روش علمی، روش آماری، و سرعت نور* (۲)

آر.جی. مکای*، آر. دبلیو. اُلدفُرد**
ترجمهٔ الهه وحیدی‌اصل

۱.۴ مسأله

درک اینکه از یک تحقیق چه چیزی باید فرا گرفت، به‌قدری مهم است که جای شگفتی است که در درس آشنایی با آمار به‌ندرت به آن پرداخته می‌شود یا اصلاً نمی‌شود. در یک مرور اجمالی، هیچ کتاب درسی آماری مقدماتی را که ساختاری برای فهم این مسأله به‌دست دهد نیافتیم. برای مثال، کتاب درسی عامه‌پسند و مورد اقبالِ مور و مکاب [۴۰] هیچ ذکری از نقش آمار در فرمول‌بندی مسأله نمی‌کند.

دو مورد استثنایی قابل توجه، مقالهٔ هند [۲۸] و کتابی به قلم چتفیلد [۱۱] هستند. هدف هند عبارت است از: «برانگیختن مباحثه دربارهٔ نیاز به فرمول‌بندی مسائل تحقیق با دقت کافی، به‌طوری که بدون ابهام و به‌درستی با فنون آماری مطابقت داشته باشند». او پنج اصل را برای کمک به این مطابقت پیشنهاد می‌کند اما هیچ ساختار یا زبانی ارائه نمی‌دهد. چتفیلد توصیهٔ بسیار خوبی برای درک روشن زمینهٔ فیزیکیِ وضعیت تحت بررسی به‌منظور روشن ساختن اهداف و فرمولبندی مسأله برحسب اصطلاحات آماری در اختیار می‌گذارد.

هدف مرحلهٔ مسأله در روش آماری بیان روشن آن چیزی است که قرار است فراگرفته شود. خوش‌تعریف بودن ساختار و وضوح اصطلاحات کمک می‌کنند تا مسأله‌ای در یک زمینهٔ خاص به‌شکلی درآورده شود که بتواند راهنمای طراحی و اجرای مرحله‌های بعدی باشد.

۱.۱.۴ واحدها و جامعهٔ هدف. جامعهٔ هدف گردآیه‌ای از واحدهاست که می‌خواهیم نتایجی را در مورد آنها استخراج کنیم. لازم است در مشخص‌کردن هردوی آنها دقت کافی مبذول شود.

در ۱۸۷۹، مایکلسن علاقه‌مند بود سرعت نور سفید را زمانی که بین دو نقطهٔ نسبت به‌هم ثابت در خلأ حرکت می‌کند، تعیین کند. در این صورت، یک واحد عبارت از یک بار تراگسیل چنین نوری بین منبع و مقصد است که هر دو در خلأ قرار گرفته‌اند. جامعهٔ هدف عبارت است از کل چنین تراگسیلهایی، قبل و پس از ۱۸۷۹ و طیِ این سال.

برای برخی تحقیقات ممکن است تعریف واحدها یا گردایهٔ آنها برحسب فرایند مولد آنها ساده‌تر باشد. یک مثال، فرایند تولیدی است که واحدهایی را تحت شرایط خاص تولید می‌کند. در این موارد، اشاره به فرایند هدف در مقایسه با جامعهٔ هدف مناسب‌تر است.

۲.۱.۴ متغیرها. متغیرها خصوصیاتی از هر واحد در جامعه‌اند و می‌توانند مقادیر عددی یا رسته‌ای اختیار کنند. مقادیر متغیرها معمولاً از یک واحد به واحد دیگر تغییر می‌کند.

متغیر اولیهٔ مورد نظر، که آن را متغیر پاسخ می‌نامیم، سرعت نور وابسته به هر یک از چنین تراگسیلهایی است. متغیرهای بسیار دیگری وجود دارند، که آنها را متغیرهای توضیحی می‌نامیم که به هر واحد منضم شده‌اند، مانند فاصلهٔ بین دو نقطه، حرکت نقاط نسبت به یکدیگر، خصوصیات منبع، و غیره. در مسألهٔ مایکلسن، او هیچ علاقه‌ای به این متغیرهای دیگر نشان نمی‌دهد.

۳.۱.۴ صفات جامعه. صفات جامعه خلاصه‌هایی از اطلاعات هستند که مشخصه‌های جامعه را توصیف می‌کنند. به زبان رسمی، صفت عبارت از تابعی است که بر تمام جامعه اعمال می‌شود و از طریق مقادیر متغیر روی تک‌تک واحدها تعیین می‌شود.

صفت مورد نظر، در این بحث، سرعت متوسط نور در سرتاسر واحدهای جامعهٔ هدف است. این مثال از آن لحاظ غیرعادی است که باور بر این بود که سرعت نور سفید در خلأ ثابت است و بنابراین مقدار متغیر پاسخ از واحدی به واحد دیگر در این جامعهٔ هدف هیچ تغییری نمی‌کند.

صفات ممکن است عددی یا نموداری باشند. برای مثال، یک نمودار پراکنش که با استفاده از همهٔ واحدهای جامعهٔ هدف ساخته‌شده، یک صفت است. ضرایب خط کمترین توانهای دوم برازش داده شده به این نمودار پراکنش و تغییرات مانده‌ها حول این خط، صفات عددی هستند.

مشخص‌سازیِ روشن صفات مورد نظر می‌تواند بسیاری از مسائل را حل کند. پارادکس لرد[1]، آن‌گونه که در [۲۸] ارائه شده، با توجه به اینکه دربردارندهٔ دو صفت متفاوت است به‌آسانی قابل رفع است. (ر.ک. بحث ما در هند [۲۸]).

۴.۱.۴ جنبهٔ مسأله. جنبه، خصوصیتی است که ماهیت اساسی مسأله را مشخص کند و می‌تواند علّی، پیشگویانه، یا توصیفی باشد.

گوییم مسأله‌ای جنبهٔ علّی دارد اگر معطوف به تحقیق در ماهیت رابطه‌ای علّی بین یک متغیر توضیحی و یک متغیر پاسخ باشد، زبانی که قبلاً به‌کار بردیم به ما اجازه می‌دهد تا منظور از «رابطهٔ علّی» را دقیق‌تر بیان کنیم. منظور این است که تغییری در مقدار متغیر توضیحی (در حالی که بقیهٔ متغیرهای توضیحی ثابت نگه‌داشته شوند) برای همهٔ واحدهای جامعه منجر به تغییری در مقدار صفت مورد نظر می‌شود.

مسأله دارای جنبهٔ پیشگویانه است اگر هدف، پیشگویی مقادیر متغیرها دربارهٔ یک یا چند واحد در جامعهٔ هدف باشد. مسأله دارای جنبهٔ توصیفی است هرگاه هدف، برآورد، یا توصیف یک یا چند صفت در جامعه باشد.

در اینجا، مسأله دارای جنبهٔ توصیفی است؛ هدفْ برآورد یک صفت جامعه، یعنی متوسط سرعت نور است. اگر تلاش مایکلسن بر آن بود که نشان دهد سرعت نور می‌تواند، مثلاً، بر اثر حرکت دادن مقصد نسبت به منبع تغییر کند، در این صورت مسأله، جنبهٔ علّی پیدا می‌کرد (همان‌گونه که در آزمایش معروف مایکلسن و مورلی [۳۸] مشاهده می‌شود). کار مایکلسن را نمی‌توان به‌راحتی به‌عنوان مثالی از جنبهٔ پیشگویانه در نظر گرفت. یک مثال آشناتر پیش‌بینی فروش آینده از روی اطلاعات گذشته است.

در مرحلهٔ مسأله، تصمیم‌گیری دربارهٔ جنبهٔ مسأله به‌دلیل الزامات خاصی که ممکن است به برنامه تحمیل کند، دارای اهمیت است.

۲.۴ برنامه

هدف این مرحله، ایجاد برنامه‌ای برای گردآوری و تحلیل داده‌هاست. پیشنهاد ما این است که برنامه را به تعداد زیادی زیرمرحله تفکیک کنیم، که برخی از آنها به ناگزیر همپوشانی دارند. برای کاربرد مؤثر PPDAC، ممکن است تکرارهایی درون مرحله یا بین مرحله‌ها لازم باشد تا برنامهٔ رضایت‌بخشی فراهم آید.

۱.۲.۴ مشخص‌کردن واحدهای مورد مطالعه و جامعهٔ مورد مطالعه. جامعهٔ مورد مطالعه، گردآیهٔ واحدهای مورد مطالعه است که برای آنها مقادیر متغیرهای مورد نظر را شاید بتوان تعیین کرد. این مفهوم به‌طور مستقیم متناظر با «چارچوب» در نوشتگان مربوط به بررسیهای نمونه‌ای است. اختلاف بین صفات مورد نظر در جامعهٔ مورد مطالعه و صفات متناظر در جامعهٔ هدف، خطای مطالعه نامیده می‌شود. این اختلاف یک ارزیابی کمّی ساده از صفات عددی را میسر می‌سازد اما تعریف آن برای صفات نموداری ممکن است دشوار باشد.

واحدهای مورد مطالعه ممکن است بخشی از جامعهٔ هدف باشند یا نباشند، که در مطالعهٔ مایکلسن چنین هستند. به‌دلیل آنکه فاصله‌های لازم برای اندازه‌گیری سرعت نور بسیار بزرگ‌اند، واداشتن نور به اینکه حتی یک خلأ نسبی را بپیماید عملی نبود. (مایکلسن حتی در حال مرگ، مطالعه‌ای را برای اندازه‌گیری سرعت نور در لوله‌ای به‌طول یک مایل که در حد نزدیک به خلأ تخلیه شده بود، راهبری کرد [۳۹]). تمامی واحدها در مطالعهٔ مایکلسن، متضمن تراگسیل نور از میان هوا در یک مکان خاص در یک بازهٔ زمانی مشخص بود. منبع و مقصد در فاصلهٔ ثابتی از هم بودند و هر دو در جریان مطالعه ثابت باقی ماندند. مایکلسن تصمیم گرفت تراگسیل نور، را یک ساعت پیش از غروب آفتاب با یک ساعت پس از طلوع آفتاب در مدت چند روز در ماه ژوئن ۱۸۷۹ بررسی کند. تحت این قیود، او در انتخاب واحدهایی که روی آنها می‌توانست سرعت نور را تعیین کند، آزاد بود.

