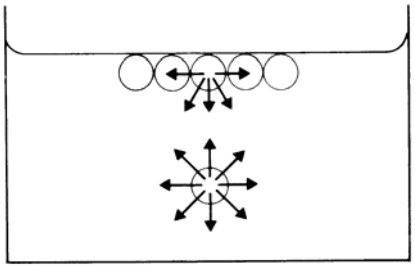
فصل دوازدهم
کشش سطحی[1]

۱۲-۱. تئوری کشش سطحی:

وقتی سطح یک مایع گسترش می یابد، مولکول هایی که در ابتدا در نواحی درونی بوده اند، به بخش‌های سطحی مایع می‌آیند. برای خنثی کردن نیروهای جاذبه بین این مولکول‌ها (مولکول‌های به سطح آمده) و مولکول‌های همسایه‌شان باید کار انجام داد. این فرآیند قدری شبیه به تبخیر یک مایع است. اگر چه در تبخیر، مولکول‌ها کاملا از مایع جدا می‌شوند ولی مولکول‌ها در یک لایه سطحی هنوز تحت تاثیر نیروهای قوی بین مولکولی می باشند. شکل (۱۲-۱) نیروهای بین مولکولی وارده بر یک مولکول واقع شده در لایه سطحی و نیروهای بین‌مولکولی وارده بر یک مولکول واقع شده در ناحیه درونی مایع را نشان می‌دهد:



شکل (۱۲-۱): نیروهای بین‌مولکولی که بر یک مولکول در لایه سطحی و یک مولکول در درون یک مایع وارد می‌شود.

این میان‌کنش نامتوازن که به وسیله مولکول‌های لایه سطحی تجربه می‌شود منجر به تمایل مایع به حداقل‌کردن[2] سطح آن می‌شود. به همین دلیل است که یک قطره مایع به شکل کروی در می‌آید. کشش سطحی را با علامت γ نشان می‌دهند و به صورت مقدار کار مورد نیاز برای گسترش سطح یک مایع به اندازه واحد سطح تعریف می‌شود.

و به بیان ریاضی:

$$\gamma = \frac{dw}{dA} \qquad (۱-۱۲)$$

---

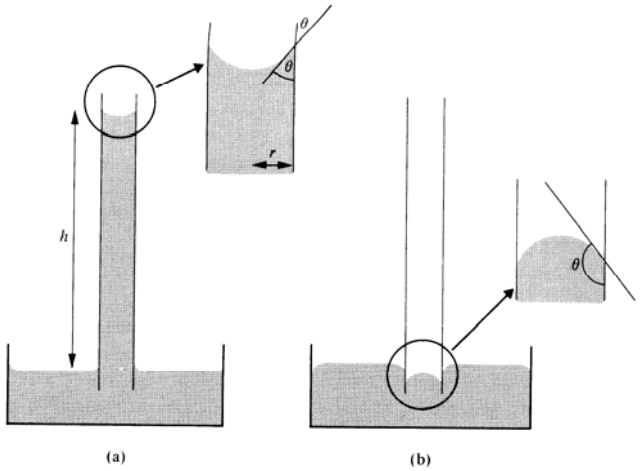
[1] Surface Tension
[2] Minimization

در سیستم CGS ، کشش سطحی بر حسب $erg.cm^{-۲}$ و یا $dyn.cm^{-۱}$ بیان می شود و ۱ erg = ۱ dyn.cm. در سیستم SI، کشش سطحی برحسب $J.m^{-۲}$ و یا $N.m^{-۱}$ بیان می‌شود و ۱ J = N.m. این دو واحد به وسیله معادله زیر به یکدیگر مربوط می‌شوند:

$$۱\ dyn.cm^{-۱} = ۱ \times ۱۰^{-۳}\ N.m^{-۱}$$

۱۲-۲. اندازه‌گیری کشش سطحی مایعات:

روش صعود از لوله موئین[۳] روش ساده‌ای برای اندازه‌گیری کشش سطحی مایعات است. در این روش، یک لوله موئین با شعاع r در مایع مورد نظر فرو برده می‌شود (شکل ۱۲-۲):



شکل (۱۲-۲): (a) پدیده صعود از لوله موئین برای بیشتر مایعات معمولی. (b) وقتی پیوستگی[۴] بزرگتر از چسبندگی[۵] باشد، پایین آمدن مایع در لوله موئین مشاهده می‌شود.

