

جدول تناوبی و سرگذشت مندلیف

بهاره احمدی^۱، رضا یوسفی^۱، علی اکبر موسوی موحدی^{۲*}

۱. مرکز تحقیقات بیوشیمی و بیوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. عضو پیوسته فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران،

عضو پیوسته آکادمی جهانی علوم (تواس)، عضو پیوسته علوم جهان اسلام

moosavi@ut.ac.ir

نامه علوم پایه شماره ۱۵، بهار و تابستان ۱۴۰۴

چکیده

جدول تناوبی به عنوان یک آرایش منظم از عناصر شیمیایی بر اساس عدد اتمی و ویژگی‌های مشابه، به عنوان پایه‌ای برای شیمی نوین شناخته می‌شود. از دوران باستان تا دوره کیمیاگری و در نهایت، شکل‌گیری جدول تناوبی در قرن نوزدهم، تحولات مهمی در درک عناصر و خواص آن‌ها رخ داده است. البته دانشمندان قدیم ایرانی نیز با استفاده از روش‌های تجربی و ساخت ابزارهای دقیق، نقش مهمی در شناسایی مواد و عناصر شیمیایی ایفا کردند. آثار آنان پایه‌گذار تحول از کیمیاگری به شیمی علمی نوین در تاریخ علم شد. مندلیف با پیش‌بینی خواص عناصر ناشناخته و ایجاد الگوی منسجم، تأثیر عمیقی بر علم شیمی و صنایع مختلف گذاشت. امروز، جدول تناوبی شامل ۱۱۸ عنصر است و تحقیقات برای کشف عناصر جدید همچنان ادامه دارد. در این مطالعه به بررسی تاریخچه و اهمیت جدول تناوبی عناصر، به‌ویژه نقش دیمتری مندلیف^۱ در ایجاد آن پرداخته شده است. مندلیف، اولین کسی نبود که جدول تناوبی عناصر را کشف کرد اما جدول مندلیف به دلیل توانایی در پیش‌بینی عناصر کشف نشده و ساختار واضح و سازمان یافته‌اش، شناخته شده‌ترین و تأثیرگذارترین جدول دسته‌بندی عناصر است. این مقاله همچنین به چالش‌ها و پیشرفت‌های علمی در زمینه ساخت عناصر سنگین‌تر و ناپایدار می‌پردازد و به اهمیت و کارکردهای آینده جدول تناوبی در علم و فناوری اشاره می‌کند.

کلید واژگان: جدول تناوبی، عناصر شیمیایی، آرایش نظام‌مند، عناصر جدید، تاریخ علم، کیمیاگری، خواص و توسعه عناصر، دیمتری مندلیف

۱. مقدمه

جدول تناوبی عناصر، یک آرایش سیستمی از تمام عناصر شیمیایی است که با افزایش عدد اتمی سازماندهی شده است. این ترتیب، یک الگوی تکرار شونده به نام «قانون تناوبی» را نشان می‌دهد، که در آن عناصر یک ستون (گروه)، ویژگی‌های مشابهی دارند. دیمتری مندلیف، پیشنهاد دهنده آرایش سیستمی جدول تناوبی، در سال ۱۸۶۹، شروع به جمع‌آوری و دسته‌بندی ویژگی‌های شناخته شده عناصر کرد. او مشاهده کرد که گروه‌های خاصی از عناصر خواص مشابهی نشان می‌دهند، اگرچه چندین استثنا را نیز برای روندهای نوظهور تشخیص داد. او همچنین وجود عناصر کشف نشده‌ای را پیش‌بینی کرد که در این الگوها قرار می‌گیرند و با گذشت زمان، فضاهای خالی جدول به تدریج پر می‌شد. تا به امروز، این جدول به عنوان یکی از ضروری‌ترین مراجع در علم شیمی عمل می‌کند و به طور سیستمی در سازماندهی سایر عناصر شناخته شده کاربرد دارد.

سفری تاریخی به دنیای عناصر

تلاش برای درک ماهیت بنیادی عناصر به دوران باستان برمی‌گردد، جایی که فیلسوفان نظریه‌های مختلفی را در مورد آنچه که اجزای سازنده اصلی جهان را تشکیل می‌دهند، ارائه کردند. در ابتدا گمانه‌زنی‌هایی در مورد یک عنصر وجود داشت که به آن‌ها، نظریه‌های تک‌عنصری می‌گویند. فیلسوفان مختلف نظرات متفاوتی داشتند؛ به عنوان مثال، تالس^۲ (۶۴۰-۵۴۶ قبل از میلاد) پیشنهاد کرد که آب عنصر اولیه است. آناکسیمنس^۳ (۵۶۰-۵۰۰ قبل از میلاد) اعتقاد داشت که هوا عنصر اساسی است. هراکلیتوس^۴ (۵۳۶-۴۷۰ قبل از میلاد) نیز استدلال می‌کرد که آتش، اصل همه چیز است. امپدوکلس^۵ (۴۹۲-۴۳۳ قبل از میلاد) با معرفی مفهوم چهار عنصر (هوا، خاک، آتش و آب)، ایده عناصر را گسترش داد. عنصر پنجمی به نام اتر، توسط فیلولائوس^۶ (حدود ۴۶۰-۴۰۰ قبل از میلاد) و یا افلاطون^۷ (۴۲۷-۳۴۷ قبل از میلاد) معرفی شد که به عنوان ماده تشکیل‌دهنده کیهان تصور می‌شد.

1. Dmitri Mendeleev

2. Thales

3. Anaximenes

4. Heraclitus

5. Empedocles

6. Philolaus

7. Plato

جیوه^۳ (روح) و گوگرد^۴ (گوهر) تشکیل شده‌اند [۳].

