

روش علمی، روش آماری، و سرعت نور* (۱)

آر.جی. مکای*، آر. دبلیو. آلدفرد**

ترجمه الهه وحیدی اصل

۱. مقدمه

«وحدت علم صرفاً در روش آن است نه در محتوای آن» (کارل پیرسون، ۱۸۹۲ [۴۳]، ص. ۱۲).

«آمار آن شاخه از روش علمی است که با داده‌های به‌دست آمده از شمارش یا اندازه‌گیری خصوصیات گروه‌هایی از پدیده‌های طبیعی سروکار دارد. در این تعریف، «پدیده‌های طبیعی» شامل همهٔ رخدادهای جهان بیرونی است، خواه انسانی باشد یا نه» (کندال، ۱۹۴۳ [۳۰]، ص. ۲).

این دیدگاه که آمار شامل توصیف کمی روش علمی است از زمان پیدایش آمار به‌عنوان یک رشته علمی مطرح بوده است. با این حال، آماردانان، شاید به‌دلیلی موجه، از بیان صریح ارتباط بین آمار و روش علمی پرهیز کرده‌اند. در طول قرن‌ها، متفکران بزرگ دربارهٔ اینکه علم از چه چیزی تشکیل می‌یابد و در مورد روش آن به مباحثه پرداخته‌اند بی‌آنکه راه‌حلی بیابند (برای مثال، رک. [۳۶]). و در قرن حاضر، بررسی‌های تاریخی رویدادهای علمی (برای مثال، [۳۲]) دربارهٔ روش اکتشاف علمی شبهه ایجاد کرده است. یک موضع رادیکال، که از طریق بازبینی کارهای گالیله مطرح شد، همان سخن پل فایرابنت^۱ فیلسوف است که دربارهٔ روش در علم چنین می‌نویسد:

... رویدادها، شیوه‌ها، و نتایجی که علوم را تشکیل می‌دهند هیچ ساختار مشترکی ندارند؛ هیچ عنصری نیست که در هر تحقیق علمی موجود باشد اما در هیچ جای دیگر حضور نداشته باشد (فایرابنت، ۱۹۸۸ [۱۹]، ص. ۱، تأکید از اوست).

فایرابنت سپس، با کمی شوخ‌طبعی، مطرح می‌کند که تنها روش جهانشمول که ممکن است در علم یافت شود «بی‌روشی» است. اینکه دیدگاه فایرابنت

1. Paul Feyerabend

در مورد علم به‌طور عام صادق باشد، قابل بحث است؛ و اینکه این دیدگاه در مورد آمار صادق نیست، تزی اصلی این مقاله است.

در این مقاله، با بازبینی نسبتاً تفصیلی یک مطالعه خاص، یعنی تعیین سرعت نور توسط آلبرت آبراهام مایکلسن [۳۷] در سال ۱۸۷۹، آنچه را ساختار مشترک آمار تلقی می‌کنیم و آنچه را می‌خواهیم روش آماری بنامیم، شرح می‌دهیم.

دلایل متعددی برای انتخاب مطالعه مایکلسن وجود دارند. نخست آنکه، به علم فیزیک گاهی به‌عنوان علمی نگریسته می‌شود که چالشی بزرگ‌تر در برابر توضیح روش آماری قرار می‌دهد تا، مثلاً، پزشکی یا علوم اجتماعی که در آنها جوامع مورد نظر خوش‌تعریف هستند. یک مورد اولیه، تردید اِج‌ورث در ۱۸۸۴ در توصیف آمار به‌عنوان «علم میانگین‌ها به‌طور کلی (از جمله مشاهدات فیزیکی)» بود و در عوض، این توصیف مصالحه‌آمیز کمتر «فلسفی» را ترجیح داد که [آمار] علم «آن دسته از میانگین‌هایی است که توسط پدیده‌های اجتماعی مطرح می‌شوند» [۱۸].

دوم اینکه، سرعت نور در خلأ یک ثابت بنیادی است که مقدار آن «معلوم شده» است؛ در ۱۹۷۴، مقدار آن برابر با ۲۹۹۷۹۲۴۵۸ کیلومتر بر ثانیه تعریف شد. بنابراین، ما در وضعیت استنباطی فوق‌العاده نادری یعنی «دانستن پاسخ» هستیم (آن زمان مقادیر تعیین‌شده چنان تغییرپذیری کمی داشتند که آن را تا یک جزء در ۱۰^۹ جزء معلوم در نظر می‌گرفتند، و متر استاندارد را نمی‌شد با چنین دقتی اندازه‌گیری کرد. دومی نیز به‌طور مشابه تعریف می‌شود، و مدت زمانی است که ۹۱۹۲۶۳۱۷۷۰ دوره از تابش متناظر با گذار بین دو تراز فوق ریز از اتم سیزیم-۱۳۳ طول می‌کشد. حال متر به صورت مسافتی تعریف می‌شود که نور از میان خلأ در ۱/۲۹۹۷۹۲۴۵۸ ثانیه می‌پیماید! رک. [۹]).

سوم اینکه، مایکلسن بررسی‌اش را در دوره‌ای گزارش کرد که انتشار میزان قابل توجهی از جزئیات بررسی امکان‌پذیر بود، و این امر به دیگران امکان می‌داد از مشکلاتی که او با آنها مواجه بود و راه‌حلهایی که یافته بود، آگاهی پیدا کنند.

چهارم اینکه، تعیین سرعت نور برای علم و فناوری اهمیت داشته (و هنوز هم دارد) در نتیجه، تاریخچه آن به قدری غنی است که می‌توان پشت‌صحنه‌ای تدارک دید و پرسشهای بزرگ‌مقیاس درباره ماهیت علم و آمار را در آن مورد بحث قرار داد.

پنجم، این مقدار یابیها در نوشتگان آماری در دسترس هستند و نخست در مقاله استیگلر [۴۷] درباره برآوردهای استوار مکان پدیدار شدند.

سرانجام و مهم‌تر از همه، مطالعه تاریخی این خصوصیت مهم را دارد که کاملاً مبتنی بر مطالب و مواد عمومی است. اطلاعاتی را که با هم به صورت یک منبع واحد جمع‌آوری می‌شوند، می‌توان در مقایسه با منابع متداول بازبینی کرد و با دستیابی به مطالب تاریخی جدید بهبود بخشید، و این اطلاعات می‌تواند بستر آزمون مشترکی برای استفاده دیگران باشد.

این بحثها مستلزم بررسی زمینه‌های جداگانه‌ای با جزئیات متفاوت است. نیاز به گشت و گذار تاریخی گسترده‌ای داریم تا شاید منظور از روش علمی را بفهمیم. این کار در بخش ۲ انجام می‌شود، که در آن تاریخچه‌ای از تعیین سرعت نور از روزگار باستان تا اواخر دهه ۱۸۰۰ را ارائه می‌کنیم. با آماده شدن صحنه، مبانی اپتیکی، ابزارها، و روش نخستین مقدار یابیهای سرعت نور به وسیله مایکلسن در بخش ۳ توصیف می‌شوند. اینها جزئیات لازم برای بحث درباره روش آماری را فراهم می‌کنند. ساختاری که ما پیشنهاد می‌کنیم در بخش ۴ توصیف می‌شود. روش علمی در بخش ۵ مورد بازبینی قرار می‌گیرد و در بخش ۶ با روش آماری مقایسه می‌شود.

۲. سابقه تاریخی

اندیشه ارسطو (۳۸۴-۳۲۲ ق.م.) به مدت نزدیک دوهزار سال بر علم غربی حکمفرما بود. کیهان‌شناسی او چنان قدرتمند است که او را وادار به این اظهار نظر می‌کند که «... نور ناشی از وجود چیزی است که از نوع حرکت نیست» ([۵]، ۴۴۶^b۲۵ - ۴۴۷^a۱۰). نه حرکتی، و نه سرعتی. و اگر اینها کافی نباشند، استدلال به نفع سرعت متناهی به سادگی رد می‌شود:

ایمپدوکلس (و همراه او همه افراد دیگری که از عبارات مشابهی استفاده می‌کردند) در سخن گفتن از اینکه نور «در حال حرکت است» یا در لحظه معین بین زمین و یوش آن قرار دارد اشتباه کرده‌اند. حرکت نور برای ما قابل مشاهده نیست، این دیدگاه هم با شواهد استدلالی روشن و هم با واقعیت‌های مشاهده‌شده مغایرت دارد؛ اگر مسافت پیسوده شده کوتاه می‌بود، حرکت شاید غیرقابل مشاهده می‌بود، اما وقتی مسافت از خاور دور به انتهای باختر باشد، باور کردن موضوع بیش از حد مشکل است.

