

2- وجود ضغط زائد داخل الفقاعات أو القطرات، فقطرة السائل في الغاز أو الفقاعة الغازية في السائل، تأخذ شكلاً كروياً نصف قطره (R).

بما أن التوتر السطحي يسعى لإنقاص السطح وبالتالي إنقاص نصف القطر فإن الحجم يتناقص ولهذا فإن الضغط الداخلي يزداد. ونصل إلى حالة التوازن عندما يكون الضغط ($P_\circ$) داخل الفقاعة أكبر من الضغط الخارجي (P) أي أن الضغط الزائد (ΔP) داخل الفقاعة أو القطرة يساوي إلى:

$$\Delta P = P_\circ - P \qquad (1\text{-}5)$$

وبالاستفادة من قانون لابلاس *(Laplace Law)* المطبق في نقطة من سطح ذي شكل ما حيث يمكن تحديد نصفي قطري كرتين (R_1 و R_2) يميزان تقوس السطح في هذه النقطة مما يسمح بتحديد قيمة الضغط الزائد (ΔP) من جهة التقعر والمعطى بالعلاقة التالية:

$$\Delta P = A\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \qquad (1\text{-}6)$$

وهكذا نجد في حالة كرة نصف قطرها R ($R_1 = R_2 = R$):

$$\Delta P = \frac{2A}{R} \qquad (1\text{-}7)$$

أما في حالة اسطوانة نصف قطرها R (شريان مثلاً) فإن:

$$R_1 = R$$

$$R_2 = \infty$$

وبالتالي يكون :

$$\Delta P = \frac{A}{R} \qquad (1\text{-}8)$$

1-2-2 نتائج وجود الضغط الزائد: *Excess Pressure Results*

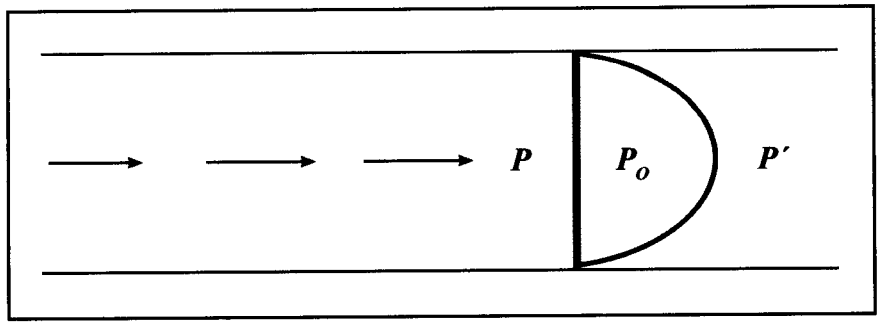
1- اندماج القطرات أو الفقاعات *Fusion of drops or bubbles*:

الضغط الزائد في الفقاعات أو القطرات الصغيرة (R صغيرة) أكبر مما هو عليه في الفقاعات أو القطرات الكبيرة، لذا فإنه عند تماس فقاعة أو قطرة صغيرة مع فقاعة أو قطرة كبيرة تتفرغ بداخلها.

2- السدادة الغازية *Gas Stopper*:

إن وجود فقاعة هوائية في سائل ينساب داخل انبوب شعري *Capillary tube* يؤدي إلى توقف انسياب هذا السائل.

لنأخذ انبوباً شعرياً نصف قطره (R) ينساب بداخله من اليسار إلى اليمين سائل فيه فقاعة هوائية، نلاحظ وبسبب تأثير ضغط السائل أن فقاعة الغاز تأخذ شكلاً غير متناظر، فهو مستوي من اليسار وكروي بنصف قطر (R) من اليمين كما في (الشكل 2-1).



الشكل (2-1) الفقاعة، السدادة الغازية

فعند السطح البيني من جهة اليسار يكون فرق الضغط:

$$\Delta P = P_\circ - P = \frac{2A}{R} = \frac{2A}{\infty} = o \Rightarrow P_\circ = P \qquad (1\text{-}9)$$

أما عند السطح البيني من جهة اليمين فيكون:

$$\Delta P = P_{\circ} - P' = \frac{2A}{R} \Rightarrow P' = P_{\circ} - \frac{2A}{R} = P - \frac{2A}{R} \qquad (1\text{-}10)$$

فعندما تكون (R) صغيرة جداً، فإن المقدار ($\frac{2A}{R}$) يمكن أن يساوي (P) وبالتالي ينعدم الضغط (P') وهذا يعني انعدام فرق الضغط على يمين الفقاعة ومن ثم ينعدم التدفق. وهذا ما يحصل عادة في الأوعية الدموية للكائن الحي، حيث إن الحقن المفاجئ للهواء وتشكل فقاعات غاز النيتروجين العائدة إلى الصعود العنيف داخل الماء تتسبب في إيقاف انسياب الدم وبالتالي تنشأ في حال فقر الدم حوادث خطيرة وأحياناً مميتة.

1-2-3 السطح الفاصل مابين سائل وسائل *Biliquids Seperaltion Surface* :

أ- توتر السطح البيني *Bisurface Tension*:

يوجد على السطح الفاصل مابين سائلين غير قابلين للمزج توتر شبيه بالتوتر السطحي يسمى توتر السطح البيني ، تتعلق قيمته بطبيعة السائلين وبدرجة الحرارة.

ب- الانتشار *Diffusion*:

عند وضع قطرة من سائل (A) على سطح سائل (B) (A و B غير قابلين للمزج) نلاحظ الحالتين الأتيتين:

الأولى: السائل (A) ينتشر على سطح السائل (B)، فإذا كان سطح السائل (B) كبيراً فإن سماكة الطبقة السطحية للسائل (A) تماثل عندئذٍ سماكة طبقة وحيدة الجزيء *mono molecule layer* .

الثانية: يبقى السائل (*A*) على شكل قطرة فوق سطح السائل (*B*) أي لا يوجد انتشار *No diffusion case*.

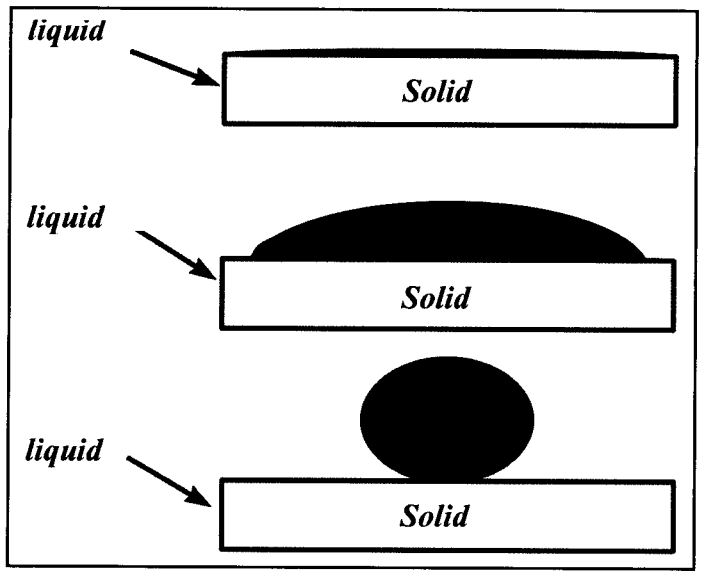
ويفسر الإنتشار بوجود قوى تجاذب مابين (*A* و *B*)، فعندما تكون هذه القوى وحيدة فإن (*A*) يمتزج مع (*B*) وهذا يعني أنه يوجد في (*A*) زمر تكون مجذوبة من قبل (*B*) (محب اذا كان *B* هو الماء) وزمر متنافرة مع (*B*) (كاره إذا كان *B* هو الماء). لذا فإن جزيئات (*A*) تتوجه على سطح (*B*) (زمر مجذوبة نحو *B* وزمر مدفوعة نحو الخارج).

ج- **الاستحلاب** *milky solution*:

إذا قمنا بخض *Shake* سائلين غير قابلين للمزج (مثلاً زيت في ماء)، نرى بأن الزيت يتوضع على شكل قطرات صغيرة مكوناً بذلك مستحلباً، وأنه عندما تتلامس هذه القطرات الصغيرة مع بعضها البعض فإنها تندمج. أن هذه الظاهرة شبيهة بظاهرة وجود قطرات سائل في غاز أي أن السطح الفاصل يميل ليكون أصغرياً.

