القسم الأول

# كيمياء السطوح


*الفصل الأول: التوتر السطحي للسوائل*

*الفصل الثاني: عمليات الامتزاز*

*الفصل الثالث: أيسوثرمات الامتزاز*

*الفصل الرابع: الامتزاز على الأسطح الحرة للسوائل*


obeikandl.com

obeikandl.com

## الفصل الأول

# *التوتر السطحى للسوائل*

- ظاهرة التوتر السطحى
- تعريف التوتر السطحى
- حساب قوى التوتر السطحى
- وحدات التوتر السطحى
- تأثير درجة الحرارة على التوتر السطحى
- قوى التماسك والتلاصق وحدوث البلل
- خاصية الأنبوبة الشعرية
- قياس التوتر السطحى لسائل

أولا: طريقة ارتفاع السائل فى الأنبوبة الشعرية

- خطوات التجربة
- طريقة الحسابات
- التوتر السطحى لسائل موجود مع بخاره
- أمثلة محلولة

ثانيا: طريقة وزن النقطة

- خطوات التجربة
- طريقة الحسابات
- التوتر بين السطحى (التوتر السطحى البينى)
- ظواهر مرتبطة بالتوتر السطحى
- التوتر السطحى ودرجة الحرارة
  1- معادلة إوتفوس
  2- معادلة رامساى شيلدز
  3- معادلة كاتاياما
  4- معادلة ماكلويد
- أسئلة ومسائل عامة

obeikandl.com

obeikandl.com

## ظاهرة التوتر السطحى

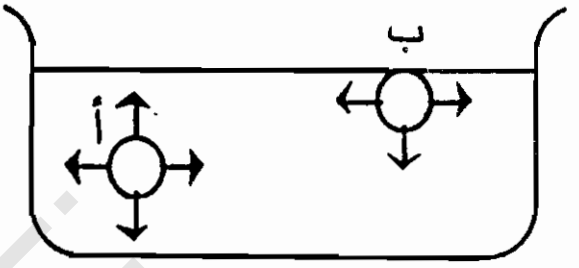
تعد خاصية التوتر السطحى من أهم الظواهر السطحية والتى لـــها تطبيقـات متعددة. فجميع السوائل تقاوم تمدد سطوحها فالقطرة الصغيرة من ســائل تميـل إلـى التشكل بالشكل الكروى؛ لأن نسبة مساحة السطح إلى الحجم فى الكرة أقل منها فـى أى شكل هندسى آخر، فنجد أن مساحة سطح مكعب حجمه (1) سم تساوى (6) سم، بينمـا مساحة سطح كرة لها نفس الحجم تساوى (4.56) سم. وفى بعـض الحـالات تكـون مقاومة التمدد كبيرة لدرجة أن أشياء كثيفة لا تستطيع اختراق السائل ولكنها تطفو على سطحه. فمن الممكن أن تطفوا أبرة صلب نظيفة أو شاشة معدنية على سطح الماء النقى إذا وضعت بعناية على السطح.

ويمكن تفسير مقاومة سطح السائل للتمدد بأنـــها ناتجـة عـن أن الجزيئـات الموجودة عند السطح تتعرض لقوى غير متماثلة بين الجزيئـات بخـلاف الجزيئـات الموجودة فى داخل السائل، فإنها تتعرض لقوى متماثلة (متوازنة).

ولكى نتفهم ظاهرة التوتر السطحى، نفترض أنه لدينا سائل موضوع فى إنـاء كما هو موضح بالشكل (1-1)، حيث يكون الجزئ (A)؛ والموجود فى وسط الســائل، محاط بواسطة جزيئات السائل الأخرى فى جميع الاتجاهات؛ أى إنه يكون منجذبا فـى جميع الاتجاهات بالتساوى بواسطة الجزيئات المجاورة. ولكـــن بالنسـبة للجزيئـات الموجودة عند السطح، ومنها الجزئ (B)، فإنها تكون واقعة تحت تأثير قوى تجـاذب فقط نحو داخل السائل. فنجد أن قوى الجذب الواقعة على الجزئ (B) من الجزيئـــات المحيطة به يمينا ويسارا، وإلى الأمام والخلف متساوية، ولكن لا يوجد ما يجذب هـــذا الجزئ إلى أعلى. ولهذا، فإن قوى الجذب الواقعة عليه من الجزيئات التى تقع أســفله لا تجد ما يعادلها من الناحية الأعلى.

وتكون النتيجة انجذاب تلك الجزيئات الموجودة عند السطح إلى الداخل. ونتيجة لتعرض الجزيئات السطحية لكى تتجذب نحو الداخل، فإن المساحة الســطحية للســائل

تميل إلى أن تتقص (تقل) حتى الحد الأدنى، مما يؤدى إلى انكماش سطح السائل إلى أقل مساحة ممكنة.




**شكل (1-1): جزئ السائل فى وسط الإناء وعلى سطح السائل (حدوث توتر السطح).**

ويمكن مشاهدة ذلك عند إسقاط قطرة من الماء- مثلا- من قطارة، حيث أن قطرة الماء تكون على هيئة كرة بسبب هذه الظاهرة؛ لأن سطح الكرة هو أقل مساحة بالنسبة لأى حجم من الحجوم.

## تعريف التوتر السطحى

ويترتب على ذلك، أنه لزيادة سطح السائل؛ أى زيادة مساحته، ضد قوى الجذب السابقة لابد من بذل قدر من الطاقة؛ والتى تعرف بـ "التوتر السطحى" للسائل.

ويعد التوتر السطحى مقياسا لتلك القوى الواقعة على سطح السائل والمتجهة نحو داخل السائل؛ وهى تلك القوة التى يلزم التغلب عليها لكى يتمدد سطح السائل.

ويعرف التوتر السطحى لسائل بأنه: "تلك القوة بالداين التى تؤثر بزاوية عمودية على خط طوله 1 سم من سطح السائل".

## حساب قوى التوتر السطحى

نظرا لأن أى سائل لديه القدرة على إنقاص مساحة سطحه، فإنه يلزم عمل شغل ضد ذلك السحب نحو الداخل، بحيث يعمل الشغل بطريقة عكسية للتوتر، مما يعيد الجزيئات إلى السطح مرة أخرى، بحيث تزيد مساحة السطح.

