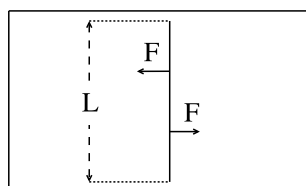


# کشش سطحی Surface Tension

## ۱ مقدمه

سطوح مرزی سیال‌ها مقاومتی در برابر بزرگ شدن از خود نشان می‌دهند. این مقاومت همان کشش سطحی است. به صورت دقیق‌تر، اگر یک مرز دو بعدی برای یک سیال داشته باشیم و یک خط فرضی از سیال با طول  $L$  روی این سطح فرض کنیم، به این خط فرضی از دو طرف نیرویی وارد می‌شود که برابر است با کشش سطحی  $\gamma$  ضرب در  $L$  (شکل ۱). این خط فرضی می‌تواند حتی یک تکه سیم یا نخ باشد. به دلیل این که این جسم از هر دو طرف توسط مایع کشیده می‌شود همچنان در تعادل باقی می‌ماند، اما اگر بتوان کاری کرد که نیروی دو طرف برابر نباشد (مثلاً کشش سطحی یک سمت با سمت دیگر متفاوت باشد) این جسم شروع به حرکت می‌کند. نمونه این پدیده را می‌توانید در آزمایش‌های مشاهده‌ای، هنگامی که قابی با یک سیم متحرک روی آن دارید، ببینید.



شکل ۱: تصویر سطح مرزی یک سیال از بالا. یک خط فرضی (یا حتی یک جسم) داخل این سیال از دو طرف کشیده می‌شود. مقدار نیروی دو طرف این خط به کشش سطحی و طول خط بستگی دارد.

بر اساس تعریف کشش سطحی می‌توان گفت این کمیت کشش در واحد طول مرز سیال را نشان می‌دهد. یعنی نیرویی که سیال به خطی به طول واحد وارد می‌کند. کشش سطحی مانند فشار دارای جهت نیست و برای تعیین جهت نیروی حاصل از آن باید یک خط در نظر گرفت. مانند وقتی که جهت نیروی حاصل از فشار را با دانستن جهت‌گیری یک سطح می‌توان فهمید.

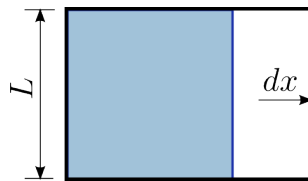
اندازه کشش سطحی به پیوند بین مولکول‌ها مربوط است. مولکول‌های داخل توده سیال با یکدیگر پیوند تشکیل داده و انرژی خود را پایین می‌آورند. اما مولکول‌های روی سیال قسمتی از این پیوندها را از دست داده که باعث افزایش انرژی می‌شود، علاوه بر این در آب، مولکول‌های سطح با شکل خاصی می‌ایستند که باعث افزایش آنتروپی شده و در نتیجه انرژی آزاد مولکول‌های سطح کم‌تر است.

زیاد بودن انرژی مولکول‌ها در سطح نامطلوب است و بنابراین سیال دوست دارد مرز خودش را کوچک‌تر کند که منجر به کشش در این سطح می‌شود. بر این اساس می‌توان تعریف دیگری برای کشش سطحی داشت و آن میزان افزایش

انرژی آزاد نامطلوب در واحد سطح مرز سیال است. یعنی می‌توان گفت:

$$F = \gamma S \quad (1)$$

که  $F$  اختلاف انرژی آزاد سیال با سطح و سیال بدون سطح بوده،  $\gamma$  کشش سطحی و  $S$  سطح مرزی سیال است. در بسیاری از اوقات به جای بیان انرژی آزاد  $F$  از نماد انرژی  $E$  استفاده می‌کنند، اما دقیق‌تر این است که کشش سطحی انرژی آزاد در واحد سطح است یعنی آنتروپی هم در آن مؤثر است. از نظر ترمودینامیکی و بزرگ‌مقیاس نیز می‌توان خاصیت انرژی در واحد سطح بودن کشش سطحی را به دست آورد. اگر نیرو در واحد طول سطح سیال  $\gamma$  باشد، برای افزایش سطح سیالی مطابق شکل ۲ به اندازه  $dx$  باید کاری معادل  $F dx$  که در آن  $F = \gamma L$  است انجام داد. یعنی کار برابر با  $w = \gamma L dx$  می‌شود. در نهایت کمیت  $L dx$  چیزی جز میزان افزایش سطح نیست، بنابراین، کشش سطحی ضرب در سطح میزان تغییر انرژی را می‌دهد. این به معنای آن است که کشش سطحی همان انرژی در واحد سطح مرز سیال است.



