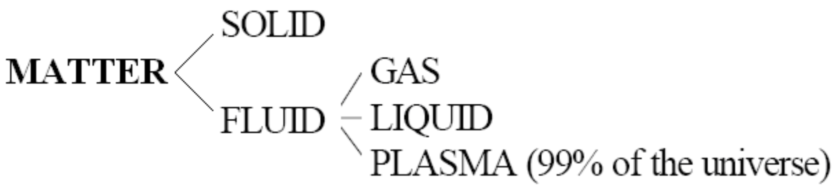
الخصائص الفيزيائية للموائع (*Physical Properties of Fluid*):

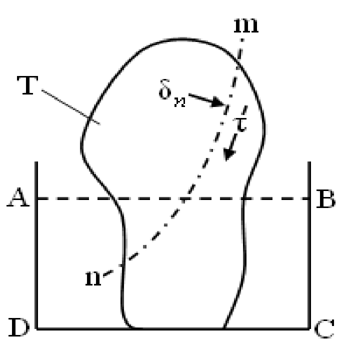
من المعروف أن المادة توجد في الطبيعة بحالاتها الأربع: الصلبة، السائلة، الغازية والبلاسما (انظر الشكل (1.1)). فعند تغير درجة الحرارة أو الضغط فإن المادة السائلة يمكن أن تتحول إلى مادة صلبة أو غازية، فمثلاً عند الضغط العالي فإنه في المياه العادية تتشكل عدسات ثلجية وبالعكس فعند انخفاض الضغط فإنه يمكن أن تظهر فقاعات غازية في السائل نفسه.



الشكل (1.1)، يوضح الحالة الفيزيائية للمادة.

فالسائل (*Liquid*) بالتعريف هو عبارة عن جسم فيزيائي يبدي الصفتين التاليتين:

1. لايغير من حجمه إلا قليلاً عند تغير الضغط والحرارة (وهذا مايتوافق مع المادة الصلبة).
2. يتميز بخاصية السيولة (الميوعة) ولذلك فهو يأخذ شكل الوعاء الذي يوضع فيه، وفي هذه الخاصة يتماثل السائل مع الغاز ويختلف بها عن المادة الصلبة. ولإظهار خاصية السيولة للجسم السائل، ندرس وضع المادة الصلبة في وعاء ما كما في الشكل (1.2).



الشكل (1.2)

في هذه المادة الصلبة (T) وتحت تأثير وزنها سوف تنشأ إجهادات معينة. إذا أخذنا مقطعاً وهمياً في الجسم وليكن (nm)، ففي هذا المقطع كما في جميع المقاطع سوف يكون بالإضافة إلى الإجهاد العادي قوة إجهاد أخرى τ تكون مسايرة للمقطع لذلك سميت بالإجهادات المماسية أو إجهادات القص (*Shear Stress*).

ولو افترضنا أن المادة الصلبة (T) اتخذت لنفسها وتحت تأثير وزنها التركيب الذي لايتأثر بالإجهاد τ (بمعنى أن τ مهمل) فعندها سيأخذ الجسم الصلب شكل الوعاء (ABCD). ومنه يمكن القول وبالاعتماد على الخاصية الثانية للموائع، إن الجسم المائع في أثناء سكونه لايمكن أن يحتوي على إجهادات مماسية ولهذا السبب فهو يأخذ شكل الإناء الموضوع فيه، كما أن الغازات تتمتع بهذه الصفة ولذلك فهناك حالات كثيرة نظرية تستخدم فيها قوانين الحالات السائلة للحالات الغازية.

إذاً يفهم من تعبير سائل أنه جسم يتمتع بخاصية السيولة وذو انضغاطية قليلة جداً.

- يستثنى من حالة السوائل المشار إليها السوائل الشاذه (نفط ثقيل، دهانات، وزيوت تشحيم) فهي تمتلك في أثناء سكونها إجهادات قص ولاتنطبق عليها قوانين الأواني المستطرقة.
- يقصد بالسائل المثالي السائل الذي يحقق الشروط التالية:

1. لايتغير حجمه مطلقاً في أثناء تغير الضغط أو الحرارة.
2. عديم اللزوجة مطلقاً (لاتوجد قوى احتكاك داخلية (إجهادات) عند الحركة.

غير أن هذه السوائل لاتوجد في الطبيعة.

وهكذا مما تقدم يمكن استخلاص مايلي:

1. عند دراسة السوائل الساكنة لايمكن التمييز بين السائل المثالي والحقيقي.
2. أما عند دراسة حركة السوائل فمن السهل ملاحظة السائل الحقيقي الذي يتميز بظهور قوى احتكاك داخلية (اللزوجة).

في حين يفهم من تعبير الغاز (*Gas*) –حسب النظرية الحركية للغازات (*Kinetic Theory*)– بأنه عبارة عن مجموعة من الجزيئات التي تتحرك بشكل دائم وعشوائي وفق مسارات معينة ومستقلة أي بشكل عام غير محكومة بالقوى التي تظهر فيما بينها، حيث يمكن لهذه الجزيئات أن تغير من اتجاه مساراتها وسرعتها بشكل مفاجىء وذلك نتيجة لتصادمها مع بعضها البعض أو نتيجة لتصادمها بجدران الوعاء الذي يحويها.

واعتماداً على هذه النظرية يمكن أن نستنتج مايلي:

- إن الضغط (p) المتشكل على جدران الوعاء ناشىء من تصادم جزيئات الغاز المتحركة بسرعة بالجدار الداخلي للوعاء.
- تزداد قيمة الضغط داخل الوعاء بتصغير حجمه، إذ تقل المسافة بين الجزيئات وبالتالي يزداد عدد التصادمات بين هذه من جهة وبينها وبين الجدران الداخلية للوعاء من جهة أخرى.
- تزداد قيمة الضغط داخل الوعاء بازدياد درجة الحرارة، إذ تزداد الطاقة الحركية للجزيئات وبالتالي يزداد احتمال تصادم هذه الجزيئات فيما بينها من جهة وبينها وبين الجدران الداخلية للوعاء من جهة أخرى.

1.2.1- الكثافة (*Density*):

تعرف الكثافة المادية أو الكتلة النوعية (*Specific Mass*) لمائع بأنها كتلة واحدة الحجم، ويرمز لها عادة بـ (ρ):

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (1.5)$$

ويمكن تعيين واحدة قياسها كمايلي:

$$[\rho] = \frac{Kg}{m^3} = \frac{1}{9,81} \cdot \frac{Kp \cdot s^2}{m^4}$$

تتأثر كثافة السوائل بشكل رئيسي بدرجة الحرارة، فمع ازدياد درجة الحرارة تنخفض كثافة السوائل باستثناء الماء الذي تكون كثافته أكبر مايمكن عند درجة الحرارة ($4\ ^\circ C$)، حيث تبلغ كثافة الماء عند درجة الحرارة هذه ($1000\,Kg/m^3$). في حين يكون للضغط تأثير بسيط جداً على كثافة السوائل بحيث يمكن إهماله.