جامعهٔ مورد مطالعه و واحدهای مورد مطالعه در این مورد بسیار متفاوت با هدف است. مایکلسن دریافت که اندازه‌گیری سرعت نور در هوا ممکن است به‌خطای مطالعه منجر شود. او تصمیم گرفت خطا را با استفاده از عاملی مبتنی بر شاخص شکست هوا تصحیح کند. توجه داشته باشید که این تصحیح در خارج از قلمرو روش آماری قرار دارد، و مستلزم دانشی در زمینهٔ مورد مطالعه است.

روش آماری، با ملزم کردن پژوهشگران به در نظر گرفتن خطای مطالعه، تضمین می‌کند که ربط جامعهٔ مورد بررسی با جامعهٔ هدف در نظر گرفته شود. معیارهایی فراتر از خطای مطالعه، مانند هزینه، راحتی، و اخلاق نیز در تعیین جامعهٔ هدف، اهمیت دارند.

۲.۲.۴ انتخاب متغیرهای پاسخی که باید اندازه‌گیری شوند. برنامه باید شامل مرحله‌ای باشد که در آن تصمیم می‌گیریم چه متغیرهایی را روی هر واحدی که باید در نمونه انتخاب شود اندازه‌گیری کنیم. متغیرهای پاسخ، که تا حد امکان متناظرند با متغیرهایی که برای تعریف صفات مورد نظر در جامعهٔ هدف به کار می‌روند، باید به وضوح تعریف شوند.

مایکلسن نمی‌توانست با ابزارهای خود، سرعت نور را به‌ازای هر واحد به‌طور مستقیم اندازه‌گیری کند. در عوض، در هر مقداریابی، متغیرهای پاسخ زیر را برای محاسبهٔ سرعت نور اندازه‌گیری کرد:

۱. مقدار جابه‌جایی dی تصویر در شکاف ــ این مقدار به‌ازای هر واحد اندازه‌گیری شد.

۲. شعاع r، فاصلهٔ بین نشانهٔ عمودی شکاف و وجه جلویی آینهٔ چرخان ــ این مقدار همیشه برای واحدهایی که در یک دورهٔ زمانی یکسان اندازه‌گیری می‌شوند، تعیین نمی‌شد، بلکه هر روز صبح یا بعدازظهر، زمانی که واحدها نمونه‌گیری می‌شدند، اندازه‌گیری می‌شد.

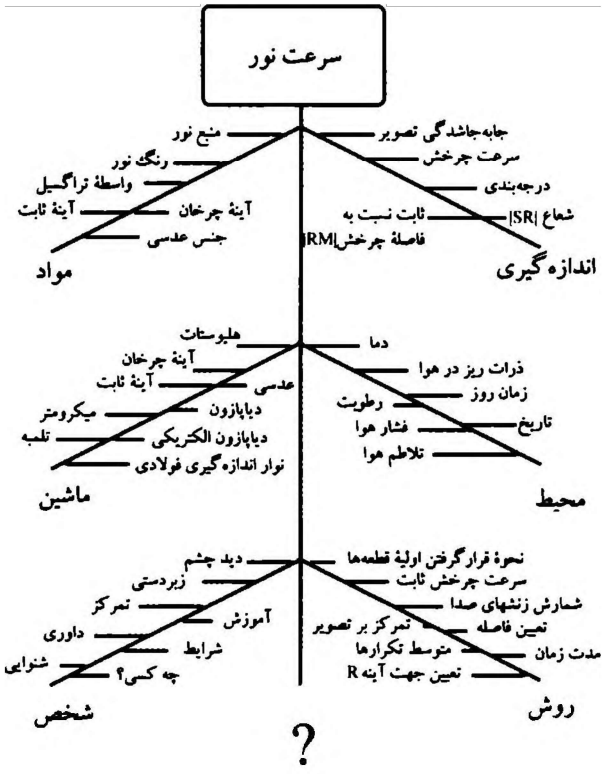
۳. تعداد زنشهای B در هر ثانیه بین دیاپازون الکتریکی Vt_2 و دیاپازون استاندارد Vt_2 ــ این متغیر یک‌بار برای هر مجموعهٔ ۱۰تایی از مقداریابیهای d مشخص شد.

۴. دمای T ــ یک‌بار برای هر مجموعهٔ ۱۰تایی از مقداریابیهای d اندازه‌گیری شد.

مقادیر متغیرهای پاسخ مطابق با فرمول پیشین ([۳۷]، ص. ۱۳۳) با چندین مقدار ثابت ترکیب شدند تا مقداری برای سرعت نور در هوا در دمای T ایجاد کنند.

۳.۲.۴ پرداختن به متغیرهای توضیحی. در این مرحله، لازم است همهٔ متغیرهای توضیحی ممکن را که شاید تغییرپذیری در پاسخ را تبیین کنند،

1. Lord



شکل ۹ نمودار استخوان ماهی

مشخص و به‌نحوی سازماندهی کنیم. یک سازماندهی سودمند نمودار استخوان ماهی است که برای مطالعهٔ مایکلسن در شکل ۹ نشان داده شده است.

تصمیم‌گیری در مورد اینکه چگونه در مرحلهٔ برنامه‌ریزی با متغیرهای توضیحی رفتار شود حائز اهمیت است. سه انتخاب وجود دارد. نخست می‌توان یک متغیر توضیحی را ثابت نگاه داشت یا محدود به دامنه‌ای از مقادیر کرد به‌طوری که جامعهٔ مورد مطالعه مقید شود. دوم، وقتی یک واحد در نمونه قرار داشته باشد، مقدار یک متغیر توضیحی را می‌توان به‌طور عمدی تعیین کرد یا برای استفادهٔ بعدی در تحلیل اندازه‌گیری کرد. سرانجام، متغیر توضیحی را می‌توان به‌طور کامل نادیده گرفت. و سومین مسیر عمل را در پیش گرفت در صورتی که از پیش بدانیم که متغیر توضیحی بی‌اهمیت است (برای مثال، تغییرپذیری را در متغیرهای پاسخ توضیح نمی‌دهد) یا این کار را بر اثر غفلت به‌دلیل عدم تشخیص حضور یا اهمیت متغیر انجام دهیم.

با بازبینی ابزارها و روش پیشنهادی مایکلسن، متغیرهای توضیحی بسیاری در جامعهٔ مورد مطالعهٔ مایکلسن وجود دارند که می‌توانند توضیح دهند که چرا سرعت نورِ تعیین‌شده براساس متغیرهای پاسخ اندازه‌گیری شده، از واحدی به واحد دیگر تغییر می‌کند. مایکلسن دریافت که در نظر گرفتن این متغیرها مهم است و او در برنامهٔ خود از هر سه جهت با آنها برخورد کرد. برای مثال، او فاصلهٔ بین آینهٔ چرخان تا آینهٔ ثابت را ثابت نگه‌داشت، و به این ترتیب جامعهٔ مورد مطالعه را بیشتر تهذیب کرد. او همچنین به‌طور عمدی زاویهٔ انحراف صفحهٔ چرخش آینهٔ چرخان را از $\arctan(۰٫۰۲)$ در مقدارییهای اولیه تا $\arctan(۰٫۰۱۵)$ در ۱۲ مجموعهٔ نهایی تغییر داد. او تعداد زیادی از متغیرهای توضیحی مانند مشاهده‌گر، روز، کیفیت تصویر، و امثال آنها را اندازه‌گیری کرد. وی فشار هوا را نادیده گرفت ([۳۷]، ص. ۱۴۱) زیرا «... خطا به واسطهٔ نادیده‌گرفتن ارتفاع جوی بیش از حد کوچک است».

اختلاف اولیه بین برنامه‌های آزمایشی و مشاهده‌ای در این مرحله پررنگ می‌شود. در یک برنامهٔ آزمایشی، مقادیر متغیرهای توضیحی متناظر با عاملهای مورد نظر توسط آزمایش‌کننده تعیین می‌شود و به واحدهای موجود در نمونه تخصیص داده می‌شود. طرح آزمایشی سنتی جزئیاتی را دربارهٔ این تخصیص در اختیار می‌گذارد. در برنامهٔ مشاهده‌ای، متغیرهای توضیحی به‌طور عمدی دستکاری نمی‌شوند، مگر با محدودکردن جامعهٔ مورد مطالعه یا قرارداد نمونه‌گیری. مقادیر اندازه‌گیری شدهٔ آنها در تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۴.۲.۴ فرایند اندازه‌گیری. یک عنصر اساسی برنامه، تصمیم‌گیری در مورد چگونگی اندازه‌گیری متغیرهای پاسخ و توضیحیِ انتخاب‌شده روی واحدهای نمونه است. برای تعیین مقدار هر متغیر روی یک واحد، ابزارهای اندازه‌گیری، روشها و افراد درگیر را فرایند اندازه‌گیری می‌نامیم. به محض اینکه فرایند اندازه‌گیری مشخص می‌شود، درک خصوصیات آن دارای اهمیت است. خطای اندازه‌گیری را اختلاف بین مقدار تعیین‌شدهٔ متغیر به کمک فرایند اندازه‌گیری و مقدار «واقعی» می‌نامیم. خطای اندازه‌گیری در جریان تحلیل و بنابراین به مرحلهٔ نتیجه‌گیری انتقال پیدا می‌کند.

در بسیاری از کاربردها، یک چرخهٔ کوچک‌تر جداگانهٔ PPDAC انجام می‌شود تا خصوصیات فرایند اندازه‌گیری در مطالعهٔ سرتاسری بررسی شود. خصوصیات فرایند اندازه‌گیری را در قالب اندازه‌گیری مکرر یک واحد مطالعهٔ یکسان تعریف می‌کنیم. دو مفهوم مربوط عبارت‌اند از اریبی اندازه‌گیری، صفتی از فرایند اندازه‌گیری (هدف) که خطای اندازه‌گیری سیستماتیک را توصیف می‌کند، و تغییرپذیری اندازه‌گیری، صفتی از فرایند اندازه‌گیری (هدف) که تغییر در خطای اندازه‌گیری از یک مقداریابی به بعدی را توصیف می‌کند.