شکل ۲: سطح یک سیال در حال افزایش است.

در این آزمایش ما می‌خواهیم اندازه کشش سطحی آب را که بیش‌ترین کشش سطحی را بین مایعات دارا است، اندازه‌گیری کنیم. برای این کار از چند روش استفاده خواهیم کرد.

## ۲ مدل و نظریه

برای اندازه‌گیری کشش سطحی ما از سه روش استفاده می‌کنیم. در روش اول که نام آن روش حلقه دو نوی<sup>۱</sup> است، یک حلقه داخل آب فرو کرده و با نیروی لازم برای جدا کردن آن از سطح کشش سطحی آب را محاسبه می‌کنیم. در روش دوم که با نام بیشینه فشار حبابی<sup>۲</sup> شناخته می‌شود، یک لوله موئین داخل آب کرده و با افزایش فشار داخل آن از دهانه آن

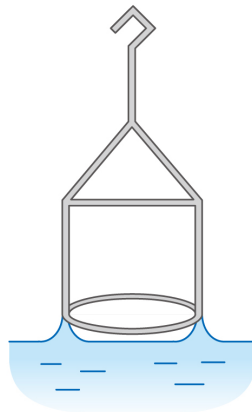
<sup>۱</sup>Du Noüy ring method

<sup>۲</sup>Maximum bubble pressure

حباب خارج می‌کنیم، از فشار خروج حباب می‌توان کشش سطحی آب را محاسبه کرد. در روش سوم با اندازه‌گیری حجم بزرگترین قطره می‌توان کشش سطحی را تعیین کرد.

## ۱.۲ حلقه دو نوی

فرض کنید یک حلقه نازک (مثلا حلقه‌ای از سیم) روی سطح مایعی داریم. گر بتوانیم این حلقه را به صورت متقارن به بالا کشیده طوری که کج نشود، مایع به خاطر چسبندگی با این حلقه همچنان به آن متصل خواهد ماند و یک پوسته استوانه‌ای مایع، از پایین حلقه، دور تا دور آویزان می‌شود (شکل ۳).



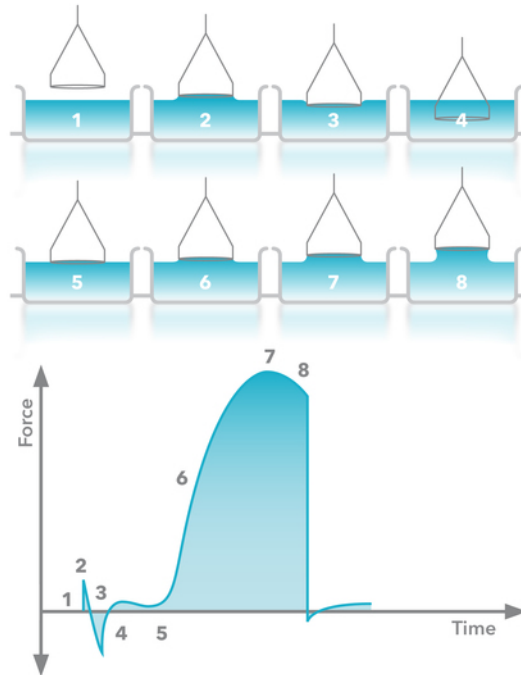
شکل ۳: شکل نمادینی از یک حلقه که در حال بیرون آمدن از آب است. همان طور که می‌بینید آب از این حلقه آویزان می‌شد. توجه کنید که این اتفاق در سراسر حلقه است، یعنی آب از دور تا دور این حلقه آویزان می‌شود.

