

استفاده از چراغهای روغنی بنوموسی برای کمک به تدریس و تفهیم کنترل خودکار (چراغ روغنی با فتیله خودتنظیم)

غلامحسین رحیمی^۱

چکیده: یکی از مباحث مهم حوزه مهندسی، سامانه‌های کنترل خودکار با بازخورد یا بدون آن است. از منظر غالب استادان و دانشجویان این موضوع از مباحث کمابیش جدید و پیشرفته مهندسی محسوب می‌شود و لذا از حوزه‌های جوان در تاریخ مهندسی تلقی می‌شود. در این مقاله نشان داده می‌شود که ایده کنترل خودکار پیشینه دیرینه‌ای در تاریخ مهندسی دارد و یکی از برجسته‌ترین مهندسان ایرانی را باید پیش‌قراول مبحث کنترل خودکار دانست. با هدف آشناسازی استادان و دانشجویان مهندسی با مبحث کنترل خودکار، مقاله حاضر به معرفی چراغهای روغنی با کنترل خودکار، که در کتاب *الحیل بنوموسی* تشریح شده است، می‌پردازد. نخست پیشینه کتاب *الحیل* و فشرده ویژگیهای علمی آن بیان می‌شود. سپس اشاره‌ای به پیشینه کنترل خودکار در تاریخ مهندسی می‌شود. پس از آن سه چراغ روغنی از چهار چراغ به اختصار معرفی می‌شود. در انتها و به‌عنوان نمونه، چراغ روغنی با فتیله خودتنظیم به تفصیل تشریح می‌شود. در این مقاله پیشنهاد شده است که با استفاده از طرحهای بنوموسی می‌توان موضوع کنترل خودکار را به دانشجویان بهتر تفهیم کرد و در تدریس از آن بهره گرفت.

واژه‌های کلیدی: بنوموسی، کتاب *الحیل*، کنترل، کنترل خودکار، چراغ روغنی

۱. استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران ایران. gh.rahimi.s@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۱۵)

(پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۸/۱۷)

۱. مقدمه

طرح مسئله

مجله آموزش مهندسی ایران، به موازات مباحث جدید در حوزه‌های مختلف آموزش مهندسی، به چاپ و نشر مباحث مهم مهندسی در تاریخ تمدن ایران و اسلام همت گماشته است، و از این رهگذر دانشجویان و استادان مهندسی را با پیشینه پرافتخار این شاخه مهم علمی و فنی در ایران آشنا می‌کند. همانگونه که در مقالات پیشین نشان داده شد [۱، ۲، ۳]، با استفاده از برخی منابع علمی تمدن اسلام و ایران می‌توان مطالب علمی جدید را بهتر تشریح و عمیق‌تر تفهیم کرد و از این رهگذر دانشجویان را با بعضی منابع علمی تمدن اسلامی و به‌ویژه دانشمندان و مهندسان ایرانی نیز آشنا کرد. در این مقاله ضمن معرفی یکی از مهم‌ترین و برجسته‌ترین آثار مهندسی مکانیک در تمدن ایران و اسلام، نشان داده می‌شود که با کمک تعدادی از طرحهای این کتاب می‌توان پاره‌ای از مباحث کنترل خودکار را تفهیم و تشریح کرد. به این منظور از میان طرحهای مختلفی که به حوزه کنترل خودکار مربوط می‌شوند، چهار طرح مرتبط با چراغهای روغنی انتخاب و معرفی می‌شوند و چراغ روغنی با فتیله خودتنظیم، به‌عنوان نمونه، با تفصیل بیشتر تشریح می‌شود.

ممکن است که این پرسش پیش آید که چرا و چگونه چراغهای روغنی بنوموسی را می‌توان به‌عنوان نمونه کلاسیک برای ایجاد تنوع در مثالها و نیز در تفهیم بهتر درس کنترل به کار گرفت. یکی از مثالهای کلاسیک، کنترل سطح مایعات است که هم‌اکنون نیز در صنایع مختلف مانند مخازن ذخیره مایعات (و نیز سیفون دستشویی) استفاده می‌شود. بیشتر قواعد کنترلی از زمان بنوموسی تا کنون تغییر نکرده است فقط ابزار کنترل پیشرفته‌تر شده و قواعد به زبان ریاضی توصیف و در نتیجه دقیق‌تر و روشن‌تر شده‌اند. در این مقاله تأکید بر این نکته است که به جا، یا در کنار، مثالهای کلاسیک، از نمونه‌های بنوموسی می‌توان کمک گرفت و با این کار چند منظور را محقق ساخت.

۲. کتاب الحیل و ابداعات آن در حوزه مهندسی کنترل

در مقاله [۳] فشرده‌ای از زندگی بنوموسی و کتاب الحیل بیان شد که در اینجا تکرار نمی‌شود و نکاتی مطرح می‌شود که در مقاله مذکور نیامده است.

کتاب الحیل احمدبن موسی بن شاکر خراسانی [۴]، احتمالاً یکی از برجسته‌ترین و تأثیرگذارترین کتابهای مکانیکی در قرون میانه محسوب می‌شود. در حال، این کتاب در فضای خلاء و بدون اثرپذیری از آثار علمی گذشتگان تألیف نشده است. آنچه که از کتابهای تاریخی برمی‌آید احمدبن موسی با آثار مکانیکی پیش از خود، به‌ویژه آثار یونانیان آشنا بوده و آنها را کاملاً درک کرده

است. احتمالاً سه اثر زیر مهم‌تر و تأثیرگذارتر بوده‌اند: رسالهٔ *ساعت آبی* منسوب به ارشمیدس^۱ (سدهٔ سوم پیش از میلاد)، کتاب *پنوماتیک* منسوب به فیلون بیزانسی (سدهٔ دوم پیش از میلاد) [۵] و کتاب *پنوماتیک* منسوب به هرون اسکندرانی (سدهٔ اول پیش از میلاد) [۶].

بررسی کتابهای ارشمیدس، فیلون و هرون نشان می‌دهد که حداکثر ۲۰ درصد از دستگاههای تشریح شده در کتاب *الحیل*، از حدود صد دستگاه، به نوعی تکرار کارهای دانشمندان نام برده است البته همین وسایل تکراری نیز اغلب با نوآوریهای ویژهٔ بنوموسی توأم است و بقیه از ابتکارات خاص بنوموسی محسوب می‌شود.

در کتاب *الحیل* بنوموسی، مجموعاً حدود یکصد دستگاه (وسیله یا طرح) ابداعی آمده است. نزدیک به ۸۰ درصد طرحها منعکس‌کنندهٔ انواع مختلف ظروف و مخازن ساده و پیچیده‌اند که با هوا و مایعات کنترل می‌شوند و خروجیهای مشخص و اعجاب‌آور دارند.

در طراحی و ساخت دستگاههای مندرج در کتاب *الحیل*، تعدادی عناصر و اجزای اصلی وجود دارند که در وسایل مختلف تکرار می‌شوند. از ترکیب ماهرانه و دقیق این اجزای اصلی دستگاههای مختلف با عملکردهای متنوع حاصل می‌شود. باره‌ای از آنها عبارت‌اند از:

- سیفونها: شامل سیفون ساده (لولهٔ خمیده)، سیفون متحدالمرکز، سیفون دوگانه؛
- شیرها و سوپاپها: شامل شیرهای تنظیم‌کننده (با کمک گوی شناور)، تنظیم‌کننده، موازنه‌کننده، تنظیم جریان، شیر مخروطی، شیر توپی و نظایر اینها؛
- سیستم کنترل با نرخ جریان؛
- سوپاپ شناور، که معمولاً متشکل از مخزنی حاوی یک شناور است و از طریق یک میلهٔ سوپاپی به آن متصل است و جریان مایع را کنترل می‌کند؛
- سوپاپهای موازنه‌ای (اهرمی)، تعادل اهرمی؛
- سیستمهای قفل هوا و کنترل هوا؛
- ظروف مرتبط و تنظیم سطح مایع؛

۱. رسالهٔ منسوب به ارشمیدس فقط به زبان عربی موجود است و اولین بار در *الفهرست ابن‌ندیم* (وفات ۹۵۵ میلادی) از آن یاد شده است. از نوع ادبیات و شیوهٔ ترسیم اشکال به نظر می‌رسد که رساله را باید دانشمندان مسلمان مبتنی بر فناوری یونانی - رومی نوشته باشند.

۱۴۲ استفاده از چراغهای روغنی بنوموسی برای کمک به تدریس و تفهیم کنترل خودکار ...

- سوپاپ کنترل (عنصر کلیدی برای کنترل نرخ جریان مایع که وابسته به ارتفاع مایع در منبع است)؛
- آب‌افشانه‌های فواره‌ای، فواره‌ها؛
- توربین (توربینهای بنوموسی عمدتاً، در فواره‌ها برای ایجاد فشار جهت آب‌فشانی طراحی و استفاده شده است)؛
- چرخ‌دنده، پیچ، زنجیر و چرخ زنجیر؛
- چراغهای روغنی با کنترل خودکار، که موضوع مورد بحث این مقاله است.

یکصد دستگاه ابداعی با استفاده از قوانین ساده و پیچیده مهندسی و کنترل خودکار با سیستمهای بدون بازخورد، یا با آن، طراحی و ساخته شده‌اند. توضیحات مندرج در کتاب حکایت از آگاهی و شناخت کامل ابداع‌کننده دستگاهها به قوانین و اصول مسلم علوم مختلف فیزیک و مکانیک در حیطه مورد نظر دارد. برخی از دستگاهها، متضمن سازکارهای پیچیده و بسیار شگفت‌انگیز و اجزای ترکیبی قابل توجهی است که ابداع آنها در قرن سوم هجری، یعنی حدود ۱۲۰۰ سال پیش، باورنکردنی جلوه می‌کند. در حد اطلاعات نگارنده، بعید است که حداقل تا قرن هفده میلادی قوی‌تر از کتاب بنوموسی در حوزه کنترل مکانیکی ادوات، منبعی وجود داشته باشد.

از یکصد دستگاه تشریح شده در کتاب/حیل، حدود ۲۰ دستگاه جزء وسایل کنترل خودکار محسوب می‌شود. بنوموسی را باید از پیش‌قراولان مهندسی کنترل خودکار دانست.

