

استفاده از نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی برای تدریس ارتعاشات واهلشی (جام تانتالوس و نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی)

غلامحسین رحیمی*

چکیده: یکی از نمونه‌هایی که در ابتدای کتب و مقالات علمی در باره نوسانات واهلشی^۱ معرفی می‌شود، منبع حاوی مایع و یک سیفون ساده است که به جام تانتالوس^۲ مشهور است. پیگیری نگارنده مقاله نشان داده است که منشأ تاریخی مستندی برای این جام نمی‌توان یافت و احتمالاً از اواخر قرن هجدهم یا اوایل قرن نوزدهم این جام به‌عنوان یک وسیله آزمایشگاهی در مراکز آموزشی و تحقیقاتی اروپا معرفی شده است. در سی و دومین طرح در کتاب *الحیل* احمد بن موسی عملاً دستگاهی معرفی می‌شود که وسیله‌ای با همان عملکرد، اما کامل‌تر از جام تانتالوس است، دستگاهی که در این مقاله "نوسانگر واهلشی"^۳ هیدرولیکی بنوموسی نامیده شده است. در این مقاله نخست سابقه کتاب *الحیل* و فشرده زندگی مؤلف کتاب؛ یعنی احمد بن موسی بن شاکر خراسانی بیان شده است. سپس، سوابق تاریخی و علمی جام تانتالوس بررسی و پس از آن کارکرد جام تانتالوس تحلیل و در انتها، نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی مبتنی بر واهلش به تفصیل تشریح شده است. نویسنده این مقاله مدعی است که بنوموسی اولین مهندسی بود که سیستم نوسانگر واهلشی را در یک دستگاه مکانیکی به‌کار گرفت. علاوه بر این، در این مقاله نشان داده شده است که با استفاده از نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی می‌توان پدیده‌های ارتعاشی را به دانشجویان بهتر تفهیم کرد.

واژه‌های کلیدی: بنوموسی، کتاب الحیل، جام تانتالوس، نوسانگر واهلشی

* استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. rahimi_gh@modares.ac.ir

1. Relaxation Oscillations
2. Tantalus Cup
3. Relaxation Oscillator

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۵)

(پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۲/۳۰)

۱. مقدمه

همان‌گونه که در دو مقاله قبل بیان شد [۱ و ۲]، با استفاده از برخی از 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 از منابع علمی تمدن اسلامی و به ویژه دانشمندان و مهندسان ایرانی آشنا کرد. در این مقاله ضمن معرفی یکی از مهم‌ترین و برجسته‌ترین آثار مهندسی مکانیک در تمدن ایران و اسلام، نشان داده شده است که با استفاده از یکی از طرح‌های این کتاب می‌توان برخی از پدیده‌های ارتعاشی را تشریح کرد. نکته مهم آن است که در ابتدای برخی از مقالات و بعضی از کتب جدید در حوزه ارتعاشات، برای تفهیم بهتر ارتعاشات واهلشی از یک نمونه تاریخی (بنام جام تانتالوس) استفاده می‌شود، همان هدفی که این مقاله، و دو مقاله قبل نگارنده، پی می‌گیرد. در کلاسهای درس ارتعاشات برای رشته‌های مهندسی مکانیک، عمران و برق می‌توان این جام افسانه‌ای را - که فقط جنبه اسطوره‌ای دارد - جایگزین نمونه واقعی کرد که حدود دوازده سده قبل اختراع، معرفی و تشریح شده است.

۲. بنوموسی و کتاب الحیل او

مکانیک^۱ به شاخه‌ای از علم فیزیک اطلاق می‌شود که موضوع آن علم حرکت، شناسایی توازن و تعادل بین نیروها و به کار بردن قوانین حاکم بر آنهاست. هر چند در منابع تمدن اسلامی عنوان صریحی به نام مکانیک وجود ندارد، ولی تمام مباحث آن را در بخش‌های مختلف منابع علمی و فنی می‌توان یافت. احتمالاً در یونان باستان به علم مکانیک "میخانیقون" گفته می‌شد.^۲

در تمدن اسلامی مفهومی معادل مکانیک که مورد پذیرش و استفاده تمام دانشمندان و نویسندگان باشد، مشاهده نمی‌شود. اما یکی از نزدیک‌ترین عناوین به مکانیک علم الحیل است. برای نمونه، باب هشتم کتاب *مفاتیح العلوم* عنوان "علم حیل" را دارد که تمام ابزار و روش‌هایی که در هر دو فصل این باب توضیح داده شده است، به حوزه مهندسی مکانیک تعلق دارد. بنابراین، نزد کاتب خوارزمی علم حیل را می‌توان معادل مهندسی مکانیک یا بخشی از آن دانست. فارابی در کتاب *احصاء العلوم* علم حیل را بخشی از علم تعلیم (ریاضیات) ذکر و آن را به دو بخش حیل عددی و حیل هندسی تفکیک می‌کند. حیل هندسی مشتمل بر بیشتر رشته‌های مهندسی، از جمله مهندسی مکانیک، به تعبیر امروزی می‌شود. بنابراین، نزد فارابی مهندسی مکانیک بخشی از حیل هندسی

1. Mechanics

۲. کاتب خوارزمی منجانیقون Manganon یونانی را معادل "صناعه الحیل" ذکر می‌کند.

است [۳]. سنان بن ثابت در رساله *اصول خمس* که در باره ماشینهای ساده است، مطلب خود را در حوزه *صناعة الحیل* ذکر می‌کند.

کتاب *الحیل بنوموسی*، همانند کتاب *الحیل جزری*، با عنوان *الجامع بین العلم و العمل النافع فی صناعة الحیل* کلاً به حوزه مهندسی مکانیک تعلق دارد. اما همان‌گونه که از عنوان کتاب جزری پیداست، وی محتوای کتاب خود را در چهارچوب *صناعة الحیل* قرار می‌دهد. در مجموع، نمی‌توان "علم حیل" را دقیقاً معادل مهندسی مکانیک دانست، بلکه "صناعة الحیل" به مفهوم مهندسی مکانیک به تعبیر امروزی آن نزدیک‌تر است.

دانش مکانیک را می‌توان به دو بخش نظری و کاربردی (یا صنعتی و مهندسی) تفکیک کرد. در بخش نظری بیشتر مفاهیم بنیادی فیزیک مکانیک مانند ماده، مکان (فضا)، زمان، نیرو، حرکت، بقا، رابطه بین نیرو و حرکت و نظایر آن و قوانین و روابط بین کمیتها مطرح می‌شود. مکانیک کاربردی (یا صنعتی و مهندسی) به تجزیه و تحلیل، طراحی و ساخت نظامات، دستگاهها و ابزارآلات مکانیکی مربوط می‌شود. بخش تحلیلی مکانیک مهندسی به بخش نظری فیزیک مکانیک تکیه دارد. کتاب *الحیل احمد بن موسی*، مورد استفاده این مقاله، به بخش کاربردی مکانیک تعلق دارد.

