فصلنامه آموزش مهندسی ایران، شماره ٤١، سال یازدهم، بهار ١٣٨٨، ص١٥١- ١٣٥

# طراحی و ساخت ترازوی حکمت؛ ترازویی مکانیکی مربوط به سده پنجم

یوسف یاسی[1]، جمشید ایلانلو[2]، مرجان پدیدار[2]، مریم میرزایی[2] و مهسا سید عبداللهی[2]

**چکیده:** ترازوی حکمت از جمله پیشرفته ترین ترازوهایی است که در دوران پس از اسلام طراحی و ساخته شده است. طراح و سازنده این ترازو عبدالرحمن خازنی، مؤلف کتاب *میزان الحکمه*، است. از جمله عوامل برتری این ترازو نسبت به سایر ترازوهای هم عصر خود دقت، عملکرد ترکیبی و سه گانه و تعداد بیشتر کفه‌های آن است که در عیار سنجی آلیاژهای دو عنصری مورد استفاده بوده است. این ترازو اولین بار پیش از سال ٥١٥ هجری قمری در مرو ساخته شده و پس از نابودی آن تا به اکنون هیچ آثاری از نمونه بازسازی شده آن در ایران رؤیت نشده است . در سال ١٣٨٧ اولین نمونه ترازوی حکمت در سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران در قالب پروژه‌ای تحقیقاتی با عنوان " طراحی و ساخت فناوریهای دانشمندان قدیم ایران " در پژوهشکده مکانیک بر اساس مستندات موجود از کتاب *میزان الحکمه* طراحی و بازسازی شده است تا چگونگی عملکرد، امکان بهینه سازی و توسعه کاربرد آن بررسی شود. در این تحقیق مدرج سازی بازوی ترازو با به کارگیری محاسبات ریاضی به منظور مدرج کردن ترازو برای تشخیص و عیار سنجی سایر عناصر جامد بجز طلا صورت گرفت که روشی کاملاً متفاوت بود با آنچه به صورت عملی الخازنی انجام داده است. بدین ترتیب امکان به کارگیری ترازوی حکمت در تشخیص انواع عناصر خالص و حتی عیار سنجی آلیاژهای دو پایه به شرط شناخت حداقل یکی از دو عنصر موجود در آلیاژ فراهم شد. از جمله اهداف دیگر اجرای این طرح، کندوکاو در زوایای فناوریهای گذشته به منظور یافتن و انتشار جزئیات علمی و فنی آنها و تطابق دانش گذشته با علوم و فنون امروز برای به روز رسانی و یافتن جایگاههایی مناسب در دانش و صنعت امروز برای آنان است. باشد که زنجیره دانش امروز و دانش گذشته به منظور تکامل و به کارگیری علوم و فنون گذشته به عنوان شالوده‌ای به دانش امروز متصل شود و شکل بگیرد.

**واژه‌های کلیدی: ترازوی حکمت، الخازنی، ترازو و عیار سنجی.**

پرتال جامع علوم انسانی

---

١. استادیار سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.yousefyassi@yahoo.com

٢. سازمان پژوهشهای علمی وصنعتی ایران، تهران، ایران.

## ۱. مقدمه

اساساً پروژه "طراحی و ساخت ابداعات و اختراعات دانشمندان گذشته ایران" در پژوهشکده مکانیک سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران که ترازوی حکمت یکی از زیر مجموعه‌های آن است، رسالتی بس فراتر از اجرای یک پروژه تحقیقاتی صرف دارد. شاید از جمله اهداف نهفته این طرح دمیدن روحی تازه به کالبدی باشد که سالهاست در زیر خروارها خاک فراموشی خفته است. بدین ترتیب، شاید بتوان عظمت و توانایی دانشمندان قدیم ایران را نه تنها به گوش جوانان تشنه علم و دانش این مرز و بوم، بلکه با تحرکات علمی مناسب در جهان طنین انداز کرد. البته، این نه بدان معناست که فقط به داشته‌های گذشته خود فخر بفروشیم، بلکه دیگر هدف قابل توجه و شایسته پیگیری این طرح ایجاد تفکری استفهامی و دانش گستر در اذهان جوانان، عاشقان علم و دانش و شیفتگان این آب و خاک است تا بیندیشیم که "چگونه ترازوی حکمت و دیگر فناوریهای پیشرفته گذشته" در جای خود ماندند تا گذشت زمان همه را به دست فراموشی سپارد. آیا اگر اولین چراغی که ادیسون افروخت همین مسیر را می پیمود، نمی بایست ما هم امروز در زیر نور شمع شبهای خود را سپری می‌کردیم؟ با اجرای این طرحها و انتقال نتایج آن در مراجع علمی می‌توان نیاموخته‌های علم و دانش گذشته را به نسلهای جدید امروز آموخت تا زمینه لازم برای توسعه و تکامل این فناوریها و یافتن راهکارهای مناسب برای به روز رسانی و به کارگیری آنها در علوم و صنایع امروز فراهم شود. اگر چه نیل به تمام این اهداف در گستره محدود یک طرح نمی‌گنجد، ولی می‌توان امیدوار بود که گامی که باید قرنها پیش برداشته می‌شد، امروز برداشته شده است.

مهندسی مکانیک در ایران قدیم کاملاً شکوفا بوده است و صنعتگران با آن آشنایی داشتند. کتابهای متعددی در این زمینه از تخریب تاریخ در امان مانده است که از آن جمله می‌توان به کتابهای *ابتکارات خارق العاده مکانیکی*، نوشته احمد بن موسی بن شاکر خراسانی، و مبانی نظری و علمی مهندسی مکانیک در تمدن اسلامی، نوشته ابی العزیز بن اسماعیل الجزری، اشاره کرد [۱۳]. از دیگر این کتابها می‌توان کتاب *میزان الحکمه*، نوشته الخازنی، را برشمرد که شرحی بر ترازوهای طراحی و ساخته شده تا آن زمان از جمله ترازوی ابوریحان، ترازوی خیام و ترازوی حکمت است و طراح آن خود الخازنی بوده است.