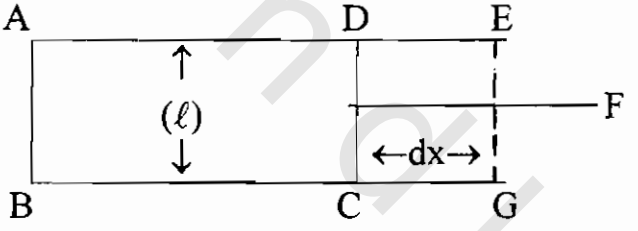
ولكى نتمكن من التوصل إلى تعبير لهذا الشغل، نفرض أنه لدينا غشـــاء مـــن سائل ممطوط على إطار من سلك على هيئة مســـتطيل، وبفـــرض أن أحـــد جوانـــب المستطيل قابلا للتحرك (شكل 1-2) وبفرض أن القوة المؤثرة عموديا علـــى الجـــانب المتحرك يرمز لها بالرمز "F"، بحيث تحركه ضد قوى التوتر السطحى. فإذا تحـــرك هذا الجانب مسافة (dx)، فإن الشغل المبذول (W) يعطى بالعلاقة التالية:

$$W = Fdx \qquad (1\text{-}1)$$

والزيادة الناتجة فى المساحة السطحية ($\Delta A$) للغشاء تعطى بالعلاقة:

$$\Delta A = 2(\ell . dx) \qquad (1\text{-}2)$$

حيث $\ell$ : طول الجانب المتحرك، مع ملاحظة وضع المعامل (2)، نظرا لوجود غشائين على جانبى الإطار.




**شكل (1-2): تجربة توضح كيفية حساب قوة التوتر السطحى.**

وحيث أن القوة "F": المؤثرة تضاد قوى التوتر السطحى ($\gamma$) المؤثرة علـــى الغشاء، فإن

$$F = \gamma . 2\ell \qquad (1\text{-}3)$$

$$\gamma = \frac{F}{2\ell} = \frac{\text{Force}}{\text{unit length}} \qquad (1\text{-}4)$$

وبالتعويض عن قيمة "F" من المعادلة (3) فى المعادلة (1)، فإننا نحصل على العلاقة التالية:

$$W = \gamma \cdot 2\ell \cdot dx \qquad (1\text{-}5)$$

$$\therefore \quad W = \gamma \, \Delta A \qquad (1\text{-}6)$$

أو

$$\gamma = \frac{W}{\Delta A} = \frac{Work}{area} \qquad (1\text{-}7)$$

وكما هو واضح من المعادلة (3)، يعرف التوتر السطحى بأنه: "تلك القوة بالداين التى تؤثر على وحدة الأطوال من سطح السائل".

وكذلك، فإنه من المعادلة (7)، يمكن أن يعرف التوتر السطحى بأنه: "الشغل بالإرج اللازم لإحداث زيادة فى مساحة سطح السائل قدرها وحدة المساحات".

أى إنه الشغل اللازم لدفع جزيئات السائل بعيدا ناحية السطح ضد قوى الجذب الداخلية. ولذلك يشار إليها أيضا بـ "الطاقة الحرة لسطح السائل" لكل سم$^2$ من المساحة.

**وحدات التوتر السطحى**

ومن خلال هذين التعريفين، نجد أن وحدات التوتر السطحى هى dyne/cm (داين/سم) فى حالة تعريف التوتر السطحى بأنه القوة. أو هى (erg/cm$^2$) (إرج/سم$^2$) فى حالة تعريف التوتر السطحى بأنه الشغل.

**تأثير درجة الحرارة على التوتر السطحى**

يقل التوتر السطحى لسائل بزيادة درجة الحرارة، حيث أن قوى التجاذب الداخلية للجزيئات تقل، مما يؤدى إلى تحرر الجزيئات.

ويمكن تفسير ذلك، بأنه عند رفع درجة حرارة سائل ما، فإن الطاقة الحركية لجزيئات السائل تزداد، مما يجعلها قادرة على أن تتغلب على قوى التجاذب الواقعة بينها، حيث تبدأ فى الابتعاد بعضها عن بعض مما يؤدى إلى تمدد السائل.

وتعتمد القوى المؤثرة على جزيئات سطح السائل، والتى تجذب هذه الجزيئات إلى الداخل، على عدد جزيئات السائل فى وحدة الحجوم. ونظرا لتمدد السائل بالحرارة،

يقل عدد الجزيئات التى تشغل وحدة الحجوم. وبذلك تقل قوى الجذب الناتجة من هـــذه الجزيئات، ويقل معها التوتر السطحى للسائل بارتفاع درجة الحرارة.

ويوضح الجدول (1-1)، قيم التوتر السطحى لبعض الســوائل عنــد درجــات الحرارة المختلفة، والتى يتضح منها انخفاض التوتر السطحى للسوائل بزيادة درجـــات الحرارة.

**جدول (1-1): قيم التوتر السطحى لبعض السوائل عند درجات الحرارة المختلفة.**

| التوتر السطحى / السائل | $\gamma \cdot 10^{-3}$ (Dynes/cm) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0°C | 25°C | 50°C | 75°C |
| بنزين | 31.60 | 28.20 | 25.00 | 21.00 |
| كلورفورم | 29.00 | 26.10 | 23.10 | 20.20 |
| كحول إيثلى | 24.00 | 21.80 | 19.80 | --- |
| نتروفبرن | 46.40 | 43.20 | 40.20 | 37.30 |
| ماء | 75.64 | 71.19 | 67.91 | 63.50 |

**قوى التماسك والتلاصق وحدوث البلل**

عند وضع سائل على سطح صلب، فإنه تؤثر قوتان على سلوك هذا الســـائل، وهما: قوى التماسك وقوى التلاصق.