1-2-4 سطح سائل - صلب التبلل *Solid-Liquide Surface*:

عند وضع قطرة سائل فوق سطح صلب، نلاحظ عدة حالات، كما في (الشكل 3-1).



الشكل (3-1)

أ- انتشار سائل القطرة على سطح الجسمالصلب، فنقول إن السائل يبلل الصلب بشكل كامل (مثلاً الماء على سطح الزجاج النقي).

ب- تسطح طفيف للقطرة على سطح الصلب مع احتفا ظها بتماسكها، فنقول إن السائل يبلل جزئياً الصلب (مثلاً الماء على سطح الزجاج الذي يوجد عليه قليل من الشحم).

ج- احتفاظ القطرة بشكلها الكروي، فنقول إن السائل لا يبلل الجسم الصلب أبداً (مثلاً الزئبق على سطح الزجاج). ويمكن تفسير ذلك إذا اعتبرنا بأن (F_1) تمثل قوة التجاذب مابين جزيئات السائل نفسه و (F_2) تمثل قوة التجاذب مابين الجسم الصلب وجزيئات السائل، فإذا كانت (F_2) أكبر بكثير من (F_1) فإن السائل يبلل كلياً أما إذا كانت (F_2) معدومة فالسائل لا يبلل أبداً. بينما نجد أنه من أجل القيم الوسيطة فالسائل يبلل جزئياً. لذا نجد أنه عند وضع انبوب زجاجي نصف قطره صغير بشكل شاقولي (عمودي) في سائل يبلل الزجاج فإن السائل يرتفع في الانبوب تسمى هذه الظاهره بالخاصة الشعرية، وتعود هذه الظاهره إلى جذب جزيئات الجسم الصلب للسا ئل. ولهذه الظاهره تطبيقات عديدة منها (الإسفنج، ورق النشاف، فتيلة المصباح، رطوبة الجدار... الخ)، وعندما يبلل السائل الصلب بشكل كامل يمكن حساب مقدار ارتفاع السائل في الانبوب الشعري.

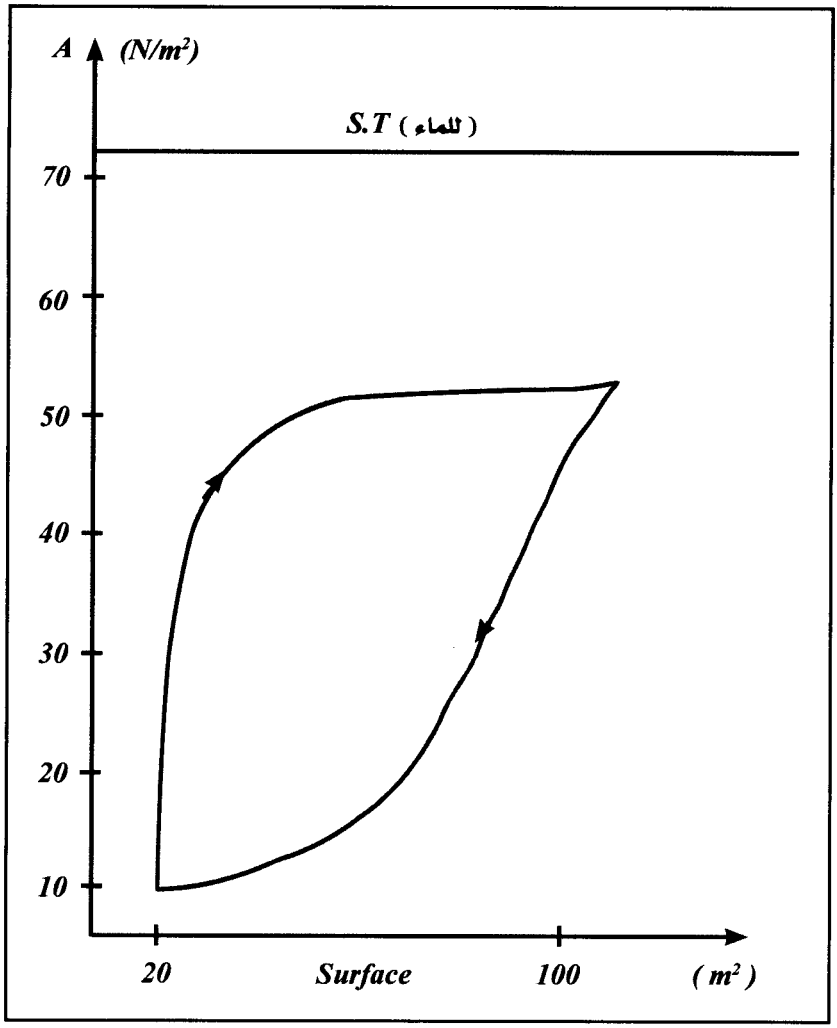
1-3 الإدمصاص في الطور السائل (محاليل) *Adsorption*:

عند مقارنة قيمة الوتر السطحي (A) لمحلول مع قيمة (A_o) التوتر السطحي لمذيبه، نلاحظ بأن (A) يمكن أن تكون أكبر بقليل أو أصغر بقليل من (A_o)، لكن في بعض الحالات نرى بأن (A) أصغر بكثير من (A_o) (مثلاً واحد ميلغرام من المذاب في لتر من مذيب ينقص التوتر السطحي للمذيب إلى النصف) فنقول عندئذٍ بأن المذاب فعال توترياً. يمكن تفسير ذلك على النحو الآتي: إذا افترضنا بأن (F_o) تمثل قوى التجاذب بين جزيئات المذيب و (F) تمثل قوى التجاذب مابين جزيئات المذيب وجزيئات المذاب. فعندما يكون تركيز المذاب ضعيفاً تكون جزيئاته متباعدة عن بعضها البعض وبالتالي فإن قوى التجاذب بين جزيئاته تكون مهملة.

عندما تكون ($F_o \gg F$) فإن جزيئات المذيب تتقارب من بعضها البعض ما أمكن وبسبب ذلك فإنها تطرد جزءاً كبيراً من جزيئات المذاب إلى سطح المحلول، وبالتالي فإن ازدياد تركيز المذاب على السطح يسمى ادمصاص (امتزاز *adsorption*) في الطور السائل ويترجم ذلك بوجود طبقة ادمصاص (امتزاز *adsorption*) على السطح حيث يكون لتوترها السطحي قيمة أصغر بكثير من قيمة التوتر السطحي للمذيب . ولبيان ذلك ندرس الآتي:

أ- تغير التوتر السطحي للطبقات السطحيه كتابع للسطح:

عندما يتغير سطح طبقة منتشرة أو مدمصة (ممتزة) فإن توترها يتغير ويوضح (الشكل4-1) المنحني البياني (توتر سطحي كتابع للسطح) والذي تم الحصول عليه من أجل طبقة ادمصاص (امتزاز) خافضة للتوتر السطحي الرئوي (مادة موجودة على سطح الحويصلات الرئوية) والذي من خلاله نستخلص ما يلي:



الشكل (4-1) تغير التوتر السطحي كتابع للسطح

مهما كانت قيمة السطح فإن التوتر السطحي يكون دائماً أصغر من التوتر السطحي للماء.

ب- عند ازدياد سطح الطبقة فإن التوتر السطحي يزداد والعكس صحيح ويفسر ذلك كما يلي:

عندما يكون السطح الذي تشغله الطبقة كبيراً فإن الجزيئات الفعالة توترياً تكون متباعدة عن بعضها البعض، أي أن السطح مكون بشكل أساسي من جزيئات الماء التي تتسبب بتوتر سطحي مرتفع.

أما عندما يتناقص سطح الطبقة فإن الجزيئات الفعالة توترياً والمجبرة على البقاء على السطح تتقارب وتأخذ مكان جزيئات الماء ولذلك ينخفض التوتر السطحي.

ج- دورة البطاء: تعني أنه من أجل نفس القيمة للسطح فإن التوتر السطحي لايملك نفس القيمة عند ازدياد السطح أو تناقصة (فهو ذات قيمة أكبر أثناء تزايد السطح).

1-4 الإدمصاص على سطح الأجسام الصلبة:

Adsorption Due to Solid Surfaces

عند ادخال قطعة فحم خشبي في انبوب اختبار يحتوي على غاز النشادر نلاحظ بأن حجم الغاز يتناقص ويمكن أن يختفي.

