بررسی مایع چرخان و قایق روی آن

زد. ساباتکا و ال. دوراک
ترجمه: کاظم نجفی، دبیر فیزیک از تکاب

چکیده

ایـن مقاله، روشـی سـاده و ارزان را برای تولید سـطح سـهموی مایع چرخان معرفی می‌کند. مایع مورد مطالعه آب است. بخش دوم مقاله مربوط به قایق روی سطح چرخان یک مایع است.

کلیدواژه‌ها: شکل سهموی، مایع چرخان، حرکت قایق

مقدمه

در زندگـی روزمـره همواره با سـطوح سـهموی مواجه می‌شویم. هنگام رانندگی از چراغ‌هایی استفاده می‌کنیم که به شکل سهموی هستند. آینهٔ سهموی بخشی از تلسکوپ نیوتون را تشـکیل می‌دهد. گزارش‌هایی در مورد سـطوح بازتاباننده صیقلی مایع به عنوان آینهٔ تلسـکوپ وجود دارد. دانش‌آموزان می‌توانند مثال‌های بسیار دیگری از سطوح سهموی پیدا کنند.

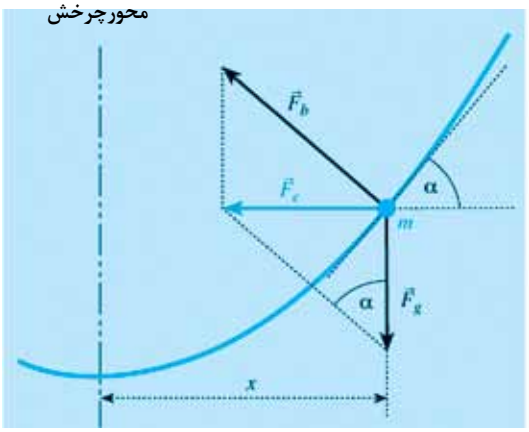
بدیهی است که مثال‌های زندگی روزمره برای دانش‌آموزان جذاب اسـت. در عین حـال، می‌توان دانش‌آمـوزان را با این واقعیت که یک مایع معمولـی در حال چرخش دارای چنین سـطحی اسـت شـگفت‌زده کرد. بنابراین، خوب است سطح مایع را اندازه‌گیری و نظریهٔ ارائه شده را تأیید کنیم. به همین صورت می‌توان توجه دانش‌آموز را به این پرسش معطوف کرد که اگر قایق کوچکی را بر روی سطح سهموی مایع چرخان قرار دهیم، چـه اتفاقی می‌افتد. آزمایش‌های انجام شـده با استفاده از مایعات چرخان، که در این مقاله توضیـح داده شده‌اند، در دوازدهمین نمایشـگاه ابتکارهای معلمان فیزیک سـال ۲۰۰۷ در پـراگ جمهـوری چک نیز ارائه و در شـرح کنفرانس نیز منتشـر گردیده‌اند ولی در آنجا مسـائل فقط به صورت مختصر ذکر شد و جزئیات نتایج تجربی و بحث مفصل در مورد مباحث نظری نیامده‌اند. بعضی تصویرهای جدید نیز برای این مقاله تهیه شـده است. این ابتکارها در یک سمینار بخش علوم برلین به سال ۲۰۰۸ ارائه شدند.

توصیف سادهٔ سطح سهموی مایع چرخان

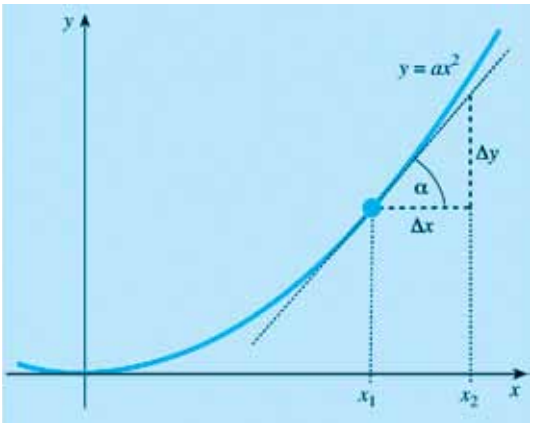
نظریهٔ سـهموی‌های مایع در بسـیاری از مقاله‌ها، مانند آنچـه در منابع ۵-۳ آمده اسـت، توصیف شـده‌اند. در اینجا تمام حالت‌های ممکن برای شـکل سـطح یک مایع چرخان را نمی‌آوریم بلکه توصیفی جایگزین را برای آن ارائه می‌دهیم که در سـطح دبیرستان قابل درک باشد (مثلاً در سمینارهای مخصـوص فیزیـک بـرای دانش‌آموزانـی کـه بـه فیزیـک علاقه‌مندند.)