استفاده بنوموسی از سوپاپهای خودکار، ادوات دقیق زمان‌سنجی، نظامات درنگ یا کندکننده سیستمهای کنترل بی یا با بازخورد، استفاده از تعادل استاتیکی و دینامیکی مایعات کاملاً علمی و مبتنی بر اصول مهندسی مکانیک و کنترل است.

۳. ملاحظاتی درباره پیشینه چراغهای روغنی و کنترل خودکار

۳.۱. پیشینه چراغهای روغنی

ایده سوزاندن روغن برای ایجاد نور مصنوعی به صدها هزار سال قبل برمی‌گردد. احتمالاً هنگامی که انسان اولیه گوشت را روی آتش می‌پخت و متوجه نور حاصل از سوختن روغن در حال ریختن روی شعله‌ها شد، ایده استفاده از روغن برای ایجاد روشنایی در ذهن او ایجاد شد.

نکته قابل توجه این است که هرچند پیشینه چراغهای روغنی به پیش از تاریخ برمی‌گردد، ولی هنوز برای روشنایی در حالت نیمه‌روشن و مهتابی، به‌عنوان جایگزین شمع و مشعل استفاده می‌شود.

از این رو، چراغ روغنی از معدود وسایل و دستگاہهایی است، که بشر از دوران پیش از تاریخ تا زمان معاصر و زندگی مدرن، از آن استفاده می‌کند.

از یک نظر چراغ روغنی مخزن ساده‌ای حاوی روغن به‌عنوان منبع سوخت است که روشنایی مداومی فراهم می‌آورد. در حالت کلی، چراغ روغنی متشکل از بدنه، فتیله و سازکار تغییر فتیله است. بدنه، مخزنی است که بخش اصلی آن منبع سوخت تلقی می‌شود. بدنه چراغ روغنی از مواد مختلفی ساخته می‌شده است؛ مانند برنز، نقره، طلا، آهن، گل پخته، سرامیک و حتی سنگ. لوله‌ای (افشانک^۱) در بدنه وجود دارد که محل استقرار فتیله و بیرون آمدن آن از سر لوله است. محل ریختن روغن به داخل چراغ، یک یا چند گشودگی تعبیه‌شده در بالای بدنه است. اغلب دسته نیز بخش دیگری از بدنه را تشکیل می‌دهد. شکل ۱ تصاویری از چراغهای روغنی به جای مانده از دوران قدیم را نشان می‌دهد که در کتاب *الحیل* کمابیش از این شکل استفاده شده است. شکل ۲ تصویری از یک چراغ روغنی است که در موزه سنندج نگهداری می‌شود.



شکل ۱: تصویر تعدادی از چراغهای روغنی دوران قدیم

فتیله معمولاً از کتان و پیروز معمولی و مانند آنها ساخته می‌شده است. ضخامت فتیله عامل مهمی است. فتیله نازک روغن را آهسته‌تر از فتیله ضخیم می‌سوزاند. به‌هرروی، ضخامت فتیله بر اندازه شعله تأثیر چندانی ندارد. برای سوخت معمولاً از روغن زیتون، روغن خام ماهی، دانه‌های روغنی و گیاهان نیز استفاده می‌شده است.

۱. نازل (Nozzle)

۱۴۴ استفاده از چراغهای روغنی بنوموسی برای کمک به تدریس و تفهیم کنترل خودکار ...



شکل ۲: تصویری از یک چراغ روغنی در موزه سنندج

چراغهای روغنی بنوموسی از سازکار کنترل خودکار برخوردارند که آنها را از سایر چراغها متمایز می‌سازد. علاوه بر این، چراغها با نوعی بازخورد همراه‌اند.

۲.۳. پیشینه کنترل خودکار

هر دستگاهی متشکل از اجزایی است که به صورت نظام‌یافته با هم کار می‌کنند تا هدف یا اهداف از پیش تعیین شده‌ای را محقق سازند. در مهندسی، هدف کنترل یک دستگاه آن است که دستگاه یا به جهت مشخصی هدایت شود و یا خروجی (تابع هدف) دستگاه در سطح معینی ثابت نگه داشته شود؛ بنابراین، در نظام کنترل خودکار، تغییری که باید کنترل شود، نخست اندازه‌گیری می‌شود، سپس با مقدار مرجع مقایسه می‌شود و در نهایت تفاوت به ورودی سیستم تزریق می‌شود تا دستگاه در جهت موردنظر هدایت شود. دستگاههای با کنترل بازخورد، دستگاهی است که با مقایسه ورودی و خروجی و استفاده از این تفاوت به‌مثابه عامل کنترل، رابطه معینی را بین خروجی و ورودی مرجع برقرار می‌سازد.

همانگونه که مشاهده می‌شود، نظریه کنترل خودکار رابطه تنگاتنگی با مفهوم بازخورد دارد. در سیستم بازخورد، سیگنال خروجی مجدداً به دستگاه برمی‌گردد تا سیگنال ورودی را افزایش یا کاهش دهد.

استفاده از بازخورد^۱ برای کنترل یک دستگاه در تاریخ علم جالب است. هرچند که مفهوم بازخورد نسبتاً جدید است (در اواخر قرن نوزدهم)، ولی مطالعه کتابهای مهندسان برجسته قدیم نشان می‌دهد که ایده کنترل خودکار با بازخورد و بدون آن از زمانهای قدیم کاملاً فهم شده و کارکرد درستی داشته است.

احتمالاً قدیمی‌ترین سیستمهای کنترل خودکار به دوران هلنیستی^۲ برمی‌گردد. اولین کاربردهای کنترل با بازخورد در طراحی سازکارهای تنظیم‌کننده شناور در یونان به حدود ۳۰۰ سال پیش از میلاد مربوط می‌شود. ساعت آبی کتسبوسی از یک شناور تنظیم‌کننده^۳ استفاده می‌کند. فیلون (حدود ۲۵۰ سال ق.م.) چراغ روغنی اختراع کرد، که سطح روغن سوخت را ثابت نگه می‌داشت. هرون اسکندرانی، که در قرن اول پس از میلاد می‌زیست، در کتاب پنوماتیک خود چند شکل از سازکارهای تنظیم ارتفاع آب با استفاده از شناور تنظیم‌کننده آورده است که قدیمی‌ترین کاربرد آن کنترل نرخ جریان در ساعت‌های آبی است [۶]. دستگاهی که گفته می‌شود کتسبوسی اسکندرانی حدود سه قرن پیش از میلاد آن را معرفی کرد و سطح آب در مخزن را تنظیم می‌کرد. هدف این سازکار نگه داشتن جریان آب در مخزن در نرخ ثابت و مستقل از انحرافات ارتفاع و فشار با استفاده از سوپاپ شناور بود.

فیلون بیزانسی حدود ۲۰۰ سال پیش از میلاد در کتاب خود مثالی از سیستم کنترل خودکار سطح روغن در چراغهای روغنی می‌آورد. در این دستگاهها ارتفاع روغن h را مقدار هوای ورودی به مخزن روغن، که بسته و محفوظ از هواست، کنترل می‌کند و ثابت نگه می‌دارد. نکته قابل توجه آنکه از کتاب پنوماتیک فقط ترجمه عربی آن موجود است. هرون اسکندرانی مهندس نام‌آشنای دیگر در تاریخ کنترل خودکار است که در قرن اول میلادی می‌زیست. وی در کتاب خود تعدادی دستگاههای کنترل خودکار که با آب و هوا کار می‌کنند معرفی کرد و سپس بنوموسی معرفی بارزتر و وسیع‌تری از آن ارائه کرد.

با خاموشی تدریجی دوران هلنیستی و رکود علم و فن در بیزانس، حدود دو قرن بعد در دنیای اسلام مجدداً مفاهیم، روشها و سیستمهای کنترل خودکار و بازخورد وسیع‌تر و عمیق‌تر همراه با

-
1. Feedback
 2. Hellenistic era
 3. Float Regulator

۱۴۶ استفاده از چراغهای روغنی بنوموسی برای کمک به تدریس و تفهیم کنترل خودکار ...

نوآوریهای متعددی معرفی شدند. پیش‌قراول و برجسته‌ترین این دانشمندان بنوموسی (به‌ویژه احمد) بودند که کتاب *الحیل* آنها در تاریخ سیستمهای کنترل خودکار شاهکار محسوب می‌شود (در بخش اول مقاله معرفی کتاب و نویسنده انجام شد). اصولاً باید تأکید کرد که آثار مکتوب مسلمانان در حوزه مهندسی مکانیک و به‌ویژه در حوزه کنترل خودکار با کتاب بنوموسی آغاز می‌شود [۸ و ۹].

بررسی کتاب *الحیل* بنوموسی نشان می‌دهد که از میان یکصد طرح معرفی شده بیش از ۲۰ طرح دستگاههای کنترل اتوماتیک هستند. بررسی دقیق و عمیق این دستگاههای کنترلی به لحاظ علمی و فنی کامل و حتی در حال حاضر آماده به‌کارگیری است. در میان این دستگاهها، باید به چراغهای روغنی که ارتفاع روغن در مخزن آنها ثابت نگه داشته می‌شود یا چراغ روغنی که فتیله آن به طور خودکار تنظیم می‌شود، و موضوع مورد بحث این مقاله است، یا چراغ روغنی که بدنه آن به گونه‌ای در برابر باد قرار می‌گیرد که همواره فتیله را روشن نگه دارد، اشاره کرد.

حدود دو قرن پس از بنوموسی، اسماعیل الرزاز جزری، در کتاب مشهور خود به نام کتاب *الحیل* ۵۰ دستگاه مختلف را شرح می‌دهد که در آن اصول و مبانی دستگاههای مختلف مانند ساعت‌های آبی، دستگاههای کنترلی، فواره‌های آب، دستگاه خون‌گیری، وسایل بالا بردن آب (تلمبه‌ها) و نظایر آن معرفی و نحوه ساخت آنها تشریح می‌شود. از بازده ساعت آبی تشریح شده در کتاب دو دستگاه ساعت آبی سازکار کنترل خودکار نرخ جریان آب دارند [۱۰].