كذلك عند إضافة مسحوق التالك إلى محلول ماء أزرق الميتلين وتركه يتثقل، نلاحظ أن التالك ذو اللون الأبيض قد أصبح أزرقاً وأن الماء الذي يعلوه أصبح عديم اللون.

إن عملية تثبيت الغاز أو المذاب على الجسم الصلب تسمى ادمصاص (امتزاز) على سطح الأجسام الصلبة وأن لهذه الظاهرة تطبيقات عديدة. هذا

ويمكننا أن نستنتج بأن الادمصاص (امتزاز) من النوع الفيزيائي الذي تعود فيه الروابط مابين الصلب والمذاب إلى قوى مابين الجزيئات من نوع فاندرفالز *Vander Waals*، لكنها أشد مما هي عليه في السوائل لأن حقل القوى على سطح الأجسام الصلبة أكثر أهمية.

أما الإدمصاص من النوع الكيميائي فتكون الروابط مع الصلب هي روابط مشتركة. وأنه ليس من السهل التمييز مابين هذين النوعين من الادمصاص وبهدف زيادة سطح الادمصاص على الأجسام الصلبة، تستخدم هذه الأجسام على شكل مساحيق، ولهذه الظاهرة تطبيقات عديدة منها:

أ- في الصناعة *In Industry*: (الأصبغة، أقنعة الغاز).

ب- في التحاليل *In Analysis*: (الكروماتوغرافيا الإدمصاصية).

ج- في طب الأحياء *In Bio-medicin*: (إدمصاص نيتروجين الهواء الجوي يسمح بالحصول على هواء غني بالاكسجين).

د- في المعالجة *In therapy*: (استخدام الكربون في علاج الجوف المعوي بسبب خواصه الإدمصاصية للسموم ونواتج التخمر).

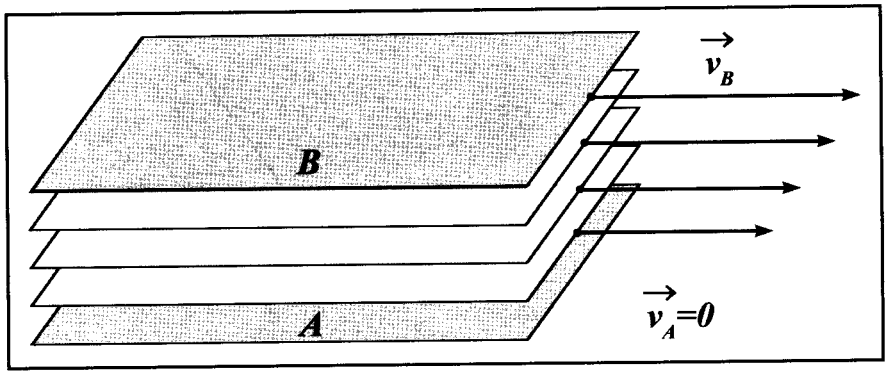
1-5 اللزوجة *Viscosity*:

عندما يتحرك جسمان صلبان متلامسان بسرعتين مختلفتين، تعمل على السطح الفاصل بينهما قوى احتكاك *Frictional Forces* تظهر من خلال تحول الطاقة إلى حرارة ومن تباطؤ الصلب الأكثر سرعة.

أما فيما يتعلق بالموائع فإن ظواهر مشابهة تحدث عندما لاتتحرك جميع جزيئات المائع بنفس السرعة، لكنها تختلف عن الأجسام الصلبة من حيث إن

السرعة داخل المائع تتغير تدريجياً، أي أن الاحتكاك لا يحدث على السطح الفاصل الذي لاوجود له، بل يحدث داخل المائع ولذلك نطلق اسم لزوجة *Viscosity* على الاحتكاك بين جزيئات المائع.

فإذا وضعنا في مائع صفيحتين معدنيتين متوازيتين (A و B) تتحركان بسرعتين مختلفتين ($\vec{v}_A$ و $\vec{v}_B$) (مثلاً: $\vec{v}_A = o$) كما في (الشكل 5-1) نستنتج بأن:



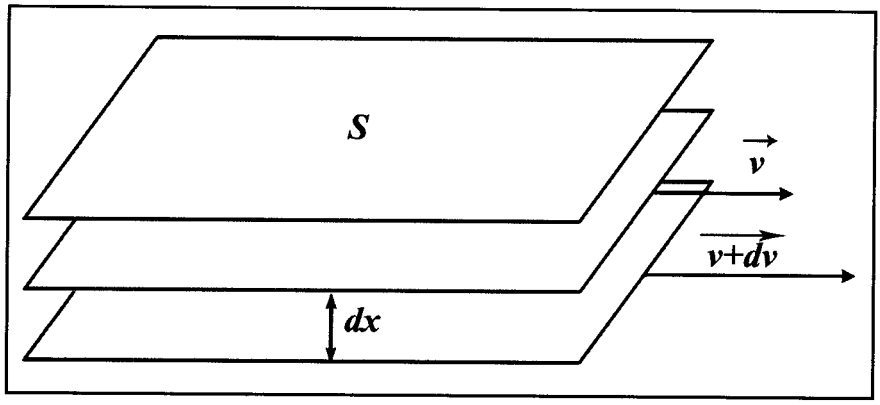
الشكل (5-1) حركة جزيئات المائع بالنسبة لصفيحتين أحداهما ثابتة والأخرى متحركة

أ- جزيئات المائع الملامسة للصفيحة (A) لاتتحرك أبداً، بينما جزيئات المائع الملامسة للصفيحة (B) تتحرك بسرعة مساوية ($\vec{v}_B$) وبالتالي نتوصل إلى أن جزيئات المائع الملامسة للجسم الصلب تكون ملتصقة مع هذا الصلب وبالتالي فإنها تتحرك بسرعة مساوية لسرعته.

ب- تتغير سرعة السائل تدريجياً مابين (A و B) من $\vec{v}_A = 0$ إلى $\vec{v}_B$ أي أن السائل يسلك سلوكاً كما لوكان مكوناً من مجموعة صفائح موا زية للصفائح المعدنية.

1- العلاقة الرياضية الأساسية:

إذا اعتبرنا المائع مكوناً من تكرار صفائح متوازية، فإنه عندما تتحرك إحدى هذه الصفائح بسرعة $(v+dv)$ فإنها وبسبب الإحتكاك بالصفحة المجاورة لها تجبرها على التحرك بسرعة $(\vec{v})$ وبهدف إعتبار تأثير قوة الإحتكاك $(\vec{F})$ الموجودة مابين الصفيحتين كما في (الشكل6-1).



الشكل (6-1)

اقترح نيوتن العلاقة التالية :

$$F = \eta s \frac{dv}{dx} \qquad (1\text{-}11)$$

حيث :

$s\ (m^2)$: السطح المشترك للصفيحتين .

$dv\ (m/s)$: فرق السرعة مابين الصفيحتين.

$\eta\ (poisuille)$: معامل اللزوجة المتعلق بطبيعة السائل وبدرجة الحرارة.

$dx\ (m)$: البعد الفاصل مابين الصفيحتين.

$\frac{dv}{dx}\ (s^{-1})$: تدرج السرعة.

يقاس معامل اللزوجة في النظام الدولي بوحدة (بوازويل) *Poisuille* $(pl = Kg/m.sec)$، بينما يقاس في النظام الجاوسي (CGS) بالبواز أو بويز والذي يساوي إلى (0.1) بوازويل.

أما معامل اللزوجة النسبي (η_r) فهو عبارة عن نسبة معامل اللزوجة المطلقة (η) إلى معامل لزوجة الماء $(\eta^{ماء})$ وذلك عند درجة الحرارة نفسها أي أن:

$$(\eta_r = \frac{\eta^{مطلق}}{\eta^{ماء}}) \qquad (1\text{-}12)$$

2- قانون أنيشتاين *Einestien Law* :

يحدد هذا القانون العلاقة الياضية التي تربط مابين معامل لزوجة المحلول والحجم النسبي ونعبِّر عنه على النحو الآتي:

$$\eta = \eta_o(1 + K\varnothing) \qquad (1\text{-}13)$$

حيث:

η : معامل لزوجة المحلول أو المعلق .

η_o : معامل لزوجة المذيب .

$\varnothing$: الحجم النسبي .