زکریای رازی (۹۲۵-۸۶۵)، این نظریه را با هدف طبقه بندی مواد شیمیایی توسعه داد. او متوجه شد که گوگرد ویژگی‌های خاصی دارد و در فرآیندهای سوختی و شیمیایی نقش حیاتی ایفا می‌کند و در مقالات خود به خواص گوگرد در پزشکی و درمان بیماری‌ها اشاره کرده است. همچنین وی برای اولین بار استفاده از جیوه در برخی از داروها و فرآیندهای شیمیایی را بررسی کرد. در آن زمان جیوه به عنوان یک عنصر سمی شناخته می‌شد، ولی زکریای رازی از آن برای آزمایش‌های شیمیایی و دارویی استفاده می‌کرد [۴]. اگرچه زکریای رازی نتوانست جزئیات عناصر شیمیایی را به‌طور دقیق طبق سیستم نوین جدول تناوبی طبقه بندی کند، اما تحقیقات او در زمینه خواص و کاربردهای این عناصر به‌شدت بر علم شیمی تأثیر گذاشت. در کتاب *الاسرار*، رازی به گونه‌ای نظام‌مند به معرفی موارد معدنی، گیاهی و حیوانی می‌پردازد و به این صورت، نخستین گام‌ها را در جهت طبقه بندی مواد بر پایه خواص فیزیکی و واکنش پذیری آن‌ها برمی‌دارد [۵]. وی در کتاب *المدخل/التعلیمی*، به تبیین مفهوم عنصر و ماهیت ترکیبات مادی می‌پردازد و تلاش می‌کند رابطه میان جوهر و تغییرات شیمیایی را به صورت عقلانی توضیح دهد [۶]. این دو اثر نشان می‌دهند که رازی از بنیان‌گذاران نگرشی بوده که زمینه را برای تدوین جدول تناوبی عناصر فراهم کرده است.

در اواخر عصر کیمیاگری، تمایل به مشاهده ماده از دریچه اصول متافیزیکی کاهش یافت. این تغییر نشان دهنده حرکت به سمت رویکردهای تجربی و علمی برای درک عناصر بود و راه را برای شیمی نوین هموار کرد. ایجاد جدول تناوبی مشروط به چهار تحول مهم بود: (۱) عقاید عرفانی عصر کیمیاگری باید کنار گذاشته می‌شد، چرا که کیمیاگران برای آن‌ها شواهد علمی نداشتند. (۲) تعریف واضحی از عنصر مورد نیاز بود که تعریف رابرت بویل^۵ (عناصر به عنوان مواد ساده‌ای که از اجسام دیگر ساخته نشده‌اند) زمینه را برای این درک فراهم کرد. (۳) توسعه روش‌های شیمی تجزیه که امکان جداسازی عناصر را فراهم می‌کند. آنتوان لوازیه^۶ با تأکید بر آنالیز کمی در شیمی، نقش اساسی در این پیشرفت ایفا کرد. (۴) روشی برای مرتبط کردن هر عنصر با یک عدد طبیعی ویژه (جرم اتمی) ضروری بود. هنگامی که این پیش نیازها برآورده شد، ایده جدول تناوبی به سرعت در دهه ۱۸۶۰ گسترش یافت و چندین دانشمند در تدوین آن سهیم شدند. یوهان ولفگانگ دوبراینر^۷، الکساندر-امیل بگور^۸ دو شان کورتو^۹، جان نیولندز^{۱۰} ژولیوس لوتار مایر^{۱۱} و دیمتری مندلیف از زمره دانشمندانی هستند

افلاطون این پنج عنصر را با پنج چند وجهی منظم مرتبط کرد. در نظر افلاطون، آتش با چهار وجهی، هوا با هشت وجهی، آب با بیست وجهی، زمین با مکعب و اتر با دوازده وجهی مرتبط بود. این تفسیر هندسی، درکی ساختاری از عناصری که تا قرن هفدهم تداوم داشت را ارائه کرد [۱].



نمایش عناصر به شکل‌های چند وجهی از نگاه افلاطون [۱]

ارتباط ایرانیان و کشف عناصر نیز قابل توجه است، اگرچه منابع اصلی مرتبط با این موضوع از بین رفته‌اند اما نشانه‌هایی از تأثیر این مکتب در سنت‌های فلسفی یونان به‌ویژه از طریق فیثاغورث^۱ و افلاطون دیده می‌شود. همان‌طور که بسیاری از دانشمندان یونانی نیز اذعان داشته‌اند، آن‌ها بیشتر نقش انتقال‌دهنده‌ی دانش را داشته‌اند تا آغازگر آن.

در متون مزدایی، روایاتی درباره عناصر جهان مادی ارائه شده است. نخستین تلاش برای ترکیب نظریه کیهان‌شناسی یونانی با اسطوره‌های سنتی ایرانی، در بندهشن دیده می‌شود که بیان می‌کند اهورامزدا از نور بی‌پایان، آتش را آفرید، از آتش هوا را، از هوا آب را و از آب زمین را خلق کرد. در همین منبع، نظریه‌ای کاملاً جدید و یادآور نظریات تالس مطرح می‌شود که «اصل اولیه همه چیز، یک قطره‌ی آب است» (۱).

افلاطون که از او به عنوان یکی از موثرترین نظریه‌پردازان در مورد عناصر سازنده جهان یاد می‌شود، در رم با جریان‌های فکری فیثاغوری آشنایی یافت. فیثاغورث و اصحاب او پرورش فکری‌شان را مدیون دانشمندان و اندیشمندان ایرانی می‌دانسته‌اند. اسارت فیثاغورس در بابل سبب شد تا او با مذهب و فلسفه خردمندان ایرانی، از طریق زارتاس که یک متفکر پیش‌تاز ایرانی بود، آشنا شود [۲].

در رابطه با تأثیر دانشمندان ایرانی در شناخت عناصر، هولمیارد^۲، یکی از پژوهشگران برجسته تاریخ کیمیاگری به وضوح اشاره کرده است که جابر بن حیان (حدود ۷۲۱-۸۱۵) معتقد بود که فلزات از

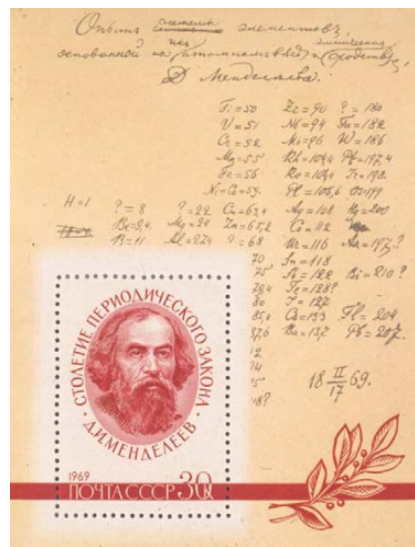
1. Pythagoras
2. Eric John Holmyard
3. Mercury
4. Sulfur
5. Robert Boyle