مایکلسن توجه دقیقی به فرایندهای اندازه‌گیری که برای مطالعه‌اش مشخص کرده بود مبذول داشت و در مورد تحقیقاتی که به آنها مبادرت کرده بود به تفصیل بحث کرد تا اطمینان دهد که اریبی اندازه‌گیری و تغییرپذیری اندکی وجود دارد. برای مثال، اندازه‌گیری فاصلهٔ بین دو آینه را درنظر بگیرید ([۳۷]، ص. ۱۲۵). او برای اجتناب از اریبی، یک نوار فولادی را در برابر نسخهٔ وردمان[1] یارد استاندارد مدرج کرد. در این درجه‌بندی از یک دستگاه سنجش با دو میکروسکوپ استفاده شد که یکی ثابت بود و دیگری را می‌شد با پیچاندن پیچی به سمت میکروسکوپ ثابت پس و پیش برد. فاصلهٔ بین میکروسکوپها به اندازه یک یارد استاندارد تنظیم شده بود. سپس، نوار به‌گونه‌ای در دستگاه سنجش قرار می‌گرفت که ۰٫۱ فوت متناظر با نشانهٔ میکروسکوپ ثابت باشد و طول نخستین یارد نوار با پیچاندن پیچ تا زمانی که نشانهٔ میکروسکوپ قابل حرکت با ۳٫۱ فوت روی نوار متناظر باشد، تعیین می‌شود. این شیوه ۳۳ بار تکرار شد تا تعداد تجمعی گردشهای پیچ متناظر با طول نوار از ۰٫۱ تا ۹۹٫۱ فوت تعیین شود. دما ثبت شد تا جرح و تعدیلی (که نحوهٔ آن توضیح داده نشد) انجام پذیرد.

سپس، او مطالعهٔ جداگانه‌ای را برای تعیین فاصلهٔ متناظر با یک گردش پیچ میکروسکوپ قابل حرکت انجام داد. این کار با ۲۰ بار اندازه‌گیری تعداد گردشهایی که متناظر با ۱ میلی‌متر هستند و سپس متوسط‌گیری انجام شد. روشن است که مایکلسن توان متوسط‌گیری را در کاهش تغییرپذیری در

1. Wurdeman

اندازه‌گیری درک می‌کرد. با ترکیب‌کردن نتایج دو مطالعه و تنظیم دما، طول تصحیح‌شدهٔ نوار فولادی ۱۰۰ فوتی، ۱۰۰٫۰۰۶ فوت به‌دست آمد.

برای اندازه‌گیری فاصلهٔ بین دو آینه (تقریباً ۲۰۰۰ فوت)، برنامه این بود که نشان‌گذارهای سربی در امتداد زمین قرار داده شوند و از نوار برای اندازه‌گیری فاصله، از یکی از نشان‌گذارها تا بعدی، با تبعیت از یک شیوهٔ استاندارد به‌دقت تعریف شده استفاده شود. قرار بر این بود که نوار روی زمینی (تقریباً) صاف قرارگیرد و با استفاده از یک وزنهٔ ثابت ۱۰ پوندی هموار شود. این کار مایکلسن را بر آن داشت که کش آمدن نوار را بررسی کند.

برای تصحیح به‌خاطر کش‌آمدن، یک مطالعهٔ کوچک دیگر انجام شد که در آن نوار با استفاده از نیروی ۱۵ پوندی کش داده شد و میزان کش آمدن در بازه‌های ۲۰ فوتی برحسب میلی‌متر اندازه‌گیری شد. داده‌ها در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲

طول	میزان کش‌آمدن
۱۰۰	۸٫۰
۸۰	۵٫۰
۶۰	۵٫۰
۴۰	۳٫۵
۲۰	۱٫۵

تصحیح به‌خاطر کش‌آمدن نوار برای اندازه‌گیری فاصلهٔ بین آینه‌ها به‌صورت زیر است:

$$\text{تصحیح} = \frac{۸٫۰ + ۵٫۰ + ۵٫۰ + ۳٫۵ + ۱٫۵}{۳۰۰} \times ۱۰۰ \times \frac{۱۰}{۱۵}$$

با تبدیل آن به فوت و ضرب‌کردن در ۲۰، تصحیح کلی برای کش‌آمدن ۰٫۳۳+ فوت بود.

به زبانی که ما معرفی کرده‌ایم، برای این مطالعهٔ کوچک، جامعهٔ مورد مطالعه که از نیروی ۱۵ پوندی استفاده می‌کند با جامعهٔ هدفی که مستلزم یک نیروی ۱۰ پوندی است متفاوت است. همچنین به میانگین موزون عجیب، برای برآورد کش‌آمدن هر فوت از نوار توجه داشته باشید.

هدف از تصحیح برای میزان کش‌آمدن طول نوار، کاهش اریبی در اندازه‌گیری نهایی فاصلهٔ بین دو آینه بود. برای کاهش تغییرپذیری، این شیوه پنج بار تکرار شد (با تصحیحهایی برای دما روی هر کدام). اندازه‌گیریهای تصحیح شده از لحاظ دما از ۱۹۸۴٫۹۳ تا ۱۹۸۵٫۱۷ فوت تغییر می‌کردند. مایکلسن از متوسط پنج مقدار تعیین‌شده استفاده کرد و سپس تصحیحی برای کش‌آمدن و اریبی در نوار انجام داد تا اندازهٔ نهایی فاصلهٔ بین دو آینه را به‌دست آورد.

مطالعهٔ موردی، نمونهٔ بارزی از اقدام یک دانشمند دقیق برای کاستن خطای اندازه‌گیری در فرایند اندازه‌گیری‌اش با استفاده از دو رویکرد متفاوت است. او برمبنای مطالعات تجربی، اریبی را با مدرج کردن و تصحیح، و تغییرپذیری را با متوسط‌گیری، کاهش داد. مایکلسن در نتیجه‌گیری مقاله‌اش بحثی مفصل دربارهٔ تأثیرات اریبی اندازه‌گیری ممکن برروی برآورد سرعت نور آورده است. تشخیص اینکه داده‌های امروزی تا چه حدی بدون توجه کافی به ویژگیهای فرایند اندازه‌گیری تولید و تحلیل می‌شوند، هشداردهنده است. (و هیچ تعجبی هم ندارد زیرا در آموزش آمار توجه بسیار کمی به اندازه‌گیری می‌شود. نظر مور و مکاب [۴۰]، ص. ۲۲۳ را بشنوید: «اما، به طور کلی، پرسشهای مربوط به اندازه‌گیری به حوزه‌های واقعی علم تعلق دارند و نه به حوزهٔ روش شناختی آمار. بنابراین در کل، خواهیم پذیرفت که همهٔ متغیرهایی که با آنها کار می‌کنیم تعریفهای مشخصی دارند و به‌صورت رضایت‌بخشی اندازه‌گیری می‌شوند». دو مرجع سودمند در این زمینه، یودن [۵۴] و ویلر و لای‌دی [۵۲] هستند).

۵.۲.۴ قرارداد نمونه‌گیری. قرارداد نمونه‌گیری شیوه‌ای است که برای انتخاب واحدها از جامعهٔ مورد مطالعه‌ای که قرار است اندازه‌گیری شود به‌کار می‌رود. هدف قرارداد نمونه‌گیری انتخاب واحدهایی است که نمایندهٔ جامعهٔ مورد مطالعه با توجه به صفت(های) مورد نظر باشند. قرارداد نمونه‌گیری با چگونگی و زمان انتخاب واحدها و تعداد آنها سروکار دارد.

مایکلسن تصمیم گرفت تعدادی از واحدها را یک ساعت پس از طلوع آفتاب و یک ساعت پس از غروب آفتاب در چند روز بین ۵ ژوئن تا ۲ ژوئیه نمونه‌گیری کند. واحدها در گروههای ۱۰تایی، و در هر دورهٔ زمانی از یک تا ۶ گروه، انتخاب شدند. واحدها را مایکلسن و در دو مورد، دستیارانش ستوان نازرو و آقای کلاسون انتخاب کردند. در کل ۱۰۰۰ واحد نمونه‌گیری شدند. در طول کار نمونه‌گیری، در سایر متغیرهای توضیحی دخل و تصرفهایی انجام شد (سرعت چرخش آینه، زاویه میل آینهٔ چرخان، و غیره). مایکلسن اهمیت انتخاب واحدها با مقادیر مختلفی برای این متغیرهای توضیحی را تشخیص داد به‌طوری که توانست محقق کند که در سرعت اندازه‌گیری شدهٔ نور تأثیرگذار نیستند. برای مثال، بحث او دربارهٔ اریبی مشاهده‌گر در بخش نهایی مقاله را درنظر بگیرید. برای مواجهه با این موضوع، مجموعه‌ای دیگری از اندازه‌گیریها به‌وسیلهٔ مشاهده‌گر دیگری که از نتایج مایکلسن بی‌اطلاع بود، انجام شدند. اختلاف نظام‌مندی در دو مجموعهٔ مقادیر مشاهده نشد.

خطای نمونه‌گیری را اختلاف بین صفت مورد نظر در جامعه‌ای که مطالعه روی آن انجام می‌شود و صفت متناظر در نمونه می‌نامیم. نظیر فرایندهای اندازه‌گیری، ممکن است اریبی و تغییرپذیریِ مرتبط با قرارداد نمونه‌گیری نیز وجود داشته باشند. اینها ویژگیهای قرارداد، هستند و نه هیچ واحد نمونه‌گیری خاصی. مانند فرایند اندازه‌گیری، اریبی نمونه‌ای و تغییرپذیری نمونه‌ای برحسب ویژگیهای خطای نمونه‌گیری، زمانی که قرارداد نمونه‌گیری به‌طور مکرر بر روی جامعهٔ مورد مطالعه اِعمال می‌شود تعریف می‌شوند. این تکرارها همیشه فرضی‌اند که به این معنی است که می‌توانیم اریبی و تغییرپذیری نمونه‌گیری را تنها از طریق مدلی برای قرارداد نمونه‌گیری توصیف کنیم. بحث دربارهٔ این مدل را به بخش تحلیل موکول می‌کنیم اگرچه در کاربرد مؤثر PPDAC، مدلهای ریاضی برای قرارداد نمونه‌گیری بالقوه (و فرایندهای اندازه‌گیری) برای کمک به اموری چون تعیین اندازهٔ نمونه به‌کار می‌روند.

۶.۲.۴ قرارداد گردآوری داده‌ها. قرارداد گردآوری داده‌ها شیوه‌ای برای اجرای مرحله‌های برنامه به‌منظور گردآوری و ثبت داده‌هاست. این قرارداد با موضوعات مدیریتی و اجرایی مانند اینکه چه کسی، چه کاری را، و در چه زمانی انجام دهد سروکار دارد. این قرارداد همچنین شامل برنامه‌ای است برای تحت نظر داشتن داده‌ها در ضمن گردآوری آنها برای تضمین کیفیت کار.