اشاراتی در باره زندگی بنوموسی: پسران موسی بن شاکر خراسانی سه برادر ایرانی به نامهای محمد، احمد و حسن بودند که از مشهورترین شخصیت‌های علمی ایرانی در قرن سوم هجری (نهم میلادی) محسوب می‌شوند. احمد بن موسی مهندس برجسته‌ای بود که مهم‌ترین کتاب مکانیکی را در قرن سوم به نام *کتاب الحیل* تألیف کرد [۴]. در خصوص زندگی و آثار بنوموسی منابع متعددی در دسترس است. خوانندگان می‌توانند به مدخل بنوموسی از دانشنامه جهان اسلام و نیز پیشگفتار و مقدمه کتاب آتیلا بیر به نام *کتاب الحیل از منظر مهندسی کنترل*، که خود منابع اصلی را معرفی کرده اند، مراجعه کنند [۵].

در کتاب *الحیل احمد بن بنوموسی* در مجموع حدود یک صد دستگاه (وسیله یا طرح) ابداعی آمده است. قریب به ۸۰ درصد طرحها منعکس‌کننده انواع مختلف ظروف و مخازن ساده و پیچیده هستند 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. یکی از طرحهای مندرج در کتاب دستگاهی است که نگارنده آن را «نوسانگر هیدرولیکی واهلشی» نامیده و موضوع مورد بحث این مقاله است.

۳. پیشینه

۳.۱. پیشینه تاریخی

در برخی از مقالات و کتب علمی از جام تانتالوس^۱ به عنوان یکی از مثالهای تاریخی برای ورود به بحث نوسانگرهای واهلشی استفاده می شود. مدلی که از این وسیله ارائه می شود تا به مثابه اولین نوسانگر واهلشی مطرح شود، متشکل از مخزن آبی است که در آن یک سیفون ساده قرار گرفته است و با نرخ ثابتی مایعی به داخل آن ریخته می شود. زمانی که ارتفاع آب به مقدار بحرانی خود می رسد، به یکباره محتویات مخزن از طریق سیفون خالی می شود و فرایند پر و خالی شدن مخزن مجدداً تکرار می شود.

بررسیهای نگارنده در خصوص "جام تانتالوس" به عنوان یک نوسانگر ساده مکانیکی در منابع علمی و فنی یونانی بر جای مانده مانند آثار فیلون، ارشمیدس، کتسیوس، هرون (قرن اول میلادی) و پاپوس، اثری از آن یافت نشد. اما در خصوص "تانتالوس" و "جام حاوی سیفون" به صورت مجزا و منفک از یکدیگر آثاری در دسترس است.

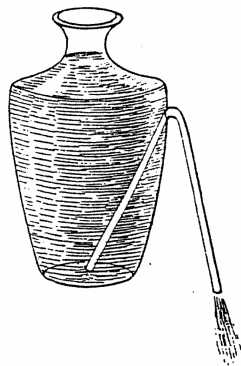
در اسطوره های یونانی تانتالوس پسر زئوس و پلوتون ذکر شده است که با دیونه ازدواج کرد و صاحب سه فرزند به نامهای پلوپس، نیوبه و پروتئاس شد. او به مجلس شام خدایان دعوت شد، اما شام و شراب را ربود و اسرار خدایان را برای انسانهای فانی فاش کرد. ویل دورانت می نویسد: "تانتالوس چون اسرار خدایان را فاش کرد و نوشابه بهشتی و خوراک آسمانی آنان را دزدید و پسر خود، پلوپس، را جوشانید و قطعه قطعه کرد و به آنان عرضه داشت، به خشم خدایان گرفتار آمد. زئوس قطعات بدن پلوپس را دوباره به یکدیگر پیوند داد و برای مجازات تانتالوس او را به عالم اموات برد، دچار تشنگی موحشی کرد و در میان دریاچه های نهاد. چون تانتالوس برای نوشیدن آب کوشش می کرد، آب دریاچه از او کناره می گرفت. شاخه های پر بار میوه بر فراز سرش آویزان بود، ولی چون می خواست به آنها برسد، از او دور می شدند. صخره عظیمی بر فرازش معلق بود و هر لحظه موجودیت او را تهدید می کرد." [۶].

همان گونه که مشاهده می شود، تانتالوس چیزی جز یک موجود افسانه ای نیست و لذا نمی توان به استناد آن یک اثر فنی را ردیابی تاریخی معتبر کرد و در یک متن علمی به آن استناد کرد. بنابراین،

۱. لغتنامه وبستر جام تانتالوس را چنین تعریف می کند: "نوعی سرگرمی فلسفی، متشکل از جامی که تندیس مردی در درون آن قرار گرفته است و از میان تندیس سیفونی تعبیه شده است که بازوی بلندتر آن از کف جام به بیرون امتداد می یابد و امکان خروج هر نوع مایعی که به درون جام ریخته می شود، هنگامی که سطح مایع به بالاترین نقطه خم لوله که درست زیر دهان تندیس است، برسد، فراهم می آورد."

بیش از اطلاعاتی که ویل دورانت به ما می‌دهد، به آن نمی‌پردازیم و نامگذاری جام را صرفاً یک امر سلیقه‌ای و استحسانای می‌پنداریم.^۱

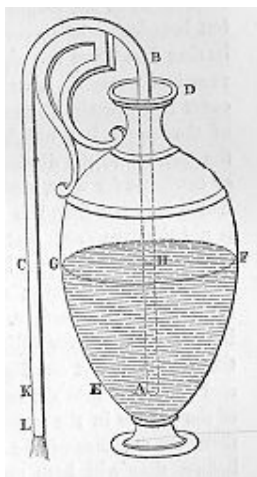
اما در خصوص "جام حاوی سیفون" گفتنی است این جام در هر دو اثر فیلون (طرح نهم)^[۷] و هرون (طرح اول)^[۸] مشاهده می‌شود. در شکل ۱ سیفون ساده فیلون از کتاب پنوماتیک وی و در شکل ۲ همین سیفون ساده از کتاب پنوماتیک هرون نشان داده شده است.



شکل ۱: سیفون ساده فیلون [۸]

۱. شاید خروجی متناوب آب از جام به نوعی تداعی کننده رفت و برگشت آب دریاچه در جهت خلاف خواست تانتالوس باشد. به همین دلیل، در داخل جامهای تزئینی که ساخته می‌شود، مجسمه‌ای قرار دارد که خم لوله به موازات چانه مجسمه قرار گرفته است. چون سطح آب بالا آید، قبل از رسیدن به دهان مجسمه به یکباره خالی می‌شود که تداعی کننده رفت و برگشت آب دریاچه و مجازات تانتالوس است. در ضمن، اسم عنصر شیمیایی تانتالوم Tantalum با عدد اتمی ۷۳ نیز از نام تانتالوس اخذ شده است، بدون اینکه هیچ‌گونه ارتباط معنایی با آن داشته باشد. البته، برخی از سایتها، مانند ویکی پدیا Wikipedia، این وسیله را "جام فیثاغورث"^۱ نیز خوانده‌اند. در همین سایت نیز بیان شده که این انتساب بر اساس یک حکایت تاریخی استنتاج شده است. به علاوه، ادعا شده است که هرون این وسیله را در دستگاه شبه ریاتیک خود به کار گرفته است. جست و جوی نگارنده حداقل در دو کتاب "مکانیک" و "پنوماتیک" هرون چنین ادعایی را تأیید نمی‌کند. درهرحال، باب تحقیق در این باره گشوده است.

