قلم‌زنی در ایران

تغییر حالت قیر از مایع به جامد و از جامد به مایع، به صنعتگران قلم‌زن کمک می‌کند تا بدون سوراخ‌شدن فلز، بر روی آن نقش و نگارهای متنوعی ایجاد کنند.

فصل ۵

ویژگی‌های ماده

هنگامی که رفتار ماده را در حالت‌های گاز، مایع و جامد مورد بررسی قرار می‌دهیم، سؤال‌های زیادی مشابه سؤال‌های زیر برای ما مطرح می‌شوند :

چرا تغییر شکل جامدها مشکل است؟ چرا مایع‌ها شکل ظرف را به‌خود می‌گیرند؟ چرا قطره‌آبی که از شیر جدا می‌شود، درحین سقوط نیز قطره باقی می‌ماند؟ چرا گازها را می‌توان متراکم کرد، ولی مایع‌ها را نمی‌توان به‌آسانی متراکم کرد؟

شکل ۵ــ۱ــ مراحل سقوط یک قطره شیر و برخورد آن به سطح این مایع در لحظه‌های مختلف عکس‌برداری شده است.در عکس‌برداری از رنگ‌های متفاوت نور استفاده شده است.

این مشاهده‌ها و بسیاری پدیده‌های دیگر را، که در این فصل با آن‌ها آشنا خواهید شد، می‌توان باتوجه به نیروهای بین مولکول‌ها و چگونگی حرکت مولکول‌ها در داخل ماده توضیح داد.

۵ــ۱ــ حالت‌های مختلف ماده

می‌دانیم که مولکول‌ها کوچک‌ترین جزء سازنده ماده‌اند[۱]. اندازه اتم‌ها در حدود یک انگستروم ($A^\circ = ۱۰^{-۱۰} m$) است. اندازه مولکول‌ها بستگی به این امر دارد که از چند اتم تشکیل شده است. در فعالیت زیر می‌توانید اندازه یک مولکول روغن را برآورد کنید.

فعالیت ۵ـ۱

یک قطره روغن را روی سطح آب بچکانید. قطره روغن روی سطح آب گسترش می‌یابد. هرچه سطح آب وسیع‌تر باشد، گسترش روغن بیش‌تر است. این گسترش آن‌قدر ادامه می‌یابد تا در روی سطح آب لایه‌نازکی که ضخامت آن در حدود اندازهٔ یک مولکول است تشکیل شود. با اندازه‌گیری تقریبی مساحت روغن در روی سطح آب و نیز اندازه‌گیری حجم قطره (در فصل ۱ روشی برای اندازه‌گیری آن داده شده است) می‌توانید ضخامت لایه را برآورد کنید. ضخامت لایه برآوردی از اندازه مولکول روغن است.

ماده‌ها در حالت (فاز)های گاز، مایع و جامد یافت می‌شوند. اکنون به بررسی این حالت‌ها می‌پردازیم.

الف ــ گاز: در حالت گازی مولکول‌ها آزادانه به اطراف حرکت می‌کنند و با یکدیگر و با دیواره ظرف برخورد می‌کنند. فاصله مولکول‌ها در حالت گاز درحدود چند ده برابر فاصلهٔ آن‌ها در مایع و جامد است. ویژگی‌هایی را که در بالا شرح دادیم می‌توان تا حدودی با انجام فعالیت‌ها و مشاهده‌های زیر دریافت.

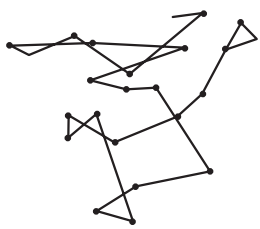
فعالیت ۵ـ۲

در یک ظرف نوشابه پلاستیکی را ببندید و سعی کنید آن را متراکم کنید. سپس آن‌را پر از آب کنید و دوباره سعی کنید آن را متراکم کنید. درکدام حالت متراکم کردن ظرف مشکل‌تر است؟

۱ــ در مواردی نیز که کوچک‌ترین جزء سازنده ماده اتم است برای سادگی از واژه مولکول برای این جزء استفاده کرده‌ایم.

از این فعالیت می‌توان دریافت که فاصله مولکول‌ها در حالت گاز بیش‌تر از فاصله آن‌ها در حالت مایع است.

وقتی یک گل خوشبو را وارد اتاق می‌کنید و یا این‌که در یک شیشه عطر را در اتاق باز می‌کنید، بوی خوش آن‌ها را می‌توانید در تمام اتاق حس کنید. برای توجیه این پدیده می‌توان گفت که وقتی مولکول هوا به مولکول عطر برخورد می‌کند، مسیر حرکت آن را تغییر می‌دهد. مولکول عطر پس از این برخورد به حرکت خود در امتداد یک خط مستقیم ادامه می‌دهد. برخورد بعدی با یک مولکول دیگر هوا مجدداً مسیر مولکول عطر را تغییر می‌دهد، در نتیجه، مولکول‌های عطر مطابق شکل (۵ــ۲) در مسیر خط شکسته حرکت می‌کنند. به‌این‌ترتیب مولکول‌های عطر در اثر برخورد با مولکول‌های هوا به قسمت‌های مختلف اتاق منتقل می‌شوند. این پدیده، **پخش** مولکول‌های عطر در اتاق نامیده می‌شود. از این مشاهده می‌توان دریافت که مولکول‌ها در هوا آزادانه به اطراف حرکت و با یکدیگر برخورد می‌کنند.



شکل ۵ــ۲

ب ــ مایع : فاصله مولکول‌ها در مایع در مقایسه با گاز بسیار کم است (در حدود $10^{-10}\,m$). در مایع مولکول‌ها به اطراف خود حرکت می‌کنند و به سهولت روی هم می‌لغزند.

فعالیت ۵ـ۳

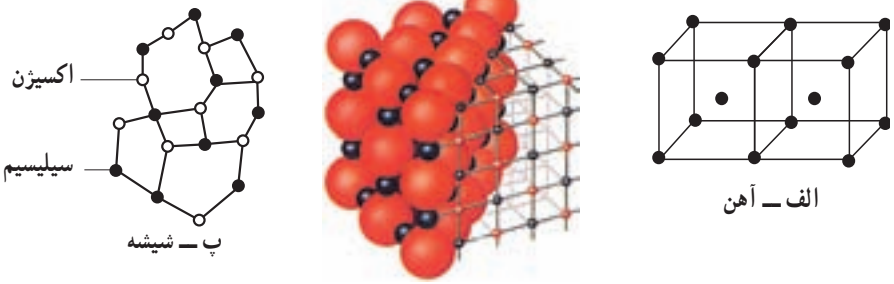
یک قطره جوهر را در داخل آب بریزید. مدتی صبر کنید. چه مشاهده می‌کنید؟ این مشاهده کدام ویژگی مایع را که در بالا شرح داده شد نشان می‌دهد؟

فعالیت ۵ـ۴

هنگامی که لیوانی را که پر از آب است کج می‌کنیم، آب به راحتی از آن می‌ریزد. این پدیده کدام‌یک از ویژگی‌های مایع را که در بالا ذکر شد نشان می‌دهد؟

پ ــ جامد: درجامد فاصله مولکول‌ها مانند فاصله آن‌ها در مایع است (یعنی، در حدود $10^{-10}\,m$). آن‌ها نمی‌توانند، مانند وضعیتی که در حالت‌های مایع و گاز دارند، آزادانه به اطراف حرکت کنند. بلکه، در جامد در مکان‌های خاصی قرار می‌گیرند و فقط می‌توانند در اطراف این مکان‌ها حرکت‌های نوسانی (رفت و برگشتی) بسیار کوچکی انجام دهند.