۴. چراغهای روغنی بنوموسی

در کتاب *الحیل* بنوموسی چهار طرح درباره چراغهای روغنی معرفی و تشریح شده است که همگی از مبانی کنترل خودکار برخوردارند. این چهار چراغ عبارت‌اند از: الف) در اولین چراغ روغنی (طرح ۹۵) سطح روغن همواره ثابت می‌ماند؛ ب) در دومین طرح (طرح ۹۶) فتیله چراغ به طور خودکار تنظیم می‌شود؛ پ) سومین طرح (طرح ۹۷) چراغی است که در آن هم فتیله و هم ارتفاع روغن به صورت خودکار تنظیم می‌شود؛ ت) در چهارمین طرح (طرح ۹۸) بدنه چراغ همواره در برابر باد به گونه‌ای می‌چرخد که خاموش نشود.

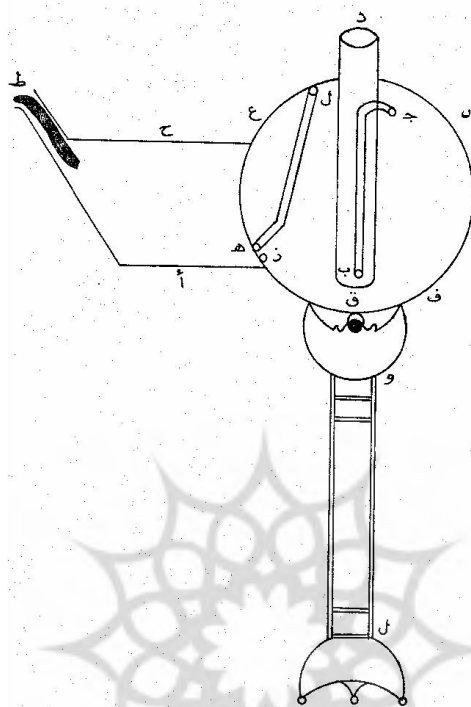
در این بخش سه طرح الف، پ و ت به اختصار معرفی می‌شود و در بخش بعد طرح ب یعنی چراغ روغنی با فتیله خودتنظیم به تفصیل بررسی و تشریح می‌شود.

۴.۱. چراغ روغنی^۱ که در آن ارتفاع روغن به طور خودکار کنترل می‌شود. (شکل ۳)

چراغ روغنی که روی ستون^۲ ل - و قرار گرفته، از یک منبع روغن کروی و مخزن ح - ا، که در آن فتیله^۳ ط روغن را جذب می‌کند، تشکیل شده است. برای سوختن کامل و شدت نور پیوسته سطح روغن مخزن ح - ا باید کنترل شود. روغن از طریق سوراخ د به داخل منبع روغن ریخته می‌شود. روغن ریخته‌شده با عبور از مانع هوای د - ب - ج در کف منبع کروی جمع می‌شود. توجه شود که یک سر لوله^۴ د ق باز و انتهای ق آن بسته است. در فصل مشترک منبع و مخزن روغن، دو سوراخ د و ه - یکی بالای دیگری ایجاد می‌شود. در سوراخ بالایی ه - لوله^۵ ه - ل تعبیه شده است. در خلال فرایند پر شدن، هوا از طریق لوله ل - ه - بیرون می‌رود. همان‌گونه که در کتاب ذکر شده است یا سوراخ د در ابتدا بسته است و یا سیفونی در عقب قرار می‌گیرد (که در شکل نیامده است). در خلال پر کردن، سوراخ د با یک سیم بسته شده است. هنگامی که روغن به اندازه موردنیاز ریخته شد، این مانع باید برداشته شود تا امکان جریان یافتن روغن به داخل مخزن فتیله‌دار فراهم شود. اگر سوراخ د به منبع روغن از طریق سیفون متصل شود، به محض این که ارتفاع روغن در منبع به انتهای بالایی سیفون برسد، روغن به صورت لحظه‌ای به مخزن فتیله‌دار ح - ا جاری می‌شود. روغن این مخزن افزایش می‌یابد تا این که انتهای ه - لوله^۶ و رودی هوا ه - ل منبع با روغن پوشیده شود. اکنون فتیله روشن می‌شود و روغن مخزن به تدریج می‌سوزد و ارتفاع آن (h_o) کاهش می‌یابد تا جایی که سوراخ ه - باز شود. هوا از طریق لوله^۷ ل - ه - وارد منبع کروی می‌شود و روغن از سوراخ د، به میزانی که هوا وارد می‌شود، داخل می‌شود تا سوراخ ه - دوباره بسته شود و به همین ترتیب ادامه می‌یابد. بنابراین، همان مقدار روغن که در مخزن ح - ا می‌سوزد هوا داخل منبع روغن می‌شود و موجب خارج شدن و تأمین روغن از طریق سیفون و یا سوراخ د می‌شود. کنترل خودکار سطح چراغ روغنی تا زمانی که در منبع کروی روغن وجود دارد، ادامه می‌یابد.

-
1. Oil Lamp
 2. Pillar
 3. Wick

۱۴۸ استفاده از چراغهای روغنی بنوموسی برای کمک به تدریس و تفهیم کنترل خودکار ...

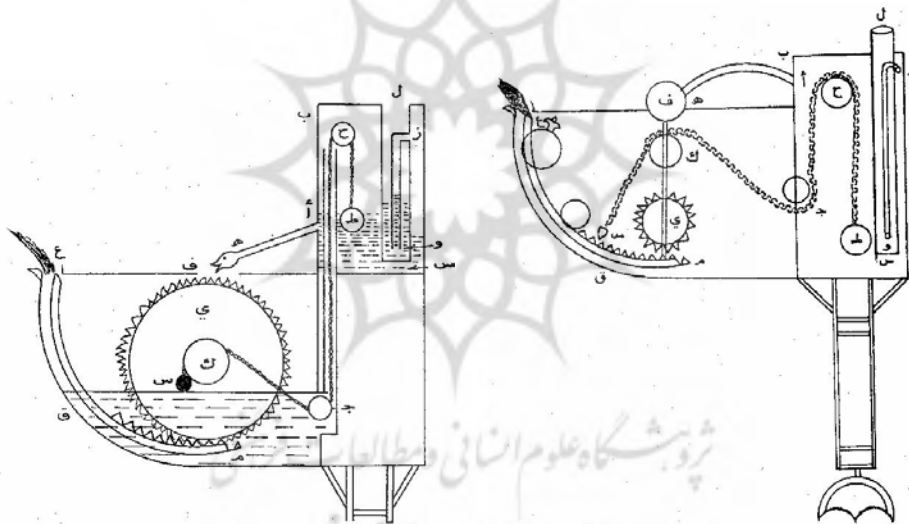


شکل ۳: چراغ روغنی بنوموسی با کنترل خودکار ارتفاع روغن [۴]

عامل تأمین خودکار روغن، تفاوت ارتفاع مرجع (h_r) و ارتفاع روغن (h_o) است: $(h_r - h_o)$.
 با توجه به چسبندگی^۱ روغن، فرایند نوعی هیستریزیس^۲ دارد.
 لازم به توضیح است که این چراغ روغنی با ترکیب میترانه سیفونهای اضافه شده به چراغ روغنی
 فیلون، عملاً اولین اصلاح و بهبود اساسی این نوع چراغ از زمان فیلون محسوب می شود.
 ۲.۴. چراغ روغنی که فتیله آن به طور خودکار تنظیم می شود
 دستگاه ابداعی چراغ روغنی است، که فتیله اش خودبه خود تنظیم می شود، چنان که به نظر می رسد،
 هیچ گاه مصرف نمی شود. این طرح در نسخه واتیکان وجود ندارد، در نسخه برلین/گوتا (طرح ۹۶)
 موجود است و در نسخه توپکاپی هم نیست. شرح کامل دستگاه همراه با تحلیل عملکرد آن در بخش
 بعد آمده است.

-
1. Viscosity
 2. Hystereses

۳.۴. چراغ روغنی که در آن فتیله و ارتفاع روغن به طور خودکار تنظیم و کنترل می‌شود. (شکل ۴) در این طرح کنترل سطح روغن دستگاه ۹۵ و سازکار تنظیم خودکار فتیله دستگاه ۹۶ همراه با هم در یک دستگاه به کار گرفته می‌شود. چون شکل اصلی کافی نبود، اصلاح و بازسازی شکل داده شده در کتاب را بیر در مرجع [۴] انجام داده است. روغن از طریق سوراخ ل به داخل منبع واقع در عقب چراغ ریخته می‌شود. روغن ریخته شده با عبور از قفل هوا و - ذ به داخل منبع روغن جاری می‌شود و از آنجا به داخل مخزن چراغ از طریق یک سر قو^۱، که روی چراغ روغنی امتداد یافته، می‌ریزد. ارتفاع روغن مخزن به طور خودکار با یک لوله هوا کنترل می‌شود که از آن نیز زنجیر تنظیم‌کننده فتیله می‌گذرد. جریان روغن به داخل مخزن چراغ، هنگامی که انتهای ذ لوله هوا با روغن مسدود می‌گردد، متوقف می‌شود. مقدار روغن مصرف‌شده به طور خودکار توسط منبع روغن با جاری شدن از طریق سر قو، مجدداً تأمین می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴: چراغ روغنی بنوموسی که به چراغ خدا مشهور بوده است [۴]

فتیله با شناور ط واقع در منبع روغن تنظیم می‌شود. موقعیت شناور به وسیله قرقره‌های ح - ب - ک و وزنه موازنه س به محور دنده - ک منتقل می‌شود. همانند دستگاه ۹۶، هنگامی که ارتفاع روغن از منبع کاهش می‌یابد، دنده فتیله را به سمت سوراخ خروجی حرکت می‌دهد (بخش بعد را ببینید).

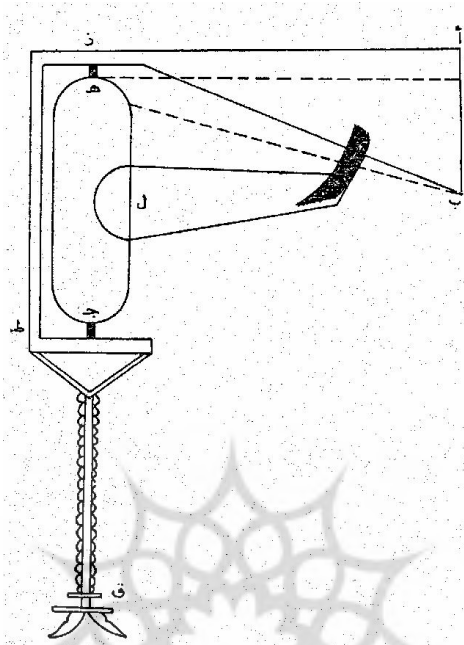
۱۵۰ استفاده از چراغهای روغنی بنوموسی برای کمک به تدریس و تفهیم کنترل خودکار ...