اگر حلقه با نیروی  $F$  کشیده شود، مقدار این نیرو بر حسب کشش سطحی مایع با هوا و زاویه تماس آب با حلقه قابل محاسبه است (وزن حلقه را هم می‌توان برای محاسبات دقیق‌تر در نظر گرفت). در واقع آب به خاطر کشش سطحی اش حلقه را به پایین می‌کشد. وقتی شما حلقه‌ای را می‌کشید بر اساس میزان نیروی شما، زاویه آب با حلقه تغییر کرده به گونه‌ای که حلقه به صورت تعادلی می‌ایستد. در شکل ۴ نمودار نیروی کشنده حلقه بر حسب زمان (جابجایی) را مشاهده می‌نمایید. طبق این نمودار یک نیروی بیشینه وجود دارد. در این نیرو آب متصل به حلقه به صورت عمود بر سطح تراز آب ایستاده است و نیازی نیست که ما برای محاسبات خود زاویه‌ای در نظر بگیریم. در واقع با کشیدن حلقه به بالا به مرور زاویه آب با حلقه به صورت عمودی در می‌آید و جایی که نیرو بیشینه می‌شود زاویه آب متصل به حلقه با راستای عمودی صفر است. نیرویی که یک مرز آب به حلقه وارد می‌کند برابر با  $\gamma L$  است که  $L$  محیط حلقه است. از آن جایی که دو مرز آب و هوا داریم (داخل و بیرون پوسته استوانه‌ای)، و هر مرز به اندازه  $\gamma L$  نیرو وارد می‌کند، در نهایت نیروی

کل وارد بر حلقه برابر با  $2\gamma L$  است. پس می‌توان کشش سطحی مایع را از رابطه زیر به دست آورد:

$$\gamma = \frac{F_{max} - W}{2L} \quad (2)$$

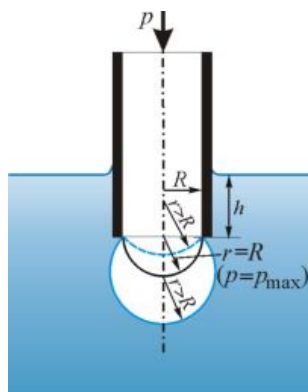
که  $W$  وزن حلقه است.



شکل ۴: نیروی وارد بر حلقه بر حسب زمان کشیدن (جابجایی) حلقه.

## ۲.۲ بیشینه فشار حبابی

فرض کنید یک لوله باریک داخل مایعی قرار دارد که فشار داخل لوله بیش‌تر از فشار هوا است. این امر باعث تشکیل حبابی در پایین لوله (قسمتی که داخل آب است) می‌شود. چیزی که از جدا شدن حباب جلوگیری می‌کند کشش سطحی آب است، یعنی سطح آب در مقابل بزرگ شدن این حباب مقاومت می‌کند (شکل ۵).



شکل ۵: در این شکل یک حباب در حال تشکیل را می‌بینید. بسته به این که شعاع این حباب چقدر باشد، حباب پایدار یا ناپایدار خواهد بود.

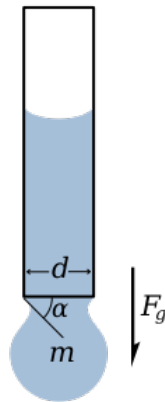
هر چه فشار بیشتر شود، شعاع حباب بیشتر می‌شود. هنگامی که اختلاف فشار کم است، حباب به صورت عرق چینی از یک کره خیلی بزرگ است، همین طور که فشار بالاتر می‌رود، حباب تبدیل به عرق چینی از یک کره کوچکتر می‌شود. اگر پوسته‌ای از سطح این کره را در نظر بگیریم می‌توانیم نیروهای وارد بر آن را بنویسیم و شعاع حباب را بر حسب اختلاف فشار داخل لوله با مایع و کشش سطحی مایع به دست آوریم.

$$r = \frac{2\gamma}{\Delta p} \quad (3)$$

در یک فشار آستانه، شعاع کره با شعاع داخلی لوله برابر می‌شود، اگر کمی فشار از این مقدار بیشتر باشد، کشش سطحی آب توانایی نگه داشتن حباب را نخواهد داشت، حباب متورم شده و شعاع آن بزرگ‌تر می‌شود و چون فشار هم چنان از فشار تعادلی بیشتر است (با زیاد شدن شعاع حباب باید فشار آن کم باشد) حباب به صورت ناپایدار و تشدید شده منبسط شده و از سر لوله جدا می‌شود. اگر ما فشار بیشینه حباب و شعاع داخلی لوله موئین را بدانیم، کشش سطحی از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\gamma = \frac{\Delta p R}{2} \quad (4)$$

## ۳.۲ بزرگ‌ترین قطره



شکل ۶: قطره‌ای در پایین یک مجرا تشکیل شده است. به این قطره نیروی وزن و کشش سطحی وارد می‌شود. کشش سطحی از لبه مجرا وارد شده و زاویه نیروی آن با لبه مجرا  $\alpha$  است. به دلیل در تعادل بودن قطره، می‌توان گفت این نیروها هم‌دیگر را خنثی می‌کنند.