(ارسطو ۳۸۴-۳۲۲ ق.م.)، در باب روح: مقاله II [۴]، ۴۱۸^b۲۰ - ۴۱۸^b۲۷.

این دیدگاه را بسیاری از متفکران در تاریخ غرب بازگو کرده‌اند: از جمله آنها اوگوستن (حدود ۳۵۴-۴۳۰)، جان پچام^۱ (حدود ۱۲۳۰-۱۲۹۲)، آلبرت کبیر (حدود ۱۲۰۰-۱۲۸۰)، توماس آکویناس (حدود ۱۲۲۵-۱۲۷۴)، و ویتلو^۲ (حدود ۱۲۳۰-۱۲۷۵) هستند. عده‌ای نیز معتقد به دیدگاه مقابل بودند، از جمله ابن هیثم (حدود ۹۶۵-۱۰۴۰) و راجر بیکن^۳ (حدود

بحث تا آغاز «انقلاب علمی» قرن ۱۷ ام ادامه یافت. لیندبرگ^۱ شواهدی مقدماتی از مباحث اروپای قرون وسطی را ارائه می‌دهد [۳۴]. غولانی همچون فرانسیس بیکن^۲ (۱۵۶۱-۱۶۲۶)، یوهان کپلر^۳ (۱۵۷۱-۱۶۳۰)، و رنه دکارت (۱۵۹۶-۱۶۵۰) به نامتناهی بودن سرعت نور باور داشتند. بیکن با ملاحظه فواصل عظیمی که نور می‌بایست از ستارگان تا زمین پیماید، تردیدهایی درباره نامتناهی بودن سرعت نور داشت، اما پذیرش چنین سرعتی را در مقایسه با سرعت‌های سرسام‌آور ستارگان حول زمین، قابل‌هضم‌تر می‌یافت! کلمات قصار ۴۶ از جلد دوم کتاب نووم ارگانون، مثلاً [۶]، را ببینید.

دکارت، برای مثال، انتقال نور را به فشار دادن یک چوب سخت تشبیه کرد- لحظه‌ای که یک انتهای آن (منبع) فشار داده شود، انتهای دیگر حرکت می‌کند (ادراک) ([۲۴]، صص. ۲۵۸-۲۵۹). این قیاس، قوی است؛ هیچ حرکت قابل درکی در هیچ نقطه‌ای در امتداد چوب وجود ندارد، مهم نیست که طول چوبی که مورد استفاده قرار گرفته چقدر باشد! دکارت به شدت به این دیدگاه باور داشت؛ زمانی که همکار و مربی علمی‌اش، ایزاک بیکن^۴ (۱۵۸۸-۱۶۳۷) ادعا کرد که آزمایشی را انجام داده که نشان می‌دهد سرعت نور متناهی است، دکارت این ادعا را با گفتن اینکه اگر این ادعا درست باشد، او (دکارت) از فلسفه هیچ نمی‌داند و تمام نظریه‌اش باطل خواهد شد، رد کرد! (رک. نکته ۱). بیکن و دکارت نتوانستند در مورد آزمایشی که موضوع را رفع و رجوع کند، توافق کنند (رک. نکته ۲). در میان این غولان، گالیله گالیلی (۱۵۶۴-۱۶۴۲) یکه و تنها بر عدم توافق خود پای می‌فشارد؛ او نوشت:

ساگردو: ... من نمی‌توانم باور کنم که عمل نور، هر چقدر هم خالص، می‌تواند بدون حرکت باشد، و درواقع سریع‌ترین حرکت را دارد.

سالیواتی^۵: اما سرعت نور را چه و چقدر بزرگ در نظر بگیریم؟ آیا ممکن است آنی و زودگذر باشد؟ یا مانند بقیه حرکتها مستلزم زمان است؟ آیا می‌توانیم خودمان را با آزمایشی در مورد چگونگی آن مجاب سازیم؟

(گالیله گالیلی (۱۵۶۴-۱۶۴۲)، دو علم جدید (۱۶۳۸) [۲۳]، ص. ۴۹).

در همان کتاب، گالیله برهانی را برای تعیین آنی بودن یا نبودن نور پیشنهاد کرد. این برهان اساساً همان بود که بیکن پیش‌تر پیشنهاد داده بود و همان قدر خشم دکارت را برانگیخت. در نامه‌ای به دانشمند آزمایشگر بزرگ مارین مرسن^۷ (۱۵۸۸-۱۶۴۷)، به تاریخ ۱۱ اکتبر ۱۶۳۸، دکارت نقد آتشینی از کتاب گالیله (رک. نکته ۳) به عمل آورد. راجع به آن برهان پیشنهادی، دکارت نوشت:

1. Lindberg 2. Francis Bacon 3. Johannes Kepler

4. Issac Beeckman 5. Sagredo 6. Salviati 7. Marin Mersenne

1. John Pecham 2. Witelo 3. Roger Bacon

ثابت—نصف‌النهار اصلی—است. اگر مثلاً زمان محلی دو ساعت زودتر از زمان نصف‌النهار اصلی تعیین شده باشد، موقعیت باید $30 = 24/2 \times 360$ درجه طول جغرافیایی در غرب نصف‌النهار اصلی باشد.

زمان را می‌توان به‌طور نجومی تعیین کرد. برای مثال، وقت محلی صفر را می‌توان زمانی تعریف کرد که ستاره‌ای مثلاً آرکتوروس^۱، در حال عبور از خط فرضی طول جغرافیایی که مستقیماً در راستای شمال—جنوب از موقعیت محلی بگذرد مشاهده شود؛ وقت صفر استاندارد متناظر زمانی است که همان ستاره از نصف‌النهار اصلی می‌گذرد. ستارگان به‌قدر کافی از ما دور هستند که این دو عبور در دو لحظه متفاوت از زمان اتفاق بیفتد. جدولهایی که به‌دقت از زمانهای عبور ستارگان مختلف از نصف‌النهار اصلی تهیه می‌شوند، به دریاوردن این امکان را می‌دهند که وقت محلی خود را تنظیم کنند. برای تعیین اختلاف میان ساعت محلی و ساعت استاندارد، می‌توان از اتفاقات نجومی نزدیک‌تری چون اختفا یا گرفتگی ماه یا یک سیاره استفاده کرد. این اتفاقات، صرف‌نظر از موقعیت راصد بر کره زمین اساساً در یک لحظه یکسان از زمان مشاهده می‌شوند، و گذشته از اینها قابل پیش‌بینی هستند. بنابراین، مقایسه وقت محلی یک اتفاق نزدیک با زمان استاندارد جدول‌بندی‌شده آن، تفاوت زمانی را که برای محاسبه طول جغرافیایی مورد نیاز است به‌دست خواهد داد. در ۱۶۰۹، گالیله پس از شنیدن خبرهایی از اهالی فلاندر درباره یک تلسکوپ ساخته‌شده از دو عدسی که قابلیت بزرگ کردن تصویر اجسام دور را داشت، درصدد طراحی و ساخت نخستین تلسکوپ سودمند نجومی درآمد. [به گفته استیلمن دریک^۲ (۱۵)، ص. ۲۹]، هانس لیپرش^۳، عدسی‌تراشی از اهالی هلند، را عموماً مخترع تلسکوپ می‌دانند که در سال ۱۶۰۸ تقاضای حق ثبت اختراعش را داد. در ماه مارس سال بعد، گالیله اعلام کرد که چهار قمر مشتری را کشف کرده است [۲۱]. برای نخستین بار، در اینجا یک سیستم مداری وجود داشت که آشکار بود حول زمین نمی‌چرخد. گالیله استدلال کرد که این مطلب، گواه محکمی علیه نظام بطلمیوسی است (که طبق آن همه اجرام آسمانی حول یک زمین ثابت می‌چرخند) و به نفع نظام خورشید مرکزی کپرنیکی است. حمایت آشکار او از نظام کپرنیکی به‌عنوان نمایش واقعی حرکت سیارات (در تقابل با مدل محاسباتی مناسب) گالیله را به تعارض با کسانی واداشت که بعضی عبارات کتاب مقدس را به‌صورت ظاهری تفسیر می‌کردند [۲۲]. برخی از این افراد نفوذ قابل توجهی در کلیسای کاتولیک رم داشتند. گالیله به فرمان پاپ اوربان^۴ هشتم، از نشر آثارش محروم شد و از سال ۱۶۳۳ تا زمان مرگش در ۱۶۴۲ تحت بازداشت خانگی قرار داشت. این کار او را از ادامه کار علمی باز نداشت (بازدیدکننده امروزی از موزه فلورانس می‌تواند صندوق شیشه‌ای عاجکاری‌شده‌ای را ببیند که یادگاری طعنه‌آمیزی را نشان می‌دهد—انگشت میانی استخوانی گالیله که به سمت آسمان اشاره می‌کند).