6. Antoine Lavoisier
7. Johann Wolfgang Döbereiner
8. Alexandre-Émile Béguyer de Chancourtis
9. John Newlands
10. Julius Lothar von Meyer

از شماره ۱۱۸، یعنی ۱۱۹ و ۱۲۰ دست یابند. به نظر می‌رسد یک مسابقه جهانی که ژاپن، از شانس بیشتری برای پیروزی برخوردار است، در جریان است [۹]. البته ژاپن در این زمینه سابقه خوبی دارد، یکی مربوط به کشف عنصری جدید در سال ۱۹۰۸ با نام نیپونیوم^۱ که در اصل متعلق به موقعیت ۷۵ جدول تناوبی بود ولی اشتباهاً در موقعیت ۴۳ قرار داده شد. دانشمندان زمانی متوجه این خطا شدند که عنصر ۷۵ با نام رنیم^۲ توسط آلمانی‌ها به ثبت رسیده بود و دیگری، اعلام نیپونیوم^۳ در سال ۲۰۱۲ به عنوان عنصر ۱۱۳ می‌باشد [۱۰]. البته رقیب اصلی برای اعلام عناصر ۱۱۹ و ۱۲۰ آزمایشگاه ملی لارنس برکلی (LBNL)^۴ است اما به دلیل از بین رفتن همکاری‌های بین المللی علی‌الخصوص با موسسه مشترک تحقیقات هسته‌ای (JINR) روسی به دلایل سیاسی، شانس ژاپن در این خصوص بیشتر شده است. در این راستا، ژاپن از ابزارهای پیشرفته‌ای مثل دستگاه تولید کننده پرتوهای یونی از عنصر با تبدیل آن به پلاسما بوسیله شرایط دمایی فوق العاده بالا شامل فناوری ابررسانا جهت ایجاد میدان مغناطیسی قوی و شتاب دهنده پرتوی یون تولیدی برای برخورد موثر با هدف و در نتیجه شانس بالا جهت غلبه بر دافعه بین هسته‌ای استفاده می‌کند که قدرت آن‌ها نسبت به ابزاری که برای تولید رنیم به کار بردند، رشد ۵ برابری داشته است. این بدین معنی است که سرمایه‌گذاری هنگفتی روی این موضوع توسط ژاپنی‌ها صورت گرفته است.

با وجود این تلاش‌ها، این هدفی بسیار سخت است چون هر قدر عنصر سنگین‌تر باشد، تعداد پروتون بیشتری دارد یعنی دافعه الکترواستاتیکی بسیار قوی بین آن‌ها برقرار است. پس لازمه این برخورد، شتابی در حد سرعت نور پرتوهای یونی است تا دو هسته بتوانند کنار هم قرار گیرند و همجوشی هسته‌ای صورت گیرد تا عنصر سنگین‌تر ایجاد شود که البته، شانس این برخورد نیز پایین است. در همین ارتباط ادعا شده است که در هر ۲۰۰ روز تنها دو هسته بر این دافعه غلبه کرده و اتم فوق سنگینی را می‌سازند، اتمی بسیار ناپایدار که بعد از گذشت زمانی در حد میلی ثانیه، دچار فروپاشی می‌شود و نیمه عمر بسیار پایینی دارد. بنابراین باید ردیاب دقیقی وجود داشته باشد تا همین عنصر ناپایدار را شناسایی کند [۹]. حال فرض کنیم عناصر ۱۱۹ و ۱۲۰ و موارد مشابه سنتز شدند، با وجود این ناپایداری، انتظاری برای استفاده از آن‌ها در زندگی روزمره و فناوری نمی‌رود اما با یادآوری مفهوم جزیره پایداری، می‌توان به دنبال ایزوتوپ‌هایی از آن عناصر بود که در این محدوده قرار داشته، پایدارند و به این ترتیب قابل استفاده خواهند بود. برای نمونه زمانی که تکنسیوم^{۱۱} با طول عمر ۶ ساعت ساخته شد،

که نقش اساسی در ایده جدول تناوبی و گسترش آن داشته‌اند (۲). در این میان، جسارت مندلیف در پیش بینی خواص عناصر ناشناخته، او را از هم عصرانش متمایز ساخت. او در جدول تناوبی خود برای عناصری با وزن اتمی خاص، شکاف‌هایی باقی گذاشت و وجود و ویژگی‌های آن‌ها را پیش بینی کرد. زمانی که عناصر اسکندیم^۲، گالیوم^۳ و ژرمانیوم^۴ در سال‌های پس از پیش‌بینی‌اش کشف شدند، هر کدام چارچوب نظری او را تأیید می‌کرد و شهرت او به میزان قابل توجهی افزایش یافت [۱،۷].



تمبر پستی روسی از تصویر دیمتری مندلیف که در پس زمینه آن، نسخه دست نویس جدول تناوبی او مربوط به سال ۱۸۶۹ قرار دارد [۱]

آینده جدول تناوبی

جدول تناوبی امروزی، ۱۱۸ عنصر دارد که ۹۲ مورد ابتدایی آن طبیعی و ۲۶ مورد انتهایی مصنوعی است. آخرین عنصر ساخته شده، اوگانسون^۵، در موسسه مشترک تحقیقات هسته‌ای (JINR)^۶ در روسیه، توسط یک تیم مشترک از دانشمندان روسی و آمریکایی سنتز شد و به افتخار فیزیکدان هسته‌ای، یوری اوگانسین^۷ که نقش اصلی را در کشف آن داشت، در سال ۲۰۱۶، نام‌گذاری شد. او کسی است که روش‌های پیشگامانه‌اش، از جمله «همجوشی سرد» و «همجوشی گرم»، به کشف چندین عنصر از جدول تناوبی منجر شد [۸].

در حال حاضر شیمیدان‌ها در تلاش هستند تا جدول تناوبی را وسعت ببخشند. ژاپن، آمریکا، روسیه، چین و آلمان در حال به روزرسانی و تجهیز کردن مراکز تحقیقاتی خود هستند تا به عناصر سنگین‌تر

1. Scandium
2. Gallium
3. Germanium
4. Oganesson
5. Joint Institute for Nuclear Research
6. Yuri Oganessian

7. Neptunium
8. Rhenium
9. Nihonium
10. Lawrence Berkeley National Laboratory
11. Technetium

هیچ نظری درباره کاربرد آن وجود نداشت اما امروزه در تشخیص پیشرفت سرطان استخوان و ارزیابی جریان خون مغزی و عملکرد تیروئید، قلب و کبد استفاده می‌شود.