درجامدهای بلورین مولکول‌ها در طرح‌های منظمی مانند شکل‌های (۵ــ۳ الف و ب) در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و جامدهای بلورین از تکرار این طرح‌ها حاصل می‌شوند. فلزها و بیشتر سنگ‌ها مانند نمک‌طعام و الماس جامدهای بلورین هستند.



الف ــ آهن

ب ــ نمک طعام

پ ــ شیشه

شکل ۵ــ۳

جامدهای بلورین معمولاً هنگامی تشکیل می‌شوند که مایع را به آهستگی سرد کنیم. در این‌صورت مولکول‌ها فرصت دارند که در طرح منظمی خود رامرتب کنند.

در جامدهای بی‌شکل مانند شیشه، برخلاف جامدهای بلورین، مولکول‌ها، مانند شکل (۵ــ۳ــپ) در طرح منظمی درکنار یکدیگر قرار ندارند. این جامدها، معمولاً از سرد کردن سریع مایع به‌دست می‌آیند. با این عمل مولکول‌ها فرصت کافی پیدا نمی‌کنند که خود را در طرح منظمی مرتب کنند. در نتیجه، تا حدود زیادی در وضعیت نامنظمی که درحالت مایع داشتند باقی می‌مانند.

دیدیم که فاصله مولکول‌ها در گاز بسیار بیشتر از فاصله آن‌ها در جامد و مایع است. با معرفی کمیت بسیار مهمی به نام چگالی می‌توان درستی این امر را تحقیق کرد.

۵ــ۲ــ چگالی

ما در زندگی روزمره با جامدها، مایع‌ها و گازهای مختلف سروکار داریم. ممکن است بخواهیم جرم آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کنیم و ببینیم مثلاً درمیان مایع‌ها جرم یک حجم معین از کدام مایع بیشتر از دیگری است. برای پاسخ دادن به این سؤال لازم است به آزمایش (۵ــ۱) توجه کنید :

آزمایش ۵ـ۱

وسایل و مواد لازم: یک لیوان، مایع‌های مختلف مانند : آب، الکل‌صنعتی، روغن، مایع ظرف‌شویی، ... و ترازو

یک لیوان اختیارکنید و حجم داخلی آن را اندازه‌گیری کنید. سپس در آن مایع‌های مختلف بریزید و جرم آن‌ها را اندازه‌گیری و جدول زیر را تکمیل کنید.

مایع	حجم (V) m^3	(جرم m) kg	m/V kg/m^3
آب			
الکل صنعتی			
مایع ظرف‌شویی			
روغن			

نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

جرم یکای حجم از هر جسم، **چگالی** آن نامیده می‌شود و چگالی را با نماد ρ نمایش می‌دهیم. اگر جرم جسم m و حجم آن V باشد، چگالی آن از رابطه زیر به‌دست می‌آید :

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (۱ـ۵)$$

یکای چگالی kg/m^3 است. در آزمایش (۵ـ۱) با تقسیم کردن جرم هرمایع به حجم آن چگالی آن مایع را به‌دست آورده‌اید. چگالی مواد مختلف در سه حالت جامد، مایع و گاز در جدول (۵ـ۱) آمده است.

چگالی آب را که در آزمایش (۵ـ۱) به‌دست آمده است با آنچه که در جدول (۵ـ۱) برای آب ذکر شده مقایسه و در صورتی که تفاوتی مشاهده می‌کنید علت‌های ممکن را بیان کنید.

فعالیت ۵ـ۵

در روی بعضی اجناس (مانند روغن، شامپو، مایع ظرف‌شویی و ...) جرم یا حجم آن‌ها نوشته شده است. چگالی آن‌ها را اندازه‌گیری کنید.

فعالیت ۵ـ۶

چگالی یک جامد، مانند قاشق، کارد و ... را به‌دست آورید.

برای اندازه‌گیری حجم آن‌ها می‌توانید از یک استوانه مدرج حاوی آب استفاده کنید. با انداختن این اجسام در این استوانه حجم آب به اندازه حجم جسم افزایش می‌یابد.

جدول ۵ــ۱ــ چگالی برخی مواد

جامدها	چگالی (kg/m^3)	مایع‌ها	چگالی (kg/m^3)	گازها	چگالی (kg/m^3)
پلاتین	۲۱۴۰۰	جیوه	۱۳۶۰۰	دی‌اکسید کربن	۲
طلا	۱۹۳۰۰	آب ($4^\circ C$)	۱۰۰۰	اکسیژن	۱/۴۳
سرب	۱۱۳۰۰	نفت	۸۰۰ ـ ۹۵۰	هوا	۱/۲۹
نقره	۱۰۵۰۰	هوای مایع ($-194^\circ C$)	۹۲۰	هلیوم	۰/۱۸
مس	۸۹۳۰	ازت مایع ($-196^\circ C$)	۸۱۰	هیدروژن	۰/۰۹
آهن (فولاد)	۷۸۰۰	الکل (اتانول)	۷۹۰		
روی	۶۹۰۰	هلیوم مایع ($-269^\circ C$)	۱۲۵		
چوب	۲۵۰ ـ ۱۰۰۰				
آلومینیوم	۲۷۰۰				
یخ	۹۲۰				

* در مواردی که دما ذکر نشده است، چگالی مربوط به دمای $0^\circ C$ است.

فعالیت ۵ـ۷

ازمقایسه چگالی هوا درحالت‌های گاز و مایع و نیز هلیوم در این دو حالت چه نتیجه‌ای می‌توان درمورد فاصله مولکول‌ها در حالت‌های گاز و مایع به‌دست آورد؟

یکی از موارد استفاده از چگالی این است که می‌توان با استفاده از آن با داشتن هریک از دو کمیت جرم یا حجم دیگری رامحاسبه کرد.

مثال ۵ـ۱

جرم یک لیتر آب چند کیلوگرم است؟

حل: با استفاده از جدول (۵ـ۱) چگالی آب $۱۰۰۰ kg/m^۳$ است. یک لیتر برابر با $۱۰^{-۳} m^۳$ است. در نتیجه :

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

$$۱۰۰۰ = \frac{m}{۱۰^{-۳}}$$

که از آن مقدار $m = ۱kg$ به‌دست می‌آید.

فعالیت ۵ـ۸

اگر برای اندازه‌گیری جرم جسمی وزنه دراختیار نداشته باشید، چگونه می‌توانید جرم آن را تعیین کنید؟

فعالیت ۵ـ۹

حجم داخل یک سطل را با روش‌های مختلف اندازه بگیرید و نتیجه‌ها را با یکدیگر مقایسه کنید.

۵ـ۳ـ نیروهای چسبندگی

اگر به یک قطره آب که از شیر می‌چکد توجه کنیم، می‌بینیم که قطره پس از جدا شدن از شیر در تمام طول مسیر به‌صورت قطره باقی می‌ماند. مولکول‌های این قطره درحین سقوط از یکدیگر دور نمی‌شوند و متصل به یکدیگر باقی می‌مانند. برای توجیه این پدیده می‌توان گفت که بین مولکول‌های مایع یک نیروی ربایشی وجود دارد که **نیروی چسبندگی** نامیده می‌شود. این نیرو مولکول‌های مایع را در قطره متصل به یکدیگر نگاه می‌دارد. تأثیر این نیرو را می‌توان در پدیده‌های مختلف مشاهده کرد.