در کتاب اشاره شده است که این دستگاه را می‌توان به‌عنوان یک وسیلهٔ زمان‌سنج^۱ به کار برد. سازکار متصل به شناور ط اجازه می‌دهد که گوی ماربل^۲ در هر ساعت فروافتد، به‌گونه‌ای که زمان از تعداد ماربلهای سقوط کرده محاسبه شود. در ابتدای معرفی این چراغ، بنوموسی ذکر می‌کند که هرکس که این چراغ ببیند فکر می‌کند که نه روشنایی چراغ موجب مصرف روغن می‌شود و نه فتیله‌ای می‌سوزد و کاهش می‌یابد. لذا، این چراغها به "چراغ خدا" (سراج‌الله) مشهور بوده‌اند.

۴.۴. چراغ روغنی، که چون همواره در جهت مخالف باد قرار می‌گیرد، خاموش نمی‌شود. (شکل ۵) چراغ روغنی به یک ورق نیمه‌استوانه‌ای بسته شده است و آن را از باد محافظت می‌کند. برای این منظور ستون ج - ق و نیم‌استوانهٔ ج - ل - ه را از مس می‌سازیم. نیم‌استوانه با دو میلهٔ متصل به دو انتها و چارچوب مربوط به راحتی دَوَران می‌کند. چراغ روغنی به گونه‌ای نصب می‌شود که بخشی از آن در داخل نیم‌استوانه قرار می‌گیرد. بالک^۳ ا - ب - ذ از مس و به شکل مثلثی ساخته می‌شود که می‌تواند شکل‌های دیگری نیز داشته باشد. انتهای ذ ورق مثلثی به نقطهٔ مرکزی بالای نیم‌استوانه بسته می‌شود. هنگامی که چراغ روشن می‌شود و در برابر باد قرار می‌گیرد، باد به ورق ا - ب - ذ برخورد می‌کند که موجب می‌شود بالک آنقدر دَوَران کند تا در جهت سرعت باد قرار گیرد. بنابراین چراغ از گزند باد مصون می‌ماند.

در شکل اصلی چراغ بیش از حد بلند رسم شده است. ورق با یاتاقانهای^۴ ه و ب به پایهٔ ق - ب - ذ - ه و ب، متصل و ثابت شده است؛ برای اینکه پشت ورق همواره در برابر باد بچرخد بالک مثلثی شکل ه - ا - ب به ورق متصل است (در شکل اصلی بالک به اشتباه متصل به پایه کشیده شده است؛ موقعیت واقعی با خطوط بریده نشان داده شده است [۱۱]).

-
1. Time Piece
 2. Marble Ball
 3. Wing
 4. Bearing



شکل ۵: چراغ روغنی بنوموسی که همواره در جهت مخالف باد قرار می‌گیرد [۴]

قرنها بعد، از این سازکار در توربینهای بادی با محور افقی برای حفظ خودکار توربین در برابر باد استفاده می‌شده است. در زمان حاضر، جهت‌سنجی باد نیز مبتنی بر این سازکار صورت می‌گیرد.

۵. چراغ روغنی که فتیله آن به طور خودکار تنظیم می‌شود

در این بخش ابتدا چراغ مطابق با شرح بنوموسی توضیح داده می‌شود. سپس، اجزای دستگاه تجزیه و تحلیل قرار می‌شود.

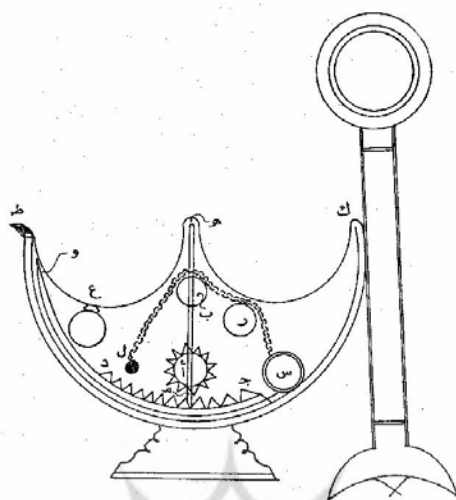
۵. ۱. شرح دستگاه

مطابق شکل ۶ چراغ ک - ه - ط را، که بالای آن به وسیله صفحه‌ای خمیده بسته شده است، می‌سازیم و در این صفحه، سوراخ ع را برای ریختن روغن (یا نفت) به داخل چراغ ایجاد می‌کنیم. محل بیرون آمدن فتیله با حرف ط مشخص شده است. میله خمیده د - ج را از مس یا آهن می‌سازیم و آن را روی سطح پایینی چراغ می‌گذاریم که بتواند به‌آسانی در آن حرکت کند. به این میله، دندان‌هایی با استحکام کافی را لحیم و انتهای د - و آن را خم می‌کنیم. در انتهای و سوراخی

ایجاد کرده، فتیله را در آن قرار می‌دهیم که یک سر آن از سوراخ ط بیرون و سر دیگر فتیله متصل به انتهای و میله مذکور است. میله م - ه را با دو محور متصل به آن، مطابق شکل، می‌سازیم. محور و یاتاقانها باید کاملاً موازی با سطح افق باشند. روی میله م - ه چرخ دندانه‌دار ا را نصب می‌کنیم. چرخ به کمک محوری عمود بر صفحه چرخ از مرکز به میله م - ه متصل می‌شود. دندانه‌های چرخ با دندانه‌های میله مذکور کاملاً درگیر است. به میله م - ه، قرقره ب را نیز محکم وصل می‌کنیم. گوی شناور س را می‌سازیم و به سطح بالایی آن زنجیر س - ل را، که از روی قرقره ب (چرخ زنجیر) عبور می‌کند، متصل و به انتهای ا زنجیر، وزنه شاغولی ل را آویزان می‌کنیم. بدیهی است وقتی روغن از سوراخ ع در چراغ ریخته شود، گوی شناور س بالا می‌آید و در نتیجه وزنه ل پایین می‌رود. به دلیل حرکت زنجیر از روی قرقره ب (چرخ زنجیر)، قرقره و میله م - ه متصل به آن (میله به مرکز قرقره ب محکم وصل شده است، به گونه‌ای که، با چرخش قرقره میله نیز می‌چرخد) و در نتیجه چرخ دندانه‌دار ا (مرکز چرخ ا به میله کاملاً محکم شده و با میله می‌چرخد) با چرخش چرخ ا، دندانه‌های آ به دندانه‌های میله د - ج گیر می‌کند و میله د - ج به سمت نقطه ک حرکت می‌کند.^۲

۱. در کتب *الحیل* واژه «بکرة» را برای قرقره (قرقره‌ای که دور آن طناب است) و واژه «دولاب» را برای چرخ و واژه «دولاب ذودندانات» را برای چرخ دندانه‌دار به کار برده‌اند. علاقه‌مندان می‌توانند به متن اصلی از نسخه عربی کتاب *الحیل*، که در انتهای این مقاله آمده است، رجوع کنند. برای کاربرد موردنظر، استفاده از چرخ زنجیر به جای قرقره مناسب‌تر است.

۲. در مأخذ [۳] صفحه ۳۶۷ سطر سوم، مترجم انگلیسی و به تبع آن مترجم فارسی برای حرکت میله دندۀ د - ج را، که در متن اصلی به سمت نقطه ک بوده، در درون قلاب به سمت نقطه ط اصلاح کرده است: «میله د - ج به سمت نقطه ک [باید ط باشد] حرکت می‌کند». در صورتی که به نظر می‌آید جهت نشان داده شده در متن اصلی درست است «.. یترحرک قضیب ج - د الی ناحیه ک ..» و اصلاح انجام شده نادرست است. زمانی که روغن در مخزن چراغ ریخته شود، شناور س بالا و وزنه ل پایین می‌آید، لذا میله م - ه به سمت راست دَوَران می‌کند. اگر فرض شود که جهت حرکت در متن کتاب *الحیل* نادرست بوده است، بنابراین در هنگام کم شدن سطح روغن مخزن در اثر روشن بودن فتیله چراغ نیز نادرست است. البته این مطلب در صورت درستی جمله اولی، منتفی است.



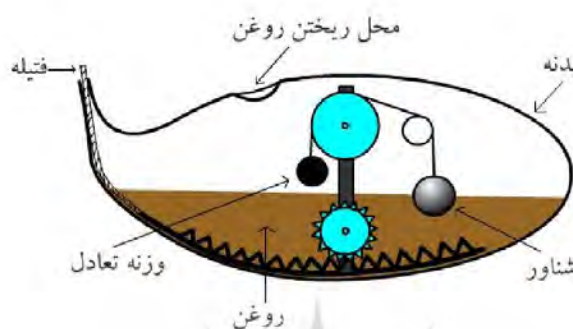
شکل ۶: چراغ روغنی بنوموسی که فتیله آن به طور خودکار تنظیم می‌شود [۴]

اکنون، آن قدر در سوراخ ع روغن می‌ریزیم تا چراغ کاملاً پر شود. در این حالت شناور س در بالاترین وضعیت خود قرار دارد و در نتیجه وزنه ل در پایین‌ترین وضعیت خود قرار می‌گیرد و فتیله به اندازه کمی، اما معین، از سوراخ ط بیرون می‌آید. وقتی فتیله آتش زده می‌شود، روغن مصرف می‌شود و در نتیجه سطح روغن به تدریج پایین می‌رود و متناسب با آن شناور س نیز پایین می‌آید. با پایین آمدن شناور زنجیر حرکت می‌کند و قرقره ب، میله م - ه و چرخ ا را می‌چرخاند و در نتیجه میله خمیده د - ج به سمت ط حرکت می‌کند که نتیجه نهایی آن، بیرون آمدن فتیله از سوراخ ط خواهد بود!