في حين تتعلق كثافة غاز ما بشكل رئيسي بالضغط ودرجة الحرارة التي يتواجد عندها هذا الغاز. انظر الجدول (1.4).

أما الحجم النوعي (*Specific Volume*) بالتعريف فهو حجم واحدة الكتلة ويرمز له عادة بـ (ν) وبالتالي فهو يساوي مقلوب الكثافة:

$$\nu = \frac{\mathrm{V}}{m} \Rightarrow \nu = \frac{1}{\rho} \qquad (1.6)$$

1.2.2- الوزن النوعي (*Specific Weight*):

يعرّف الوزن النوعي بأنه وزن واحدة الحجوم ويرمز له بـ (γ)، أي:

$$\gamma = \frac{w}{\mathrm{V}} \qquad (1.7)$$

حيث إنَّ:

w : وزن حجم السائل المدروس، (N).

V : حجم السائل المدروس، (m^3).

γ : الوزن النوعي، (N/m^3).

فإذا علمنا أن ($1m^3$) من الماء يزن ($9810\,N$) عند درجة الحرارة ($+4\ ^\circ C$) فعندئذٍ يكون الوزن النوعي للماء:

$$\gamma = \frac{9810}{1} = 9810\,N/m^3$$

وعند ثبات الضغط تتغير قيمة الوزن النوعي للماء بالعلاقة مع درجة الحرارة بشكل بسيط (حوالي $0,5 \div 4\%$) وذلك عند تغير درجة الحرارة بشكل تدريجي ضمن المجال $[30 \div 100\ ^\circ C]$.

يؤثر الضغط بشكل ضعيف جداً على قيمة الوزن النوعي للسوائل بحيث يمكن إهمال هذا التأثير، فمثلاً عند تغير الضغط المطبق على الماء بحوالي ($100\ bar$) يكون التغير في قيمة الوزن النوعي حوالي ($4,65\%$).

السائل أو الغاز	$\rho\left[Kg/m^3\right]$	السائل أو الغاز	$\rho\left[Kg/m^3\right]$
المياه العذبة	999	الإيتانول النقي	789,3
المياه المالحة	1020	زيت الخروع	970
الزئبق	13595	الهواء	1,188
الكيروسين	780-820	الأوكسجين	1,312
البنزين	680-740	الهليوم	0,614
البنزول	900	الآزوت	1,151
النفط	760-900	بخار الماء	0,739

الجدول (1.4)، قيم الكثافة لبعض السوائل والغازات عند $T = 15\ ^\circ C$ والضغط الجوي.

1.2.3- الكثافة النوعية (*Specific Gravity*):

وتدعى أحياناً بالكثافة النسبية (*Relative Density*) وهي بالتعريف النسبة بين الوزن النوعي للسائل عند درجة حرارة القياس إلى الوزن النوعي للماء عند درجة الحرارة ($+4\ ^\circ C$)، أي:

$$S_g = \frac{\gamma}{\gamma_{w,+4^\circ C}}$$

فإذا كان الوزن النوعي للزئبق ($133\, KN/m^3$) فإن كثافته النوعية هي:

$$S_g = \frac{133000}{9810} = 13,6$$

وبناء على ماسبق يمكن أن نستنتج أن الكثافة النوعية للماء تساوي (1) عند درجة الحرارة $(+4\ ^\circ C)$.

يلاحظ أن الكثافة النوعية ليس لها واحدة.

- **علاقة الكثافة بالوزن النوعي:**

من المعلوم أن وزن (ثقل) الجسم هو جداء كتلة الجسم المدروس بتسارع الجاذبية الأرضية، أي:

$$w = m \cdot g$$

كما أنه يمكن تعيين حجم السائل المدروس وفقاً للعلاقة:

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

وبالتعويض ينتج:

$$\gamma = \frac{w}{\mathrm{V}} = \frac{m \cdot g}{m/\rho} = \rho \cdot g$$

حيث إنَّ:

g : تسارع الجاذبية الأرضية، $(9{,}81 m/s^2)$.

ρ : كثافة السائل المدروس، (Kg/m^3).

وبالتالي فإنه يمكن التعبير عن الوزن النوعي لسائل ما بدلالة الكثافة النسبية على النحو التالي:

$$S_g = \frac{\gamma}{\gamma_{w,+4^\circ C}} = \frac{\rho \cdot g}{\rho_{w,+4^\circ C} \cdot g} = \frac{\rho}{\rho_{w,+4^\circ C}}$$

وبناءً على ماسبق يمكن استنتاج كثافة الماء عند الدرجة $(+4\ ^\circ C)$ على النحو التالي:

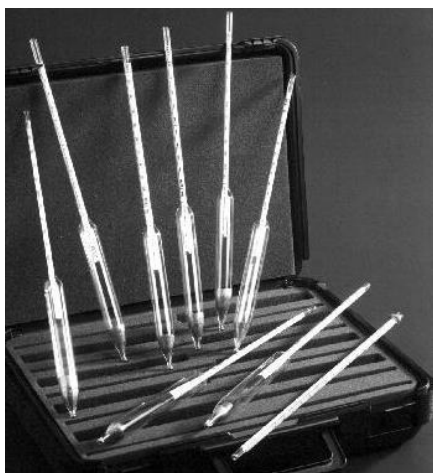
$$\rho_{w,+4^\circ C} = \frac{\gamma_w}{g} = \frac{9810\,(N/m^3)}{9{,}810\,(m/s^2)} = 1000\,Kg/m^3$$

- **قياس الكثافة:**

يتم قياس الكثافة باستخدام إحدى الأجهزة التالية:

a) باستخدام البكنومتر (*Pycnometer*): والذي هو عبارة عن حوجلة زجاجية قياسية تتسع لحجم معين غالباً ($50\,cm^3$) أو ($100\,cm^3$). توزن الحوجلة قبل وبعد ملئها بالسائل ويقسم الفرق بين الوزنين على حجم السائل فنحصل على كثافة السائل المقاسة عند درجة حرارة القياس.

b) المكثاف العائم (الهيدرومتر العائم: *Precision Hydrometer*): يعتمد على مبدأ قوة دافعة أرخميدس الذي ينص على أن الأجسام المغمورة كلياً أو جزئياً في سائل ذو كثافة معينة تتلقى قوة من الأسفل تحاول رفعها إلى الأعلى وتساوي إلى وزن السائل المزاح وبتعبير آخر فهي تساوي حجم السائل المزاح (وهو يساوي حجم الجزء المغمور من الجسم) مضروباً بالكثافة وقوة الجاذبية الأرضية ($F = \mathrm{V} \cdot \gamma = \mathrm{V} \cdot g \cdot \rho$) فإذا كان حجم الهيدرومتر ثابت وقوة الجاذبية الأرضية ثابتة للمكان نفسه فإن مقدار انغماس الهيدرومتر يعود بالدرجة الأولى إلى كثافة السائل، وتحتوي الهيدرومترات على مقاييس حرارة حيث يجب أن يشار عادة إلى درجة الحرارة التي يتم عندها قياس الكثافة.