**قوى التماسك**

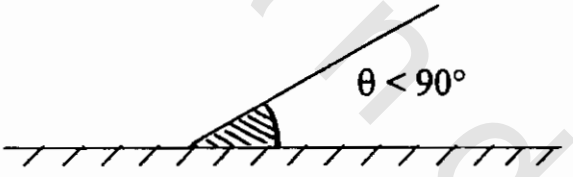
تعرف قوى التماسك بأنها:"تلك القوى التى تربط جزيئـــات الســائل بعضـــها ببعض". وهى تعتمد على قوى التجاذب المتبادلة بين جزيئات المادة الواحدة، وتكـــون هى المسئولة عن المظهر المتماسك للمادة؛ أى بمعنى إلـــى أى مـــدى تكـــون المـــادة متماسكة.

**قوى التلاصق**

وتعرف قوى التلاصق بأنها: "تلك القوى التى تربط جزيئات السائل بسطح الجسم الصلب". وهى تعتمد على التجاذب بين جزيئات مادة وجزيئات مادة أخرى، وتكون مسئولة عن مدى التلاصق بين المادتين.

**ظاهرة البلل**

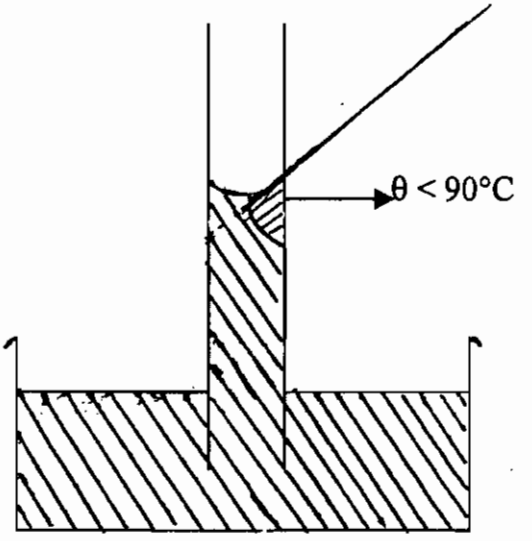
فعندما تكون قوى التلاصق أكبر من قوى التماسك، فإن السائل ينتشر على سطح الصلب، كما هو موضح بالشكل (1-3) وتكون زاوية التماس (θ) بين السائل وسطح الصلب أقل من (90) درجة. والسوائل التى تعطى هذه الظاهرة تنتشر على السطح الداخلى لأنبوبة زجاجية شعرية، ويتبلل سطح الصلب.



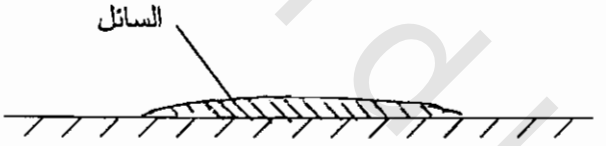

**شكل (1-3): زاوية التماس θ أقل من °90**

فإذا غمست أنبوبة شعرية مفتوحة الطرفين فى السائل، وحيث أن قوى التلاصق أكبر من قوى التماسك وزاوية التماس (θ) فى هذه الحالة أصغر من 90 درجة، نلاحظ ارتفاع مستوى السائل داخل الأنبوبة الشعرية عنه خارجها (حيث h تمثل مقدار ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية). كما هو موضح بالشكل (1-4).

أما إذا كانت زاوية التماس (θ) بين السائل والسطح الصلب تساوى الصفر، فإنه يحدث البلل الكامل، وينتشر السائل انتشارا تاما على السطح الصلب، كما هو موضح بالشكل (1-5).

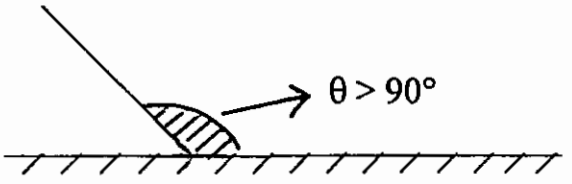



**شكل (1-4): يوضح ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية تحت تأثير قوى التوتر السطحي (حيث تكون قوى التلاصق أكبر من قوى التماسك).**

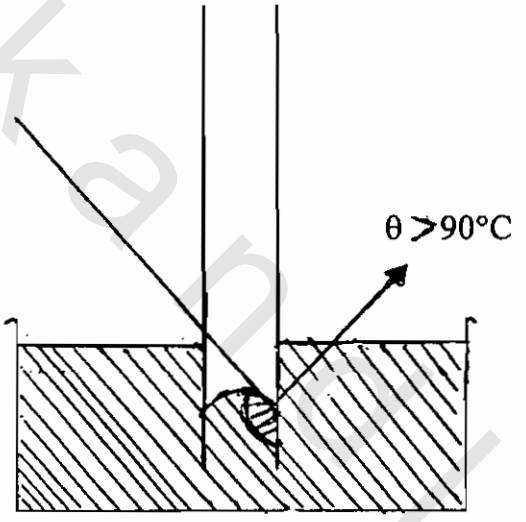



**شكل (1-5): زاوية التماس (θ) = صفر وحدوث (حدوث بلل كامل)**

أما إذا كانت قوى التماسك أكبر من قوى التلاصق، فإن السائل لاينتشر على سطح الصلب، كما هو موضح بالشكل (1-6)، وتكون زاوية التماس بين السائل وسطح الصلب أكبر من (90) درجة. ويكون مستوى مثل هذا السائل فى الأنبوبة الشعرية منخفضا عن مستواه خارج الأنبوبة الشعرية، كما هو موضح بالشكل (1-7)، حيث "h" تمثل مقدار انخفاض ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية. وفى هذه الحالة، فإن السوائل لاتبلل سطح الصلب.