ابوالفتح عبدالرحمن خازنی، دانشمند علم مکانیک، از علمای ریاضی، اختر شناس بزرگ سده پنجم و ششم و خدمتکار خزانه دار دربار سلجوقی در مرو بوده است[۶]. در گذشته، ساخت ترازوهای ساده با ساختاری متشکل از دو کفه و یک شاهین به منظور سنجش وزن اجسام، اجرای عدل و عدم کم فروشی یکی از ضروریات معیشت مردم بوده است که عملکرد این ترازوها بر پایه قوانین اهرم بنا شده بود. اما بر اساس نیازهای بشر، به خصوص پادشاهان، ترازوهایی برای تشخیص درصد خلوص آلیاژ

به کار گرفته شده در اجسامی همچون تاج پادشاهی و طلاجات خزانه حکومتی و ... توسط دانشمندانی از جمله ارشمیدس، منلاؤوس، سندبن علی، یوحناء یوسف، احمد بن الفضل المساح، محمد زکریا، ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، عمر خیام و مظفربن اسماعیل اسفزاری ساخته شد[۱]. در آن زمان، این نوع سنجش را عیار سنجی اجسام مرکب (مختلط) می نامیدند. در این میان، تحقیقات علمی خازنی نیز، تحت تأثیر شغل اربابش، به سمت ابداع و اختراع ترازوی آبی به منظور اندازه‌گیری جرم حجمی مواد و میزان خلوص آلیاژهای دو عنصری سوق داده شد[۵ و ۸].

اگر چه مقایسه تمام ترازوهای ساخته شده تا آن زمان با ترازوی حکمت در محدوده کار این تحقیق نمی گنجد، لکن همترازی برخی از انواع آنها شاید بتواند به بیان هر چه بهتر جایگاه علمی ترازوی حکمت کمک کند. در قیاس ترازوی حکمت با ترازوهای آن زمان که به منظور عیار سنجی طراحی و ساخته شده بودند، این گونه می‌توان گفت که اولین ترازوی عیارسنج را ارشمیدس در یونان ساخت و کاربرد آن فقط عیار سنجی بود و درجه بندی آن به شکل ساده‌ای انجام می شد.

بعدها ترازویی به نام میزان طبیعی توسط زکریای رازی، متوفی به سال ۳۱۳ه.ق. ساخته شد که کاربرد آن نیز فقط عیارسنجی بوده است. آن ترازو به دو گونه درجه بندی می‌شده، گونه اول به طور تقریبی میزان خلوص یا ناخالصی عنصر را مشخص می‌کرده و دقیقاً عددی را نشان نمی داده است. درگونه دوم درجه بندی، که مدرج کردن توسط شعیرات انجام می‌شده است، فاصله شاخصهای بین دو عنصر به ۱۲ قسمت تقسیم می‌شده که با نحوه شمارش خاص آنها و انجام دادن محاسبات، یافتن نسبت دقیق عناصر موجود در آلیاژ دو پایه مورد نظر امکان پذیر می‌شده است. از معایب این ترازو می‌توان به محدود بودن درجه بندی آن برای دو عنصر اشاره کرد، زیرا در صورت درجه بندی برای عناصر دیگر احتمال تداخل درجه بندیها وجود داشت.

پس از زکریای رازی، در بین سالهای ۳۶۲ تا۴۴۰ه.ق.، ابوریحان بیرونی نیز ترازویی ساخت که امکان سنجش وزن، سنجش وزن مخصوص، تشخیص عناصر و اندازه‌گیری به وسیله آن وجود داشت. بازوی این ترازو درجه بندی نداشت و عملکرد آن بر اساس وزن آب هم حجم جسم مورد سنجش استوار بود و به همین منظور، ابوریحان بیرونی جداولی نیز تهیه کرده بود که و از آنها در سنجشهایش استفاده می‌کرد. اختلاف بین وزن مخصوص محاسبه شده توسط ابوریحان بیرونی با وزن مخصوصهایی که دانشمندان قرون اخیر محاسبه کرده‌اند، بسیار ناچیز است. از جمله ایراداتی که خازنی به ترازوی ابوریحان گرفته، عدم سهولت در به کارگیری این ترازو، کمی دقت آن و نیاز به جداول محاسباتی کمکی است. پس از ابوریحان بیرونی، میزان‌الجامع را، که میزان‌الحکمه نیز خوانده می‌شده است و به فارسی به آن ترازوی حکمت می‌گویند، اولین بار اسفزاری، متوفی به سال ۵۱۵ ه.ق.، ساخته است پس از مرگ وی، عبدالرحمن خازنی آن را تکمیل و بازسازی کرده است. این ترازو

کاربرد گسترده ای داشته و امکان سنجش جرم، چگالی، عیارسنجی، اندازه گیری زمان و اندازه‌گیری خطوط افقی به وسیله آن وجود داشته است. میزان الحکمه معایب ترازوهای ماقبل خود را نداشته است و در دقت عمل نیز به گفته خازنی، اندازه تفاوت آن در سنجش وزن به اندازه یک حبه (۱۶۸مثقال) در هزار مثقال است(۰/۱۶۸).

مقایسات میان ترازوی حکمت و برخی دیگر از ترازوهای ساخته شده عمدتاً بر مبنای ادعای الخازنی در کتاب *میزان‌الحکمه* و همچنین، انجام دادن محاسبات مقایسه‌ای بر پایه جداول به جا مانده از ابوریحان بیرونی در کتاب *میزان الحکمه* صورت گرفته است [۱۲]، [۱]. بدین ترتیب، با مقایسه اعداد به دست آمده توسط الخازنی و ابوریحان بیرونی با ارقام امروزی، ادعای الخازنی تأیید می‌شود.