الشكل (1.3)، الشكل العام للمكثاف العائم

c) الأجهزة الحديثة: وتعتمد على انتشار الأمواج داخل السائل (صوتية، اهتزازية...وغيرها).

- **درجة الكثافة الأمريكية** (*API degree*):

تعطى درجة الكثافة الأمريكية (معهد البترول الأمريكي) بالعلاقة التالية:

$$API = \frac{141.5}{\rho_{60F^\circ}^{60F^\circ}} - 131.5$$

حيث إنَّ ($\rho_{60F^\circ}^{60F^\circ}$) الكثافة النوعية (النسبية) للنفط بالنسبة للماء عند درجة الحرارة ($60\,F^\circ = 15.6\ ^\circ C$).

ملاحظة: اتفق الخبراء في معهد البترول الأمريكي على اعتماد الدرجة ($60\,F^\circ$) لقياس صفات النفط ومشتقاته.

واعتماداً على درجات (*API*) فإن النفط يقسم إلى:

1. $API > 40$: نفط خفيف جداً.
2. $30 < API < 40$: نفط خفيف.
3. $23 < API < 30$: نفط متوسط.
4. $10 < API < 23$: نفط ثقيل.
5. $API < 10$: نفط ثقيل جداً.

وقد وجد أن درجة كثافة الماء بحسب (*API*) تساوي (10) ويلاحظ أن درجة الكثافة الأمريكية تتناسب عكساً وقيمة الكثافة فكلما كانت الكثافة كبيرة كلما كانت درجة (*API*) صغيرة والعكس صحيح.

لاتتغير الكثافة بشكل كبير عند تغير درجة الحرارة بالنسبة للسوائل وذلك لاينطبق على الغازات، فمثلاً كثافة الماء تتغير بمقدار صغير جداً عند تغير درجة الحرارة من ($+4\ ^\circ C$) وحتى ($+94\ ^\circ C$).

$$\frac{\rho_{w,+4^\circ C} - \rho_{w,+94^\circ C}}{\rho_{w,+4^\circ C}} = \frac{1000 - 964}{1000} = 3.6\%$$

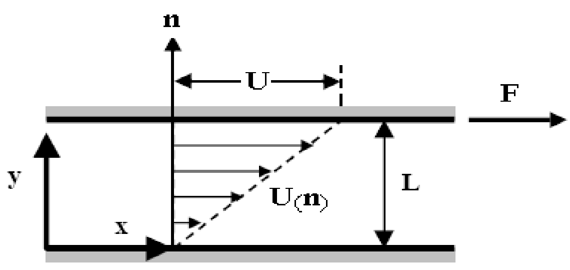
وبالتالي فإنه من أجل معظم التطبيقات الهندسية فإن التغير في كثافة السوائل الناجم عن تغير الضغط أودرجة الحرارة يكون مهملاً ولاينطبق ذلك على الغازات.

1.2.4- اللزوجة (*Viscosity*):

اللزوجة بالتعريف هي الصفة الفيزيائية المميزة للسوائل الحقيقة بأنها تقاوم تغير شكلها، ولذلك فإن كل جسم يتحرك في سائل حقيقي يتلقى مقاومة تستلزم بذل قوى خارجية للتغلب عليها وكل سائل حقيقي يجري ضمن أجسام كالأنابيب يخسر جزءاً من قدرته الميكانيكية. وهذا ماسنأتي على إيضاحه في الفصول اللاحقة.

ولفهم ماهية اللزوجة نتصور تجربة كوئيت التالية:

نفترض أن صفيحتين طويلتين جداً بينهما سائل لزج (انظر الشكل (1.4))، إذا سحبت الصفيحة العلوية في مستويها بسرعة (U) فإن التجربة تبين بإن السائل يبقى ملتصقاً بكلتا الصفيحتين، وبالتالي فإن السرعة فيما بين الصفيحتين تتوزع بشكل خطي بحيث تكون أعظمية وتساوي سرعة الصفيحة نفسها على جدار الصفيحة العلوية وتساوي الصفر عند الصفيحة السفلية. ولكي تبقى حركة الصفيحة العلوية مستمرة يلزم تطبيق قوة مماسية (F) باتجاه حركتها بحيث تكفي للتغلب على قوى الاحتكاك السائل فقط وذلك باعتبار أن قوى الإجهادات الناظمية (الضغط) متساوية فيما بينها.



الشكل (1.4)، يوضح مفهوم اللزوجة.

لقد أثبتت التجارب المتعددة التي أجريت بهذا الخصوص مع تغير البعد (L) أن الإجهادات المماسية (*Tangential Stresses*) بالنسبة لواحدة السطح المبلل تتناسب طرداً مع السرعة (U) وعكساً مع البعد (L)، أي:

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{U}{L} \qquad (1.8)$$

حيث إنَّ:

S : مساحة سطح الصفيحة.(m^2).

τ : الإجهاد المماسي للاحتكاك الداخلي، (N/m^2) أو(Kp/m^2).

μ :معامل تناسب وتتعلق قيمته بطبيعة السائل المدروس، ويطلق عليه اللزوجة التحريكية (*Dynamic Viscosity*)، ويمكن استنتاج واحدة قياسها كمايلي:

$$\mu = \frac{\tau \cdot L}{U} = \frac{N}{m^2} \cdot \frac{m \cdot s}{m} = \frac{N \cdot s}{m^2} = pa \cdot s = 10 \frac{dyn \cdot s}{cm^2} = 10 \frac{g}{cm \cdot s} = 10 \; poise$$

وفي أغلب الحسابات الهيدروليكية يتم استخدام معامل اللزوجة الحركية (*Kinematic Viscosity*)$-\upsilon-$ والذي يساوي حاصل قسمة معامل اللزوجة التحريكية على كثافة السائل:

$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho} \qquad (1.9)$$

وتلعب هذه اللزوجة دوراً هاماً في كافة الجريانات التي تؤثر فيها قوى الاحتكاك وقوى العطالة. أما واحداتها القياسية في الجملة الدولية فيمكن استنتاجها من العلاقة (1.9) كمايلي:

$$\upsilon = \frac{Kg}{m \cdot s} \cdot \frac{m^3}{Kg} = \frac{m^2}{s} = 10^4 \; stokes$$

يمكن كتابة العلاقة (1.8) بشكل أكثر شمولية وذلك بالتعويض عن تغير السرعة باتجاه الناظم بتدرج السرعة وبالتالي نحصل على المعادلة التالية:

$$\tau = \mu \cdot \frac{\partial U}{\partial n} \qquad (1.10)$$

تدعى المعادلة السابقة بقانون نيوتن للزوجة (*Newton's Viscosity Law*) والذي على أساسه تم تقسيم الموائع إلى موائع نيوتونية (*Newtonian Fluids*) موائع غير نيوتونية (*Nonnewtonian Fluids*).