دیمیتری ایوانوویچ مندلیف

دهه ۱۸۵۹-۱۸۳۴: آغاز راه

دیمیتری ایوانوویچ مندلیف^۱، در ۲۷ ژانویه سال ۱۸۳۴، در روسیه، در خانواده‌ای پرجمعیت با ۱۳ خواهر و برادر، متولد شد. پدر او، ایوان پاولویچ^۲، یک معلم و مدیر مدرسه محلی بود که علوم سیاسی و فلسفه تدریس می‌کرد و از همان دانشگاهی دانش آموخته شده بود که دیمیتری در آن مشغول به تحصیل می‌شود. در ۹ سالگی دیمیتری، پدرش بینایی خود را از دست می‌دهد و به دنبال آن، خانه نشین می‌شود. به این ترتیب مسئولیت خانواده به مادر او، ماریا دیمیتریانا^۳، محول می‌شود و کارگاه شیشه‌گری اجدادی خود را احیا می‌کند. با مرگ پدر و آتش سوزی کارگاه، دیمیتری ۱۳ ساله به مدرسه شبانه روزی می‌رود و پس آن برای ادامه تحصیل، به همراه مادر و خواهرانش، راهی مسکو می‌شود. او ابتدا برای تحصیل در دانشگاه مسکو اقدام می‌کند اما دانشگاه او را نمی‌پذیرد. به همین جهت در سال ۱۸۵۰ به پترزبورگ رفتند و نهایتاً وارد موسسه آموزش اصلی^۴، جایی که پدرش نیز در آن تحصیل کرده بود شد. مندلیف خود اعتراف کرده است «من پیشرفت‌هایی که داشته‌ام را به طور کلی مدیون این موسسه هستم». مدتی از شروع تحصیل نگذشته بود که او، مادر و خواهرش را به دلیل بیماری سل از دست داد. تنهایی و غربت، او را آسیب پذیرتر از همیشه کرده بود و مدام بیمار می‌شد. رفته رفته او به شرایط جدید عادت کرد و تحصیلات را با جدیت آغاز کرد. او در این دوران، به هر موضوعی علاقه نشان می‌داد، زیست شناسی، تاریخ، علوم تربیتی و دانش‌های دیگر. در نوشته‌های دانشجویی مندلیف، نشانه‌هایی از تفکر خلاق او مشهود بود. او کنجکاوی زیادی داشت و از پرداختن به مسائل پیچیده علمی نمی‌ترسید. از طرفی، نوعی دیدگاه فلسفی داشت که در آن فرآیند تحقیق به همان اندازه یا بیشتر، از نتایج به دست آمده ارزش دارد. در پایان نامه کارشناسی ارشد، او به رابطه شکل بلورها با خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها پرداخت که موضوعی چالش برانگیز در آن زمان بود و حتی امروز نیز همچنان دشوار است. یکی از خصوصیات او، این بود که درس خواندن برای امتحان را کاری بی‌معنی می‌دانست. او خود اشاره می‌کند که شب‌های امتحان، با دوستانش مشغول بازی بوده و کسانی که درس می‌خواندند را درک نمی‌کرده است.

دهه ۱۸۶۱-۱۸۵۹: شکل‌گیری شخصیت علمی

مندلیف در سال ۱۸۵۹، تحقیقات خود را در زمینه اثر موینگی آغاز کرد. او این شانس را به دست آورد که این کار را در کشور آلمان، با کمک هزینه‌ای که از جانب دانشگاه سن پترزبورگ پرداخت می‌شد، دنبال کند. به این ترتیب راهی آلمان و وارد دانشگاه هایدلبرگ شد، جایی که شیمیدانان نامداری چون رابرت بونزن^۵ (کاشف عناصر سزیم^۶ و روبیدیم^۷ - به همراهی کیرشهف)، گوستاو کیرشهف^۸ (مبدع اصطلاح جسم سیاه) و امیل ارلن‌مایر^۹ (مخترع ابزار آزمایشگاهی) مشغول به فعالیت بودند. او شانس همکاری با هر کدام را داشت و نهایتاً به آزمایشگاه بونزن رفت که در نامه‌ای به دوست خود از امکانات ضعیف (نبود ترازوی دقیق)، محیط آشفته و نبود پرسنل مجرب شکایت می‌کند و اعلام می‌کند که تصمیم گرفته تا محیط کاری خود را ایجاد کند، جایی که بتواند کنترل بهتری روی آزمایش‌های خود داشته باشد. حضور در هایدلبرگ بر رشد شخصیت علمی او موثر بوده است. در سال ۱۸۶۰، او به کنگره بین‌المللی شیمی رفت و آنجا توانست با دانشمندان در سراسر دنیا آشنا شود و ارتباطی وسیع با جامعه علمی آن زمان ایجاد کند. دانشگاه سن پترزبورگ که حامی مالی او بود و پیشرفت‌های او را رصد می‌کرد، به این نتیجه رسید که تحقیقات مندلیف در روسیه نیز قابل پیگیری است. به همین سبب از حمایت مالی او دست کشید و او ناچار، به روسیه بازگشت.

دهه ۱۸۶۹-۱۸۶۱: پیشرفت‌های علمی و ایجاد جدول تناوبی

مندلیف پس از بازگشت به روسیه، به تدریس مشغول شد. همچنین به تدوین دایره‌المعارف پرداخت که موفقیت آمیز نبود، چرا که از نظر ناشران، این کار سودی نداشت. او در این دوران در مقطع دکتری نیز تحصیل می‌کرد و نهایتاً توانست با ارائه پایان‌نامه‌ای بسیار موفق در سال ۱۸۶۵، تحت عنوان «گفتمانی درباره ترکیبات الکل و آب» این دوره را به پایان برساند. پایان‌نامه دکتری او نیز مورد جدیدی بود و برای اولین بار بود که سیستم آب-الکل، مورد مطالعه قرار می‌گرفت. پس از آن به سمت استادی شیمی دانشگاه پترزبورگ درآمد. یکی از مواردی که همیشه او را آزار می‌داد، نبود منبع یادگیری مناسب به زبان روسی بود. همین مسئله بود که او را به نگارش کتابی تحت نام اصول شیمی^{۱۰} به زبان روسی واداشت. هنگام نگارش کتاب، زمانی که داشت عناصر را دسته‌بندی می‌کرد، متوجه خواص شیمیایی مشابه گروهی از عناصر، مخصوصاً هالوژن‌ها شد. او ۶۳ عنصر شناخته شده زمان خود را در ردیف‌هایی به ترتیب افزایش جرم اتمی مرتب کرد و عناصری که دارای ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی مشابه بودند