در جدول ۱ مقایسه اعداد به دست آمده توسط الخازنی و ابوریحان بیرونی و درصد اختلاف آنها با ارقام امروزی ارائه شده است.

**جدول ۱: مقایسه اعداد به دست آمده توسط الخازنی و ابوریحان بیرونی و درصد اختلاف آنها با ارقام امروزی**

| وزن مخصوص / عنصر | محاسبات امروزی | اندازه گیریهای خازنی | اندازه گیریهای ابوریحان بیرونی | درصد اختلاف با مقادیر امروزی | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | خازنی | بیرونی |
| برنج | ۸/۴ | ۸/۵ | ۸/۶۷ | +۱/۲ | +۳/۲۱ |
| مس | ۸/۸۵ | ۸/۶۶ | ۸/۹۲ | −۱/۲۴ | +۱ |
| جیوه | ۱۳/۵۶ | ۱۳/۵۶ | ۱۳/۷۴ | ۰ | +۱/۳۳ |
| آهن | ۷/۸ | ۷/۷ | ۷/۶۹ | −۱/۲۸ | −۱/۴۱ |

به روایتی، ترازوی حکمت را اولین بار مظفربن اسماعیل اسفزاری به نام میزان الحکمه به دستور سلطان سنجر ساخت[۱]؛ در روایتی دیگر، نامی که اسفزاری بر ترازوی اختراعی خود نهاده بود، "ترازوی غنس و عیار" ثبت شده است[۱]. ترازوی مذکور پس از ساخته شدن به خازن سلطان سنجر سپرده شد و خازن، که ساخت این ترازو را عامل بر ملاشدن تقلبهایش در جواهرات خزانه سلطان می دانست، از بیم خشم سلطان سنجر آن را نابود کرد. اسفزاری که از نابود شدن ترازویش باخبر شد، از غم از دست رفتن زحمات چند ساله‌اش بیمارشد و چندی بعد از دنیا رفت [۲،۱و۳]. پس از مرگ

اسفزاری، خازنی کار وی را دنبال کرد و با تکمیل و بازسازی ترازو با کمک آیات قرآنی نام المیزان الجامع را بر آن نهاد[۱] به همین دلیل، ترازوی حکمت یا المیزان الجامع، به صورتی پیشرفته، با دارا بودن پنج کفه و امکان سه نوع سنجش[۱] و به صورت ترکیبی از ترازوهای ساده و آبی، توسط عبدالرحمن خازنی طراحی و ساخته شد. کار این ترازو بر پایه اصول ارشمیدس؛ یعنی برابری بازوها و کم شدن وزن جسم در آب استوار است. کتاب *میزان الحکمه* تنها سندی است که از شیوه‌های سنجش و ساخت ترازوی حکمت از خازنی به جا مانده است([۹ و۷]. در این مقاله ساخت و مدرج کردن ترازوی حکمت و نحوه عملکرد سه گانه آن و تشریح نتایج به دست آمده از آزمونهای سنجش وزن، چگالی و درصد خلوص آلیاژ دو عنصری بررسی شده است. همچنین میزان دقت ترازو در سنجشهای مختلف در مقایسه با دقتی که برای این ترازو در منابع به جا مانده از گذشته ذکر شده نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین، از دیگر اهداف مهم این طرح بررسی فرضیه امکان تعیین محل ثبت علایم شاخص برای سایر عناصر جامد، علاوه بر طلا و نقره، بر روی بازوی ترازو است. به منظور نیل به این هدف از روش معمول شاخص‌گذاری که مورد استفاده الخازنی بوده است، استفاده شده است. همچنین، با فرض وجود رابطه‌ای بین فاصله شاخصهای عناصر تا مرکز شاهین ترازو و چگالیهای آنها سعی شده است تا رابطه‌ای به شکل یک معادله ریاضی، به منظور شاخص‌گذاری، یافت شود. در چنین صورتی امکان مقایسه دقتهای دو روش شاخص گذاری که در نهایت به دقت کلی ترازو منجر می شود، وجود خواهد داشت. بدین ترتیب، به راحتی می‌توان ترازو را برای کلیه عناصر جامد مدرج و از آن برای تعیین درجه خلوص هر مخلوط دو پایه ای استفاده کرد. و این بدان دلیل است که این ترازو از ابتدا به منظور عیار سنجی طلا و عمدتاً برای تعیین درجه خلوص طلا، با احتمال وجود ناخالصی نقره در آن، طراحی و ساخته شده است. لذا، با ارائه و بررسی این فرضیه و در صورت اثبات می‌توان از این ترازو به منظور تشخیص نوع عناصر جامد خالص و برای عیار سنجی سایر آلیاژهای دو پایه نیز بهره جست.

ناگفته نماند که به کارگیری این ترازو به شکل موجود شاید در زمینه‌های علمی و صنعتی امروز جایگاهی نداشته باشد و فقط بتوان آن را با چنین ابعادی در موزه‌ها و برای آشنا ساختن دانش پژوهان به کار گرفت، اما آنچه حایز اهمیت است و از آن می‌توان در آموزش مهندسی بهره جست،

---

۱. شایان ذکر است که از دیگر کاربردهای این ترازو اندازه گیری خطوط افقی و زمان است که خازنی در خاتمه کتاب خویش در این دو مورد توضیح داده است[۱]. در این مقاله به بررسی ساخت ترازوی حکمت با سه نوع سنجش، پرداخته شده است).

دانش و مبانی علمی به کار رفته در طراحی ترازوست که با روزآمد کردن آنها شاید بتوان به ساز وکارهای ساده و کوچکی برای ارزیابی درجه خلوص آلیاژهای دو پایه یا چند پایه دست یافت.