فبالإضافة إلى الموائع النيوتونية التي تحقق العلاقة (1.10) والتي تظهر لزوجتها في أثناء تحركها فقط توجد موائع غير نيوتونية (لاتحقق العلاقة (1.10)) وتتميز بوجود حالة الإجهاد (وجود الإجهادات المماسية) حتى عند وجودها في حالة السكون، ويقال عن هذه الموائع أن لها لزوجة تكوينية (بنيوية)، وتحدث حركة مثل هذه الموائع من جراء التأثير الخارجي بعد أن تأخذ الإجهادات المماسية قيماً معينة. وتنسب إلى هذه الموائع على سبيل المثال سوائل الحفر (طفلة سائل الحفر)، النفوط الثقيلة، زيوت التزليق، المحاليل الغروية.

1.2.4.1- **قياس لزوجة السوائل**:

تحدد لزوجة السوائل بالتجربة بواسطة أجهزة تسمى بمقاييس اللزوجة ويسمح مقياس أنكلر للزوجة والمستخدم على نطاق واسع في تحديد قيم لزوجة السائل الاصطلاحية $[E^\circ]$. ويتحدد بواسطة الجهاز الموضح في الشكل (1.5) زمن مرور (t_f) $200cm^3$ من السائل الخاضع للتجربة عند درجة الحرارة المعطاة، ومن ثم يتم تحديد زمن مرور (t_w) $200cm^3$ من الماء المقطر عند درجة الحرارة ($20\ ^\circ C$)، وعندئذ تكون لزوجة السائل بدرجات اللزوجة الاصطلاحية (أنكلر):

$$E^\circ = \frac{t_f}{t_w} \qquad (1.11)$$

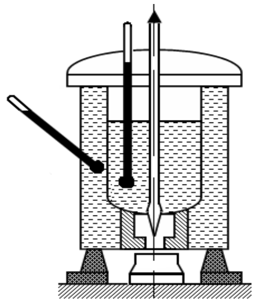
ويتم الانتقال من اللزوجة الاصطلاحية إلى اللزوجة الحركية (الكينماتيكية) المقدرة بواحدة ($Stokes$) بواسطة استخدام عدة معادلات أهمها:

- قانون فون–ميس:

$$\upsilon = 0,0731 \cdot E^\circ - \frac{0,0631}{E^\circ} \qquad (1.12)$$

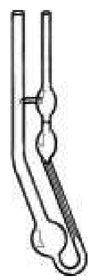
- قانون فوجل:

$$\upsilon = E^\circ \times 0,076^{\left[1-\frac{1}{(E^\circ)^3}\right]} \qquad (1.13)$$



الشكل (1.5)، الرسم التخطيطي لمقياس أنكلر للزوجة.

غالباً مايستخدم جهاز أوستفلد لقياس لزوجة السوائل النيوتونية (*Ostwald Viscometer*) وهو يعتمد كما في مقياس أنكلر على النسبة بين الزمن الذي يستغرقه تفريغ كمية معينة من السائل إلى الزمن الذي يستغرقه تفريغ الكمية نفسها من الماء.

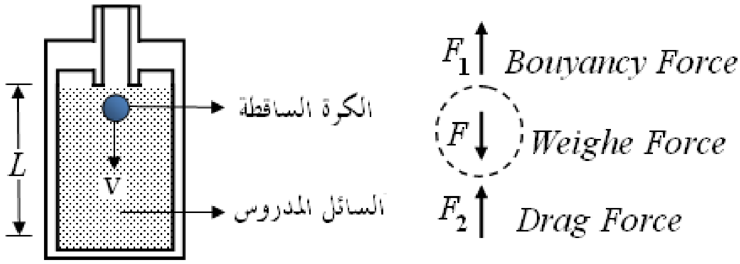


الشكل (1.6)، الشكل العام لمقياس أوستفلد.

وعلاوةً على ذلك يتم استخدام الأجهزة التالية بهدف قياس لزوجة السوائل:

- **مقياس اللزوجة ذو الكرة الساقطة:**

عندما يسقط جسم صلب تحت تأثير قوة الجاذبية الأرضية خلال وسط سائل فإن الجسم سيتسارع حتى يصل إلى سرعة ثابته تدعى السرعة النهائية أو الحدية (*Terminal Velocity*)، عند هذه السرعة تكون قوة المقاومة (F_2) إضافة إلى قوة الطفو –دافعة أرخميدس- (F_1) مساوية للقوة الناتجة عن وزن الكرة (F).



الشكل (1.7)، مقياس اللزوجة ذو الكرة الساقطة.

من قانون نيوتن للحركة لدينا:

$$\sum F = m \times a$$

وبالتالي فإن:

$$weight\ \ force - bouyancy\ \ force - drag\ \ force = 0$$

1. يحسب وزن الجسم كحاصل جداء الوزن النوعي لمعدن الكرة بحجمها، أي:

$$F = \gamma_b \left(\frac{\pi}{6} \cdot D^3 \right)$$

2. قوة الطفو تساوي وزن السائل المزاح:

$$F_1 = \gamma_f \cdot \mathrm{V}_b = \gamma_f \left(\frac{\pi}{6} \cdot D^3 \right)$$

حيث إنَّ:

γ_f : الوزن النوعي للسائل.

V_b : حجم الكرة:

D : قطر الكرة.

3. تعطى قوة المقاومة على جسم كروي يتحرك ضمن سائل لزج بسرعة قليلة بالعلاقة التالية:

$$F_2 = 3\pi\mu \cdot \mathrm{v} \cdot D$$

μ : اللزوجة المطلقة عند درجة حرارة القياس.

v : السرعة الحدية للكرة.

D : قطر الكرة.

بالتعويض في المعادلة الأساسية، ينتج:

$$\gamma_b\left(\frac{\pi}{6}\cdot D^3\right)-\gamma_f\left(\frac{\pi}{6}\cdot D^3\right)-3\pi\mu\cdot \mathrm{v}\cdot D=0$$

تحدد السرعة (v) بقياس الزمن (t) اللازم لكي تقطع الكرة مسافة (L) محددة على الجهاز بسرعة حدية (*Terminal*) ويكون:

$$\mathrm{v}=\frac{L}{t}$$

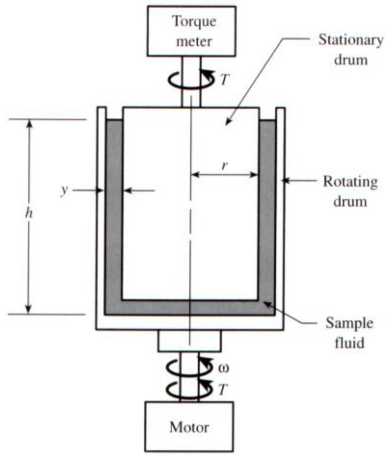
وبالتالي ينتج:

$$\mu=\frac{(\gamma_b-\gamma_f)D^2\cdot t}{18L}$$

وعندما يتم تقدير (γ_b) و(γ_f) بواحدة (N/m^3) و(D) بـ (m) و(t) بـ (sec) و(L) بـ (m) عندئذٍ تكون واحدة قياس اللزوجة هي ($pa\cdot s$)