1. Dmitri Ivanovich Mendeleev
2. Ivan Pavlovich Mendeleev
3. Maria Dmitrievna Mendeleeva
4. Main Pedagogical Institute
5. Robert Bunsen

6. Cesium
7. Rubidium
8. Gustav Kirchhoff
9. Emil Erlenmeyer
10. The Principles of Chemistry

دهه ۱۹۰۰-۱۸۷۰: علوم بین رشته‌ای

مندلیف شخصیتی چند وجهی داشت که بر بینش او در شیمی و اقتصاد، تأثیر ماندگاری بر جای گذاشته است. بخش بزرگی از علاقه او در زمینه تولید و پالایش بهتر نفت در روسیه بود. صنعت نفت در ایالات متحده آمریکا، پس از اینکه ادوین دریک^{۱۱} چاه نفت تجاری را در پنسیلوانیا در سال ۱۸۵۹ حفر کرد، به سرعت رو به رشد بود. این سرآغاز تولید مقادیر زیاد نفت، به ویژه نفت خام سبک بود که در مقایسه با نفت خام سنگین‌تر موجود در روسیه، پالایش آن آسان‌تر بود. در آن زمان، صنعت نفت روسیه توسعه نیافته بود و قادر به رقابت با واردات نفت سفید آمریکایی نبود که بر بازار روسیه تسلط داشت و تا ۱۸۷۰، ۹۰ درصد عرضه را به خود اختصاص می‌داد. مندلیف به نفت آمریکا علاقه داشت که در درجه اول، بحث اقتصادی آن بود. او به دنبال بهبود توانایی تولید نفت روسیه و رقابتی ساختن آن در برابر واردات آمریکا بود. در همین راستا، در سال ۱۸۷۶ به عنوان بخشی از هیئت دولت روسیه به ایالات متحده سفر کرد که همزمان بود با برگزاری یک نمایشگاه بین‌المللی بزرگ در فیلادلفیا که پیشرفت‌های این کشور را در زمینه‌های مختلف به نمایش می‌گذاشت. بازدید او شامل مطالعه پالایشگاه‌های نفت محلی برای درک بهتر چگونگی تقویت صنعت نفت روسیه بود. مندلیف همچنین یافته‌های خود را از صنایع نفت در پنسیلوانیا مستند کرد. این نشان می‌دهد که چگونه تلاش‌های علمی مندلیف با منافع اقتصادی کشورش گره خورده است. (۴) او همچنین علاقه شدیدی به شیمی فیزیک داشت، علی‌الخصوص مطالعه برهم‌کنش‌های مولکولی در گازها و مایعات از طریق خواصی مانند چگالی، انبساط حرارتی، کشش سطحی. یکی از کشفیات او این بود که بالاتر از یک دمای معین که توسط او به عنوان «نقطه جوش مطلق» نام گذاری شده است، کشش سطحی و گرمای تبخیر برابر با صفر می‌شود؛ در این دما، مایع بدون توجه به فشار و حجم به بخار تبدیل می‌شود و برعکس، در زیر آن دما هر گازی در یک ظرف می‌تواند تنها با اعمال فشار به مایع تبدیل شود. از آن زمان این پدیده به طور گسترده‌ای برای مایع کردن گازهایی مانند اکسیژن^{۱۲}، نیتروژن^{۱۳}، هلیوم^{۱۴} و ... مورد استفاده قرار گرفت [۱۲]. مطالعات او در زمینه رفتار گازها تحت فشار بالا، مورد توجه ارتش روسیه قرار گرفت و به او بودجه‌ای برای تحقیق در این زمینه اختصاص دادند که با وقوع جنگ بین روسیه و دولت عثمانی، این حمایت مالی قطع شد. فعالیت‌ها و نظریه‌های او در زمینه بهبود اوضاع اقتصادی روسیه مخالفانی داشت، چرا که آن‌ها معتقد

را در ستون‌های عمودی کنار هم قرار داد. برای مثال، لیتیوم^۱، سدیم^۲ و پتاسیم^۳ که همگی واکنش‌پذیری شدیدی با آب داشتند را در یک گروه جای داد، در حالی که کلر^۴، برم^۵ و ید^۶ را که همگی نافلزهای واکنش‌پذیر بودند، در گروه جداگانه‌ای قرار داد. به این شکل، در سراسر یک ردیف، ویژگی‌ها به تدریج از فلزی به نافلزی تغییر می‌کردند؛ و در امتداد هر گروه، ویژگی‌ها مشابه باقی می‌ماندند اما شدت آن‌ها بیشتر یا کمتر می‌شد. مندلیف همچنین در جدول خود جاهای خالی گذاشت، جایی که هیچ عنصر شناخته شده‌ای در آن نمی‌گنجید و پیشبینی می‌کرد که در آینده شناسایی خواهند شد، عناصری چون گالیوم^۷، اسکاندیوم^۸ و ژرمانیم^۹ که درستی نظام او را تأیید کردند. (جدول تناوبی نوین بر اساس افزایش عدد تناوبی توسط هنری موزلی^{۱۰} مرتب شده است) [۳]. به همین سبب، مقاله‌ای تحت عنوان «ارتباط بین خواص عناصر و وزن اتمی آن‌ها» را در ۱۷ فوریه سال ۱۸۶۹ منتشر کرد. این روز، به عنوان روز ملی جدول تناوبی ثبت شده و در آن «قانون تناوبی» را جشن می‌گیرند. انتظار می‌رود وقتی کسی دستاوردی به این بزرگی دارد، خود آن را ارائه دهد اما مندلیف این مسئولیت را به یک دوست محول کرد و خود برای بررسی سودآوری محصولات لبنی به خارج از شهر رفت. او که پس از دریافت سمت استادی دانشگاه، مزرعه‌ای خریداری کرد تا به آرزوی دیرینه خود، سکوت و آرامش، برسد، به تولید لبنیات علاقه‌مند شد و حتی پس از بازگشت نیز به جای ارائه گزارش درباره جدول تناوبی، گزارشی از بازدید خود تدوین کرد [۱۱].

