



## روش‌های مقیاس‌بندی فشارسنج‌های خلأ و کاربرد آن‌ها در پژوهش‌های هسته‌ای

زهرا یوسفی ماکویی، مریم صالحی\*، سیدمحمدجمال قطبی، علی اصغر زواریان  
گروه پژوهشی فن‌آوری خلأ، سازمان جهاد دانشگاهی صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۳۴۴۵-۶۸۶، تهران - ایران

**چکیده:** برای بررسی صحت و دقت عملکرد فشارسنج‌های خلأ و به عبارتی مقیاس‌بندی آن‌ها، از دو نوع استاندارد با عنوان‌های اولیه و ثانویه استفاده می‌شود؛ استانداردهای اولیه مورد بررسی عبارت از استاندارد فشارسنج جیوه‌ای، استاندارد انبساط حجمی و استاندارد جریان روزنه‌ای هستند که، به ترتیب، برای مقیاس‌بندی فشارسنج‌ها در محدوده‌ی خلأ پایین، خلأ متوسط و خلأ بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله سعی شده است انواع روش‌های استانداردسازی فشارسنج‌های خلأ و مبانی علمی حاکم بر این روش‌ها و نیز کاربرد و اهمیت آن‌ها در پژوهش‌های هسته‌ای به اجمال مورد بررسی قرار گیرد.

**کلیدواژه‌ها:** فشارسنج خلأ، مقیاس‌بندی، استانداردهای اولیه و ثانویه

## The Calibration Methods of Vacuum Pressure Gauges and Their Usage in Nuclear Researches

Z. Yousefi Makouee, M. Salehi\*, S.M.J. Ghotbi, A.A. Zavarian  
Vacuum Technology Research Group, ACECR-Sharif, University Branch, P.O.Box: 13445-686, Tehran - Iran

**Abstract:** There are two criteria named primary and secondary standards, to calibrate vacuum pressure gauges. The most important primary standards are: "mercury manometer vacuum standard", "volume expansion vacuum standard" and "orifice flow vacuum standard", where they are used in low vacuum, medium vacuum and high vacuum ranges, respectively. In this paper we have tried to explain all the methods of standardizing vacuum pressure gauges and their scientific bases. We have also described briefly the importance and the usage of the methods which are applied in nuclear researches.

**Keywords:** Vacuum Pressure Gauge, Calibration, Primary and Second Standards

## ۱. مقدمه

امروزه فن آوری خلأ در بیش تر صنایع و نیز پژوهش‌ها نقش مهم و حیاتی دارد. وسعت و اهمیت کاربردهای فن آوری خلأ در زمینه‌های مختلف از جمله هسته‌ای، ریزالکترونیک، هوا-فضا، نانو فن آوری و... قابل توجه است. فرایندهای تولیدی جدید، پیچیده و با خلوص بالا، نیاز به اندازه‌گیری دقیق خلأ دارند. دقت این اندازه‌گیری‌ها تأثیر زیادی بر اعتبار و صحت نتایج، کیفیت محصول، بازده مصرف انرژی و در برخی فرایندها بر روی امنیت کار با سیستم دارد. بنابراین دقت اندازه‌گیری باید به صورت جدی مورد توجه قرار گیرد. این دقت به کمک فشارسنج‌های مقیاس‌بندی شده و تأیید آن‌ها با استانداردهای مرتبط فراهم می‌شود. استانداردهای اولیه خلأ، بالاترین کیفیت اندازه‌گیری را دارند زیرا در آن‌ها فشار مستقیماً از اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی (مثل جرم، طول، زمان و...) با دقت زیاد و با حد تفکیک بالا به دست می‌آید. این استانداردها بر قوانین فیزیکی و اندازه‌گیری‌های دقیق کمیت‌های فیزیکی مرتبط، استوار هستند. به فشارسنجی که طبق استانداردهای اولیه مقیاس‌بندی شده و فشارسنج‌های دیگر با استفاده از آن مقیاس‌بندی می‌شوند، فشارسنج مرجع یا استاندارد ثانویه گفته می‌شود. فشارسنج مرجع باید از کیفیت، پایداری، تکرارپذیری و دقت فوق‌العاده‌ای نسبت به فشارسنج‌های دیگر برخوردار باشد. رایج‌ترین استانداردهای اولیه عبارت از فشارسنج جیوه‌ای<sup>(۱)</sup>، انبساط حجمی<sup>(۲)</sup> و جریان روزنه‌ای<sup>(۳)</sup> هستند. این سه استاندارد و استاندارد ثانویه، در بسیاری از مراکز جهانی استانداردسازی و مقیاس‌بندی به منظور مقیاس‌بندی فشار استفاده می‌شوند [۱].

