مجلّهٔ تاریخ علم، شمارهٔ چهارم،۱۳۸۴، ص۷۱-۸۳

بررسی یک ساعت خورشیدی استوانه‌ای عربی اسلامی[۱]

دنی ساووا denis.savoie@talais-decouverte.fr
رئیس گروه اختر شناسی و اختر فیزیک کاخ اکتشافات پاریس و رئیس کمیسیون ساعت‌های خورشیدی

چکیده (تاریخ دریافت: ۸۳/۶/۱۲ ـ تاریخ پذیرش: ۸۴/۸/۱۰)

در ارگ قاهره، مقابل مسجد محمد علی، تجهیزات یک ساعت خورشیدی بر بدنهٔ یک برج قرار گرفته است که بسیار خوب کار می‌کند. این ساعت خورشیدی به خاطر شمار نوشته‌ها و علائم و نیز به خاطر پیچیدگی محاسباتی که برای طراحی و ساخت آن به کار رفته (استوانه‌ای مایل به جنوب غربی با [چهار] شاخص کج)، یقیناً ساعتی استثنایی است و شاهد بسیار خوبی برای پیشرفت فوق‌العاده فنی مسلمانان در ساخت شاخص‌ها و ساعت‌های خورشیدی در قرن هجدهم میلادی به شمار می‌آید.

نخستین بار در این مقاله به بررسی این ساعت خورشیدی و بیان مبانی ریاضیات جدید آن می‌پردازیم.

کلید واژه‌ها: ساعت خورشیدی، شاخص قطبی، خطوط ساعات، مختصات استوانه‌ای، اوقات شرعی، معادلهٔ زمان.

۱- توصیف ساعت

مجموعهٔ این ساعت صفحه‌ای است از مرمر سفید محدب به اندازهٔ تقریبی یک متر مربع. بر روی این صفحه پنج ساعت خورشیدی وجود دارد که هر کدام با شاخص خود کار می‌کند[۲]. از چپ به راست، ساعت‌های خورشیدی زیر را می‌یابیم:[۳]

---

۱. این مقاله (به فارسی و فرانسه) نخستین بار در این مجله چاپ می‌شود (مترجم فارسی: آرمان کریمی گودرزی، عضو دفتر همکاری‌های فرهنگی سفارت فرانسه در ایران) متن فرانسه ← pp. 7-13.

۲. برپایهٔ عکس‌های ارائه شده (ص۸۰-۸۳)، اکنون چهار شاخص آن برجاست (← دنبالهٔ مقاله).

۳. ← صفحات ۸۰-۸۳ ، به ویژه ۸۱ و ۸۲ همین مقاله.

– ساعت سمت چپ، که با یک شاخص کار می‌کند، دارای ۱۷ خط کمانی روزانه (۲۴ ساعته) و یک منحنی از ساعت هشت تا ظهر و یک خط عمودی برای ظهر حقیقی است. روی این ساعت، نام برخی از برج‌های منطقةالبروج به عربی ثبت شده است (جَدْی، سرطان، میزان، سنبله و اسد).

– ساعت خورشیدی داخل بیضی، که شاخص قطبی آن از میان رفته است. خطوط ساعات در این ساعت «سنتی» است که فواصل ۲۰ دقیقه به ۲۰ دقیقه را نشان می‌دهند و نزدیک به پایهٔ شاخص قطبی به هم می‌رسند. از شاخص ساعت خطی از سمت راست شروع می‌شود که صفحهٔ زیرین شاخص است. سمت چپ بیضی عبارت «زمان مانده تا ظهر» و در قسمت راست عبارت «زمان گذشته از ظهر» به عربی[۱] نوشته شده است. روی صفحهٔ ساعت خورشیدی از چهار ساعت پیش از ظهر (ساعت ۸ صبح) تا هفت ساعت بعد از ظهر (ساعت ۱۹) حک شده است.

– ساعت مستقر در بالا و سمت راست ساعات اسلامی (شرعی) را (۳۰ دقیقه به ۳۰ دقیقه) چنان که در وسط ساعت نوشته شده، نشان می‌دهد؛ این خطوط از ساعت ۵ در سمت چپ تا ساعت ۱۲ درجه بندی شده‌اند، و آخرین خط، خطی افقی است که از پایهٔ شاخص می‌گذرد. این بدان معنا است که طول روز را در هر تاریخی به ۱۲ ساعت (اعتدالی) تقسیم می‌کرده‌اند. به این ترتیب معلوم می‌شده که چه مدتی از طلوع خورشید گذشته یا چه مدتی به غروب خورشید مانده است. این خطوط در چهارچوب دو کمان شبانه‌روز انقلاب تابستانی و زمستانی قرار گرفته‌اند؛ خط راست شب و روز اعتدالی از سمت چپ تا چهارچوب [دو کمان] «بالا» می‌رود. این ساعت خورشیدی را خطی عمود قطع می‌کند که از سطح فوقانی ساعت شروع می‌شود و تا پائین چهارچوب ادامه می‌یابد: این خط، وقت نماز ظهر را نشان می‌دهد.

– در قسمت زیر ساعتِ اوقات شرعی، ساعت خورشیدی کوچکی وجود دارد که شاخص آن کاملاً بر روی کمان شبانه‌روزی تابستانی ساعت قبلی قرار گرفته است و شمار اوقات پیش از شب (ساعت غروب) را نشان می‌دهد.

---

۱. ترجمهٔ عبارات عربی روی ساعت از پروفسور احمد جبار است (نویسنده).

– آخرین ساعت خورشیدی، در سمت پائین و راست، نشان دهندهٔ وقت نماز عصر و شمار ساعات پیش از این نماز (منحنی‌های محصور در کمان‌های هذلولی) است.

در قاب ترنج مانند سمت راست، این عبارت نوشته شده است: «از محاسبات خلیل (...) ابراهیم مهندس (...) منجم، سال ۱۱۹۵ [یا ۱۱۵۵] هجری». بنابراین تاریخ ساخت این ساعت خورشیدی به قرن ۱۸ میلادی (۱۷۴۲ یا ۱۷۸۰) باز می‌گردد.

جملهٔ « با انحراف ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه جنوبی شرقی از عرض ۳۰ درجه و ۲ دقیقهٔ شمالی»[۱] در نوار حاشیهٔ فوقانی درج شده است. از اصطلاح انحراف/ مَیل در این ساعت متوجه می‌شویم که اندازه‌های به کار رفته در ساعت‌های آفتابی اسلامی غالباً از جهت شرق محاسبه شده است. علاوه بر آن، اندازه ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه از محل ارگ بسیار نزدیک به جهت قبله است (بر پایهٔ محاسبات جدید: ۴۶ درجه و ۰۹ دقیقه شرقی) و آشکار است که این رقم بی‌حساب نیست. وانگهی همان طور که پیش آمدگی ساعت از دیوارهٔ برج گواهی می‌دهد، این مجموعه ساعت مشخصاً رو به شرق دارد.

۲- مبانی نظری ساعت

برای ترسیم چنین ساعتی، ابتدا باید مختصات انتهای سایه یک شاخص را در لحظه معین بدانیم[۲].

استوانه‌ای افقی با محور Ox (شکل ۱) و معادله $y^2 + z^2 = R^2$ داریم، در این معادله R شعاع استوانه است (محور yها به سمت شمال، محور xها به سمت شرق، محور z ها به جهت سمت الرأس). $a = PK$ ، یعنی شاخص افقی مایل به سمت جنوب است و $k=R+a$ ؛ معادله استوانه بر حسب k عبارت خواهد بود از:

---

۱. عین این جملهٔ عربی که به خط نستعلیق (به تعبیر عرب‌ها: فارسی/ ایرانی) بر بالای این مجموعه از ساعت‌های آفتابی حک شده، چنین است: « منحرفة ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه انحراف جنوبی شرقی لعرض ثلاثین درجة و دقیقتین شمالی» (ویراستار، نقل از تصویر صفحهٔ ۸۱).

۲. برای محاسبهٔ مختصات یک ساعت خورشیدی ← D. Savoie, *la Gnomonique*, les Belles Lettres, Paris, 2001; *Gnomonique moderne*, éd. Société Astronomique de France, 1997.

$$(y-k)^2+z^2=R^2$$

در این مجموعه [از ساعت‌های آفتابی]، مختصات زاویه‌هایی که سمت خورشید را تعریف می‌کنند، مختصات افقی h و A هستند که h ارتفاع خورشید و A سمت آن (تقاطع دایرهٔ افق و دایرهٔ ارتفاع) است. مختصات (p, q, r) بردارِ واحد که آخرین درجه k از شاخص را به خورشید S متصل می‌کند، به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$\begin{cases} p=-\cos(h)\sin(A) \\ q=-\cos(h)\cos(A) \\ r=\sin(h) \end{cases}$$

یافتن مختصات آخرین درجهٔ سایهٔ شاخص بر روی استوانه، از طریق یافتن محل اتصال خط راست واقع بر بردارِ واحد که از k می‌گذرد، امکان‌پذیر است. در حالی که هر نقطه از این خط راست دارای مختصات پارامتریک (ρp ρq, ρr) است، پارامتر ρ در محل اتصال مذکور ثابت می‌کند که:

$$(\rho q-k)^2+(\rho r)^2=R^2$$

و از این معادله

$$\rho^2(q^2+r^2)-(2kq)\rho+(k^2-R^2)=0$$

به دست می‌آید که این معادله از نوع $Ax^2+Bx+C=0$ (درجه دوم) است. برای یافتن ρ، $A=(q^2+r^2)$، $B=-2kq$، $C=(k^2-R^2)$ را در $\Delta=B^2-4AC$ قرار می‌دهیم. این معادلهٔ درجه دوم دارای دو جواب است که اولین جواب مطابق با نقطهٔ تلاقی خط راست با استوانه عبارت است از :

$$\rho=\frac{-B+\sqrt{\Delta}}{2A}$$

مختصات x، y، z نقطه سایه بر روی استوانه عبارتند از:

$$\begin{cases} x=\rho p \\ y=\rho q \\ z=\rho r \end{cases}$$

حال فرض کنیم که شاخص PK به سوی جنوب نباشد، بلکه با جهت جنوب زاویه D را بسازد (D = میل شاخص = زاویه‌ای که از غرب به جنوب اندازه‌گیری می‌شود ـ امتداد

آن غرب، و جهت مثلث آن، به سوی جنوب است). ضمناً فرض کنیم که همین شاخص، افقی نباشد و به اندازهٔ زاویه z سمت به خط افق مایل باشد (این زاویه از افق بـه سـوی سمت الرأس منفی محاسبه می‌شود، $-90° < z < +90°$).

مختصات سایه کدامند؟

مختصات خورشید از K با در نظر گرفتن جهت D عبارتند از:

$$\begin{cases} p' = -\cos(h)\sin(A-D) \\ q' = -\cos(h)\cos(A-D) \\ r' = \sin(h) \end{cases}$$

مختصات خورشید با توجه به انحراف z عبارتند از:

$$\begin{cases} p'' = -\cos(h)\sin(A-D) \\ q'' = -\cos(h)\cos(A-D)\cos(z) + \sin(z)\sin(h) \\ r'' = \cos(h)\cos(A-D)\sin(z) + \cos(z)\sin(h) \end{cases}$$

مختصات x'' ، y'' ، z'' از نقطه سایه بر روی استوانه عبارتند از:

$$\begin{cases} x'' = \rho p'' \\ y'' = \rho q'' \\ z'' = \rho r'' \end{cases}$$

برای انتقال مختصات به طور عملی، تعدادی محور «استوانه‌ای» را (شکل‌هـای ۲ و ۳) از نقطه پایه شاخص مستقیم می گذارنیم: به این ترتیب کافی است که به کمک یک متـر نواری نرم مقدار $\hat{y}$ را جا به جا کنیم؛ اندازه مقدار x بر طول خط مولد استوانه قرار مـی گیرد. در این صورت داریم:

$$\hat{y} = R\beta\frac{\pi}{180^\circ} \quad \text{با} \quad \tan\beta = \frac{|z''|}{R + a - |y''|}$$

در این صورت مختصات انتهای سایه از P ، x'' و $\hat{y}$ خواهند بود: x'' ها از سمت راسـت و $\hat{y}$ ها به سمت بالا مثبت حساب می‌شوند.

یادآوری: ϕ عرض جغرافیایی محل، δ زاویه میل خورشید، H زوایه سـاعتی خورشـیدند؛ پس داریم:

$$\sinh = \sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cos H$$

$$\tan A = \frac{\sin H}{\sin\phi\cos H - \cos\phi\tan\delta}$$ H با A هم علامت است

مثال: در نظر می‌گیریم $D = +۴۳^\circ ۱۷'$، $\phi = ۳۰^\circ ۰۲'$، (شاخص $۴۳^\circ ۱۷'$ از جنوب به سمت غرب را نشان می دهد) $z = -۱۰^\circ$ (شاخص ۱۰° بالای افق را نشان می‌دهد) $R = ۱۰۰۰\text{cm}$، $a = ۱۰\text{cm}$.

مختصات انتهای سایهٔ شاخص را برای $H = ۱۵^\circ$ (ساعت ۱۳) و $\delta = ۲۳^\circ ۲۶'$ (انقلاب تابستانی) حساب می‌کنیم، پس داریم:

$$h = ۷۵^\circ,۰۸۵;\ A = ۶۷^\circ,۳۱۰;\ \Delta = ۷۵۵,۷۲۸;\ \rho = -۲۵,۷۳۰$$

و از اینجا داریم:

$$p'' = -۰,۱۰۵;\ q'' = -۰,۳۹۹;\ r'' = ۰,۹۱۱$$

بنابراین

$$x'' = ۲,۶۹۷\text{cm};\ y'' = ۱۰,۲۷۵\text{cm};\ z'' = -۲۳,۴۳۵\text{cm}$$

خواهند بود و نتیجه می‌گیریم که:

$$\beta = ۱^\circ,۳۴۳;\ \widehat{y} = -۲۳,۴۳۸\ \text{cm}$$

اکنون که امکان انتقال مختصات انتهای سایه بر روی سطح ساعت خورشیدی وجود دارد، می توانیم منحنی‌هایی را که پیش‌تر توصیف کردیم، رسم نماییم. باید توجه کرد که پارامترهای ساعت خورشیدی مشخص شده‌اند (عرض جغرافیایی، سمت، انحراف و طول شاخص‌ها، شعاع استوانه) و متغیرها تنها عبارت‌اند از زاویهٔ میل خورشید و زاویهٔ ساعتی آن.

به طور مثال برای ترسیم کمان‌های روزانه، برای یک میل معین اندازهٔ زاویه ساعتی خورشید را تغییر می‌دهیم. برای ترسیم منحنی هشت‌گانه زمان متوسط، H= –E را قرار می دهیم که E معادلهٔ زمان است و این منحنی مقدار متناسب با زاویهٔ میل خورشید را تعیین می‌کند.

توجه داریم که این ساعت خورشیدی دارای کاربرد کاملاً مذهبی هم هست؛ زیرا

نشانگر اوقات نماز در اسلام است[۱]: سه ساعت خورشیدی (ساعت داخل بیضی و ساعت‌هایی که با شاخص‌های نصب شده در بالای صفحه مرمری قرار گرفته‌اند) وقت نماز ظهر را، هنگامی که خورشید به وسط آسمان می‌رسد، نشان می‌دهند.

ساعتی که زمان نماز عصر را نشان می‌دهد مربوط به لحظه‌ای است که طبق تعریف، طول l سایه شاخص a برابر است با (a+l') که l' طول سایه در ظهر خورشیدی است. در این لحظه، زاویهٔ ساعتی H خورشید دارای مقدار زیر است:

$$\cos H = \frac{\sinh_{\circ} - \sin\varphi\sin\delta}{\cos\varphi\cos\delta} \quad \text{با} \quad \tan(h_{\circ}) = \frac{1}{1+\tan(\varphi-\delta)}$$

با شناختن زاویهٔ ساعتی خورشید در لحظه عصر، می‌توان تعداد درجه‌ها (یا دقیقه‌ها، به طور کلی بیست دقیقه به بیست دقیقه یا پنج درجه به پنج درجه) قبل از این لحظه را مشخص کرد. باید یادآور شد که یک ساعت خوشیدی عمودی که زمان نماز عصر را نشان می‌دهد، ضرورتاً دارای جهت جنوب غربی است.

شگفت‌انگیزترین این ساعت‌ها بی‌تردید ساعتی است که شامگاه را نشان می‌دهد؛ می‌دانیم که دو نماز (*مغرب* و *عشا*) را پس از غروب خورشید به جا می‌آورند: نماز *مغرب* را پس از غروب و نماز *عشا* را در آغاز شب. بدین‌سان، این ساعت شامگاهی طول زمانی را که خورشید به ارتفاع معینی در زیر افق می‌رسد، نشان می‌دهد. مقادیر پذیرفته شده برای به جا آوردن این نماز (*عشا*) برحسب کشورها و زمان‌ها از ۱۵° تا ۲۰° تغییر می‌یابد[۲].

از طریق این توصیف دریافتیم که این ساعت خورشیدی یک اثر نادر است. طرّاحان این ساعت نه تنها منجّمان سطوح عالی، بلکه هنرمندان بزرگی نیز بوده‌اند. در عمل جایگاه و محل و چگونگی استقرار ساعتها بر روی صفحه مرمرین جلب توجه می‌کند.

---

۱. ← مقالهٔ کامل‌تر در مورد نمازها در اسلام:

E. Wiedemann, J. Frank, Die Gebetszeiten im islam, in *Islamic Mathematics and Astronomy*, ed. By Fuat Sezgin, vol. 92, for the Institute for the History of Arabic-Islamic Science, Frankfurt am Main, 1988, P97-128.

۲. برای محاسبهٔ ساعات غروب در ساعت‌های آفتابی اسلامی ←

D. Savoie , « Heure des crépuscules sur les cadrans solaires arabo-islamiques », *l'Astronomie*, vol. 118, juillet – eoût 2004, p. 426-432.

با این همه، رمز و رازهایی از این ساعت خورشیدی هنوز ناگفته مانده است، به ویژه راه‌های محاسبات و روش‌های آن بیان نشده است[۱]. در پایان این بررسی، فن ساخت ساعت آفتابی اسلامی را می‌ستاییم که در آن دوران، مهارت ساخت شاهکارهایی بدیع و یگانه را داشت که تا امروز هیچ برابری برای آن در غرب وجود ندارد.

۱. برای فنون گنومونیک اسلامی ← به:

David. A. King, « Astronomie et société musulmane », *Histoire des sciences arabes*, sous la direction de R. Rashed avec la col. De R. Morelon, t1 astronomie, théorique et appliquée, Paris 1997, P. 173-215.

چند توصیف دیگر از ساعت‌های خورشیدی اسلامی هم در متن زیر می توان یافت:

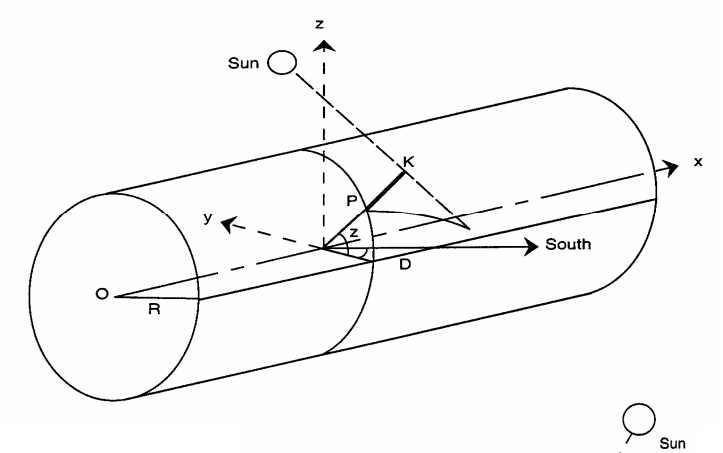
David. A. King, *Islamic astronomical Instruments*, Variom reprints, Londres ; 1987.

از همین نویسنده

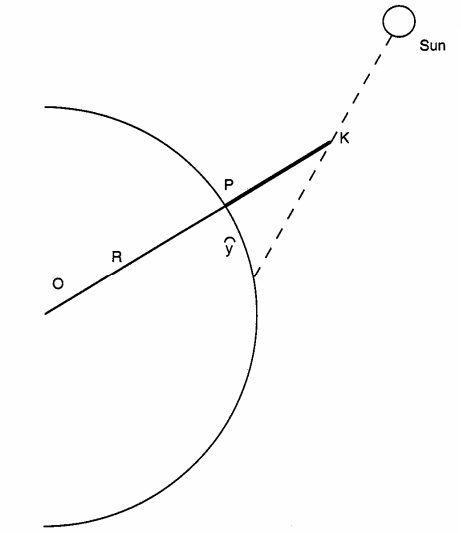
« Ibn Yunus' Very useful Tables for reckoning Time by the Sun », *Islamic Mathématical Astronomy*, VAriom Reprints, Lonres, 1986, p.365-367.

ضمناً ← به: جلد های ۲۵ و ۹۲

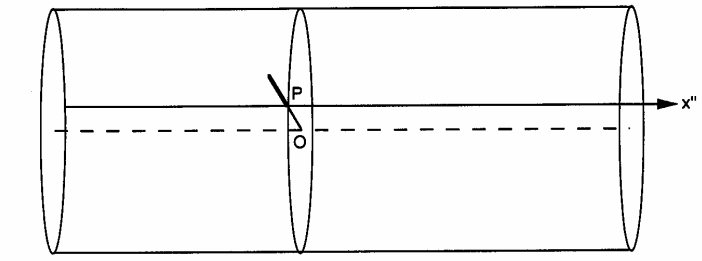
By Fuat Sezgin, *Islamic Mathematics and Astronomy*, Frankfurt am Main.



شکل ۱



شکل ۲



شکل ۳