K : معامل يتعلق بشكل الجزيئات الكبيرة أو الجسيمات في المعلق وقيمته تزداد بإزدياد عدم التناظر فمثلاً [من أجل الكرة يكون $(K = 2.6)$ بينما من أجل جزيئة خطية كبيرة فإن $(K \rangle\ 10^3)$].

وفي المحاليل كبيرة الجزيئات يكون الحجم النسبي:

$$\varnothing = \frac{\text{حجم الجزيئات الكبيرة}}{\text{حجم المحلول}}$$

بينما في المعلقات يكون الحجم النسبي :

$$\varnothing = \frac{\text{حجم الجسيمات في المعلق}}{\text{حجم المعلق}}$$

أما لزوجة الدم فهي عبارة عن لزوجة معلق *Suspension* كريات قوامها الأساسي كريات حمراء في المصل.

إذاً المذيب في هذه الحالة هو المصل. وبما أن كريات الدم الحمراء هي تقريباً متناظرة فإن $(K = 2.6)$، كما أن:

$$\text{الحجم النسبي} = \varnothing = \frac{\text{حجم الكريات الحمراء}}{\text{حجم الدم}}$$

هو عبارة عن الهيماتوكريت *Hematocret*.

وبالتالي فإن علاقة أنيشتاين بالنسبة للدم تأخذ الشكل الآتي:

$$\eta_{blood} = \eta_{serum}(1 + 2.6\varnothing) \qquad (1\text{-}14)$$

والتي تبين بأن معامل لزوجة الدم يزداد:

أ- بإزدياد معامل لزوجة المصل.

ب- بازدياد الهيماتوكريت والذي يعود في الحالة العامة إلى زيادة عدد الكريات الحمراء.

ويمكننا تعريف مصل الدم على أنه محلول جزيئات بروتينية كبيرة (الألبومين، الفلوبيلين...) في مذيب هو الماء بالإضافة إلى جزيئات صغيرة وشوارد

صغيرة (سكر، بولة، Cl^- ، Na^+ ...) بحيث يكون معامل لزوجة المصل قريب جداً من معامل لزوجة الماء. وبشكل عام إذا كانت $(\varnothing_3, \varnothing_2, \varnothing_1 \ ...)$ الحجوم النسبية وكانت $(K_3, K_2, K_1 \ ...)$ المعاملات K لكل واحد من البروتينات، نجد عندئذٍ بأن لزوجة المصل الكلية:

$$\eta^{\text{مصل}} = \eta^{\text{ماء+جسيمات صغيرة}} (1 + K_1 \ \varnothing_1 + K_2 \ \varnothing_2 + K_3 \ \varnothing_3 + ...) \qquad (1\text{-}15)$$

يتغير المعامل (K) مع شكل البروتينات وبالتالي فإن حاصل الضرب $(K\varnothing)$ الخاص بالجزيئات المتناظرة (K ضعيفة) تكون مهملة (حتى ولو كانت $\varnothing$ مرتفعة) بالمقارنة مع $(K\varnothing)$ للجزيئات الخطية الكبيرة. ولهذا فإن لزوجة المصل تعود بشكل أساسي إلى لزوجة الجزيئات الخطية الكبيرة.

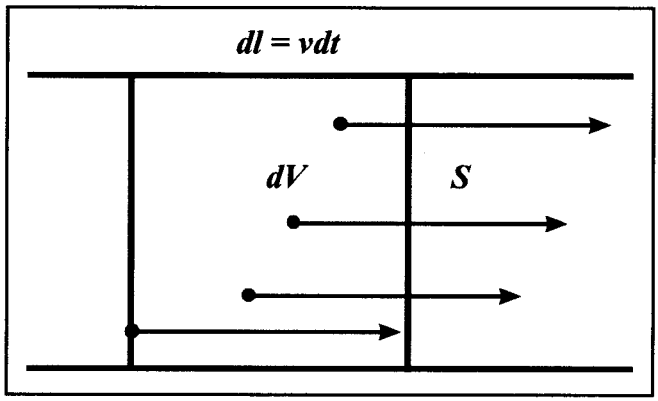
ملاحظة: تسمى الموائع التي معامل لزوجتها (η) مستقل عن سرعة المائع بالموائع النيوتونية *Newtonian Fluids*. أما بقية الموائع فتسمى بالموائع اللانيوتونية *Non Newtonian Fluids*.

1-6 الحركات الانتقالية للموائع *Transition Movements of Fluids*

يعرف التدفق على أنه كمية المائع التي تجتاز مقطعاً سطحياً (S) من قناة خلال وحدة الزمن، وبما أنه غالباً ما يعبر عن كمية المائع بحجمه لذا فالتدفق (D) هو عبارة عن الحجم (dV) الذي يجتاز المقطع (D) خلال وحدة الزمن (dt) ومنه:

$$D = \frac{dV}{dt}$$

فإذا كانت (v) سرعة المائع كما في (الشكل 7-1).



الشكل (7-1) تدفق المائع خلال قطع سطحي (s)

فإنه خلال الزمن dt تستطيع الجزيئا ت التي تبعد عن (s) مسافة أقل من $(dl=vdt)$ أن تجتاز (S) وبالتالي فالحجم:

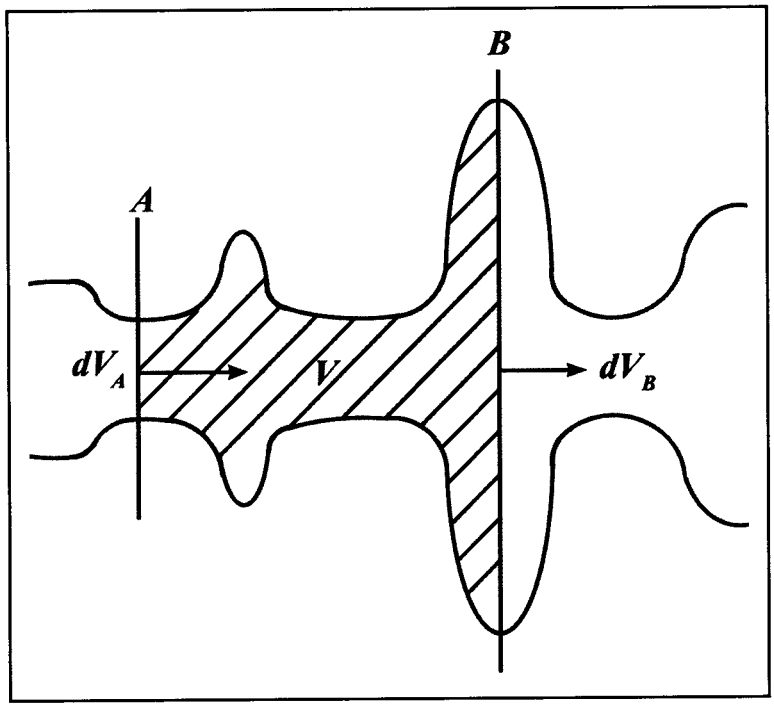
$$dV = sdl = sv.dt$$

هو الذي يجتاز (S) أي أن:

$$D = \frac{dV}{dt} = \frac{svdt}{dt} = sv \qquad (1\text{-}16)$$

تعبر معادلة الاستمرارية $(D = sv)$ عن انحفاظ المادة. حيث يعبر عن التدفق في الجملة الدولية (SI) بوحدة (m^3/sec) أما في الجملة الكاوسية (CGS) فوحدة التدفق هي (cm^3/sec). عندما يحصر مقطعان $(A$ و $B)$ حجماً (V) من قناة محيدة جدرانها غير مرنة وذات شكل ما ولا تحتوي على ثقوب، وعندما يكون نظام الانسياب مستمراً (قناة مليئة بالماء) كما في (الشكل 8-1) نلاحظ ما يلي:

أ- خلال الزمن (dt) يدخل من (A) إلى الحجم (V) حجماً من المائع قدره (dV_A).



الشكل (1-8) انسياب مستمر خلال قناة جدرانها مرنة ذات شكل غير محدد

ب- خلال الزمن (dt) فإنه من المقطع (B) يخرج من الحجم (V) حجماً قدره (dV_B) . وبما أن الحجم (V) ثابت فإن:

$$dV_A = dV_B$$

إذا:

$$\frac{dV_A}{dt} = \frac{dV_B}{dt}$$

ومنه:

$$D_A = D_B \qquad (1\text{-}17)$$

أي أنه في قناة وحيدة وفي لحظة محددة يكون للتدفق نفس القيمة على طول القناة.