**شكل (1-6): زاوية التماس θ أكبر من 90° (لايحدث البلل)**




**شكل (1-7): يوضح انخفاض السائل داخل الانبوبة الشعرية تحت تأثير قـــوى التوتر السطحي حيث لايحدث بلل (قوى التماسك أكبر مـــن قـــوى التلاصق).**

## خاصية الأنبوبة الشعرية

تلتصق جزيئات سائل كالماء بقوة مع سطح الصلب كالزجـــاج فتبللـــه (قـــوى التلاصق أكبر من قوى التماسك). وتكون النتيجة أنه إذا وضعت أنبوبة شعرية (دقيقـة) رأسيا (عموديا) فى إناء به ماء، فإنه سوف يتكون فيلم رقيق على السطح الداخلى

للأنبوبة. ومساحة هذا الفيلم الرقيق تكون كبيرة جدا بالنسبة لحجم السائل الداخلى فى الأنبوبة الشعرية. وحيث أن التوتر السطحى يميل إلى تقليل المساحة، فإنه إما أن تجذب الجزيئات المكونة للفيلم الرقيق إلى أسفل تحت تأثير قوى الجاذبية الأرضية، وهذا صعب جدا أن يحدث بسبب قوى التلاصق الكبيرة الناشئة بين جزيئات الماء وسطح الزجاج. وإما أن يرتفع الماء داخل الأنبوبة ليقلل من مساحة الفيلم الرقيق. وهذا أسهل وهو مايحدث بالفعل، أى ارتفاع السائل يتم تحت تأثير قوى التوتر السطحى.

ويستمر ارتفاع الماء داخل الأنبوبة الشعرية تحت تأثير قوى التوتر السطحى حتى يصل إلى ارتفاع معين تتساوى عنده قوى الشد إلى أسفل (قوى الجاذبية الأرضية) مع القوى التى تعمل لشد السائل لأعلى (قوى التوتر السطحى)، وعند هذه اللحظة يتوقف ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية.

**قياس التوتر السطحى لسائل**

توجد عدة طرق مختلفة بمكن استخدام أيا منها لقياس التوتر السطحى لسائل. وأهم هذه الطرق مايأتى:

1- طريقة ارتفاع السائل فى الأنبوبة الشعرية (Capillary rise method).

2- طريقة وزن النقطة (drop weight method).

3- طريقة الميزان الالتوائى (The torsion balance method).

4- طريقة ضغط الفقاعة (Pubble pressure).

5- باستخدام جهاز التنسيوميتر (Tensiometer).

وسوف نتناول بعض هذه الطرق بشئ من التفصيل:

**أولا: طريقة ارتفاع السائل فى الأنبوبة الشعرية**

**خطوات التجربة**

يتم تعيين التوتر السطحى لسائل بهذه الطريقة باتباع الخطوات التالية:

1- نحضر السائل المراد تعيين التوتر السطحى له ونضعه فى إناء (كثافة ذلك السائل "d" تكون معلومة).

2- نحضر أنبوبة شعرية مفتوحة الطرفين، ومعلومة نصف القطر (r)، ونغمسها من أحد طرفيها فى السائل.

3- نلاحظ ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية، ويستمر ارتفاع السائل داخل الأنبوبة تحت تأثير قوى التوتر السطحى، كما هو موضح بالشكل (1-8).

4- عند ارتفاع معين داخل الأنبوبة الشعرية، يتوقف ارتفاع السائل. وعند هذه النقطة يكون السائل واقع تحت تأثير قوتين متساويتين فى المقدار، ومتضادتين فى الاتجاه، وهما قوى التوتر السطحى، التى تدفع السائل لأعلى، وقوى الجاذبية الأرضية، التى تشد السائل لأسفل.

5- نقيس ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية، وليكن "h" سم.

**طريقة الحسابات**

عندما يتوقف ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية، فإن السائل يكون واقع تحت تأثير قوتين متساويتين فى المقدار ومتضادتين فى الاتجاه، وهما: قوى التوتر السطحى، وقوى الجاذبية الأرضية، حيث إن:

قوى التوتر السطحى $= 2\pi r \gamma \cos\theta$

قوى الجاذبية الأرضية $= \pi r^2 h d g$.

قوى الجاذبية الأرضية = قوى التوتر السطحى

$$2\pi r \gamma \cos\theta = \pi r^2 h d g$$

$$\gamma \cos\theta = \tfrac{1}{2} r h d g$$

وفى حالة ما إذا كانت السوائل تبلل السطح الزجاجى، فإنه يمكن اعتبار أن

$$\theta = 0$$

وبالتالى، فإن:

$$\cos \theta = \cos 0 = 1$$

وتؤول المعادلة السابقة إلى الصورة

$$\gamma = \frac{1}{2} r h d g$$

حيث $\gamma$ : التوتر السطحى لسائل

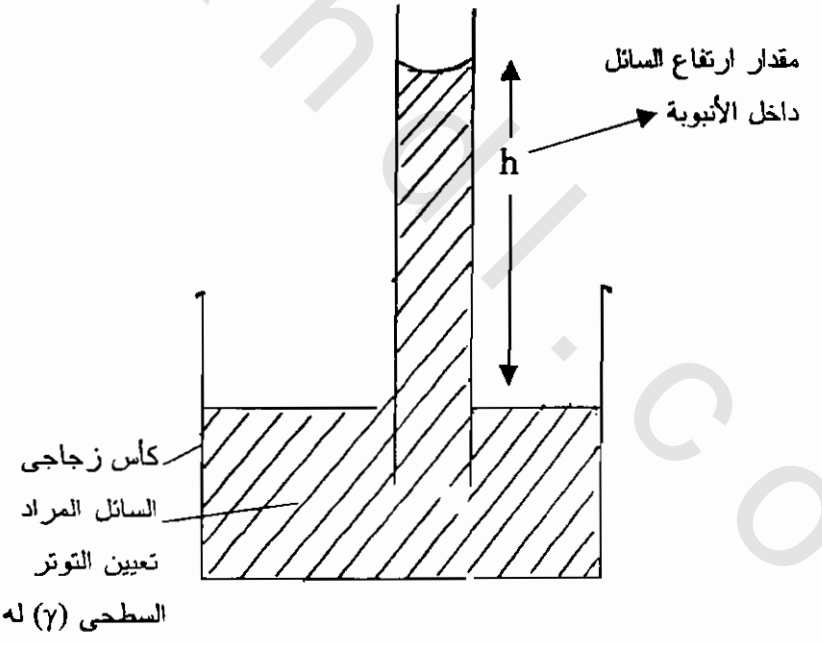
r : نصف قطر الأنبوبة الشعرية

h : ارتفاع السائل داخل الأنبوبة.

d : كثافة السائل.

g : عجلة الجاذبية الأرضية.