по въ видъ, какъ качества, уже ясно выражаются приближенно въ ставленномъ мною началъ ко всей совокупности элементовъ, какъ которыхъ извѣстны съ достовѣрностію. На этотъ разъ я являюсь преждевременно выдѣлять общую систему элементовъ. Вотъ этотъ «законъ»:

Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=132,9	Tl=204
Be=9,1	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112		
B=11	Al=27,4	7=58	U=116	Ac=197?	
C=12	Si=28	7=70	Sn=118		
N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210	
O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?		
F=19	Cl=35,5	Br=80	I=127		
	Ca=40	Sr=87,6	Ba=137	Pb=207	
	7=45	Ce=92			
	7Er=56	La=94			
	7Th=60	Di=95			
	7Pa=72,6	Th=118?			

а которъ принадлежитъ къ разнымъ рядамъ имѣтъ различіе въ величинѣ радиуса, что ясно въ гомогенной таблицѣ. Или въ правилѣ периодичности при составленіи системы элементовъ, много извѣстныхъ фактовъ. То я другое мало вынесъ. Какъ качество, качество, естественная система элементовъ (предположеніе ося элементовъ), но я вынесъ для удобства изложенія въ таблицѣ результаты. Слѣдуетъ для удобства изложенія вынести въ таблицѣ элементы, какъ вынесъ при составленіи основной таблицы, вынесенныя въ этой таблицѣ.

Li	Na	K	Ca	Rb	Ag	Cs	Tl
7	23	39	40	85,4	108	133	204
Be	Mg	Zn	65,2	65,2	112	112	204
B	Al	—	—	—	—	—	Bi
C	Si	—	—	—	—	—	—
N	P	—	—	—	—	—	—
O	S	—	—	—	—	—	—
F	Cl	—	—	—	—	—	—
19	35,5	80	127	160	190	200	200

یکی از اولین جدول‌های تناوبی از کتاب «اصول شیمی» مندلیف سال ۱۸۶۹

1. Lithium
2. Sodium
3. Potassium
4. Chlorine
5. Bromine
6. Iodine
7. Gallium

8. Scandium
9. Germanium
10. Henry Moseley
11. Edwin Drake
12. Oxygen
13. Nitrogen
14. Helium

در پیشرفت علمی و افزایش دقت در اندازه‌گیری‌ها دارد؛ به‌گونه‌ای که دانشمندان برجسته به اهمیت آن پی برده‌اند و حتی در نهادهایی مانند دفتر بین‌المللی اوزان و مقیاس‌ها^۲ مسئولیت‌های مدیریتی بر عهده داشته‌اند.

علم اندازه‌شناسی شامل تعریف پارامترها، توسعه، نگهداری و کاربرد استانداردهای اندازه‌گیری است و به سه شاخه‌ی اصلی تقسیم می‌شود [۱۳، ۱۴]:

مترولوژی علمی (یا بنیادین)

به تعیین واحدهای اندازه‌گیری، تعریف ثابت‌های فیزیکی، و توسعه روش‌های نوین اندازه‌گیری می‌پردازد.

مترولوژی صنعتی (یا کاربردی)

دقت اندازه‌گیری‌ها را در فرآیندهای تولید، مهندسی و کنترل کیفیت تضمین می‌کند.

مترولوژی قانونی

مربوط به اندازه‌گیری‌هایی است که بر تجارت، سلامت عمومی، ایمنی و اجرای قوانین تأثیر می‌گذارند؛ مانند ترازوهای فروشگاه‌ها، پمپ‌های سوخت، و تجهیزات پزشکی

مندلیف در طول زندگی خود، جوایز متعددی کسب کرد: جایزه دمیدوف^۳ (۱۸۶۲)، مدال دیوی^۴ (۱۸۸۲) و مدال کاپلی^۵ (۱۹۰۵). اما سوالی ایجاد می‌شود؛ دانشمند برجسته‌ای که به دلیل تدوین آرایش تناوبی عناصر شیمیایی و ایجاد جدول تناوبی مشهور است، چرا هرگز جایزه نوبل را دریافت نکرد؟ او که در زمان اهدای شش جایزه اول نوبل شیمی زنده بود، در سال ۱۹۰۵ نامزد جایزه نوبل شد اما آدولف فون بایر^۶ این جایزه را دریافت کرد. در سال ۱۹۰۶، بار دیگر نامزد شد، اما علی‌رغم حمایت شدید برخی از اعضای کمیته، آنری مويسان^۷ این جایزه را دریافت کرد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که بعضی از دانشمندان مانع مهمی برای دریافت جایزه نوبل مندلیف بوده‌اند زیرا معتقد بودند دستاورد مندلیف بسیار قدیمی است. طبق وصیت‌نامه آلفرد نوبل^۸ «کسانی که در سال گذشته بیشترین سود را به بشریت رسانده‌اند» واجد شرایط دریافت این جایزه‌اند لذا بنیاد نوبل، این اجازه را می‌دهد تا اکتشافات قدیمی در صورتی که اهمیتی جدید کسب کنند نیز در نظر گرفته شوند. اکتشاف گازهای نجیب در سال ۱۹۰۴ و تعیین جایگاه آن‌ها در جدول تناوبی، اهمیت جدول تناوبی را بیش از پیش روشن کرد. تناوب خواص شیمیایی و فیزیکی حتی برای این گروه از عناصر که در زمان فرموله شدن قانون تناوبی کاملاً ناشناخته بودند، برقرار

بودند جای یک دانشمند در آزمایشگاه است اما او اینگونه به آن‌ها پاسخ داد «اولاً شیمی دان بودن، لزوماً به معنای دوری از گیاهان و کارخانه‌ها و نقش آن‌ها در کشور و در نتیجه مشکلات اقتصادی مرتبط نیست. دوم، راه‌حل واقعی و درست مشکلات اقتصادی در آینده تنها از طریق به‌کارگیری روش‌های تجربی استفاده‌شده در علوم طبیعی، که شیمی یکی از مهم‌ترین محورهای آن است، قابل انتظار است. سوم، نه تنها باید نظرات اقتصاددانان شنیده شود بلکه نظرات سایر کارشناسان نیز می‌باید در نظر گرفته شود.»