اما این اکتشاف مهم علمی دارای پتانسیل تجاری نیز بود. فیلیپ سوم، پادشاه اسپانیا، جایزه معتابه‌ای به هر شخصی می‌داد که بتواند روشی علمی برای تعیین موقعیت کشتی در زمانی که از دید خشکی ناپدید می‌شود به‌دست آورد. این ایده به ذهن گالیله خطور کرد که با استفاده از زمانهای پیش‌بینی‌شده گرفتگی اقمار مشتری، ساعت سماوی مشترک مورد نیاز برای تعیین طول جغرافیایی را به‌دست آورد. در نوامبر ۱۶۱۶، مذاکراتی را با اسپانیا برای

«آزمایش او برای دانستن اینکه نور در یک لحظه انتقال می‌یابد یا نه، بی‌فایده است، زیرا ماه‌گرفتگیها، که ارتباط بسیار نزدیکی با محاسباتی دارند که از روی آنها انجام می‌شود، بهتر از هر چیزی که بتوان بر روی زمین آزمایش کرد این غیرقابل مقایسه بودن را اثبات می‌کند» [۱۶]، ص. ۳۸۹. (به‌نظر می‌رسد که این تکذیبیه مبتنی بر استدلالی باشد که او، آن‌گونه که در نکته ۲ توصیف شد، برای بیکن ارائه داد). مع‌هذا، این برهان توسط اعضای آکادمی فلورانس مورد آزمایش قرار گرفت، اما موفقیتی کسب نشد [۱۲]. حرکت نور یا آنی یا به‌قدر کافی نزدیک به آن بود یعنی سریع‌تر از آن بود که بتوان آن را اندازه گرفت. در ۱۶۷۶، نخستین شواهد تجربی از سرعت متناهی ارائه شد. ستاره‌شناس دانمارکی آله زمر^۱ (۱۶۴۴–۱۷۱۰)، زمانی که روی موضوع کاملاً متفاوتی تحقیق می‌کرد، داده‌هایی جمع‌آوری کرد و به تفاوتی دست یافت که به این اکتشاف منتهی شد. جالب اینجاست که این کشف مهم و کاملاً خالص علمی زمانی اتفاق افتاد که زمر روی مسأله‌ای کار می‌کرد که امروزه آن را بسیار کاربردی می‌نامیم.

نکته ۱. (از [۱۴B]، ص. ۳۰۸):

“Contra ego, si quae talis mora sensu perciperetur, totam meam Philosophiam funditus eversam fore inquebam.”

ترجمه خام این گفته این است: «درست برخلاف آن، من نگرانم که اگر تأخیری از این نوع به‌وسیله حواس پنجگانه درک شود، کل فلسفه من در معرض ابطال قرار می‌گیرد».

نکته ۲. موفقیت‌آمیز بودن آزمایش بیکن [۸] در سال ۱۶۲۹ قابل تردید بود. آزمایش عبارت بود از شلیک یک خمپاره و مشاهده روشنایی آن در آینه‌ای که حدود ۱۸۵٫۱۸۵ متر دورتر قرار گرفته بود؛ حرکت ساعتی که در کنار خمپاره قرار گرفته بود مدت زمان سیری‌شده را اندازه‌گیری می‌کرد. با مقادیر امروزی، زمان رسیدن روشنایی به آینه و بازگشت آن حدود $1/100000$ ثانیه است! دکارت استدلال می‌کند که حتی اگر بیکن می‌توانست تأخیری به میزان $1/24$ ضربان قلب (یا حدود $1/24$ ثانیه را، که سرعتی تنها حدود ۸۹ کیلومتر بر ثانیه از آن حاصل می‌شود)، کشف کند در آن صورت آشکار ساختن تأخیر بین رخداد و مشاهده گرفتگی ماه که در حدود یک ساعت است امکان‌پذیر می‌بود. اشکالهای این استدلال به‌تفصیل در [۴۵] مورد بحث قرار گرفته است.

نکته ۳. برای مثال، «... سبک او در نوشتن مطالب به شکل گفتگو، که در آنها سه شخص را معرفی می‌کند که هیچ کاری نمی‌کنند جز اینکه به‌نوبت از هر یک از ابداعات او تمجید کنند به بالا بردن قیمت متاع او کمک می‌کند» [۱۶]، ص. ۳۸۸. انتقادهای جدی عموماً متوجه گالیله می‌شود که علل پدیده‌ای را که در آن تحقیق می‌کرد، تشخیص نمی‌دهد. برای اغلب دانشمندان در آن زمان، و به‌خصوص برای دکارت، لب کلام علم در همین خلاصه می‌شود.

۱.۲ طول جغرافیایی

یکی از مسائل مهم کاربردی آن زمان تعیین طول جغرافیایی به‌خصوص در دریا بود. مبانی این محاسبه، مقایسه زمان محلی در دریا با زمان در یک نقطه مرجع

1. Ole Römer

1. Arcturus 2. Stillman Drake 3. Hans Lippershey

4. Pope Urban

مدار بیضوی خودش وابسته بودند، پی برد. او به مدت کوتاهی در سال ۱۶۷۵ متناهی بودن سرعت نور را پذیرفته بود اما بعد آن را به نفع توضیحی سنتی‌تر کنار گذاشت. کاسینی و پس از او برادرزاده‌اش جیاکومو فیلیپو مارالدی^۱ (۱۶۶۵-۱۷۲۹)، این نظر را در پیش نهادند که مدار مشتری و حرکت اقمار آن شاید بتوانند نابرابریهای مشاهده‌شده را توضیح دهند ([۵۰]، [۴۲])، و [۳۱]. بسیاری از منجمان بر این عقیده که حرکت نورانی است، باقی ماندند. گزارش بررسیهای جیمز برادلی^۲ (۱۶۹۳-۱۷۶۲) (رک. [۱] و [۳۱]) در سال ۱۷۲۹ موجب شد که تقریباً همه در مورد متناهی بودن سرعت نور اتفاق نظر پیدا کنند. برادلی که در حال مطالعه اختلاف منظر^۳ ستارگان بود، تغییرات سالانه‌ای را در موقعیت ستارگان کشف کرد که نمی‌شد آن را براساس اثر اختلاف منظر توضیح داد، ولی می‌شد آن را با حرکت زمین در صورتی که سرعت نور متناهی باشد تبیین کرد. برادلی بر مبنای مشاهدات دقیق برآورد کرد که ۸ دقیقه و ۱۲ ثانیه طول می‌کشد تا نور از خورشید به زمین برسد، که در نتیجه آن، مقدار سرعت نور ۳۰۱۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه است.

در ۱۸۰۹، بر مبنای مشاهدات مربوط به گرفتگیهای مشتری طی ۱۵۰ سال، ژان بابتیست ژوزف دالامبر^۴ (۱۷۴۹-۱۸۲۲) مدت زمانی را که طول می‌کشد تا نور از خورشید به زمین برسد، ۸ دقیقه و ۱۳٫۲ ثانیه برآورد کرد، که منجر به سرعتی حدود $300300 \approx 26764 \times 10^3$ کیلومتر بر ثانیه می‌شود. زمان در اینجا همان‌گونه است که در [۴۲] گزارش شد. برای محاسبه نور، فاصله بین زمین و خورشید باید معلوم باشد. در برآوردی که در اینجا گزارش شد، فاصله به‌کار رفته ۱۴۸۰۹۲۰۰۰ کیلومتر بود که همان است که از ارقام برادلی در بالا استخراج می‌شود.

نتایج این برآمدهای اولیه نجومی در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

متأسفانه، اندازه‌گیریهای سرعت که با این روش انجام شد، به نظریه نجومی و مشاهدات به‌کاررفته وابسته بود. سایمن نیوکم^۵ (۱۸۳۵-۱۹۰۹) از رساله‌ای در ۱۸۷۵ سخن می‌گوید که گلازناب^۶ ارائه کرده و طبق آن، رصدهای مربوط به گرفتگیهای یو از سال ۱۸۴۸ تا ۱۸۷۰ نشان می‌دهد که مقادیری بسیار متفاوت برای سرعت را می‌توان از رده‌های مختلفی از این رصدها تحت فرضیه‌های متفاوتی به‌دست آورد ([۴۲]، ص. ۱۱۴). نشان داده شد که مقادیر مربوط به زمان خورشید تا زمین را می‌توان بین ۴۹۶ و ۵۰۱ ثانیه به‌دست آورد، که سرعتی حدود $295600 \approx 295592 \times 10^3$ و $298600 \approx 298572 \times 10^3$ کیلومتر بر ثانیه را (دوباره با استفاده از فاصله زمین تا خورشید برادلی) نتیجه می‌دهد.