وهكذا، وبمعلومية قيمة "h" التى تم تعيينها من التجربة، يمكن التعويض فى المعادلة السابقة، حيث يمكن تعيين "$\gamma$" للسائل.




شكل (1-8): تجربة عملية لقياس التوتر السطحى لسائل عن طريق ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية.



obeikandl.com

**التوتر السطحي لسائل موجود مع بخاره**

فى حالة ما إذا كان السائل موجود وبخاره أيضا، فإنه عند قياس التوتر السطحي لذلك السائل، فإن المعادلة المستخدمة وهى:

$$\gamma = ½\ h\ d\ g\ r$$

تصبح غير دقيقة لحساب قيمة التوتر السطحي للسائل، وبالنسبه لحسابات دقيقة لقيمة التوتر السطحي، فإنه يلزم عمل التصحيحين التالين:

**أ- تصحيح بالنسبة لسطح السائل فى الأنبوبة الشعرية:**

فيصبح الارتفاع بدلا من h هو $(h + r/3)$

**ب- تصحيح بالنسبة لكثافة البخار المتجمع فوق السائل:**

فتكون كثافة السائل الفعلية هى كثافة السائل $d_L$ مطروحا منها كثافة بخار السائل $d_V$، حيث تصبح كثافة السائل الفعلية هى: $(d_L - d_V)$

وبإجراء هاتين التصحيحين فى المعادلة السابقة، نحصل على الصورة التالية:

$$\gamma = ½\ (h + \frac{r}{3})\ (d_L - d_V)\ r\ g$$

## أمثلة محلولة

(1) إذا كان نصف قطر أنبوبة شعرية هو (0.0335) سم، وعند غمسها فى سائل كثافته هى (0.866) جم/سم$^3$، ارتفع السائل فى الأنبوبة إلى ارتفاع قدره (2.0) سم. احسب التوتر السطحي لذلك السائل، علما بأن عجلة الجاذبية الأرضية هى (981) م/ث$^2$.

الحل:

من المعطيات، نجد أن:

$r = 0.0335\ cm, \quad d = 0.866\ gm/cm^3$

$h = 2.0\ cm, \quad g = 981\ ms^2 \quad \gamma = ?$

ولحساب التوتر السطحي للسائل، نستخدم العلاقة التالية:

$$\gamma = \frac{1}{2} r h d g$$

وبالتعويض عن القيم المعطاة، في المعادلة السابقة، نحصل على:

$$\gamma = \frac{1}{2} \times 0.0335 \times 2.0 \times 0.866 \times 981$$

$$\gamma = 28.46 \quad dynes/cm$$

(2) احسب ارتفاع الماء داخل أنبوبة شعرية نصف قطرها ($0.2 \times 10^{-2}$) متر عند درجة حرارة (30°) درجة مئوية علما بأن كثافة الماء هي ($0.996 \times 10^{3}$) جم/سم$^3$، والتوتر السطحي للماء هو ($71.18 \times 10^{-3}$) نيوتن/م. والجاذبية الأرضية هي (981) م/ث$^2$

**الحل:**

من المعطيات، نجد أن:

$h = ?, \qquad r = 0.2 \times 10^{-2}\ m$

$d = 0.996 \times 10^{3}\ gm/cm^3, \quad g = 981\ m/s^2, \quad \gamma = 71.18 \times 10^{-3}\ N/m$

ولحساب ارتفاع الماء داخل الأنبوبة الشعرية "h"، نستخدم العلاقة التالية:

$$\gamma = \frac{1}{2} r h d g$$

$$h = \frac{2\gamma}{rdg}$$

وبالتعويض عن القيم المعطاة في المعادلة السابقة، نحصل على:

$$h = \frac{2 \times 71.18 \times 10^{-3}}{0.2 \times 10^{-2} \times 0.996 \times 10^{3} \times 981 \times 10^{-2}}$$

$$h = \frac{142.36 \times 10^{-3}}{195.4152 \times 10^{-1}}$$

$$h = 0.7285 \times 10^{-2}\ m$$

(3) إذا كان التوتر السطحي للكلورفورم عند (20) درجة مئوية يساوى (16.2) داين/سم، وكانت كثافتا السائل وبخاره عند نفس درجة الحرارة هما: (0.9188) جم/سم$^3$ و (0.011) جم/سم$^2$، على الترتيب. احسب ارتفاع السائل في أنبوبة شعرية نصف قطرها (0.105) مم، علما بأن زاوية التلامس $\theta$ مساوية للصفر. وعجلة الجاذبية هى (981) م/ث$^2$.

الحل:

من المعطيات، نجد أن:

$\gamma = 16.2$ dynes/cm , $d_L = 0.9188$ gm/cm$^3$

$d_V = 0.011$ gm/cm$^3$ , $r = 0.105$ mm $= 0.0105$ cm

$h = ?$ , $g = 981$ m/sec$^2$

ولحساب ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية (h) ، فإننا نستخدم العلاقة التالية (للسائل وبخاره):

$$\gamma = \tfrac{1}{2}\left(h + \frac{r}{3}\right)(d_L - d_V)\, gr$$

وبالتعويض عن القيم المعطاة فى المعادلة السابقة، نحصل على:

$$16.2 = \tfrac{1}{2}\left(h + \frac{0.0105}{3}\right)(0.9188 - 0.0110)\, 981 \times 0.0105$$

$\therefore \quad h = 3.46$ cm

## ثانيا: طريقة وزن النقطة

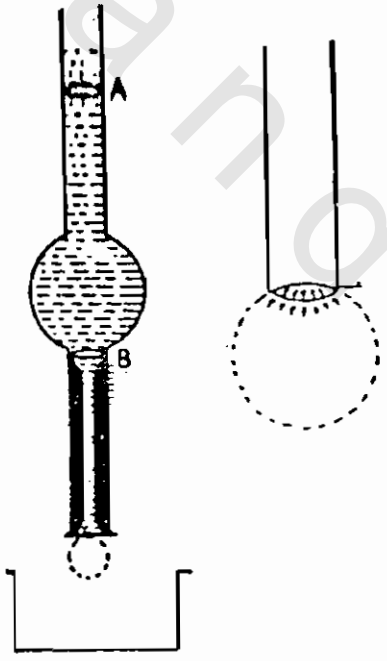
تستخدم هذه الطريقة لتعيين التوتر السطحي لسائل بمعلومية التوتر السطحي لسائل آخر معروف، حيث يعرف هذا السائل المعلوم التوتر السطحي له بـــ "السائل المرجع".