أما بالنسبة لقناة متفرعة كما في (الشكل 9-1) نلاحظ أن:

مايدخل إلى الحجم (V) خلال الزمن (dt) يساوي إلى مايخرج من الحجم (V) خلال نفس الزمن أي أن:

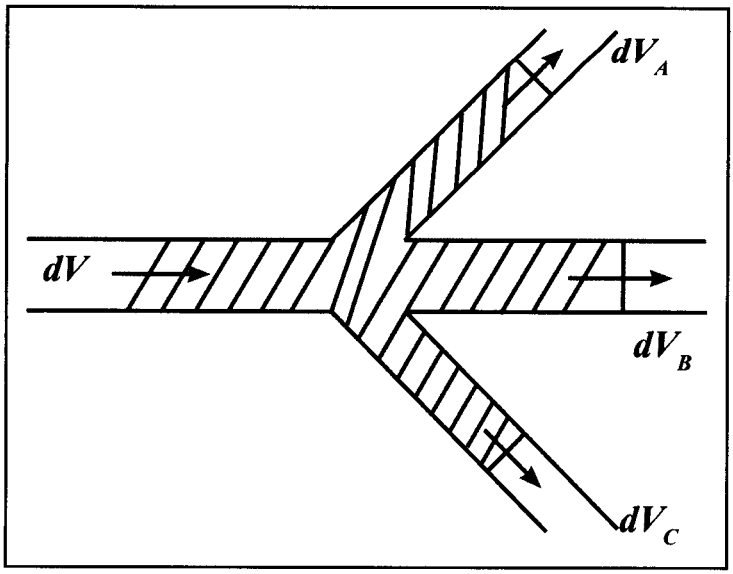
$$dV = dV_A + dV_B + dV_C$$

إذاً:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV_A}{dt} + \frac{dV_B}{dt} + \frac{dV_C}{dt}$$

ومنه:

$$D = D_A + D_B + D_C$$



الشكل (9-1) تدفق المائع خلال القناة المتفرعة

أي أن التدفق في القناة الرئيسية يساوي إلى مجموع التدفقات في الأقنية الفرعية.

وبالرجوع إلى معادلة الاستمرارية *Continuity Equation* نستطيع أن نكتب أن:

$$\text{السرعة} = \frac{\text{مقدار التدفق}}{\text{مساحة المقطع}}$$

فإذا كانت القناة وحيدة وكان مقطعها ثابتاً يكون للسرعه عندئذٍ قيمة ثابتة على طول القناة.

أما إذا احتوت القناة على اتساع، فإن السرعة في مستوي الاتساع تكون أخفض، أي أن للسرعة قيمة أقل عند الاتساع مما هي عليه في بقية مناطق القناة، وكذلك عند الاختناق الموجود في القناة فإن المقطع يتناقص وبالتالي فإن قيمة السرعة عند الاختناق تكون أكبر مما هي عليه في بقية مناطق القناة .وسنناقش في هذا الصدد الحالتين الآتيتين:

1- موائع مهملة اللزوجة *Minor Viscosity Fluids*:

لا يوجد مائع لزوجته معدومة،حيث إن كل مائع يتحرك يحدث احتكاكاً، ويمكن الاقتراب تجريبياً من شروط اللزوجة المعدومة وذلك عندما يكون الانسياب في قناة مقطعها كبير وطولها صغير لمائع لزوجته ضعيفة ويتحرك بسرعة ضعيفة أيضاً، وسنناقش المفا هيم الآتية:

أ- الطاقه الكلية ***Total Energy*** :

نعلم أنه من أجل جسم صلب كتلته (m) يتحرك بسرعه (v) موجود على ارتفاع (h) ويخضع لتسارع الجاذبية الأرضية $(\vec{g})$ تكون الطاقة الكلية هي عبارة

عن مجموع الطاقة الكامنة *mgh Potential Energy* والطاقة الحركية *Kinetic Energy* $(1/2mv^2)$ أى أن:

(الطاقة الكامنة + الطاقة الحركية = الطاقة الكلية)

أما بالنسبة لمائع حجمه (V) يتحرك بسرعة $(\vec{v})$ وكتلته (m) وموجود على ارتفاع (h) ويخضع لتسارع الجاذبية الأرضية $(\vec{g})$ فإنه يملك بالإضافة إلى الطاقة الحركية $(1/2mv^2)$ والطاقة الكامنة (mgh) طاقة ضغطية (PV) تعود إلى خضوع المائع للضغط (P). لذا فإن الطاقة الكلية للمائع تعطى بالعلاقة التالية:

$$\text{الطاقة الكلية} = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV$$

ب- عند حركة مائع مثالي وهذا يعني أنه مجرد من الاحتكاك (لزوجته معدومة) وغير قابل للا نضغاط، فإن طاقتة الكلية تبقى ثابتة أثناء الانسياب أي أن:

$$mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV = C^{te}$$

نقسم على الحجم (V) :

$$\frac{mgh}{V} + \frac{1}{2}\frac{mv^2}{V} + P = C^{te}$$

وبعد الرجوع إلى علاقة الكتلة الحجمية:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

يمكننا الحصول على معادلة برنولي *Bernoullis Equation* :

$$\rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P = C^{te} \qquad (1\text{-}19)$$

التي تعبر عن انحفاظ الطاقة.

حيث:

ρgh : ضغط الثقالة (الطاقة الكامنة لوحدة الحجم).

$\frac{1}{2}\rho v^2$: ضغط حركي (الطاقة الحركية لوحدة الحجم).

P : الطاقة الكامنة لوحدة الحجم والعائدة إلى الضغط والذي يأخذ احدى التسميات التالية:

أ- ضغط بشكل مختصر.

ب- ضغط انتقالي.

ج- ضغط سكوني.

أي أنه يعبَّر عن الضغط المطبق على جزيء السائل. عندما يكون المائع ساكناً فإن سرعته تكون معدومة وبالتالي:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 = 0$$

إذاً:

$$pgh + P = C^{te}$$

ومنه:

$$P = C^{te} - \rho gh$$

تصلح هذه العلاقة للاستعمال حتى وإن كانت اللزوجة غير معدومة لأنها لا تظهر عندما تكون السرعة معدومة.

إذاً عند نفس الارتفاع (h نفس المستوي الأفقي) يكون للضغط نفس القيمة، ومن جهة أخرى إذا تغيرت (h) بمقدار (Δh) فإن (P) يتغير بمقدار (ΔP) أي أن:

$$\Delta P = -\rho g \ \Delta h \qquad (1\text{-}20)$$

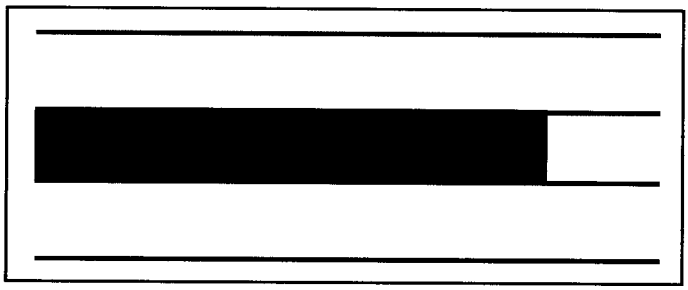
وهذا يعني أنه عندما يزداد الارتفاع فإن (Δh) تكون موجبة، بينما (ΔP) تكون سالبة. أي أن الضغط يتناقص والعكس صحيح. أما عندما تكون القناة أفقية ومقطعها ثابت يكون (P) ثابتاً على طول القناة. وأنه عند وجود اتساع في القناة الأفقية فإن الضغط عند مستوى الارتفاع يكون أكبر مما هو عليه في بقية أجزاء القناة. بينما نلاحظ أنه عند وجود اختناق في القناة الأفقية فإن قيمة الضغط عند مستوى الاختناق تكون أقل مما هي عليه في بقية أجزاء القناة .