## ۲. شرح ترازو

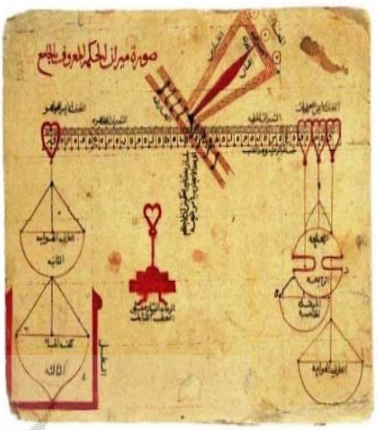
به منظور بیان هرچه بهتر و دقیق تر ساختمان ترازو و چگونگی کارکرد آن، این بخش به دو زیر مجموعه، ساختمان ترازو و عملکرد ترازو تقسیم شده است.

### الف. ساختمان ترازو

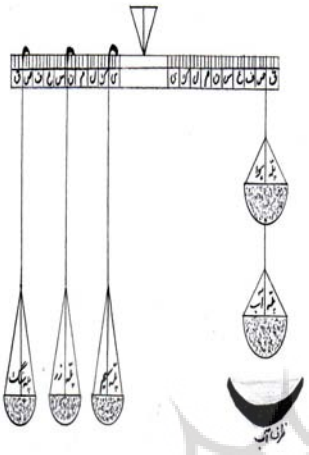
بدنه اصلی ترازو متشکل است از یک پایه بلند، یک قاب چهار پهلو، که ترازو به آن آویخته شده و بر روی پایه استوار است، و محوری افقی، که عمود نامیده می شود و کفه‌های توزین به آن آویخته‌اند. این ترازو شامل ۵ کفه یا پله است که همگی بر عمود ترازو سوار هستند. از این میان، سه کفه ثابت اند و دوکفه دیگر قابلیت جا به جایی در طول عمود را دارند، که در متن اصلی کتاب *میزان الحکمه* با نام منقلتان[1] ذکر شده‌اند[۱]. بر اساس اصل برابری بازوهای ارشمیدس، عمود به دو بازوی متساوی تقسیم شده است. در وسط عمود شاهین ترازو، که نشان دهنده میزان تعادل ترازوست، در راستایی عمود بر محور اصلی ترازو[۱]، که توسط قابی از جنس خودش (الفیارین)از سه طرف احاطه شده است، به روی تیرچه‌ای عرضی نصب می‌شود. قاب نیز توسط چند قلاب(المعالیق) به مکانی دیگر آویخته شده تا بدین ترتیب، ترازو از شرایط تعلیق مضاعف برخوردار شود[۱]. در یک طرف عمود کفه‌ای به نام کفه معیار یا پله هوایی اول(الطرفیۀ الهوائیۀ الاولی) آویخته شده که در کتب دیگر به نام کفه سنگ نامیده شده است. بر روی همین بازو دو کفه فرعی به نامهای پله مجنحۀ و پله منقلۀ آویخته شده‌اند، که به منظور عیار سنجی از آنها استفاده می‌شود. در طرف دیگر عمود کفه آب یا پله حاکم (کفۀ الماء الثالثه)،که همیشه در ظرفی از آب قرار دارد، به حالت تعلیقی مضاعف به زیر کفه هوا یا پله هوایی دوم (الطرفیۀ الهوائیۀ الثانیۀ) آویخته شده است. تمام اجزای نامبرده و ترتیب قرارگرفتن آنها در تصاویر ۱و۲ مشاهده می‌شود.

---

۱. المنقله: هر چیز که آن را از موضعی به موضع دیگر نقل توان کرد، آن را منقله و منقل گویند [۱].



**شکل۲: ترازوی حکمت** [۱۰]



**شکل ۱: ترازوی حکمت** [۱] **صفحه۱۲**

ب. عملکرد ترازو

۱. سنجش جرم

در حالت تعادل، شاهین ترازو به حالت عمود و در مقابل شاخص عمودی تعادل ایستاده است و عمود ترازو نیز موازی خط افق قرار می‌گیرد. به منظور سنجش جرم آلیاژ مورد نظر در کفه هوا قرار داده می شود که با این کار، ترازو از حالت تعادل خارج خواهد شد. با افزودن وزنه در کفه معیار و برقراری تعادل در ترازو، جرم آلیاژ سنجیده می‌شود.

۲. سنجش چگالی

پس از سنجش جرم در کفه هوا، با انتقال جسم به کفه آب و فرو رفتن کفه در آب، بنا بر اصل ارشمیدس، از وزن جسم به اندازه وزن مایع هم حجم آن کاسته می شود. با توجه به اینکه کفه درظرفی از آب فرو رفته و چگالی آب نیز یک گرم بر سانتی مترمکعب است، لذا، اختلاف جرم جسم در کفه آب و کفه هوا نشان دهنده حجم آب است[۱]. با به دست آوردن حجم آب و دانستن این نکته

---

۱. شایان ذکر است که به کاربردن واژه سنجش وزن توسط ترازو غلطی مصطلح است، زیرا جرم سنجیده شده در کفه هوا با $m'$ نشان داده می شود. لذا، $m'$ سنجیده شده نشان دهنده جرم جسم و با وزن آن ( $w = m'g$ ) متفاوت است.