۱۲۰ استفاده از نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی برای تدریس ارتعاشات واهلشی (جام تانتالوس ...



شکل ۲: سیفون ساده هرون [۸]

توضیحات فیلون و هرون نشان می‌دهد که آنها این جام را فقط برای نشان دادن عملکرد سیفون ساده یا لوله خمیده معرفی می‌کنند، نه وسیله‌ای برای نمایش حرکات نوسانی. از این رو، نمی‌توان طرح‌های فیلون و هرون را همانند "جام تانتالوس" به مثابه یک نوسانگر ساده مکانیکی فرض کرد. از نمونه‌های بر جای مانده و مطالعه سوابق تاریخی چنین برداشت می‌شود که این وسیله از اواخر قرن هجدهم یا اوایل قرن نوزدهم در برخی از مراکز آموزشی اروپا به‌عنوان یک وسیله علمی مورد استفاده بوده است [۹].

در تمدن اسلامی انواع مختلف سیفون‌ها کاملاً شناخته شده بود و از آنها به‌عنوان یک وسیله مستقل یا به مثابه جزئی از یک دستگاه پیچیده‌تر استفاده می‌شده است. یوسف کاتب خوارزمی (نیمه اول قرن چهارم ه. سیفون ساده (و نیز سیفون متحدالمرکز یا كأس العدل) را به روشنی تعریف می‌کند و آن را سَخَّارَه یا سارقَة‌الماء (به فارسی آبدزدک) می‌نامد:

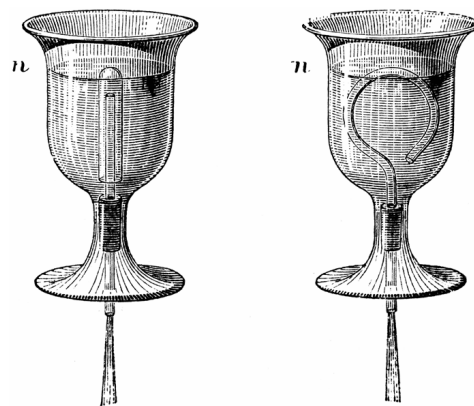
"لوله‌ای خمیده است که از شیشه یا غیر آن ساخته شده، یک سر آن را در آب یا دیگر مایعات می‌گذارند و از سر دیگرش می‌کنند تا آب داخل آن شود و از سری که در دهان است فرو ریزد، این ریزش تا هنگامی که سر لوله در آب باشد پیوسته ادامه دارد و این عمل ممکن نمی‌شود، مگر هنگامی که سر لوله‌ای را که می‌کنند از سطح آب پایین‌تر باشد، زیرا اگر از سطح آب بلندتر باشد، آب ریزش نمی‌کند" [۱۰].

به رغم اینکه فیلون و هرون سیفون ساده را به‌عنوان یک وسیله مستقل در کتاب پنوماتیک خود معرفی کرده‌اند، اما احمد بن موسی به دلیل سادگی و نیز احتمالاً شناخته شدن آن به وسیله عموم

مردم، آن را به عنوان طرحی مستقل مطرح نکرده، بلکه در دستگاههای مختلف از آن بهره برده است. وی عمدتاً از سیفون متحدالمرکز (کأس العدل)، که کارکرد آن هوشمندانه‌تر است و در ضمن برای شروع جریان مایع نیاز به محرک اولیه ندارد (مانند مکش اولیه خارجی)، استفاده کرده است. بنوموسی سیفون ساده را در طرحهای متعدد خود، مانند طرحهای ۴، ۱۶-۱۸، ۳۲، ۳۴، ۵۸، ۶۳ و ۸۴ به کار گرفته است.

به عنوان جمع‌بندی اولیه باید تأکید شود که نگارنده به هیچ مدرک مستندی حاکی از وجود داشتن "جام تانتالوس" به مثابه نوسانگر مکانیکی، قبل از احمد بن موسی، دست نیافته است. لذا، فرض می‌شود که وی برای اولین بار این وسیله ساده، اما بسیار هوشمندانه را طراحی کرده و در یک دستگاه با عملکرد از پیش تعیین شده به کار گرفته است. حتی اگر ثابت شود که این جام قبل از احمد بن موسی ساخته شده است، باز هم وی آن را به عنوان جزئی از دستگاه پیچیده‌تر به کار می‌گیرد و آن دستگاه خود نوآوری وی محسوب می‌شود.

در غرب، همان‌گونه که بیان شد، جام نوسانگر حاوی سیفون کمابیش از قرن هجدهم به بعد گزارش شده است. عکسها و نمودارها و نمونه‌های فراوانی از این جام در سایتهای مختلف در دسترس است که در شکل ۳ چند مدل از آن نشان داده شده است. نکته جالب آنکه در حال حاضر، این جام در شکلهای مختلف و به شکل فانتری ساخته شده و به قیمت نسبتاً بالا به فروش گذاشته می‌شود.



شکل ۳: الف. نموداری از جام تانتالوس، مرجع [۱۱]

۱۲۲ استفاده از نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی برای تدریس ارتعاشات واهلشی (جام تانتالوس ...



شکل ۳: ب. نمونه ساخته شده از جام تانتالوس (اخذ از سایتهای ذی ربط)

۲.۳. پیشینه تحقیق

در خصوص تحلیل علمی آنچه به نام جام تانتالوس مشهور است، فقط مقاله چیاو^۱ و همکاران در دسترس بود [۱۲]. در چند مقاله دیگر فقط در ابتدای مقاله برای طرح علمی یا تاریخی مطلب در حد چند پاراگراف یا حداکثر یک صفحه به آن پرداخته شده است. برای نمونه، این مثال را در ابتدای مقاله گارل^۲ [۱۳] می توان یافت. در مقاله گرانسمن^۳ [۱۴] و به ویژه مقاله ونگ^۴ [۱۵] سازگاری متفاوت (سیستم الاکلنگی)، اما با عملکردی مشابه برای توصیف اولیه نوسانات واهلشی معرفی شده است.

-
1. Chialvo
 2. Garrel
 3. Gransman
 4. Wang

در خصوص دستگاه احمد بن موسی که مورد بحث این مقاله است، هیچ‌گونه مطلب و مقاله‌ای پیدا نشد و فقط آتیلا بیر نمودار کنترلی این دستگاه را همانند دستگاه‌های دیگر کتاب *الحیل* ترسیم کرده که در انتهای این مقاله آمده است [۵].