2- موائع غير مهملة اللزوجة *Non Minor Viscosity Fluids*:

أ- الانسياب الصفائحي والمضطرب وعدد رينولدز:

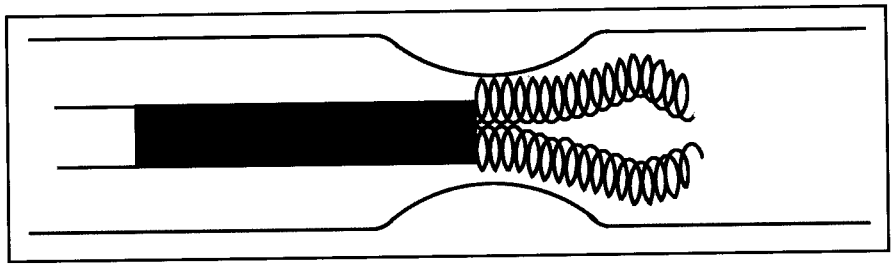
لنلاحظ الآتي: عند تلوين الجزء المحوري من سائل ينساب ضمن قناة (الماء مثلاً) نستنتج بعد فترة وجيزة ما يلي:

عندما تكون سرعة الانسياب ضعيفة فإن الجزء المحوري الملون لا يختلط أبداً مع الجزء المحيطي وبالتالي فالسائل يتحرك وفق صفائح مشتركة المحور، ينزلق بعضها على بعضها الآخر، فنقول في هذه الحالة بأن الإنسياب صفائحي كما في (الشكل 10-1).



الشكل (10-1) الانسياب الصفائحي عندما تكون سرعة الإنسياب ضعيفة

وبالعكس عندما تكون سرعة السائل كبيرة (في مستوي الاختناق)، تظهر عندئذ اضطرابات (دوامات) لذا فإن جزيئات الجزء المحوري تختلط مع جزيئات الجزء المحيطي فنحصل على انسياب مضطرب *unsteady flow* كما في (الشكل 11-1).



الشكل (11-1) الانسياب المضطرب عندما تكون سرعة الانسياب كبيرة

وللتمييز ما بين هذين النظامين للانسياب فقد حدد تجريبياً العالم الفيزيائي الإنكليزي رينولدز العدد (R) الذي حمل اسمه والمعطى بالعلاقة الآتية:

$$R = \frac{\rho \bar{v} r}{\eta} \qquad (1\text{-}21)$$

حيث:

ρ : الكتلة الحجمية للمائع.

η : معامل لزوجة المائع.

r : نصف قطر القناة الاسطوانية.

$\bar{v}$: السرعة المتوسطة لانسياب المائع.

فإذا كانت $(R \langle 1000)$ فالإنسياب يكون صفائحياً، وإذا كانت $(R \rangle 1500)$ فالإنسياب يكون مضطرباً. أما إذا كانت $(1000 \langle R \langle 1500)$ فعندئذٍ لا نستطيع معرفة نظام الانسياب. وبالرجوع إلى علاقة عدد رينولدز، نلاحظ بأن عدة عوامل

من المعادلة الرياضية التي تعبر عن (R) تتغير معاً. فمثلاً في مستوي الاختناق يتناقص نصف القطر(r)، لكن هذا لا يعني بأن عدد رينولدز (R) يتناقص، بل على العكس فإن سرعة المائع تزداد في مستوي الاختناق وبالتالي فإذا كانت القناة اسطوانية وكان التدفق (D) لا يتغير بالاختناق نحصل على:

التدفق = السرعة × مساحة المقطع

أي أن :

$$\bar{v} = \frac{D}{\pi \ r^2} \qquad (1\text{-}22)$$

نلاحظ بأن السرعة متناسبة عكساً مع مربع نصف القطر ولهذا فعندما يتناقص نصف القطر (r) فإن حاصل الضرب ($\bar{v}r$) يزداد وبالتالي فإن عدد رينولدز (R) يزداد. لذا عندما يكون الاختناق كافياً يصبح الإنسياب مضطرباً.

أما أثناء فقر الدم فإن معامل اللزوجة (η) يتناقص وكذلك الكتلة الحجمية (ρ)، لكن تأثيرهما على عدد رينولدز يكون متعاكساً، لذلك ففي الكائن الحي يزداد تدفق الدم وبالتالي تزداد سرعته، ونتيجة لهذه المتغيرات المختلفة تزداد قيمة عدد رينولدز وهذا مايجعل الدم يميل بشكل كبير ليكون مضطرباً في جسم فقير بالدم.

ففي الانسياب المضطرب ونتيجة للاصطدامات العديدة مابين الجسيمات فإن ضياع الطاقة في الانسياب المضطرب يكون أكبر بكثير مما هو عليه في الانسياب الصفائحي. وأنه عند اصطدام الجسيمات فيما بينها، تنتج ظواهر اهتزازية صوتية أي اصدار ضجيج (خرير) كالريح مثلاً بالنسبة للهواء. أما في الكائن الحي فيمكن إدراك هذا الضجيج بالإصغاء وهذا يحدث عندما يمر المائع

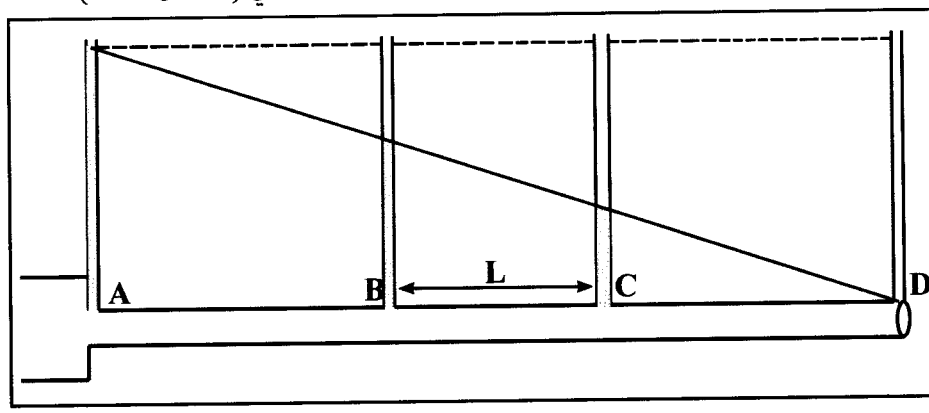
(هواء في المسالك الهوائية، أو دم في الأوعية الدموية) في مقطع ضيق جداً، وأنه في حالة فقر الدم فإن ظهور ذلك يكون واضحاً جداً.

لذا نرى أنه في الصناعة (خاصة الألكترونية والفضائية) وفي معامل التحاليل أو في المستشفيات (غرف العمليات، عزل بهدف استئصال الأعضاء، حروق كبيرة... الخ) يتم استخدام غرف بتدفق صفائحي، والمبدأ في ذلك هو التالي:

في التطبيقات التي أشرنا إليها يجب العمل في جو لايحتوي على جسيمات مجهرية (كالغبار، البكتيريا... الخ) ولهذا يتم تصفية الهواء عند الدخول إلى الغرفة من الجسيمات المجهرية، ومن جهة أخرى فإن المجرى الهوائي يقوم بسحب ما ينتج منها في الغرفة ذاتها. لكن عندما يكون مجرى الهواء مضطرباً، تحدث اضطربات تحتوي على جسيمات يجب التخلص منها وبسبب ذلك فإنها تدور في مكانها ولا تخرج من الغرفة ولهذا السبب يتم استخدام غرف بتدفق صفائحي.

ب- قانون بوازويل التجريبي *Poiseuelles Practical Law*:

وضع بوازويل أنابيب شفافة عمودية في النقاط (A,B,C,D) من قناة أفقية اسطوانية نصف قطرها $(r \langle 1mm)$ كما في (الشكل 12-1).



الشكل (12-1)

ينساب فيها سائل بشكل صفائحي فوجد بأن الضغط يتناقص وفق اتجاه الانسياب من اليسار إلى اليمين أي أن:

$$P_A \rangle P_B \rangle P_C \rangle P_D$$

فتوصل إلى علاقة التدفق الحجمي التالية:

$$D = \frac{(P_B - P_C)\ \pi r^4}{8\eta L} \qquad (1\text{-}23)$$

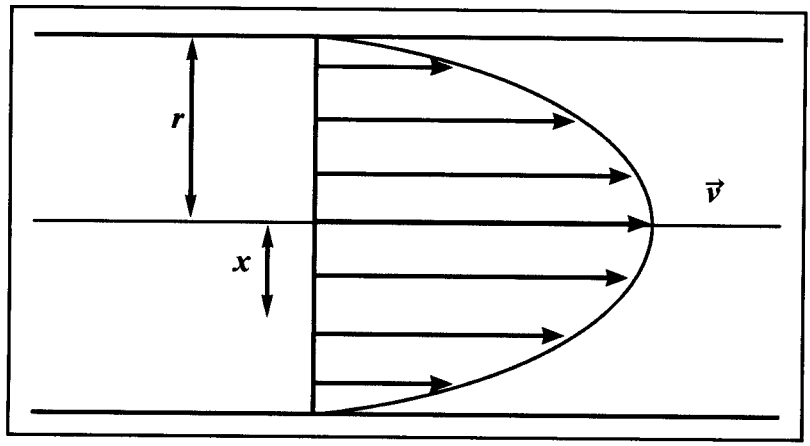
والمعروفة بإسم قانون بوازويل.