نیرویی که به سمت پایین وارد می‌شود، کشش نیروی جاذبه بر روی مایع است و به وسیله عبارت $\pi r^{۲} h \rho g$ داده می‌شود که در آن ρ چگالی مایع، g شتاب جاذبه زمین، r شعاع لوله موئین و h ارتفاع ستون مایع در لوله موئین است. عبارت $\pi r^{۲} h$ نیز برابر حجم است (توجه داشته باشید که در اینجا از

[۳] Capillary Rise Method
[۴] Cohesion
[۵] Adhesion

مقدار کم مایع که بالاتر از سطح تماس هوا-مایع قرار دارد صرف‌نظر شده است). بایستی وزن ستون مایع به وسیله نیروی به سمت بالای بوجود آمده توسط کشش سطحی مایع به توازن برسد. این نیرو که در امتداد محیط سطح داخلی سیلندر بین مایع و دیواره شیشه ای عمل می کند، به وسیله $۲\pi r\cos\theta$ داده می‌شود که در آن $۲\pi r$ محیط سطح داخلی سیلندر، θ زاویه تماس بین مایع و لوله موئین در سطح تماس هوا- مایع و $\cos\theta$ جزء عمودی نیرو (عمل‌کننده به سمت بالا) است. با معادل قرار دادن این دو نیرو خواهیم داشت:

$$\pi r^{۲}h\rho g = ۲\pi r\gamma\cos\theta \qquad (۲-۱۲)$$

و یا

$$\gamma = \frac{rhpg}{۲\cos\theta}$$

کشش سطحی چندین مایع معمول در جدول (۱۲-۱) نشان داده شده است:

جدول (۱۲-۱): کشش سطحی برخی از مایعات در ۲۹۳ K.

مایع	کشش سطحی ($dyn.cm^{-۱}$)
استون	۲۳/۷
کلروفرم	۲۷/۱
اتانول	۲۲/۳
جیوه	۴۷۶
آب	۷۲/۷۵

در حالی که برای بسیاری از مایعات وقتی یک لوله موئین در آنها فرو برده می‌شود مایع در لوله موئین بالا می‌آید، برای برخی دیگر از مایعات از جمله جیوه سطح مایع در لوله موئین وقتی که در این مایعات فرو می رود، پایین تر از سطح مایع آزاد است. این دو رفتار متفاوت با توجه به جاذبه بین‌مولکولی بین مولکول‌های یک مایع که پیوستگی نامیده می‌شود و جاذبه بین مولکول‌های مایع و دیواره شیشه‌ای که چسبندگی نامیده می‌شود، قابل فهم است. اگر چسبندگی قوی‌تر از پیوستگی باشد، آنگاه دیواره شیشه‌ای خیس خواهد شد و مایع در امتداد دیواره‌ها حرکت خواهد کرد. چون سطح

تماس بخار- مایع در مقابل کشیده شدن مقاومت می‌کند، مایع نیز در لومن[۶] لوله بالا می‌آید. بر عکس اگر پیوستگی بزرگتر از چسبندگی باشد، پایین آمدن مایع در لوله موئین مشاهده خواهد شد.

مثال: شعاع یک آوند حدود ۰/۰۲ cm است. در ۲۹۳ K، آب چه مقدار در چنین آوندی بالا خواهد آمد؟

حل:

داریم:
$$\gamma = \frac{rhpg}{۲\cos\theta}$$

و یا
$$h = \frac{۲\gamma\cos\theta}{r\rho g}$$

از آنجایی‌که زاویه تماس معمولا بسیار کوچک است، می‌توان فرض نمود که $\theta = ۰$ باشد.

در سیستم واحدهای CGS:

$$\gamma = ۷۲/۷۵\ \text{dyn.cm}^{-۱}$$
$$\cos\theta = ۱$$
$$r = ۰/۰۲\ \text{cm}$$
$$g = ۹۸۰/۷\ \text{cm.s}^{-۲}$$
$$\rho = ۱\ \text{g.cm}^{-۳}$$

داریم:
$$h = \frac{۲\times(۷۲/۷۵\ \text{dyn.cm}^{-۱})}{(۰/۰۲\ \text{cm})\times(۹۸۰/۷\ \text{cm.s}^{-۲})\times(۱\ \text{g.cm}^{-۳})} = ۷/۴\ \text{dyn.s}^{۲}.\text{g}^{-۱}$$

$$۱\ \text{dyn} = ۱\ \text{g.cm.s}^{-۲} \Rightarrow h = ۷/۴\ \text{cm}$$

و در سیستم واحدهای SI:

$$\gamma = ۰/۰۷۲۷۵\ \text{N.m}^{-۱}$$

---

[۶] Lumen

$$r = ۰/۰۰۰۲ \text{ m}$$
$$g = ۹/۸۰۷ \text{ m.s}^{-۲}$$
$$\rho = ۱\times۱۰^{۳} \text{ kg.m}^{-۳}$$