## ۲. دسته‌بندی خلأ

یکی از مهم‌ترین پارامترها برای شناسایی و دسته‌بندی خلأ، کمیت مسافت آزاد میانگین<sup>(۴)</sup> ذرات باقی‌مانده در خلأ است که برابر است با متوسط فاصله‌ای که مولکول‌ها بین دو برخورد متوالی می‌پیمایند. وقتی این کمیت، با کاهش تعداد مولکول‌ها (در دمای ثابت)، از اندازه‌ی محفظه بزرگ‌تر شود، خلأ ایجاد شده، با عنوان خلأ بالا<sup>(۵)</sup> شناخته می‌شود. با وجود این، خلأ براساس نوع فن آوری به کار رفته برای اندازه‌گیری آن، به محدوده‌های مشخص شده در جدول ۱ تقسیم می‌شود، هر چند که این دسته‌بندی مورد توافق جهانی نیست [۲، ۳].

## جدول ۱. محدوده‌های خلأ

نام محدوده	محدوده‌ی فشار (میلی‌بار)
خلأ پایین	۳۰-۱۰۰۰
خلأ میانی	۱۰ <sup>-۳</sup> -۳۰
خلأ بالا	۱۰ <sup>-۹</sup> -۱۰ <sup>-۳</sup>
خلأ خیلی بالا	۱۰ <sup>-۱۲</sup> -۱۰ <sup>-۹</sup>
خلأ بی‌نهایت بالا	زیر ۱۰ <sup>-۱۲</sup>

## ۳. مقیاس‌بندی براساس استاندارد اولیه

### ۱.۳ محدوده‌ی خلأ پایین

رایج‌ترین روش در این محدوده، استفاده از فشارسنج جیوه‌ای است. این فشارسنج‌ها عموماً از یک لوله‌ی U شکل تشکیل شده‌اند (شکل ۱. الف). مهم‌ترین اصل در فشارسنج‌های جیوه‌ای، اصل تساوی فشار در ارتفاع‌های یکسان است؛ اختلاف فشار در یک طرف لوله‌ی U شکل باعث اختلاف ارتفاع جیوه‌ی موجود در آن شده و این اختلاف ارتفاع، فشار درون محفظه خلأ را تعیین می‌کند [۱].

$$P = \rho gh + P_{ref} \quad (1)$$

فشارسنج‌هایی که بر این اساس در آزمایشگاه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند، تنها به لحاظ روش اندازه‌گیری طول ستون جیوه با یک‌دیگر متفاوت‌اند. دقت به دست آمده با فشارسنج جیوه‌ای، به دقت و صحت اندازه‌گیری طول ستون جیوه بستگی دارد.

به طور نظری از فشارسنج‌های جیوه‌ای برای اندازه‌گیری فشارهای پایین‌تر نیز می‌توان استفاده کرد اما از آنجایی که در این فشارها طول ستون جیوه باید از مرتبه‌ی متر باشد، با توجه به وزن جیوه و نیز افزایش فشار بخار آن، به لحاظ کاربردی دشوار است.