مایکلسن هیچ نشانه‌ای از اینکه چه برنامه‌ای برای ثبت و کنترل داده‌هایش داشته، به‌دست نمی‌دهد. با این حال، دقت وسواس‌آمیزی که در جایی دیگر در طرح‌ریزی مطالعه‌اش نشان می‌دهد، این فکر را به‌ذهن می‌آورد که او دقت خاصی برای حصول اطمینان از اینکه داده‌ها ضمن اندازه‌گیری ثبت شوند، داشته است.

در تداول امروزی، این مرحله، علاوه‌بر چیزهای دیگر، شامل در نظر گرفتن ورود داده‌ها، ساختارهای پرونده، نرم‌افزار تحلیل و امثال آنها، به‌خصوص برای برنامه‌هایی است که در آنها مقدار بسیار زیادی داده باید گردآوری شود.

۳.۴ داده‌ها

هدف مرحلهٔ داده‌ها، اجرای برنامه و تضمین کیفیت داده‌ها به‌منظور آمادگی برای تحلیل است.

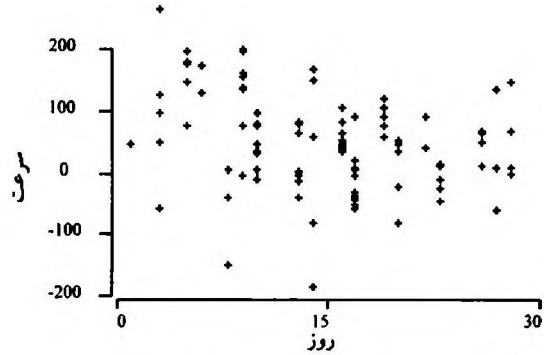
۱.۳.۴ برنامه را اجرا کنید. مایکلسن، تا جایی که می‌توان گفت، حاصل همهٔ اندازه‌گیریها روی ۱۰۰۰ واحدی را که گردآوری کرده بود، به‌کار برد. متأسفانه، او همهٔ ۱۰۰۰ نقطهٔ داده‌ای را گزارش نکرد، بلکه مقدار متوسط جابه‌جایی d را برای ۱۰ مقداریابی در هر مجموعه ارائه داد. همه متغیرهای توضیحی ثبت‌شده، در کل مجموعه به‌عنوان ثابت درنظر گرفته شدند.

۲.۳.۴ نظارت بر داده‌ها. در پایان مرحلهٔ برنامه، شناختی در مقادیر به‌وضوح نابهنجار برای متغیرها به‌دست آمده است. نظارت بر مقادیر ثبت‌شدهٔ داده‌ها در ضمن کار برای تضمین کیفیت آنها و ایجاد تغییراتی در شیوه‌ها در صورت نیاز، دارای اهمیت است.

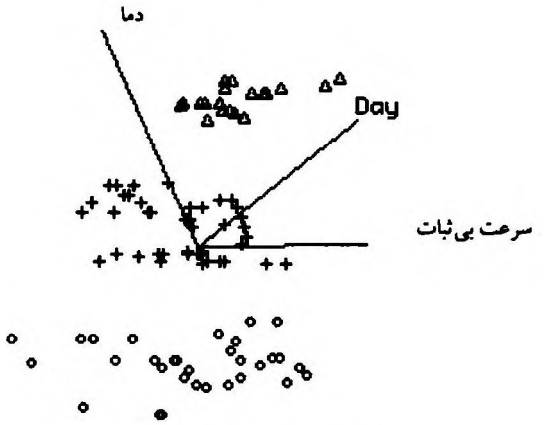
اگرچه مایکلسن ادعا می‌کند که دو ماه با ابزارهایش کار کرده است، عجیب این است که نخستین مجموعهٔ ثبت‌شده از اندازه‌گیریها با نور برق، در شب به‌دست آمده‌اند. او سپس این روش را پس از مشاهدهٔ اینکه «تصویر دیگر در غروب آفتاب واضح نیست و نور [برق] یکنواخت نبود» به نفع نور طبیعی کنار می‌گذارد ([۳۷]، ص. ۱۲۴). از این مطلب چنین برمی‌آید که نوعی نظارت برداده‌ها انجام شده است. او بررسی دیگر منابع خطا و اِعمال تغییرات برروی برنامه‌اش را، به مرور که پیش می‌رود، توصیف می‌کند.

اگر مایکلسن به منابع محاسباتی امروزی دسترسی می‌داشت، این احتمال وجود داشت که حداقل مقداریابیهای سرعت را روزبه‌روز بررسی کند. در شکل ۱۰ نموداری از مقادیر ثبت‌شدهٔ سرعت نور در هوا در برابر روز آمده است. از آنجا که مقادیر بسیار زیادی به‌صورت یکسان ثبت شده‌اند، مقادیر رسم شده، نوفهٔ تصادفی یکنواختی در دامنهٔ ۴ تا ۴ دارند، که تأثیر بصری مطلوب آن، پراکندن نقاط در نمودار است.

رابطهٔ کاهشی آشکاری وجود دارد که فقط وقتی سه مقدار دور افتاده نادیده گرفته شوند، قوت بیشتری دارد. موارد استثنایی قابل توجه در برابر این رابطه، مقادیری هستند که در سه روز آخر به‌دست آمده‌اند. با بررسی داده‌ها درمی‌یابیم که مایکلسن در سومین روز به‌آخر مانده، آینهٔ چرخان R را وارونه کرده است. پس از گذشت دو روز در این وضعیت، دوباره آن را وارونه کرده تا به وضعیت اولیه دست یابد. این تغییر دادنها، مسلماً بر فرایند تأثیر گذاشته و پیش از آن زمان، فرایند مطالعه ظاهراً گرایش روبه پایین داشته است. به‌نظر نمی‌رسد که مایکلسن متوجه این مطلب شده باشد.



شکل ۱۰ سرعت تعدیل‌شدهٔ نور در برابر روز



شکل ۱۱ سه خوشه در فضای سه‌بعدی

۳.۳.۴ بازبینی داده‌ها. در اینجا سازگاری درونی داده‌ها به‌صورت کلی، دوباره با هدف تضمین کیفیت داده‌ها برای تحلیل بعدی، ارزیابی می‌شود. داده‌ها از لحاظ وجود الگوها و جنبه‌های دور از انتظار بازبینی می‌شوند.

با آن همه متغیر که ثبت می‌شوند، نمودارهای ممکن زیادی وجود دارند که الگوهای جالبی را در داده‌ها نشان می‌دهند. علاوه‌بر روندی که در شکل ۱۰ مشخص شد، با یک بازرسی سریع نکات بسیار بیشتری آشکار می‌شود. برای مثال، نمودار پراکنش سه‌بعدی از روز، دما، و سرعت بی‌ثبات را می‌توان دوران داد و به‌صورتی که در شکل ۱۱ نشان داده شده درآورد که سه خوشهٔ متمایز را آشکار می‌کند.

به محض اینکه الگوها مشخص شدند، سه تصمیم می‌توان گرفت: نادیده گرفتن آنها؛ دوباره انجام دادن مراحل برنامه و داده‌ها؛ یا با احتمال خیلی بیشتر، انتقال اطلاعات به مرحلهٔ تحلیل.

مایکلسن سازگاری درونی داده‌ها را در مقاله‌اش مورد سؤال قرار نمی‌دهد.

۴.۳.۴ ذخیرهٔ داده‌ها برای تحلیل بعدی. مقادیر مربوط به سرعت اندازه‌گیری‌شدهٔ نور در هوا برای هر مجموعه و متغیرهای پاسخ و توضیحی وابسته در جدولهای ۳ و ۴ آورده شده‌اند. جدول ۵ ستونهای جدول را توصیف می‌کند. امروزه گاهی دقت بیشتری در انتخاب واسطه‌ها و تعریف و سازماندهی ساختارهای داده‌ای به‌کار رفته در ذخیره‌سازی داده‌ها لازم است.