۱. مترجم انگلیسی کتاب/الحیل در توضیح طرح شماره ۹۶ نوشته است: «ضرورتی برای شکل عجیب قسمت بالایی چراغ وجود ندارد، یک صفحه ساده افقی مانند طرح شماره ۱۷ کافی خواهد بود». علاوه بر مسائلی از قبیل زیبایی ظاهری چراغ، به‌کارگیری ظرافت هنری و پیچیدگی طرح و یا نکات دیگری که برای ما نامعلوم است و بنوموسی بدان توجه داشته است، از نظر مهندسی، صفحه خمیده ک - ه - ط باتوجه به شکل طرح، کاملاً ضروری است. زیرا با بالا آمدن سطح روغن در درون مخزن چراغ، شناور س نیز بالا می‌آید، تا زمانی که مخزن پر شود. در آن زمان، شناور به بالاترین حد خود می‌رسد. اگر قرار باشد سطح ک - ه - ط افقی باشد فاصله بین صفحه افقی و چرخ ر بیش از قطر گوی شناور س خواهد شد، لذا از یک طرف، نیروی حاصل از فشار روغن و از طرف دیگر نیروی کششی ناشی از وزن وزنه ل به گوی شناور س وارد می‌شود و آن را به سمت میله م - ه منحرف می‌کند. پیرو آن با پایین آمدن سطح روغن در درون مخزن، شناور س در مکان اولی خود واقع نمی‌شود که هدف دستگاه را عملی سازد. سطح افقی در صورتی که تمام اجزای داخلی دستگاه تغییر مناسبی بدهند، می‌تواند افقی باشد ولیکن در شرایط تصویر نسخه برلین / گوتا نمی‌تواند اینگونه باشد [۵].

۱۵۴ استفاده از چراغهای روغنی بنوموسی برای کمک به تدریس و تفهیم کنترل خودکار ...

شکل ۷ نمودار شماتیک از چراغ روغنی با فتیله خودتنظیم بنوموسی را نشان می دهد.



شکل ۷: نمودار چراغ روغنی با فتیله خودتنظیم

۵. ۲. تحلیل دستگاه^۱

در این بخش چراغ روغنی با فتیله خودتنظیم تحلیل علمی می شود. لازم به ذکر است که باتوجه به محدودیت مقاله فقط بخشی از سازکار و رفتار خودکار آن بررسی می شود. در روابطی که پس از این می آید، از نمادهای زیر استفاده می شود.

m : جرم شناور س	r_b : شعاع قرقره ب
M : جرم وزنه ل	r_a : شعاع چرخ دنده ا
H : ارتفاع روغن چراغ	I : شعاع خمیدگی میله د و
ρ_o : چگالی روغن	R : فاصله مراکز قرقره ب و چرخ دنده ا
V_f : حجم شناور	V_o : حجم مخزن روغن

زمانی که هیچ نوع روغنی در داخل چراغ نباشد، شناور س در پایین ترین و وزنه L در بالاترین وضعیت خود قرار دارند. این حالت با این فرض برقرار است که وزن شناور به مراتب از وزن وزنه بیشتر است ($mg > Mg$). با ریختن روغن به داخل چراغ، گوی شناور بالا و وزنه L پایین می رود. شناور س باید با دقت به زنجیر متصل شود و هیچ روزنه ای برای نفوذ روغن نداشته باشد. زمانی که مخزن کاملاً

۱. در تهیه مطالب این بخش از مفاد صفحات ۱۵۸ الی ۱۶۲ کتاب [۱۲] نیز استفاده شده است.

پیر باشد، شناور س در بالاترین و وزنه L در پایین‌ترین وضعیت قرار می‌گیرند. می‌توان دستگاه را به گونه‌ای طراحی کرد که میله $M - H$ در وضعیت چراغ خالی از روغن، به حالت قائم قرار گیرد. توجه شود که زنجیر از روی چرخ واسط ک نیز عبور می‌کند. با بالا آمدن سطح روغن، نیروی ناشی از فشار روغن به شناور س وارد و موجب بالا رفتن شناور می‌شود. لذا با شل شدن زنجیر، نیروی وزنه L زنجیر را به سمت پایین می‌کشد. نیروی کششی مذکور موجب حرکت زنجیر و در نتیجه چرخش قرقره B (چرخ زنجیر) می‌شود.

اگر در مخزن چراغ به ارتفاع h روغن ریخته شود، آنگاه نیرویی معادل F_b از طرف سیال به شناور س وارد می‌شود که به شناوری^۱ یا نیروی شناوری (بالابری) مشهور است. نیروی شناوری خالص برابر با وزن سیال جابه‌جا شده توسط گوی است. اکنون، اگر نیروی شناوری از وزن جسم بیشتر باشد، جسم به سمت بالا حرکت می‌کند و جسمی که وزن آن از نیروی شناوری فزونی گیرد، در مایع فرو می‌رود. اگر حجم روغن جابه‌جا شده V_b باشد، نیروی وارد از روغن به گوی برابر با $\rho_0 g V_b$ خواهد بود. در خلال پر کردن چراغ، همواره وضعیتی ایجاد می‌شود که نیروی حاصل از فشار روغن (به سمت بالا) به علاوه نیروی وزن وزنه، از نیروی وزن شناور (به سمت پایین) بیشتر است، لذا باعث بالا رفتن گوی و شناور شدن آن می‌شود تا زمانی که تعادل حاصل شود. اکنون مطلب بالا را با روابط ریاضی زیر بیان می‌کنیم.

زمانی که چراغ بدون روغن است، گوی شناور اصولاً، روی کف مخزن چراغ واقع می‌شود و وزنه معلق است. این حالت باتوجه به بزرگ‌تر بودن وزن شناور از وزن وزنه پدید می‌آید. یعنی

$$mg > Mg \quad (1)$$

نیروی کششی T در زنجیر برابر با وزن وزنه Mg خواهد بود.

با ریختن روغن به داخل چراغ، چنانچه نیروی وزن وزنه نبود، فقط دو نیروی وزن و شناوری به گوی وارد می‌شد (شکل ۸)، یعنی

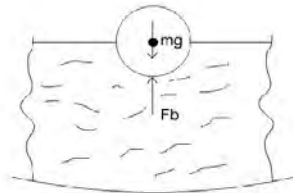
$$F_n = -W + \gamma_0 V_b = -mg + \rho_0 g V_b \quad (2)$$

یا

$$F_n = (\rho_0 V_b - m)g \quad (3)$$

که F_n برآیند دو نیروی عمودی W و $F_b = \gamma_0 V_b$ است.

۱۵۶ استفاده از چراغهای روغنی بنوموسی برای کمک به تدریس و تفهیم کنترل خودکار ...



شکل ۸: گوی شناور در روغن

لازم به ذکر است که در تمام حالات و محاسبات فرض می‌شود که وزنه تعادل هیچ‌گاه در روغن شناور و یا غوطه‌ور نمی‌شود. البته، لحاظ فرض بالا تغییری در نحوه انجام محاسبات ایجاد نمی‌کند.

چنانچه گوی شناور به شکل کره کامل با شعاع a در نظر گرفته شود، حجم آن $V = \frac{4}{3} \pi a^3$ است. اگر گوی به اندازه ارتفاع h در روغن فرورود، حجم آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_b = \frac{\pi}{3} h^2 (3r - h) \quad (۴)$$

همانگونه که ذکر شده V_b حجم روغن جابه‌جا شده نیز است.

اصولاً، گوی شناور به صورت یک کره توخالی است. فرض شود که جرم مخصوص آن ρ_b است (مثلاً برای آهن $\rho_f = 7800 \text{ kg/m}^3$). حداقل شعاع لازم برای اینکه در روغن غرق نشود به شکل زیر به دست می‌آید.

گوی غرق می‌شود اگر $mg > F_b$ باشد، یعنی

$$mg > \rho_o \frac{4}{3} \pi a^3 g \Rightarrow a < \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho_o}} \quad (۵)$$

که ρ_o جرم مخصوص روغن است. به عبارت دیگر، اگر a کمتر از $\sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho_o}}$ باشد شناور در روغن

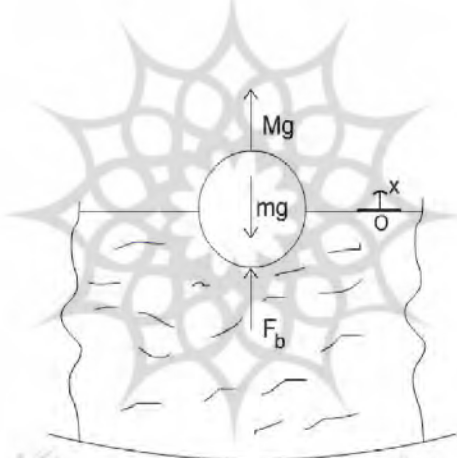
غرق شده و به سمت پایین می‌رود و اگر بزرگ‌تر از این مقدار باشد در سطح روغن شناور باقی می‌ماند. توجه شود که چگالی متوسط گوی کروی توخالی بالا برابر است با:

$$\rho_s = \frac{3m}{4\pi a^3} \quad (۶)$$

بنابراین اگر $\rho_s > \rho_o$ گوی در روغن فرومی‌رود. اگر $\rho_s = \rho_o$ گوی در حال تعادل غوطه‌ور در روغن خواهد بود و اگر $\rho_s < \rho_o$ باشد، گوی در سطح روغن شناور می‌ماند. در حالتی که وزنه از طریق زنجیر به گوی متصل است، عملاً به گوی سه نیرو وارد می‌شود: وزن گوی در جهت پایین، نیروی شناوری به طرف بالا و وزن وزنه، که از طریق زنجیر به گوی وارد شده، و جهت آن به طرف بالا است. در این حالت عملاً حجم روغن جابه‌جا شده کمتر از حالتی است که وزنه وجود ندارد (چرا؟). نیروی خالص وارد به گوی برابر خواهد بود با (شکل ۹):

$$F'_n = -mg + \rho_o V'_b g + Mg = (M + \rho_o V'_b - m)g \quad (7)$$

که V'_b حجم روغن جابه‌جا شده با لحاظ نیروی وزنه است. واضح است که $V'_b < V_b$ است (چرا؟). همانگونه که مشاهده می‌شود جرم شناور و وزنه و شعاع شناور باید به‌دقت انتخاب شود تا امکان حرکت موردنظر فراهم آید.