جدول ۱ بررسیهای مبتنی بر رصدهای نجومی

سال	مؤلفان	منابع مشاهداتی	سرعت (کیلومتر بر ثانیه)
۱۶۷۶	زمر	اقمار مشتری	۲۱۴۰۰۰
۱۷۲۶	برادلی	ابراهی ستارگان	۳۰۱۰۰۰
۱۸۰۹	دالامبر	اقمار مشتری	۳۰۰۳۰۰

1. Giacomo Filippo Maraldi 2. James Bradley 3. parallax
4. Jean-Baptiste Joseph Delambre 5. Simon Newcomb
6. Glasenapp

کاربردهای ناوبری اکتشافات نجومی خود آغاز کرد و در ۱۶۱۷، در حالی که به مذاکرات خود با اسپانیا ادامه می‌داد، به کار ساخت تلسکوپی قابل استفاده در دریا پرداخت [۱۵]. متأسفانه جداولی که تهیه کرده بود به‌قدر کافی برای هدف موردنظر دقیق نبودند—در نظریه موجود در آن زمان، اختلالات اقمار که به سبب برهم‌کنش آنها ایجاد می‌شد، به حساب نیامده بود [۱۳].

گرچه بسیاری از نویسندگان متون از کاربرد تلسکوپ در دریا طرفداری می‌کردند، آنهایی که دشواری عملی هدایت یک تلسکوپ بسیار طویل به‌سوی مشتری از روی یک کشتی در حال حرکت را درک می‌کردند نسبت به روش پیشنهادی شک داشتند و بی‌تردید اسباب تفریح آنها بود. این روش هیچ‌گاه در دریا با موفقیت همراه نشد (این مسأله بیش از ۱۵۰ سال، تا زمانی که جان هریسن مخترع انگلیسی ساعت‌های قابل حمل دقیقی ساخت، حل نشده باقی ماند. برای شرح عامه‌پسندی از ماجرا، رک. [۴۶]). اما در خشکی، مقادیر بسیار دقیقی از طول جغرافیایی را می‌شد به این روش به‌دست آورد و نتیجه آن، اصلاحاتی اساسی در جغرافیای قرن ۱۷ و ۱۸ام بود.

۲.۲ نخستین شواهد

در ۱۶۷۱، زمر به ون^۱، جزیره‌ای مسکونی نزدیک کپنهاک، رفت تا در تعیین دوباره طول جغرافیایی رصدخانه‌ای که در آنجا واقع بود کمک کند. وی همراه با دیگران، رصدکردن مجموعه‌ای از گرفتگیهای یو^۲، بزرگ‌ترین قمر مشتری، را آغاز کرد. در پایان، آنها اطلاعات مربوط به هشت ماه رصد یا، چون قمر یو یک بار گردش حول مشتری را در ۴۲ ساعت انجام می‌دهد، زمانهای حدود ۱۴۰ گرفتگی در ۲/۳ از سال را در دست داشتند. فواصل زمانی بین این گرفتگیها منظم نبودند اما مطابق با مکانی که زمین در مدار خود قرار داشت ظاهر می‌شدند. طول فاصله با نزدیک شدن زمین به مشتری کوتاه‌تر و با دور شدن زمین بلندتر می‌شد؛ زمان پیش‌بینی شده یک گرفتگی به‌طور ریاضی، در صورتی که زمین به مشتری نزدیک بود بسیار زود و در صورتی که زمین از مشتری دور بود بسیار دیر بود. این نقص برازش سیستماتیک به زمر این اجاره را داد که در پاریس در سپتامبر ۱۶۷۶ اعلام کند که گرفتگی‌ای که برای ۹ نوامبر آن سال پیش‌بینی شده بود به واقع ۱۰ دقیقه دیرتر رخ خواهد داد. مشاهده نظر او را تأیید کرد و زمر استدلال کرد که اختلاف به واسطه متناهی بودن سرعت نور است. هر چه ما دورتر از منبع نور باشیم، نور زمان بیشتری برای رسیدن به ما نیاز دارد.

بر مبنای این رصدها، زمر برآورد کرد که نور حدود ۲۲ دقیقه برای گذر از قطر کامل مدار زمین نیاز دارد یا حدود ۱۱ دقیقه زمان لازم است تا نوری که از خورشید می‌آید در زمین به ما برسد. بر این اساس، او سرعت نور را حدود ۲۱۴۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه برآورد کرد (برای اطلاعات بیشتر از کار زمر، رک. [۳۱]). برای اطلاع از جزئیات این تحقیق، رک. [۱۲].

«اثبات» زمر بلافاصله مورد اقبال همگانی قرار نگرفت. توضیحات جایگزین را جیان دومینیکو کاسینی^۳ (۱۶۲۵-۱۷۱۲) که در آن زمان منجمی در آکادمی علوم تازه تأسیس در پاریس بود، عرضه کرد. در ۱۶۶۶ کاسینی جداولی را در مورد گرفتگی اقمار مشتری منتشر کرده بود که از طریق آن به‌وجود نابرابریهایی در فواصل زمانی گرفتگیهایی که به مکان مشتری در

1. Hven 2. Io 3. Gian Domenico Cassini

که به بیرون فرستاده می‌شود به دندانهای در مسیر برگشت برخورد کند، هیچ تصویری از منبع مشاهده نمی‌شود. دوبار کردن این سرعت، هنگامی که پرتو به بیرون فرستاده شده به درون شکاف موجود بعدی باز می‌گردد، تصویری کامل ایجاد می‌کند. سرعت سه‌برابر، هیچ تصویری ایجاد نمی‌کند و به همین ترتیب الی آخر. سرعت چرخش همراه با مسافت طی شده (در چارچوب کار فیزو، دو برابر ۸۶۳۳ متر)، را می‌شد به اندازه‌ای از سرعت نور تبدیل کرد. بدین طریق، فیزو نخستین مقدار یابی زمینی سرعت نور را در سال ۱۸۴۹ انجام داد.

دیگران به سرعت به تقلید از این دستاورد ماندگار پرداختند. تنها دو سال بعد لئون فوکو^۱ (۱۸۱۹-۱۸۶۸) یکی از همکاران سابق فیزو، اجرای اندازه‌گیری‌های دقیق‌تری را بر مبنای آینه چرخان به جای چرخ دندانهای میسر کرد.

۳. مقدار یابیهای سرعت نور به وسیله مایکلسن در ۱۸۷۹

در نوامبر ۱۸۷۷، آلبرت آبراهام مایکلسن^۲ (۱۸۵۲-۱۹۳۱)، که در آن زمان نوابان دوم ۲۴ ساله‌ای در نیروی دریایی ایالات متحده و معلم فیزیک در آکادمی نیروی دریایی ایالات متحده در آنابولیس مریلند بود، به ابزارهایی برای اصلاح رویکرد آینه چرخان فوکو دست یافت. حتی با وجود این، لازم بود بررسیهای مقدماتی بسیاری انجام دهد تا از دستیابی به مقدار دقیق‌تری برای سرعت نور اطمینان حاصل کند. عین گفته خود او ([۳۷]، ص. ۱۱۵) چنین است: «بین آن زمان و ماه مارس سال بعد، چند آزمایش مقدماتی به منظور آشناکردن خودم با راهکارهای ابتیکی انجام دادم. تا این زمان تنها دستگاهی که از آن استفاده می‌شد از نوعی بود که می‌شد با اصلاحاتی در دستگاههای موجود در آزمایشگاه آکادمی نیروی دریایی به دست آورد».

در آوریل ۱۸۷۸، برقراری تماس با پروفیسور سایمن نیوکم (۱۸۳۵-۱۹۰۹) از نیروی دریایی ایالات متحده ([۴۹]، ص. ۳۸) را آغاز کرد که در آن زمان سرپرست سالنامه دریانوردی^۳ نیروی دریایی بود و در نیروی دریایی و جامعه علمی به عنوان اخترشناس شهرت داشت. مایکلسن درباره کار و روشهای نیوکم گفتگو کرد. با این حال، در این زمان، مایکلسن هنوز فرد ناشناخته‌ای بود که برای یک چنین تحقیق تخصصی از طرف نیروی دریایی ایالات متحده وجوهی در اختیارش قرار داده نمی‌شد. خوشبختانه، پس از ازدواج با مارگارت مک لین هیمونی^۴ در بهار ۱۸۷۷، می‌توانست برای پشتیبانی مالی به پدربزرگ متولش رویاورد. پدربزرگ او (در [۳۷] از او تنها به عنوان «شخص محترم غیرنظامی» یاد شده است) به شدت به نتایج اولیه مایکلسن علاقه‌مند شده بود و در ژوئیه ۱۸۷۸ مبلغ ۲۰۰۰ دلار مورد نیاز او را برای خرید ابزارهای نوری دقیق جهت اجرای اندازه‌گیری‌هایش فراهم نمود. این گونه بود که مایکلسن تلاش مادام‌العمر خود را برای تعیین سرعت نور آغاز کرد.