اکنون ممکن است این سؤال مطرح شود که چرا این نیروی ربایشی باعث نمی‌شود که مولکول‌ها

درهم فرو روند. برای توضیح‌دادن این امر می‌توان گفت که وقتی مولکول‌ها به‌هم بسیار نزدیک می‌شوند یک نیروی رانشی قوی بین آن‌ها ایجاد می‌شود که از نزدیک‌شدن بیش‌تر آن‌ها جلوگیری می‌کند. درواقع، این که ظرف حاوی آب در فعالیت (۵ــ۲) را به آسانی نمی‌توان متراکم کرد حاکی از این است که با متراکم‌کردن اندک ظرف، مولکول‌های آن، آن‌قدر به یکدیگر نزدیک می‌شوند که نیروی رانشی قوی که در بالا به آن اشاره شد بین مولکول‌ها ایجاد شود. این نیرو مانع متراکم کردن بیش‌تر آب می‌شود. نیروی رانشی بین مولکول‌ها عاملی است که مایع‌ها را تقریباً تراکم‌ناپذیر می‌کند. در نتیجه، با توجه به نکات بالا می‌توان گفت که در فاصله‌های خیلی کوتاه (درمقایسه با فاصله بین مولکول‌ها در حالت مایع) نیروی بین مولکولی رانشی است و در فاصله‌های بیشتر این نیرو ربایشی است. نیروهای بین مولکولی کوتاه بُرد هستند. یعنی، وقتی فاصله مولکول‌ها چند برابر فاصله بین مولکولی می‌شود نیروهای بین مولکولی بسیار کوچک و عملاً صفر می‌شوند.

فعالیت ۵ـ۱۰

باتوجه به مطالبی که در بالا درمورد نیروهای بین مولکولی بیان شد، توضیح دهید چرا مولکول‌های عطر در شکل (۵ــ۲) ناگهان تغییر مسیر می‌دهند؟

۵ــ۴ــ کشش سطحی

دیدیم که تشکیل قطره آب وجود نیروهای چسبندگی را نشان می‌دهد. ولی پدیده‌های دیگری نیز وجود دارند که به کمک آن‌ها می‌توان به‌وجود نیروهای چسبندگی پی‌برد. یکی از این پدیده‌ها اثر کشش‌سطحی است که اکنون به توصیف آن می‌پردازیم.

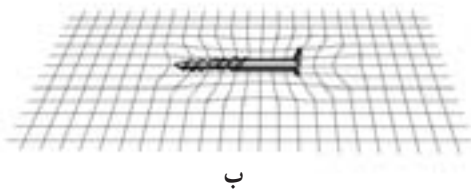
آزمایش ۵ـ۲

وسایل لازم: سوزن، دستمال کاغذی و یک ظرف آب

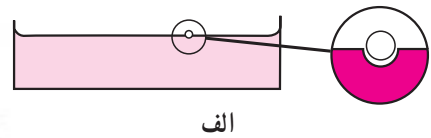
سوزن را بر روی یک تکه کوچک دستمال کاغذی قرار دهید و آن‌ها را روی سطح آب بگذارید. پس از مدتی دستمال خیس می‌شود و از سطح آب پایین می‌رود. سوزن بر روی سطح آب شناور باقی می‌ماند.

اگر به سطح آب توجه کنید، ملاحظه خواهید کرد که مطابق شکل (۵ــ۴ــ الف) در سطح آب یک فرورفتگی ایجاد می‌شود. این پدیده مشابه نگاهداری یک پیچ توسط یک پارچه توری است.

همان‌طور که در شکل (۵ــ۴ــ ب) دیده می‌شود، با قرار دادن پیچ یک فرورفتگی در پارچه توری ایجاد می‌شود.



ب



الف

شکل ۵ــ۴

شکل ۵ــ۵

همان‌طور که نخ‌های توری به یکدیگر متصل‌اند و پیچ را نگاه می‌دارند، مولکول‌های آب نیز مانند شکل (۵ــ۴ــ الف) با نیروهای چسبندگی یکدیگر را می‌ربایند و باعث می‌شوند که سطح آب مانند یک توری یا پوسته کشیده رفتار کند و سوزن را نگاه دارد. این رفتار سطح را کشش‌سطحی می‌نامند.

فعالیت ۵ ــ ۱۱

در شکل (۵ــ۵) حشره چگونه می‌تواند روی آب بایستد؟

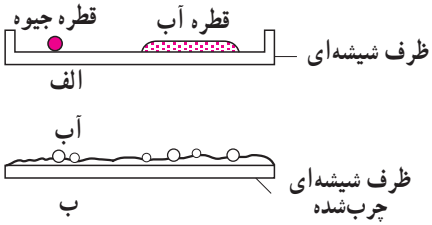
۵ــ۵ــ نیروهای چسبندگی‌سطحی

دیدیم که بین مولکول‌های یک ماده یک نیروی چسبندگی وجود دارد. این نیرو باعث می‌شود که پدیده‌های جالبی رخ دهد که در بحث‌های قبل دیدیم. هنگامی که دو ماده مختلف درتماس با یکدیگر قرار می‌گیرند نیز پدیده‌هایی اتفاق می‌افتند که اکنون به توصیف آن‌ها می‌پردازیم.

فعالیت ۵ـ۱۲

یک قطره آب را بر روی یک ظرف شیشه‌ای تمیز و خشک قرار دهید. یک‌بار نیز سطح شیشه را با روغن چرب کنید و سپس قطره را روی سطح آن قرار دهید.
آزمایش بالا را با یک قطره جیوه بر روی یک ظرف شیشه‌ای تمیز تکرار کنید.
مشاهده‌های خود را به کلاس گزارش کنید و توجیه‌های خود را به‌بحث بگذارید.

درآزمایش اول قطره آب مطابق شکل (۵ـ۶ ـ الف) بر روی سطح پهن می‌شود. در این‌صورت می‌گویند آب سطح شیشه را تر می‌کند. در آزمایش دوم قطره آب مطابق شکل (۵ـ۶ ـ ب) به‌صورت کروی درمی‌آید. قطره جیوه بر طبق شکل (۵ـ۶ـ الف) بر روی ظرف شیشه‌ای به‌صورت کروی درمی‌آید.



شکل ۵ـ۶

برای توجیه این مشاهدات می‌توان گفت بین مولکول‌های آب و شیشه نیز نیرویی وجود دارد که نیروی **چسبندگی سطحی** نامیده می‌شود. در فعالیت اول نیروی چسبندگی سطحی بیش‌تر از نیروی چسبندگی است و آب بر روی سطح شیشه پهن می‌شود. در فعالیت دوم، نیروی چسبندگی سطحی کمتر از نیروی چسبندگی است و آب به‌صورت کروی درمی‌آید.

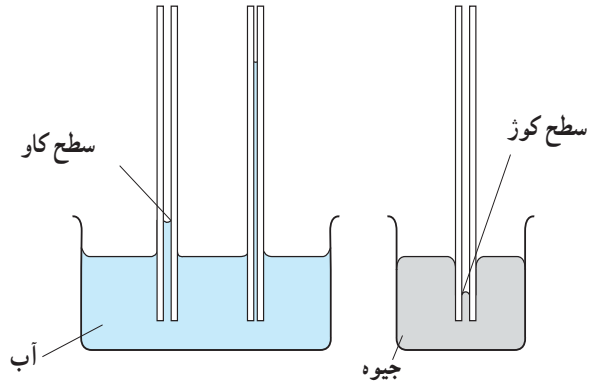
۵ـ۶ـ مویینگی

یکی دیگراز اثرهای نیروی چسبندگی سطحی، مویینگی است که اکنون به توصیف آن می‌پردازیم :

آزمایش ۵ـ۳

وسایل لازم: یک ظرف آب، یک ظرف جیوه، لوله‌های مویین با قطرهای متفاوت
لوله‌های مویین را وارد ظرف‌های آب و جیوه کنید و مشاهدات خود را یادداشت کنید و به کلاس گزارش دهید. دلیل‌های توجیهی خود را در کلاس به بحث بگذارید.