دهه ۱۹۰۷-۱۹۰۰: سال‌های پایانی

در سال‌های ۱۷۹۰-۱۹۰۰، اوضاع سیاسی در روسیه باعث ناآرامی‌هایی در فضای دانشگاهی یعنی اعتراضات یا جنبش‌های دانشجویی شد که می‌توانست فضای استرس‌آوری را ایجاد کند. بنابراین او در مارس ۱۸۹۰ تصمیم گرفت از سمت خود استعفا دهد. یکی از علوم مورد توجه مندلیف، اندازه‌گیری و مترولوژی بود. او معتقد بود «علم از لحظه‌ای آغاز می‌شود که مردم شروع به اندازه‌گیری می‌کنند. علم دقیق بدون اندازه‌گیری غیرقابل تصور است.» در نوامبر ۱۸۹۲، او توسط وزیر دارایی وقت روسیه، مسئول نظارت بر اندازه‌گیری‌ها شد. این نقش بسیار مهم بود زیرا در اواخر قرن نوزدهم، مترولوژی برای دولت روسیه، به ویژه برای تجارت، صنعت و علم اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده بود. مندلیف پس از تصدی سمت خود، بر ایجاد نمونه‌های جدید برای اندازه‌گیری، مانند طول و وزن، تمرکز کرد. او با دقت این استانداردهای جدید را با استانداردهای اروپایی موجود مقایسه کرد تا از دقت و سازگاری آن‌ها اطمینان حاصل کند. در سال ۱۸۹۳ مدیر اداره‌ی بین‌المللی اوزان و مقیاس‌ها شد و تا پایان عمر در این پست باقی ماند [۱۱].



مندلیف در اتاق کار خود در دفتر اوزان و مقیاس‌ها

شایان ذکر است دانشمندان متعددی در قلمرو علم اندازه‌گیری اوزان و مقیاس‌ها (مترولوژی) از جمله ایزاک نیوتون^۱، دستاوردهای مهمی داشته‌اند. علم اندازه‌شناسی یا مترولوژی نقش بسیار مهمی

1. Isaac Newton
2. Bureau International des Poids et Mesures
3. Demidov Prize
4. Davy Medal

5. Copley Medal
6. Adolf von Baeyer
7. Henri Moissan
8. Alfred Bernhard Nobel

از جمله کلر^{۱۱}، مولیبدن^{۱۲}، تنگستن^{۱۳} و اکسیژن^{۱۴} نقش داشت، یونس یاکوب برسلپوس^{۱۵}، شیمی‌دان سوئدی، کاشف سلنیوم^{۱۶}، سیلیسیوم^{۱۷}، توریم^{۱۸} و سرب^{۱۹} و از بنیان‌گذاران روش‌های نوین نام‌گذاری شیمیایی. ویلیام رمزی^{۲۰}، شیمی‌دان اسکاتلندی نیز گازهای نجیب آرگون^{۲۱}، کریپتون^{۲۲}، نئون^{۲۳}، زنون^{۲۴} و رادون^{۲۵} را کشف کرد که البته این کشف، بعد از نشر جدول تناوبی توسط مندلیف رخ داد.

در دوران اسلامی، کیمیا به عنوان دانشی معتبر مورد مطالعه قرار گرفت و دانشمندان ایرانی مانند زکریای رازی، تکنیک‌های پیشرفته‌ای برای شناسایی مواد و ترکیبات شیمیایی ابداع کردند. آنان همچنین تجهیزات دقیق آزمایشگاهی برای تجزیه و تحلیل مواد ساختند. با گذشت زمان و کاهش نفوذ مکتب کیمیاگری، روش‌های علمی جدید جایگزین باورهای سنتی شد، اما میراث علمی ایرانیان در این حوزه تأثیر خود را در پیشرفت دانش شیمی باقی گذاشت. ابن سینا در رساله خود، دیدگاه انتقادی نسبت به کیمیاگری داشت و عقیده داشت که فلزات قابل تبدیل به یکدیگر نیستند. خواجه نصیر الدین طوسی نیز یکی از دانشمندان بود که نظریه تکوین فلزات از گوگرد^{۲۶} و جیوه^{۲۷} را پذیرفته و در آثار خود به بررسی ویژگی‌های مواد پرداخته است (۵). ابوریحان بیرونی در کتاب *الجماهر فی الجواهر* به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی فلزات مختلف اشاره کرده و اطلاعات دقیقی از خواص آن‌ها به دست آورده و نقش این عناصر را در فرآیندهای شیمیایی مورد بررسی قرار داده است. او در فصل دوم این کتاب به شرح زئبق (جیوه) پرداخته و به بررسی فلزات هفت‌گانه یعنی طلا^{۲۸}، نقره^{۲۹}، مس^{۳۰}، آهن^{۳۱}، قلع^{۳۲}، سرب^{۳۳} و خار صینی (نام باستانی عنصر روی^{۳۴}) که بیرونی آن را برخلاف باور آن دوران به عنوان یک فلز خالص نام برد می‌پردازد [۱۵].

سهم تمدن‌های مختلف، از جمله ایران، در توسعه دانش شیمی و شناخت عناصر انکارناپذیر است. در تاریخ، ایران یکی از مراکز مهم علم و دانش بوده است و بازگشت به جایگاه علمی تمدنی آن، نیازمند ایجاد گفت‌وگای عمیق در جامعه است که به گسترش مرزهای دانش و توسعه علمی ملی و بین‌المللی منجر شود.

بود. با این حال، انتقادات قبلی مندلیف از نظریه‌های آرنیوس^۱، به خصوص نظریه تفکیک نیز ممکن است در این مخالفت نقش داشته باشد [۷].

نهایتاً مندلیف در دوم فوریه‌ی سال ۱۹۰۷ در سن ۷۲ سالگی بر اثر بیماری آنفولانزا از دنیا رفت. بیاس خدمات علمی مندلیف، هم اکنون جایزه بین‌المللی مندلیف با همکاری یونسکو-روسیه در علوم پایه تعریف شده است^۲.