که آب و جسم هم حجم هستند، حجم جسم مورد نظر نیز مشخص می شود. با در دست داشتن جرم و حجم جسم مورد نظر و با کمک رابطه چگالی می‌توان چگالی اجسام مختلف را محاسبه کرد.

$$\rho = \frac{m'}{v'}$$

۳. تشخیص درصد خلوص عناصر موجود در آلیاژ(عیارسنجی)

به منظور سنجش عیار جسمی مرکب از طلا و نقره، ابتدا همه کفه‌ها، بنا به ترتیبی که شرح داده شد، برروی عمود استقرار می یابند، به نحوی که قبل از انجام دادن هرگونه سنجش ترازو در حالت تعادل کامل قرار گیرد. به منظور تأمین تعادل هرچه دقیق تر ترازو می توان از حرکت دادن آویزه‌ای به نام رمانه روی طرف سبک عمود استفاده کرد. پس از مهیا شدن تعادل ترازو مقداری طلای خالص درکفه هوا گذاشته و با قرار دادن سنگ یا وزنه در کفه معیار، جرم آن سنجیده می شود. سپس، طلای مذکور از کفه هوا خارج و در داخل کفه آب قرار داده می شود که بدین ترتیب، بنا بر قانون ارشمیدس، به اندازه وزن مایع هم حجم طلا از وزن آن کاسته و لذا، بازوی سمت کفه‌های دوگانه سبک‌تر می شود. برای بازگرداندن تعادل از دست رفته ترازو، سنگهای کفه معیار به کفه طلا منتقل و آن قدر کفه را بر روی عمود حرکت داده می شود تا عمود کاملاً در حالت افقی و متعادل قرار گیرد؛ بدین ترتیب مکان شاخص عنصر طلا مشخص می شود. برای تعیین مکان شاخص عنصر نقره نیز مشابه این عمل انجام و صحت مکانهای به دست آمده با تکرار عملکرد یاد شده، مشخص می‌شود. بدین ترتیب، محور اصلی ترازو بر حسب نوع عناصر موجود در آلیاژ و مقدار آنها مدرج می‌شود که در گذشته این درجه بندی به وسیله حروف الفبا انجام می شده است (شکل۱و۲). پس از مدرج کردن ترازو، دو کفه فرعی بر روی شاخصهای مربوط به عناصر تشکیل دهنده آلیاژ قرار می‌گیرند[۱]. برای عیار سنجی جسمی مرکب از طلا و نقره، پس از وزن کردن آلیاژ در کفه هوا و انتقال آن به کفه آب، سنگهای توزین کفه معیار چنان میان کفه‌های فرعی توزیع می‌شوند که تعادل مجدد ترازو تأمین شود. مقدار وزن سنگهای توزین در هر یک از کفه‌های فرعی نشان دهنده مقدار وزن آن عنصر در آلیاژ مذکور است. در صورت خالص بودن جسم مورد سنجش، تعادل ترازو فقط در صورتی فراهم می‌شود که همه سنگهای کفه معیار درون یکی ازکفه های فرعی قرار گیرند.

۳. ۱. نحوه مدرج کردن ترازو برای تعیین درصد عناصر موجود در آلیاژ از طریق محاسبه

بنا بر رابطه ذکر شده در منابع موجود به منظور مدرج کردن ترازو به اطلاعات زیر نیاز است [۱۱]:

وزن جسم درکفه آب: $w'$

فاصله شاخص عنصر مورد نظر بر روی بازو تا وسط عمود: $d'$

نصف طول عمود: $l$

$$\frac{w'}{w}=\frac{d'}{l} \qquad (۱)$$

$$w-v=w' \qquad (۲)$$

$\frac{m'}{v'}$= جرم مخصوص

۲۰۰ گرم از عنصر طلا را در نظر می گیریم و با توجه به رابطه جرم مخصوص، حجم آن را محاسبه می کنیم و در نهایت، وزن آن جسم در آب با توجه به رابطه(۲) به دست می آید. با جایگذاری ارقام به دست آمده در رابطه (۱) مکان شاخص مربوط به عنصر مورد نظر تا وسط عمود به دست می آید.

محاسبات مربوط به عنصر طلا:

$$V=\frac{200}{19.3}=10.37$$

$$w'=200-10.37=189.63$$

$$\frac{189.63}{200}=\frac{d'}{100}$$

$$d'=95cm$$

با تکرار این روش برای عناصر دیگر، بازوی ترازو مدرج و آماده آزمون عیارسنجی می‌شود. ارقام مربوط به تعیین جرم مخصوص و درجه بندی ترازو در جدول (۳) ثبت شده است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

از بررسی رابطه (۱) نتایج زیر به دست می آید:

(۳)

$$\frac{w-w'}{w}=\frac{l-d'}{l}$$

$$\rho = \frac{w}{v} = \frac{w}{w - w'} \qquad (۴)$$

با استفاده از رابطه (۵) که از رابطه (۱) استنتاج شده است، می توان $d'$ را مستقل از انجام هرگونه سنجش برای عناصر مختلف به دست آورد:

$$\rho = \frac{l}{l - d'} \qquad (۵)$$

و در مقایسه دو عنصر مختلف نیز رابطه (۶) برقرار است:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{l - d_2'}{l - d_1'} \qquad (۶)$$

### ۳. معایب عملکرد

علاوه بر جامعیت عملکرد این ترازو، دقت آن از دیگر ویژگیهایی بود که موجب برتری آن نسبت به ترازوهای دیگر شد [۴]. بنا به مستندات موجود، دقت ترازوی حکمت در حدود ۱۶۸ مثقال به روی هزار مثقال ذکر شده است که این دقت ۰/۱۶۸ در ادامه "دقت اصلی" ترازو نامیده می‌شود [۱]. بلند بودن طول عمود و دیگر اجزای تشکیل دهنده و همچنین، تعلیق مضاعف مجموعه عمود و شاهین به قاب ترازو، موجب افزایش میزان حساسیت ترازو در برابر هر گونه انحرافات کوچک می‌شود که این افزایش حساسیت باعث کاهش خطا در اندازه گیری می‌شود. بدین منظور، طول عمود و نخهای اتصال در حد امکان باید بلند در نظر گرفته شود.

تبعیت کردن از روش درجه بندی خازنی مستلزم تکرار زیاد مراحل درجه بندی است. با توجه به اینکه وجود حتی یک حفره هوایی کوچک درون جسم باعث ایجاد خطا در محاسبه $w'$ خواهد شد، بدیهی است که در این مراحل، خطای اندازه گیری جرم و کاهش جرم جسم نیز بر تعیین مکان شاخصها بی تأثیر نخواهد بود. لذا، برای مدرج کردن ترازو از روش خازنی پیروی نمی‌شود و بازو به روش محاسباتی یاد شده درجه بندی می شود. میانگین خطا در آزمونهای انجام شده در قیاس با دقت اصلی ترازو در جدول(۳) نشان داده شده است.