### ۲.۳ محدوده‌ی خلأ متوسط

#### ۱.۲.۳ سنجه‌ی مک‌لئود<sup>(۶)</sup>

نوع خاصی از فشارسنج‌های جیوه‌ای، فشارسنج مک‌لئود است (شکل ۱. ب). سنجه‌ی مک‌لئود قدیمی‌ترین و دقیق‌ترین فشارسنج مطلق است که تا به امروز هم‌چنان به عنوان یک استاندارد اولیه برای مقیاس‌بندی دیگر ابزارهای اندازه‌گیری فشار مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سنجه در سال ۱۸۷۴ توسط مک‌لئود



(الف)

## ۲.۲.۳ روش انبساط حجمی

یک روش متداول و دقیق دیگر برای مقیاس‌بندی فشارسنج‌ها در این محدوده، روش انبساط حجمی است که با نام‌های مختلف انبساط فشاری، انبساط حجمی و انبساط ایستا مطرح می‌شود. این روش بر قانون بویل (که طبق آن حاصل ضرب فشار در حجم مقدار مشخصی از هر گاز در دمای ثابت، مقداری ثابت است) استوار است [۱].

دو روش برای سیستم‌های استاندارد حجمی استفاده می‌شود: تک حجمی و چند حجمی.

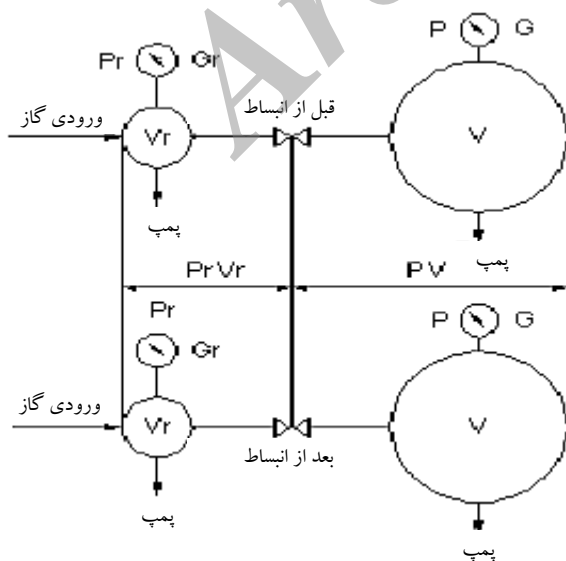
روش تک حجمی<sup>(۱)</sup>

عیب عمده‌ی روش تک حجمی این است که دقت در مقیاس‌بندی محدوده‌ی وسیعی از خلأ از دست می‌رود. در روش انبساط تک حجمی، یک حجم مرجع کوچک  $V_r$  از گاز مقیاس‌بندی در دمای  $T_1$ ، در فشار مرجع  $P_r$ ، که فشار نسبتاً بالایی است، به درون حجم بزرگ  $V$  که، بیش از این خلأ شده و در دمای  $T_2$  قرار دارد، منبسط می‌شود (شکل ۲). فشار بعد از انبساط با استفاده از قانون بویل این است

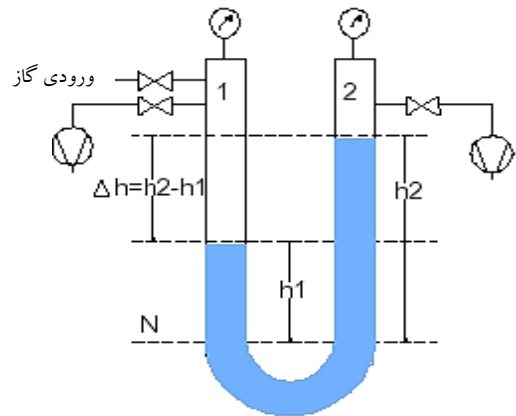
$$P = P_r \left[ \left( \frac{V_r}{V_r + V} \right) \right] \left( \frac{T_2}{T_1} \right) = P_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right) R \quad (۳)$$