این جایزه برای بزرگداشت میراث دیمتری مندلیف، مبدع آرایش سیستمی جدول تناوبی عناصر، در سال ۲۰۲۱ میلادی از طریق همکاری بین یونسکو (سازمان آموزشی، علمی و فرهنگی ملل متحد) و فدراسیون روسیه با هدف ارتقاء برتری در علوم پایه و علوم بنیادی و گرامیداشت تأثیر مندلیف بر علم، به‌ویژه در توسعه جدول تناوبی، و تشویق تحقیقات علمی پیشرفته، تاسیس شده است؛ این جایزه به دانشمندان از سراسر جهان که دستاوردهای برجسته و اصلی در علوم پایه داشته‌اند اعطا می‌شود. این دستاوردها می‌باید به پیشبرد درک ما از قوانین طبیعی و توسعه علمی جهانی کمک کنند. جایزه مندلیف شامل جایزه نقدی، مدال و گواهی می‌باشد که مشارکت دریافت‌کننده در علوم پایه را تأیید می‌کند. جایزه‌ای که به‌ویژه به اهمیت همکاری‌های علمی جهانی در قلمرو علوم پایه توجه دارد.

جمع‌بندی

دیمتری مندلیف، دانشمندی است که به دلیل معرفی آرایش سیستمی جدول تناوبی عناصر شهرت دارد. کار مندلیف در سال ۱۸۶۹ پیشگامانه بود، زیرا روشی سیستمی برای سازماندهی عناصر شیمیایی شناخته شده بر اساس خواص آنها ارائه کرد. این جدول نه تنها امکان درک عناصر موجود را می‌داد بلکه پیش‌بینی کشفیات آینده را ممکن می‌ساخت. کشف عناصر شیمیایی نتیجه تلاش جمعی دانشمندان در سراسر جهان، از دوران باستان تا به امروز است. برخی از مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از همفری دیوی^۳، الکترو شیمیدان بریتانیایی که عناصر سدیم^۴، پتاسیم^۵، کلسیم^۶، منیزیم^۷، استرانسیم^۸ و باریم^۹ را با استفاده از الکترولیز کشف کرد، کارل ویلهلم شیله^{۱۰}، شیمیدان دارویی سوئدی که در کشف چندین عنصر

1. Svante Arrhenius
2. UNESCO-Russia Mendeleev International Prize in Basic Science
3. Humphry Davy
4. Sodium
5. Potassium
6. Calcium
7. Magnesium
8. Strontium
9. Barium
10. Carl Wilhelm Scheele

11. Chlorine
12. Molybdenum
13. Tungsten
14. Oxygen
15. Jöns Jakob Berzelius
16. Selenium
17. Silicon
18. Thorium
19. Cerium
20. William Ramsay
21. Argon
22. Krypton

23. Neon
24. Xenon
25. Radon
26. Sulfur
27. Mercury
28. Gold
29. Silver
30. Copper
31. Iron
32. Tin
33. Lead
34. Zinc

1. Encyclopaedia Iranica. (n.d.). Elements.
<https://iranicaonline.org/articles/elements>
2. Scerri, E. (2007, April 12). Mendeleev's legacy: The periodic system. Science History Institute.
<https://www.sciencehistory.org/stories/magazine/mendelevs-legacy-the-periodic-system>
3. Dizdaroglu, M. (2024, February 7). Henry Moseley: A patriotic scientist who changed the periodic table — and then went off to war. National Institute of Standards and Technology (NIST).
<https://www.nist.gov/blogs/taking-measure/henry-moseley-patriotic-scientist-who-changed-periodic-table-and-then-went-war>
4. Pelta-Heller, Z. (2018, January 19). Braving the elements: Why Mendeleev left Russian soil for American oil. Science History Institute.
<https://www.sciencehistory.org/stories/magazine/braving-the-elements-why-mendeleev-left-russian-soil-for-american-oil/>
5. Beigbabapour, Y. (n.d.). Post No. 75. Retrieved from <https://yosefbeigbabapour.blogfa.com/post/75/>
6. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)
<https://www.bipm.org>
7. National Institute of Standards and Technology (NIST)
<https://www.nist.gov>

منابع

1. Rouvray, D. H. (2004). Elements in the history of the periodic table. *Endeavour*, 28(2), 69-74..
2. Haghi, A., Javarashkian, A., & Bolkhari Ghehi, H. (2017). The historical roots of the concept and instance of "Materia Prima" and the "First Emanation" in Greek philosophy. *History of Philosophy*, 7(4), 1-20.
3. Holmyard, E. J. (1990). *Alchemy*. Dover Publications.
4. Pormann, P. E. (2013). Qualifying and quantifying medical uncertainty in 10th-century Baghdad: Abu Bakr al-Razi. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 106(9), 370-372..
5. Rāzī, M. b. Z. (1970). *Al-Asrar* (H. Sheibani, Trans.). Tehran: University of Tehran.
6. Rāzī, M. b. Z. (1967). *Al-Madkhal al-ta'limi: A guide to the art of alchemy* (H. Sheibani, Trans.). Tehran: University of Tehran.
7. Giunta, C. J. (2017). Dmitri Mendeleev's Nobel-prize-losing research. In *The posthumous Nobel prize in chemistry, volume 1: Correcting the errors and oversights of the Nobel Prize Committee* (pp. 31-49). American Chemical Society.
8. Chapman, K. (2018). The oganesson odyssey. *Nature Chemistry*, 10(7), 796.
9. Nelson, F. (2024). How Japan took the lead in the race to discover element 119. *ACS Central Science*, 10(9), 1669-1673.
10. Hisamatsu, Y., Egashira, K., & Maeno, Y. (2022). Ogawa's nipponium and its re-assignment to rhenium. *Foundations of Chemistry*, 24(1), 15-57..
11. Dmitriev, I. S. (2012). The soul's despairing cry. *Science First Hand*, 32(2), 52-70..
12. Shiltsev, V., & Shiltseva, E. V. (2020). Dmitrii Ivanovich Mendeleev (1834-1907): The periodic table and beyond (No. FERMILAB-CONF-031-20-AD-APC). Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL), Batavia, IL, United States.
13. Davis, R. (2003). The SI unit of mass. *Metrologia*, 40(6), 299-305..
14. Pavese, F. (1981). The use of triple point of gases in sealed cells as pressure transfer standards: Oxygen (146.25 Pa), methane (11,696 Pa) and argon (68,890 Pa). *Metrologia*, 17(2), 35-43..
15. Foundation for the Islamic Encyclopedia. (n.d.). *Encyclopaedia of the World of Islam*, entry "Mineralogy (Abu Rayhan al-Biruni)," No. 2455.