نحوه محاسبه خطا هنگام سنجش جرم عنصرآهن و همچنین، میانگین خطا در سنجش جرم عناصر مورد توزین توسط ترازو به قرار زیر است:

خطای اندازه گیری جرم عنصر آهن=

$$\frac{m' - m}{m} \times 100 = \frac{125.10gr - 125.60gr}{125.60gr} \times 100 = 0.4\%$$

میانگین خطا در سنجش جرم عناصر مورد توزین توسط ترازو=

$$\frac{0.40 + 0.05 + 1.800 + 0.70}{4} = 0.7375 \simeq 0.74$$

به طور مشابه خطای اندازه‌گیری سه نوع سنجش جرم، چگالی و عیارسنجی و همچنین، میانگین خطای آنها محاسبه شده است.

**جدول ۲: مقایسه میانگین خطا( $E'$ ) در آزمونها با دقت ذکر شده درکتاب میزان الحکمه**

| معیار / سنجش | $(gr)\ m'$ | $(gr/cm^3)\ \rho'$ | $(gr)\ T$ |
|---|---|---|---|
| $E'$ | ۰/۷۴۰ | ۱/۱۰۰ | ۳/۴۰۰ |
| اختلاف $E'$ نسبت به "دقت اصلی" | ۰/۵۷۲ | ۰/۹۳۲ | ۳/۲۳۲ |

با توجه به مقایسه انجام شده در جدول۲، علل خطاهای به وجود آمده در سنجشها را می‌توان به دلیل امکان وجود حفره‌های هوایی در درون آلیاژ مورد نظر یا تنظیم نبودن دقیق شاهین با شاخص عمودی تعادل دانست.

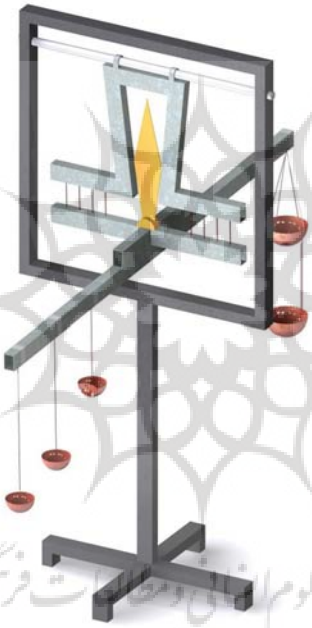
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

### ۴. ساخت نمونه و آزمون

ابتدا پایه ترازو نصب و سپس، قاب مربع شکل به بالای آن جوش داده می‌شود. میله‌ای افقی در قسمت فوقانی قاب و موازی با ضلع بالایی آن نصب می شود. مجموعه شاهین و عمود، که به هم متصل هستند، در قالب تعلیقی مضاعف به میله مذکور مطابق شکل ۳ آویخته و کفه هوا و کفه آب به حالت تعلیق مضاعف به بازوی راست و دو کفه فرعی و کفه معیار نیز به صورت مجزا به بازوی چپ آویخته می‌شوند. برای عیارسنجی به منظور جلوگیری از تداخل کفه‌های فرعی و کفه معیار، طول نخهای اتصال آنها یکی بلندتر از دیگری در نظر گرفته شده است. (شکل۳). سنجش جرم و چگالی،

همان‌طور که در بخشهای ۱ و ۲ شرح داده شد، صورت گرفته و نتایج به دست آمده در جدول ۴ ثبت شده است.

مرحله بعدی عیارسنجی است که قبل از اجرای آن بازوی چپ باید مدرج شود. به دلیل وجود خطا در محاسبه جرم مخصوص به روش خازنی، مدرج کردن ترازو از روش محاسباتی که در بخش ۳-۱ شرح داده شده، انجام می‌شود. عیار آلیاژی مرکب از آهن و آلومینیوم بنا بر توضیحات بخش ۳ سنجیده و نتایج مربوط به آن در جدول ۵ ثبت شده است.



**شکل ۳: ترازوی حکمت ساخته شده توسط سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران**

**جدول ۳: جرم مخصوص و درجه بندی ترازو**

| عنصر / کمیت | طلا | نقره | آهن | مس | آلومینیوم | سرب |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\gamma$ $(kg/m^3)$ | ۱۹۲۶۰ | ۱۰۵۰۰ | ۷۸۶۰ | ۸۹۲۰ | ۲۷۰۰ | ۱۱۴۰۰ |
| $\gamma'$ $(kg/m^3)$ | – | – | ۷۶۷۵ | ۸۵۴۳ | ۲۷۹۴ | ۱۱۳۷۰ |
| $E$ $(\%)$ | – | – | ۲/۳۵۴ | ۴/۲۲۶ | ۳/۴۸۱ | ۰/۲۶۳ |
| $w'$ $(gr)$ | ۱۸۹/۶۳ | ۱۸۰/۹۵۳ | ۱۷۴/۵۵ | ۱۷۷/۵۷ | ۱۲۵۰/۹۳ | ۱۸۲/۴۱ |
| $d'$ $(cm)$ | ۹۵ | ۹۰ | ۸۷ | ۸۸ | ۶۲ | ۹۱ |