که در آن،  $R$  نسبت انبساط است و چنین تعریف می‌شود

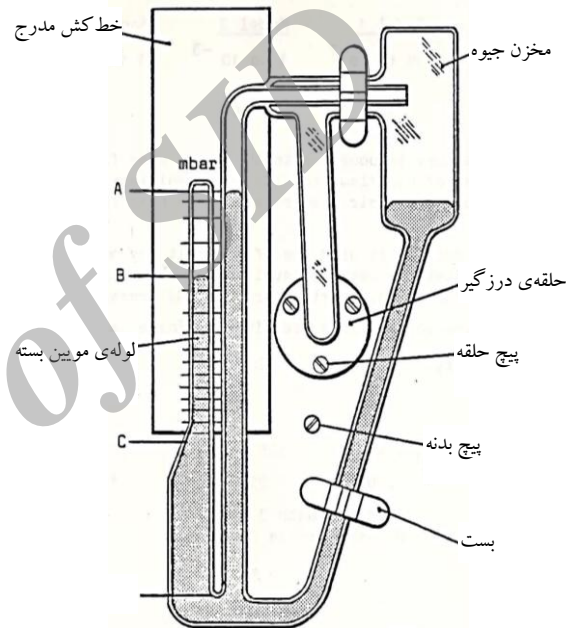
$$R = \frac{V_r}{(V_r + V)} \quad (۴)$$



شکل ۲. اصول سامانه‌ی انبساط حجمی تک حجمی.



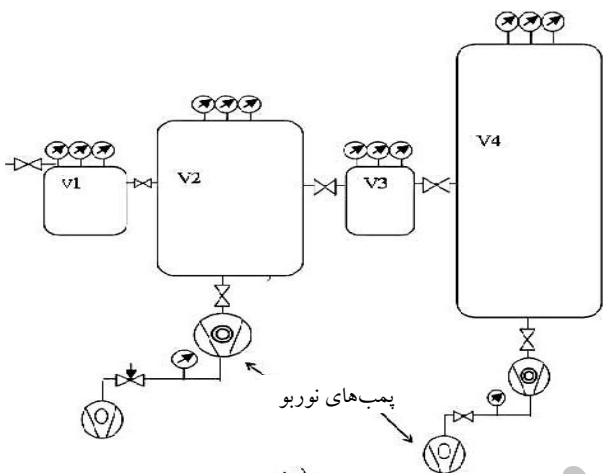
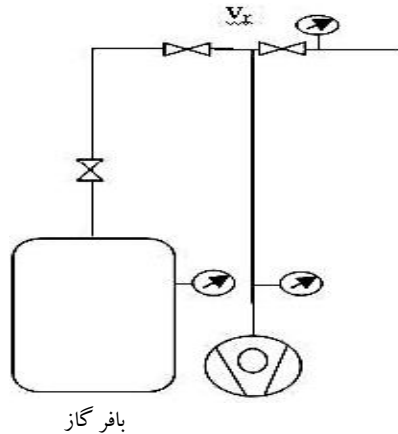
(ب)



شکل ۱. فشارسنج جیوه‌ای (الف)؛ نمونه‌ای از فشارسنج مک‌لئود (ب).

اختراع شد. می‌توان نشان داد که این نسخه، به طور نظری می‌تواند برای اندازه‌گیری فشار در محدوده‌ی  $10^{-1}$  تا  $10^{-7}$  میلی‌بار مورد استفاده قرار گیرد. این وسیله برای گازهای پایدار در تمام محدوده‌ی  $10^{-1}$  تا  $10^{-4}$  میلی‌بار قابل اعتماد است. پایین‌تر از این فشار، اندازه‌گیری تنها به صورت کیفی انجام می‌شود. در این نوع فشارسنج، فشار درون محفظه‌ی خلأ به وسیله‌ی اختلاف ارتفاع بین دو سطح جیوه مشخص می‌شود. به این ترتیب، اگر شعاع مقطع لوله‌ها و  $h$  اختلاف ارتفاع جیوه در دو لوله باشد، با فرض این که  $V$  مجموع حجم محفظه‌ی  $C$  و لوله‌ی موئین بسته‌ی بالایی آن باشد، مقدار فشار در لوله‌ی موئین بسته (و به تبع آن مقدار این کمیت در محفظه‌ی خلأ) چنین محاسبه خواهد شد [۴]

$$P_1 = \frac{\rho g \pi r^2 h^2}{V - \pi r^2 h} \quad (۲)$$



شکل ۳. سامانه‌ی ایجاد فشار مرجع (الف)، سامانه‌ی انبساط حجمی چهار مرحله‌ای (ب).