۱.۳ نظریه ابتیکی

یکی از مشکلات ناشی از فواصل زیاد بین منبع و آینه در طرح فیزو این است که شدت نور با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. تصویر با قراردادن یک عدسی بین منبع و آینه، درخشان‌تر می‌شود. اگر، مطابق شکل ۱، منبع S و آینه M به گونه‌ای قرار گیرند که یک نور با منبع نقطه‌ای از یکی، دقیقاً روی

در صورتی که هم منبع و هم مشاهده‌کننده زمینی باشند مقدار سرعت را بهتر می‌توان محاسبه کرد. زیرا همه چیز در آن صورت قابل دسترسی خواهد بود و می‌توان کنترل بیشتری در طول مطالعه و در نتیجه بر روی مشاهدات اعمال کرد. اما این ما را به یک مسأله قدیمی باز می‌گرداند: چگونه سرعت نور را می‌توان روی زمین اندازه‌گیری کرد؟

۳.۲ مقدار یابیهای زمینی

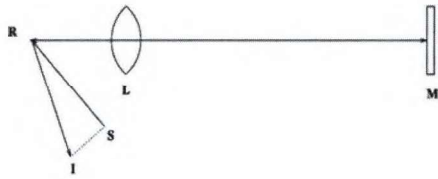
دو نفر را تصور کنید که در انتهای یک ریل طولانی ایستاده‌اند. نفر اول پوشش منبع نور پر قدرتی را در زمان معینی برمی‌دارد و نفر دوم زمانی را که نور مشاهده می‌شود، ثبت می‌کند. طول ریل تقسیم بر اختلاف بین زمان شروع و زمانی که نور مشاهده می‌شود اندازه‌ای از سرعت نور را به دست می‌دهد. (این آزمایش اساساً همان آزمایشی است که آیزک بیکن در سال ۱۶۲۹ به دکارت پیشنهاد کرد. رک. نکته ۲). البته، مشکل این است که نور چنان سریع حرکت می‌کند که مسافت باید بسیار بزرگ باشد و در غیر این صورت مدت زمان حرکت بسیار کوتاه است. اندازه‌گیری مستقیم مسافتهای فوق‌العاده بزرگ و فواصل زمانی فوق‌العاده کوتاه بسیار دشوار است.

در صورتی که هر دو مشاهده‌گر منابع نوری در اختیار داشته باشند که با پرده‌ای پوشانیده شوند، کار بهتر انجام می‌شود. اندازه‌گیری زمان موقعی آغاز می‌شود که مشاهده‌گر اول پرده را برمی‌دارد و نور را به دومی می‌فرستد. زمانی که مشاهده‌گر دوم نور اول را می‌بیند، پرده را از منبع نور دوم برمی‌دارد. سپس زمانی که مشاهده‌گر اول منبع نور دوم را می‌بیند دوباره منبعش را با پرده می‌پوشاند. مدت زمان بین پرده‌برداری و پوشاندن منبع نور اول، اندازه مدت زمان لازم برای آن است که نور مسافت بین دو مشاهده‌گر را دوبار بپیماید. بهتر شدن کار آشکار است. مسافت دو برابر شده و به جای یک ساعت، دوساعت قرار داده شده که فرض می‌کنیم همزمان شده‌اند. این همان آزمایش پیشنهادی گالیله در ۱۶۳۸ است؛ قریب ۲۰۰ سال طول کشید تا این آزمایش به قدر کافی اصلاح شود تا نتیجه‌ای از آن به دست آید.

نوآوریهای ضروری را ایپولیت فیزو (۱۸۱۹-۱۸۹۶) مطرح کرد. یکی از نوآوریها این بود که به جای نفر دوم یک آینه مسطح ثابت قرار گیرد که سطح آن بر پرتو نور ساطع شده از منبع عمود باشد. هنگامی که این کار انجام شد، پرتو نور به طور مستقیم به مبدأ خود بازتابانده می‌شد و یک منبع انسانی خطا به طور کامل از سیستم حذف می‌شد. نوآوری دوم، خودکارسازی پوشاندن و پرده‌برداری از منبع بود که موجب کاهش خطای منبع انسانی اول می‌شد.

این پیشرفت‌ها، توأمًا، به فیزو امکان داد به جای اندازه‌گیری مستقیم زمان، سرعت را به طور غیرمستقیم اندازه‌گیری کند. یعنی به جای اندازه‌گیری مدت زمان بین پرده‌برداری و پرده‌افکنی توانست حداقل سرعتی را اندازه بگیرد که پرده می‌بایست برای پوشاندن منبع نور در زمان دقیقی که نور بازمی‌گشت طی مسافت کند. ترفند او این بود که از چرخ‌های که دندان‌هایی به طور دقیق بر آن تعبیه شده بود، استفاده شود که در حال چرخش مقابل منبع نور قرار داده می‌شد تا به عنوان یک پرده متحرک عمل کند. دندان‌ها منبع را می‌پوشاندند در حالی که شکافها آن را نشان می‌دادند و بنابراین چرخ دقیقاً همانند مشاهده‌گر گالیله عمل می‌کرد. هر نوری که به منبع باز می‌گردد به دندان‌ها یا شکاف برخورد می‌کند. اگر چرخش چرخ به قدر کافی سریع تنظیم شده باشد که هر پرتوی

1. Leon Foucault 2. Albert Abraham Michelson
3. Nautical Almanac 4. Margaret McLean Heminway



شکل ۴ تصویر بازگشتی I توسط آینه چرخان R دورتر از منبع S قرار می‌گیرد.

هرگاه آینه را با سرعت ثابت بچرخانند، میزان انحراف برای همه باریکه‌های نور که از L عبور می‌کنند، با M برخورد می‌کند و باز می‌گردند، یکسان خواهد بود. در این صورت برای یک باریکه پیوسته نور ناشی از S و سرعت چرخش ثابت و زیاد R، تصویری از منبع به جای انطباق بر آن (همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است) کنار S ظاهر خواهد شد. هرچه R سریع‌تر بچرخد یا هر چه $|RS|$ طول‌تر باشد، تصویر بازگشتی I از منبع S دورتر قرار خواهد گرفت و اندازه‌گیری انحراف آسان‌تر خواهد شد.

با اندازه‌گیری دقیق میزان جابه‌جایی از S تا I (رک. شکل ۴)، و فاصله بین S تا R، زاویه انحراف را می‌توان تعیین کرد. با استفاده از این زاویه همراه با سرعت چرخش ثابت معلوم، می‌توان مدت‌زمانی را که لازم است تا نور فاصله از R تا M و بالعکس را بپیماید تعیین کرد. با تقسیم این فاصله بر زمان مقداری برای سرعت نور به دست می‌آید.

فرض کنید θ نشان‌دهنده زاویه انحراف باشد. در این صورت به آسانی می‌توان نشان داد که زاویه چرخش آینه $\theta/2$ است. زاویه θ برحسب درجه برابر است با $\arctan(|IS|/|IR|)$. اگر سرعت چرخش برحسب دور بر ثانیه برابر n باشد، آنگاه مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا باریکه نور از R تا M را بپیماید و بازگردد برابر است با

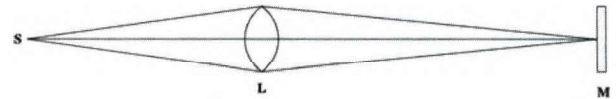
$$\frac{1}{n} \times \frac{\theta/2}{360^\circ} \text{ ثانیه}$$

بنابراین، سرعت نور گسیل‌شده تحت شرایط مطالعه برابر است با

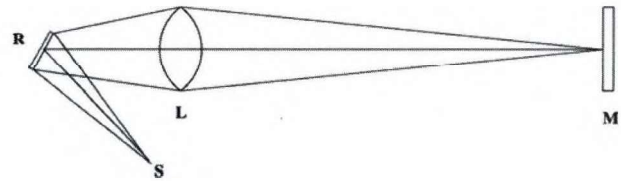
$$2 \frac{360^\circ n}{\arctan(|IS|/|SR|)} \times 2|RM|$$

در این وضعیت، فاصله‌های $|IS|$ و $|SR|$ باید تا آنجا که ممکن است بزرگ باشند تا خطای اندازه‌گیری θ کاهش یابد. فاصله $|IS|$ با ماکسیم کردن سرعت چرخش R و فاصله $|RM|$ ماکسیم می‌شود. نوآوری مهم مایکلسن در طرح فوکو اجازه بسیار بزرگ کردن $|RM|$ را می‌دهد. در طرح فوکو M به شکل کره‌ای با مرکز R بود. بزرگ‌ترین فاصله $|RM|$ که توسط فوکو به دست آمد ۲۰ متر بود ([۳۷]، ص. ۱۱۷)، که تنها موجب جابه‌جایی به میزان ۷ میلی‌متر برای $|IS|$ می‌شد ([۴۲]، ص. ۱۱۸). مایکلسن تصمیم گرفت آینه چرخان را در نقطه کانونی عدسی قرار دهد که به او امکان استفاده از یک آینه مسطح برای M را می‌داد. یعنی، R می‌بایست در نقطه‌ای قرار گیرد که در آن باریکه‌های نور موازی که در عدسی از M می‌گذرند در طرف دیگر همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده به هم برسند.