ويعرف الجهاز المستخدم لهذا الغرض باسم "الاستالاجموميتر" stalagmometer. وهو عبارة عن أنبوبة شعرية ذات فقاعة، كما هو موضح بالشكل (9-1).

وفى هذه الطريقة يمكن المقارنة بين قيمتى التوتر السطحى $\gamma_A$ و $\gamma_B$ لسائلين مختلفين هما: A، B حيث يمر كل منهما على انفراد عبر نفس الأنبوبة الشعرية، مع تعيين كتلتى القطرتين $W_A$ و $W_B$.

وبناء على ذلك، فإن:

$$\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{W_A}{W_B}$$




شكل (9-1): جهاز الاستالاجموميتر (أنبوبة شعرية ذات فقاعة)

## خطوات التجربة

1- نحضر جهاز "الاستالاجموميتر" (الأنبوبة ذات الفقاعة)، نغسل الأنبوبة ونجففها تماما.

2- نحضر السائل (A) المراد تعيين التوتر السطحي له ($\gamma_A$)، ونملأ الأنبوبة بهذا السائل (بواسطة) السحب حتى العلامة "A"، كما هو موضح بالشكل (1-9).

3- يسمح للسائل بالسقوط ببطء جدا على هيئة نقط تجمع فى زجاجة معلومة الوزن.

4- يحصى عدد النقط الساقطة (بمعدل نقطة فى كل ثانيتين، ويعين وزنها. ويأخذ متوسط وزن نقطة من السائل (A)، وهو ($W_A$).

5- تعاد الخطوات السابقة باستخدام السائل (B) وهو سائل معلوم التوتر السطحي له ($\gamma_B$)، حيث يمكن تعيين متوسط وزن نقطة من السائل (B)، وهو ($W_B$).

## طريقة الحسابات

نفرض أن $n_A$، $n_B$، هما أعداد النقط التى تم الحصول عليها من حجمين متساويين من السائلين A و B، وكثافتيهما: $d_A$ ، $d_B$ على الترتيب.

يتحدد متوسط وزن النقطة من السائل (A) من العلاقة:

$$W_A = \frac{V}{n_A} d_A$$

وبنفس الطريقة، يتحدد متوسط وزن النقطة من السائل (B) من العلاقة:

$$W_B = \frac{V}{n_B} d_B$$

وحيث أن:

$$\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{W_A}{W_B}$$

وبالتعويض عن قيم $W_A$، $W_B$، نحصل على:

$$\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{\frac{V}{n_A}.d_A}{\frac{V}{n_B}.d_B}$$

$$\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{d_A n_B}{d_B n_A}$$

وبمعلومية التوتر السطحي للسائل (B)، السائل المرجع، فإنه يمكن تعيين التوتر السطحي للسائل الآخر (A)، وذلك بمعرفة كثافة كل من السائلين $d_A$، $d_B$ وبمعرفة عدد النقط المتكونة من حجمين متساويين من السائلين، $n_A$ و $n_B$ على الترتيب.

**مثال:**

عند تعيين التوتر السطحي لسائل (A)، باستخدام طريقة وزن النقطة باستخدام جهاز الاستالاجموميتر، أعطى السائل (A) (55.0) نقطة، وأعطى نفس الحجم من الماء (السائل B) (25.0) نقطة. فإذا كانت كثافتا السائلين A و B هما: (0.800) و (0.966) جم/سم$^3$، على الترتيب، وكان التوتر السطحي للماء (72) داين/سم.

احسب التوتر السطحي للسائل (A)

**الحل:**

من المعطيات، نجد أن:

$n_A = 55$ , $n_B = 25$ , $d_A = 0.800$ gm/cm$^3$

$d_B = 0.996$ gm/cm$^3$, $\gamma_A = ?$ , $\gamma_B = 72$ dynes/cm

ولتعيين التوتر السطحي للسائل A، ($\gamma_A$)، نستخدم العلاقة:

$$\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{d_A n_B}{d_B n_A}$$

وبالتعويض عن القيم المعطاه، فى المعادلة السابقة، نحصل على:

$$\frac{\gamma_A}{72} = \frac{0.80 \times 25}{0.996 \times 55}$$

$$\gamma_A = 26.3 \text{ dynes/cm}$$

**التوتر بين السطحى (التوتر السطحى البينى)**

يحدث توتر بين سطحى، عندما يتلامس سائلان A، B، عديمى الامتزاج أو محدودى الامتزاج، ويحدث هذا التوتر عند الحد الفاصل بين طبقتى السائلين. ويرمز للتوتر بين السطحى فى هذه الحالة بالرمز ($\gamma_{AB}$).

ويمكن قياس التوتر بين السطحى باستخدام طرق شبيهة جدا بتلك المستخدمة لقياس التوتر السطحى فى حالة السوائل النقية. وعادة ماتكون قيمته وسطا بين قيمتى التوتر السطحى للسائلين $\gamma_A$، $\gamma_B$، ولكنها عادة ماتكون أقل من أى منهما.

فإذا تصورنا أنه يمكن نزع عمود من سائل نقى مساحة مقطعة (1) سم$^2$ إلى جزئين بعيدا عن بعضهما البعض، فإنه سوف ينشأ سطحان، مساحة مقطع كل منهما هى (1) سم$^2$.

وحيث أن التوتر السطحى هو أيضا عبارة عن الشغل اللازم لإحداث وحدة مساحة سطحية، فإن الشغل المبذول فى نزع السائل إلى جزئين بعيدا عن بعضهما، يعطى بالعلاقة:

$$W_C = 2\gamma$$

حيث $W_C$ هى شغل التماسك بالنسبة للسائل.

وبطريقة مماثلة، فإذا تصورنا عمود سائل مكون من سائلين عديمى الامتزاج أو محدودى الامتزاج، فإن الشغل اللازم لفصل أحد السائلين عن الآخر، والمؤثر ضد قوى التوتر السطحى، كما هو موضح بالشكل (1-10) يعطى بالعلاقة:

$$W_a = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB}$$

حيث $W_a$ هى شغل الالتصاق. وتسمى هذه المعادلة بمعادلة "دوبرية".