### ۳.۳ محدوده‌ی خلأ بالا

روش جریان روزنه‌ای، که «روش پویا» یا «انبساط پیوسته» نیز نامیده می‌شود، برای مقیاس‌بندی خلأسنج‌ها در محدوده‌ی جریان مولکولی<sup>(۱۰)</sup> (خلأ بالا و خیلی بالا) استفاده می‌شود. در این روش، با برقراری تعادل بین آهنگ ورود گاز به محفظه و آهنگ خروج آن، یک خلأ پایدار با فشار قابل محاسبه در محفظه ایجاد می‌شود. معمول‌ترین شکل استفاده‌ی آن، روزنه‌ی حلقه‌ای با رسانایی<sup>(۱۱)</sup> قابل محاسبه است که گاز مقیاس‌بندی از طریق آن، از نیمه‌ی بالایی محفظه‌ی خلأ، شناخته شده به عنوان محفظه‌ی مقیاس‌بندی، تخلیه می‌شود. برای همه‌ی انواع دستگاه‌های مقیاس‌بندی که با روش روزنه‌ای کار می‌کنند، اندازه‌گیری دقیق آهنگ جریان گاز ضروری است. یکی از مواردی که باعث تنوع و تمایز در سامانه‌های مختلف روش جریان روزنه‌ای می‌شود، تعداد روزنه یا روش مرجع اندازه‌گیری آهنگ جریان است. از

روش چند حجمی برای فشارهای پایین‌تر و محدوده‌های وسیع‌تر فشار استفاده می‌شود. از این روش در محدوده‌هایی که در آن‌ها روش تک حجمی از دقت کافی برخوردار نیست، استفاده می‌شود. سامانه‌هایی که روش انبساط چند حجمی در آن‌ها استفاده می‌شود، می‌توانند سه مرحله‌ای، یا بیش‌تر باشند؛ سامانه‌ی مورد استفاده در روش انبساط چند حجمی از مجموعه‌ای از حجم‌های کوچک و بزرگ تشکیل می‌شود (شکل ۳). با ایجاد مرحله‌های بیش‌تر در انبساط حجمی، قابلیت مقیاس‌بندی در خلأ خیلی بالا<sup>(۹)</sup> نیز حاصل می‌شود، اما به دلیل مشکلات ساختی، افزایش سطح نشی و حجم زیاد سامانه، برای مقیاس‌بندی خلأ خیلی بالا معمولاً از استاندارد جریان روزنه‌ای، استفاده می‌شود. برای یک سامانه‌ی انبساط حجمی چهار مرحله‌ای، معادله‌های روش تک حجمی چنین تغییر می‌کنند [۵]

$$P = P_r \left[ \left( \frac{V_r}{V_r + V} \right) \left( \frac{V_1}{V_1 + V_r} \right) \left( \frac{V_r}{V_r + V_r} \right) \left( \frac{V_r}{V_r + V_f} \right) \right] \quad (۵)$$

$$R = \left[ \left( \frac{V_r}{V_r + V} \right) \left( \frac{V_1}{V_1 + V_r} \right) \left( \frac{V_r}{V_r + V_r} \right) \left( \frac{V_r}{V_r + V_f} \right) \right] \quad (۶)$$

معادله‌ی (۳) و به تبع آن معادله‌ی (۵)، اساساً با این فرض که فشارهای موردنظر، حاصل شرایط هم‌دما هستند، به دست آمده‌اند. فشار مرجع، با یک استاندارد اولیه یا ثانویه که با در نظر داشتن دقت و محدوده‌ی فشار به تجهیزها متصل شده است، اندازه‌گیری می‌شود. فشار مرجع در سامانه‌ی انبساط حجمی معمولاً از چند میلی‌بار تا یک میلی‌بار است. این فشار را می‌توان با یک فشارسنج استاندارد ثانویه مانند یک فشارسنج خازنی که با یک فشارسنج جیوه‌ای مقیاس‌بندی شده است، اندازه‌گیری نمود. روش انبساط حجمی، روش اصولی و قدرتمند است که به عنوان یک استاندارد اولیه، برای ایجاد فشار مقیاس‌بندی در محدوده‌ی فشار تعیین شده، در محدوده‌ی خلأ متوسط، به کار می‌رود.