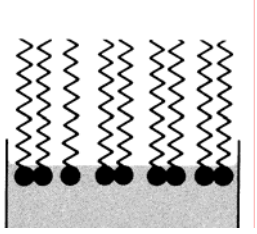
از اینرو خواهیم داشت:

$$h = \frac{۲\times(۰/۰۷۲۷۵ \text{ N.m}^{-۱})}{(۰/۰۰۰۲ \text{ m})\times(۹/۸۰۷ \text{ m.s}^{-۲})\times(۱\times۱۰^{۳} \text{ kg.m}^{-۳})} = ۰/۰۷۴ \text{ N.s}^{۲}\text{.kg}^{-۱}$$

$$۱ N = ۱ \text{ kg.m.s}^{-۲} \Rightarrow h = ۰/۰۷۴ \text{ m}$$

۱۲-۳. تاثیر مواد حل‌شونده بر کشش سطحی آب:

کشش سطحی محلول های آبی عموما نزدیک به کشش سطحی آب خالص خواهد بود اگر حل‌شونده‌ها، نمک‌هایی مثل NaCl، سوکروز و یا دیگر موادی باشند که در سطح تماس آب- هوا جمع نمی‌شوند. برعکس اگر ماده حل‌شونده ترکیبی دوگانه دوست باشد، کاهش زیادی در کشش سطحی روی خواهد داد. چنین مولکول‌هایی از دو قسمت تشکیل شده‌اند: یک سر قطبی و یک دنباله آب‌گریز. گروه‌های غیرقطبی تمایل دارند که خارج از آب و در امتداد یکدیگر قرار گیرند در حالی که سرهای قطبی تمایل به فرو رفتن بدرون آب دارند (شکل ۱۲-۳):



شکل (۱۲-۳): دیاگرام شماتیک یک مولکول دوگانه‌دوست در آب. دایره‌های تیره نشان‌دهنده سرهای قطبی و خط‌های زیگزاگی نشان‌دهنده دنباله‌های هیدروکربنی غیرقطبی می‌باشند.

از اینرو گفته می‌شود که چنین مولکول‌هایی رفتار شیزوفرنی[۷] نشان می‌دهند. کاهش کشش سطحی در این موارد بستگی به ماهیت مولکول حل شونده دارد. از اینرو، اگر چه یک محلول M ۰/۰۱ اسید کاپروییک[۸] (CH_3-$(CH_2)_4$–COOH) کشش سطحی را به اندازه حدودا $dyn.cm^{-1}$ ۱۵ پایین می آورد، کاهشی حدود $dyn.cm^{-1}$ ۲۵ در کشش سطحی محلول M ۰/۰۰۰۵ اسید کاپریک[۹] (CH_3–$(CH_2)_8$–COOH) مشاهده می شود. موادی که بدین طریق موجب کاهش کشش سطحی می شوند، مواد فعال سطحی[۱۰] یا سرفکتنت[۱۱] نامیده می شوند. موثرترین سرفکتنت ها، صابون ها، پاک کننده‌ها[۱۲] و پروتئین‌های غیرطبیعی‌شده می‌باشند.

۱۲-۴. کشش سطحی و تنفس:

عمل سرفکتنت‌ها نقش مهمی در پدیده تنفس ایفاء می کند. گسترده‌ترین سطح بدن انسان که در تماس با محیط اطرافش است، سطح داخلی مرطوب شش‌هاست. جهت معاوضه موثر دی‌اکسید کربن و اکسیژن، بین خون در گردش و اتمسفر، یک شخص به طور میانگین نیاز به سطح ریه‌ای تقریبا به اندازه یک زمین تنیس دارد. چنین سطحی به وسیله قسمت قسمت شدن[۱۳] شش‌ها به میلیون‌ها فضای هوایی کوچک بنام آلوئولی[۱۴] و فشرده‌شدن آنها در قفسه سینه مهیا می‌شود. در حین تنفس عادی، فشار در آلوئولی حدودا mm Hg ۳ کمتر از فشار اتمسفر است. به همین دلیل است که می گویند فشار گاژی[۱۵] به اندازه mm Hg ۳- وجود دارد که هوا را قادر می‌سازد به درون آلوئولی از طریق مجاری برونش وارد شود. فشار گاژ، تفاوت بین فشار مطلق یک سیال (گاز یا مایع) و فشار اتمسفر است. به عنوان مثال وقتی ما فشار یک تایر را اندازه می گیریم، در واقع فشار هوای داخل تایر را اندازه‌گیری نمی کنیم بلکه مقدار فشار بیش از فشار اتمسفر را اندازه می گیریم. برای فشار خون نیز چنین تفسیری صادق است.