شکل ۹: نیروهای وارد به گوی شناور

نیروی F'_n (در صورت وجود) به زنجیر وارد و موجب شل شدن آن می‌شود و از آن طرف نیروی وزن وزنه L زنجیر را به سمت خود می‌کشد. با حرکت زنجیر، قرقره B و میله D - C و چرخ A و در نتیجه میله خمیده D - C در جهت خلاف ساعت گرد می‌چرخد و میله D - C به سمت نقطه K حرکت می‌کند.

برای اینکه عمل بالا اتفاق بیفتد باید وزن وزنه L ، Mg ، بیشتر از تفاضل وزن شناور mg و نیروی وارد از سیال به شناور، باشد. یعنی

۱۵۸ استفاده از چراغهای روغنی بنوموسی برای کمک به تدریس و تفهیم کنترل خودکار ...

$$mg < Mg + \rho_0 g V_b' \Rightarrow m < M + \rho_0 V_b' \quad (۸)$$

یا

$$F_n' > 0 \Rightarrow Mg > mg - \rho_0 g V_b'$$

این وضعیتی است که در زمان پر کردن چراغ از روغن اتفاق می افتد و موجب بالا رفتن گوی و پایین رفتن وزنه می شود.

در وضعیت تعادلی، (پایدار یا بدون حرکت)، مثلاً مخزن روغن پر، گوی در بالاترین ارتفاع و چراغ هنوز روشن نشده است، نیروی کششی در زنجیر برابر Mg است. به عبارت دیگر، برآیند نیروهای وارد به گوی در جهت عمودی صفر است:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_n' = -mg + Mg + \rho_0 g V_b' = 0 \quad (۹)$$

$$\Rightarrow mg = Mg + \rho_0 V_b' g \Rightarrow m = M + \rho_0 V_b'$$

پس از پر شدن کامل چراغ، فتیله را آتش زده و چراغ را روشن می کنیم. حرکت دستگاه وارونه می شود، یعنی با سوختن فتیله و مصرف روغن چراغ، سطح روغن در درون مخزن، اکنون به آرامی پایین می آید. با پایین رفتن سطح روغن، شناور نیز همراه آن پایین می رود ولی نیروی وزنه ل ممانعت می کند. در هر حال، چون وزن شناور بیشتر از مجموع وزن وزنه و نیروی شناوری است، لذا این نیرو موجب حرکت زنجیر در جهت مخالف (جهت ساعت گرد) می شود. یعنی:

$$m > M + \rho_0 V_b' \quad (۱۰)$$

بنابراین، خواه در حالت افزودن روغن به چراغ، رابطه (۸)، و خواه در خلال کاهش سطح روغن به علت سوختن روغن، دستگاه از وضعیت تعادلی (۹) خارج شده و موجب حرکت زنجیر می شود. در خلال حرکت زنجیر و بالا رفتن وزنه (یعنی حالت سوختن روغن و در نتیجه کاهش سطح آن)، نیروی کششی F_n' از طریق زنجیر به قرقره ب (چرخ زنجیر) وارد و موجب چرخش آن می شود. باتوجه به شکل ۹ می توان نوشت:

$$F_n' = -mg + Mg + \rho_0 g V_b' = (-m + M + \rho_0 V_b') g \quad (۱۱)$$

لنگر پیچشی وارد به قرقره برابر است با:

$$T = F_n' . r_b = (-m + M + \rho_0 V_b') g r_b \quad (۱۲)$$

میله حول نقطه ب می تواند دوران کند (نقطه ب نقطه اتکای میله م - ه است). به دلیل اینکه قرقره ب و چرخ ۱ به میله م - ه متصل شده اند، لذا دستگاه تحت لنگر پیچشی T در جهت ساعت گرد می چرخد. (شکل ۱۰). یعنی

$$T = F_n' r_b = F_a (R + r_a) \quad (۱۳)$$

F_a نیروی وارد بر انتهای چرخ دنداندار است که با دندانه‌های میله خمیده د - ج درگیر است. از (۱۳) داریم:

$$F_a = \frac{r_b}{R + r_a} F_n' \quad (۱۴)$$

نیروی F_a از طریق چرخ دنداندار ا به میله خمیده د - ج وارد و موجب حرکت آرام میله به سمت نقطه ط می‌شود که در نتیجه فتیله نیز به آهستگی از روزنه ط بیرون می‌آید.

در اثر اعمال نیروی F_n' وارد بر قرقره ب، میله م - ه حول نقطه ب دوران و زاویه میله نسبت به وضعیت اولیه خود (زاویه θ) تغییر می‌کند.

اگر سطح روغن به اندازه Δh کاهش یابد، در نتیجه زنجیر نیز به اندازه Δh حرکت می‌کند. مقدار حرکت محیطی هر نقطه روی قرقره ب، نیز به همین اندازه خواهد بود (با فرض لغزش صفر زنجیر)، یعنی $\Delta h = c_a$ (شکل ۱۰). باتوجه به شکل ۱۰ می‌توان نوشت:

$$c_b = \Delta h$$

$$c_b = r_b \Delta \theta \Rightarrow \Delta \theta = \frac{c_b}{r_b} = \frac{\Delta h}{r_b} \quad (۱۵)$$

از طرف دیگر داریم:

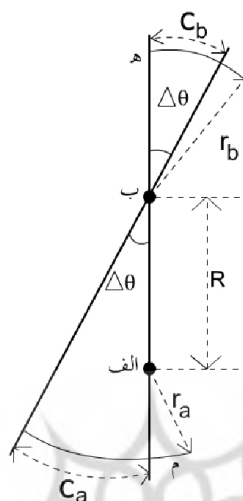
$$c_a = (R + r_a) \Delta \theta \Rightarrow \Delta \theta = \frac{c_a}{R + r_a} \quad (۱۶)$$

بنابراین،

$$c_a = \frac{R + r_a}{r_b} \Delta h \quad (۱۷)$$

c_a تغییر مکان میله خمیده د - ج و یا به بیان دیگر میزان بیرون آمدن فتیله از چراغ است.

۱۶۰ استفاده از چراغهای روغنی بنوموسی برای کمک به تدریس و تفهیم کنترل خودکار ...



شکل ۱۰: نمودار چرخش میله در اثر حرکت زنجیر

چنانچه طول اولیه آن بخش از فتیله که بیرون است l و در اثر سوختن در مدت زمان t ، به اندازه Δl کوتاه شود، باید سطح روغن به اندازه‌های پایین رود تا $\Delta l = c_a$ شود. یعنی

$$\Delta l = c_a = \frac{R + r_a}{r_b} \Delta h \quad (18)$$

معادله (۱۸) رابطه بین کاهش ارتفاع روغن در مخزن و افزایش طول بیرونی فتیله را به دست می‌دهد.

ضریب تناسب $\frac{R + r_a}{r_b}$ است.

باتوجه به رابطه (۱۸) می‌توان نسبتهای موردنظر را از ابعاد اجزای سازکار کنترل خودکار چراغ برای ایجاد ارتباط بین کاهش سطح روغن و میزان موردنظر حرکت فتیله به دست آورد.

همانگونه که مشاهده می‌شود، به سبب کند بودن سوختن فتیله، دستگاه باید بسیار ظریف و حساس باشد. بزرگ‌تر بودن بازویی که چرخ دنده a به آن متصل است نسبت به بازوی طرف قرقره، یعنی $R + r_a \gg r_b$ بخشی از این حساسیت را تأمین می‌کند.

تمام محاسبات بالا بر این اساس انجام شد که اصطکاک وجود ندارد، نیروهای وارده استاتیکی است و حرکت سازکار پله‌ای است. یعنی سازکار از یک وضعیت تعادلی به وضعیت تعادلی دیگر، در اثر حرکت تبدیل می‌شود و یا بالعکس و در نتیجه فرایند این تبدیل تجزیه و تحلیل می‌شود. تحلیل دقیق

مستلزم ورود مفهوم مشتق زمانی و فضایی کمیتها است. آنچه در زیر می آید توصیف کوتاهی از حرکت سازکار چراغ است.

بررسی دینامیکی^۱: با ریختن روغن و یا سوختن آن، سطح روغن در درون مخزن چراغ تغییر می کند، لذا ارتفاع سطح روغن در درون چراغ، تابعی از دبی ورودی، در صورت وجود، و دبی خروجی روغن است.

فرض شود، مقدار روغن ورودی به مخزن چراغ $q_i(t)$ و مقدار خروج (سوختن) روغن q_o بر واحد حجم بر واحد زمان باشد. حجم مخزن روغن را با V نشان می دهیم. فرض شود که در زمان t ، حجم روغن موجود در مخزن، $V(t)$ باشد. لذا اگر مخزن خالی باشد $V(t) = 0$ و اگر کاملاً پر از روغن باشد $V(t) = V_0$. اگر بخشی از مخزن حاوی روغن باشد $0 < V(t) < V_0$.

چنانچه مخزن چراغ در ابتدا و پیش از روشن شدن کاملاً پر شود و در ضمن در خلال سوختن فتیله، روغنی به داخل مخزن ریخته نشود، $V(t)$ از مقدار حداکثر خود یعنی V_0 ، به تدریج به مقدار صفر کاهش پیدا می کند. دستگاه ۹۷، بخش ۳-۳، عملاً سازکاری دارد که با کاهش سطح روغن به صورت خودکار از یک منبع بالادستی مقدار معینی روغن وارد شده و سطح روغن در مخزن را همواره ثابت نگه می دارد. در هر حال، دستگاه مورد بحث ما این سازکار را ندارد.

همانگونه که اشاره شد، تجزیه و تحلیل بالا در حالت پایدار و استاتیکی انجام شد. اما سطح روغن در حال کاهش تدریجی است. در هر حال، اگر سطح روغن در مخزن به آهستگی کاهش یابد، می توان با خطای قابل قبول معادله برنولی را، که برای جریانهای پایدار صادق است، معتبر دانست. برای سادگی مطلب مخزن روغن را می توان به صورت مکعب مستطیل در نظر گرفت.

مجدداً تاکید می شود که آنچه در زیر می آید تحلیل ساده دینامیکی است. روابط داده شده نه جامع اند و نه تمام جزئیات و عوامل مؤثر در تحلیل را در نظر می گیرند.