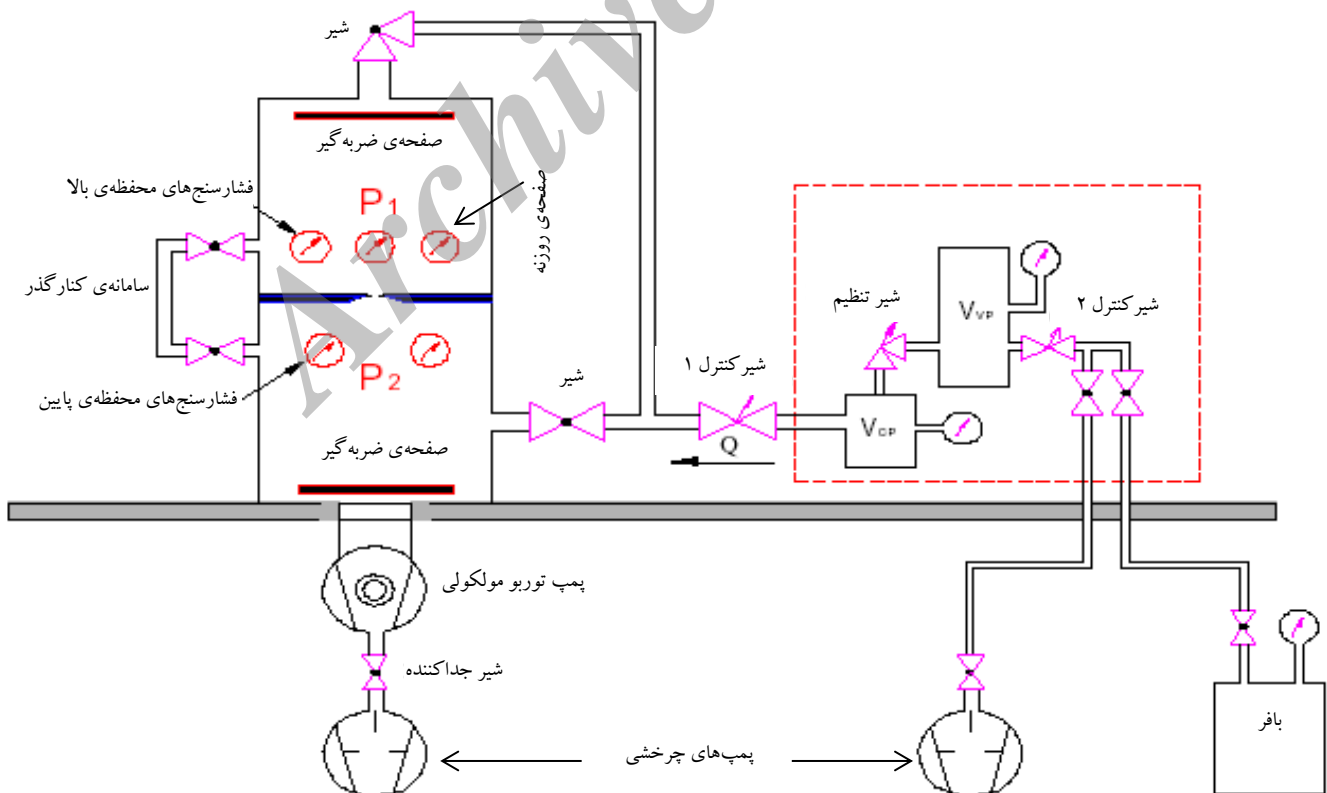
معمولاً برای اطمینان از دقت فشار به دست آمده،  $P_2$ ، آن را در چند آزمون ابتدایی با یک فشارسنج مرجع مقایسه می‌کنند. کمیت‌های  $Q$ ،  $R$ ،  $C$  در معادله‌ی (۷)، ثابت‌های مشخصه‌ی هر دستگاه مقیاس‌بندی هستند و در ابتدا برای هر دستگاه، و برای همیشه، محاسبه می‌شوند. پس از این اندازه‌گیری و به دست آمدن رابطه‌ی (۷) برای یک دستگاه، هر فشارسنج دلخواه دیگر که در این دستگاه نصب شود، نیز قابل مقیاس‌بندی خواهد بود.