۴. ملاحظه علمی

سیفون ساده یا سیفون خمیده^۱ یا لوله خمیده، لوله‌ای خمیده و یو (U) شکل است که معمولاً برای تخلیه مایعات به کار گرفته می‌شود. همان‌گونه که گفته شد، این سیفون در کارهای هرون و فیلون به‌عنوان یک وسیله مستقل معرفی شده است. احمد بن موسی نیز در طرح‌های خود از آن بهره برده است. یکی از این طرح‌هایی که سیفون ساده در آن استفاده شده، دستگاه جالبی است که مولد نوسانات مکانیکی با درنگ است.

نوسان Oscillation نوعی حرکت تکرارپذیر در جهت کشش زمانی حول یک نقطه مرجع معمولاً نقطه تعادل است. مثال واضح حرکت نوسانی، حرکت رفت و برگشتی یک پاندول است. نوسانگرها را از یک نظر می‌توان به دو دسته شبه خطی و غیرخطی تقسیم کرد. دسته‌ای از پدیده‌های مصنوعی و طبیعی را می‌توان با نوسانگرهای غیرخطی مدل کرد که به نوسانگرهای واهلشی (انقطاعی یا درنگ مند) مشهورند. نمودار حرکت نوسانگرهای واهلشی مشتمل بر یک دوره زمانی است که در بخشی از آن تغییرات زیادی رخ نمی‌دهد و در بخشی از زمان تغییرات ناگهانی به وجود می‌آید؛ به عبارت دیگر، در نوسانات پرشی یک مقیاس زمانی واحد وجود ندارد. شکل موج معمولاً به صورت مربع، دوزنقه یا مثلث است. در مجموع، نوسانات واهلشی پدیده‌هایی هستند که هر چند در آنها موج پیاپی و در طول زمان به‌طور تناوبی و همسان تکرار می‌شود، اما نوسانها شکل سینوسی ساده را ندارند. نوسانات واهلشی با مشخصه‌های زیر شناخته می‌شوند:

الف. یک فرایند تناوبی است که در آن تغییر هموار و آهسته حالت یک شیء در یک بازه زمانی محدود با تغییر نامنظم سریع حالت در یک زمان بی نهایت کوتاه تعویض می‌شود و تغییر می‌کند.

ب. یک سازکار غیر خطی است که یک حالت دو پایداره^۲ را فراهم می‌کند.

پ. در هر دوره تناوب، یک فرایند واهلشی Relaxation مندرج است که انتقال از یک حالت پایدار به یک حالت دیگر را پدید می‌آورد.

ت. شکل موج نوسانات واهلشی شبیه دندان‌اره است که در آن، برای مثال، تغییر مکان تا مقدار معینی افزایش می‌یابد و سپس، به صفر سقوط می‌کند و بعد از آن این چرخه تکرار می‌شود.

1. Bent Siphon
2. Bistable

۱۲۴ استفاده از نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی برای تدریس ارتعاشات واهلشی (جام تانتالوس ...

به صورت ریاضی نوسانهای واهلشی را می‌توان با یک معادله دیفرانسیل مرتبه دو با ضرایب ثابت توصیف کرد.

واندر پل^۱ در سال ۱۹۲۶، اولین فردی است که دستگاه نوسانگر واهلشی Relaxation Oscillator را، در خلال مطالعه مدارات الکتریکی، پیشنهاد، تجزیه و تحلیل و معادله دیفرانسیل حاکم بر آن را استخراج کرد.

۵. نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی

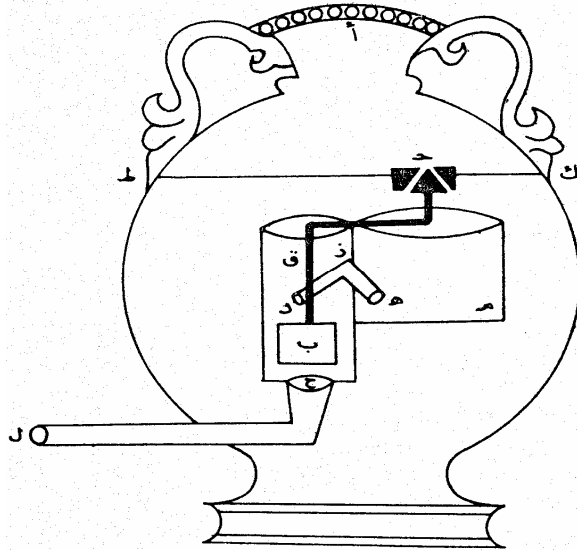
در این بخش ابتدا نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی به صورت فشرده معرفی و تشریح و سپس، اجزای آن به صورت علمی تحلیل می‌شود.^۲

۵. ۱. طرح ۳۲ - پارچی که مایع را به مقدار معین و در فواصل زمانی از پیش تعیین شده بیرون می‌ریزد (شکل ۴). پارچ با صفحه افقی ط - ح - ک به دو بخش تقسیم شده است. مایعی که از طریق دهانه پوشیده شده با ورق مشبک ریخته می‌شود، در محفظه بالایی پارچ جمع می‌شود. بخش فوقانی به مثابه منبع مایع عمل می‌کند. مقداری مایع از طریق سوپاپ ح به داخل مخزن م جاری می‌شود. دستگاه طوری تنظیم شده است که چنانچه ارتفاع و مقدار آب در منبع بالا در حد معینی باشد، سوپاپ مخروطی باز شود. هنگامی که ارتفاع مایع در مخزن م به ذ برسد، سیفون ه - ذ - د دفعتاً مایع را به مخزن ق - ذ که شناوری در داخل آن است، منتقل می‌کند. شناور ب این مخزن بالا می‌آید و سوپاپ ح را می‌بندد. محتویات مخزن ق - ذ از طریق لوله ح - ل بیرون می‌ریزد. با کاهش ارتفاع مایع در مخزن ق - ذ شناور ب نیز پایین می‌رود و سوپاپ ح متصل به آن باز می‌شود و آب مجدداً به مخزن م وارد می‌شود. چرخه (سیکل) قبل مجدداً تکرار می‌شود. این فرایند تا زمانی که مایع منبع بالایی تخلیه شود، ادامه می‌یابد.

از منظر مهندسی سیستم نوین این دستگاه همانند یک نوسانگر مکانیکی عمل می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقدار مایع و زمان تخلیه در تمام چرخه‌ها یکسان است. این دستگاه احمد بن موسی را برای توصیف حرکات تناوبی، نه حرکات ساده، می‌توان به‌کار گرفت.

1. Vander Pol

۲. در انتهای مقاله ترجمه کامل طرح ۳۲ بنوموسی از کتاب الحیل آمده است.



شکل ۴: نوسانگر مکانیکی بنوموسی [۱۶]

برای تحلیل دستگاه نخست به دو جزء مشتمل بر نوسانگر ساده هیدرولیکی و سوپاپ شناور تفکیک و سپس، عملکرد دستگاه به طور کامل تشریح می‌شود. ابتدا رفتار سیفون ساده با زبان علمی به اختصار توصیف می‌شود.