اگر سوختن بسیار تدریجی روغن، ناشی از سوختن فتیله، تابعی از مساحت سطح روغن باشد، می توان نشان داد که ارتفاع روغن در خلال سوختن، فارغ از شکل مخزن، با نرخ ثابتی تقلیل می یابد. فرض شود که نرخ تغییر حجم روغن برابر باشد با

$$\frac{dV}{dt} = -kA(x) \quad (19)$$

۱. رفتار واقعی دستگاه موردنظر شبه استاتیکی، نه دینامیکی، است. این بخش فقط جنبه آموزشی دارد و می توان از مطالعه آن صرف نظر کرد.

۱۶۲ استفاده از چراغهای روغنی بنوموسی برای کمک به تدریس و تفهیم کنترل خودکار ...

که k یک ثابت مثبت و $A(x)$ مساحت سطح است هنگامی که روغن ارتفاع x دارد (x امتداد عمودی

است). نرخ تغییر ارتفاع روغن $\frac{dx}{dt}$ است. طبق قاعده زنجیره‌ای داریم: $\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dx} \frac{dx}{dt}$

به عبارت دیگر:

$$\frac{dV}{dx} \frac{dx}{dt} = -kA(x) \quad (20)$$

اما حجم کل روغن تا عمق h برابر است با:

$$V(x) = \int_0^h A(x) dx$$

مشتق‌گیری از رابطه بالا نسبت به x می‌دهد: $dV/dx = A(x)$. از قرار دادن این مقدار در معادله (۲۰)، خواهیم داشت:

$$A(x)(dx/dt) = -kA(x) \Rightarrow dx/dt = -k \quad \text{ثابت} \quad (21)$$

اما dx/dt سرعت کاهش ارتفاع روغن در مخزن است که می‌توان آن را با v نمایش داد. بنابراین

$$\frac{dV}{dt} = vA(x) \quad (22)$$

یا

$$V = \int_{t_1}^{t_2} vA(x) dt = A(x) \int_{t_1}^{t_2} v dt \quad (23)$$

رابطه (۲۳) حجم کاهش یافته روغن را در فاصله زمانی $\Delta t = t_2 - t_1$ می‌دهد. چنانچه سرعت مستقل از زمان باشد، داریم

$$V = A(x)v\Delta t \quad (24)$$

دبی حجمی خروجی روغن، از طریق فتیله، در مدت زمان Δt برابر با $V = q\Delta t$ است. کاهش حجم روغن در مخزن در همین زمان برابر با $A\Delta x$ خواهد بود. بنابراین، رابطه (۲۴) می‌دهد:

$$q\Delta t = -A\Delta x \Rightarrow \Delta t = -\frac{A\Delta x}{q} \quad (25)$$

از انتگرال‌گیری رابطه بالا به دست می‌آید:

$$t = \int_0^i dt = -\int_{h_1}^{h_2} \frac{A}{q} dx \quad (26)$$

چنانچه روابط A و q بر حسب h معلوم باشند، زمان لازم برای کاهش سطح روغن از h_1 به h_2 به دست می‌آید. واضح است که از رابطه بالا می‌توان زمان لازم برای سوختن تمام روغن چراغ را پیدا کرد.

حالت خاصی که در آن سطح مقطع ثابت باشد، به عنوان مثال، مخزن به شکل مکعب مستطیل، رابطه (۲۶) به شکل زیر در می آید:

$$t = -A \int_{h_1}^{h_2} \frac{dx}{q} \quad (27)$$

چنانچه فرض شود که دبی خروجی همانند خروج مایع از سوراخی به فاصله h از سطح آزاد روغن در مخزن باشد، در این حالت $q = C_d A_f \sqrt{2gh}$ است. A_f مساحت سطح مقطع فرضی است که از آن روغن خارج می شود و C_d ضریب تخلیه است [۱۶]. با قرار دادن این مقدار در رابطه (۲۷) داریم

$$t = -\frac{A}{C_d A_f \sqrt{2g}} \int_{h_1}^{h_2} h^{-1/2} dh = \frac{2A}{C_d A_f \sqrt{2g}} (\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2}) \quad (28)$$

توجه شود که استخراج رابطه (۲۸) براساس نوعی مشابه سازی انجام شد که دقت آن محل تأمل است. علاوه بر این، محاسبه تجربی C_d و A_f برای سازکار فتیله چندان ساده نیست.

در این مرحله می توان سازکار حرکت زنجیره میله و چرخ دنده را بررسی کرد. سرعت بالا آمدن وزنه، و یا پایین رفتن زنجیر در طرف گوی شناور برابر با نرخ زمانی کاهش ارتفاع روغن در مخزن است:

$$v_b = \frac{dx}{dt} \quad (29)$$

سرعت بالا برابر با سرعت خطی نقاط محیطی چرخ زنجیر ب است. لذا، سرعت زاویه ای قرقره ب و چرخ دندانه دار ا را می توان به دست آورد:

$$v_b = r_b \omega \Rightarrow \omega = \frac{dv_b}{dt} = \frac{v_b}{r_b} \quad (30)$$

سرعت نقطه درگیر شدن چرخ دندانه دار ا با دندانه های میله خمیده د - ج با استفاده از سرعت زاویه ای میله م - ه به دست می آید:

$$v_a = (R + r_a) \omega = (R + r_a) \cdot \frac{v_b}{r_b} \quad (31)$$

$$v_a = \frac{R + r_a}{r_b} v_b$$

معادله (۳۱) رابطه بین سرعت خروج فتیله از سوراخ ط را برحسب نرخ کاهش ارتفاع روغن در مخزن به دست می دهد. توجه شود که چنانچه از رابطه (۱۸) مشتق زمانی گرفته شود، معادله (۳۱) به دست می آید.

۱۶۴ استفاده از چراغهای روغنی بنوموسی برای کمک به تدریس و تفهیم کنترل خودکار ...

از سوی دیگر دبی خروجی، نرخ حجمی کاهش روغن در مخزن، برابر است با:

$$q_o = Av = A\left(\frac{r_b}{R+r_a}\right) \quad (32)$$

معادله حرکت شناور و وزنه را، باتوجه به قانون دوم نیوتن، می توان چنین نوشت (شکل ۱۱):

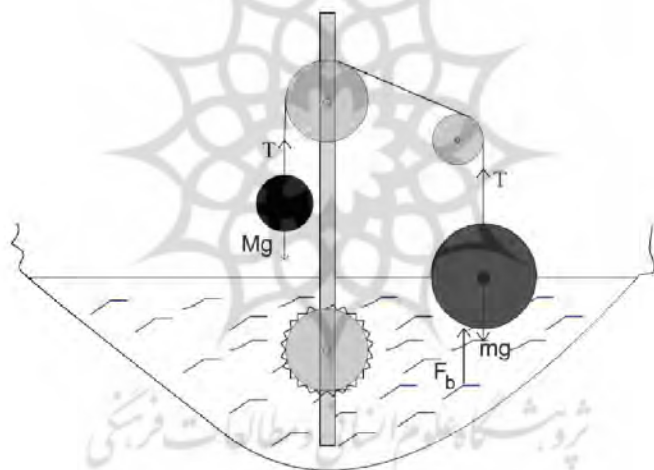
$$T + F - mg = ma \quad \text{معادله حرکت شناور} \quad (33)$$

$$Mg - T = Ma \quad \text{معادله حرکت وزنه} \quad (34)$$

که a شتاب حرکت شناور یا وزنه (کلاً سازگار) است. از ترکیب معادلات (۳۳) و (۳۴) معادله حرکت مجموعه به دست می آید:

$$Mg + F_b - mg = (M + m)a \quad (35)$$

که $F_b = \rho_o V_b' g$. از رابطه بالا می توان شتاب حرکت را به دست آورد.



شکل ۱۱: نمودار سازگار در حال حرکت چراغ روغنی

آنچه در بالا بیان شد فقط منعکس کننده این نکته است که به کمک روابط نسبتاً ساده فیزیک مکانیک می توان به توصیف علمی دستگاه به شیوه امروزی پرداخت. تأکید می شود که تجزیه و تحلیل بالا هنوز کامل نیست.

در انتهای این بخش باید یادآوری کرد که می توان با گرفتن تبدیل لاپلاس از روابط ذی ربط بالا، دستگاه را تجزیه و تحلیل کنترلی کرد (به بخش ۷ مراجعه شود).

۶. طراحی و ساخت چراغ روغنی

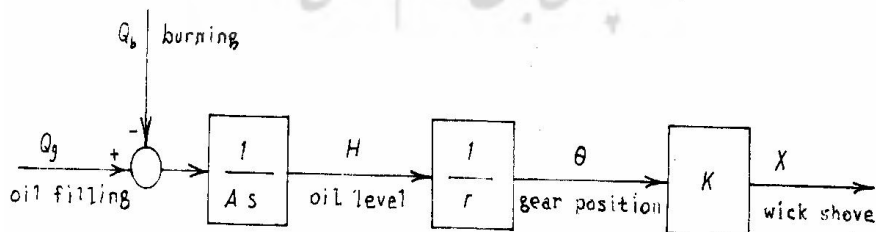
چراغ روغنی با فتیله خودتنظیم (چراغ موصوف در بخش ۴)، با استفاده از توضیحات بنوموسی در کتاب *الحیل*، در سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، طراحی و ساخته شد. در چراغ به جای روغن آب ریخته شد. سازکار طراحی شده، خواه به مخزن آب افزوده و یا از آن آب برداشته شود، مطابق با توصیف مؤلف به خوبی کار می‌کند. شکل ۱۲ عکس نمونه مسی و پلاستیکی ساخته شده از این چراغ روغنی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: نمونه‌های ساخته شده از چراغ روغنی بنوموسی

۷. نمودارهای کنترلی چراغهای روغنی

آتیلایر در کتاب ارزشمند خود به ترسیم نمودارهای کنترلی تمام دستگاه‌های کتاب *الحیل* مبادرت کرده است که در زیر نمودار کنترلی چراغ روغنی با فتیله خودتنظیم آمده است. برای اطلاعات بیشتر، خوانندگان علاقه‌مند را به کتاب مذکور ارجاع می‌دهیم.