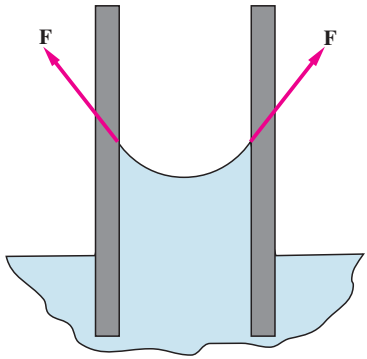
درآزمایش (۵ـ۳) می‌توان موردهای زیر را مشاهده کرد :
۱ـ سطح آب در لوله مویین دارای فرورفتگی است.
۲ـ آب در لوله مویین بالا می‌رود و سطح آن بالاتر از سطح آب ظرف قرار می‌گیرد.
۳ـ سطح جیوه در لوله مویین دارای برآمدگی است.



شکل ۵ــ۷

۴ــ جیوه در لوله مویین بالا می‌رود ولی سطح آن پایین‌تر از سطح جیوه در ظرف قرار می‌گیرد.

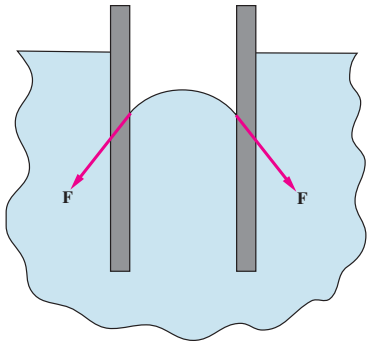
در مورد اول نیروی چسبندگی سطحی بیشتر از نیروی چسبندگی است. در نتیجه مولکول‌های آب به طرف سطح داخلی لوله مویین کشیده می‌شوند و در سطح آب مانند شکل (۵ــ۸) فرورفتگی ایجاد می‌شود.



شکل ۵ــ۸

از طرف سطح داخلی لوله مویین نیروی F مطابق شکل به آبی که با لوله در تماس است وارد می‌شود. این نیرو باعث بالا رفتن آب در لوله مویین می‌شود.

در مورد سوم، نیروی چسبندگی بیش‌تر از نیروی چسبندگی سطحی است. مولکول‌های جیوه که به سطح داخلی لوله مویین نزدیک‌اند به طرف مرکز لوله کشیده می‌شوند و در سطح جیوه مطابق شکل (۵ــ۹) برآمدگی ایجاد می‌شود.



شکل ۵ــ۹

از طرف سطح داخلی لوله مویین نیروی F مطابق شکل به جیوه‌ای که با لوله در تماس است وارد می‌شود. این نیرو باعث پایین رفتن جیوه در لوله‌مویین می‌شود.

فعالیت ۵ ـ ۱۳

آزمایشی طراحی کنید که در آن سطح آب در لوله‌مویین دارای برآمدگی باشد و سطح آن نسبت به سطح آب در ظرف پایین رود.

فناوری و کاربرد

مصالح ساختمانی از قبیل خاک و آجر و سیمان به سبب مویینگی آب را به درون خود می‌کشند. برای جلوگیری از این عمل، از قیر که آب در آن نفوذ نمی‌کند، استفاده می‌کنند و قبل از ساختن ساختمان زمین را قیراندود می‌کنند تا از نفوذ رطوبت به داخل ساختمان جلوگیری شود.

فعالیت ۵ ـ ۱۴

درگذشته در ایران به جای قیراندود کردن چگونه از نفوذ آب باران به داخل ساختمان جلوگیری می‌کردند؟

فعالیت ۵ ـ ۱۵

درگیاهان آب و مواد غذایی لازم دیگر بر اساس مویینگی از آوندهای چوبی بالا می‌روند. مواد دیگری را نام ببرید که در اثر این خاصیت آب در آن‌ها نفوذ می‌کند.

اکنون که با نیروهای بین مولکولی آشنا شده‌ایم به بررسی برخی خواص مایع‌ها و گازها می‌پردازیم.

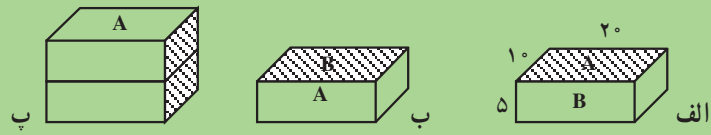
۵ــ۷ــ فشار

اگر با کفش روی برف بایستیم، مقداری در آن فرو می‌رویم. ولی اگر چوب اسکی به پا داشته باشیم، کمتر در برف فرو می‌رویم علت چیست؟ در این مثال، وزن تغییر نکرده است. بلکه سطح

تماس ما با برف افزایش یافته است. در حالتی که چوب اسکی به پا داریم، نیروی وارد بر سطح در مقایسه با حالتی که با کفش در برف ایستاده‌ایم در سطح بیش‌تری توزیع شده است و در نتیجه کمتر در برف فرو می‌رویم.

فعالیت ۵ـ۱۶

در شکل (۵ـ۱۰ـ الف) آجری به ابعاد $۵\,cm \times ۱۰\,cm \times ۲۰\,cm$ نشان داده شده است. مساحت وجه A برابر $۲۰۰\,cm^۲$ و مساحت وجه B برابر $۱۰۰\,cm^۲$ است. سطح مقداری ماسه‌نرم را صاف کنید و آجر را از وجه B روی آن قرار دهید. (شکل ۵ـ۱۰ـ ب) مقدار فرورفتگی آجر را در شن اندازه‌گیری و یادداشت کنید. سپس آجر را از وجه A روی ماسه قرار دهید و آجر یکسان دیگری را روی آن بگذارید (شکل ۵ـ۱۰ـ پ). مقدار فرورفتگی را مجدداً اندازه‌گیری و یادداشت کنید. مشاهده خود را به کلاس گزارش دهید و توجیه آن را به بحث بگذارید.



شکل ۵ـ۱۰

از فعالیت (۵ـ۱۶) مشاهده خواهیم کرد که مقدار فرورفتگی در دو حالت یکسان است. علت این است که در آزمایش دوّم، هم وزن را دوبرابر کرده‌ایم و هم سطح تماس را. در نتیجه، نیرویی که به هر بخش از سطح تماس وارد می‌شود مانند حالت اول است. کمیتی که ما در این‌جا با آن سروکار داریم، اندازهٔ نیروی عمودی وارد بر واحد سطح است که **فشار** نامیده می‌شود. اگر اندازه نیروی عمود بر سطح A برابر F باشد، فشار وارد بر سطح A با رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$P = \frac{F}{A} \qquad (۲ـ۵)$$

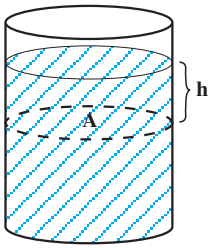
واحد فشار در SI، $N/m^۲$ است که پاسکال (Pa) نامیده می‌شود.

دراین رابطه اگر F و A را دوبرابر کنیم، فشار P تغییر نمی‌کند.