۵. ۲. تحلیل سیفون ساده

شکل ۵ نمودار ترسیم شده فقط از بخش مخزن حاوی سیفون از دستگاه احمد بن موسی (شکل ۴) است که اینک جداگانه به صورت علمی تحلیل می‌شود.

لوله خمیده شکل ۵ را در نظر بگیرید که یک سر آن در مخزن م و سر آزاد آن در مخزن ق است. مخزن م تا نقطه ذ پر از مایع است. ارتفاع مؤثر مایع در لوله سیفون h است. با فرض اینکه مایع ایده‌آل، تراکم ناپذیر و جریان در لوله آرام و پیوسته است و نیز با صرف نظر از اتلافات، سرعت خروج مایع از انتهای لوله سیفون د با رابطه (۱) به دست می‌آید^۱:

۱. برای تحلیل هیدرولیکی این‌گونه دستگاهها می‌توان از کتب درسی مکانیک سیالات مانند کتاب استریتز [۱۷] یا مانسون [۱۸] استفاده کرد.

۱۲۶ استفاده از نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی برای تدریس ارتعاشات واهلشی (جام تانتالوس ...

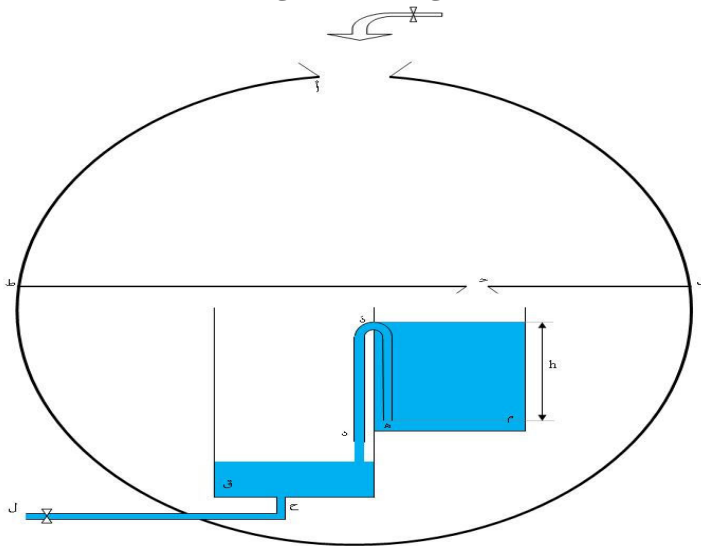
$$v_d = \sqrt{2gh_1} \quad (1)$$

که h_1 فاصله عمودی ذ-د است. رابطه ساده (۱) که فرمول مشهور تریچلی^۱ است، سرعت مایع در انتهای آزاد سیفون را نشان می‌دهد. بنابراین، سرعت سیفون با توجه به فرضیات اولیه، منحصرأ به وسیله تفاوت ارتفاع بین سطح آزاد مایع مخزن بالایی و نقطه خروج مایع از لوله نشان داده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، عمق لوله در مخزن بالایی سرعت سیفون را متأثر نمی‌سازد.

دبی حجمی مایع خروجی از سیفون با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$q_d = v_d \cdot A_s \quad (2)$$

و دبی جرمی با ضرب رابطه یادشده در چگالی ماده به‌دست می‌آید.



شکل ۵: نمودار پیکر آزاد یک سیفون ساده

1. Torricelli

۲. نکته جالب آنکه این معادله برای سرعت سیفون نظیر معادله سقوط هر شیء از ارتفاع h_1 است، برای مثال، اگر سنگی را از ارتفاع h_1 رها کنیم، با فرض صرف‌نظر کردن از مقاومت هوا، سرعت سنگ در لحظه برخورد با زمین از رابطه (۲) به دست می‌آید.

۵.۳. نوسانگر ساده هیدرولیکی احمد بن بنوموسی

شکل ۵ را در نظر بگیرید. منبع بالای پارچ که یا پر شده است یا مثلاً از شیر آب تغذیه می‌شود، از دریچه h به‌طور پیوسته به داخل مخزن M حاوی سیفون، با دبی q_i می‌ریزد. در این مرحله فرض می‌شود که نرخ ورود مایع ثابت است. هنگامی که ارتفاع آب به بالاترین نقطه خم لوله نقطه z ؛ یعنی ارتفاع بحرانی برسد، سیفون آغاز به کار می‌کند و مایع مخزن M تا ارتفاع h به سرعت با نرخ جریان Q به مراتب بیشتر از جریان ورودی تخلیه می‌شود و به مخزن Q می‌ریزد و از آنجا از طریق لوله h به خارج از پارچ هدایت می‌شود. بنابراین، ارتفاع مایع در مخزن به h می‌رسد. با باز شدن دریچه و ورود آب به مخزن M و رسیدن ارتفاع آب به نقطه z ، فرایند تکرار می‌شود. تکرار خودکار این چرخه تا زمانی که آب وارد مخزن M بشود، ادامه می‌یابد.

اگر نرخ ورودی مایع به مخزن حاوی سیفون ثابت باشد، افزایش ارتفاع مایع در مخزن از h به H بر حسب زمان به صورت خطی خواهد بود؛ یعنی :

$$h(t) = \frac{h_0 - h_{cr}}{t_1} + h_0 \quad (3)$$

در شکل ۶ تغییرات ارتفاع مایع در مخزن حاوی سیفون نشان داده شده است. خط AB با معادله (۳) توصیف می‌شود. به رغم اینکه پر شدن مخزن تقریباً فرایندی خطی است، اما تخلیه آن فرایندی غیر خطی است؛ به عبارت دیگر، نرخ تخلیه مایع تابع غیر خطی از ارتفاع مایع در مخزن است، چرا که در خلال تخلیه با کاهش ارتفاع نرخ تخلیه نیز کاهش می‌یابد. زمانی که ارتفاع مایع به h برسد، عمل سیفون شدن قطع و چرخه تکرار می‌شود. دوره تناوب T تابعی از نرخ ورودی مایع است. برای این دستگاه دوره تناوب نوسان فقط وابسته به نرخ جریان ورودی و تفاضل ارتفاع h است. در شکل ۶ نرخ تخلیه مایع از سیفون بر حسب زمان نشان داده شده است.