این کار نسـخهٔ توسـعه یافته از کاری است که در کشور جمهوری چک ارائه شـده. (۲) ما شرایط را هم از نظر دستگاه مختصات لخت و هم از نظر دسـتگاه مختصات چرخان (یعنی غیـر لخت) شـرح می‌دهیم. در بسـیاری از کشـورها مفهوم دسـتگاه مختصات غیرلخت در برنامهٔ درسی دبیرستان مورد بررسی قرار نمی‌گیرد؛ با این حال، فکر می‌کنیم ارائهٔ دست‌کم توصیفی کوتاه از دسـتگاه مختصات چرخان ارزشـمند باشد.

بـه عنوان مثال، بحث در مورد قایق چرخـان از دید ناظری که بر سـطح یک مایع



شکل ۱: نیروهایی که بر یک مایع اثر می‌کنند.



شکل ۲: شکل فرضی سطح آب چرخان

می‌چرخد، برای مردمی که دست‌کم با مفهوم نیروی مرکز گریز آشنایی دارند، کمی ساده‌تر به نظر می‌رسد. شکل۱

به نظر ما ارائهٔ توصیفی از دستگاه‌های لخت و چرخان برای دانش‌آموزان و دبیران مفید خواهد بود. مهم‌ترین نتیجه‌ای که به آن نیاز داریم، این واقعیت است که نیروی مرکزگرا متناسب با فاصله از محور چرخش است.

بررسی در یک چارچوب مرجع لخت

اندکی آب به جرم m را در سطح آب به‌صورت جرم نقطه‌ای در نظر می‌گیریم. با فرض اینکه بخشی از آب به‌صورت یکنواخت در دایره‌ای به دور محور چرخش در حال دوران باشد، باید یک نیروی جانب مرکز F_c وجود داشته باشد که باعث حرکت جزء آب به این صورت شود. که مقدار آن از رابطهٔ معروف (۱) به‌دست می‌آید:

$$F_c = mR\omega^2 \qquad (۱)$$

در اینجا R فاصله از محور چرخش (که ما آن‌را با x نیز نشان می‌دهیم)، m جرم جزء آب ما و ω سرعت زاویه‌ای آب چرخان است. نیروی مرکز گریز مجموع همهٔ نیروهایی است که روی جرم عمل می‌کنند و عبارت‌اند از: نیروی جاذبهٔ گرانشی $F_g=mg$ و نیروی شناوری F_b که عمود بر سطح آب است. از شکل ۱ که تانژانت زاویهٔ α را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\tan\alpha = \frac{F_c}{F_g} = \frac{mx\omega^2}{mg} = x\frac{\omega^2}{g} \qquad (۲)$$

که در آن g شتاب گرانی زمین و x فاصله جزء آب از محور چرخش است.

اکنون باید شکلی را بیابیم که در این معادله صدق کند. می‌توانیم کار خود را با یک مشاهدهٔ کیفی شروع کنیم: هرچه x بزرگ‌تر باشد، مقطع سطح مایع دارای شیب بیشتری خواهد بود همان‌طور که از معادلهٔ (۲) نیز پیداست و شکل (۱) نیز نشان می‌دهد، این مقطع شبیه یک سهموی است (ساده‌ترین منحنی که دارای شکلی مشابه با شکلی است که دانش‌آموز می‌شناسد.) اما آیا واقعاً چنین است؟ برای ساده‌تر کردن درک مطلب فرض می‌کنیم که شکل سهموی باشد و سپس ثابت می‌کنیم که این فرض درست است. بنابراین، فرض کنیم که برش عمودی سطح مایع که شامل محور چرخش است، دارای شکل زیر باشد.

$$y=ax^2 \qquad (۳)$$

که در آن y ارتفاع از پایین‌ترین نقطهٔ سطح، a یک ثابت مثبت، و x فاصله از محور چرخش است.

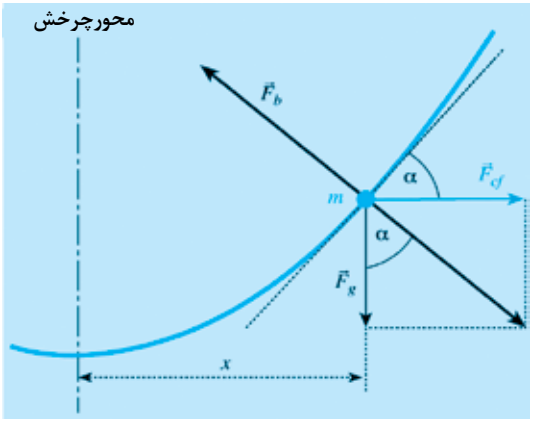
اکنون می‌توانیم با استفاده از شکل (۲)، tanα را محاسبه کنیم:

$$\tan\alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{ax_2^2 - ax_1^2}{x_2 - x_1} \qquad (۴)$$

$$= \frac{a(x_2 + x_1)(x_2 - x_1)}{x_2 - x_1} = a(x_2 + x_1) = 2ax$$

که در آن $x_2 = x_1 = x$

بنابراین، برای شکل مفروض ما همان‌طور که معادلهٔ (۲) ایجاب می‌کند، tanα با x متناسب است. ثابت کرده‌ایم که مقطع آب چرخان سهموی است. همچنین، به راحتی می‌توان



▲ شکل ۳: نیروی مرکز گریز (F_{cf})، گرانشی (F_g) و شناوری (F_b) که بر یک مایع در دستگاه مختصات چرخان وارد می‌شوند

میله‌ها	S	T(s)	$C_t(m^{-1})$	$C_e(m^{-1})$	δ_c
چوبی	+	۰/۶۳۵	٤/۹۹	٤/۹٤	۰/۹٪
	Δ	۰/٦٤۳	٤/۸٦	٤/٦۷	٤/۰٪
	□	۰/۷۲۲	۳/۸٦	۳/۸۳	۰/۸٪
فلزی	○	۰/۸۷۳	۲/٦٤	۲/٦٥	-۰/٦٪
	+	۱/۲۱۲	۱/۳۷	۱/۳٥	۲/۲٪

جدول ۱: نتیجه‌های تجربی. S نماد استفاده شده در نمودار، T دوره، C_t ضریب نظری، C_e ضریب تجربی، δ_c انحراف نسبی C_e و C_t

مقدار ثابت a را از مقایسه معادله‌های (۲) و (۴) به‌دست آورد:

$$a = \frac{\omega^2}{2g} \qquad (۵)$$

این بدان معناست که معادلهٔ (۲) را می‌توان به شکل $y = \omega^2 / (2g)x^2$ نوشت. معمولاً ارتفاع نسبت به پایین‌ترین نقطه در روی سطح را با h نمایش می‌دهند (به جای y). فاصله از محور عمودی (که برای آن از نماد x استفاده کردیم) را با نماد R نمایش می‌دهیم. بنابراین، به شکل آشنای معادله‌ای برای سطح مایع چرخان می‌رسیم که به صورت زیر است:

$$h = \frac{\omega^2}{2g} R^2 \qquad (۶)$$

که در آن h ارتفاع از پایین‌ترین نقطه بر روی سطح مایع و R فاصله از محور چرخش است.

بررسی در دستگاه مختصات غیرلخت

بحث کیفی از دیدگاه دستگاه مختصات چرخان برای دانش‌آموزان ساده است و می‌تواند به درک مفهوم نیروی جانب مرکز کمک کند؛ زیرا هر کسی که تاکنون سوار چرخ فلک یا هر سرگرمی مشابه در یک شهربازی شده باشد، این مفهوم را درک می‌کند.

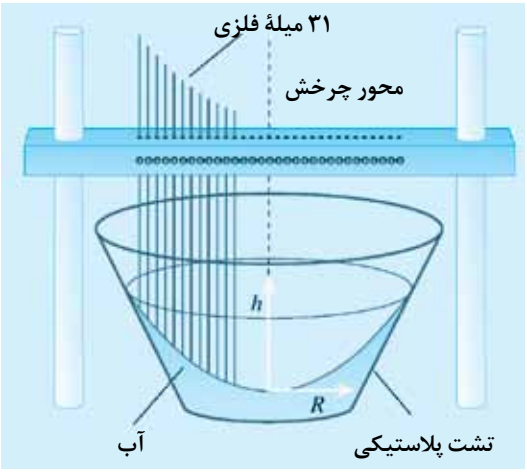
اگر شخصی که سوار چرخ‌فلک شده است، سعی کند شکل آب درون ظرف را توصیف کند و بخواهد از همان قاعده و قانون فیزیکی استفاده کند که در یک دستگاه مختصات لخت وجود دارد، مجبور است نیرویی به نام نیروی مرکز گریز را به توصیف خود بیفزاید؛ نیرویی که جسم را از مرکز چرخش دور می‌کند و دارای اندازهٔ متناسب با فاصله از مرکز چرخش است ولی نیروی گرانی هم وجود دارد که آب را به طرف پایین می‌کشد. شکل نهایی سطح، حاصلِ تقابل دو نیروست.