- **جهاز اللزوجة الدوّار** (*Rotating Viscometer*):

يتألف هذا الجهاز من وعاء دوّار (*Rotating Drum*) يُحرك بواسطة محرك كهربائي بسرعة (ω) وبداخله إسطوانة مصمتة (*Stationary Drum*) نصف قطرها (r) ثابتة ومرتبطة مع مؤشر العزم (*Torque Meter*) ويملأ الفراغ بين الإسطوانتين بالسائل المراد قياس لزوجته. فعند دوران الإسطوانة الدوّارة بسرعة (ω) فإن السائل الملامس لها يدور بنفس السرعة في حين تكون سرعته عند جدار الإسطوانة الداخلية مساوية للصفر وهذا مايوَّلد إجهادات قص (τ) داخل السائل والتي بدورها تؤدي إلى خلق قوة (F) على سطح الإسطوانة الداخلية وتحركها بحيث يؤشر مؤشر العزم (T) المربوط بها على ذلك مما يدل على قياس اللزوجة المطلقة (μ) للسائل.



الشكل (1.8)، الرسم التخطيطي لجهاز اللزوجة الدوّار.

$\tau = \frac{F}{A}$ هو عبارة عن إجهادات القص (*Shear Stress*) التي تؤثر على السطح الملامسة له باتجاه مخالف لاتجاه السرعة المؤثرة (الإسطوانة الدوّارة)، ويعبر ميل منحني السرعة بين الإسطوانتين بتدرج السرعة (*Velocity Gradient*) وباعتبار أن سرعة السائل بين الصفيحتين (v) وسماكة السائل (y) عندئذ تعطى اللزوجة على أنها النسبة بين إجهادات القص إلى تدرج السرعة، أي:

$$\eta = \frac{Shear\ Stress}{Velocity\ Gradient} = \frac{\tau}{\mathrm{v}/y}$$

وبما أن العزم يساوي إلى جداء القوة (F) بنصف القطر (r)، يكون:

$$F = \frac{\mathrm{T}}{r} \Rightarrow \tau = \frac{F}{A} = \frac{\mathrm{T}}{r \times A}$$

حيث إنَّ A المساحة الجانبية للإسطوانة الثابتة.

$$A = 2\pi r h$$

حيث إنَّ:

r : نصف قطر الإسطوانة الثابتة.

h : ارتفاع عينة السائل في المقياس.

عندئذٍ يكون:

$$\tau = \frac{\mathrm{T}}{2\pi r^2 h}$$

ومن المعروف في الفيزياء أن السرعة الزاوية في أي نقطة من سطح الإسطوانة الدوّارة تعطى بالعلاقة التالية:

$$\mathrm{v} = (r + y) \cdot \omega$$

أو

$$\mathrm{v} \cong r \times \cdot \omega$$

حيث إنَّ:

y : صغيرة قياساً بنصف القطر (r).

ω : السرعة الزاوية، (rad/s).

ومنه يكون:

$$\mu = \frac{\mathrm{T} \cdot y}{2\pi r^3 h \cdot \omega}$$

وبما أن كافة البارامترات في الطرف الأيمن من المعادلة معلومة فإم مؤشر العزم (T) يدل مباشرة على اللزوجة المطلقة بالواحدات التالية:

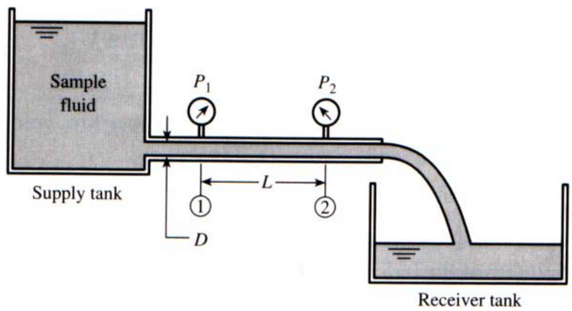
Parameter	*U.S.Customary Units*	*SI Units*
μ	$lb \cdot s / ft^2$	$N \cdot s / mt^2$
T	$lb \cdot ft$	$N \cdot ft$
y	ft	m
r	ft	m
h	ft	m
ω	rad/s	rad/s

يمثل الشكل (1.9) جهاز قياس اللزوجة الدوّار مع ملاحظة أن الإسطوانة الدوارة هي الإسطوانة الداخلية وتدعى بالمغزل (*Spindle*) والخارجية هي الثابته. ويزود كل جهاز بعدد من المغازل بهدف تغطية كافة مجالات اللزوجة.

الشكل (1.9)، يوّضح الشكل العام لمقياس اللزوجة الدوّار.

- **مقياس اللزوجة ذو الأنبوب الشعري** (*Capillary Tube Viscometer*):

يبين الشكل (1.10) أنبوب ذو قطر صغير يدعى بالأنبوب الشعري مرتبط إلى خزان تغذية ممتلئ بالسائل المراد قياس لزوجته.



الشكل (1.10)، مقياس اللزوجة ذو الأنبوب الشعري.

ففي الجريان الخطي فإن السائل يتحرك على شكل صفيحات وتصفه معادلة هاجن–بوازيل (*Hagen-Poiseuille*) التالية:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8 \cdot L \cdot \mu} \Delta p \Rightarrow \Delta p = \frac{8 \cdot L \cdot \mu}{\pi R^4} Q$$

وبما أنَّ:

$$Q = \mathrm{v} \cdot \mathrm{A} = \mathrm{v} \cdot \pi R^2$$

وبالتعويض، تأخذ معادلة بوازيل الشكل التالي:

$$\Delta p=\frac{8\cdot L\cdot \text{v}\cdot \mu}{R^2}=\frac{8\cdot L\cdot \text{v}\cdot \mu}{(D/2)^2}=\frac{32\cdot L\cdot \text{v}\cdot \mu}{D^2}$$

حيث إنَّ:

v : سرعة السائل في الأنبوبة، (m/s).

L : المسافة بين نقطتي القياس (1) و(2)، (m).

D : القطر الداخلي للأنبوب، (m).

μ : اللزوجة المطلقة عند درجة حرارة القياس، $(pa\cdot s)$.

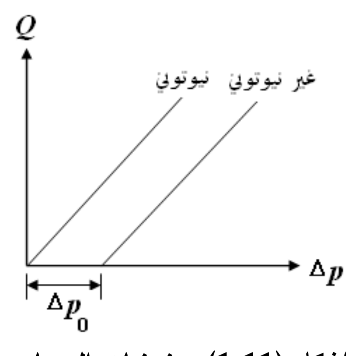
$\Delta p = p_2 - p_1$: هبوط الضغط بين المقطعين (1) و(2)، (pa).