شکل ۱۳: نمودار کنترلی چراغ روغنی با فتیله خودتنظیم ([۱۱] - ص ۲۸۷)

۸. جمع‌بندی

هدف اصلی این مقاله معرفی چهار نوع چراغ روغنی، با تأکید ویژه بر چراغ روغنی با فتیله خودتنظیم، تشریح شده در کتاب *الحیل* است، که اکثر آنها را بنوموسی اختراع و طراحی کرده است. از این رهگذر سعی شد که بنوموسی و کتاب *الحیل* وی به فشرده‌گی اما تا حدی کامل نیز معرفی شود. هدف جانبی مقاله را باید غرض تعلیمی ذکر کرد. برای این منظور بخشی از یکی از چراغهای روغنی به شیوه امروزی مورد بررسی علمی قرار گرفت. نکته مهم آن است که چراغ بر چنان اصول علمی و موازین فنی طراحی شده است که بررسی رفتار آن با زبان دانش جدید کاملاً امکان‌پذیر است. انجام چنین تحلیلی زمینه استفاده از آثار علمی دانشمندان گذشته ما را در کتابهای آموزشی و کمک‌آموزشی فراهم می‌آورد. یعنی، موضوعی که غرض اصلی تحریر مقاله را مشخص می‌کند.

در انتها، شاید اولین پرسشی که به ذهن خوانندگان این مقاله متبادر شود آن است که آیا بنوموسی دستگاه خود را با روابط ریاضی فوق‌الذکر توصیف کرده و با وقوف بر قوانین حاکم بر رفتار پدیده‌ها و ارتباط بین آنها به طراحی، ساخت، و آزمایش دستگاه پرداخته است. پاسخ هم منفی است و هم مثبت.

منفی از این نظر که آنها به شیوه‌ای که امروزه قوانین طبیعت توصیف ریاضی می‌شوند، و نیز رفتار نظامها، سازکارها و سازه‌ها، وقوع رویدادها، و نیز طراحی و توصیف فرایندها به شیوه‌ای که امروز تحلیل علمی می‌شوند، واقف و آشنا نبوده‌اند. اما اینکه اصول علمی حاکم و موازین فنی را، که رفتار پدیده‌ها و فرایندها بر آنها استوار است، می‌دانستند و چنان مسلط بوده‌اند که توانایی به‌کارگیری آنها را داشته‌اند، پاسخ مثبت است.

به عنوان مثال، در ارتباط با چراغ روغنی با فتیله خودتنظیم، موضوع مورد بحث این مقاله، بنوموسی باید بر مبانی علمی و فنی زیر باید مسلط بوده باشند:

- اصل شناوری؛ هرچند که ارشمیدس را واضع آن می‌دانند ولی فهم، تسلط و به‌کارگیری این اصل در دستگاه مورد نظر و در شرایط پیچیده‌تر از آنچه که ارشمیدس ذکر کرده است، تسلط ویژه‌ای می‌طلبد؛

- سازکارهای انتقال نیرو و گشتاور؛

- اصول حاکم بر دنده‌های درگیر و زنجیر چرخ؛

- تعادل استاتیکی اجسام؛

- مبانی کنترل خودکار و نحوه استفاده از آن؛

- اصول حاکم بر زنجیره حرکت اجزای یک سازه؛

و نظایر آن.

نکته دیگر آن است که دانشمندان تجربی در آن زمان به آزمایشهای علمی و فنی بسیاری می‌پرداختند. ولی بخشی از طراحیها مبتنی بر سعی و خطای عالمانه صورت می‌پذیرفت. مثلاً، ابعاد و نسبتهای مختلف اندازه‌گیری، که در بخش ۴ این مقاله به دست آمده است، نه براساس محاسبات ریاضی امروزی، بلکه مبتنی بر آزمایشهای متعدد و مشاهدات و تحلیلهای علمی - تجربی حاصل شده است.

مراجع

۱. رحیمی، غلامحسین (۱۳۹۰)، مثالهای کاربردی از کتاب معیارالعقول برای استفاده در کلاسهای درس رشته مهندسی مکانیک، فصلنامه آموزش مهندسی ایران، سال سیزدهم، شماره ۴۹، صص. ۸۹-۱۱۱.
۲. رحیمی، غلامحسین (۱۳۹۱)، ترازهای کرجی؛ نمونه‌های کاربردی برای استفاده در کلاسهای درس و رشته مهندسی نقشه‌برداری، فصلنامه آموزش مهندسی ایران، سال چهاردهم، شماره ۵۴، صص. ۱۶۱-۱۳۹.
۳. رحیمی، غلامحسین (۱۳۹۲)، استفاده از نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی برای تدریس ارتعاشات و اهلیسی (جام تانتالوس و نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی)، فصلنامه آموزش مهندسی ایران، سال پانزدهم، شماره ۵۹، صص. ۱۱۵-۱۳۷.
۴. بنوموسی بن شاکر (۱۳۸۱)، کتاب الحیل، تحقیق عن احمد یوسف الحسن، معهد التراث العلمی العربی (جامعه حلب)، سوریه.
5. De Vaux, C. (1903), Le tiber des appareils pneumatiques Et Des Mechines Hydrauliques, Academie des Inscriptions et des Belles, Paris 38.
6. The Pneumatics of Hero of Alexandria (1851), Translated from the original Greek by Bennet Wood Croft, London.
7. Mayr, O. (1970), The origins of feedback control, M. I. T. Press.
8. Bir, A and Kacar, M. (2006), Pioneers of Automatic Control Systems, FSTC Limited, Dec.
۹. خاکی صدیق، علی (۱۳۸۴)، تاریخ مهندسی کنترل، تهران: دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
۱۰. الجزری، ابن العزین اسمعیل (۱۳۸۰)، مهندسی مکانیک در تمدن اسلامی، ترجمه محمد جواد ناطق و دیگران، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی.
۱۱. بیر، آتیلا (۱۳۸۹)، کتاب الحیل بنوموسی، تحلیل از منظر مهندسی کنترل، ترجمه غلامحسین رحیمی، تهران: پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی.
- Bir, A. E.I. "The book kitab al-Hiyal of Banu Musa bin Shakir: Interpreted in sense of modern system and control engineering", IRCICA, Istanbul, 1990.
۱۲. قناد مهدی و رحیمی، غلامحسین (۱۳۸۲)، تاریخ مهندسی مکانیک در ایران و ابداعات مکانیکی بنوموسی در کتاب الحیل، شاهرود: دانشگاه صنعتی شاهرود.

ضمیمه یک - ترجمه طرح ۹۶ از کتاب الحیل

طرح ۹۶ - چراغ روغنی با فتیله خودتنظیم (۴]- ص ۳۶۵ و ۳۶۶)

"ساختن چراغی (سراج) که فتیله آن به طور خودکار خارج می‌شود^۱ و مثال آن: چراغی می‌سازیم که بر آن علامتهای **ک ط ع** است. بالای آن را با ورق (صفیحه) مسدود می‌کنیم. در این ورق سوراخ **ع** برای ریختن روغن (زیت) ایجاد شده است. محلی که از آن فتیله خارج می‌شود با علامت **ط** مشخص شده است. میله‌ای (قضیب) از مس (نحاس) یا آهن (حدید) فراهم می‌کنیم که روی سطح خمیده کف چراغ قرار می‌گیرد به گونه‌ای که در آن به سهولت حرکت می‌کند. میله با علامت **ج د** مشخص شده است. به این میله رشته‌ای دنداندار متصل و محکم می‌کنیم. طرفی از میله را که علامت و دارد خم می‌کنیم همانگونه که در شکل با **د** و نشان داده‌ایم. سوراخ و را در انتهای آن ایجاد می‌کنیم و یکسر فتیله را در این سوراخ قرار می‌دهیم. حال اگر میله **ج د** حرکت کند با تعبیه قیدی از حرکت سهل و روان میله **ج د**، به استثنای حرکت در جهت علامت **ط**، جلوگیری می‌شود. میله **م ه** را می‌سازیم که در دو طرف آن محور (یاتاقان) تعبیه شده است. محور و یاتاقانها به گونه‌ای نصب می‌شوند که دقیقاً و یا تقریباً به موازات سطح افق باشند. روی میله چرخ دنداندار می‌سازیم، همانگونه که برای آسیا و یا چرخ آسیا می‌سازیم، و آن را با علامت **ا** مشخص می‌کنیم. چرخ مذکور را در نقطه مرکزی آن روی میله **م ه** به طور عمودی نصب و ثابت می‌کنیم، به طوری که چرخ و میله با هم دوران کنند. دندانهای این چرخ باید با دندانهای میله **ج د** درگیر شوند. چون میله **ج د** حرکت کند، فتیله نیز به طرف خارج حرکت می‌کند. به میله **م ه** قرقره (بکره) **ب** را نصب می‌کنیم، و میله باید کاملاً به مرکز قرقره محکم و ثابت شده باشد. بنابراین، هنگامی که میله **م ه** می‌چرخد قرقره **ب** و نیز چرخ **ا** با آن خواهند چرخید. شناور (دبه) **س** را آماده کرده و به سطح بالایی شناور، زنجیر (سلسله) **س ل** را وصل می‌کنیم که از قرقره **ر** می‌گذرد. زنجیر را از قرقره **ب** نیز عبور می‌دهیم همانگونه که در شکل نشان داده شده است. به انتهای دیگر زنجیر **ل** وزنه معلق همانند یک شاقول وصل می‌کنیم. اگر روغن از طریق سوراخ **ع** به داخل ریخته شود، شناور **س** بالا می‌آید، وزنه پایین می‌رود، قرقره **ب** می‌چرخد؛ و با چرخش آن میله **م ه** و چرخ **ا** دوران می‌کنند. میله **ج د** به طرف جهت **ک** حرکت می‌کند. شناور **س** باید از وزنه **ل** سنگین‌تر باشد. در نتیجه هنگامی که فتیله روشن می‌شود و سطح روغن پایین می‌رود، وزنه **ل** بالا می‌آید، قرقره **ب** می‌چرخد و چرخ **ا** را به دوران در می‌آورد. در نتیجه میله **ج د** در جهت **ط** حرکت می‌کند و فتیله بیرون می‌آید. و این چیزی بود که می‌خواستیم توضیح دهیم."