برای کمّی‌کردن موضوع، دوباره مقدار معین کوچکی از آب را در سطح آب فرض می‌کنیم. نیروی گرانشی F_g که بر این مقدار آب اثر می‌کند، در همه‌جا یکسان است. به عبارت دیگر، نیروی مرکز گریز F_{cf} با فاصله از محور چرخش نسبت مستقیم دارد (مقدار آن از همان رابطهٔ نیروی مرکز گریز یعنی $F_{cf}=mR\omega^2$ به‌دست می‌آید). برآیند این نیروها دارای انحراف از راستای عمودی است (همان‌طوری‌که در شکل ۳ می‌بینید) و سطح باید عمود بر آن باشد[۱]. البته این نیرو دارای همان مقدار نیروی شناوری است؛ در نتیجه، نیروی خالصی که بر یک مقدار معین آب عمل می‌کند برابر صفر است. زیرا مقدار آب موردنظر هنوز در دستگاه مختصات چرخان قرار دارد.

بقیهٔ آن مشابه حالت دستگاه مختصات لخت است؛ با این تفاوت که F_c باید با F_{cf} جایگزین شود. بنابراین دوباره به معادلهٔ (۶) می‌رسیم.

دستگاهی برای اندازه‌گیری سطح یک مایع چرخان

برای ساخت این دستگاه از دستگاه ارائه شده در مقابل باستا[۲] الهام گرفته‌ایم. [۵] دستگاه‌های ارائه شده در آن مقاله قادر بودند سهموی‌های جامد را اندازه‌گیری کنند. دستگاهی که ما در اینجا ارائه می‌کنیم، شکل سطح یک مایع در حال حرکت را اندازه‌گیری می‌کند. این روش دارای برتری است؛



شکل ۴: میله‌های استفاده شده برای اندازه‌گیری سطح مایع چرخان

شکل ۵: نمونهٔ نهایی دستگاه با استفاده از میله‌های فلزی

زیرا جامدکردن اجسام ممکن است خیلی مشکل باشد. مزیت روش و رویکرد ما این است که ما را قادر می‌سازد مستقیماً شکل را اندازه‌گیری کنیم و به‌وضوح آن‌را ببینیم.

وسیلهٔ اندازه‌گیری ما (همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود) متشکل است از ۳۱ میلهٔ نازک که موقعیت آن‌ها را می‌توان طوری تنظیم کرد که انتهای پایینی‌شان با سطح آب تماس داشته باشد. در این مورد، ما سطح سهموی آب را در یک تشت پلاستیکی معمولی ایجاد کردیم. یک میز چوبی با یک تشت پلاستیکی بر روی یک موتور دارای سرعت قابل تنظیم قرار داده می‌شود (شکل ۵). هر یک از میله‌های فلزی عمودی در انتهای پایینی خود حالتی میخ مانند دارند. وقتی که آب با سرعت زاویه‌ای ثابت ω می‌چرخد، باید مدتی صبر کنیم تا سطح خود را به حالت تثبیت شده برساند. سپس باید میله‌ها را یکی‌یکی تنظیم کنیم. ابتدا همهٔ میله‌ها را در بالا قرار می‌دهیم. تجربه نشان می‌دهد که بهتر است ابتدا میله‌ها را با سطح آب تماس دهیم و سپس آن‌ها را اندکی بالا بکشیم تا هیچ تماسی بین آب و میله‌ها نباشد. اکنون انتهای میله‌ها شکل سطح را نسخه‌برداری می‌کنند و یک سهموی کاملاً قابل رویت را می‌سازند. به عنوان یک پروژهٔ دانش‌آموزی حتی می‌توان از ساختمان ساده‌تر و ارزان‌تری نیز استفاده کرد که در شکل ۶ می‌بینید. این روش نتیجهٔ آزمایش را بهتر نشان می‌دهد. فقط بعضی وقت‌ها مشکل انعطاف‌پذیری پیچ‌ها و خم‌شدن آن‌ها پیش می‌آید. برای تأیید تجربی لازم است دورهٔ تناوب T (یا بسامد یا سرعت زاویه‌ای) را بدانیم. در استفاده از موتورهای قدیمی این موضوع می‌تواند ایجاد مشکل کند؛ زیرا این موتورها دارای نوسان سرعتی و فاقد سرعت‌سنج مناسب‌اند. بنابراین، ما بسامد را از طریق رایانه و فوتوترانزیستور متصل به میکروفون ورودی اندازه‌گیری را انجام دادیم.