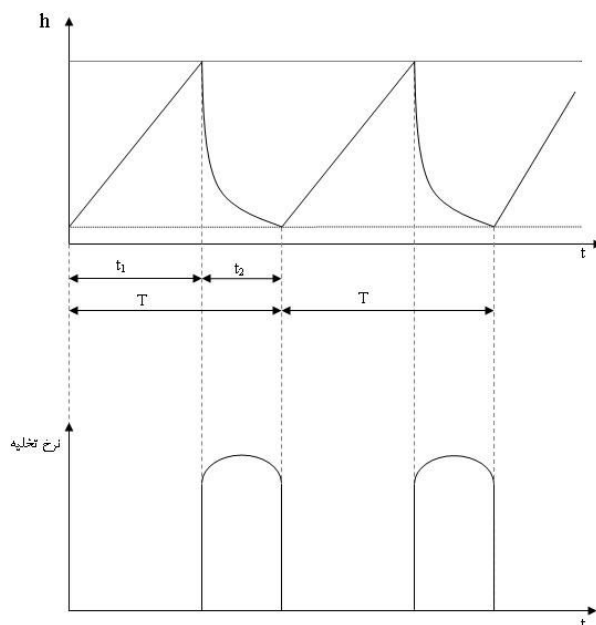
هر دوره تناوب متشکل از دو بخش است. در خلال بخش اول فرایند $(t = t_2)$ انرژی در

دستگاه ذخیره می‌شود و در خلال بخش دوم $(t = t_2)$ انرژی ذخیره شده به خارج منتقل می‌شود. واهلش relaxation به تخلیه سریع دستگاه ارجاع دارد. دامنه^۲ (نوسان) نوسانات آب در مخزن M ، h است. مهم‌ترین شرط نوسان کننده آن است که به صورت زیر است:

$$q_0 - q_i > 0 \quad (4)$$

1. Period
2. Amplitude

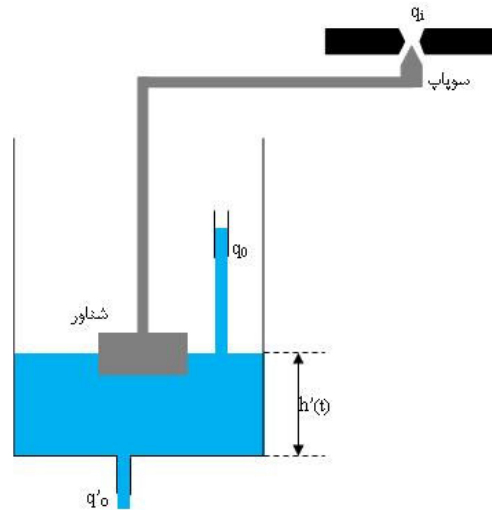
۱۲۸ استفاده از نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی برای تدریس ارتعاشات واهلشی (جام تانتالوس ...



شکل ۶: تغییرات ارتفاع مایع و دبی خروجی بر حسب زمان

۵. ۴. سوپاپ شناور

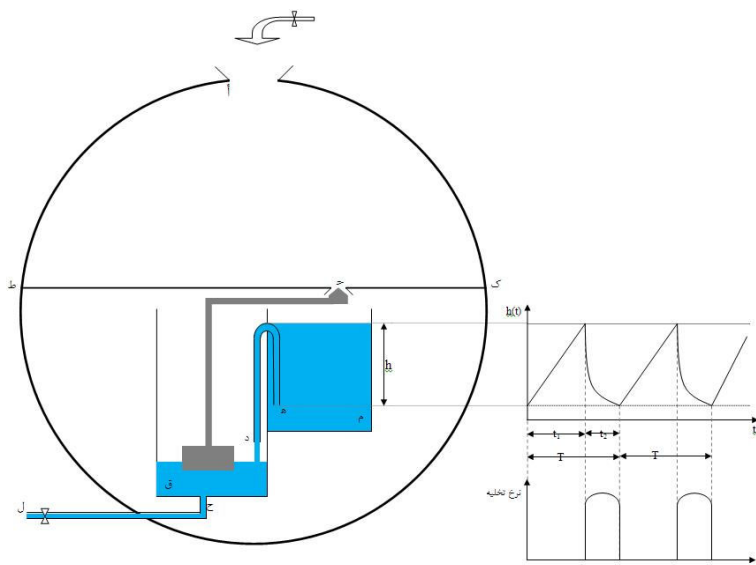
سوپاپهای شناور در طرحهای مختلف احمد بن موسی به کار گرفته می‌شود. این سوپاپها معمولاً متشکل از یک گوی شناور است که به آن میله‌ای متصل است و سوپاپ بسته به نوع کاربرد و شکل دستگاه طراحی شده به آن متصل است. در طرحهای کتاب *الحیل* از دو نوع سوپاپ شناور استفاده می‌شود: سوپاپ بازکننده و سوپاپ مسدود کننده. در دستگاه مورد بحث، سوپاپ از نوع مسدود کننده دریچه ورود مایع است. این سوپاپها علاوه بر اینکه نرخ ورود و خروج مایع را کنترل می‌کنند، به مثابه کلید قطع و وصل نیز هستند. این سوپاپها می‌توانند نرخ جریان ورودی و خروجی در مخزن حاوی شناور را کنترل کنند (خودکنترلی)، همان‌گونه که می‌توانند نرخ جریان را در یک بخش از دستگاه کنترل کنند (کنترل خارجی). در شکل ۷ سوپاپ شناور دستگاه مورد بحث نشان داده شده است.



شکل ۷: سوپاپ شناور بنوموسی

۵. ۵. دستگاه نوسانگر واهلشی بنوموسی با سازکار کنترل نرخ مایع ورودی اکنون از ترکیب مناسب مخزن حاوی سیفون و مخزن حاوی گوی شناور و سوپاپ متصل به آن، دستگاه شکل ۸ حاصل می‌شود که نمودار باز ترسیم شده شکل ۴ است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدل جام تانتالوس را نمی‌توان به عنوان نوسانگر واهلشی کامل در نظر گرفت، چرا که مخزن حاوی سیفون به‌طور مداوم توسط منبع بالا دستی (مثلاً شیر) با مایع تغذیه می‌شود. در نتیجه، زمانی که سیفون به کار می‌افتد تا زمانی که عمل سیفون کردن متوقف می‌شود، مایع خروجی به مراتب بیشتر از حجم مایع به ارتفاع h است؛ به عبارت دیگر، چون مقدار مایع تخلیه شده بیش از حالت واقعی نوسانگر واهلشی است، لذا، زمان تخلیه (t_2 در شکل ۶) نیز بیش از مدت لازم برای تخلیه در یک دستگاه مطلوب است، چرا که تخلیه باید به مراتب سریع‌تر از زمان پر شدن رخ دهد. حال آنکه در مدل جام تانتالوس چنین نیست. اما این نقیصه در دستگاه بنوموسی کاملاً مرتفع شده است، چرا که در خلال فعال بودن سیفون چون دریچه ورود مایع بسته است، تخلیه سریع رخ می‌دهد و نمودار تغییرات ارتفاع مایع متشکل از پرشدن تدریجی و تخلیه ناگهانی خواهد بود، همان‌گونه که از یک نوسانگر واهلشی انتظار می‌رود.

۱۳۰ استفاده از نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی برای تدریس ارتعاشات واهلشی (جام تانتالوس ...