تا به حال به این فکر کرده‌اید که چه چیزی اندازه یک قطره آب را تعیین می‌کند. کشش سطحی یکی از پارامترهای مؤثر در اندازه قطره آب است. کمیت دیگر اندازه سوراخی است که آب از آن بیرون می‌آید. فرض کنید آب به صورت خیلی آهسته‌ای از مجرای به شعاع داخلی  $r$  بیرون می‌آید. با گذشت زمان آب در پایین مجرا جمع شده و قطره‌ای تشکیل می‌شود که در طول زمان بزرگ می‌شود. به این قطره نیروهایی وارد می‌شود (شکل ۶). یکی از این نیروها، نیروی گرانش است، اما به دلیل جاذبه قطره با لبه مجرا قطره معلق مانده و سقوط نمی‌کند. این نیرو بر حسب کشش سطحی قابل محاسبه است. اگر زاویه لبه قطره با مجرا را  $\alpha$  فرض کنیم، این نیرو برابر است با

$$F = L\gamma \sin(\alpha) \quad (۵)$$

که  $L = 2\pi r$  محیط مجرا است. از طرفی این نیرو وزن قطره را خنثی می‌کند. لذا در صورتی که حجم قطره  $V$

باشد، رابطه زیر را بین کشش سطحی و حجم قطره خواهیم داشت

$$V = \frac{2\pi r \gamma}{\rho g} \sin(\alpha) \quad (6)$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی آب و  $g$  شتاب جاذبه زمین است. اگر دقت کنید، در رابطه بالا یک حد برای اندازه بزرگترین حجم قطره به دست می‌آید و آن وقتی است که  $\alpha = \frac{\pi}{4}$  در واقع داریم

$$V_{max} = \frac{2\pi r \gamma}{\rho g} \quad (7)$$

یعنی قطره می‌تواند تا این حجم بزرگ شده و همچنان آویزان بماند. اما اگر کمی دیگر به حجم آن اضافه شود، قطره می‌افتد. پس حجم قطره‌هایی که از مجرا آهسته پایین می‌آیند برابر با  $\frac{2\pi r \gamma}{\rho g}$  است.

## ۳ روش آزمایش

### ۱.۳ حلقه دو نوی

تمیزی د آزمایش‌های کشش سطحی بسیار مهم است. بشری را با آب خالی به خوبی بشوید<sup>۳</sup>. در این بشر آب ریخته و آن را روی جک قرار دهید.

حلقه دو نوی را نیز به خوبی بشوید. سعی کنید این حلقه را به خوبی به شکل یک دایره در آورید. دو طرف نخ را به این حلقه ببندید و وسط نخ را روی قلاب نیروسنج ببندید. محل اتصال دو سر نخ به حلقه را به گونه‌ای تنظیم نمایید که حلقه افقی و صاف بایستد. این کار کمی به دقت و تلاش نیاز دارد.

بشر پر از آب و جک را زیر این حلقه قرار دهید. پیچ جک را بپیچانید تا بشر بالا بیاید و حلقه داخل آب برود. حالا آرام آرام جک را پایین آورده تا حلقه به سطح آب رسیده و توسط آب کشیده شود. همین طور که جک را پایین می‌آورید نیروی نیروسنج را بخوانید تا بیشینه آن را پیدا کنید. چند بار با بالا پایین کردن جک، حلقه را از آب جدا کنید و نیروهای به دست آمده را در جدول ۱ یادداشت نمایید.

<sup>۳</sup> مایع ظرف‌شویی و صابون کشش سطحی آب را به شدت کم می‌کنند. لذا هنگام شست و شوای این مواد استفاده ننمایید.