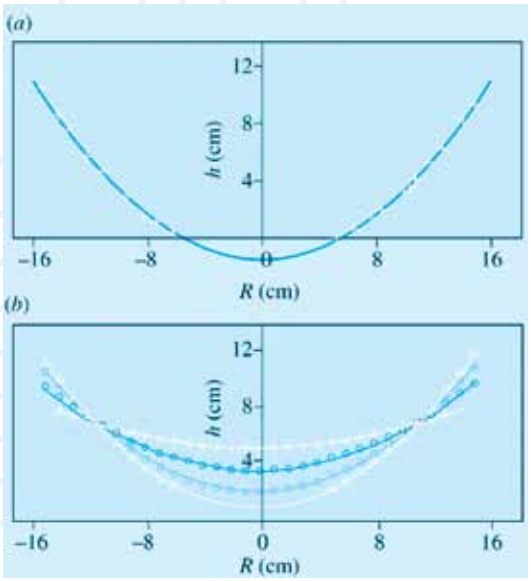
مقایسهٔ نظریه و آزمایش

ضریب نظری معادلهٔ ۶ را ـ که با c_t نمایش می‌دهیم ـ با ضریب تجربی به‌دست آمده از برازش انتهای میله‌ها با یک سهموی مقایسه می‌کنیم. ضریب تجربی را با c_e نمایش داده‌ایم. بعضی از نتایج تجربی را در جدول ۱ و شکل ۷ آورده‌ایم[۳].

$$c_t = \frac{\omega^2}{2g} = \frac{2\pi^2}{g}\frac{1}{T^2} \qquad (۷)$$

نتایج تجربی به خوبی با مدل نظری سازگاری دارند. انحراف نسبی بیشینه ۴ درصد است که با در نظر گرفتن سادگی چیدمان آزمایش نتیجه خوبی است. حتی دستگاه چوبی استفاده شده نیز (تصویر ۷ الف) نتایج خوبی را نمایش می‌دهد.

شـکل ۶: نمونهٔ اصلی دستگاه که در آن از میله‌های چوبی استفاده شده است.



شـکل ۷: (الـف) نقـاط سـطح مایـع چرخـان و منحنی درون‌یابـی شـده متناظر (سـهمی) که بـا میله‌هـای چوبی اندازه‌گیری شـده است. (ب) نقطه‌های سطح مایع چرخان بر روی منحنی درون‌یابی شده متناظر (سهمی)

قایقی روی مایع چرخان

با نگاه به شکل سطح مایع چرخان ممکن است این پرسش مطرح شود که اگر شـئ کوچکی (مثلاً یک قایق کوچک) در روی سـطح آب چرخان قرار گیرد، چه اتفاقی می‌افتد. حالتی شبیه این شـرایط را می‌توان در داستان «سقوط در گرداب» نوشـتهٔ ادگار آلن پو مشـاهده کـرد که در آنجا نیز مسـئله، خلاص‌شـدن از یک گرداب شدید و سـهمویِ چرخانِ سطح آن اسـت. البته گرداب و سـطح سـهموی چرخان دو مسئلهٔ متفاوت‌اند ولی شـباهت‌هایی خاص بین این دو شرایط وجود دارد. این داستان مسئله را به شکل یک موضوع میان رشته‌ای درمی‌آورد.

زمینه‌های کیفی حرکت قایق

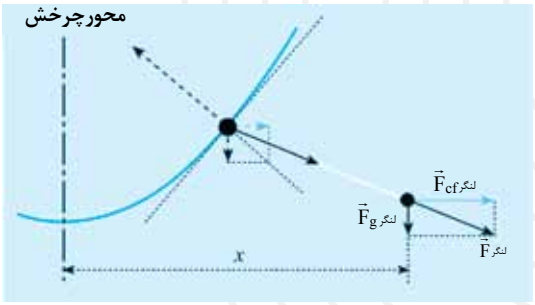
مسئله خیلی پیچیده‌تر از آن است که در سطح دبیرستان بـه صورت کمـی با آن برخورد شـده اسـت (در واقـع ما از راه‌حل‌های کمی منتشر شده در این باب بی‌خبریم) ولی حتی یک بحث کیفـی نیز می‌تواند ما را به نتایـج جالبی رهنمون شود و می‌تواند با آزمایش انجام شده مورد مقایسه قرار گیرد.

قایـق را با یک مدل سـاده مثلاً یک کـره و یا یک توپ کوچـک شبیه‌سـازی کرده و مرکز جرم این کـره را دقیقاً در سـطح مایع فرض می‌کنیم. شـرایط مشابه شـرایط حاکم در شکل ۱ یا ۳ است. قایقی که درست روی سطح آب قرار گرفته باشد، موقعیت خود را نسـبت به آب موجود در پیرامون خود حفظ می‌کند. اکنـون قایقی را در نظر می‌گیریم که اندکی از جرم آن در زیر سـطح آب قرار گرفته است. این جرم می‌تواند لنگر سـنگینی باشد که به یک طناب دراز در زیر قایق متصل شده است. خواهیم دید که چنین قایقی به سمت بالا و دور از محور چرخش کشیده خواهد شد.