حيث:

L : المسافة الفاصلة مابين النقطتين B و C.

η : معامل لزوجة السائل.

$P_B - P_C$: فرق الضغط مابين النقطتين (B,C) من القناة كما توصل أيضاً إلى أن سرعة المائع تكون عظمى على محور القناة وتتناقص حتى تنعدم على الجدران كما في (الشكل 13-1).



الشكل (13-1) تغير سرعة المائع من نقطة إلى أخرى داخل القناة

وأن مظهر السرعات هو عبارة عن قطع مكافئ أي أن:

$$v = \frac{(P_B - P_C)}{4\eta\ L}\left(r^2 - x^2\right) \qquad (1\text{-}24)$$

حيث:

x : بعد النقطة المعتبرة عن المحور.

ويمكننا الحصول على السرعة المحورية عندما $(x=0)$ أي أن:

$$v_{max} = \frac{r^2}{8\eta} \cdot \frac{(P_B - P_C)}{L} \qquad (1\text{-}25)$$

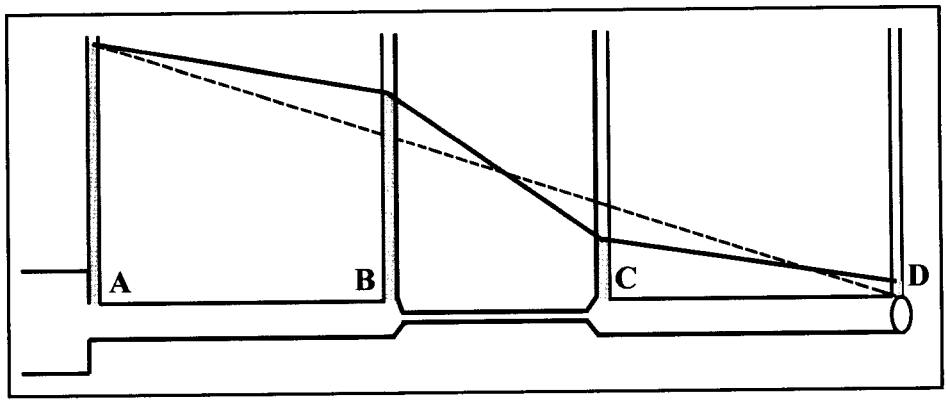
أما السرعة المتوسطة فتعطى بالعلاقة التالية:

$$\bar{v} = \frac{v_{max}}{2} = \frac{r^2}{8\eta} \cdot \frac{(P_B - P_C)}{L}$$

ج- نتائج *Results*:

1- تأثير الإختناق على التدفق والضغط:

عند وجود اختناق بين (B,C) كما هو واضح في (الشكل 14-1)



الشكل (14-1) كيفية تأثير الاختناق على التدفق والضغط

فإننا نؤكد على الآتي:

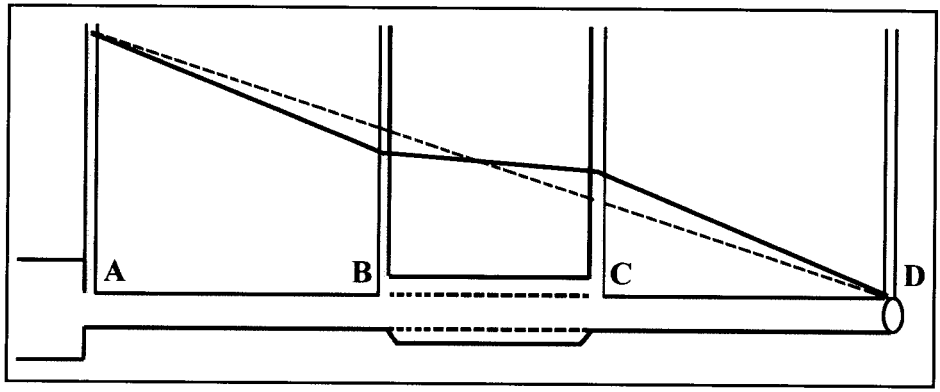
أ- الضغط في (B) أكبر مما هو عليه عند غياب الاختناق في القناة.

ب- الضغط في (C) أصغر مما هو عليه عند غياب الإختناق في القناة.

ج- تناقص التدفق في القناة.

2- تأثير الاتساع على التدفق والضغط:

عند وجود اتساع مابين (B و C) كما هو واضح في (الشكل 15-1)



الشكل (15-1) كيفية تأثير الاتساع على التدفق والضغط

فإننا نؤكد على الآتي:

أ- الضغط في (B) أصغر مما هو عليه عند غياب الاتساع في القناة.

ب- الضغط في (C) أكبر مما هوعليه عند غياب الاتساع في القناة.

ج- تزايد التدفق في القناة.

1-7 التثفل *Centerifugal Filteration* :

عند خض مزيج من الرمل والماء، ثم تركه يرقد، نلاحظ بأن الرمل يتوضع في أسفل الوعاء، إن هذا الانتقال للرمل الذي يم تحت تأثير الجاذبية الأرضية يسمى التثفل *(Centerifuge)* .

أما سرعة تثفل كرة نصف قطرها (r) وكتلتها الحجمية (ρ) أكبر من الكتلة الحجمية $(\rho_\circ)$ للسائل فتعطى بالعلاقة التالية:

$$\vec{v} = \frac{2}{9}\frac{(\rho - \rho_\circ)\ r^2}{\eta} \cdot \vec{g} \qquad (1\text{-}26)$$

من خلال العلاقة (1-26) نرى بأن السرعة متناسبة مع (r^2)، بمعنى آخر فإن سرعة تثفل الكرة تزداد بتزايد حجمها، وهذه الظاهرة عامة، ومهما كان شكل الجسم الصلب فإن سرعة تثفلة تزداد مع حجمه فمثلاً، عدة أقراص أو عدة مكعبات ملتصقة مع بعضها البعض تتثفل بسرعة أكبر من سرعة تثفل واحد منها فقط. وهذا يحدث لأن الحجم يزداد بنسبة أكبر من السطح وأن القوة المحركة للكرة (هي عبارة عن الثقل الظاهري للكرة والذي يساوي إلى الثقل الحقيقي للكرة مطروحاً منه (دافقة أرخميدس) متناسبة مع الكتلة وبالتالي مع الحجم، بينما قوة الإحتكاك (القوة المقاومة) متناسبة مع السطح، فعندما يزداد الحجم فإن القوة المحركة تزداد بمقدار أكبر من تزايد قوة الإحتكاك ولهذا فالسرعة تزداد. كما نلاحظ أنه عند وضع دم غير متخثر في انبوب شفاف وعمودي. نستنتج بعد مضي بعض الوقت عدم احتواء الجزء العلوي على الكريات الحمراء، بل يحتوي فقط على المصل وهذا يعني أن الكريات الحمراء قد تثفلت، نطلق تعبير سرعة تثفل الكريات (*v.s*) على مقدار ارتفاع المصل الخالي من الكريات الحمراء بعد مضي ساعة من الوقت وهي عادة أقل من (*10mm*) ويمكن أن تزداد بمقدار كبير في بعض

الأمراض والسؤال الذي يمكن طرحه الآن، هو معرفة ما إذا كان سبب الزيادة في (*v.s*) يكمن في المصل أم في الكريات الحمراء؟.

وللاجابة على هذا السؤال نأخذ عينتين من الدم لهما نفس الهيماتوكريت، لكن سرعة تثفلهما مختلفة جداً.

الأول: هو دم طبيعي مكون من المصل (*N*) والكريات (*N*) وله (*v.s*) وهي سرعة تثفل عادية.

الثاني: هو دم مريض مكون من المصل (*P*) والكريات (*P*) وله (*v.s*) مرتفعة.