يقاس كلٌّ من الضغط والسرع بواسطة مقياس الضغط ومقياس التدفق على التوالي وبقياس هاتين القيمتين ومعرفة كلٍ من قيم قطر الأنبوب وطول مسافة القياس يمكن تحديد لزوجة السائل من المعادلة:

$$\mu==\frac{\Delta p\cdot D^2}{32\cdot L\cdot \text{v}}$$

- **منحنيات الجريان:**

عند حساب لزوجة السوائل غير النيوتونية يفضل استخدام الطريقة البيانية التي تعتمد على إنشاء منحنيات الجريان $Q=f(\Delta p)$ للسائل وذلك باستخدام أنبوبة قياسية تتوضع بشكل أفقي ورصد فرق الضغط بين نقطتي قياس البعد بينهما (L)، وتؤخذ على الأقل ثلاث نقط تعبر عن تغير الغزارة مع فرق الضغط. عند رسم النتائج على إحداثيات $(Q-\Delta p)$ نستطيع تحديد هوية النفط.



الشكل (1.11)، منحنيات الجريان.

فإذا انطلق منحني الجريان من المبدأ فهذا يعني أن النفط نيوتوني وأن السائل يتحرك فور تطبيق أدنى فرق ضغط طبقاً للمعادلة:

$$\tau = \mu \frac{du}{dn} \qquad (1.14)$$

أو طبقاً لمعادلة بوازيل التالية التي تمثل جريان السوائل في النظام الصفحي:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8 \cdot L \cdot \mu} \Delta p \qquad (1.15)$$

ومن المعادلة السابقة وبمعرفة قيمة نقطة معينة ($Q - \Delta p$) يمكن حساب لزوجة النفط النيوتوني.

أما في حالة النفط غير النيوتوني فإنه يحتاج إلى بذل قوة ضغط معينة (فرق الضغط الأولي) (Δp_0) حتى يبدأ السائل بالحركة وهو بالتالي يحقق معادلة بنغهام التالية:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8 \cdot L \cdot \mu} (\Delta p - \frac{4}{3} \Delta p_0) \qquad (1.16)$$

أو وفقاً للمعادلة التالية:

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dn} \qquad (1.17)$$

Q : الغزارة، (m^3 / s).

R : نصف قطر الأنبوبة، (m).

L : طول الأنبوبة مابين نقطتي القياس، (m).

μ : اللزوجة التحريكية للسائل، ($pa \cdot s$).

Δp_0 : فرق الضغط الأولي اللازم للقضاء على إجهاد القص الأولي (τ_0)، (pa).

$\Delta p = p_1 - p_2$: فرق الضغط بين نقطتي القياس (1) و(2)، (pa).

وبناءً عليه ومن معادلة بنغهام وبمعرفة قيمة نقطة معينة ($Q - \Delta p$) يمكن حساب لزوجة النفط غير النيوتوني.

ويلاحظ أنه عندما تكون ($\Delta p_0 = 0$) تعود المعادلة (1.16) إلى معادلة بوازيل للسوائل النيوتونية، كما يلاحظ أنه عندما يكون ($du = 0$) يكون ($\tau = \tau_0$) أي أن للسائل الساكن إجهادات مماسية حتى في أثناء السكون.

الشكل (1.12).

تكتب معادلة توازن القوى في الأنبوبة التي تتأثر بقوتين متعاكستين في الاتجاه على النحو التالي:

1. قوة الضغط وهي عبارة عن جداء فرق الضغط في مقطع الأنبوب (مقطع التيار):

$$F_1 = \Delta p \cdot S = \pi r^2 \cdot \Delta p$$

2. قوة الإجهادات المماسية وهي تؤثر على محيط التيار وتغطي كامل طول الأنبوبة أي تؤثر على المساحة الخارجية للتيار (إسطوانة التيار):

$$F_2 = \tau \cdot 2\pi r L$$

حتى يتحقق التوازن يجب أن يكون:

$$F_1 = F_2$$

$$\pi r^2 \cdot \Delta p = \tau \cdot 2\pi r L$$

ومنه يمكن حساب (Δp):

$$\Delta p = \frac{\tau \cdot 2\pi rL}{\pi r^2} = \frac{\tau \cdot 2L}{r} \Rightarrow \tau = \frac{\Delta p \cdot r}{2L}$$

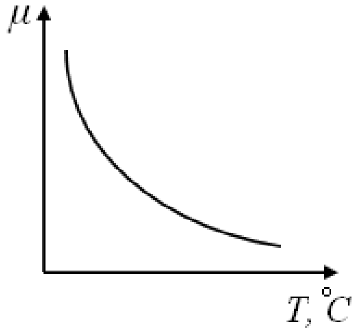
وبالقيم الأولية يكون:

$$\tau_0 = \frac{\Delta p_0 \cdot r}{2L}$$

$$Q = \frac{\pi R^4}{8 \cdot L \cdot \mu} \Delta p \qquad (1.18)$$

وهي معادلة بوازيل للسوائل النيوتونية.

إن علاقة لزوجة السوائل بالحرارة هي علاقة عكسية فمع ازدياد درجة الحرارة تتناقص اللزوجة كما هو موضح في الشكل (1.13)، في حين أن للضغط تأثيراً صغيراً جداً على اللزوجة بحيث يمكن إهمال هذا التأثير.



الشكل (1.13)، علاقة اللزوجة بدرجة الحرارة.

وكثيراً مايتطلب العمل في الصناعة حساب لزوجة السائل (النفط مثلاً) بدرجات حرارة مختلفة، لهذا فقد اقترحت أكثر من معادلة بهذا الشأن نذكر من أهمها:

- معادلة رينولدز–ڤيلونوڤا:

$$\upsilon_t = \upsilon_* \cdot e^{-u(t-t_*)} \tag{1.19}$$

υ_t: اللزوجة المراد قياسها عند الدرجة (t).

υ_*: اللزوجة عند الدرجة (t_*) وتكون معلومة عادة.

u: عامل انحناء منحني اللزوجة بالنسبة للحرارة، $(1/{}^\circ C)$. ويحسب بالنسبة لدرجتي حرارة t_1 و t_2 وذلك حسب المعادلة التالية:

$$u = \frac{\ln \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}}{t_2 - t_1} \tag{1.20}$$

حيث υ_2, υ_1 لزوجة السائل عند درجتي الحرارة t_1 و t_2. كما يمكن تعيين لزوجة بعض السوائل محددة المواصفات عند درجات الحرارة المختلفة باستخدام مخططات بيانية خاصة.

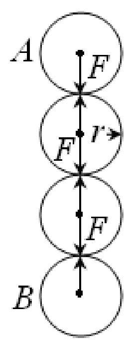
ونورد في الجدول (1.5) قيم اللزوجة التحريكية والحركية لبعض السوائل.