بنابراین، اگر قطر M به بزرگی اندازه قطر L باشد، هر باریکه واحدی که از R از درون M می‌گذرد، لزوماً با M برخورد می‌کند و از درون L به R



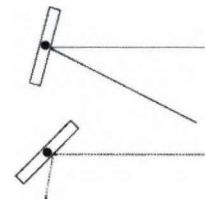
شکل ۱ S و M در موقعیت تصویر نقطه‌ای یکدیگر قرار دارند.



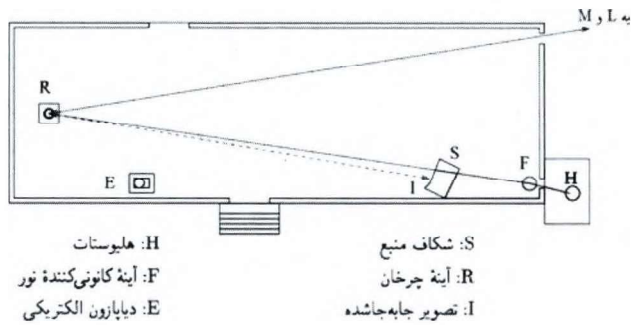
شکل ۲ قراردادن آینه R بین منبع S و عدسی L.

دیگری متمرکز شود، آنگاه تصویر بازگشتی تا حد امکان شفاف خواهد بود. توجه کنید که فاصله بین L و M با فاصله بین L و S برابر نیست. هرچه M از عدسی دورتر می‌شود، S را باید نزدیک‌تر کرد تا هر دو نقطه در کانون منبع نقطه‌ای دیگری باقی بمانند. این مطلب در صورتی صحیح است که هر دو نقطه خارج از فاصله کانونی عدسی باشند (نقطه‌ای که در آن باریکه‌های نور موازی در یک طرف عدسی یکدیگر را در طرف دیگر قطع می‌کنند). با دورتر کردن S و M از یکدیگر، در همان حال که هر یک در کانون دیگری نگه‌داشته می‌شود، مسافتی را که نور باید طی کند و بنابراین مدت‌زمانی را که سپری می‌شود، افزایش داده‌ایم. با این حال مدت‌زمانی که سپری می‌شود بیش از حد کوتاه و اندازه‌گیری آن دشوار است.

فوکو، به جای چرخ فیزو، از آینه‌ای چرخان استفاده کرد که مطابق شکل ۲ بین S و L قرار گرفته بود [به گفته نیوکم [۴۲]، ص. ۱۱۷] این تدبیر بسیار پیش‌تر از آن توسط چارلز ویستن^۱ (۱۸۰۲-۱۸۷۵) پیشنهاد شده و دومینیک فرانسواز ژان آراگو^۲ (۱۷۸۶-۱۸۵۳) در ۱۸۳۸ آن را امتحان کرده بود بدون آنکه موفقیتی کسب کند. پرتوهای نورگسیلی از منبع که با R برخورد می‌کنند و از عدسی L می‌گذرند با M برخورد خواهند کرد و به منبع S بازخواهند گشت. اگر، پس از اینکه باریکه نورگسیلی از S برای نخستین بار بر R فرود می‌آید بتوان R را پیش از برخورد دوباره با باریکه‌ای که از M باز می‌گردد، چرخاند، آنگاه باریکه بازگشتی دیگر به طور دقیق به منبع S باز نمی‌گردد بلکه در جهت چرخش از S منحرف می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳ چرخاندن آینه R موجب بازتاب پرتو بازگشتی می‌شود.



شکل ۶ اتاقی که چینش آزمایشی را نشان می‌دهد.

یک عدسی با فاصله کانونی طولانی، نور را کانونی می‌کرد (یک عدسی ۸ اینچی غیرنافام با فاصله کانونی ۱۵۰ فوت). عدسی در موضعی به فاصله حدود ۸۰ فوت از سازه و آینه ثابت در فاصله‌ای حدود ۱۹۲۰ فوت از سازه قرار داشت. لازم بود هم آینه M و هم عدسی L بر یک محور مرکزی مشترک عمود باشند، همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است.

مایکلسن هیچ شرحی در مورد چگونگی قرارگرفتن عدسیها نمی‌دهد، اما با ذکر جزئیاتی طرز قرارگرفتن آینه را توصیف می‌کند. در ابتدا، در مکانی قرار داده شده بود که سطح بازتابان آن روبه‌روی سوراخ در سازه قرار می‌گرفت.

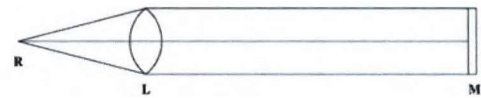
«یک زاویه‌یاب [نوعی ابزار مساحی زمین که برای اندازه‌گیری زاویه‌ها به‌کار می‌رفت] در حدود ۱۰۰ فوتی مقابل آینه قرار داشت و این آینه به‌وسیله پیچهایی به‌اطراف حرکت می‌کرد تا اینکه مشاهده‌گر در زاویه‌یاب، تصویر تلسکوپ خود را ببیند که در مرکز آینه بازتابیده است. اکنون، تلسکوپ که به آینه متصل شده بود (بدون حرکت دادن خود آینه) به‌سوی علامتی روی یک قطعه مقوای متصل به زاویه‌یاب نشانه می‌رفت.»

به این طریق، تلسکوپ بالای آینه به‌صورت قائم بر سطح بازتابنده‌اش قرار می‌گرفت.

«آنگاه زاویه‌یاب را ۱۰۰۰ فوت منتقل کردند، و، در صورت لزوم، تنظیمها [در مورد تلسکوپ] تکرار می‌شد.»

پس از قرارگرفتن تلسکوپ در این وضعیت، آینه حرکت داده شد به‌طوری که تلسکوپ آن به‌سمت سوراخ واقع در ساختمان نشانه برود. تنظیم نهایی از طریق کانونی کردن دوربین تلسکوپ واقع بر آینه ثابت، به‌دست شخصی که خارج از ساختمان قرار داشت، انجام گرفت. پس از آن آینه با استفاده از پیچهایی حرکت داده شد تا اینکه مشاهده‌گر تصویر دوربین تلسکوپش را مشاهده کند که در مرکز آینه بازتابیده شده بود.

آینه چرخان یک قرص مدور ۲۵ راینچی (با قطر ۲٫۰ اینچ) بود که یک طرف آن نقره‌اندود شده و بر یک میله عمودی قرارگرفته بود که به نوبه خود در یک قاب آهنی جا داشت. این قاب را می‌شد به کمک ریسمانهای کوچکی به‌هر دو طرف حرکت داد یا جلو و عقب برد. میله نوکهای تیزی داشت که درون حفره‌های مخروطی در قاب حرکت محوری داشت؛ و اینها تنها نقاط تماس بین قاب و میله بودند. قسمت بالایی میله از مرکز یک چرخ کوچک درون یک دیواره متصل به قاب عبور می‌کرد. این چرخ به‌وسیله اصطکاک میله را در جای خود نگاه می‌داشت. با دمیدن هوا به‌داخل محفظه، بر فراز



شکل ۵ R در نقطه کانونی L.

باز می‌گردد صرف‌نظر از اینکه فاصله بین M و L چقدر باشد. این کار اجازه می‌دهد که M بسیار دور واقع شود. تنها مشکل این است که هرچه M از L دورتر باشد، کانون منبع نقطه‌ای S به کانون R نزدیک‌تر خواهد بود، که با ماکسیمم کردن فاصله بین S و R تعارض دارد. این کار را می‌توان تا حدودی با به‌کار بردن یک عدسی با طول کانونی بزرگ اصلاح کرد.