شکل ۸ : دستگاه نوسان کننده واهلشی بنوموسی

۶. جمع بندی و نتیجه گیری

کتاب *الحیل* احمد بن موسی یکی از آثار برجسته مهندسی در قرون میانه محسوب می شود. این کتاب حاوی بیش از صد طرح است که تعداد چشمگیری از آنها دستگاههایی هستند که با آب و هوا کار می کنند و بعضاً سازکار پیچیده ای را فراهم می سازند. سی و دومین طرح بنوسی دستگاهی است که مایع ذخیره شده یا ورودی را در فواصل زمانی معین به بیرون انتقال می دهد. این دستگاه را می توان اولین نمونه یک نوسانگر واهلشی کامل در تاریخ نوسانگرهای مکانیکی (هیدرولیکی) دانست. در این مقاله نشان داده شد که بر خلاف آنچه در برخی از مقالات و کتب آمده است، آنچه جام تانتالوس نامگذاری شده است، هیچ گونه پشتوانه تاریخی ندارد و فقط یک نامگذاری با استفاده از اسامی اساطیر یونانی برای مقاصد آزمایشگاهی بوده است. دوم اینکه حتی این جام عملاً برای نشان دادن و توضیح حرکات نوسانی واهلشی ناقص است و نوسانگر بنوموسی این پدیده را کامل تر مدل می کند. در نتیجه، معلمان و استادان می توانند برای تشریح اولیه پدیده های نوسانی از این دستگاه استفاده کنند؛ به عبارت دیگر، در تفهیم پدیده نوسانات واهلشی می توان از دستگاه احمد بن موسی به جای جام اسطوره ای تانتالوس یا الاکلنگ بهره گرفت.

مراجع

۱. رحیمی، غلامحسین (۱۳۹۰)، مثالهای کاربردی از کتاب معیارالعقول برای استفاده در کلاسهای درس رشته مهندسی مکانیک، فصلنامه آموزش مهندسی ایران، شماره ۴۹، سال سیزدهم، 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 (۱۳۹۰)، فارابی، علم الحیل و فلسفه فناوری، مجله تاریخ تمدن اسلامی (مقالات و بررسیها)، دانشکده الهیات دانشگاه تهران، سال ۴۴، شماره ۱ (شماره پیاپی ۹۲)، بهار و تابستان، صص. ۱۰۲ - ۸۵.
۴. احمد بن موسی بن شاکر خراسانی (۱۳۷۲)، کتاب الحیل، ترجمه سرافراز غزنی، انتشارات آستان قدس رضوی.
۵. آتیلایرا (۱۳۸۹)، کتاب الحیل از منظر مهندسی کنترل ۱، ترجمه غلامحسین رحیمی، پژوهشگاه علوم انسانی، تهران.
۶. ویل دورانت (۱۳۶۷)، تاریخ تمدن، یونان باستان، جلد دوم، سازمان انتشارات و آموزش انقلاب اسلامی، تهران، ص. ۴۷.
7. Carra De Vaux (1903), "Le tiber des Appareils Pneumatiques ...", Academie des Inscriptions et des Belles, Paris 38.
8. The Pneumatics of Hero of Alexandria (1851), Translated from the original Greek by Bennet Woodcroft, London.
9. Gerard L'Estrange Turner (1983), "Nineteenth-century scientific instruments", University of California Press, 320 Pages.
۱۰. یوسف کاتب، خوارزمی، (۱۳۶۲)، مفاتیح العلوم، ترجمه حسین خدیو جم، تهران: مرکز انتشارات علمی و فرهنگی، ص. ۳۳۸.
11. Deschanel, A. (1884) Elementary treatise on natural philosophy, Part I. Mechanics, hydrostatics, and pneumatics, New York: D. Appleton and Company, P. 235.
12. Chialvo, Dante, R. et al. (1991), Bifurcation in a simple hydraulic oscillator: The "Tantalus cup", *European Journal of Physics*, Vol. 12, pp. 297-302.
13. Garrel, Renaud (2008), Using the relaxation oscillations principle for simple phonation modeling, *Journal of Voice*, Vol. 22, No. 4, pp. 385-95.
14. Gransman, J. (1987), Asymptotic methods for relaxation oscillations and applications, *Applied Mathematical Sciences* in, Vol. 63, Springer, New York.
۱۵. بنوموسی بن شاکر (۱۳۸۱)، کتاب الحیل، تحقیق از احمد یوسف الحسن، معهد التراث العلمی العربی (جامعه حلب)، سوریه، ص. ۱۰۵.
16. Wang, DeLiang (1999), Relaxation oscillators and networks, In J.G. Webster(ed.), *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, Wiley & Sons, Vol. 18, pp. 396-405.
17. Streeter, V.L. et al. (1998), *Fluid mechanics*, Mc Graw-Hill.

۱. مشخصات کتاب اصلی به قرار زیر است:

Atilla Bir, E.I. "The Book kitab al-Hiyal of Banu Musa bin Shakir :Interpreted in Sense of Modern System and Control Engineering", IRCICA, Istanbul, 1990

۱۳۲ استفاده از نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی برای تدریس ارتعاشات واهلشی (جام تانتالوس ...

۱۸. مانسون، یانگ و اکی شی (۱۳۸۷)، مکانیک سیالات، ترجمه بهار فیروز آبادی، مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

پیوست یک - ترجمه طرح شماره ۳۲ الحیل^۱ (۱۱)، صص ۱۰۵-۱۰۳)

"ساختن پارچی (جره) با یک شیر (بزال) که در آن مقدار دلخواهی آب ریخته می‌شود؛ هنگامی که شیر باز می‌شود، مقداری آب از آن خارج می‌شود. سپس، برای دوره زمانی معین - که وابسته به میزان آب خروجی و فاصله زمانی قطع تا تخلیه مجدد آب مورد نظر ماست - خروج آب قطع می‌شود. ابه عبارت دیگر، نرخ تخلیه معین می‌شود و ابعاد مخزنی که از آن مقدار اندازه‌گیری شده خروجی در دوره زمانی مورد نظر محاسبه می‌شود - هیل^۱. این وضعیت به‌طور پیوسته ادامه می‌یابد؛ یعنی جریان آب برای دوره زمانی معین قطع می‌شود و برای دوره تناوب بعد جاری می‌شود تا تمام محتوای پارچ خالی شود. این دستگاه برای لوله‌های (انابیب) گرم و سرد حمامها و همچنین، برای استفاده در برخی نهرها و چشمه‌ها (عیون) مناسب است.