---

[۷] Schizophrenic
[۸] Caproic acid
[۹] Capric acid
[۱۰] Surface Active Agents
[۱۱] Surfactant
[۱۲] Detergents
[۱۳] Compartmentation
[۱۴] Alveoli
[۱۵] Gauge Pressure

آلوئولی توسط موکوسی پوشیده شده که به طور طبیعی دارای کشش سطحی معادل $۵۰\ \text{dyn.cm}^{-۱}$ می‌باشد. شعاع متوسط آلوئولی، $۰/۰۰۵\ \text{cm}$ است. در حین دم، شعاع آلوئولی با فاکتور دو افزایش می‌یابد. تفاوت فشار مورد نیاز جهت باد کردن یک آلوئولوس[۱۶] توسط رابطه (۱۲-۳) داده می شود:

$$P_i - P_\circ = \frac{۲\gamma}{r} \qquad (۳-۱۲)$$

که در این رابطه، P_i فشار داخل آلوئولی، $P_\circ$ فشار در فضای بین شش‌ها و حفره پلورال است که شش‌ها را در برگرفته و r شعاع آلوئولی است.

برای چنین انبساطی، تفاوت فشار باید حداقل برابر باشد با:

$$P_i - P_\circ = \frac{۲\times(۵۰\ \text{dyn.cm}^{-۱})}{۰/۰۰۵\ \text{cm}} = ۲\times۱۰^{۴}\ \text{dyn.cm}^{-۲} = ۱۵\ \text{mm Hg}$$

از آنجایی که $P_\circ$ تنها معادل $-۴\ \text{mm Hg}$ ($۷۵۶\ \text{mm Hg}$) است، خواهیم داشت:

$$P_i - P_\circ = (-۳\,\text{mm Hg}) - (-۴\,\text{mm Hg}) = +۱\ \text{mm Hg}$$

این مقدار فشار گاژ، تنها یک پانزدهم فشار مورد نیاز برای منبسط کردن یک آلوئولوس است. برای غلبه بر این مشکل، سلول‌های آلوئولی نوع خاصی از سرفکتنت را ترشح می‌کنند. این سرفکتنت یک کمپلکس فسفولیپوپروتئینی حاوی دی‌پالمیتیل‌فسفاتیدیل کولین است که به طور موثری کشش سطحی را کاهش می‌دهد و در نتیجه آلوئولوس می‌تواند بدون مشکل منبسط شود.

در سندرومی به نام سندروم تنگی‌نفس[۱۷] که در نوزادان زودرس مشاهده می‌شود، سرفکتنت کافی حضور ندارد و سلول‌های سنتزکننده سرفکتنت هنوز به خوبی قادر به انجام عمل خود نیستند. حتی در یک نوزاد سالم طبیعی در موقع تولد چنان آلوئولوس‌ها به هم چسبیده‌اند که اختلاف فشاری به اندازه ۲۵-۳۰ mm Hg برای منبسط کردن آنان برای اولین بار مورد نیاز است. بنابراین، اولین تنفس در زندگی نیاز به کوشش زیادی برای غلبه بر کشش سطحی در آلوئولی دارد.

---

[۱۶] Alveolus
[۱۷] Respiratory Distress Syndrom

۱۲-۵. فعالیت سطحی و حفظ منابع آب:

فعالیت سطحی مورد بحث در حفظ منابع آب نیز اهمیت دارد. پخش شدن یک لایه نازک از یک ماده معین بر روی سطح آب می‌تواند سرعت تبخیر آب را در منابع تقلیل دهد. ستیل الکل[۱۸] ($CH_3-(CH_2)_{14}-CH_2OH$) ماده بسیار مناسبی برای این منظور است. این الکل به صورت جامد بوده و در آب غیرقابل انحلال است ولی دارای حلالیت سطحی[۱۹] بالایی می‌باشد به طوری که مولکول‌های آن بر روی آب شناور می‌مانند و تشکیل لایه نازکی را می‌دهند که سطح آب را می‌پوشاند و اگر لایه نازک به وسیله هوا و یا عوامل دیگر پاره شود، به سهولت دوباره تشکیل می‌شود. تنها ۳۰ گرم از این ماده کافی است تا سطحی معادل m^2 ۱۰۰۰۰ آب را بپوشاند.

[۱۸] Cetyl Alcohol
[۱۹] Surface Solubility