جدول ۳ داده‌های مایکلسن: نخستین ۵۰ مشاهده

سرعت	زنش	تصحیح	زمان	اختلاف	کیفیت	جابه‌جایی	تصویر	شعاع	چرخشها	پیچ	شکاف	زمان-دور	دما	تبصره‌ها
50	1.423	-0.132	1	0.17	3	114.55	114.85	28.672	257.36	0.99614	0.300	Night	76	1
-60	1.533	-0.084	3	0.10	2	114.56	114.64	28.655	257.52	0.99614	0.074	PM	72	2
100	1.533	-0.084	3	0.08	2	114.50	114.58	28.647	257.52	0.99614	0.074	PM	72	2
270	1.533	-0.084	3	0.12	2	85.84	85.91	28.647	193.14	0.99598	0.074	PM	72	2
130	1.533	-0.084	3	0.07	2	85.89	85.97	28.650	193.14	0.99598	0.074	PM	72	2
50	1.533	-0.084	3	0.07	2	114.53	114.61	28.650	257.42	0.99614	0.074	PM	72	2
150	1.533	-0.216	5	0.07	3	114.47	114.54	28.658	257.39	0.99614	0.074	PM	83	2
180	1.533	-0.216	5	0.10	3	114.46	114.54	28.658	257.39	0.99614	0.074	PM	83	2
180	1.533	-0.216	5	0.08	3	114.47	114.57	28.662	257.39	0.99614	0.074	PM	83	2
80	1.533	-0.216	5	0.06	3	114.50	114.57	28.660	257.39	0.99614	0.074	PM	83	2
200	1.533	-0.216	5	0.13	2	114.53	114.61	28.678	257.39	0.99614	0.074	PM	83	2
180	1.517	-0.300	6	0.11	2	114.52	114.60	28.685	257.29	0.99614	0.074	PM	90	
130	1.517	-0.300	6	0.08	2	114.54	114.62	28.685	257.29	0.99614	0.074	PM	90	
-150	1.450	-0.072	8	0.09	2	114.74	114.81	28.690	257.45	0.99614	0.074	AM	71	
-40	1.450	-0.072	8	0.05	2	114.70	114.78	28.690	257.45	0.99614	0.074	AM	71	
10	1.450	-0.072	8	0.09	1	114.68	114.76	28.690	257.45	0.99614	0.074	AM	71	
200	1.500	-0.084	9	0.09	3	112.56	112.64	28.172	257.49	0.99614	0.074	AM	72	
200	1.500	-0.084	9	0.10	3	112.56	112.63	28.172	257.49	0.99614	0.074	AM	72	
160	1.500	-0.084	9	0.08	2	112.57	112.65	28.172	257.49	0.99614	0.074	AM	72	
160	1.517	-0.168	9	0.06	3	112.56	112.82	28.178	257.42	0.99614	0.260	PM	79	
160	1.517	-0.168	9	0.13	3	112.56	112.82	28.178	257.42	0.99614	0.260	PM	79	
140	1.517	-0.168	9	0.07	3	112.57	112.83	28.178	257.42	0.99614	0.260	PM	79	
160	1.517	-0.168	9	0.06	3	112.56	112.82	28.178	257.42	0.99614	0.260	PM	79	
140	1.517	-0.168	9	0.11	3	112.57	112.83	28.178	257.42	0.99614	0.260	PM	79	
80	1.517	-0.168	9	11	3	113.15	113.41	28.152	258.70	0.99614	0.260	PM	79	3
0	1.517	-0.168	9	6	3	111.88	112.14	28.152	255.69	0.99614	0.260	?	79	4
50	1.500	0.012	10	0.12	1	112.57	112.83	28.152	257.58	0.99614	0.260	AM	64	
80	1.517	0.012	10	0.05	1	112.57	112.83	28.152	257.60	0.99614	0.260	AM	64	
100	1.517	0.000	10	0.11	1	112.55	112.81	28.152	257.59	0.99614	0.260	AM	65	
40	1.517	-0.012	10	0.09	1	112.57	112.83	28.152	257.57	0.99614	0.260	AM	66	
30	1.517	-0.024	10	0.12	1	112.57	112.83	28.152	257.56	0.99614	0.260	AM	67	
-10	1.517	-0.228	10	0.06	1	112.52	112.78	28.159	257.36	0.99614	0.260	PM	84	5
10	1.500	-0.240	10	0.08	1	112.50	112.76	28.159	257.33	0.99614	0.260	PM	85	5
80	1.483	-0.228	10	0.08	1	112.46	112.72	28.159	257.32	0.99614	0.260	PM	84	5
80	1.483	-0.228	10	0.09	1	112.47	112.73	28.159	257.32	0.99614	0.260	PM	84	
30	1.483	-0.228	10	0.09	1	112.49	112.75	28.159	257.32	0.99614	0.260	PM	84	
0	1.517	0.036	13	0.09	2	112.59	112.85	28.149	257.62	0.99614	0.260	AM	62	
-10	1.500	0.024	13	0.06	2	112.58	112.84	28.149	257.59	0.99614	0.260	AM	63	
-40	1.500	0.012	13	0.07	1	112.59	112.85	28.149	257.58	0.99614	0.260	AM	64	
0	1.500	-0.144	13	0.07	3	112.54	112.80	28.157	257.43	0.99614	0.260	PM	77	6
80	1.500	-0.144	13	0.08	3	112.51	112.77	28.157	257.43	0.99614	0.260	PM	77	6
80	1.500	-0.144	13	0.11	3	112.51	112.77	28.157	257.43	0.99614	0.260	PM	77	6
80	1.500	-0.144	13	0.09	3	112.51	112.77	28.157	257.43	0.99614	0.260	PM	77	6
60	1.500	-0.144	13	0.08	3	112.52	112.78	28.157	257.43	0.99614	0.260	PM	77	6
-80	1.500	0.084	14	0.07	1	112.64	112.90	28.150	257.65	0.99614	0.265	AM	58	
-80	1.500	0.084	14	0.10	1	112.64	112.90	28.150	257.65	0.99614	0.265	AM	58	
-180	1.483	0.072	14	0.07	1	112.66	112.92	28.150	257.62	0.99614	0.265	AM	59	
60	1.483	-0.120	14	0.09	2	112.52	112.79	28.158	257.43	0.99614	0.265	PM	75	
170	1.483	-0.120	14	0.10	2	112.48	112.75	28.158	257.43	0.99614	0.265	PM	75	
150	1.483	-0.120	14	0.08	2	112.49	112.76	28.158	257.43	0.99614	0.265	PM	75	

جدول ۴ داده‌های مایکلسن: دومین ۵۰ مشاهده

سرعت	زنش	تصحیح	زمان	اختلاف	کیفیت	جابه‌جایی	تصویر	شعاع	چرخشها	پیچ	شکاف	زمان-دور	دما	تبصره‌ها
80	1.517	0.063	16	0.07	3	112.67	112.94	28.172	257.65	0.99614	0.265	AM	60	
110	1.517	0.048	16	0.09	3	112.65	112.92	28.172	257.63	0.99614	0.265	AM	61	
50	1.517	0.036	16	0.07	2	112.67	112.94	28.172	257.62	0.99614	0.265	AM	62	
70	1.517	0.024	16	0.03	2	112.66	112.93	28.172	257.61	0.99614	0.265	AM	63	
40	1.450	-0.156	16	0.13	2	133.21	133.48	33.345	257.36	0.99627	0.265	PM	78	
40	1.500	-0.168	16	0.09	2	133.23	133.49	33.345	257.40	0.99627	0.265	PM	79	
50	1.500	-0.180	16	0.07	2	133.22	133.49	33.345	257.39	0.99627	0.265	PM	80	
40	1.483	-0.168	16	0.13	2	133.24	133.50	33.345	257.39	0.99627	0.265	PM	79	
40	1.483	-0.168	16	0.06	2	133.22	133.49	33.345	257.38	0.99627	0.265	PM	79	
40	1.483	-0.168	16	0.10	2	133.22	133.49	33.345	257.38	0.99627	0.265	PM	79	
90	1.533	0.048	17	0.12	2	133.29	133.56	33.332	257.65	0.99627	0.265	AM	61	
10	1.533	0.036	17	0.08	2	133.31	133.58	33.332	257.64	0.99627	0.265	AM	62	
10	1.533	0.024	17	0.09	2	133.31	133.57	33.332	257.63	0.99627	0.265	AM	63	
20	1.533	0.012	17	0.11	2	133.30	133.57	33.332	257.61	0.99627	0.265	AM	64	
0	1.533	0.000	17	0.13	2	133.30	133.56	33.332	257.60	0.99627	0.265	AM	65	
-30	1.533	-0.180	17	0.06	3	133.21	133.48	33.330	257.42	0.99627	0.265	PM	80	
-40	1.500	-0.192	17	0.10	3	133.19	133.46	33.330	257.38	0.99627	0.265	PM	81	
-60	1.500	-0.204	17	0.05	3	133.20	133.46	33.330	257.37	0.99627	0.265	PM	82	
-50	1.517	-0.204	17	0.08	3	133.20	133.46	33.330	257.38	0.99627	0.265	PM	82	
-40	1.500	-0.192	17	0.08	3	133.19	133.46	33.330	257.38	0.99627	0.265	PM	81	
110	1.542	-0.288	19	0.08	3	133.16	133.43	33.345	257.32	0.99627	0.265	PM	89	
120	1.550	-0.288	19	0.06	3	133.15	133.42	33.345	257.33	0.99627	0.265	PM	89	
90	1.550	-0.300	19	0.09	3	133.17	133.43	33.345	257.32	0.99627	0.265	PM	90	
60	1.533	-0.300	19	0.07	3	133.16	133.43	33.345	257.30	0.99627	0.265	PM	90	
80	1.517	-0.300	19	0.07	3	133.16	133.42	33.345	257.29	0.99627	0.265	PM	90	
-80	1.517	-0.084	20	0.15	3	133.20	133.47	33.319	257.50	0.99627	0.265	AM	72	
40	1.517	-0.096	20	0.04	3	133.17	133.44	33.319	257.49	0.99627	0.265	AM	73	
50	1.517	-0.108	20	0.11	3	133.16	133.42	33.319	257.48	0.99627	0.265	AM	74	
50	1.517	-0.120	20	0.06	3	133.16	133.42	33.319	257.47	0.99627	0.265	AM	75	
-20	1.517	-0.132	20	0.10	3	133.18	133.44	33.319	257.45	0.99627	0.265	AM	76	
90	1.508	-0.252	22	0.05	2	133.15	133.42	33.339	257.33	0.99627	0.265	PM	86	
40	1.508	-0.252	22	0.08	2	133.17	133.44	33.339	257.33	0.99627	0.265	PM	86	
-20	1.483	-0.096	23	0.11	3	133.22	133.49	33.328	257.46	0.99627	0.265	AM	73	
10	1.483	-0.108	23	0.06	3	133.20	133.47	33.328	257.44	0.99627	0.265	AM	74	
-40	1.483	-0.120	23	0.09	3	133.21	133.47	33.328	257.43	0.99627	0.265	AM	75	
10	1.467	-0.120	23	0.09	3	133.19	133.45	33.328	257.42	0.99627	0.265	AM	75	
-10	1.483	-0.132	23	0.08	3	133.20	133.47	33.328	257.42	0.99627	0.265	AM	76	
10	1.483	-0.132	23	0.10	3	133.19	133.45	33.328	257.42	0.99627	0.265	AM	76	
10	1.500	-0.240	26	0.05	2	99.68	35.32	33.274	193.00	0.99645	135.000	PM	85	7
50	1.508	-0.252	26	0.06	2	99.67	35.34	33.274	193.00	0.99645	135.000	PM	86	7
70	1.508	-0.252	26	0.10	2	99.66	35.34	33.274	193.00	0.99645	135.000	PM	86	7
70	1.517	-0.252	26	0.09	2	99.66	35.34	33.274	193.00	0.99645	135.000	PM	86	7
10	1.500	-0.216	27	0.07	2	132.98	2.17	33.282	257.35	0.99627	135.145	PM	83	7
-60	1.500	-0.228	27	0.09	2	133.00	2.15	33.282	257.34	0.99627	135.145	PM	84	7
10	1.467	-0.252	27	0.06	2	133.01	2.14	33.311	257.28	0.99627	135.145	PM	86	7
140	1.467	-0.252	27	0.08	2	133.00	2.14	33.311	257.28	0.99627	135.145	PM	86	7
150	1.450	-0.252	28	0.05	3	99.45	99.85	33.205	192.95	0.99606	0.400	PM	86	8
0	1.450	-0.252	28	0.03	3	66.34	66.74	33.205	128.63	0.99586	0.400	PM	86	8
10	1.467	-0.252	28	0.07	3	47.96	50.16	33.205	96.48	0.99580	0.400	PM	86	8
70	1.450	-0.240	28	0.06	3	33.17	33.57	33.205	64.32	0.99574	0.400	PM	85	8

۴.۴ تحلیل

منظور از مرحلهٔ **تحلیل** استفاده از داده‌ها و اطلاعات گردآوری‌شده از **برنامه** برای مواجهه با سؤالاتی است که در مرحلهٔ **مسأله** فرمول‌بندی می‌شوند. شکل و طرز **تحلیل** مبتنی‌بر بسیاری چیزها از جمله موارد زیر است: پیچیدگی **مسأله** و **برنامه**؛ مهارت تحلیل‌گر؛ میزان تغییرپذیری ایجاد شده به‌وسیلهٔ **برنامه**؛ و مخاطبان مورد نظر مطالعه. ما پیشنهاد می‌کنیم که این مرحله به‌طور کلی به شکل زیر تفکیک شود:

- مدلی برای **برنامه** و **داده‌ها** بسازید؛
- مدل را برازش دهید و ارزیابی کنید؛
- از مدل نهایی برای پرداختن به **مسأله** استفاده کنید.