ويمكن من هذين النوعين من الشغل، الحصول على كمية هامة، تعرف بـ "معامل الانتشار"، والذى تمثله العلاقة التالية:

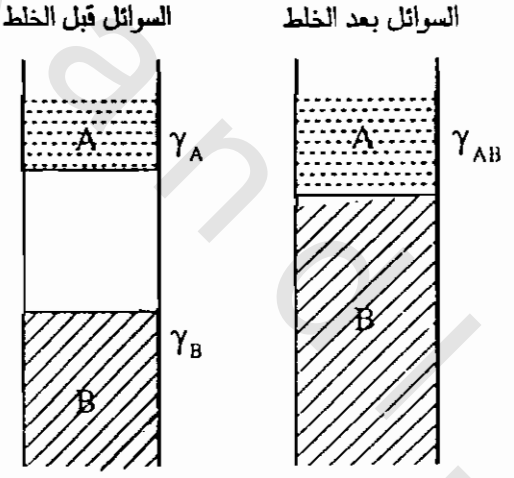
$$S_{BA} = W_a - W_{CB}$$

$$= \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB}$$

حيث $S_{BA}$ هى معامل انتشار السائل B على سطح السائل A.

$W_{CB}$ هو شغل التماسك فى السائل B

وتدل القيمة الموجبة للمقدار ($S_{BA}$) على أنه إذا وضعت كمية صغيرة من السائل (B) على سطح (A)، فإنها سوف تنتشر فوق السطح، مثل انتشار زيت على الماء.




**شكل (1-10): رسم توضيحى للسوائل قبل وبعد الخلط.**

أما إذا كانت ($S_{BA}$) سالبة الإشارة، فإنه سوف لايحدث انتشار، ويبقى السائل المضاف على هيئة نقطة على السطح.

## ظواهر مرتبطة بالتوتر السطحى

يستفاد من ظاهرة التوتر السطحى، وبخاصة فى التطبيقات العملية، فى الكثير من المنتجات الصناعية، ومنها:

1- يقلل الصابون من التوتر السطحى البينى بين الماء والمواد الدهنية أثناء عملية الغسيل، فيسمح للماء بأن يحيط بالمادة الدهنية، ويسهل غسلها.

2- تضاف لمعاجين الأسنان والحلاقة بعض المواد التى تقلل التوتر السطحى، فتسمح للمادة الفعالة فى المستحضر بالانتشار على السطح المراد معالجته، فيسهل تلامسها به، وتزداد قدرته على التطهير.

3- تضاف بعض المواد التى تزيد من التوتر السطحى أثناء معالجة الأقمشة، فيكون لها القدرة على منع بلل (تبلل) الأنسجة. وتستخدم هذه الفكرة فى صناعة الأقمشة الخاصة بالمطر، وتسمى (water proof).

**التوتر السطحى ودرجة الحرارة**

كما ذكرنا سابقا، فإن التوتر السطحى لجميع السوائل يقل بزيادة درجة الحرارة، حتى يصل إلى القيمة (صفر) عندما تصل درجة الحرارة إلى الدرجة الحرجة. فعند هذه الدرجة، لايوجد سطح فاصل بين السائل وبخاره.

وقد توصل عدد من العلماء إلى علاقات رياضية تربط بين التوتر السطحى للسائل والتغير الذى يطرأ على درجة الحرارة. وسوف نتعرض لبعض هذه العلاقات، ومنها:

**1- معادلة إوتفوس Eotvos Equation**

أقترح العالم "اوتفوس" فى عام 1886م، علاقة رياضية تربط بين التوتر السطحى للسائل والتغير فى درجة الحرارة.

فإذا افترضنا أن حجم (1) جم من السائل موجود على هيئة كرة نصف قطرها (r) سم، هو (V)، وأن مساحة السطح هى (S)، فإن:

$$V \alpha r^3$$

أو

$$r \alpha V^{1/3}$$

ولكن

$$S \alpha r^2$$

$$S \alpha (V^{1/3})^2 \alpha V^{2/3}$$

فإذا كانت (M) هى الوزن الجزيئى للسائل، و (d) كثافته، فتكون النسبة:

$$\frac{M}{d_L} = MV$$

حيث MV هى الحجم الجزيئى (المولارى) للسائل. ويكون مساحة السطح لهذا الحجم المولارى متناسبا مع $(MV)^{2/3}$. وتكون $\gamma(MV)^{2/3}$ هى طاقة السطح الجزيئية. وقد وجد أوتفوس أن الكمية $\gamma(MV)^{2/3}$ تقل خطيا مع درجة الحرارة، تبعا للمعادلة التالية:

$$\gamma\left(\frac{M}{d_L}\right)^{2/3} = \gamma(MV)^{2/3} = K(t_c - t)$$

حيث $\gamma$: هى التوتر السطحى للسائل عند درجة حرارة "t"

K: مقدار ثابت لايعتمد على درجة الحرارة

M: الحجم الجزيئى.

$d_L$: كثافة السائل.

$t_c$: درجة الحرارة الحرجة للسائل.

**2- معادلة رامساى شيلدز Ramsay – Shields equation**

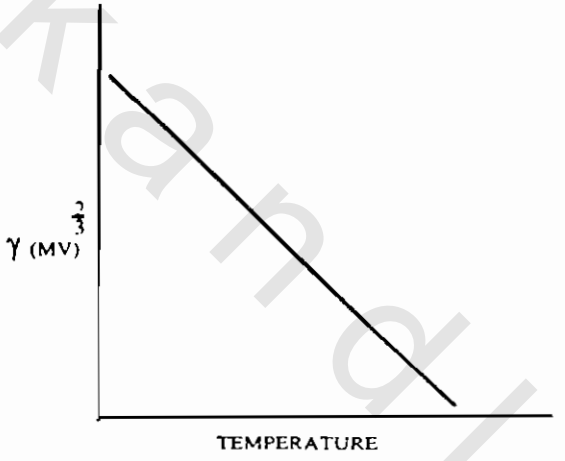
اقترح "شيلدز" هذه المعادلة فى عام 1893. وهى تعد تطويرا لمعادلة "اوتفوس"، والمعادلة هى:

$$\gamma\left(\frac{M}{d_L}\right)^{2/3} = K\,(t_c - t - 6)$$

وطبقا لهذه المعادلة، فإن قيمة "γ" تصبح صفرا عند درجة حرارة أدنى (أقل) من الدرجة الحرجة بمقدار (6) درجات. وتصلح هذه المعادلة لكثير من السوائل.