این نوآوریها، باعث جابه‌جایی به‌میزان بیش از ۱۰۰ میلی‌متر شد. چنین جابه‌جایی بزرگی مشکل دیگری را پیش آورد. در اصل، چشمی برای مشاهده تصویر جابه‌جا شده در S با استفاده از یک صفحه شیبدار از جنس شیشه نقره‌اندود منحرف شده بود تا از تداخل بین باریکه نورگسیلی از ناظر و باریکه نورگسیل شده جلوگیری شود. به‌محض اینکه جابه‌جایی از ۴۰ میلی‌متر تجاوز کرد، برداشتن سطح شیبدار نقره‌اندود و مشاهده مستقیم تصویر جابه‌جاشده امکان‌پذیر می‌شود. مایکلسن ([۳۷]، ص. ۱۱۶) خاطرنشان کرده که «بدین ترتیب چشمی خیلی ساده‌تر می‌شود و بسیاری از منابع احتمالی خطا حذف می‌شوند».

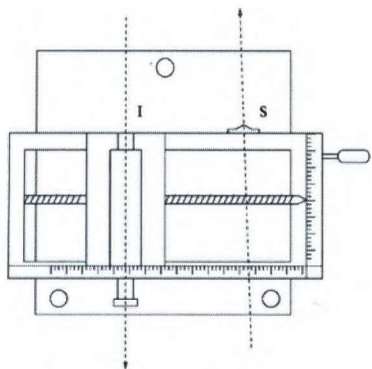
۲.۳ تجهیزات فیزیکی

نقل‌قولها و جزئیات زیر از شرحی که مایکلسن از بررسیهای خود به‌دست داده اقتباس شده است ([۳۷]، صص. ۱۱۸-۱۲۴).

«این مطالعه در بخشی روشن و تقریباً تراز در امتداد مرز دریایی شمالی آکادمی نیروی دریایی اجرا می‌شود. یک سازه چارچوبی در انتهای غربی این مرز برپا شد که نموداری از آن در شکل ۳ نشان داده شده» (رک. شکل ۶، که بازسازی شکل ۳ مایکلسن است).

«این سازه ۴۵ فوت طول و ۱۴ فوت پهنا داشت، و به‌گونه‌ای بنا شده بود که خطی که نور در امتداد آن می‌پیمود حدود ۱۱ فوت بالاتر از زمین بود. یک هلیوستات [خورپای] در H پرتوهای خورشید را از میان شکاف S به آینه چرخان R، و سپس از سوراخی در بستاور و از طریق عدسی، به آینه دور باز می‌تاباند». هلیوستات ابزاری است که برای کانونی کردن پرتوهای خورشید و هدایت آنها به‌صورت باریکه‌ای باریک به‌کار می‌رود. از آن پس این باریکه در حکم منبع نور عمل می‌کرد. از آن جاکه تنظیم یک آینه کوچک F در مقایسه با هلیوستات آسان‌تر است، چنین آینه کوچکی باریکه را از هلیوستات به شکاف هدایت می‌کند. «عدسی بر قابی چوبی نصب شده بود، که بر تکیه‌گاهی قرار داشت که روی کشویی به‌طول حدود ۱۶ فوت حرکت می‌کرد و فاصله آن از سازه در حدود ۸۰ فوت بود. آینه ثابت ... حدود ۷ اینچ قطر داشت، که بر یک قاب برنجی با قابلیت تنظیم از طریق حرکت پیچ روی یک صفحه افقی و عمودی سوار شده بود. برای تسهیل تنظیم، یک تلسکوپ کوچک مجهز به تارهای چلیپایی بر یک مفصل چرخنده به آینه متصل شده بود. این قاب سنگین بر یک پایه آجری نصب شده و کل آن را قاب چوبی دربرگرفته بود تا آن را در برابر نور خورشید محافظت کند».

برخلاف روش فوکو، یک آینه مسطح به‌عنوان آینه ثابت به‌کار رفته بود و



شکل ۷ ریزسنج مقدار جابه‌جایی $|IS|$ را اندازه می‌گیرد.

خود به وسیله آینه دیپازون بازتاب می‌یافت تا تصویری از صفحه آینه چرخان روی یک تکه شیشه صاف مستقر در مجاورت عدسی چشمی ریزسنج ایجاد شود. اگر بسامد دیپازون و سرعت آینه چرخان یکی باشد، آنگاه تصویر نهایی ظاهر شده بر شیشه واضح خواهد بود. در بیشتر مقاداریابی‌های مایکلسن، بسامد ارتعاش دیپازون نصف بسامد آینه چرخان بود، به طوری که دو تصویر واضح تشکیل می‌شد ([۳۷]، شکل ۱۳، ص. ۱۲۴).

بسامد دیپازون الکتریکی، که Vt_2 نامیده می‌شود، با شمردن تعداد زنشها [ضربانها] در هر ثانیه بین آن و یک دیپازون استاندارد Vt_2 با بسامد ارتعاش معلوم $256 \times 70^\circ$ دور در ثانیه در 65° فارنهایت اندازه‌گیری شد. در اینجا از یک دور شمار 60° ثانیه‌ای استفاده شد و دما برای تصحیح بسامد دیپازون استاندارد از لحاظ دما ثبت شد. بنابراین، بسامد ارتعاش دیپازون الکتریکی نصف مجموع $256 \times 70^\circ$ ، تعداد زنشها در هر ثانیه و تصحیح برای دماست. نتیجه نهایی برای سرعت آینه چرخان در هر ثانیه بر مبنای بسامد ارتعاش دیپازون الکتریکی و تعداد تصاویر واضح روی صفحه شیشه‌ای تعیین می‌شود.

۴.۳ یک مقدار یابی سرعت نور

۱. فاصله $|RM|$ از آینه چرخان تا آینه ثابت پنج بار، هر بار با در نظر گرفتن دما، و متوسط به کار رفته به عنوان «فاصله واقعی» بین آینه‌ها در همه محاسبات، اندازه‌گیری شد.

۲. روشن کردن کوره برای تأمین بخار جهت به حرکت درآوردن تلمبه حدود نیم ساعت قبل از شروع اندازه‌گیری آغاز شد. پس از این زمان، فشار کافی برای شروع مقاداریابی‌ها وجود داشت.

۳. آینه ثابت M همان‌گونه که در بالا توصیف شد تنظیم شده بود و هلیوستات به‌گونه‌ای مستقر و تنظیم شده بود که تصویر خورشید به سمت شکاف، نشانه رفته بود.

۴. آینه چرخان بر دو محور متفاوت تنظیم شده بود. نخست، به‌گونه‌ای به راست یا چپ متمایل شده بود که بازتاب مستقیم نور از شکاف، بالا یا پایین چشمی ریزسنج می‌افتاد. مایکلسن دریافت که بایستی آینه چرخان را کج کند. زیرا «در غیر این صورت این نور بر نوری که تصویری را تشکیل می‌دهد که باید مشاهده شود غلبه خواهد کرد» ([۳۷]، «پس از آن، آینه چرخان با چرخاندن آن به اطراف و خم کردن به جلو یا عقب تنظیم می‌شود تا اینکه نوری

سطح چرخ و توقف آن به شیوه‌ای دایره‌وار، چرخ و در نتیجه آن میله به چرخش در می‌آمد. لازم بود میله را به دقت میزان کرد تا بدون لرزش به آرامی بچرخد. هوای محرک این توربین کوچک از تلمبه‌ای با نیروی بخار تأمین می‌شد که در زیر زمین ساختمان قرار داشت. یک لوله تلمبه را به توربین متصل می‌کرد. از آنجا که سرعت چرخش آینه در صورتی ثابت می‌ماند که فشار تلمبه ثابت باشد، سیستمی از تنظیم‌کننده‌ها، سوپاپها، و کنترل بازخورد ([۳۷]، شکلهای ۱۱ و ۱۲، ص. ۱۲۴) برای تنظیم فشار و در نتیجه سرعت نصب شده بود. مایکلسن متذکر می‌شود که این سیستم می‌تواند به مدت سه یا چهار ثانیه سرعت چرخش را ثابت نگه دارد، که برای انجام اندازه‌گیری کافی بود.

برای افزایش بیشتر فاصله $|SR|$ ، آینه چرخان کمی نزدیک‌تر از کانون عدسی در مقابل عدسی (یعنی نقطه کانونی شدن باریکه‌های موازی) قرار گرفته بود. این کار به‌بهای ایجاد تصویر اندکی غیر واضح [تار] در مقایسه با قراردادن R در کانون به دست می‌آمد زیرا پرتوهای کمتری به M بر می‌خوردند و از آن بر می‌گشتند.

«با این حال، پس از کوتاه زمانی به یک حد رسیدند زیرا کمیت نور دریافتی به سرعت با نزدیک شدن آینه چرخان به عدسی کاهش می‌یابد».