مدل آماریْ رفتار متغیرهای پاسخ اندازه‌گیری شده برای واحدهای موجود در نمونه را توصیف می‌کند در صورتی که به‌طور مکرر مرحلهٔ **داده‌ها** را مطابق **برنامه** اجرا کرده باشیم. مدل، ویژگیهای جامعهٔ مورد مطالعه، قرارداد نمونه‌گیری و دستگاههای اندازه‌گیری به‌کاررفته را بازتاب می‌دهد، و تأثیر متغیرهای توضیحی اندازه‌گیری‌شده روی متغیر پاسخ را نیز در بردارد.

به محض اینکه یک مدل اولیه در نظر گرفته می‌شود، می‌توان با استفاده از ابزارهای برازش و ارزیابی مدل اصلاحاتی در مدل به عمل آورد. این فرایند تکراری تا زمانی که مدل با ساختار درونی داده‌ای گردآوری شود و اطلاعات معلوم دربارهٔ قرارداد نمونه‌گیری و دستگاههای اندازه‌گیری سازگار شود، ادامه می‌یابد. مدل نهایی برای برآورد صفات مورد نظر در جامعهٔ مورد مطالعه و ارزیابی عدم قطعیتِ ناشی از خطاهای نمونه‌گیری و اندازه‌گیری به‌کار می‌رود.

مایکلسن تحلیل خود را به محاسبهٔ میانگین ۱۰۰ سرعت اندازه‌گیری‌شده در هوا، یک خلاصهٔ عددی و برآورد خطای ممکن، یک شیوهٔ رسمی، محدود نمود. خطا بر مبنای سناریوی بدترین وضع ممکن است که در آن خطاهای محتملِ مبتنی بر انحراف معیارهای برآوردشدهٔ مقداریابیهای مکرر و حداکثر خطای سیستماتیکِ مبتنی‌بر دانش مایکلسن از ابزارهایش و تابعهای به‌کار رفته برای محاسبهٔ سرعت نور از روی متغیرهای پاسخ اندازه‌گیری شده، با هم ترکیب شوند. برای بحث بیشتر دربارهٔ کاربرد خطای محتمل، ر.ک. [۴۸].

وی پس از انجام تعدیل کوچکی برای دما (در هوا) برمبنای اثرات تغییر دما بر روی سیستمهایی که برای تعیین ϕ به‌کار می‌روند، زاویهٔ انحراف، و تصحیح برای خلأ، تحلیل خود را با گزارش سرعت نور در خلأ (کیلومتر در هر ثانیه) به‌صورت زیر به پایان می‌آورد:

$$۲۹۹۹۴۴ \pm ۵۱.$$

اگرچه مایکلسن به‌طور رسمی مدلی را پیشنهاد نکرد، بررسیهای متعددی انجام داد که معادل با جنبه‌های ارزیابی مدل است ([۳۷]، ص. ۱۳۹). برای مثال، او برای فهمیدن اینکه آیا سرعت نور اندازه‌گیری شده به‌طور سیستماتیک تحت تأثیر وضوح تصویر، یعنی یک متغیر توضیحی، قرار دارد یا نه، سرعتهای متوسط طبقه‌بندی‌شده براساس وضوح تصویر را محاسبه و با هم مقایسه کرد. این بررسی برای بسیاری دیگر از متغیرهای توضیحی تکرار شد.

امروزه می‌توانیم از روشهای گرافیکی متناظر استفاده کنیم. شاید سرعت به برخی از متغیرهای توضیحی وابسته باشد که در محاسبهٔ آن ملحوظ نشده‌اند. مثلاً آیا تأثیر دما به‌صورت موفقیت‌آمیزی از مقداریابیها حذف شده است؟

جدول ۵ داده‌های مایکلسن: کلید متغیرها

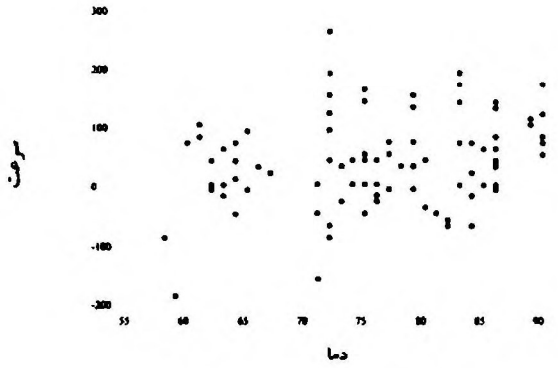
سرعت	سرعت کدگذاری شدهٔ نور در هوا؛ ۲۹۹۸۰۰ را به آن اضافه کنید تا مقیاس کیلومتر بر ثانیه به‌دست آید
زنش	تعداد زنشها در هر ثانیه بین دیاپازونها
تصحیح	تصحیح برای دما در دیاپازون استاندارد برحسب زنش در هر ثانیه
زمان	روز انجام آزمایش (۵ ژوئن= ۱)
اختلاف	اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار چرخشها
کیفیت	کیفیت تصویر I؛ وضوح بیشتر، کیفیت بالاتر (۳ = خوب، ۱ = ضعیف)
جابه‌جایی	جابه‌جایی تصویر I از شکاف S در مقیاس میکرومتر
تصویر	انحراف میکرومتری موضع تصویر
شعاع	شعاع اندازه‌گیری برحسب فوت
چرخشها	تعداد چرخشها در هر ثانیه
پیچ	مقدار یک گردش پیچ برحسب میلی‌متر
شکاف	شکاف میکرومتری
زمان-روز	زمان مشاهده در روز ثبت‌شده (۱ = AM ساعت پس از طلوع آفتاب، ۱ = PM ساعت قبل از غروب آفتاب)
دما	دمای هوا برحسب درجهٔ فارنهایت
تصره‌ها	۱. نور الکتریکی ۲. قالب انحنایافته در زاویه‌های مختلف ۳. تنظیم میکرومتر و نوسانهای شمارش‌شده ۴. نوسانهای تصویر آینهٔ چرخان، احتمالاً PM ۵. مقادیر ثبت‌شده به‌وسیلهٔ ستوان نازرو ۶. مقادیر ثبت‌شده به‌وسیلهٔ آقای کلاسون ۷. آینهٔ وارونه‌شده ۸. آینهٔ برخاسته

نمودار سرعت در برابر دما در شکل ۱۲ نشان داده شده است. یک روند نسبتاً ضعیف افزایشی در نمودار مشهود است. با این حال، حتی این روند به‌شدت به سه نقطه در گوشهٔ پایینی سمت چپ وابسته است و بنابراین محتمل نیست که نتیجه را به‌طور معنی‌داری تغییر دهد. باز هم مقادیر یکسان اندکی پس و پیش شده‌اند تا روی هم نیفتند.

عجیب است که مایکلسن در مقایسهٔ متوسطهای گروهی، اندازه‌گیریهای صبح و بعدازظهر را با هم مقایسه نکرد و همان‌گونه که در مرحلهٔ **داده‌ها** بررسی کردیم، هیچ تلاشی نیز نکرد که اندازه‌گیری را به روز ربط دهد. روابط جالب دیگری هم با استفاده از این داده‌ها می‌توان یافت؛ کندوکاو بیشتر را به خواننده واگذار می‌کنیم.

توجه کنید که اغلب تمایز روشنی بین بررسیهای سازگاری درونی در مرحلهٔ داده‌ها و بررسیهای مدل در مرحلهٔ تحلیل وجود ندارد. همان نمودارها یا خلاصه‌ها ممکن است در هر دو ظاهر شوند.

امروزه می‌توانیم هر تعداد روش را برای خلاصه‌کردن، مدل‌بندی و تحلیل داده‌ها مدنظر قرار دهیم. برای مثال، می‌توانیم یک بافت‌نگار تشکیل دهیم و



شکل ۱۲ سرعت تعدیل‌شدهٔ نور در برابر دما

یک خلاصهٔ ۵ عددی از ۱۰۰ مقدار گزارش‌شده را محاسبه کنیم. برمبنای یک مدل گاوسی، که به‌نظر می‌رسد به‌خوبی به داده‌ها ببرازد، یک بازهٔ اطمینان ۹۵٪ برای میانگین عبارت است از

$$۲۹۹۸۵۲٫۳ \pm ۱۵٫۷۰$$

با تصحیح نسبت به دما، به تبعیت از مایکلسن، و تبدیل به خلأ، یک بازهٔ اطمینان ۹۵٪ برای سرعت نور (کیلومتر بر ثانیه) در خلأ عبارت است از

$$۲۹۹۹۴۴٫۳ \pm ۱۵٫۷۰$$

توجه کنید که بازهٔ اطمینان بسیار کوتاه‌تر از آن است که مایکلسن گزارش کرده بود؛ او هم تغییرپذیری و هم اریبی ممکن را در محاسباتش گنجانده بود. می‌توان مدل‌بندیها، تحلیلها، و ارزیابیهای پیچیدهٔ دیگری از مدل انجام داد. مورد بالا برای نشان دادن زیرمرحله‌های درون مرحلهٔ تحلیل PPDAC به‌کار می‌رود. و باز، این شاهدی بر دقت مایکلسن به‌عنوان یک دانشمند است که تحلیل او به‌دقت با آنچه می‌توان امروزه انجام داد، برابری می‌کند.

خروجی دیگر این مرحله مشاهدات جالبی هستند (مانند نقاط دورافتاده ممکن که در بحث شکلهای ۱۰ و ۱۲ به آنها اشاره شد) که ممکن است راههای خوبی برای تحقیقات آینده باشند.