ساده‌تر اسـت که اثرهای مربوطه را در دستگاه مختصات چرخان با استفاده از مفهوم نیروهای مرکز گریز توضیح دهیم. لنگر نسـبت به قایق در فاصلـه دورتری از محور چرخش قرار گرفته اسـت. بنابراین، نیروی مرکـز گریز $F_{cf}=mR\omega^2$ که بر لنگر وارد می‌شود بزرگ‌تر از حالتی است که جرم آن در قایق قرار داشت.

بنابرایـن نیروی حاصـل؛ $\vec{F}_{\text{لنگر}} = \vec{F}_{g\text{لنگر}} + \vec{F}_{cf\text{لنگر}}$ که بر لنگر وارد می‌شـود دیگر بر سـطح آب عمود نیست (شکل ۸ را ببینید[۴]). واضح اسـت که این نیرو کل قایق را به سمت بالا، یعنی سمت دور از محور چرخش، می‌کشد.[۵]

در اینجـا بحث مربوط به شـرایط مسـئله در دسـتگاه مختصات لخت را حذف می‌کنیم (این روش زیاد سـر راسـت نیسـت و اندکی پیچیدگی دارد). چیزی کـه باید مورد توجه قرار گیرد، این واقعیت است که اثر کشیده شدن قایق به دورتر از محـور چرخش محدود به قایق متصل به لنگر نیسـت بلکه



شکل ۸: لنگر قایق را به سمت بالا می‌کشد.

برای قایق‌هایی که دارای حمالهٔ کشتی[۶] هستند یا مرکز جرم آن‌ها کاملاً زیر سطح آب قرار می‌گیرد نیز صحیح است (البته این قضاوت ما به صورت کیفی است و اثبات آن برای شکل کلی قایق‌ها یا جابه‌جایی مرکز جرم مشکل است ولی روند این تغییرات را نیز می‌توان به صورت کیفی مورد بررسی قرار داد).

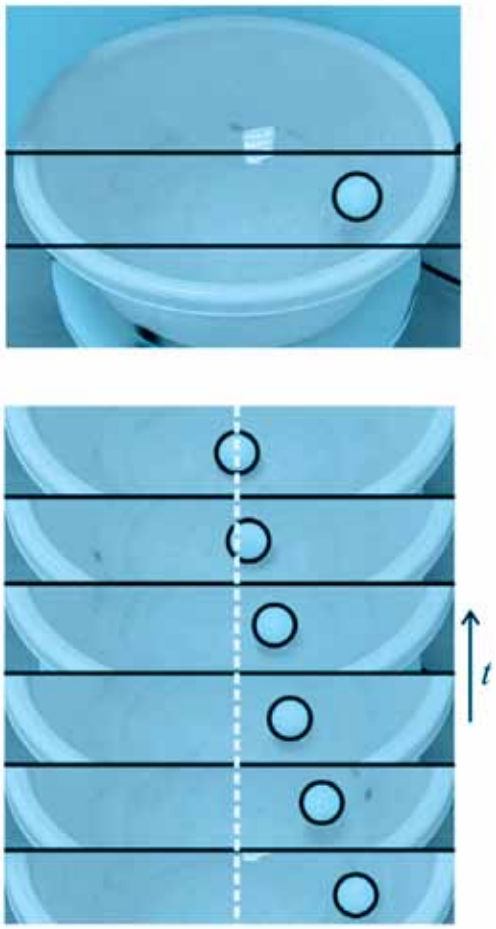
درست خلاف این وضعیت نیز در حالتی پیش می‌آید که مرکز جرم قایق بالاتر از سطح آب قرار گیرد. نیروی مرکز گریز وارد بر جرم قرار گرفته روی سطح آب (یعنی نزدیک محور چرخش) کمتر است و بنابراین، در این حالت نیروی حاصل (برآیند نیروهای گریز از مرکز و گرانشی) که دوباره بر سطح آب عمود نیست، به سمت محور چرخش کج می‌شود و کل قایق را به سمت محور چرخش می‌کشد. بنابراین، بحث نظری ما را به این نتیجه می‌رساند که قایقی که مرکز جرم آن بالاتر از سطح آب است به طرف محور چرخش و قایقی که مرکز جرم آن پایین‌تر از سطح آب قرار دارد، به طرف دورتر از محور چرخش کشیده خواهد شد. آیا آزمایش نیز این پیش‌بینی را تأیید می‌کند؟