المادة	معامل اللزوجة	
	التحريكية $(\mu \cdot 10^{-3}, pa \cdot s)$	الحركية $(\upsilon \cdot 10^{-6}, m^2/s)$
مياه عذبة (عند $T = 20\ ^{\circ}C$)	1,002	1,003
مياه مالحة (عند $T = 20\ ^{\circ}C$)	1,03	1,01
كيروسين (عند $T = 15\ ^{\circ}C$)	1,6-2,5	2-3
بنزين (عند $T = 15\ ^{\circ}C$)	0,6-0,65	0,83-0,93
نفط (عند $T = 20\ ^{\circ}C$)	8,5-40	10-50
زئبق	1,5	0,111

الجدول (1.5)، معاملات اللزوجة التحريكية والحركية للسوائل.

1.2.5- التوتر السطحي (*surface Tension*):

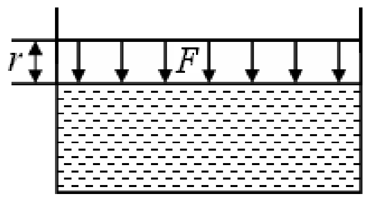
يتألف السائل من مجموعة من الجزيئات (*Molecules*) المتجاذبة فيما بينها بقوى معينة ولتكن (F) والتي تدعى بقوى التجاذب الجزيئي أو بقوى الترابط الذرية (*Molecular Cohesive forces*).



الشكل (1.19).

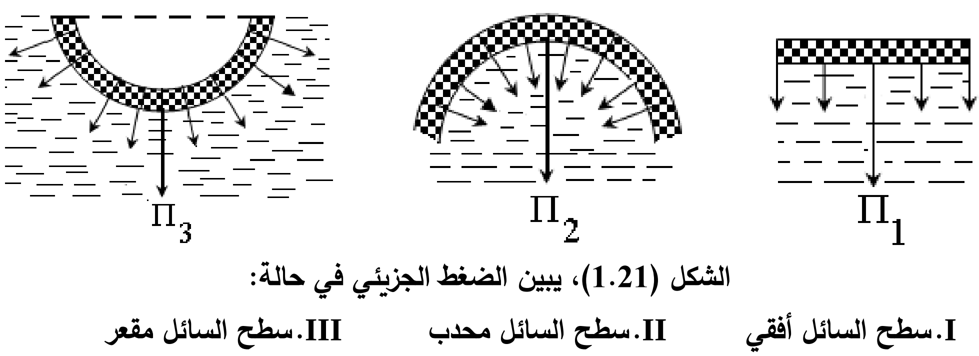
نفرض كما في الشكل (1.19) مجموعة من الجزيئات السائلية التي تؤثر كل منها على الجزيئات المجاورة بالقوة (F) وذلك ضمن مجال تأثير نصف قطره (r). وكما هو ملاحظ فإن جميع الجزيئات عدا الجزيئات العلوية (A) التي تقع على سطح السائل

والسفلية (B) التي تقع عند القعر تقع في حالة توازن (*Equilibrium*) ويعود السبب في ذلك إلى أن قوى الترابط الذرية المؤثرة على هذه الجزيئات تفني بعضها البعض في كافة الجهات. أما فيما يخص الجزيئات الواقعة على الأطراف (العلوية مثلاً) فإنها تكون دائماً في حالة شد إلى داخل السائل الأمر الذي يقود إلى النتيجة التالية: "إن السائل يحتفظ بأقل عدد من الجزيئات السائلية على السطح وبأصغر مساحة ممكنة وهذا مايفسر سقوط حبات المطر وتطاير فقاعات الصابون بشكل كرات، حيث أن سطحها يسعى دائماً لأن يكون أصغرياً. وبناء عليه فإن مجموع الجزيئات السائلية العلوية تشكل على سطح السائل طبقة رقيقة سماكتها (r) تضغط السائل من الأعلى بقوة مقدارها (F) وتشكل الضغط الجزيئي. لاحظ الشكل (1.20).



الشكل (1.20)، الضغط الجزيئي.

حيث إنَّ r يمثل نصف قطر مجال تأثير قوى الترابط (المسافة بين مركز الجزيء حتى المسافة التي تكون عندها قوى التجاذب ضعيفة جداً)، وبشكل عام فإن r تأخذ قيماً صغيرة جداً.



الشكل (1.21)، يبين الضغط الجزيئي في حالة:

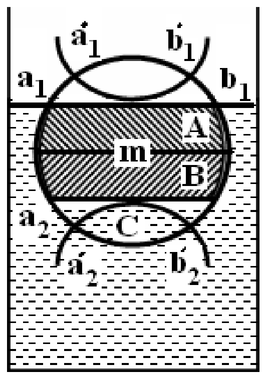
I.سطح السائل أفقي II.سطح السائل محدب III.سطح السائل مقعر

ومن المهم جداً الانتباه إلى الحالات التالية:

1) إن الضغط الجزيئي (Π) في حالة السطح الأفقي I أقل منه في حالة السطح المحدب II وأكبر منه في حالة السطح المقعر III، أي:

$$\Pi_2 > \Pi_1 > \Pi_3$$

2) ندرس وضع الجزيئة السائلية (m)-لاحظ الشكل (1.22) الواقعة بالقرب من السطح الحر للسائل (a_1b_1) حيث تخضع لقوى جذب الجزيئات المجاورة الواقعة ضمن مجال التأثير الذي نصف قطره (r)، ويهمل تجاذب الجزيئات السائلية مع الهواء.



الشكل (1.22).

وكما هو موضح في الشكل فإن قوى التجاذب الجزيئي في المنطقة (A) تتساوى مع القوى في المنطقة (B) وبالتالي فإن هذه القوى تفني بعضها بعضاً وتبقى الجزيئة (m) خاضعة لقوى جذب الجزيئات السائلية الواقعة في المنطقة (C) والمحددة أسفل المستوى (a_2b_2) في حالة سطح السائل الأفقي (a_1b_1) أو المحددة أسفل المنحني ($a'_2b'_2$) في حالة الشكل المقعر لسطح السائل ($a'_1b'_1$)، وطالما أن المساحة (C) تكون دائماً عندما تحدد من الأعلى بالخط الأفقي (a_2b_2)- أي عندما يكون سطح السائل الحر أفقياً- أكبر من الحالة التي تحدد فيها (C) من الأعلى بالخط المنحني ($a'_2b'_2$) وهذا يعني أن:

$$\Pi_1 > \Pi_3$$

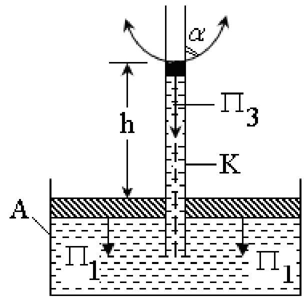
وبشكل مماثل يمكن البرهان أيضاً بأن:

$$\Pi_2 > \Pi_1$$

وهذا يعني أن الضغط الجزيئي يكون أعظمياً دائماً في حالة كون سطح السائل محدباً وأصغرياً عندما يكون مقعراً.