نعمد الآن إلى تركيب عينتين جديدتين إبتداء منهما. فنرى بأن الدم الأول المكون من المصل (*N*) والكريات (*P*) له (*v.s*) عادية أما الدم الثاني المكون من المصل (*P*) والكريات (*N*) فتكون له سرعة (*v.s*) مرتفعة.

نستنتج من ذلك بأن المصل هو المسؤول عن زيادة سرعة التثفل، وليست الكريات.

أما عند وضع كريات دم حمراء في محاليل متوازنة من السكر أو من كلوريد الصوديوم (*NaCl*) أومن أي من الشوارد أوالجزيئات الصغيرة فإنها لاتتثفل وبالتالي فإن (*V.S=0*) وكذلك بالنسبة لمحاليل الألبومين المتوازنة أو أي من جزيئات أخرى متناظرة فإن (*v.s*) هي عملياً معدومة. وبالعكس ففي محاليل مولد الليفين المتوازنة أو أي من الجزيئات الخطية الكبيرة فإن (*v.s*) تكون مرتفعة وبالتالي فإن تثفل الكريات الحمراء لايحدث إلا بوجود جزيئات خطية كبيرة وأن (*v.s*) تزداد بتزايد تركيز الجزيئات الخطية الكبيرة.

لكن النتائج التي توصلنا إليها سابقاً تقودنا الى تناقض وهو أن (*v.s*) تزداد

بتزايد تركيز الجزيئات الخطية الكبيرة، وكذلك فإن اللزوجة تزداد أيضاً لتزايد هذا التركيز و بالتالي فإن (*v.s*) تتغير وفق نفس اتجاه تغير معامل اللزوجة، وهذا معاكس للنتيجة التي تم الحصول عليها والمتعلقة بسرعة تثفل كرة على وجه العموم.

في الحقيقة، فإن هذا التناقض ليس إلا ظاهرياً لأن الفحص بالمجهر الضوئي يظهر لنا بأن الكريات الحمراء الموجودة في محلول (*NaCl*) المتوازن تكون منفصلة عن بعضها البعض، أي أن وحدة الحركة هي الكرية الحمراء الوحيدة التي تمتلك حجماً صغيراً وبالتالي فإن سرعة تثفلها ضعيفة جداً، وفي الواقع فإن (*v.s*) الصغيرة جداً هي نظرياً معدومة لأن التهيج الحراري يعيد الكريات إلى المعلق *Suspension*.

إن وجود الجزيئات الخطية الكبيرة يجعل الكريات الحمراء متوضعة مقابل بعضها البعض مشكلة بذلك اسطوانة، كما أنه بمقدار مايكون تركيز الجزيئات الخطية الكبيرة مرتفعاً بمقدار ما يكون طول هذه الاسطوانات كبيراً.

إذاً: عند تزايد تركيز الجزيئات الخطية الكبيرة في المصل فإن لزوجته تزداد، لكن حجم وحدة الخلية التي هي الاسطوانة تزداد أكثر بكثير لذا فإن (*v.s*) تزداد أيضاً.

إن تشكل الاسطوانات هذه هو عبارة عن تجمع عكوس لأن التهيج الحراري يشتت الكريات الحمراء التي تتجمع عند السكون أو عند سرعة انتقال ضعيفة (دم لانيوتوني *Non Newtotian Blood*).

يعتبر قياس (*v.s*) فحصاً سهلاً وحساساً جداً لزيادة الجزيئات الخطية الكبيرة في المصل (مولد الليفين، $\propto_2$ غلوبين، هيبتوغلوبين) حيث إن هذه الجزيئات تكون متزايدة في بعض حالات العدوى والالتهابات. فقياس (*v.s*) يشبه قياس

درجة حرارة الجسم، فهو يحمل عنصراً إضافياً لتشخيص الأمراض، كما أنه يسمح بمتابعة تطور المرض، أحياناً لايكون تركيز الجزيئات الخطية الكبيرة العنصر الوحيد الذي يلعب دوراً في قيمة (*v.s*) لأن الهيماتوكريت *Hematocrite* يلعب دوراً هاماً، فنقص الهيماتوكريت (فقر الدم) يتسبب بزيادة (*v.s*) لأن طول كل اسطوانة لا يتغير أثناء فقر الدم إنما عددها هو الذي ينخفض ولهذا السبب فإن عرقلتها تكون قليلة أثناء التثفل.

أحياناً لا يكون تسارع الجاذبية الأرضية كافياً لتثفل الكريات الحمراء المعزولة و لجعلها تتثفل يجب تأمين تسارع (γ) أكبر من (*g*). يسمى هذا التسارع بالتسارع النابذ المطبق على الدم *(Centrepital Acceleration)* .

فإذا كانت (ω) السرعة الزاوية و (*R*) المسافة بين الكرية الحمراء ومحور الدوران فإن:

$$\gamma = \omega^2 R \qquad (1\text{-}27)$$

فمثلاً، في نابذة (مثفل دوراني) تدور *(6000 rev/min)* دورة في الدقيقة (100 دورة في الثانية)، وعندما تكون (*R=0.1m*) فإن:

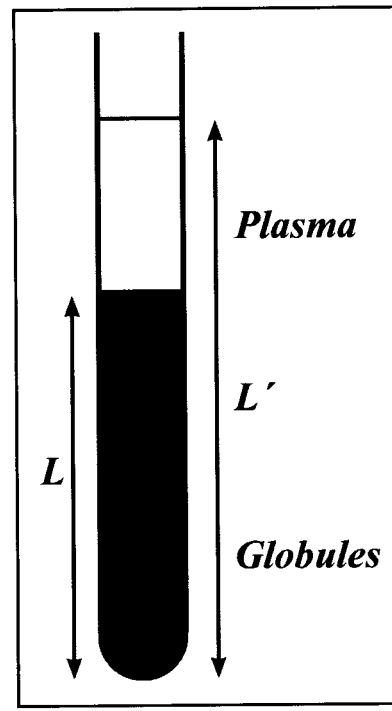
$$\omega = 2\pi.100$$

$$\gamma = (4\pi^2.10^4)\ .\ (0.1) \cong 40000\ (m/sec^2)$$

وبما أن ($g \cong 10m/sec^2$) نسطيع القول بأن التسارع النابذ يساوي (*4000g*).

يسمح هذا النوع من النبذ (تثفل بالدوران) بتثفل الجسيمات ذات الحجم المرئي بالمجهر الضوئي (كريات حمراء، خلايا مختلفة، بكتريا، جزيئات متجمعة) وفصلها عن المحلول. تسمح عملية نبذ الدم غير المتخثر بالحصول على المصل

Supernata الدموي الذي يجرى عليه عدد من الفحوصات البيولوجية، فمثلاً عند وضع الدم في انبوب مقطعه (S) ثابت فإن الحجم المشغول بالكريات الحمراء بعد عملية النبذ هو (SL) بينما الحجم الكلي هو (SL') وبالتالي فإن النسبة: ($\frac{L}{L'} = \frac{SL}{SL'}$) تساوي إلى الهيماتوكريت الذي يتم قياسه كما في (الشكل16-1).



الشكل (16-1) قياس الهيماتوكريت بإستخدام انبوب البول

أما فيما يتعلق بالبول *Urine* فإن عملية النبذ تسمح بتجميع و ضمن حجم صغير جداً (في قعر الانبوب) جميع العناصر الموجودة في انبوب البول (خلايا، بلورات ميكروية، كريات حمراء...) وأن الفحص المجهري للبول يجرى على الجزء المتثفل في قعر الانبوب. وأحياناً يكون التسارع الذي يتم الحصول عليه بالنبذ

العادي غير كافٍ لحمل الجزيئات التي حجمها أصغر بكثير من حجم الخلايا، لذا يستخدم تسارعات كبيرة جداً، أي أن سرعة الدوران مرتفعة جداً وهذا يتسبب ببعض المشاكل التقنية، مثل: (نوعية المحرك، توازن كامل للجزء المتحرك، ضرورة العمل في الفراغ وفي درجة حرارة منخفضة).

وأن النابذة السريعة جداً والتي تدور (*42000 rev/min*) دورة في الدقيقة. تنتج وعلى بعد (*0.1m*) تسارعاً قدره ($2.10^6 m/sec^2$) أي حوالي ($2.10^5 g$) .