۵.۴ نتیجه‌گیری

مقصود از مرحلهٔ نتیجه‌گیری این است که نتایج مطالعه به زبان مسأله گزارش شوند. در این مرحله باید خلاصه‌های دقیق عددی و نمودارهای لازم را برای واضح‌سازی بحث به‌کار برد و از اصطلاحات فنی آماری پرهیز کرد. به‌علاوه، نتیجه‌گیری، فرصتی برای بحث دربارهٔ قوت و ضعف برنامه، داده‌ها، و تحلیل به‌خصوص با توجه به خطاهای ممکن پدید می‌آورد. رده‌بندی خطاها به‌صورتی که در بالا عرضه کردیم، ساختاری برای این بحث فراهم می‌کند.

در مطالعهٔ مایکلسن نتیجه‌گیری او گزارش سرعت نور (کیلومتر بر ثانیه) در خلأ به‌صورت ۲۹۹۹۴۴ ± ۵۱ است. او سپس، دربارهٔ «ایراد»های ممکن از جمله، در بین مواردی که در بالا به آنها اشاره نشده است، دربارهٔ عدم قطعیت قوانین با بازتاب و انکسار در محیط در چرخش سریع، تأخیری که به واسطهٔ بازتاب ایجاد می‌شود، معایب عدسی، تغییرپذیری دوره‌ای در اصطکاک در محورهای آینهٔ چرخان، و تغییر سرعت چرخش بحث می‌کند. در هر مورد، او به برنامه و ارزیابی مدل باز می‌گردد تا نشان دهد که ایراد مورد نظر اثر کمی در برآورد سرعت نوری می‌توانسته داشته باشد.

ما به زبان امروزی خود، با مقدار سرعت گزارش‌شدهٔ نور مبتنی‌بر بازهٔ اطمینان آغاز می‌کنیم. به بحث ارائه‌شده توسط مایکلسن، خطای ممکنِ ناشی از اختلاف بین جامعهٔ هدف و جامعهٔ مورد مطالعه را اضافه می‌کنیم. در مقاله هیچ دلیلی برای اینکه چرا چنین خطای نسبتاً بزرگی در سرعت گزارش شدهٔ نهایی مایکلسن وجود دارد، نمی‌توان یافت. توجه کنید که مقدار واقعی تعیین‌شده، ۲۹۹۷۹۲٫۴۵۸ کیلومتر بر ثانیه، کاملاً خارج از بازهٔ اطمینان و بازهٔ مقادیر قابل پذیرش مایکلسن است.

۶.۴ بحث

غالباً آمار را تنها به‌عنوان مجموعه‌ای از ابزارهای تحلیل ارائه کرده‌اند. اما همان‌گونه که ساختار بالا روشن می‌کند، تحلیل تنها چهارمین مرحله در رشته‌ای پنجگانه از مراحل است که روش آماری را تشکیل می‌دهند. سه مرحله‌ای که مقدم بر تحلیل هستند در این روش اهمیت دارند ــ کل ساختار است که توازن کامل را ایجاد می‌کند. روش آماری به‌صورت یک کل، نه تنها در تحقیقات تجربی همیشه حی و حاضر است بلکه اجتناب‌ناپذیر است.

نیاز به این توازن هیچ‌جا آن قدر آشکار نیست که در آموزش آمار. طی هفت سال گذشته درسهای گوناگونی را در سطوح متفاوتی با استفاده از ساختار PPDAC در هستهٔ درس، آموزش داده‌ایم. دریافته‌ایم که این ساختار علاوه‌بر ایجاد توازن در روش، ما را وادار به‌بحث دربارهٔ مسائلی واقعی می‌کند که می‌توان آنها را از گسترهٔ متنوعی از زمینه‌های کاربردی ـ صنعتی، علمی، فناوری، اجتماعی، و تجاری استخراج کرد. روش آماری را می‌توان تقریباً در هر سطحی از مهارت ریاضی آموزش داد. مسائل واقعی و جالبی را می‌توان بدون توسل به ابزارهای تحلیلی پیچیده، مجموعه‌های بزرگ داده یا حتی منابع محاسباتی عمده حل و فصل کرد. آن چه مورد نیاز است، متن و زمینه‌ای غنی برای هر مثال به‌منظور توصیف جزئیات درون هر ساختار است؛ این مثالها قابلیت تبدیل به بررسیهای موردی[1] را دارند.

در دروس مقدماتی خود، با گذشت زمان دریافته‌ایم که هر چه وقت بیشتری به مراحلی غیر از تحلیل اختصاص یابد از پیچیدگی روشهای تحلیل کاسته می‌شود. مثلاً در امتحانات نهایی، تنها حدود یک سوم کل نمره را به سؤالاتی اختصاص داده‌ایم که مستقیماً به مرحلهٔ تحلیل مربوط‌اند. اهداف اصلی درس مقدماتی ما این بوده است که نخست نیاز فراگیر به روشهای تجربی درک شود و سپس روش آماری در زمینه‌های متنوع و نحوهٔ استفاده از آن شناسانده شود.

ساختار و زبان معرفی‌شده را می‌توان برای روشن ساختن برخی از موضوعات آماری که درگذشته مناقشاتی برانگیخته‌اند، به‌کار برد. در اینجا سه مثال می‌آوریم.

مثال ۱. دمینگ [۱۴] بررسیها را به دو نوع شمارشی و تحلیلی تفکیک و آنها را مشخص کرد. هان و میکر [۲۷] این مفاهیم را به تفصیل توصیف کردند دمینگ به‌ویژه به مقایسهٔ کاربرد شیوه‌های آماری رسمی در بررسیهای

1. case studies

نمونه‌ای با کاربرد آنها در مطالعات فرایندهای صنعتی علاقه‌مند بود که شامل واحدهایی هستند که هنوز تولید نشده‌اند (اینجا با موردی سروکار داریم که در آن طبیعی‌تر این است که فرایند مولد داده‌ها را توصیف کنیم و نه گردآوری داده‌های مورد نظر را، و بنابراین فرایند هدف به جامعهٔ هدف ترجیح داده می‌شود). دمینگ ادعا کرد که شیوه‌های استنباط آماری استاندارد (برای مثال بازه‌های اطمینان) قابل اِعمال در بررسیهای تحلیلی نیستند.

در بیان ما، مطالعهٔ شمارشی است اگر جامعهٔ هدف را بشود به‌گونه‌ای فهرست‌بندی کرد که یک قرارداد نمونه‌گیری احتمالاتی را که به هر واحد، احتمال مشمولی مثبتی می‌دهد بتوان در آن به‌کار برد. مطالعه در غیر این صورت تحلیلی است. نگرانی دمینگ اساساً امکان خطای مطالعه است که با عدم قطعیتی که با شیوه‌های آماری رسمی بیان می‌شود، به‌طور ملموس قابل دستیابی نیست.

مثال ۲. توکی [۵۱] تحلیل را به دو نوع اکتشافی[1] یا تأییدی[2] تفکیک کرد. تحلیل تأییدی، ارزیابی پرسشهای از پیش مشخص شده است و حوزهٔ سنتی آمار استنباطی است. توکی تحلیل داده‌های اکتشافی (EDA) را بیشتر به‌عنوان یک نگرش و نه به‌عنوان مجموعه‌ای از روشها توصیف می‌کند. به گفتهٔ توکی، روش پنج‌مرحله‌ای PPDAC کاملاً برای تحلیل تأییدی مناسب است اما برای تحلیل اکتشافی (و علوم به‌طور کلی) مناسب نیست. (توکی در [۵۱] مراحل را تحت عنوان پرسش، طراحی، گردآوری، تحلیل، و پاسخ نام می‌برد.) با این حال، با شاخ و برگ دادن به مراحل همان‌گونه که در بالا عمل کرده‌ایم، می‌توان دید که کجا تحلیل اکتشافی مناسب است.

نگرش و ابزارهای EDA برای رسیدن به اهداف کارهای نظارت و بازبینی در مرحلهٔ داده‌ها، آشکارا مهم است. این کارها در حکم انجام دادن یک تحقیق PPDAC کوچک است که در آن نمونهٔ مطالعهٔ بزرگ‌تر هم‌اکنون با جامعهٔ هدف درون این PPDAC کوچک‌تر یکسان تلقی می‌شود. مسأله عبارت از بازبینی بسیاری از صفات (اغلب نموداری) برای یافتن مقادیر غیرقابل انتظار در این صفتهاست.

روال دیگر، به‌کارگیری EDA در آن دسته از تحقیقات است که در آنها نمونه، تمامی جامعهٔ مورد مطالعه است. برای مثال، وقتی پژوهشگر با یک مجموعهٔ بزرگ از داده‌ها روبه‌رو می‌شود، اغلب علاقه‌مند است مجموعهٔ داده‌ها را به‌گونه‌ای بررسی کند که گویی کل جامعه را تشکیل می‌دهند. در این موارد، جامعهٔ هدف هنوز چیز متفاوتی با جامعهٔ مورد مطالعه است (هر چه‌قدر هم که بزرگ باشد) و بنابراین مشکل خطای مطالعه حتی برای داده‌کاوها سرجای خود باقی می‌ماند.

مثال ۳. آمارگاهی به این دلیل مورد نقد قرار می‌گیرد که صرفاً در یک مطالعهٔ واحد قابل اعمال است در حالی که پیشرفت علمی مستلزم تکرار است. به‌نظر می‌رسد که روش علمی که در بالا توصیف شد این دیدگاه را تقویت می‌کند. با این حال، مطالعات چندگانه را می‌توان و باید در درون چارچوب PPDAC مورد بازبینی قرار گیرد. در آنجا مشکلات ذاتی «فراتحلیل»[3] روشن می‌شوند. مثلاً یک موضوع اصلی، منظورکردن یا کنارگذاشتن مطالعات در تحلیل است. یک وجه این موضوع را می‌توان با مقایسهٔ جامعه مورد مطالعه با هدف برای هر تحقیقی که قرار است درنظر گرفته شود موردبحث قرار داد، یا می‌توان، مجموعهٔ مطالعات ممکن را به‌عنوان جامعهٔ هدف و مجموعهٔ مطالعات تحقق‌یافته را به‌عنوان جامعهٔ مورد مطالعه درنظر گرفت. سپس قرارداد نمونه‌گیری تعیین می‌کند کدام یک از مطالعات را باید در نظر گرفت.