فعالیت ۵ـ۱۷

چرا پاشنه نوک‌تیز به کف چوبی اتاق آسیب می‌رساند؟

۵ــ۸ــ محاسبه فشار در مایع‌ها



شکل ۵ــ۱۱

برای محاسبه فشار در داخل مایع‌ها، مایعی را با چگالی ρ در داخل یک ظرف مطابق شکل (۵ــ۱۱) درنظر می‌گیریم. وزن مایعی که در بالای سطح A در عمق h از سطح مایع قرار گرفته است فشاری را در این سطح ایجاد می‌کند که اکنون به محاسبه آن می‌پردازیم :

جرم مایع موجود در بالای سطح A برابر است با :

$$m = \rho V = \rho hA$$

وزن این بخش از مایع برابر با ρhAg است. در نتیجه، فشار حاصل از مایعی که در بالای A قرار دارد در این‌عمق برابر است با :

$$P = \frac{\rho hAg}{A}$$

$$P = \rho gh \qquad (۵ــ۳)$$

مثال ۵ــ۲

در داخل ظرف شکل (۵ــ۱۱) به ارتفاع ۲۰cm آب ریخته‌ایم. فشار ناشی از مایع در ته‌ظرف چه‌قدر است؟

حل:

$$P = \rho gh = ۱۰۰۰ \times ۹/۸ \times ۰/۲ = ۱۹۶۰ Pa$$

رابطه (۵ــ۳) نشان می‌دهد که فشار ناشی از مایع ساکن فقط به عمق از سطح آزاد مایع بستگی دارد و نقاط هم‌عمق هم‌فشارند. هم‌چنین، هرچه عمق بیشتر شود فشار مایع افزایش می‌یابد. این امر را در هنگام شناکردن در زیر آب حس می‌کنیم.

فعالیت ۵ــ۱۸

یک قوطی خالی را انتخاب و آن را در عمق‌های مختلف سوراخ کنید. سپس آن‌را پر از آب کنید. مشاهده‌های خود را توجیه کنید.

رابطه (۵ــ۳) را می‌توان برای گازها نیز به‌کار برد. یعنی، اگر گاز در داخل محفظه‌ای محبوس باشد، فشار ناشی از وزن گاز از این رابطه به‌دست می‌آید. ولی، چون چگالی گازها خیلی کم است،

هنگامی‌که ارتفاع گاز داخل محفظه کوچک است، اختلاف فشار در نقاط مختلف داخل محفظه ناچیز است و در نتیجه، فشار را در این موارد می‌توان در تمام نقاط گاز یکسان درنظر گرفت.

۵ــ۹ــ فشار هوا

هوا گازی است که اطراف کرهٔ زمین را اشغال کرده است و در زندگی جانداران و گیاهان نقش اساسی و حیاتی دارد. در اثر وجود هوا پدیده‌های متفاوتی در سطح زمین ایجاد می‌شود که در این‌بخش و بخش‌های بعد به بررسی برخی از آن‌ها می‌پردازیم.

در بخش قبل دیدیم که فشار ناشی از وزن گاز، در مواردی که ارتفاع آن کم است، ناچیز است. در مورد جو زمین ارتفاع هوا زیاد است و فشار ناشی از آن قابل ملاحظه است. این فشار، فشار هوا نامیده می‌شود.

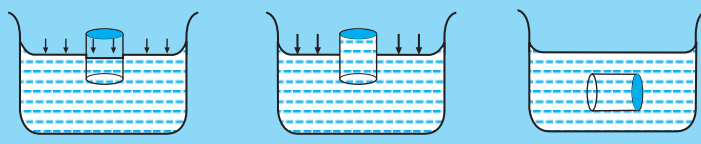
فعالیت ۵ـ۱۹

در داخل یک بطری پلاستیکی مقدار کمی آب‌جوش بریزید و در آن را محکم ببندید. سپس آب سرد روی آن بریزید. مشاهده خود را به کلاس گزارش کنید و علت را در کلاس به بحث بگذارید.

آزمایش ۵ـ۴

وسایل لازم: یک لیوان، یک ظرف

در ظرفی آب بریزید و لیوان را مطابق شکل (۵ــ۱۲ــ الف) در داخل ظرف قرار دهید. سپس درحالی که دقت می‌کنید هوا به داخل لیوان وارد نشود، انتهای آن را مطابق شکل (۵ــ۱۲ــ ب) بیرون آورید. مشاهده خود را یادداشت کنید. سپس لیوان را به‌صورت وارونه مطابق شکل (۵ــ۱۲ــ پ) وارد آب کنید. چه مشاهده می‌کنید؟ توجیه‌های خود را در کلاس به بحث بگذارید.



الف ب پ

شکل ۵ــ۱۲

در این آزمایش مشاهده می‌کنید که درحالت اول آب مطابق شکل (۵ــ۱۲ــ ب) درون لیوان باقی می‌ماند. چه عاملی مانع پایین آمدن آب در لیوان وارونه می‌شود؟ هوا به سطح آب درون ظرف نیرو وارد می‌کند و آب را در درون لیوان نگاه می‌دارد. در شکل (۵ــ۱۲ــ پ)، هوای داخل لیوان که خارج نشده است نیز به سطح آب نیرو وارد می‌کند و مانع بالا رفتن آن می‌شود. در واقع اگر به طریقی می‌توانستیم هوای داخل لیوان را خالی کنیم، آب در داخل لیوان بالا می‌رفت.

فعالیت ۵ ــ ۲۰

هنگامی که با نی نوشابه می‌نوشیم، چرا نوشابه از نی بالا می‌آید؟

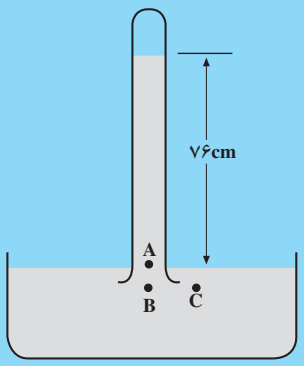
فعالیت ۵ ــ ۲۱

آزمایش (۵ــ۴) را با یک لیوان پلاستیکی انجام دهید. اگر درحالت (ب) ته لیوان را سوراخ کنید چه اتفاقی می‌افتد؟ مشاهده خود را توجیه کنید.

آزمایش ۵ ــ ۵

وسایل لازم: یک لوله آزمایش بلند (در حدود یک متر)، یک ظرف حاوی جیوه.

لوله را پر از جیوه کنید و در حالی که سر آن را با انگشت مسدود کرده‌اید، لوله را وارونه کنید و درون ظرف حاوی جیوه فرو برید و انگشت خود را از آن دور کنید. مشاهدات خود را به کلاس گزارش دهید. (چون جیوه سمی است و ممکن است جذب پوست شود، آزمایش را با یک دستکش پلاستیکی انجام دهید.)



شکل ۵ــ۱۳

در این آزمایش نیز جیوه درون لوله آزمایش وارونه باقی می‌ماند. ولی برخلاف آزمایش (۵ــ۴) که در آن آب تمام لیوان وارونه را پُر می‌کرد، در این‌جا قسمتی از بالای لوله وارونه خالی می‌ماند. چون درحین آزمایش مانع واردشدن هوا به داخل لوله آزمایش شده‌ایم، در این‌قسمت خلأ خواهیم داشت. اگر این آزمایش در سطح دریای آزاد انجام شود، ارتفاع ستون جیوه ۷۶ سانتی‌متر خواهد شد. اگر آزمایش در محلی که بالاتر از سطح دریای آزاد قرار دارد انجام شود، ارتفاع ستون جیوه کمتر خواهد شد.