#### ۴. مقیاس‌بندی براساس استاندارد ثانویه

این روش، از مقایسه‌ی مستقیم فشارسنج مورد آزمون با یک فشارسنج مرجع بهره می‌برد. فشار خوانده شده توسط فشارسنج مورد آزمون، با فشار خوانده شده توسط فشارسنج مرجع مقایسه شده و تغییرات لازم بر روی آن اعمال می‌شود تا فشاری برابر فشار خوانده شده توسط فشارسنج مرجع را نمایش بدهد. برای این منظور سامانه‌های متفاوت و متنوعی در بازارهای جهانی موجود است که از نظر اصول و روش کار مشابه یک‌دیگر ولیکن در ساختار و جزئیات متفاوت‌اند. لازم به ذکر است فشارسنج مرجع، فشارسنجی بسیار دقیق با پایداری زیاد است که ابتدا با استفاده از یک استاندارد اولیه مقیاس‌بندی شده است [۷، ۱].

این‌رو، این روش به دو دسته‌ی تک روزنه‌ای و چندگانه تقسیم می‌شود، که پرکاربردترین آن‌ها، سامانه‌ی تک روزنه‌ای است [۱]. سامانه‌ی استاندارد روزنه‌ای به طور عمده، شامل دو بخش است: محفظه‌ی مقیاس‌بندی خلأ بالا و سامانه‌ی اندازه‌گیری شار گاز. در شکل ۴ یک سامانه‌ی جریان روزنه‌ای دیده می‌شود. یک فشارسنج استاندارد ثانویه، می‌تواند به حجم بالایی یا پایینی، که به وسیله‌ی صفحه‌ی روزنه<sup>(۱۲)</sup> از هم جدا شده‌اند، به طور موقت وصل شود. فشارسنج مورد آزمون به حجم پایینی وصل می‌شود. با باز کردن شیر کنترل ۱، گاز از طریق جریان‌سنج وارد حجم بالایی شده و فشار مقیاس‌بندی را در حجم بالایی سامانه ایجاد می‌کند [۶]. با دانستن دما، فشار در حجم‌های بالا و پایین (که توسط فشارسنج استاندارد ثانویه اندازه‌گیری می‌شود)، تغییر فشار در مدت زمان ورود گاز و جرم مولکولی آن، ۳ کمیت آهنگ شارش گاز به بخش بالایی محفظه در حجم ثابت ( $Q$ )، رسانایی صفحه‌ی روزنه<sup>(۱۳)</sup> ( $C$ )، و نسبت فشار دو بخش محفظه ( $R$ )، محاسبه و سپس فشار مقیاس‌بندی، که همان فشار ایجاد شده در حجم پایینی است، چنین محاسبه می‌شود [۶]

$$P_2 = \frac{Q}{C(1-R)} \quad (7)$$



شکل ۴. سامانه‌ی مقیاس‌بندی با استفاده از روش جریان روزنه‌ای.



### پی‌نوشت‌ها

۱. Mercury Manometer Vacuum Standard
۲. Volume Expansion Vacuum Standard
۳. Orifice Flow Vacuum Standard
۴. Mean Free Path
۵. High Vacuum
۶. H.G. McLeod
۷. Single Stage
۸. Multi Stage
۹. Ultra High Vacuum (UHV)
۱۰. جریان مولکولی (Molecular Flow Regime) محدوده‌ای از خلأ است. که مسافت آزاد میانگین مولکول‌ها در آن، از ابعاد محفظه خلأ بزرگ‌تر است.
۱۱. Conductance
۱۲. Orifice Plate
۱۳. Orifice Plate Conductance
۱۴. Effusion