دستگاهی برای نشان‌دادن رفتار قایق روی مایع چرخان

دستگاه تقریباً مشابه با دستگاه مورد استفاده در آزمایش قبلی است. این بار بدون میله‌هایی که برای اندازه‌گیری شکل سطح مایع مورد استفاده بودند، برای مدل‌سازی قایقی که مرکز جرم آن بالاتر از سطح آب قرار دارد از یک توپ پینگ‌پونگ استفاده کردیم، می‌توان از یک تکه استیروفوم نیز استفاده نمود. برای حالتی هم که مرکز جرم قایق در زیر سطح آب قرار داشت، به زیر این توپ یا تکه استیروفوم یک پیچ فلزی متصل کردیم که مشابه لنگر یا حماله قایق عمل می‌کند.

مقایسهٔ حرکت نظری و واقعی قایق مدل بر روی سطح مایع چرخان

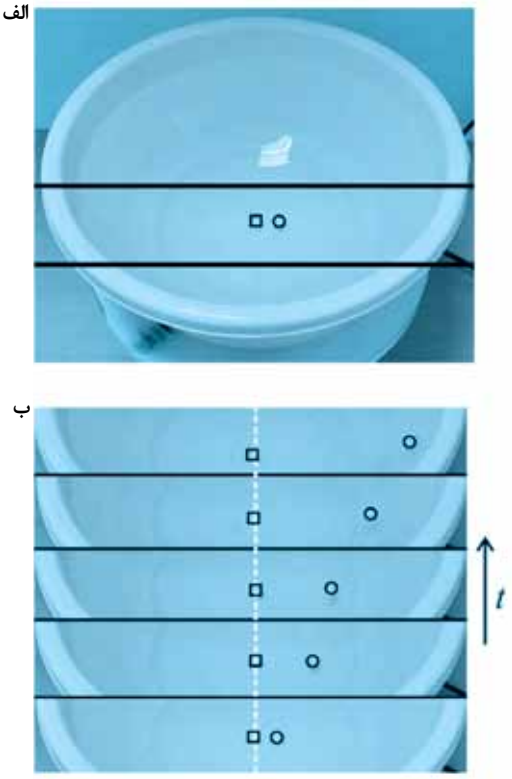
چون هیچ معادلی برای این مسئله وجود ندارد تا آن را تأیید کند، آزمایش فقط جنبهٔ کیفی دارد. به قایق مدل قرار



شکل ۹: (الف) آزمایش به وسیلهٔ یک توپ پینگ‌ـ‌پونگ (قایق در تصویر در داخل یک دایره قرار دارد). این تصویر اندکی بعد از قرار گرفتن توپ بر روی سطح آب گرفته شده است. بخشی از تصویر که بین دو خط سیاه قرار گرفته است با بخش پایینی تصویر ب مطابقت دارد.
(ب) تصویرها با توالی زمانی گرفته شده و مرتب شده‌اند. زمان از پایین به بالا در حال افزایش است. خط زرد مرکزی محل تقریبی محور چرخش تشت است. مطابق با نظریهٔ توپ پینگ‌پونگ به سمت مرکز کشیده می‌شود.

گرفته بر روی سطح آب چرخان نگاه می‌کنیم تا ببینیم چه اتفاقی می‌افتد. نتایج را در شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌بینید. این شکل‌ها نشان می‌دهند که تکه استیروفوم دارای پیچ، واقعاً به سمت بالا، یعنی دور از محور چرخش، و توپ پینگ‌پونگ برعکس به سمت پایین و نزدیک محور چرخش حرکت می‌کند.

توجه کنید که شکل‌های ۹ (ب) و ۱۰ (ب) ترکیبی از تصاویری هستند که در زمان‌های متوالی گرفته شده‌اند و فاصلهٔ زمانی بین آن‌ها یکسان نیست. زمان کلی هر آزمایش (شکل‌های ۹ (ب) و ۱۰ (ب)) تقریباً ۲۰ s است. تصویرهای ویدیویی کوتاهی از این تصاویر در سایت مؤلف[۷] موجود است.



شکل ۱۰: آزمایش با قایق‌های بدون حمالــه و با حماله، تک استیروفوم که با مربع نشان داده شده است. قایق بدون حماله است (که مرکز جرم آن بالاتر از سطح آب قرار دارد) و دیگری که با دایره نشان داده شده، استیروفوم دارای حماله اســت (که مرکز جرم آن زیر ســطح آب قرار گرفته) و در آن از یک پیچ به جای حمالهٔ کشــتی اســتفاده شده است. این شــکل‌ها با توالی زمانی و بلافاصله بعــد از قرارگرفتن هر دو تکــه در نزدیکی مرکز چرخش گرفته شــده‌اند. قایق دارای حماله، که با دایره نشان داده شده است به سمت لبه بیرونی کشــیده می‌شــود؛ در حالی‌که قایق بدون حماله، که با مربع نشــان داده شــده اســت، در همان حال به صورت شناور در نزدیکی مرکز دوران باقی می‌ماند.