نتیجهٔ این آزمایش به سطح مقطع لوله‌آزمایش بستگی ندارد. یعنی اگر سطح مقطع لوله را تغییر دهیم (مثلاً اندازهٔ آن را دو برابر کنیم) ارتفاع ستون جیوه تغییر نخواهد کرد. (چرا؟)

اکنون می‌توانید فشار هوا را در سطح دریای آزاد تعیین کنید. در این محل، همان‌طورکه در آزمایش (۵ــ۵) دیدیم، ارتفاع ستون جیوه داخل لوله وارونه در شکل (۵ــ۱۳) برابر ۷۶ سانتی‌متر است. فشاری که ستون جیوه در سطح A ایجاد می‌کند برابر با فشار هوا در روی سطح جیوه در داخل ظرف است. زیرا، در غیراین‌صورت فشار در نقطه‌های هم عمق B و C در این شکل متفاوت خواهد بود و مایع بین این دو نقطه جریان خواهد یافت و چون این امر اتفاق نمی‌افتد باید فشار در سطح A و سطح جیوه در داخل ظرف برابر باشند. فشاری که ستون جیوه در سطح A ایجاد می‌کند، با استفاده از رابطه (۵ــ۳) و جدول (۵ــ۱) برابر است با :

$$P = \rho gh = ۱۳۶۰۰ \times ۹/۸۱ \times ۰/۷۶ = ۱/۰۱ \times ۱۰^{۵}\ Pa$$

این فشار یک آتمسفر (atm) نامیده می‌شود. در نتیجه، فشار هوا در سطح دریای آزاد برابر با $۱/۰۱ \times ۱۰^{۵}\ Pa$ یا یک آتمسفر است. متداول است که به جای محاسبه ρgh فشار را برحسب ارتفاع ستون جیوه (معمولاً برحسب میلی‌متر) بیان می‌کنند. بنابراین، فشار هوا در سطح دریای آزاد برابر با ۷۶۰ میلی‌متر جیوه (mmHg) است.

با افزایش ارتفاع از سطح زمین، فشار هوا کاهش می‌یابد. رابطه فشار هوا با ارتفاع از سطح زمین پیچیده است. ولی می‌توان نشان داد که تا ارتفاع ۲۰۰۰ متر از سطح زمین فشار هوا تقریباً به‌ازای هر ۱۰m یک‌میلی‌متر جیوه کاهش می‌یابد.

مثال ۵ــ۳

شهر تهران به‌طور متوسط در ارتفاع ۱۴۰۰ متر از سطح آزاد دریا قرار دارد، فشار هوا در آن چند میلی‌متر جیوه و چند پاسکال است؟

دیدیم که به ازای هر ۱۰m یک میلی‌متر جیوه از فشار هوا کم می‌شود، درنتیجه، فشار هوا در تهران ۱۴۰ میلی‌متر جیوه از فشار هوا در سطح آزاد دریا کمتر است. یعنی $760-140=620\,mmHg$ است.

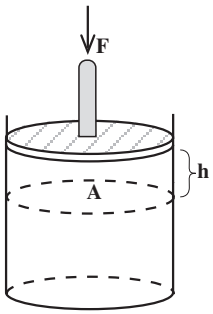
فشار هوا در تهران $= 0/620\times13600\times9/8=82633\,Pa$

فعالیت ۵ ـ ۲۲

آیا آزمایش (۵ـ۵) را می‌توان با آب انجام داد و فشار هوا را تعیین کرد؟

۵ـ۱۰ـ محاسبه فشار در مایع‌ها با درنظر گرفتن فشار هوا

در بخش (۵ـ۸) فشار ناشی از مایع را در عمق h محاسبه کردیم. در این‌بخش فشار مایع را هنگامی که یک نیروی خارجی اضافی، مثلاً نیروی ناشی از فشار هوا، به سطح مایع وارد می‌شود محاسبه می‌کنیم. برای این‌کار پیستونی را مطابق شکل (۵ـ۱۴) بر روی مایع قرار می‌دهیم فرض کنید نیروی F به پیستون وارد می‌شود.



شکل ۵ـ۱۴

در این حالت، نیروی وارد بر سطح مایع در این عمق برابر است با وزن مایع در بالای این سطح (ρghA) به‌علاوه نیروی F. در نتیجه، فشار در این عمق برابر است با :

$$P=\frac{\rho ghA+F}{A}$$

$$P=\rho gh+\frac{F}{A} \qquad (۴ـ۵)$$

یعنی، با اعمال نیروی F، فشار در تمام نقاط مایع به اندازهٔ $\frac{F}{A}$ افزایش می‌یابد.

مثال ۵ ـ ۴

فرض کنید که در مثال (۵ـ۲) یک پیستون با جرم ناچیز بر روی آب قرار دهیم و یک وزنه ۲۰۰ کیلوگرمی بر روی آن بگذاریم. فشار مایع (ناشی از وزنه و وزن مایع)

در ته ظرف چه‌قدر است؟ فرض کنید که سطح مقطع پیستون $۲۰۰cm^۲$ است.

حل: با استفاده از رابطهٔ (۵ــ۴) داریم :

$$P = \rho gh + \frac{F}{A}$$

$$= ۱۹۶۰ + \frac{۲۰۰ \times ۹/۸}{۲۰۰ \times ۱۰^{-۴}} = ۹۹۹۶۰ Pa$$

مشاهده می‌شود که دراین مثال عمدهٔ فشار از وزنه ۲۰۰ کیلوگرمی حاصل شده است.

اگر درشکل (۵ــ۱۱) در بالای مایع هوا وجود داشته باشد، به سطح آزاد مایع نیرو وارد می‌کند و در نتیجه فشار حاصل از آن، که همان فشار هواست، را نیز باید در رابطه (۵ــ۳) منظورکنیم.

بنابراین، با استفاده از رابطه (۵ــ۴) داریم

$$P = P_۰ + \rho gh \qquad (۵ــ۵)$$

این فشار، فشار کل و یا فشار مطلق در عمق h از سطح مایع نامیده می‌شود. از این به بعد هر جا که در مورد فشار مایع یا گاز صحبت می‌شود، منظور فشار کل است.

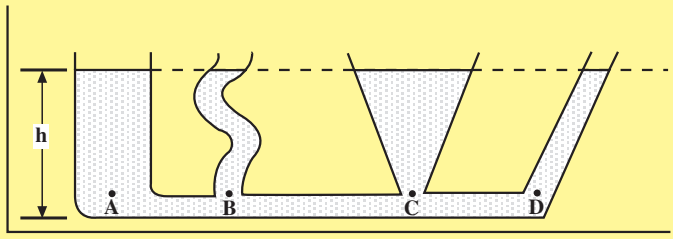
تمرین ۵ــ۱

الف ــ فشار ناشی از آب در عمق ۴ متری یک استخر چه‌قدر است؟

ب ــ فشار کل در این عمق چه‌قدر است؟

مثال ۵ــ۵

همان‌طور که در شکل (۵ــ۱۵) نشان داده شده است، ظرف‌های مختلف به یکدیگر متصل شده‌اند. در این ظرف مایع می‌ریزیم. سطح آزاد مایع در تمام ظرف‌ها در یک



شکل ۵ــ۱۵

ارتفاع قرار می‌گیرند. با توجه به رابطه (۵ــ۵) علت این امر را توضیح دهید.

حل: اگر سطح آزاد مایع در این ظرف‌ها در یک ارتفاع نباشند، بر طبق رابطه (۵ــ۵) باید فشار مایع در نقاط A، B، C و D متفاوت باشد و این امر باعث می‌شود که مایع جریان یابد. چون این امر اتفاق نمی‌افتد باید سطح‌های آزاد هم‌ارتفاع باشند.