این حد تقریباً ۱۵ فوت نزدیک‌تر از کانون عدسی به عدسی است. مطالعات قبلی مایکلسن نشان داد که اگر R حدود 258 دور در ثانیه بزند و فاصله $|SR|$ ، یا شعاع در حدود 286 فوت باشد، در این صورت انحراف حدود 115 میلی‌متر خواهد بود.

۳.۳ تجهیزات اندازه‌گیری

مایکلسن از قطعات متعددی از تجهیزات اندازه‌گیری استفاده کرد.

فاصله‌های $|SR|$ و $|RM|$ با استفاده از یک تسمه فولادی به طول اسمی 100 فوت اندازه‌گیری می‌شدند.

مقدار جابه‌جایی $|IS|$ با استفاده از یک ریزسنج مدرج مانند شکل ۷، اندازه‌گیری شد. منبع نور یک شکاف عمودی باریک بود که در یک جای ثابت روی ریزسنج قرار داشت. ریزسنج به یک تلسکوپ کوچک مجهز بود که قابل حرکت از چپ به راست با استفاده از یک صفحه مدرج واقع در سمت راست آن بود. هر چرخش پیچ، تلسکوپ را به میزان نسبتاً کوچک مشخصی حرکت می‌داد. در شکل ۷، مقیاس افقی میزان گردش را مشخص می‌کند. در کانون عدسی تلسکوپ (حدود ۲ اینچ)، و تقریباً در همان صفحه شکاف S ، یک رشته الیاف ابریشمی عمودی قرار داشت که به عنوان یک خط نشانه عمودی برای میزان کردن به کار می‌رفت. با چرخاندن پیچ، می‌شد تلسکوپ را به‌گونه‌ای قرار داد که این رشته در مرکز تصویر بازگشتی شکاف در I قرار گیرد. با این شرایط مقداری که لازم است تا تلسکوپ از موقعیت اولیه‌اش در شکاف به موقعیت تصویر حرکت داده شود، میزان جابه‌جایی $|SI|$ خواهد بود.

سرعت چرخش آینه چرخان m ، تعداد دورها در هر ثانیه، با استفاده از دیپازون الکتریکی با ارتعاش حدود 128 دور در ثانیه تنظیم می‌شد. سوپاپ تلمبه برای به چرخش درآوردن آینه R و هماهنگ نمودن سرعت گردش آن در هر ثانیه با بسامد ارتعاش دیپازون الکتریکی در هر ثانیه، گشوده می‌شد. سرعت و بسامد با قراردادن آینه‌ای کوچک متصل به یک بازوی دیپازون هماهنگ می‌شد به این گونه که بخشی از نور بازتابیده از آینه چرخان به نوبه

مسئله	- واحدها و جامعه هدف (فرایند) - متغیر(های) پاسخ - متغیرهای توضیحی - صفت(های) جامعه - جنبه(های) مسأله-علی، توصیفی، پیشگویانه
برنامه	- جامعه تحت مطالعه (فرایند) (واحدها، متغیرها، صفات) - گزینش متغیر(های) پاسخ - پرداختن به متغیرهای توضیحی - قرارداد نمونه‌گیری - فرایندهای اندازه‌گیری - قرارداد گردآوری داده‌ها
داده‌ها	- اجرای برنامه و ثبت همه انحرافات - نظارت بر داده‌ها - بازبینی داده‌ها از لحاظ سازگاری درونی - انبارش داده‌ها
تحلیل	- تلخیص داده‌ها عددی، نموداری - مدلسازی ساخت، برازش، چرخه نقد - تحلیل رسمی
نتیجه‌گیری	- هم‌نهاد زبان صریح، نمودارهای ارائه مؤثر - محدودیتهای مطالعه بحث خطاهای بالقوه

شکل ۸ روش آماری

در این بخش، با معرفی اصطلاحات فنی مورد نیاز، مفاهیم و کارهای مهمی را که در هر بخش انجام می‌شود شرح می‌دهیم. مطالعه مایکلسن در ۱۸۷۹ به‌عنوان مثالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌گونه که در بخش اول خاطر نشان شد، از بسیاری لحاظ، این تحقیق نمونه نوعی تحقیق آماری نیست و ما خوانندگان را به امتحان کردن ساختار و زبان پیشنهادی در کاربردهای دیگر ترغیب می‌کنیم.

ادامه مقاله در شماره آینده می‌آید که مشتمل خواهد بود بر تشریح مراحل پنج‌گانه در روش آماری (با استفاده از مطالعه مایکلسن به‌عنوان مثال) و سپس بحث درباره روش علمی و مقایسه آن با روش آماری که هدف نهایی این مقاله است.

- R. J. MacKay and R. W. Oldford, "Scientific method, statistical method, and the speed of light", *Statistical Science*, (3) 15 (2000) 254-278.

* آر. جی. مکای، دانشگاه واترلو، کانادا
 ** آر. دبلیو. آلدفرد، دانشگاه واترلو، کانادا

که از آینه دور بازتاب یافته است، مشاهده شود» ([۳۷]، ص. ۱۲۴). برخی تعدیلات در محاسبات برای کج کردن آینه انجام شد.

۵. فاصله $|SR|$ از آینه چرخان تار چلیپایی چشمی، با استفاده از نوار فولادی اندازه‌گیری شد.

۶. تار چلیپایی عمودی چشمی ریزسنگ در مرکز شکاف قرار گرفت و موقعیت آن برحسب موقعیت پیچ ثبت شد.

۷. دیابازون الکتریکی شروع به‌کار کرد. بسامد ارتعاش دیابازون برای هر مجموعه از مشاهدات دو یا سه بار اندازه‌گیری شد.

۸. دما ثبت شد.

۹. آینه چرخان شروع به‌کار کرد. چشمی به‌طور تقریبی برای گرفتن تصویر جابه‌جا شده تنظیم شد. اگر تصویر در چشمی ظاهر نشود، آینه به جلو یا عقب کج می‌شود تا زمانی که دیده شود.

۱۰. سرعت چرخش آینه طوری تنظیم شد که تصویر آینه چرخان یک جا ثابت شود.

۱۱. چشمی ریزسنگ با چرخاندن پیچ جابه‌جا شد تا آنکه تار چلیپایی عمودی آن در مرکز تصویر بازگشتی از شکاف قرار گرفت. تعداد دفعات پیچاندن پیچ ثبت شد. مقدار جابه‌جایی اختلاف این دو موقعیت است. برای بیان این اختلاف به‌عنوان فاصله $|IS|$ برحسب میلی‌متر، تعداد دفعات پیچاندن اندازه‌گیری شده در تعداد میلی‌مترهای مدرج برحسب پیچ ضرب شد. ۱۲. مراحل ۱۰ و ۱۱ تکرار شدند تا اینکه ۱۰ بار اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی $|IS|$ انجام گیرد.

۱۳. آینه چرخان متوقف شد، دما یادداشت شد و بسامد ارتعاش دیابازون الکتریکی بار دیگر تعیین گردید.

۴. روش آماری و مطالعه مایکلسن در سال ۱۸۷۹

سودمند است که روش آماری به‌صورت رشته‌ای از پنج مرحله ارائه شود: مسأله، برنامه، داده‌ها، تحلیل، و نتیجه‌گیری. ما از حروف اختصاری PPDAC برای ارجاع به این رشته گامها استفاده می‌کنیم.^۱ هر مرحله از روش آماری با مباحث خودش همراه است که باید آنها را درک کرد و به آنها پرداخت. (این مباحث در جدول شکل ۸ خلاصه شده‌اند).

هر مرحله به مرحله بعدی منجر می‌شود و به مرحله‌های پیشین وابسته است. با نگاه به گذشته، این بدان معناست که هر مرحله در متن مراحل پیش از خود انجام می‌شود و اعتبار می‌یابد (یا نمی‌یابد) (برای مثال، برنامه‌ای که در آن مسأله مورد توجه قرار نمی‌گیرد، ارزش چندانی ندارد؛ در چنین موردی، یکی از دو مرحله باید اصلاح شود). با نگاه به پیش‌رو در هر مرحله، می‌توان انتخابهایی به‌عمل آورد که اقدامات مرحله بعدی را ساده کند (برای مثال، یک برنامه خوش‌طرح می‌تواند تحلیل را ساده‌تر کند) جهش به پیش‌وپس بین مرحله‌ها در تکمیل ساختار PPDAC متداول است.

ساختار برای روش آماری از دو جهت سودمند است: نخست برای فراهم نمودن قالبی برای استفاده مؤثر از تحقیق تجربی و دوم، برای بازنگری نقادانه بررسیهای انجام‌شده. ساختار همه بررسیهای تجربی، چه به‌طور ضمنی و چه صریح، را می‌توان به‌کمک این مدل پنج مرحله‌ای نمایش داد.

1. PPDAC: Problem, Plan, Data, Analysis, Conclusion