برای این منظور پارچ ۱ - ک - ط را فراهم می‌سازیم که تاج آن با علامت ا مشخص شده است و آن را با ورق مشبک می‌پوشانیم، البته، اگر پوشش ورقی هم برای آن در نظر نگیریم، مشکلی پدید نمی‌آید. اکنون پارچ را از وسط یا نزدیک به وسط، در مناسب‌ترین محل، با ورق ک - ط به دو بخش تفکیک می‌کنیم، همان‌گونه که در شکل^۲ نشان داده شده است. سوراخ (ثقب) ج را در ورق ایجاد و نشیمنگاه مناسب برای سوپاپ مخروطی (باب مطحون) را تعبیه می‌کنیم. در زیر سوراخ، مخزن (حوض) م - ه نصب می‌کنیم. ابعاد این مخزن بر اساس گنجایش مورد نظر تعیین شده است، چرا که ظرفیت آن همان مقداری است که در هر دوره زمانی (دفعه) از شیر خارج می‌شود. هنگامی که آب یا شربت از سوراخ ج خارج می‌شود، به داخل مخزن م - ه می‌ریزد. در کنار مخزن م - ه مخزن کوچک ق با ارتفاع زیاد و عرض کم نصب می‌کنیم که بخش فوقانی آن با مخزن م - ه همسطح و بخش تحتانی آن، با فاصله مناسبی، پایین‌تر از کف مخزن مذکور است. در مخزن ق شناور (دبه) ب را قرار می‌دهیم و میله‌ای (قضیب) را به بالای آن لحیم می‌کنیم، همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است، طول میله به اندازه‌ای است که برای بستن سوراخ ج کافی باشد. در بخش بالایی میله سرپوش

۱. این ترجمه با استفاده از متن انگلیسی هیل و مقابله با متن عربی صورت گرفته است. واژه های داخل پرانتز معادل‌های عربی برخی کلمات فنی کتاب الحیل است.

Hill, Donald Routledge(1978), Book of Ingenious Devices, Kulwer Academic Publishers

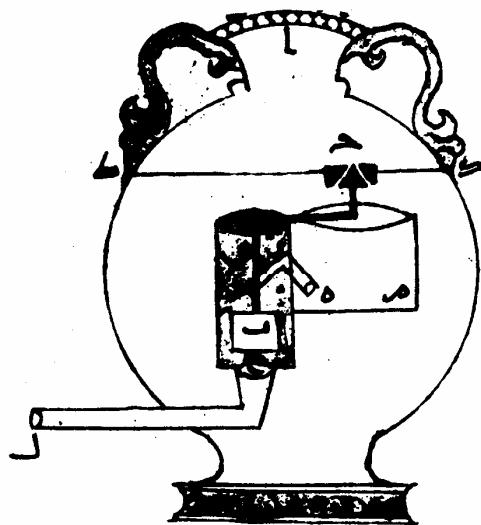
۲. شکل ۴ را ببینید.

۱۳۴ استفاده از نوسانگر هیدرولیکی بنوموسی برای تدریس ارتعاشات واهلشی (جام تانتالوس ...

plug سوپاپ مخروطی را لحیم می‌کنیم، به گونه‌ای که چون شناور بالا آید، با ورود سرپوش به نشیمنگاه، سوراخ ج بسته شود. نزدیک به کف مخزن م - ه لوله‌ای را قرار می‌دهیم که تا نقطه ذ ارتفاع می‌گیرد و سپس، به گونه‌ای به طرف پایین خم می‌شود که انتهای دیگر آن د، پایین‌تر از لبه ه باشد. از کف مخزن ق در محل ج، بعد از اینکه سوراخی ایجاد شد، از سوراخ ح لوله‌ای را که به طرف خارج امتداد می‌یابد، نصب می‌کنیم. این لوله عملاً خروجی پارچ را تشکیل می‌دهد.

واضح است که چون آب را به داخل بخش بالایی پارچ بریزیم، از سوراخ ح ورق ک - ط به داخل مخزن م - ه جاری می‌شود. هنگامی که مخزن م - ه پر می‌شود و سطح آب به نقطه ذ می‌رسد، آب از طریق لوله خمیده (انبوب منعطف) به داخل مخزن ق منتقل می‌شود و شناور بالا می‌آید و سوپاپ سوراخ ح را می‌بندد. هنگامی که ریختن آب متوقف و شیر باز می‌شود، آب از طریق شیر جاری و از لوله خارج می‌شود تا مخزن م - ه و سپس، مخزن ق خالی شوند. شناور ب پایین می‌آید. تخلیه از شیر متوقف و آب از سوراخ ج به داخل مخزن م - ه جاری می‌شود و این عمل به صورت خودکار تکرار می‌شود.

مناسب است که این دستگاه در حمامها و هر جایی که بتوان شیر را در آنجا مستقر کرد، استفاده شود و این چیزی است که می‌خواستیم توضیح دهیم."



شکل ۹: نمودار طرح ۳۲ از نسخه خطی توپکاپی (۴)، ص. ۳۱۲

پیوست دو - نامگذاری طرح

احمد بن موسی برای هیچ‌کدام از دستگاه‌های خود عنوانی ذکر نکرده است که نگارنده از آن استفاده کند. او ابتدا تمام دستگاهها را بر حسب عملکرد معرفی می‌کند که می‌توان آن را "عنوان مبسوط" خواند و سپس، نحوه ساختن دستگاه و کارکرد آن توضیح داده می‌شود. در هر حال، از این توصیف فشرده ابتدای طرحها عنوان مورد نظر احمد بن موسی را نمی‌توان استخراج کرد، ولی می‌توان عنوانی را متناسب با عملکرد دستگاهها برای آنها انتخاب کرد. بر این اساس، نگارنده این مقاله مطابق با برداشت خود عنوانی را که با عملکرد دستگاه متناسب و با ادبیات جدید علمی سازگار است، انتخاب کرده است. ممکن است که محقق دیگری به سیاقی دیگر رفتار کند.

دقت علمی، نه تاریخی، در تاریخ علم وقوع چنین نامگذاریهایی را تأیید می‌کند. برای مثال، قانون ارشمیدس (قانون شناوری)، قانون هوک (قانون رفتار ارتجاعی اجسام)، و ... علاوه بر این، گاه نامگذاریها فقط بر اساس مشابهتهای اسطوره‌ای و ادبی و نظایر آن صورت می‌گیرد، مانند جام تانتالوس، سفینه آتلانتیس و ...

پیوست سه: نمودار کنترلی طرح ۳۲ بنوموسی (۵)، ص: ۱۴۶):

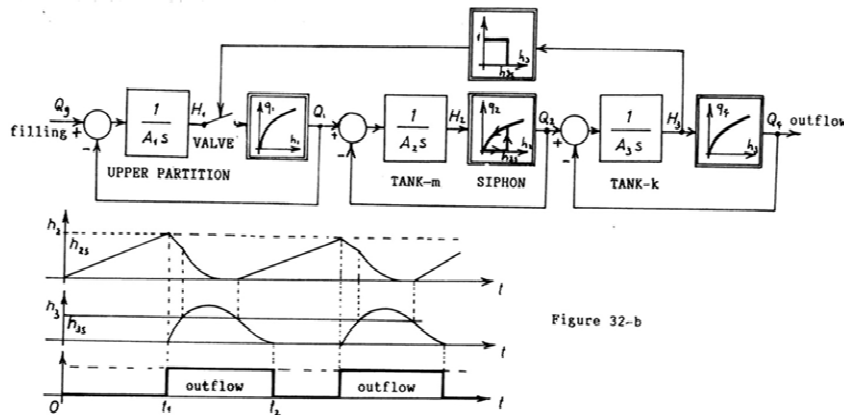


Figure 32-b