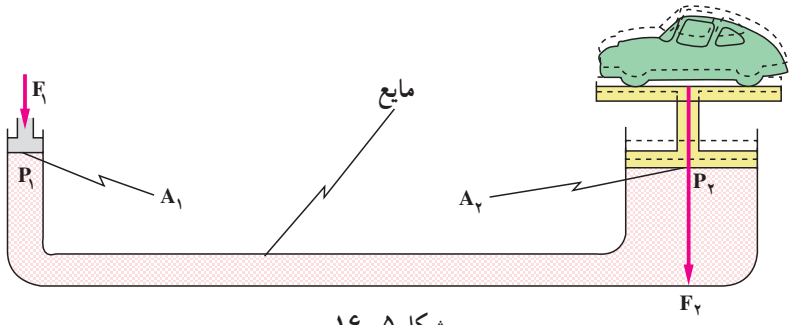
ملاحظه می‌شود که در رابطه (۵ــ۴) فشارمایع در تمام نقاط به اندازهٔ $\frac{F}{A}$ افزایش یافته است. به همین‌ترتیب در رابطه (۵ــ۵) فشار تمام نقاط مایع به اندازهٔ فشار هوا افزایش یافته است. این نتیجه‌ها نمونه‌هایی از کاربرد اصل پاسکال است. برطبق این اصل **فشار وارد بر مایع محصور بدون کاهش به تمام قسمت‌های مایع و دیواره‌های ظرف منتقل می‌شود.**

یکی از کاربردهای مهم اصل پاسکال، بالابر هیدرولیکی است.

فناوری و کاربرد

بالابر هیدرولیکی: از این بالابر برای بالابردن اجسام سنگین، مثلاً اتومبیل (برای پنچرگیری و یا تعویض چرخ‌ها)، استفاده می‌شود.

طرح ساده این بالابر در شکل (۵ــ۱۶) نشان داده شده است.



شکل ۵ــ۱۶

هنگامی که نیروی F_2 برابر با وزن اتومبیل به پیستون سمت راست وارد می‌شود، بنا بر اصل پاسکال فشار حاصل از آن که برابر $\frac{F_2}{A_2}$ است به تمام نقاط مایع، از جمله به سطح زیر پیستون سمت چپ، منتقل می‌شود. برای خنثی‌کردن نیروی حاصل از آن

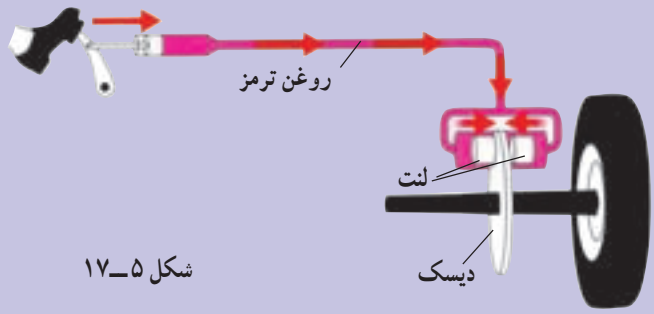
باید نیروی F_1 به این پیستون وارد شود. فشار حاصل از این دو نیرو باید با یکدیگر برابر باشند. در نتیجه :

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

بر طبق این رابطه اگر A_2 خیلی بزرگ‌تر از A_1 باشد، F_2 نیز باید بسیار بزرگ‌تر از F_1 باشد. در نتیجه، می‌توان اجسام سنگین را با نیروی کمی بالا برد.

تمرین ۵ـ۱۰

در شکل زیر دستگاه ترمز اتومبیل نشان داده شده است. توضیح دهید که این دستگاه چگونه عمل می‌کند.

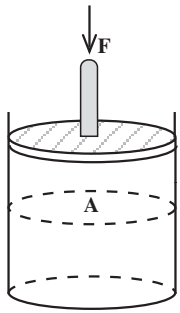


شکل ۵ـ۱۷

۵ ـ ۱۱ـ فشار درگازها

در حالی‌که با انگشت خود دهانه یک سرنگ را بسته‌اید، با حرکت پیستون آن هوای داخل سرنگ را فشرده کنید. چه حس می‌کنید؟ درهنگام باد کردن لاستیک دوچرخه، چرا رفته‌رفته انجام این کار مشکل‌تر می‌شود؟ چرا وقتی پیچ باد دوچرخه را شل می‌کنیم، باد آن خالی می‌شود؟

مثال‌های بالا و مثال‌های مشابه نشان می‌دهند که هوای داخل سرنگ و لاستیک‌ها دارای فشارند. در این حالت‌ها فشار را چگونه می‌توان محاسبه کرد؟ برای انجام این کار گازی را در نظر می‌گیریم که مطابق شکل (۵ـ۱۸) داخل یک محفظه قرار دارد و از طریق پیستون نیروی F به آن وارد می‌شود.



شکل ۵ـ۱۸

فشاری که این نیرو در زیر پیستون ایجاد می‌کند، برابر با $\frac{F}{A}$ است. بر طبق اصل پاسکال این فشار بدون کاهش به تمام قسمت‌های گاز و دیواره‌های ظرف منتقل می‌شود. بنابراین، با توجه به این که فشار ناشی از وزن گاز ناچیز است، فشار گاز در داخل ظرف با رابطه زیر داده می‌شود :

$$P = \frac{F}{A} \qquad (۶ـ۵)$$

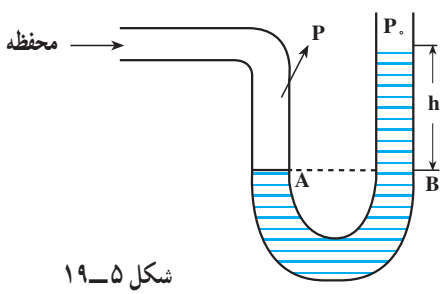
آیا اکنون می‌توانید به پرسش‌هایی که در ابتدای این بخش ذکر شد پاسخ دهید؟

فعالیت ۵ـ ۲۳

با دست خود خروجی یک تلمبه برای بادکردن چرخ دوچرخه را مسدود و هوای داخل آن را فشرده کنید. فشار گاز داخل تلمبه را برآورد کنید.

برای اندازه‌گیری فشار گاز از فشارسنج استفاده می‌شود.

فشارسنج: برای اندازه‌گیری فشار داخل یک محفظه آن را به یک لوله U شکل مطابق شکل (۵ـ۱۹) وصل می‌کنیم.



شکل ۵ـ۱۹

لوله حاوی یک مایع (معمولاً جیوه) با چگالی ρ است. اختلاف فشار هوا و فشار گاز داخل محفظه باعث می‌شود که مایع از دو طرف لوله U شکل در یک سطح قرار نگیرند. از اختلاف سطح آنها می‌توان این اختلاف فشار را به دست آورد. فرض کنید P_0 فشار هوا و P فشار گاز داخل محفظه است. چون فشار مایع در نقاط A و B یکسان است (چرا؟)، اختلاف فشار P_0 و P برابر با فشار حاصل‌از ارتفاع h از مایع است، یعنی :

$$P - P_0 = \rho gh \qquad (۷ـ۵)$$

با اندازه‌گیری h می‌توان مقدار ρgh رامحاسبه کرد. این کمیت، که برابر اختلاف فشار گاز درون محفظه و فشار هوا است، **فشار پیمانه‌ای** نامیده می‌شود. در اندازه‌گیری فشارخون و یا فشار هوای داخل لاستیک‌های اتومبیل فشار پیمانه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. (به‌عنوان مثال، فشار پیمانه‌ای هوای داخل تایر در لاستیک اتومبیل در حدود ۲۲۰kPa است). برای به‌دست آوردن فشار کل باید فشار پیمانه‌ای را با فشار هوا جمع کرد. (یعنی فشار کل هوای داخل تایر در حدود ۳۲۰kPa است.)