### مرجع‌ها

1. H.M. Akram, M. Magsood, H. Rashid, Techniques used for vacuum standardization, World Applied Sciences Journal, 7 (2009) 76-85.
2. American Vacuum Society, "Glossary", AVS Reference Guide, Retrieved, (2006) 3-15.
3. Austin Chambers, Modern Vacuum Physics, CRC Press Company (2004).
4. Edwards McLeod Gauge Catalogue, 07-D063-13-881, Feb (1980).
5. H.M. Akram, M. Magsood, H. Rashid, Development and Characterization of Volume Expansion Vacuum Standard, World Applied Sciences Journal, 6 (2009) 894-901.
6. H.M. Akram, Vacuum Standardization For High Energy Particle Systems, PHD Thesis, Chapter 5. University of the Punjab, Lahore (2009).
7. K.F. Poulter, The calibration of vacuum gauges, J. Phys, E: Sci. Instrum, (1977) 10-112.

### ۵. کاربردها در پژوهش‌های هسته‌ای

در بیش‌تر فعالیت‌های مرتبط با غنی‌سازی ایزوتوپی، از خلأ بالا استفاده می‌شود. یکی از روش‌های شناسایی ایزوتوپ‌ها که بعضاً برای جداسازی آن‌ها در مقدارهای کم نیز استفاده می‌شود، روش طیف‌سنجی جرمی است. طیف‌سنج جرمی شامل یک محفظه‌ی خلأ است که فشار آن در هنگام کار به یک نانو بار نیز می‌رسد. یکی از روش‌های غنی‌سازی به نام نفوذ مولکولی<sup>(۱۴)</sup> حتی در فشارهای پایین‌تر عمل می‌نماید. خلأ ایجاد شده در سانتریفوژهای غنی‌سازی نیز، از این مرتبه‌ی بزرگی است. در تمامی این سامانه‌های شامل محفظه‌های خلأ، از خلأ‌سنج‌های مختلفی استفاده می‌شود که همگی نیاز به مقیاس‌بندی دارند.

### ۶. نتیجه‌گیری

مقیاس‌بندی فشارسنج‌های خلأ نقش عمده‌ای در اعتبار بخشی به فعالیت‌های مرتبط با فن‌آوری خلأ دارد. این کار با استفاده از استانداردهای اولیه یا استانداردهای ثانویه صورت می‌گیرد. استانداردهای اولیه‌ی خلأ بالاترین کیفیت اندازه‌گیری را دارند. مهم‌ترین روش‌های این استاندارد عبارت از استفاده از فشارسنج جیوه‌ای، انبساط حجمی و جریان روزنه‌ای هستند. فشارسنج‌های جیوه‌ای بهترین وسایل برای استاندارد کردن خلأ پایین هستند. در حالی که برای استاندارد کردن خلأ متوسط، سامانه‌ی استاندارد انبساط حجمی چند مرحله‌ای در بیش‌تر آزمایشگاه‌ها استفاده می‌شود، استاندارد دقیقی که برای خلأ استفاده می‌شود، سامانه‌ی استاندارد جریان روزنه‌ای است. از جنبه‌ی نظری می‌توان از هر یک از این روش‌ها برای مقیاس‌بندی محدوده‌های مختلف خلأ استفاده کرد اما با توجه به مشکلات ساختی و کاربردی در هر محدوده، بهتر است از روش پیشنهاد شده استفاده شود. هر یک از روش‌ها در محدوده‌ی پیشنهاد شده بهترین روش ممکن هستند. استاندارد اولیه، با توجه به این که فشار در آن به صورت مستقیم از کمیت‌های پایه‌ی فیزیکی مانند جرم، طول و . . . محاسبه می‌شود، در مقایسه با استاندارد ثانویه دقت بیشتری در مقیاس‌بندی دارد.

روش‌های بنیادی مقیاس‌بندی، در طی زمان مرتباً تغییر می‌کنند، زیرا نیازهای جدیدی از نظر میزان دقت در سطح فشارهای پایین‌تر مطرح می‌شود، هر کدام از استانداردهای اولیه، یک سامانه‌ی مطمئن و مستقل برای ایجاد فشار در محدوده‌ی تعریف شده هستند.