**جدول٤: ارقام به دست آمده از آزمون‌های سنجش جرم و چگالی**

| عناصر وآلیاژ | $m$ $(gr)$ | $d$ $(mm)$ | $h$ $(mm)$ | $v$ $(cm^3)$ | $\rho$ $(gr/cm^3)$ | $m'$ $(gr)$ | $E$ $(\%)$ | $m''$ $(gr)$ | $v'$ $(cm^3)$ | $\rho'$ $(gr/cm^3)$ | $E$ $(\%)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| آهن | ۱۲۵/۶۰ | ۱۸/۰۰ | ۶۳/۰۰ | ۱۶/۰۲ | ۷/۸۰ | ۱۲۵/۱۰ | ۰/۴۰ | ۱۰۸/۸۰ | ۱۶/۳۰ | ۷/۷۰ | ۱/۳۰ |
| آلومینیوم | ۱۹۹/۱۰ | ۵۵/۱۰ | ۳۰/۰۰ | ۷۱/۴۹ | ۲/۷۰ | ۱۹۹/۲۰ | ۰/۰۵ | ۱۲۷/۹۰ | ۷۱/۳۰ | ۲/۷۰ | ۰/۰۰ |
| مس | ۳۸/۶۰۰ | ۱۱/۱۰۰ | ۴۷/۲۰۰ | ۴/۵۶۵ | ۸/۴۰۰ | ۳۹/۳۰۰ | ۱/۸۰۰ | ۳۴/۷۰۰ | ۴/۶۰۰ | ۸/۵۴۰ | ۱/۱۰۰ |
| برنج | ۲۴۸/۰۰ | ۵۰/۲۰ | ۱۵/۰۵ | ۲۹/۷۷ | ۸/۳۳ | ۲۴۶/۱۰ | ۰/۷۰ | ۲۱۷/۴۰ | ۲۸/۷۰ | ۸/۵۰ | ۲/۰۰ |

**جدول ۵: ارقام به دست آمده ازآزمون درصد خلوص آلیاژ مرکب از آهن و آلومینیوم**

| کمیت / عناصر | $m$ $(gr)$ | $T$ $(gr)$ | $E$ $(\%)$ |
|---|---|---|---|
| آهن | ۱۲۵/۶ | ۱۳۱/۱ | ۴/۰ |
| آلومینیوم | ۱۹۹/۱ | ۱۹۳/۶ | ۲/۸ |
| آلیاژ | ۳۲۴/۷ | ۳۲۴/۷ | ۰/۰ |

## ۵. نتیجه گیری

در تحقیق انجام شده نمونه‌ای از میزان الجامع یا ترازوی حکمت براساس اطلاعات موجود درکتاب *میزان الحکمه*، نوشته عبدالرحمن الخازنی، و سایر منابع طراحی و ساخته شد. آزمایشهای انجام شده گویای آن هستند که ترازو مطابق ادعای طراح با دقتی قابل قبول عمل می‌کند. لذا، اندازه‌گیریهای مکرر با این ترازو دقتی معادل با ۰/۷٪ در اندازه گیری وزن اجسام ،دقت۱/۱٪ در اندازه گیری چگالی و دقت ۳/۴٪ در اندازه‌گیری عیار اجسام را نشان داد.

یکی دیگر از دستاوردهای مهم اجرای این طرح، امکان تعیین محل ثبت علایم شاخص برای سایر عناصر جامد بر روی بازوی ترازوست. بدین ترتیب، به راحتی می‌توان ترازو را برای کلیه عناصر جامد مدرج و از آن برای تعیین درجه خلوص هر مخلوط دو پایه‌ای استفاده کرد. در اینجا، روشی جدید و متفاوت برای مدرج کردن بازوی ترازوی حکمت ارائه شده است. این روش بر نحوه‌ای که خازنی در کتاب *میزان الحکمه* برای درجه بندی ترازوی خویش شرح داده است، ارجحیت دارد و بر پایه روابط (۱) و (۲) و رابطه جرم مخصوص استوار است. هنگام درجه بندی به روش خازنی، به منظور از بین بردن تقریبی خطا در مکان شاخص عنصر مورد نظر، آزمایشها، بارها تکرار می‌شود، که با رابطه (۵) ارائه شده در این مقاله می‌توان این فاصله را مستقل از انجام آزمایشها و تکرار آن برای عناصر مختلف به دست آورد و به روی بازوی ترازو شاخصهای مربوط را مشخص کرد. در روش خازنی اگر ترازو در تعیین جرم و حجم جسم دارای خطا بوده درجه بندی بازو و به تبع آن عیارسنجی آن نیز با خطا انجام می‌شد و این در حالی است که در روش جدید ارائه شده، مستقل از وجود خطا در سنجیدن جرم و حجم جسم، مکان قرار گرفتن کفه های فرعی عناصر مورد نظر به درستی تعیین می‌شود.

بدین ترتیب، می‌توان چنین نتیجه گرفت که از آنجا که این گونه ترازوها از بدو امر عمدتاً به منظور تعیین درجه خلوص طلا با احتمال وجود نا خالصی نقره در آن طراحی و ساخته شده اند، لذا، با استفاده از این روش می توان هر ماده جامد خالصی را مورد چگالی سنجی قرار داد و با تعیین چگالی آن و به کارگیری شاخص مرتبط با آن عنصر، نوع عنصر را مشخص کرد. همچنین، با این وسیله می‌توان کلیه آلیاژهای دو پایه‌ای را، که شاخص عناصر تشکیل دهنده آنها بر روی بازوی ترازو قرار دارند، با شرط شناخت حداقل یک عنصر مورد عیار سنجی قرار داد و حتی نوع عنصر ناخالصی را نیز تعیین کرد.

لذا، دیگر نتیجه مهم به دست آمده که گویای برتری ترازوی حکمت بر سایر ترازوهای ما قبل خود است، این است که بازوی این ترازو نه فقط برای دو عنصر طلا و نقره، بلکه برای تمام عناصر

جامد قابل درجه بندی است و شاخصهای هر عنصر منحصر به فرد است و امکان تداخل آنها با یکدیگر وجود ندارد.

همچنین، آزمایشهای متعددی برای بررسی امکان وجود رابطه‌ای مستقیم بین فاصله مکان علایم شاخص هر عنصر بر روی بازوی ترازو تا مرکز پایه شاهین ترازو و چگالی عناصر انجام شد که بر خلاف انتظار هیچ‌گونه رابطه مستقیمی مشاهده نشد.