$\bar{F}/N$	$F_3/N$	$F_2/N$	$F_1/N$

جدول ۱: نیروی بیشینه آب بر حلقه

با استفاده از یک کولیس قطر حلقه را در نقاط مختلف اندازه‌گیری کنید. مراقب باشید کولیس را روی حلقه فشار ندهید تا شکل دایروی آن از بین برود. نتایج را در جدول ۲ یادداشت نمایید.

$l/cm$ محیط حلقه	$\bar{d}/cm$	$d_3/cm$	$d_2/cm$	$d_1/cm$

جدول ۲: قطر و محیط حلقه دو نوی

در نهایت، وزن حلقه را (با نیروسنج به دست آورید) از نیروی بیشینه متوسط به دست آمده کم کنید تا بتوانید با استفاده از محیط حلقه و رابطه ۲، کشش سطحی را محاسبه کنید.

### ۲.۳ بیشینه فشار حباب

داخل فشارسنج (لوله U شکل) مقداری آب بریزید. شیلنگی را به انتهای این لوله U شکل متصل کرده و انتهای دیگر شیلنگ را به لوله موئین متصل کنید. شیلنگ دیگری نیز به سر دیگه فشارسنج متصل نموده و انتهای دیگر آن را به یک سرنگ پر از هوا بزنید.

بشری را با آب خالص، تمیز بشویید. داخل بشر را آب کرده و آن را مقابل فشارسنج قرار دهید. لوله موئین متصل به شیلنگ را توسط پایه بالای سطح آب قرار دهید. توجه کنید که لوله موئین باید به مقدار خیلی کمی در آب فرو رفته باشد تا فشار آب به دهانه پایینی آن وارد نشود.

هوای سرنگ را به آهستگی داخل فشارسنج خالی کنید و مقدار اختلاف ارتفاع آب داخل فشارسنج را بخوانید. با این کار می‌توانید فشار بیشینه حباب را اندازه‌گیری کنید. چند بار با خالی کردن هوای سرنگ داخل لوله موئین، بیشینه فشار حبابی را اندازه‌گیری کنید. توجه کنید برای به دست آوردن اختلاف فشار باید فشارهایی که از فشارسنج می‌خوانید را از فشار پایین لوله موئین در آب (مقدار فرو رفتن آن) کم نمایید. نتایج اندازه‌گیری خود را در جدول ۳ یادداشت نمایید. فشارها را بر حسب سانتی‌متر آب بنویسید.



$\bar{p}/pa$	$\bar{p}/cmH_2O$	$p_3/cmH_2O$	$p_2/cmH_2O$	$p_1/cmH_2O$

جدول ۳: بیشینه فشار حباب

برای به دست آوردن اختلاف فشار بر حسب پاسکال  $pa$ ، چگالی آب را  $1000 \frac{kg}{m^3}$  و شتاب جاذبه زمین را  $g = 9.8 \frac{m}{s^2}$  بگیرید. در نهایت با استفاده از اختلاف فشار بیشینه حباب در جدول ۳ و اندازه‌گیری شعاع لوله موئین با استفاده از رابطه ۴، کشش سطحی آب را محاسبه کنید.

### ۳.۳ بزرگ‌ترین قطره

سرنگ‌ها را از آب خالص پر کرده و سعی کنید از آن‌ها (بدون سوزن)، قطره قطره آب خارج کنید. قطره‌ها را در بشری بریزید تا خیس نشوید. با استفاده از هر سرنگ آب را به صورت قطره‌قطره خارج کرده و تعداد قطرات را بشمارید. بر اساس میزان جابجایی پیستون سرنگ حجم آب خارج شده را خوانده و حجم هر قطره را تخمین بزنید. نتایج خود را در جدول ۴ یادداشت نمایید.

نوع سرنگ	$r/cm$	حجم آب خارج شده (cc)	تعداد قطرات خارج شده	حجم هر قطره (cc)

جدول ۴: اندازه قطره‌ها

بر اساس معادله ۷ اندازه قطره با شعاع مجرا رابطه مستقیم دارد. می‌توانید نمودار حجم قطره بر حسب شعاع را رسم نموده و با برازش خط مقدار  $\frac{2\pi\gamma}{\rho g}$  را پیدا نموده و از آن کشش سطحی را محاسبه نمایید.