ويكون الثابت (K) فى المعادلتين السابقتين هو ميل الخط المستقيم للعلاقة بين $\gamma(MV)^{2/3}$ ودرجة الحرارة (t). وهى معامل درجة الحرارة لطاقة السطح الجزيئية.

ويوضح العلاقة السابقة الشكل (1-11).




**شكل (1-11): أثر الحرارة على الشد السطحى**

### 3- معادلة كاتا ياما Katayama`s Equation

تعد هذه المعادلة، صورة معدلة لمعادلة "شيلدز". فقد استبدل كاتا ياما المقدار $(t_c-6)$ فى معادلة "شيلدز"، واستخدم بدلا منه المقدار "$t_c$".

وحيث أن هذه المعادلة تستخدم فى الحالات التى يوجد عندها السائل وبخاره، فقد أجرى تعديلا أيضا على $(d_L)$ واستبدلها بالمقدار $(d_L-d_V)$ وأصبحت معادلة "كاتاياما" على الصورة التالية:

$$\gamma\left(\frac{M}{d_L - d_V}\right)^{2/3} = K(t_c - t)$$

حيث $d_V$ هى كثافة البخار الموجود فوق السائل عند درجة الحرارة t.

## 4- معادلة ماكلويد Macleod's Equation

توصل "ماكلويد" إلى هذه العلاقة فى عام 1923م ، وهى تمثل بالمعادلة:

$$\gamma = C(d_L\, d_V)^4$$

والتى يمكن وضعها على الصورة التالية:

$$\frac{\gamma^{1/4}}{d_L - d_V} = C$$

حيث $d_L$ كثافة السائل (عند t°C).

$d_V$ كثافة البخار الموجود فوق السائل (عند t°C).

C مقدار ثابت يميز كل سائل، ولكنه لايعتمد على درجة الحرارة.

وتتميز هذه المعادلة بدقة نتائجها بالنسبة للسوائل، سواء كانت متجمعة الجزيئات أو غير متجمعة، وذلك فى مدى كبير من درجات الحرارة.

**مثال:**

احسب ($t_c$) لثانى أكسيد الكربون، مستخدما معادلة رامساى، علما بأنه عند درجتى (الصفر) و (20) درجة مئوية تكون قيمتى الكثافة هما: (0.927) جم/ سم$^3$، و(0.772) جم/ سم$^3$، كما أن قيمتى التوتر السطحى هما (1.16) داين/سم، و (4.5) داين/سم.

**الحل:**

$\gamma_{273} = 1.16$ dynes/cm, $\gamma_{293} = 4.5$ dynes/cm

$d_{273} = 0.927$ gm/cm$^3$, $d_{293} = 0.772$ gm/cm$^3$

$M_{CO_2} = 12 + (2 \times 16) = 12 + 32 = 44$



obeikandl.com

بالتعويض عن القيم السابقة فى معادلة رامساى:

$$\gamma\left(\frac{M}{d_l}\right)^{2/3} = K\,(t_c - t - 6)$$

عند 273°K

$$4.5\left(\frac{44}{0.927}\right)^{2/3} = K(t_c - 279)$$

$$\therefore \quad 140.85 = K(t_c - 279)$$

عند 293°K

$$1.16\left(\frac{44}{0.772}\right)^{2/3} = K(t_c - 299)$$

$$36.31 = K(t_c - 299)$$

وبأخذ النسبة بين المعادلتين:

$$\frac{140.85}{36.31} = \frac{(t_c - 279)}{(t_c - 299)}$$

$$\therefore \quad t_c = 306°K$$

$$t_c = 33°C$$

obeikandl.com

## أسئلة ومسائل عامة

1- "التوتر السطحى .. ظاهرة سطحية".. اشرح هذه العبارة.

2- عرف التوتر السطحى لسائل.

3- أذكر وحدات التوتر السطحى

4- تكلم عن أثر الحرارة على التوتر السطحى

5- عرف كل مما يأتى: قوى التماسك– قوى التلاصق

6- عند وضع سائل على سطح صلب، فإنه قد يحدث بلل للسطح وقد لايحدث بلل. ناقش الظروف التى يحدث عندها البلل والتى لايحدث عندها البلل مع إعطاء أمثلة.

7- اشرح خاصية الأنبوبة الشعرية.

8- وضح كيف يمكن استخدام طريقة الأنبوبة الشعرية لقياس التوتر السطحى لسائل.

9- اشرح طريقة وزن النقطة لقياس التوتر السطحى لسائل.

10- تكلم عن التوتر السطحى البينى.

11- ناقش بعض التطبيقات العملية للاستفادة من ظاهرة التوتر السطحى.

12- إلى أى ارتفاع يصعد الماء عند (20) درجة مئوية فى أنبوبة نصف قطرها (0.024) سم، وإلى أى مدى يصعد الطولوين فى نفس الأنبوبة عند نفس درجة الحرارة إذا كان توتره السطحى عند تلك الدرجة هو (28.4) داين/سم، وكثافته (0.866) جم/سم3.

13- أحسب التوتر السطحى للأسيتون، إذا ارتفع فى أنبوبة شعرية قطرها (0.2 mm) مسافة قدرها (6) سم، علما بأن كثافة الأسيتون (0.792) جم/سم$^3$.

14- إذا علمت أن التوتر السطحى للطولوين يساوى (24.8) داين/سم عند (20) درجة مئوية، وكثافته عند ذات الدرجة هى (0.866) جم/سم$^3$. أحسب نصف قطر الأنبوبة الشعرية التى تسمح للطولين بالارتفاع مسافة (2) سم.