باید توجه داشت که روش تشخیص عناصر و عیار سنجی آنها متعلق به سده ششم هجری بوده و پس از آن هیچ گونه فعالیتی برای بهینه سازی و به روز رسانی آن و ابزار مرتبط با آن، در طی هشت قرن گذشته، صورت نگرفته است. لذا، جای تعجب نیست که امروزه نتوان جایگاهی مناسب در صنعت برای این فناوری یافت. شاید با تحقیقات بیشتر و استفاده از تفکر موجود در طراحی آن بتوان آن را به صورتی توسعه بخشید تا جایگاه واقعی خود را در صنعت امروز بیابد.

از جمله مبانی علمی به کار رفته در طراحی این ترازو " قانون ارشمیدس " است. با توجه به این اصل و سایر مبانی به کار گرفته شده در طراحی ترازو، که به منظور تشخیص مقدار عناصر موجود در یک آلیاژ دو پایه و حتی تعیین عنصر ناخالصی در آلیاژ با دانستن جنس فلز پایه است، و نیز ادغام دانش و فناوری امروزی با این اصول، شاید بتوان آمیزه‌ای نو در امر توزین و تجزیه آلیاژهای دو یا چند پایه تدوین کرد. بدین ترتیب، مواردی که می‌توان از آنها در امر آموزش مهندسی، توسعه و روزآمد کردن فناوری این ترازو بهره گرفت به شرح زیر ارائه می شود:

۱. استفاده از قانون ارشمیدس در تعیین چگالی عناصر؛

۲. با نگرش به چگونگی عملکرد ترازو در تعیین جایگاه شاخصهای عناصر بر روی بازوی آن و نقش گشتاورها در این امر شاید بتوان با به کارگیری گشتاور سنجهای دیجیتال امروزی تحولی در ساختمان ترازو ایجاد کرد؛

۳. استفاده از مبانی طراحی ترازوی حکمت در تعیین ناخالصی یا تعیین مقادیر و نوع عناصر تشکیل دهنده آلیاژها.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

**نمادها**

$d$ : قطر استوانهٔ جسم مورد نظر بر حسب میلیمتر

$d'$ **:** فاصله درجه عنصر مورد نظر به روی بازو تا وسط عمود

$\gamma'$: جرم مخصوص به دست آمده از سنجشها و محاسبات بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب

$E$: خطا بر حسب درصد

$E'$ : میانگین خطا بر حسب درصد

$h$: ارتفاع استوانه جسم مورد نظر بر حسب میلیمتر

$m$: جرم واقعی بر حسب گرم

$m'$ : جرم سنجیده شده در کفه هوا توسط ترازو بر حسب گرم

$m''$: جرم سنجیده شده در کفه آب توسط ترازو بر حسب گرم

$\rho$: چگالی واقعی بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب

$\rho'$: چگالی سنجیده شده توسط ترازو بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب

$T$: سنجش میزان خلوص آلیاژ یا عیار سنجی بر حسب گرم

$v$ : حجم واقعی جسم بر حسب سانتیمتر مکعب

$v'$: اختلاف جرمها درکفهٔ آب و کفهٔ هوا، حجم آب هم حجم جسم، حجم جسم بر حسب سانتیمتر مکعب

$\gamma$: جرم مخصوص واقعی عنصر بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب

**مراجع**


۱. خازنی، ابوالفتح عبدالرحمن، **میزان الحکمه**، با مقدمه و تعلیقات مقدس رضوی، انتشارات بنیاد فرهنگ ایران، ترجمه فارسی،۱۳۴۶.

۲. شهرزوری، شمس‌الدین محمدبن محمود، **نزهه الارواح و روضه الافراح(تاریخ الحکماء)**، ترجمه مقصود علی تبریزی، ۱۳۶۵.

۳. حلبی، علی اصغر، **تاریخ فلاسفه ایرانی از آغاز اسلام تا امروز**، ۱۳۵۱.

۴. دهخدا، علی اکبر، **لغت نامه دهخدا**، زیر نظر دکتر محمد معین و دکتر سید جعفر شهیدی، ۱۳۴۵.

۵. مرادی غیاث آبادی، رضا، **سرنوشت خازنی: داستان غم انگیز دانشمندان ایران**، اسفند ماه ۱۳۸۴.

۶. مصاحب، غلامحسین، **دایرةالمعارف فارسی**، جلد اول(ا ـ س)، ص۸۷۶، ۱۳۸۳.

۷. بیرشک، احمد، **خلاصه زندگینامه علمی دانشوران**، ص۴۰۳ـ۴۰۴، ۱۳۷۴.

۸. سعیدیان، عبدالحسین، **مشاهیر جهان**، فصل ۱ـ دانشمندان نجوم، طب، ریاضی و طبیعی ایران، ۱۳۷۱.

۹. قربانی، ابوالقاسم، **زندگینامه ریاضی دانان دوره اسلامی(از سده سوم تا سده یازدهم هجری)**،مرکز نشر دانشگاهی،تهران، ۱۳۶۵.

**10.** http://muslimheritage.com/default.aspx

**11.** Charles Coulston Gillispie, Dictionary of scientific biography], volume 7, pages: 346_348

**12.** http://forum.sohail2d.com/viewtopic.php?t=5813&sid=b8bee9bcef54363a25414442fb8bc472.

۱۳. دانشی، غلامحسین ،"پیشرفتهای مهندسی مکانیک در ایران قدیم"، **فصلنامه آموزشی مهندسی ایران**، شماره ۳۳، سال نهم، بهار ۱۳۸۷.

(دریافت مقاله:۱۳۸۷/۸/۱۴)

(پذیرش مقاله: ۱۳۸۷/۱۱/۲)

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی