

فصل ۴

خجندی اخترشناس

و ابزارساز

اخترشناسی به عنوان کهن‌ترین علم، تأثیر ژرفی بر جهان‌بینی مردم داشته، زیرا بر تصور آنها نسبت به جهان اثرگذار بوده است. نقش اخترشناسی فوق‌العاده است، زیرا در پیشرفت مداوم خود ریشه‌های حوادث مهم و اساسی در تاریخ انسان را به همراه می‌آورد؛ ایجاد علوم دقیق امروزی. اخترشناسی که در بابل^{۳۷} زاده شد، در کشورهای خاور نزدیک و میانه بر پایه دستاوردهای یونان باستان و هند، و همچنین بر اساس سده‌ها سنتهای بومی پا گرفت و پیشرفته‌ترین علم طبیعی در کشورهای شرق بود. پیشرفت بعدی رشته کامل نجوم رصدی - اخترسنجی، در حقیقت مدیون اخترشناسان خاور نزدیک و میانه و آسیای میانه در سده‌های میانه است. در

۳۷. پیدایش اخترشناسی در بسیاری از نقاط جهان، مستقل از هم صورت گرفته است، مانند بابل، مصر، هند، چین، آمریکا و جاهای دیگر. مترجم.

عظیم‌ترین رصدخانه‌های ساخته شده در مدت نسبتاً کوتاه و مجهز با دقیق‌ترین ابزارهای آن زمان در بغداد، دمشق، قاهره، ری، شیراز، اصفهان، خوارزم، مرو و دیگر شهرها، بزرگ‌ترین دانشمندان شرق سده‌های میانه به رصد آسمان می‌پرداختند. ویژگی بارز این دانشمندان، روش علمی آنها یعنی ترکیبی از رصد و تحلیل نظری بود.

بین کارهای پر شمار دانشمندان که به مسایل عملی و نظری اخترشناسی اختصاص داشت، به ویژه باید از مهم‌ترین و مشهورترین آثار یعنی زیجها^{۳۸} نام برد که نتیجه اطلاعات به دست آمده از رصدهای پر شمار انجام شده در این رصدخانه‌ها بود. در فاصله سده نهم تا شانزدهم میلادی / سوم تا دهم هجری می‌توان بیش از ۱۰۰ زیج دانشمندان کشورهای خاور میانه و نزدیک و آسیای میانه را برشمرد. این زیجها معمولاً از یک پیش‌گفتار کوتاه و تعداد زیادی جدول تشکیل می‌شود. مقدمه طبق معمول تعریف اصطلاحات اخترشناسی و قواعد استفاده از جدولها را در بر داشت و مضمون اصلی زیج شامل جدولهای گاه‌شماری، مثلثاتی، نجوم کروی، جغرافیایی و جدولهای حرکت خورشید، ماه و سیاره‌ها بود.

از نخستین زیجهایی که به وسیله دانشمندان شرق تدوین شده و از زبان پهلوی (زبان فارسی میانه) به زبان عربی ترجمه شده است باید از رساله اخترشناسی به نام زیج شهریار نام برد که در زمان حکومت آخرین شاه ساسانی یزدگرد سوم (۶۳۲-۶۵۱ م) تدوین شده و تا زمان ما به‌جا نمانده است. مشهورترین زیجه عبارت است از زیج خوارزمی، زیج صابی بتانی، زیج کبیر حاکمی ابن یونس، زیج جامع کوشیار گیلانی، زیج ملکشاهی عمر خیام، زیج ایلخانی نصیرالدین طوسی، زیج الغریگ، زیج شاه‌جهانی فرید دهلوی، زیج محمدشاهی جی سینگ.

۳۸. زیج یعنی مجموعه جدولهای نجومی. واژه عربی «زیج» در اصل از «زیگ» فارسی گرفته شده است که در آغاز به معنای نخ‌نخی بود که نقاش به کمک آن نقشهایی بر پارچه و اشیاء ترسیم می‌کرد.

با بررسی فعالیت خجندی در رشته اخترشناسی به این نتیجه می‌رسیم که او نه تنها بزرگ‌ترین دانشمند در این رشته، بلکه مخترع برجسته ابزارهای اخترشناسی نیز بود. از کارهای شناخته شده خجندی که به اخترشناسی و ابزارهای اخترشناسی اختصاص دارد، باید این آثار را برگزید: رساله فی تصحیح المیل و عرض البلد، کتاب فی ساعات الماضيه من الليل، کتاب الآلة الشاملة و رساله الصفيحة الافقيه المسمى بالجامع.

در رساله فی تصحیح المیل و عرض البلد، نوشته در پایان سال ۹۹۴ م/۳۸۴ هـ خجندی به شرح مفصل کارهایش در تعیین حداکثر میل، یعنی زاویه انحراف دایرة البروج نسبت به سطح استوای آسمان از راه تعیین ارتفاع خورشید در لحظه انقلاب تابستانی و زمستانی می‌پردازد که در رصدخانه واقع بر کوه طبرک نزدیک ری در همان سال ۹۹۴ م/۳۸۴ هـ به کمک ابزار اختراعی اش یعنی «سُدس فخری» انجام داد.

اما می‌دانیم که در سده‌های میانه بر پایه حداکثر ارتفاع خورشید در روزهای انقلاب تابستانی و زمستانی، علاوه بر تعیین اندازه میل دایرة البروج نسبت به استوا، عرض جغرافیایی محل رصد، زمان سنجی، مسأله‌های اخترشناسی کروی دیگری را نیز حل می‌کردند.

مسأله تعیین میل دایرة البروج نسبت به استوا از روی ارتفاع در روزهای انقلاب تابستانی و زمستانی که در سده‌های میانه به خوبی شناخته شده بود، به وسیله خجندی از روی نصف تفاضل ارتفاع نیمروزی خورشید در این روزها حل شد، یعنی:

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_2}{2}$$

که در آن h_1 و h_2 به ترتیب ارتفاع نیمروزی خورشید در روزهای انقلاب تابستانی و زمستانی است.

خجندی در باره تعیین عرض جغرافیایی محل می‌نویسد: «و اما [تعیین] عرض ری. می‌دانیم که کم‌ترین ارتفاع کمتر معدل [خورشید] برابر است با

۳۰° ۵۳' ۰۲" و تفاضل دو ارتفاع [حداکثر و حداقل] را ۳۰° ۳۷' ۰۴" به دست آوردیم و آن را نصف کردیم ۱۸° ۴۵' ۳۲" شد؛ آن را به ارتفاع کمتر معدل افزودیم، حاصل شد ۱۵° ۲۱' ۲۵" و این ارتفاع [نیمروزی خورشید] در دو نقطه اعتدال است. آن را از ۹۰° کاستیم، باقی ماند ۳۵° ۳۴' ۳۸" و این عرض محمدیه [باروی شهر ری] است.^{۳۹}

روش خجندی در شرق سده‌های میانه بسیار متداول شد و به متمم نصف مجموع ارتفاع خورشید در روزهای انقلاب تابستانی و زمستانی تا ۹۰° تبدیل شد، یعنی:

$$\varphi = 90^\circ - \frac{h_1 + h_2}{2}$$

پس از آن‌که خجندی در رساله خود با رسم شکل به تفصیل شرح می‌دهد چگونه ارتفاع خورشید را در لحظه انقلاب خورشیدی در اول تیر و آخر آذر ۳۸۴ هجری اندازه گرفته است، نتیجه‌های خود را می‌آورد «پس معلوم شد که حداکثر میل در زمان ما برابر است با ۲۱° ۳۲' ۲۳، و عرض ری ۳۵° ۳۴' ۳۸" است. این حاصل رصد مبارکی است با ابزاری به نام "سُدس فخری" و محاسبه دقیق».^{۴۰}

اشتباه در تعیین مقدار میل دایرة البروج نسبت به استوا تنها ۵۱' ۱" است. اما این اشتباه ناچیز هم، چنان‌که خواهیم دید با جابه‌جا شدن روزنه سُدس به پایین به علت نشست اندک دیوار سُدس تبیین می‌شود که خود خجندی به آن پی برد و این مسأله را شفاهی به اطلاع بیرونی رساند و بیرونی در کتاب تحدید خود^{۴۱} آن را ذکر کرد.

در باره تعیین عرض جغرافیایی ری، یادآور می‌شویم که مقدار ۱۵° ۳۴' ۳۵

۳۹. بیوست، ص ۹۰. در حاشیه نسخه اشاره شده که محمدیه باروی (حصن) ری بوده است.

۴۰. بیوست، ص ۹۰.

۴۱. بیرونی، تحدید نهایت الاماکن، ص ۸۱.

که خجندی پیدا کرده، در واقع عرض محل رصد یعنی طبرک است، نه خود ری. اما عرض شهر ری، که به وسیله خجندی در کار مشترک با دانشمند معاصرش ابوالفضل هروی از روی رصدهای ارتفاع خورشید معین شده، خیلی نزدیک به داده‌های امروزی یعنی $۳۵^{\circ}۳۵'$ است.

به جز روشی که برای تعیین عرض مکان شرح داده شد، روشهای دیگری هم برای تعیین عرض مکان وجود داشت که در آنها تنها باید از حداکثر ارتفاع ستاره آگاه بود.^{۴۲} این روش را بیرونی به پیروی از خجندی در کتاب تحدید شرح داده و ب. گ. بولگاکف آن را روش «تعیین مستقیم» نامیده است، زیرا در این مورد لازم نیست میل ستاره δ و حداکثر میل دایرة البروج ϵ را بدانیم.^{۴۳} بیرونی در قانون مسعودی که در واقع یک فرهنگ اخترشناسی و علوم وابسته به آن است، چند روش برای تعیین عرض مکان از روی ارتفاع ستاره در نصف‌النهار و از روی انحراف طلوع و غروب ستارگان، و برای ستارگانی که غروب نمی‌کنند - از روی بیشترین ارتفاع می‌آورد.^{۴۴}

از روشهایی که بیرونی عرضه می‌کند، باید از روش تعیین عرض مکان از روی سمت و ارتفاع h_1, A_1 و h_2, A_2 یک ستاره که در ساعت‌های مختلف یک روز یا یک شب اندازه‌گیری شود یاد کرد: «همراه با هر ارتفاع سمت آن را اندازه می‌گیریم و جهتش را معین می‌کنیم. سپس برای هر یک از آنها سینوس سمت را در سینوس متمم ارتفاع آن ضرب می‌کنیم، حاصل ضرب سمت به دست می‌آید. اگر جهت دو سمت متفاوت باشد، حاصلضربهای آنها جمع می‌شوند. اما اگر جهتها یکی باشد، آنگاه تفاضل حاصلضربها گرفته می‌شود. این

۴۲. می‌دانیم که عرض جغرافیایی φ با ارتفاع قطب یا متمم زاویه میان افق و استوای سماوی در مکان مورد نظر برابر است.

۴۳. بیرونی، تحدید نهایات الاماکن، ص ۳۷-۳۹.

۴۴. بیرونی، قانون مسعودی، چاپ عبدالکریم سامی الجندی، بیروت ۲۰۰۲، جلد ۱، ص ۳۸۱-۳۸۵ (بابهای هفتم و هشتم مقاله چهارم).

نخستین [نتیجه] است. همچنین تفاضل سینوسهای دو ارتفاع را می‌گیریم و این دومین [نتیجه] است. و اما [برای تعیین] عرض شهر، دو نتیجه را مجذور می‌کنیم، و از مجموع آنها جذر می‌گیریم و نخستین [نتیجه] را بر این جذر تقسیم می‌کنیم، خارج قسمت سینوس عرض شهر خواهد بود.^{۴۵} این قاعده را می‌توان با این فرمول بیان کرد:

$$\sin\varphi = \frac{\sin A_1 \cosh_1 \pm \sin A_2 \cosh_2}{\sqrt{(\sin A_1 \cosh_1 \pm \sin A_2 \cosh_2)^2 + (\sinh_1 - \sinh_2)^2}}$$

همه قاعده‌های بیرونی با اثبات هندسی همراه است.

در باره تعیین دیگر مختصات جغرافیایی، یعنی طول مکان، یادآور می‌شویم که روش متداول عملاً نه تعیین طول هر مکان، بلکه تفاوت طولهای دو مکان مسکونی بود. برای تعیین طول مورد نظر، باید از یک شهر بزرگ که معمولاً مقدار طول آن به خوبی مشخص شده بود، آغاز می‌کردند. سپس با پیدا کردن تفاوت طولها از راه جمع و تفریق، مقدار مطلوب را به دست می‌آوردند. معمولاً برای تعیین تفاوت طولها در ماه‌گرفتگی که در یک زمان در دو شهر مشاهده می‌شد و طول یکی از شهرها معلوم بود، استفاده می‌کردند. «با تعیین حتی‌الامکان هرچه دقیق‌تر لحظه وسط ماه‌گرفتگی، هر دو ناظر تفاوت زمان محلی را در هر دو شهر که همان تفاوت طولهای جغرافیایی آنهاست، معین می‌کردند. با دانستن طول یکی از آنها می‌توان دقیق‌ترین طول دیگر را به دست آورد».

یکی از خدماتهای خجندی به دانش اخترشناسی عبارت است از مقایسه مقدار حداکثر میل خورشید که به وسیله دانشمندان پیشین و دانشمندان زمان خود او به دست آمده بود و همچنین نتیجه‌های قانونمندی کاهش این مقدار که خجندی به احتمال زیاد برای نخستین بار آن را مستقلاً کشف کرده بود. خود او در این باره چنین می‌گوید: «هندیان حداکثر میل را ۲۴ درجه می‌گرفتند و بطلمیوس آن را ۲۳°۵۱' یافت. مؤلفان زریج ممتحن آن را ۲۳°۳۵' یافتند و ما

۴۵. بیرونی، قانون مسعودی، جلد ۱، ص ۴۲۱-۴۲۳ (باب ۱۶ مقاله چهارم).

آن را $21^{\circ} 32' 23''$ یافتیم. اختلاف بین دو طرف رصدهای فوق، یعنی رصد هندیان و رصد ما حدود نیم درجه است. و ممکن نیست این در اثر اختلاف میان ابزارها باشد... زیرا اگر به علت تفاوت ابزارها بود، باید گاهی زیاد و گاهی کم می‌شد، نه اینکه همیشه کم شود. چون آن را همواره در جهت کاهش یافتند پس علتش چیز دیگری است و آن این است که میل فلک البروج نسبت به استوای آسمانی ثابت نیست».^{۴۶}

اکنون به ارزیابی فعالیت طراحی خجندی می‌پردازیم. نقش شرق سده‌های میانه در تکمیل ابزارهای اخترشناسی قدیمی، ساخت و پرداخت ابزارهای رصدی تازه و بدیع از نظر طرح و ساختمان، بسیار مهم است. در آثار بسیاری از اخترشناسان مشهور سده‌های ۹-۱۵ م/۳-۹ هـ، رساله‌های مستقلی دربارهٔ ابزارهای اخترشناسی وجود دارد.

اگر برخی مؤلفان ابزارهای ساخت خود را توصیف می‌کردند، دیگران شرح مختصر انواع گوناگون ابزارها را که به عنوان راهنما به صورت گسترده‌ای برای بقیهٔ این ابزارها به کار می‌رفت، تعمیم می‌دادند.

همهٔ ابزارهای پیش از پیدایش دوربین اخترشناسی (تلسکوپ) را که در قدیم در اخترشناسی به کار می‌رفت از نظر ساختمان و روش استفاده می‌توان به پنج گونهٔ اصلی تقسیم کرد: (۱) ابزارهای آفتابی- سایه‌ای و پرتوی، (۲) روزنه‌ای-گرد و خطی، (۳) روزنه‌ای-نمایشی، (۴) ابزارهای نمایشی، (۵) ابزارهای تعیین زمان بر پایهٔ اندازه‌گیری تغییر حجم مادهٔ پر شده.

در اینجا به شرح همه ابزارهای اخترشناسی سده‌های میانه که از نظر ساختمان خود به این یا آن گونه تعلق دارند نمی‌پردازیم، زیرا به اندازهٔ کافی در منابع دیگر به آنها پرداخته‌اند.

یادآوری می‌کنیم که ابداع ابزارهای مربوط به فعالیت‌های رصدی گوناگون، حاصل خلاقیت خجندی در طراحی ابزارهای اخترشناسی است. در این باره

پیش از همه دو نوشته‌اش که به ابزارهای اخترشناسی اختصاص دارد، گواهی می‌دهد، و اولاً این سخنان خود خجندی: «این خدمتگزار او [فخرالدوله]... دیگر ستارگان را با ذات‌الحلق‌ها^{۴۷} و ابزارهای دیگری که می‌سازد رصد می‌کند تا بر پایه نتایج آن زریح فخری را تدوین کند»^{۴۸}. ثانیاً بیرونی که هم‌عصر خجندی است، به خدمات معلم خود ارجح والایی می‌نهد و او را «پدیده نادر دوران خود در کار تهیه اسطرلابها و دیگر ابزارها» می‌داند.^{۴۹}

به گفته بیرونی، خجندی نه تنها ساختمانهای تازه‌ای از ابزارها را طرح می‌کرد، بلکه خود نیز مستقیماً در ساخت آنها شرکت می‌جست. او که به درستی رصد نجومی که نتایج نظری خود را بر آن پایه گذاشته بود، اهمیت زیاد می‌داد، به ابزارهای اخترشناسی، کار ساخت آنها و اسلوب کار با آنها توجه زیاد داشت. از جمله ابزارهای اخترشناسی اختراع شده به وسیله خجندی که توجه خاص مورخان علم و اخترشناسان متخصص را به خود جلب کرده «سدس فخری» است که به افتخار فخرالدوله فرمانروای آل بویه که خجندی در دربار او بود، چنین نامیده شده است.

چه چیزی موجب شد تا خجندی ابزاری چنان عظیم را اختراع کند؟ اگر به گذشته بنگریم، معلوم می‌شود که پیش از اختراع سدس، ابزارهای اخترشناسی مانند ربع دیواری، اسطرلاب، ذات‌الحلق، زاویه‌یاب، شاخص و جز اینها وجود داشت که بسیاری از آنها را اخترشناسان یونان باستان برای رصد به کار می‌بردند. اساس کار اکثر این ابزارها بر رصد نظاره‌ای جرم‌های آسمانی به یاری عضاده^{۵۰} با

۴۷. ذات‌الحلق (دارنده حلقه‌ها) ابزار نجومی مورد استفاده منجمان عهد باستان چون هیپارخوس و بطلمیوس بود و تا زمان تیکو براهه نیز با آن سیاره‌ها را رصد می‌کردند.

۴۸. پیوست، ص ۸۴.

۴۹. بیرونی، *تحذیر نهایات الاماکن*، ص ۸۱.

۵۰. عضاده نام یکی از اجزای اسطرلاب است. این واژه عربی به صورت آلیداد (العضاده) به زبانهای اروپایی راه یافته است.

دو روزنه برای نشانه گرفتن ستاره‌ها استوار بود. عضاده معمولاً به شکل خطکش بود. هنگام رصد خورشید یا دیگر ستارگان باید سطح چرخش عضاده و صفحه ابزار درست بر سطح نصف‌النهار منطبق می‌شد. در مورد ربع دیواری، دیواری که عضاده بر آن استوار می‌شد نیز در سطح نصف‌النهار ساخته شده بود. بدیهی است که دقت اندازه‌گیری به اندازه این یا آن ابزار بستگی داشت، یعنی صفحه با قطر بیشتر، درجه‌بندی دقیق‌تر داشت. دقت درجه‌بندی صفحه ربع دیواری بزرگ به قطر تا ۵ متر از یک دقیقه و برای ذات‌الحلق از ۱۵' - ۳۰' بیشتر نبود. نارسایی این ابزارها و اشکال کار با آنها این بود که اولاً، خورشید با چشم غیرمسلح رصد می‌شد و طبیعتاً دقت رصد کاهش می‌یافت؛ ثانیاً چرخش عضاده هنگام کار نیازمند تحرک زیاد رصدگر بود.

خجندی که بارها به ضرورت طرح و ساخت ابزارهای فوق پی برده بود، این نارساییها را به خوبی درک می‌کرد و هنگام اختراع سدس خود، شالوده‌اش را بر دو اصل متضاد قرار داد: خورشید با چشم مشاهده‌کننده دیده نمی‌شود و پرتوهای آن از روزنه‌ای به بخش بالای اتاق تاریک نفوذ می‌کند و خورشید خود به صورت «نقطه روشن» روی سطح کمانی مدرج ظاهر می‌شود. دقت رصد با این ابزار از بسیاری جهات از پیشینیان خود بیشتر بود. به همین جهت غرور و افتخار خجندی که در رساله خود گفته است: «ابزاری که خود ابداع کرده بودم»،^{۵۱} قابل درک است.

سدس خجندی از ابزارهای خورشیدی است که «از نظر اصل کار می‌توان آنها را به دو گروه بخش کرد: ۱) ابزارهای سایه‌ای یا شاخص‌دار بر پایه اندازه‌گیری مقدار و جهت سایه متغیر با زمان که به وسیله میله عمودی به نام «شاخص» روی صفحه مدرج روشن با نور خورشید، می‌افتد؛ ۲) ابزارهای پرتوی بر پایه اندازه‌گیری موقعیت لکه روشن خورشید (متغیر با زمان) در لحظه معین که با گذر پرتوها از روزنه‌ای مخصوص بر صفحه مدرج ایجاد می‌شود».

ابزار ساخته ابوسهل کوهی (د. ۴۰۵ هـ) معاصر خجندی، از ابزارهای پرتوی

بود که به یاری آن، ارتفاع خورشید اندازه‌گیری می‌شد. بیرونی در کتاب *تحديد* خود این ابزار را چنین شرح می‌دهد: «و شرف‌الدوله به ابوسهل کوهی فرمان داد تا رصد را تجدید کند. پس وی در بغداد اتاقی ساخت که قاعده آن قطعه کره‌ای به قطر بیست و پنج ذراع بود و در مرکز این کره سوراخی بر سقف اتاق وجود داشت که از آن شعاع‌های خورشید به درون اتاق می‌تابید و مدارهای روزانه خورشید را رسم می‌کرد».^{۵۲}

پس از این که باستان‌شناس و. ل. ویاتکین در سال ۱۹۰۸ کمان عظیم زیرزمینی ابزار اصلی اخترشناسی رصدخانه سده پانزدهم میلادی / نهم هجری سمرقند را یافت، «سدس فخری» خجندی، ساختمان، کاربردها و شیوه کار با آن مورد توجه خاص مورخان اخترشناسی قرار گرفت.

خود و. ل. ویاتکین و سپس برخی اخترشناسان و پژوهشگران بعدی که نخست به نام «سدس فخری» و کارکرد اصلی رصدخانه سمرقند پی نبرده بودند، کمان ابزار اصلی اخترشناسی را به اشتباه ربع دانستند. برای نمونه آرتور بری در تاریخ مختصر اخترشناسی خود در این باره می‌نویسد: «کار عمده الغیبگ تهیه فهرست ستارگان است». چنان که گ. ژ. جلالوف مورخ علم به درستی تأکید می‌کند «در نتیجه چنین دیدگاه‌های نادرستی، بسیاری کوشیدند تا اسلوب مشاهده ستارگان شمالی را نشان دهند. از جمله یکی از مؤلفان می‌نویسد: باید در نقطه شمالی برجی مستحکم با شکافی به طرف نصف‌النهار بسازند... و این، امکان می‌داد تا ارتفاع یک ستاره را که به طرف شمال از سمت‌الرأس قرار دارد، اندازه بگیریم. هنگام رصد چنین ستاره‌ای، چشم رصدگر در مرکز کمان قرار می‌گرفت و ابزار بازتاب‌دهنده به منزله افق مصنوعی روی غلتک‌های کمان حرکت می‌کرد». بی‌تردید اخترشناسان رصدخانه سمرقند میزان اهمیت علمی فهرست ستارگانی را که خود یا پیشینیان آنها تنظیم کرده بودند، می‌دانستند. چنین اطلاعاتی که زمان درازی را درنوردیده، به اصلاح اندازه و حرکت تقدیمی این اجسام آسمانی یاری رسانده است.

۵۲. بیرونی، *تحديد نهايات الاماکن*، ص ۷۵.

اما کارکرد مهم رصدخانه سمرقند تعیین موقعیت دقیق خورشید، ماه و پنج سیاره درخشان شناخته شده در آن زمان بود و توضیحات مقدمه زیج جدید الغیبیگ مؤید آن است. دو فصل نخست نظری (از چهار فصل) آن، بخش کمکی برای بررسی سومین فصل اصلی این اثر بود که به حرکت خورشید، ماه و سیاره‌ها و جدولهای پرشمار اختصاص داشت.

در ارتباط با این مطلب می‌توان خبر یکی از مؤلفان بلاواسطه اثر یاد شده، معلم الغیبیگ، غیاث‌الدین جمشید بن مسعود کاشانی (د. ۸۳۲ هـ) را آورد که در نامه‌ای در باره الغیبیگ و مکتب علمی سمرقند به پدرش، از زندگی علمی در دربار الغیبیگ و درباره کار رصدخانه و فعالیتهای آن می‌نویسد: «هنوز وقت کارهای مشکل نشده است، چه حالیا عمارت برمی‌آورند^{۵۳} چون تمام شود و آلات تمام شود و نصب کرده شود و رصد چند که همین نگریستن باشد به چشم از حرکت کواکب کرده شود و ثبت کرده شود، و بعد از آن که از آن مقادیر مابین مرکزین و نصف قطر تدویر و مقدار میول اقطار الماره بالذروه و الحضيض و حاصل اوساط و بعد مراکز معدلات المسیر از مراکز حوامل و غیر ذلک پیدا باید کرد.»^{۵۴}

در نتیجه پژوهشهای همه‌جانبه یک سلسله از منابع (نسخه‌های خطی)، مورخان اخترشناسی آسیای میانه گ. ژ. جلالوف و ت. ن. کاری نیازوف توانستند دلایل بی‌چون و چرایی بیابند که بخش حفظ شده کمان رصدخانه سمرقند نمونه سدس فخری است نه ربع، آن‌گونه که تا کنون می‌پنداشتند.^{۵۵}

در این زمینه اطلاع عبدالعلی بن محمد بن حسین بیرجندی (د. ۹۳۴ هـ) پیرو سنتهای مکتب علمی سمرقند سده ۱۵ میلادی/۹ هجری، گواهی مستقیم و

۵۳. منظور ساختمان رصدخانه سمرقند است.

۵۴. از سمرقند به کاشان: نامه‌های غیاث‌الدین جمشید کاشانی به پدرش، به کوشش محمد باقری، تهران، ۱۳۷۵، ص ۷۴.

۵۵. در نامه نویافته کاشانی به صراحت ذکر شده است که قوس سنگی رصدخانه سمرقند سدس است (از سمرقند به کاشان، ص ۴۱).

بسیار مهمی است. او در فصل چهارم شرح خود بر زیج گورکانی یادآوری می‌کند: «در زمانهای قدیم مقدار میل مدار دایرة البروج نسبت به خط استوا به یاری به اصطلاح ربع سنگی معین می‌شد که شرح آن در مجسطی آمده است. در زمان فخرالدوله، محمود خجندی [اخترشناس] ابزار دیگری به نام «سدس فخری» اختراع کرد که به کمک آن حتی ثانیه‌های کمان هم معین می‌شد. رصدکنندگان در سمرقند میل یاد شده را به یاری سدس فخری اندازه می‌گرفتند و فاصله سمت الرأسی خورشید را به وسیله آن معین می‌کردند. با تعیین این فاصله‌ها، کشف کردند که مقدار میل با گذشت زمان تغییر می‌کند. به نظر برخی، علت ناپایداری، تفاوت خود ابزارها در زمانهای گوناگون است. اما دیگران می‌اندیشند که با گذشت زمان وضع و موقع آن تغییر می‌کند. سدس فخری چنان پیچیده است که نمی‌توان در اینجا به شرح آن پرداخت.» در باره وجود سدس فخری در رصدخانه الغیبیگ، حکایت اخترشناس هندی سده هفدهم میلادی / یازدهم هجری سوابی جی سینگ نیز گواهی می‌دهد. او با نام بردن از ابزارهای اخترشناسی رصدخانه سمرقند و رصدخانه جیبور، در پیش‌گفتار کتاب خود زیج جدید محمدشاهی^{۵۶} که به سلطان محمدشاه (۱۷۱۹-۱۷۴۸ م) اهدا شده بود، می‌نویسد: «در اجرای دستور اعلیحضرت با جان و دل کمر بستند و از روی کتابهای مسلمانان، در اینجا نیز چند ابزار اخترشناسی ساختند، شبیه آنهایی که زمانی در سمرقند ساخته شده بود، مانند ذات‌الحلق برنج با ضلع ۳ گز، و با واحدهای رایج در زمان ما هر یک دو ذراع و ذات‌التقبتین، ذات‌الشعبتین، سدس فخری و آلت شامله».

ما همه ابزارهای نامبرده را به تفصیل شرح نخواهیم داد، زیرا از همه آنها در تاریخ اخترشناسی به تفصیل یاد شده است. اما جا دارد در اینجا به جز سدس فخری یاد شده، از دیگر اختراع بسیار مهم خجندی یعنی ابزار اخترشناسی به نام «آلت شامله» نیز یاد شود.

آلت شامله ابزاری همه‌کاره، جانشین اسطرلاب و ربع سده‌های میانه است. بعدها

۵۶. نسخه خطی شماره ۷۸۶ در فرهنگستان علوم تاجیکستان.

ابزار تکمیل شده ابوالقاسم اسطرلابی در سده سیزدهم میلادی / هفتم هجری به وسیله نصیرالدین طوسی در رصدخانه مراغه، و به وسیله اخترشناس چینی فائومون - چی در رصدخانه پکن نصب شد. این نمونه‌ای کامل از ابزار همه‌کاره و پس از سدس فخری، دومین ابزاری بود که در رصدخانه سمرقند مورد استفاده قرار می‌گرفت. خجندی اثر جداگانه‌ای به نام کتاب الآلة الشاملة را به شرح این ابزار و اصول کار با آن اختصاص داده است.^{۵۷}

نامه غیاث‌الدین جمشید کاشانی طراح، سازنده و مدیر اصلی رصدخانه سمرقند به پدر خود، کارکرد سدس یعنی ابزار اصلی این رصدخانه را روشن می‌سازد. نویسنده نامه با اشاره به مسئله ساختمان رصدخانه می‌نویسد: «حالا آمدیم به سر سخن رصد. حضرت سلطنت پناهی،^{۵۸} خلدالله ملکه، در طفولیت عمارت رصد مراغه^{۵۹} را دیده بود و فرموده که من آن را به چشم وقوف ندیده‌ام. اصحاب پیش از آمدن این بنده^{۶۰} گفته بوده‌اند که در زیر آن بلندی‌ایست که مردم در آن نشینند. و دو حلقه فرموده بودند از برنج ریخته که قطر آن شش گز بود و جهت رصد میل و رصد آفتاب بر نهج بطلمیوس و غافل از اینکه بعد از بطلمیوس هر رصدی که کردند انواع دقتها استنباط کرده‌اند و از آن حلقه که بطلمیوس کرده بود عدول کردند، چه آن از خللی خالی نیست. و هیچکس معلوم نداشت که آن منبر مستدیر هندسی که در میان عمارت رصد مراغه است چیست و از بهر چیست. این بنده صورت حال به عرض حضرت رسانید و تفاوتی که به واسطه حلقه می‌تواند بود نیز به عرض رسانید و نیز آنکه در زمان عضدالدوله^{۶۱}

57. C. Brockelmann, *Geschichte der arabischen Litteratur*, S1, p. 390.

۵۸. منظور الغیبیگ است.

۵۹. منظور رصدخانه مراغه (سده ۷ هـ) است.

۶۰. یعنی خود جمشید کاشانی.

۶۱. دومین شاه دیلمی فارس (۳۳۸-۳۷۲ هـ) که قلمرو خود را تا عراق، دیاربکر، عمان و کرمان گسترش داد.

حلقه [ای] ساخته بوده‌اند که ده گز قطر داشته و این از آن هم کمترست؛ و عوض آن در رصد مراغه منبر هندسی مستدیر ساخته بوده‌اند و آن را سدس فخری خوانند، نصف قطر آن شش گز بود. این حلقه را فرمودند شکستند و آلت دیگر که این بنده گفت ساختند و بنای عمارت رصد به موجبی که این بنده شرح داد فرمودند. آن جمیع حالات و امثال ذلک اعیان مملکت معلوم کردند».^{۶۲}

ساختمان رصدخانه پیش از همه با تعیین دقیق راستای نصف‌النهار آغاز شد که با ساختمان سدس و اصول کار آن مطابقت دارد. در این باره، نوشته کاشانی گواهی می‌دهد: «روزی دیگر که تسویه زمین جهت استخراج خط نصف‌النهار در موضع رصد شده بود و آن را بنایان فاخر [= آجرچینی] کرده بودند و خشک شده بود، رفتیم که خط نصف‌النهار پیدا کنیم...»^{۶۳}

نامه جمشید کاشانی در سال ۸۲۷ هجری پس از ورودش از کاشان به سمرقند نوشته شده است و با زمان ساختن رصدخانه‌ای که یکی از مدیران آن، خود کاشانی بود، مطابقت دارد. کاشانی می‌نویسد: «آنچه در کار رصد درین مدت روی نمود چنان بود که این بنده کیفیت آن به عرض حضرت سلطنت پناهی خلدالله ملکه و سلطانه رسانیده. مثلاً کیفیت عمارت رصد و کیفیت هر آلت رصد. آن حضرت به ذهن وقاد و خاطر نقاد در آن تأمل فرمودند. بعضی که پسندیدند به ترتیب آن اشارت فرمودند و در بعضی اختراعی و استنباطی مزید فرمودند، و بر آن موجب به ترتیب آن اشارت فرمودند».^{۶۴}

پیش از ساخت رصدخانه، جمشید کاشانی در سال ۸۱۸ هجری رساله کوچکی به زبان فارسی به نام رساله شرح آلات رصد نوشته بود که شرح چند ابزار اخترشناسی و از آن جمله سدس فخری را در بر داشت. اطلاع کاشانی تا چندی پیش یعنی تا پیدا شدن کتاب کوچک علمی بیرونی، تنها شرح این ابزار،

۶۲. از سمرقند به کاشان، ص ۶۵.

۶۳. از سمرقند به کاشان، ص ۶۷.

۶۴. همان، ص ۷۳.

قابل دسترس برای دانشمندان آسیای میانه به‌شمار می‌آمد. در اینجا تکه‌ای از این رساله را می‌آوریم که شامل شرح ابزار مورد نظر ماست. «سدس فخری: سدس دایره باشد در سطح دایره نصف‌النهار نصب کرده و آن را به یک یک ثانیه قسمت کرده باشند و آن چنانست که دیواری برآرند از سنگ و گچ که طول قاعده آن هشتاد گز باشد و سطبری آن چهار گز و طول قامت آن در طرف شمال چهل گز باشد و در طرف جنوب یک گز و چنان کنند که از جانب جنوب از قاعده دیوار تا جانب شمال از سر دیوار سدسی باشد از مقعر حلقه چنانکه اگر عمودی از مرکز آن بر سطح افق قائم کرده است بر یک طرف سدس گذرد و روی آن مقعر را از سنگ تراشیده کنند و بر میانه آن به درازی حفری کنده باشند که عرض آن چهار اصبع بود و عمق آن یک اصبع و اندرون آن تخته‌های مس یا برنج بیفکنند چنانکه سطح ظاهر آن در غایت استدارت باشد و آن را به درجات و دقایق و ثوانی قسمت کنند و این گاهی توان ساخت که خط نصف‌النهار در غایت تدقیق بیرون آورده باشند...»^{۶۵} به این اطلاع جمشید کاشانی باید شرح کوتاه بیرونی را درباره سدس فخری بیفزاییم که در زمان خود به وسیله مورخ علم ا. ویدمان آورده شده است. او اشاره می‌کند: «بالای کمان گنبدی ساخته شده بود با روزنه‌ای و از این روزنه پرتوهای خورشید بر صفحه سفیدی که روی کمان سدس حرکت می‌کرد، گرفته می‌شد».^{۶۶}

این همه چیزهایی است که تا چندی پیش مورخان علم درباره سدس فخری می‌دانستند. بر پایه این داده‌ها روشن شده است که کمان سدس برای گرفتن پرتوهای خورشید در نیمروز اختصاص یافته بود که در نتیجه، ارتفاع خورشید در نیمروز معین می‌شد. داده‌های جمشید کاشانی درباره اندازه‌های ابزار با اندازه

۶۵. نسخه خطی شماره ۲۶۴۷ کتابخانه دانشگاه لیدن، ص ۲. تصویر این رساله در کتاب کاشانی نامه (ابوالقاسم قربانی، دانشگاه تهران، ۱۳۵۰) در صفحات ۴۲ تا ۴۴ آمده است.

66. E. Wiedemann, Al-Khudjandi, *Encyclopaedie d'Islam*, II, Leiden, 1927, pp. 1043-1044.

کمان رصدخانه سمرقند که و. ل. ویاتکین محاسبه کرده است (قطر حدود ۸۴ متر) هم خوانی دارد. اما چنان که پ. گ. بولگاکف به درستی یادآوری می‌کند، برای برخی از پرسشها پاسخی نیافته‌ایم. از آن جمله منظور از نصب صفحه سفید روی کمان سدس که ا. ویدمان می‌گوید، چه بوده است؟ چگونه با دقت مرکز «لکه روشن» خورشید را معین می‌کنند؟ اندازه روزنه چقدر است؟ و در رابطه با آن، آیا سدس فخری تنها برای رصد خورشید است یا برای تعیین ارتفاع دیگر ستارگان نیز به کار می‌رود؟ چگونه سدس فخری را می‌سازند؟ دقت کمان عملاً چگونه برآورد می‌شود؟

نبود شرح مفصل‌تر در باره سدس فخری پژوهشگران را وا داشت است تا برای این پرسشها فرضیه‌هایی کم و بیش محتمل بسازند. از جمله ت. ن. کاری نیازوف با تکیه بر اطلاع ا. ویدمان کاربرد دیافراگم را در نظر دارد: «در واقع با بستن شکاف روی گنبد با صفحه‌ای که روزنه کوچکی در آن ایجاد شده باشد، می‌توان انعکاس خورشید را روی صفحه سفید به دست آورد». سپس ادامه می‌دهد: «پرتوهایی که از روزنه می‌گذرد بر صفحه سفید که در طول ناودان کمان سدس حرکت می‌کند، بازتاب می‌یابد. از سوی دیگر، به یاری ابزار نشانه‌گیری که در طول ناودانهای سدس حرکت می‌کند، رصد سیاره‌ها و ستارگان ممکن می‌شود.»

در باره فن ساخت سدس فخری نیز پیشنهادهایی شده است. مثلاً نصب کمانهای مرمر می‌توانست پس از برپایی دیوارهای اصلی ساختمان صورت گیرد. صاف کردن آنها ممکن بود پیش از آن در محوطه کارگاه از روی نمونه، و پرداخت و ترسیم درجه‌ها پس از نصب کمان پرداخت نشده در جای خود به عمل آید. در مرکز ابزار باید محوری آهنی قرار داشته باشد که با استفاده از آن به عنوان مرکز، بتوان مثلث متساوی‌الاضلاع مفتولی با ضلع‌های ۴۰/۰۴ متری را چرخاند و کمان درست دایره را به دست آورد و ابزار را به دقت به درجه‌ها تقسیم کرد.»

کتاب تحدید نهایات الاماکن بیرونی که [ترجمه روسی آن] در سال ۱۹۶۶

میلادی انتشار یافت،^{۶۷} اطلاعات تازه‌ای نه تنها در باره آشنایی شخصی و همکاری بیرونی با خجندی، بلکه اطلاعات مهمی در باره فن ساختمان مخصوص برای سدس را نیز آشکار ساخت. بیرونی سدس فخری را چنین توصیف می‌کند: «و سپس ابومحمود حامد بن خضر خجندی، به فرمان فخرالدوله، در کوه طبرک چسبیده به شهر ری، دو دیوار متوازی بر خط نصف‌النهار به فاصله هفت ذراع از یکدیگر ساخت، و بر روی دو دیوار طاقی زد که در میان آن سوراخ گردی به قطر یک وجب درآورده بود؛ و مرکز این سوراخ را مرکز سدس دایره‌ای [به قطر هشتاد ذراع] قرار داد که بر خط نصف‌النهار میان دو دیوار نهاده بود؛ سطح آن سدس با تخته و روی تخته با صفحه برنجین پوشیده شده و [هر درجه از] محیط آن به سیصد و شصت قسمت تقسیم شده بود که هر قسمت نماینده ده ثانیه بود. خورشید از این سوراخ بر سطح نصف‌النهار می‌تابید. و ابومحمود چنبری به اندازه نوری که بر زمین می‌افتاد ساخت که مرکزش محل تقاطع آشکار دو قطر آن بود؛ این چنبر را بر محیط روشنی [آفتاب] می‌گذاشت و از روی محل قرار گرفتن مرکز آن، فاصله میان خورشید و سمت‌الرأس را به دست می‌آورد».^{۶۸}

از این اطلاعات دیده می‌شود که هیچ صفحه سفیدی که ا. ویدمان از آن نام می‌برد روی کمان سدس نبوده است. اما تعیین دقیق مرکز «لکه روشن»، به کمک چنبری با دو قطر متقاطع و متحرک روی کمان ابزار، آشکار می‌شود.

در پی بیرونی، شرح و فن ساختمان سدس را در کتاب جامع المبادی والغایات ابوعلی حسن بن علی بن عمر مراکشی (د. ۶۶۰ هـ) می‌یابیم. ترجمه فرانسوی شرح این ابزار همراه با متن عربی مراکشی در میانه‌های سده نوزدهم/

۶۷. ترجمه انگلیسی آن هم در سال ۱۹۶۶ میلادی منتشر شد. ترجمه فارسی این اثر را احمد

آرام در سال ۱۳۵۲ در تهران منتشر کرد.

۶۸. بیرونی، تحدید نهایات الاماکن، ص ۷۶.

سیزدهم به وسیله ل. آ. سدیو^{۶۹} منتشر شد و در کتاب مورخ ایرانی ابوالقاسم قربانی ترجمه فارسی شرح سدس فخری بنا به روایت مراکشی آمده است. اینک ترجمه این شرح:

«فصل دوم در آلت موسوم به سدس فخری - بین این آلت و آلت‌های دیگری که برای رصد میل کلی به کار می‌روند، تفاوت بسیار است و این تفاوت این است که آلت‌های دیگری که برای رصد میل به کار می‌برند تنها درجه‌ها و دقیقه‌ها را به دست می‌دهند، ولی با این آلت درجه‌ها و دقیقه‌ها و ثانیه‌ها حاصل می‌شود. طریقه ساختن این آلت از این قرار است: خط نصف‌النهار را با روشی که گذشت، رسم می‌کنیم.^{۷۰} در دو طرف خط نصف‌النهار و به موازات آن دو دیوار می‌سازیم به طوری که فاصله بین این دو دیوار هفت ذراع باشد و بین آنها و در جهت جنوب سقفی محکم بنا می‌کنیم و در بالای آن سقف سوراخی مدور تعبیه می‌کنیم که قطرش یک‌ششم ذراع و ارتفاعش از زمین بیست ذراع باشد. و بر قطر این سوراخ میله‌ای آهنی سوار می‌کنیم. سپس زمین را در راستای شاغول مرکز سوراخ سقف تا بیست ذراع حفر می‌کنیم. بعد تخته‌های محکمی را به زاویه‌های قائمه به هم وصل می‌کنیم، به طوری که در بین آنها فضایی چهار پهلو و غیر مایل و به طول چهل ذراع ایجاد شود و در یک طرف آن دو حلقه نصب می‌کنیم و آن دو حلقه را به میله آهنی که در سوراخ کار گذاشته بودیم می‌آویزیم. به این ترتیب به جای نصف قطر (یعنی شعاع دایره)، تنها سهم باقی می‌ماند. سپس لوله را در حفره می‌گردانیم به طوری که کمانی برابر با یک‌ششم دایره (یعنی ۶۰ درجه) به دست آید و در این یک‌ششم دایره، لوحهایی سوار می‌کنیم و آن را هموار و صاف و صیقلی می‌کنیم و آن را با صفحه‌هایی که برای تقسیم و درجه‌بندی مناسب باشند، می‌پوشانیم و این کمان را به ۶۰ درجه قسمت می‌کنیم. هر یک از این قسمت‌ها یک درجه خواهد بود. هر درجه را که

69. L. A. Sédillot

۷۰. مراکشی روش تعیین راستای نصف‌النهار را پیش از توصیف سدس آورده است.

برای تعیین میل به کار می‌رود به ۶۰ قسمت می‌کنیم. روشن است که هر یک از این قسمت‌ها یک دقیقه است و هر دقیقه را به ۱۰ قسمت می‌کنیم به طوری که هر یک از این قسمت‌های ده‌گانه برابر با شش ثانیه شود...»^{۷۱}

چنان‌که از مضمون متن دیده می‌شود، ابوالقاسم قربانی تنها بخشی از شرح سدس را آورده که مربوط به فن ساختمان آن است. این اطلاعات مراکشی را با مضمون رساله کوچک بیرونی که مخصوصاً به سدس فخری اختصاص یافته، مقابله کرده‌ایم. «داستان ابزاری به نام سدس فخری چنان که ابوریحان بیرونی — که خداوند حمایتش کند — پس از بازدید آن نقل کرد»^{۷۲} در *مجلة المشرق* بیروت پس از رساله خجندی چاپ شده است.

این مقابله روشن کرده است که مضمون اطلاعات مراکشی و بیرونی مطابقت دارد و آشنایی مراکشی را با رساله نامبرده بیرونی تأیید می‌کند. با وجود این، در دو نکته اختلاف دیده می‌شود؛ یکی در رابطه با اندازه روزنه‌ای که پرتوهای خورشید از آنجا می‌گذرد و دیگری میزان دقت اندازه‌گیری با این ابزار.

در رساله بیرونی اندازه قطر دایره روزنه یک وجب داده شده که به تقریب برابر با ۲۰ سانتی‌متر است. اما به گفته مراکشی این قطر ۸ تا ۹ سانتی‌متر است.^{۷۳} اگر طبق قانون‌های نورشناخت هندسی اندازه روزنه لازم برای به دست آوردن لکه نوری شدید برای کمان سدس با شعاع ۲۰ متر را (با در نظر گرفتن قطر زاویه‌ای خورشید ۳۰′) محاسبه کنیم، آنگاه مقدار آن را نزدیک ۱۸ سانتی‌متر به دست می‌آوریم که با داده بیرونی — «حدود یک وجب» — بیشتر مطابقت دارد.^{۷۴}

اما دقت اندازه‌گیری سدس فخری به عقیده مراکشی تا ۶ ثانیه و به عقیده بیرونی تا ۱۰ ثانیه است. البته اگر هر یک از درجه‌های دایره را به ۶۰۰ جزء

۷۱. ابوالقاسم قربانی، *ریاضی‌دانان ایرانی*، تهران، ۱۳۵۰، ص ۱۶۵-۱۶۶.

۷۲. حکایة الآلة المسماة السدس افخری علی ما حکاه ابوالریحان البیرونی ایدة الله بعدان شاهده.

۷۳. اندازه ذراع حدود نیم متر است که یک ششم آن حدود ۸ یا ۹ سانتی‌متر می‌شود.

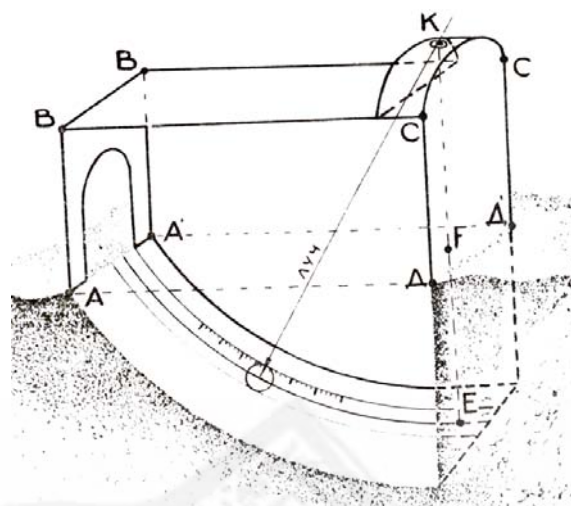
۷۴. بیرونی، *تحدید نهایات الاماکن*، ص ۷۶.

برابر تقسیم کنیم، آنگاه می توان دقت اشاره شده مراکشی را به دست آورد. با در نظر گرفتن تذکر بیرونی در این باره که متن وی «پس از بازدید آن» نوشته شده است، خبر بیرونی را باید موثق تر دانست. اما مراکشی که دو سده پس از بیرونی می زیست ظاهراً با تکیه بر کارهای تازه در این رشته، در اثر خود کوشیده است تا این ابزار را به صورت کامل تر شرح دهد.

اکنون بخش دوم شرح سدس را که به کار ابزار اختصاص دارد، می آوریم که به احتمال زیاد در کتاب مراکشی نوشته شده است. چون معنا و ترتیب شرح بیرونی و مراکشی با هم مطابقت دارد، شرح را از روی رساله بیرونی ادامه می دهیم.

«وقتی خورشید به دایره نصف النهار می رسد پرتوش از این سوراخ به حوالی خط نصف النهار می افتاد. زیرا پرتوهای خورشید به صورت مخروط است و آنچه بر زمین می افتد بزرگ تر از اندازه سوراخ است. ابزار دیگری هم ساخته شده بود به صورت دایره ای با دو قطر متقاطع [عمود بر هم] که محل تقاطعشان مرکز دایره بود و آن را مطابق اندازه پرتوهای بر زمین افتاده ساخت. وقتی [خورشید] به خط نصف النهار نزدیک می شد آن [ابزار دایره] را بر آن [دایره پرتوها] منطبق می کرد و همراه با حرکت آن آهسته آهسته حرکت می داد تا به خط نصف النهار برسد. با این کار محل مرکز پرتوهایی که از دایره نصف النهار می آمدند معلوم می شود. از اینجا ارتفاع خورشید در خط زوال (نصف النهار) دانسته می شود. از این نقطه تا پای عمود وارد از محل سوراخ متمم ارتفاع [خورشید] است و از این [نقطه] در جهت دیگر تا سطح زمین برابر با ارتفاع [خورشید] منهای ۳۰ درجه است و این تفاوت بین یک ششم و یک چهارم [دایره] است. خداوند در کار درست موفق می گرداند.»^{۷۵}

بر پایه آنچه در بالا گفته شد می توان سدس فخری را به وسیله این طرح احتمالی توضیح داد (شکل ۶):



شکل ۶

کار ساخت با تعیین راستای نصف‌النهار آغاز می‌شود. سپس در طول خط نصف‌النهار دو دیوار موازی $ABCD$ و $A'B'C'D'$ ساخته شده که فاصله آنها ۷ ذراع (تقریباً ۳/۵ متر) است. در سمت جنوب این دیوارها طاقی مستحکم مطابق با ساختمان خود با روزنه‌ای به قطر حدود یک وجب (تقریباً ۲۰ سانتی‌متر) ساخته شده است. ارتفاع روزنه از سطح زمین یعنی KF برابر ۲۰ ذراع (تقریباً ۱۰ متر) است. چاله‌ای به همین عمق هم در زمین کنده شده است. بنابراین $KF=FE$. به این ترتیب، ارتفاع روزنه از عمق زمین برابر ۲۰ متر می‌شود. به روزنه (K) به یاری دو حلقه روی قطر یک تسمه آهنی وصل شده که روی آن تیری با مقطع چهارگوش قرار گرفته و از تخته‌های محکم آویخته شده است. این تیر شعاع سدس را تشکیل می‌داد. سپس با چرخاندن این تیر در جهت شمال، زمین چندان کنده شد تا یک ششم مطلوب دایره به دست آمد. پایه خاکی به دست آمده با تخته‌های صاف پوشیده شد و با ورقه‌های مسی روکشی و روی آنها درجه‌بندی شد. در رصدخانه سمرقند به جای آنها از سنگ مرمر

استفاده کردند و تفاوت در مصالح ساختمانی به کار رفته پیشرفت کارهای ساختمانی در آسیای میانه در دوره‌ای بین خجندی و جمشید کاشانی را نشان می‌دهد. خجندی از راه انتخاب اندازه مناسب قطر روزنه توانست پیش‌بینی کند که «لکه سفید» خورشید در اتاقک ابزار نه درست در لحظه اوج خورشید بلکه پیش از آن می‌افتد، چنان که گویی از ناظر فرارسیدن نیمروز پیشی می‌گیرد. موقعیت دقیق مرکز «لکه روشن» خورشید از راه جابه‌جایی آهسته چهارراهه با دایره‌ای که روی «لکه روشن» خورشید قرار داشت، پیدا شد. وانگهی قطر چهارراهه متحرک با قطر «لکه روشن» خورشید مطابقت داشت. به این ترتیب، از روی درجه‌های ابزار، مقدار دقیق ارتفاع نیمروزی خورشید معین می‌شد.

طبیعی است به کمک این ابزار با چنین قطر روزنه‌ای، رصد ستارگان یا سیاره‌ها با چشم ناممکن بود. بنابراین سدس فخری و نمونه‌های بعدی آن از جمله ابزار اخترشناسی رصدخانه سمرقند در سده پانزده میلادی / نهم هجری، تنها برای مشاهده ارتفاع خورشید به کار می‌رفت و از اینجا مهم‌ترین ثابتهای اخترشناسی مانند میل دایره البروج نسبت به خط استوا، نقطه‌های اعتدال بهاری، طول سال اعتدالی و جز اینها محاسبه می‌شد.

اما رصد ماه، سیاره‌ها و ستارگان، به کمک دیگر ابزارها انجام می‌شد که جمشید کاشانی از آنها نام می‌برد: دو ذات‌الحلق، ذات‌السمت و ذات‌الهدفة‌السیاره و جز اینها.^{۷۶}

این واقعیت که فقط بخش کاری کمان سدس درجه‌بندی شده است، از نو این فرضیه‌های مورخان علم را به یاد می‌آورد که کدام ابزار در رصدخانه سمرقند اصلی بوده است: سدس یا ربع. بی‌تردید سدس فخری کمان زیرزمینی عظیم، ابزار اصلی اخترشناسی بود، اما تنها دو برابر شده آن، یعنی قطر سدس خجندی برابر شعاع سدس رصدخانه سمرقند بود. این رصدخانه گواه دستاوردهای دوره شکوفایی علم در سده‌های میانه در آسیای میانه است و چه از نظر اندازه و چه

از لحاظ تکامل فنی از همه رصدخانه‌های عهد باستان و سده‌های میانه برتر است. هنوز در هیچ جای جهان، باستان‌شناسان موفق نشده‌اند چنین بنای علمی کاملی را بیابند. و آ. شیشکین به درستی می‌گوید: «رصدخانه به بهترین و کامل‌ترین ابزارهای آن زمان مجهز بود که در این میان، معروف‌ترین آنها "سدس فخری" عظیم بود. ساختمان عالی رصدخانه، دقت ابزارها، روش‌های رصد در حد کمال و نظم و ترتیب آنها چنین دقتی را در کار تأمین کرده بود که فقط نخستین تلسکوپ مورد استفاده گالیله در سال ۱۶۱۰ میلادی برتر از آن بود».

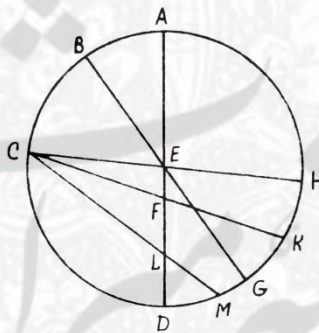
سدس فخری احتمالاً پیش از رصدخانه سمرقند، یکی از ابزارهای رصدخانه مراغه بود، سپس آن را در نیمه دوم سده سیزدهم میلادی/هفتم هجری در رصدخانه پکن ساختند که نمونه مشابه آن همراه با دیگر ابزارهای قدیمی تا زمان ما نگه‌داری شده است. در پی رصدخانه سمرقند، در رصدخانه جیبور هند سدس نصب شد، که در این باره اطلاعات پایه‌گذار این رصدخانه و مؤلف زیج محمدشاهی سوایی جی‌سینگ گواهی می‌دهد. در تأیید این مطلب، جمله‌ای از و. آ. شیشکین پژوهشگر رصدخانه سمرقند می‌آوریم که سدس رصدخانه جیبور «به ظاهر جز تقلید سدس فخری با اندازه کوچک‌تر نیست (شعاع کمان آن برابر ۸/۶۴ متر است)، که سوایی جی‌سینگ از روی این نمونه ساخته است.».

پیش از این یادآوری شد که خجندی به یاری سدس با رصد ارتفاع نیمروزی خورشید در لحظه انقلاب خورشیدی اول تیر و آخر آذر سال ۳۸۴ هجری، مقدار حداکثر میل را برابر $۲۱^{\circ} ۳۲' ۲۳''$ محاسبه کرد.

طبق محاسبه‌های دقیق خود خجندی، این مقدار در مقایسه با واقعیت، تقریباً ۲ دقیقه کم‌تر بود. علت این اختلاف خرابی فنی نامحسوس ابزار بود که خود خجندی آن را یافت و شفاهاً به بیرونی اطلاع داد. بیرونی در کتاب تحدید خود به خدمات معلم خویش در رشته اخترشناسی ارزش عالی می‌دهد و با در نظر گرفتن وی به عنوان «یگانه عصر خویش در ساختن اسطرلابها و دیگر ابزارها»، در باره این اختلاف توضیح مفصل می‌دهد.

بیرونی می‌نویسد: «... ابومحمود خود شفاهی به من از فسادی که در کار رصد از فرو افتادن سوراخ سقف طاق به اندازه یک وجب پیش آمده بود، و اینکه چندان میلی برای تصحیح اندازه آن پیدا نکرده بود، سخن گفت. و گواه بر این است کاستی اندازه میلی که او یافته بود از آنچه دیگران در نزدیکی زمان او یافتند و ذکر آن گذشت یا پس از این ذکر آن خواهد آمد.

اگر $ABCD$ دایره نصف‌النهار و E مرکز آن (شکل ۷) و، بر این دایره، A سمت‌الرأس و B گذرگاه منقلب صیفی (تابستانی) و C گذرگاه منقلب شتوی (زمستانی) باشد، BC دو برابر میل [اعظم] خواهد بود. بر فرض آنکه DH از دایره‌ای باشد که سدس فخری بر آن عمل شده است، E که مرکز سدس است سوراخ بالای طاق خواهد بود که جانشین حسی مرکز کل است. شعاع صیفی از آن به صورت BEG می‌گذرد و شعاع شتوی به صورت CEH ؛ و بنابراین، با توجه به تساوی دو کمان BC و HG ، کمان HG دو برابر میل اعظم خواهد بود.



شکل ۷

چون فرض کنیم که سوراخ، همان‌گونه که ابومحمود یادآور شده است، هنگام انقلاب شتوی به F فرو افتاده باشد، شعاع شتوی به صورت CFK به این سوراخ درمی‌آید و KG یعنی دو برابر میل یافته شده از اندازه حقیقی آن HG کم‌تر می‌شود. و هر چه فرو افتادن سوراخ بیشتر باشد، کاستی اندازه میل افزون‌تر می‌شود، تا آنجا که اگر فرو افتادن بسیار شود، امکان آن هست که شعاع شتوی

تباه شده درست بر شعاع صیفی بیفتد و میل نابود شود، بلکه اگر از این حد بگذرد و به صورت شعاع CLM درآید که از سوراخ L گذشته است، DM متمم ارتفاع شتوی از DG متمم ارتفاع صیفی کم تر شود که خلاف آن است که هست»^{۷۷}. با نتیجه‌گیری از شرح مختصر زندگی و فعالیت علمی اندیشمند نامدار تاجیکستان، ابومحمود خجندی یادآور می‌شویم که او در کنار چشمه جوشان علم بالنده آسیای میانه می‌آفرید و افتخار مسلم آن است. در باره خدماتهای خجندی در رشته علوم دقیق هر چه بگوییم، مبالغه نکرده‌ایم. بسیاری از موفقیت‌های علمی او هنوز در حیاتش، هم‌عصران و پیروانش را به تحسین واداشته بود و در کارهای ابوالفضل هروی، ابوریحان بیرونی، ابوالقاسم اسطرلابی، ابوعلی حسن مراکشی، نصیرالدین طوسی، غیاث‌الدین جمشید کاشانی و دیگران رشد و تکامل یافته است.

خجندی یکی از نخستین کسانی در تاریخ علم بود که ناپایداری طول اوج خورشید و میل دایرة البروج نسبت به خط استوا را معین کرد و مدلل ساخت، برهان بدیع خود را برای قضیه سینوسها در مثلث کروی پیدا کرد و در رشته معادله‌های سیال، حق تقدم در کوشش برای اثبات این قضیه که مجموع توانهای سوم دو عدد نمی‌تواند برابر توان سوم عدد دیگری باشد (حالت خاص از قضیه کلی فرما)، به او تعلق دارد.

دیدار بیرونی با خجندی در ری و آشنایی شخصی‌اش با اختراع برجسته او — سدس فخری ساخته بر قله کوه طبرک — مهم‌ترین رویداد زندگی علمی بیرونی بود. این آشنایی و همکاری بعدی آنها تا اندازه بسیار زیادی سبب علاقه ریاضی-اخترشناسی و شناخت بیرونی شد و سه دهه پس از مرگ معلم خویش که خود نیز دانشمند نامداری شد، بارها از نام و خدماتهای علمی خجندی یاد می‌کرد.

سدس فخری عظیم زیرزمینی، طرح و ساخته شده خجندی که با دقت و اصالت ساختمان خود اخترشناسان آن دوره را به شگفتی واداشته بود، در آینده

۷۷. بیرونی، *تحدید نهایات الامکن*، ص ۸۱-۸۲.

به صورت ابزار اصلی بزرگ‌ترین رصدخانه‌های کشورهای آسیای میانه، خاور میانه و نزدیک درآمد. دقیق‌ترین جدولهای الغیگ که به یاری این ابزار تنظیم شده بود، منبعی برای علم اروپایی شد.

چنان‌که گفتیم، خجندی به جز سدس فخری، در رساله الصفیحة افقیه المسمی بالجامع که به ما نرسیده، برای نخستین بار اسطرلاب «زرقاله» را شرح می‌دهد. این اختراع شهرت خاص خود را به سبب کار اخترشناس عرب-اسپانیایی سده یازدهم میلادی / پنجم هجری ابراهیم زرقالی به دست آورده که در اروپای غربی به عنوان آرزاکل^{۷۸} مشهور شده و ظاهراً نسبت خود را از نام این اسطرلاب گرفته است.

در اسطرلاب «زرقاله» ترسیم به یاری تصویر گنجگاشتی^{۷۹} (تسطیح)، نه از قطبهای کره آسمان، بلکه از نقطه تقاطع دایره البروج با خط استوای آسمان انجام می‌شود. در این صورت این دایره‌ها با خطهای مستقیم نشان داده می‌شوند. نقش عنکبوت (صفحه مشبک روی اسطرلاب) را در اینجا خطکش چرخان ویژه‌ای به عهده دارد. این اسطرلاب که صفیحة آن برای هر عرضی مناسب بود در اروپا به صفحه آرزاکل^{۸۰} مشهور بود و در سده شانزدهم میلادی دوباره به وسیله گما فریزیوس^{۸۱} هلندی اختراع شد.

بیرونی در رساله اسطرلاب خود در بخش جداگانه‌ای روش خجندی را برای ترسیم «دایره‌های سمت» (عمودی) روی صفیحه (صفحه ثابت روی اسطرلاب) شرح می‌دهد.^{۸۲}

در پایان یادآور می‌شویم که حدود سال ۱۰۰۰ م / ۳۹۰ هـ، بیرونی در آثار

78. Arzachel

79. Stereographic projection

80. Saphea Arzachelis

81. Gemma Frizius

۸۲. بیرونی، استیعاب الوجوه الممكنه فی صنعة الاطرلاب، تصحیح محمداکبر جوادی حسینی، مشهد، ۱۳۸۰، ص ۵۶.

الباقیه عن القرون الخالیة قابلیت لازم برای اخترشناس را مطرح کرده است. به نظر او دقت بالای نتایج رصد را فقط کسی می‌تواند به دست آورد که به موازات نظریه اخترشناسی «ابزارهای اخترشناسی را بشناسد، بتواند آنها را نصب کند و با آنها کار کند».

چنان‌که پیش از این دیدیم، ابومحمود خجندی نیز که در کانون ابزارسازی دقیق خاور میانه قرار داشت، همه این شرایط را داشت. او نه تنها ابزارهای اخترشناسی را می‌شناخت بلکه ابزارهای تازه‌ای می‌ساخت و به شرح آنها می‌پرداخت و «می‌توانست آنها را نصب کند» و مشاهده‌های اخترشناسی لازم را به عمل آورد، یعنی «می‌توانست با آنها کار کند».

نصیرالدین طوسی بزرگ‌ترین ریاضی‌دان و اخترشناس سده ۱۳ میلادی / ۷ هجری، بنیانگذار مکتب علمی مراغه با کارهای خجندی به خوبی آشنا بود و اصالت قضیه‌های قابل اثباتش را می‌ستود. دانشمندان و سازندگان برجسته ابزارهای اخترشناسی بعدی مانند ابوسعید سجزی، ابوالقاسم اسطرلابی، ابوالحسن مراکشی، جمشید کاشانی و دیگران با نام و خلاقیت خجندی به خوبی آشنا بودند. اندیشه‌های ریاضی-اخترشناسی خجندی از طریق دانشمندان مکتبهای علمی مراغه و سمرقند پس از نفوذ به اروپا تأثیر مهمی بر پیشرفت آینده ریاضیات و اخترشناسی گذاشت. به همین مناسبت نتیجه‌گیری پژوهشگران میراث علمی نصیرالدین طوسی و میرزا الغیبیگ که به درستی می‌پندارند مکتبهای علمی آنها، نه در خلأ و نه جدا از سنتهای علمی آسیای میانه و بیش از همه از موفقیت‌های پیشینیان آنها به وجود آمده بود، قابل فهم است. بنابراین، ت. ن. کاری نیازوف کاملاً حق دارد که می‌گوید: «مکتب اخترشناسی الغیبیگ به وسیله پیشینیان، به ویژه به وسیله هم‌میهنانش - فرغانی، خوارزمی، بیرونی، خجندی و دیگران آماده شده بود».