ومن الجدير بالذكر أن الضغط الجزيئي مهما كبر فهو صغير جداً ومن الصعب قياسه بالأجهزة العادية وعند التحدث عن الضغط داخل السائل أو الضغط على جدار فإننا سوف نعتبر أن الضغط الجزيئي مهمل باستثناء موضوع الأنابيب الشعرية حيث لايجوز إهماله.

1.2.6- الخاصة الشعرية (*Capillary Effects*):

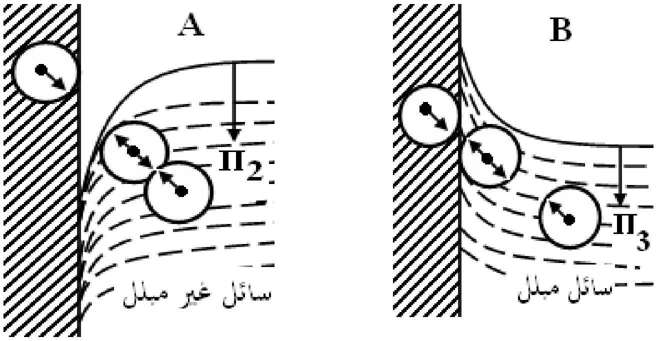


الشكل (1.23)، الخاصة الشعرية.

نبين في الشكل (1.23) وعاء مملوء بالسائل وقد غمست فيه أنبوبة شعرية فعند تلامس السائل مع جدار الأنبوبة يمكن أن تحصل إحدى الحالتين التاليتين (كما هو واضح في الشكل (1.24)):

1. إذا كانت قوى تجاذب الجزيئات السائلية فيما بينها أكبر من قوى تجاذب الجزيئات السائلية مع الجزيئات المعدنية للجدار، نحصل على الحالة (A) وهي حالة سائل غير مبلل.

2. أما عندما تكون قوى تجاذب الجزيئات السائلية مع الجزيئات المعدنية للجدار أكبر من قوى تجاذب الجزيئات السائلية فيما بينها، نحصل على الحالة (B) وهي حالة سائل مبلل.



الشكل (1.24)، يبين حالات التبلل.

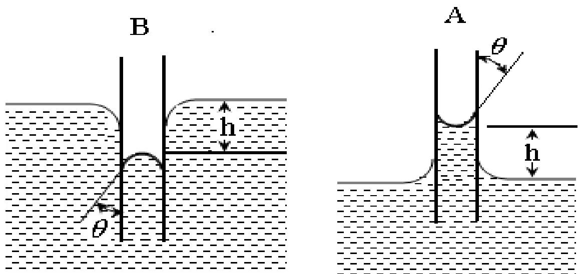
ومع الأخذ بعين الاعتبار الضغط الجزيئي (Π_1) المتولد بفعل قوى تجاذب جزيئات القشرة السطحية للسائل باتجاه الداخل، فإنه عند تلامس السائل مع الأنبوب وخاصة عندما يكون قطر الأنبوب صغيراً جداً فإن سطح السائل الملامس للجدار يعود للحالة (A) في الشكل (1.24) إذا كان السائل غير مبلل، وهذا يعني أن الضغط الجزيئي في هذه الحالة يكافئ الضغط الجزيئي في حالة السطح المحدب (الشكل (1.21) الحالة II)، ويكون عندئذ:

$$\Pi_2 > \Pi_1$$

أما في حالة السائل المبلل فإن سطح السائل داخل الأنبوبة يكون مقعراً نحو الأسفل وبالتالي:

$$\Pi_1 > \Pi_3$$

وعليه فبحسب الفرق بين الضغوط الجزيئية على سطح السائل وفي مقطع تلامس السائل مع الأنبوب، فإما أن يرتفع السائل داخل الأنبوبة الشعرية بفعل فرق الضغط الجزيئي ($\Pi_1 - \Pi_3$) وذلك عندما يكون السائل مبللاً (انظر الشكل (1.25.A)) أو ينخفض في الأنبوبة بفعل فرق الضغط الجزيئي ($\Pi_1 - \Pi_2$) عندما يكون السائل غير مبلل (الشكل (1.25.B)).



الشكل (1.25).

إن المركبات المماسية لقوى الترابط الذرية الموازية للسطح الخارجي للسائل تجعله في حالة شد يطلق عليه اسم التوتر السطحي ويكون بالتعريف: "التوتر السطحي (σ_o) يمثل قوة الشد (F) الموازية للسطح الخارجي للسائل بالنسبة لكل واحدة طول من الخط المحدد لهذا السطح والتي يجب القيام بعمل من أجل التغلب عليها أثناء تكبيره".

$$\sigma_o = \frac{dF}{dS} = const \quad (dF - dS) \tag{1.46}$$

وواحدة قياسه:

$$[\sigma_o] = \left[\frac{F}{S}\right] = N \cdot m^{-1} = \frac{1}{9{,}81}\frac{Kp}{m}$$

إن قيمة σ_o تبقى ثابته في كل نقطة من السطح الخارجي الحر للسائل المعتبر ولايتغير مع تغير السطح، وهي تتعلق بدرجة الحرارة.

أما قيمة الارتفاع أو الانخفاض (h) في الأنبوبة التي قطرها ($d = 2r$) للسائل الذي وزنه النوعي (γ) فتنتج من مساواة قوة الرفع الناشئة عن التوتر السطحي مع قوة الجاذبية الأرضية، وينتج:

$$h = \frac{2\sigma_o \cos\theta}{\gamma \cdot r} \tag{1.47}$$

ويمكن باستخدام هذه المعادلة حساب الارتفاع أو الانخفاض الشعري التقريبي في الأنبوبة، فإذا كانت الأنبوبة نظيفة فإن ($\theta = 0^\circ$) للماء وحوالي ($\theta = 140^\circ$) للزئبق.

ومن الجدير بالذكر أن ارتفاع السائل (h) لايتغير في حالة تمييل الأنبوبة كون (h) يمثل الارتفاع الشاقولي.

ونورد في الجدول (1.10) قيم التوتر السطحي لبعض السوائل عند درجة الحرارة $(T = 20\,^{\circ}C)$.

المائعان المتتاخمان	$\sigma_o \cdot 10^3 \left[Kp \cdot m^{-1}\right]$	$\sigma_o \cdot 10^3 \left[N \cdot m^{-1}\right]$
ماء/هواء	7,4	72,5
زيت/هواء	2,54 – 3,06	25 – 30
زئبق/هواء	48,2	472
كحول/هواء	2,6	25,5
ماء/كيروسين	4,9	48
زئبق/ماء	38,2	375

الجدول (1.10).