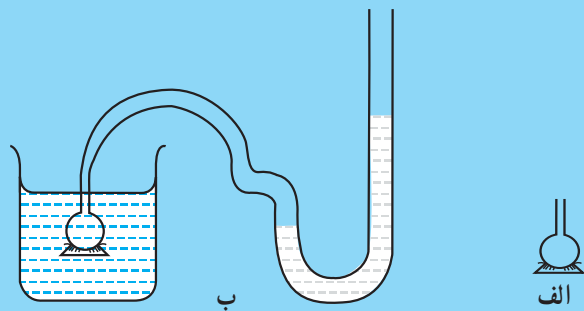
فعالیت ۵ـ۲۴

با استفاده از یک سرنگ و یک لوله باریک قابل‌خم‌کردن مانند نی‌نوشابه یا شیلنگ کولر و... یک فشارسنج بسازید. فشار گاز داخل سرنگ را با استفاده از آبی که داخل لوله می‌ریزید اندازه‌گیری کنید.

آزمایش ۵ـ۶

وسایل لازم: فشارسنج، قیف، پوسته قابل ارتجاع

به انتهای یک قیف یک پوسته قابل‌ارتجاع (مثلاً بادکنک) را مطابق شکل (۵ـ۲۰ـ الف) وصل کنید و انتهای دیگر قیف را مطابق شکل (۵ـ۲۰ـ ب) به فشارسنج متصل کنید.



شکل ۵ـ۲۰

با وارد کردن قیف در داخل مایع می‌توانید فشار مایع را اندازه‌گیری کنید. با انجام این آزمایش: ۱ـ چگونگی بستگی فشار به عمق ۲ـ یکسان بودن فشار در نقاط هم‌عمق را تحقیق کنید. هم‌چنین، تحقیق کنید که آیا فشار در هر نقطه در مایع به جهت‌گیری پوسته در آن نقطه بستگی دارد یا خیر؟

از این آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که اندازهٔ نیروی وارد بر پوسته به جهت‌گیری پوسته بستگی ندارد و فقط به فشار در مکانی که پوسته در آن قرار دارد وابسته است. یعنی، در یک عمق معین اندازهٔ نیروی وارد بر پوسته در حالتی که در وضعیت افقی قرار دارد و درحالتی که به‌صورت قائم قرارگرفته است یکسان است.

تمرین‌های فصل پنجم

۱ــ در هنگام پاک کردن تخته سیاه ذرات گچ به‌طور نامنظم به‌اطراف حرکت می‌کنند. حرکت نامنظم آن‌ها را چگونه می‌توان توجیه کرد؟

۲ــ جرم نفت موجود در یک بشکه پر نفت خانگی را تخمین بزنید.

۳ــ حجم یک گرم طلا چند سانتی‌متر مکعب است؟

۴ــ تخمین بزنید که هوای داخل کلاس شما چند کیلوگرم است. اگر تمام آن را مایع کنیم چه حجمی را اشغال می‌کند؟ (از جدول ۵ ــ ۱ استفاده کنید.)

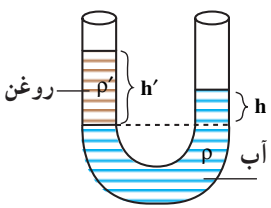
۵ــ قطعه‌ای به شما داده شده و ادعا می‌شود که از طلای خالص ساخته شده است. چگونه می‌توانید درستی این ادعا را بررسی کنید؟

۶ــ چرا پونز راحت‌تر از میخ به داخل چوب فرو می‌رود؟

۷ــ فشاری را که در هنگام ایستادن در روی زمین ایجاد می‌کنید برآورد کنید.

۸ــ در چه عمقی از دریا فشار ده برابر فشار جو در سطح دریا است (چگالی آب دریا را $۱۱۵۰\,kg/m^۳$ فرض کنید)؟

۹ــ در یک ظرف لوله U شکل حاوی آب مطابق شکل مقابل مقداری روغن ریخته‌ایم.



شکل ۵ــ۲۱

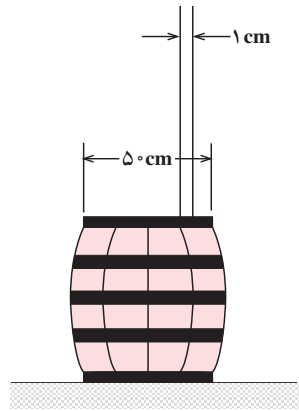
الف ــ نشان دهید :

$$\frac{h'}{h}=\frac{\rho}{\rho'} \qquad (۵ــ۷)$$

که در آن ρ' چگالی روغن و ρ چگالی آب و h' ارتفاع ستون روغن است.

ب ــ چگونه می‌توان با این روش چگالی یک مایع نامعلوم را تعیین کرد؟ این آزمایش را انجام دهید و درستی رابطه بالا را تحقیق کنید.

۱۰ــ آزمایش شکل (۵ــ۲۲) را پاسکال برای اولین بار انجام داد. لوله باریک و بلندی را به‌بشکه‌ای وصل کرد و در داخل لوله آب ریخت. هنگامی که ارتفاع آب در لوله به ۱۵/۳ متر رسید، درپوش بشکه دررفت. اگر قطر درپوش ۵۰cm باشد، در این لحظه چه نیرویی از طرف آب به درپوش وارد شده است؟ قطر داخلی لوله ۱cm است.



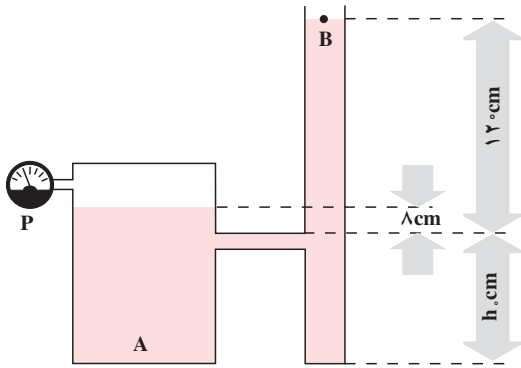
شکل ۵ــ۲۲

۱۱ــ فشار هوا را در محلی که زندگی می‌کنید برآورد کنید.

۱۲ــ اگر در مخزن شکل (۵ــ۲۳) آب بریزیم، وقتی سطح مایع از h_0 بالاتر می‌رود، هوا در داخل ظرف A به دام می‌افتد. اگر سطح مایع در ظرف A، ۸cm بالاتر از h_0 و در B، ۱۲۰cm بالاتر از h_0 باشد ؛

الف ــ فشارسنج چه عددی را نشان می‌دهد؟ (این فشارسنج فشار پیمانه‌ای را اندازه‌گیری می‌کند.)

ب ــ فشار کل گاز محبوس چه‌قدر است؟

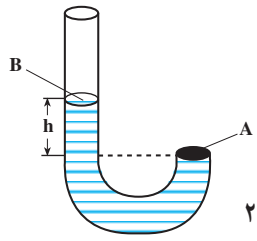


شکل ۵ــ۲۳

۱۳ــ در شکل (۵ــ۲۴) مایعی به چگالی ρ در داخل لوله U شکل ریخته شده و انتهای سمت‌راست آن با درپوشی بسته شده است. مایع تمام بخش سمت راست لوله را اشغال کرده است. اختلاف ارتفاع در نقاط A و B برابر h است.

الف ــ فشار مایع در A چقدر است؟

ب ــ اگر شعاع لوله r باشد، چه نیرویی از طرف مایع به درپوش A وارد می‌شود؟



شکل ۵ــ۲۴