نتیجه‌گیری

همان‌طور که قبلاً ذکر شــد، مســئلهٔ شــکل سطح مایع چرخان یک مســئلهٔ قدیمی است که در بسیاری از کتاب‌های فیزیک توضیح داده و حل شــده است. امیدواریم که دست‌کم تعدادی از خوانندگان را به این موضوع علاقه‌مند کرده باشیم. اندازه‌گیری مستقیم شکل توضیح داده شده را می‌توان در دبیرستان یا در آزمایشگاه به عنوان یک پروژه کوچک مطرح کرد. دستگاه نیز می‌تواند با اندکی تغییرات ساخته شود. مثلاً تعــداد میله‌ها را می‌توان کم و زیــاد کرد. آزمایش کیفی دوم را نیــز می‌توان به‌طور ســاده و به صورت نظــری آماده کرد و به دانش‌آموزان ارائه داد. مســئله را می‌تــوان ابتدا به صورت نظــری برای دانش‌آموزان توضیح داد (مثلاً در قالب داســتان کوتاه ادگار آلن‌پو که در اینجا ذکر شــد). ســپس پیش‌بینی دانش‌آموزان را با آزمایش واقعی مقابله کرد. البته خوب است که این مســئله را به صورت کمّی نیز حل کنیم. امیدواریم در کارهای آتی خود به این کار رجوع کنیم.

پی‌نوشت

۱. می‌توان به دانش‌آموزان یادآوری کرد که ســطح آب غیرچرخان (ایســتا) عمود بر نیروی گرانشــی اســت که بر آن اثر می‌کند. اگر ســطح آب عمود بر نیرو نباشد، آب جریان خواهد یافت تا دوباره تعادل برقرار شود.

2. Basta

۳. در دو اندازه‌گیــری (جــدول ۱ و تصاویــر ۷ الف و ب علامت‌های + و Δ) ســرعت زاویه‌ای زیاد اســت و آب کافی در تشــت جهت تشکیل ســهموی کامل وجود ندارد. بنابراین، مرکز تشت خشک می‌ماند و شکل آب چرخان به صورت یک سهموی بریده می‌شود و نمی‌توانیم آب زیادتری اضافه کنیم؛ زیرا از تشت بیرون می‌ریزد.

۴. برای ساده‌تر کردن بحث، نیروی شناوری وارد بر لنگر و طناب را نادیده می‌گیریم. همچنین در شــکل ۸ جرم لنگر را مبالغه‌آمیز نشان داده‌ایم. نیروهای نشان داده شده در این تصویر نظیر جرم‌های یکسان لنگر و قایق است.

۵. به صورت دقیق‌تر مؤلفه‌ای از $\vec{R}^{\text{لنگر}}$ که مماس بر سطح آب است قایق را به طرف بالا می‌کشد. مؤلفه‌ای عمودی می‌خواهد قایق را در آب فرو برد. این نیرو با افزایش نیروی شناوری به تعادل می‌رسد. (مثلاً می‌توانیم حجم قایق را افزایش دهیم.)

6. keel

7. http://kdf.mff.cuni.cz/~sabatka/publikace/zaverecne_prace/diplomka/index.html

منابع

1. Berg R E 1990 Rotating liquid mirror Am. J. Phys. 58 280-1

2. ˇSabatka Z and Dvoˇr´ak L 2007 Vodn'ı paraboloid Veletrh n´apad˚u uˇcitel˚u fyziky 12: Sborn´ık z konference pp 197-201

3. Goodman J M 1969 Parabolic surface and vortices in hydrodynamics Am. J. Phys. 37 864-8

4. Grube J 1973 Centripetal force and parabolic surface Phys. Teach. 11 109-11

5. Basta M, Picciarelli V and Stella R 2000 A simple experiment to study parabolic surfaces Phys. Educ. 35 120-3

6. Poe E A 1841 A Descent into the Maelstr¨om http://en.wikisource.org/wiki/A Descent into the Maelstr%C3%B6m, accessed 12 October 2009

7. ˇSabatka Z 2008 Experimenty pro interaktivn´ı fyzik´aln´ı laboratoˇr - vybran´e experimenty v rotuj´ıc´ı soustav´ach (CD pˇr´ıloha) http://kdf.mff.cuni.cz~/sabatka/publikace/zaverecne prace/diplomka/index.html, accessed 12 October 2009