۵. دربارهٔ روش در علم

وقتی نوشته‌های کسانی را بررسی می‌کنیم که به‌مدت طولانی و عمیقاً دربارهٔ ماهیت علم اندیشیده‌اند، درمی‌یابیم که مشکلات یکسانی به کرات بروز می‌کنند (کتاب جان لوسی [۳۵] یک نقطهٔ شروع منطقی در این بحث است). در بیشتر این آثار شور و شوق زیادی در این مورد دیده می‌شود که علم به‌معنایی در حال پیشروی است، که ما هرچه بیشتر دربارهٔ دنیای پیرامون خود کسب اطلاع می‌کنیم، که ما به‌طور پیوسته این دانش را یکپارچه می‌کنیم، که فناوریِ دائماً پیچیدهٔ ما گواه قدرت علم است. با این حال، درصورتی که تحت فشار قرارگیریم، نه تنها نمی‌توانیم بر سر روش علم توافق کنیم، حتی کاملاً نمی‌توانیم دربارهٔ چیستی علم، یا حتی در مورد اینکه آیا چیزی که علم دربارهٔ آن سخن می‌گوید، حقیقی است یا نه به‌توافق برسیم! با نگاهی به تاریخچه‌ای که در این مقاله توصیف شد، سرنخ‌هایی در مورد اینکه چرا این وضعیت همچنان پابرجاست، به‌دست می‌آوریم.

ظاهراً شواهد کافی برای حقیقی بودن پیشرفت علم وجود دارد، از پرسش دربارهٔ بی‌معنی بودن سرعت نور گرفته تا بحث دربارهٔ اینکه متناهی است یا نه، تا شواهد فزاینده برای سرعت متناهی تا برآوردهای هرچه «بهتر»ی برای مقدار آن. ممکن است به‌نظر برسد که دانش علمی، نقطهٔ اتصال واقعیتهایی است که تا به حال انباشته شده، و اینکه نظریه‌ها بسته به تحقق یا ابطال آنها براساس این واقعیتها، به بقای خود ادامه می‌دهند یا از بین می‌روند، و اینکه حقیقت سرانجام از این مجموعهٔ واقعیتها استنباط خواهد شد.

در کتاب کوهن [۳۲] چارچوبی برای این پیشرفت توصیف شده است: درون یک پارادایم [سرمشق] علمی، علم متعارف به‌عنوان یک فعالیت «حل معما» پیگیری می‌شود؛ این امر در نهایت بی‌هنجاریهایی را ایجاد می‌کند، بی‌هنجاریهایی که برهم انباشته می‌شوند تا مرحله‌ای بحرانی فرا برسد، یک پارادایم جدید به‌نحوی مطرح می‌شود، دانش متعارف دوباره پیش می‌رود. برای مثال، علم متعارف، درون پارادایمی پیگیری می‌شد که در آن نور بدون سرعت بود، بی‌هنجاریهای نجومی شروع به ظهور نمودند، که سرانجام منجر به نظریه‌ای شدند که در آن نور دارای سرعت متناهی است، که در نتیجهٔ آن مجموعهٔ دانش متعارف درصدد حل مسألهٔ تعیین مقدار آن برآمد. در یک بررسی تاریخی مفصل‌تر، بسیاری از چنین چرخه‌های کوهنی را می‌توان نشان داد.

اما روش چطور؟ قرنها قبل، ارسطو نوشت که دانش به‌دلیل آنکه «حاصل از توانایی برهان‌آوری» است، مستلزم آموزش اصول برهان‌آوری و لذا لزوماً آموزش علم است «... گاهی از طریق استقرا و گاهی به‌کمک قیاس به پیش می‌رود» ([۲]، ۱۹ ۱۱۳۹ـ۳۶ ۱۱۳۹). اما به‌کاربردن هر یک از اینها دردسرهایی دارد ــ فرانسیس بیکن، پرقدرت‌ترین طرفدار روش استقرایی، ادراک خود از سرعت باورنکردنی حرکت ستارگان در مدارشان به دور زمین را مبنای استقرا قرار داد و نتیجه‌گیری کرد که نامتناهی‌بودن سرعت نور منطقی

1. exploratory 2. confirmatory 3. meta-analysis

است، و با استعدادی نه کمتر از ارسطو و دکارت، با قیاس محض ثابت کرد که نور احتمالاً نمی‌تواند سرعتی متناهی داشته باشد. استفاده از ترکیب استقرا و قیاس آن گونه که در رویکرد فرضیه‌ای-قیاسی[1] معمول است، آسان‌تر از این نیست. این مطلب به‌طور صریح تنها دوبار در تاریخچهٔ بالا ظاهر می‌شود ــ یک بار توسط ارسطو به‌کار گرفته شد تا استدلال امپدوکلس[2] را رد کند، و یک بار توسط دکارت برای رد نظر بیکمن ــ و در هر دو مورد خطا بود! در موارد متعددی، هر یک از اینها به‌عنوان روش علم مطرح شده‌اند.

خط مشی‌ای که اندکی با این تفاوت دارد، آن است که چنین روشی را اتخاذ کرده آن را به جایگاه یک معیار ارتقا دهیم تا علم را از غیرعلم تشخیص دهیم. کارل پوپر این کار را در سال ۱۹۳۴ با رویکرد فرضیه‌ای قیاسی انجام داد. پوپر بانگاه تحقیرآمیز به دیدگاه عمومی موجود مبنی‌بر اینکه روشهای استقرایی متمایزکنندهٔ علم از غیرعلم است، این نظر را در پیش نهاد که «برای یک نظام علمی تجربی باید امکان ردشدن براساس تجربه وجود داشته باشد» ([۴۴]، ص. ۴۱). این بدان معناست که برای اینکه نظریه‌ای سزاوار عنوان علمی باشد، باید ابطال‌پذیر باشد؛ آزمایشی قطعی که نظریه را رد می‌کند، یک آزمایش ابطال‌کنندهٔ قاطع است. (آی. جِی. گود[3] در مقاله‌ای که به‌عنوان یک منبع عمومی تهیه شده بود [۲۵]، حق تقدم نسبی را در این مورد به آر. ای. فیشر[4] می‌دهد زیرا آزمونهای معناداری [۲۰] به‌قبل از پویر باز می‌گردد. به‌نظر می‌رسد که این امتیازبخشی، نابه‌جا باشد: پویر از ابطال‌پذیری به‌عنوان یک معیار برای تعیین حدود و ثغور علم استفاده می‌کند؛ فیشر کارهایی از این قبیل نکرده است). برمبنای این معیار، نظریهٔ زمین مرکزی عالم، علمی است زیرا با کشف هرگونه منظومهٔ مداری که مرکز آن زمین نباشد قابل ابطال است؛ کشف گالیله در مورد اقمار مشتری این نظریه را مردود کرد. به‌همین نحو، نظریه‌های علمی ارسطو و دکارت دربارهٔ نور با تعیین مقدار سرعت نور به وسیلهٔ رُمر رد شدند. این معیار با واداشتن دانشمندان به‌تلاش برای رد نظریه، تبدیل به روش شده است؛ نظریه‌ها تنها زمانی تأیید می‌شوند که در مقابل سخت‌گیرانه‌ترین آزمونها به حیات خود ادامه دهند.

اما علم متعارف، محافظه‌کار است. آزمایشهای قاطع معمولاً مدتها بعد از ثبوت واقعیت به این عنوان دست می‌یابند ــ کاسینی[5] و همکارانش در آن زمان نشان دادند که مشاهدات رُمر را می‌توان با نظریهٔ موجود وفق داد. (برای مثالها و بحث بیشتر، ر.ک. [۳۳]، صص. ۷۱ـ۹۰). اگر نظریه‌ها پس از اینکه نخستین بار مردود شدند، دور افکنده شوند، نتیجهٔ آن هرج و مرج خواهد بود. به‌جای آن، علم متعارف به حرکت ادامه می‌دهد، گاهی نظریهٔ خود را به‌خوبی تنظیم می‌کند تا اطلاعات جدید را در خود جا دهد، گاهی نظریه را به‌مدد فرضیه‌های کمکی ترمیم می‌کند، و گاهی اطلاعات را به پستو می‌اندازد به‌طوری که ابطالهای پوپر بدل به بی‌هنجاریهای کوهن می‌شود. به‌تدریج که بی‌هنجاریها انباشته می‌شوند، حرکت دشوارتر می‌شود و جامعهٔ علمی دچار دلشورهٔ روزافزونی می‌شود که بحرانی در راه است.

اینجاست که دیدگاه کوهن جالب‌تر و دردسرسازتر از همه است. کوهن گذار از یک پارادایم به دیگری را به تغییر گشتالت[6] در ادراک بصری تشبیه می‌کند.

1. hypothetico-deductive 2. Empedocles 3. I. J. Good
4. R. A. Fisher 5. Cassini

۶. gestalt (کلیت یکپارچه): ساختار، پیکربندی، یا الگویی از پدیده‌ای فیزیکی، زیستی، یا روانشناسی که چنان درهم‌بافته است که یک واحدِ کارکردی را تشکیل می‌دهد و خواص آن از مجموع خاصیتهای اجزای آن قابل حصول نیست. ــ م.

تغییر پارادایم مانند تغییر گشتالت ناگهانی و بی‌دلیل است. ولی برخلاف تغییر گشتالت، تغییر پارادایم به دانشمند اجازه نمی‌دهد که از این پارادایم به‌دیگری برود و برگردد، هیچ دیدگاه خنثای سومی وجود ندارد که بتوان از آن هر دو پارادایم را دید ــ اگر وجود می‌داشت، خودِ آن، پارادایم سومی می‌شد. منظور این نیست که بگوییم که پارادایم جدید را نمی‌توان تا حدی مدلل و توجیه کرد، بلکه ممکن است این کار با مقایسهٔ آن با پارادایم قدیمی‌تر مقدور نباشد. زیرا به محض اینکه گذار کامل شود دیدگاه شخص تازه کیش در این حوزه ــ روشهای آن، مفاهیم آن، پرسشهای آن، و حتی داده‌ها ــ تغییر پیدا کرده است و پارادایم قدیم را تنها می‌توان از منظر پارادایم جدید نگریست. در یک کلمه، دو سر پارادایم نامتوافق‌اند. مفاهیم، نظریه، روشها، و داده‌هایی که مطابق یکی از آنها معنی‌دار هستند، ممکن است در دیگری نباشند.

مفهوم نور را درنظر بگیرید. به عقیدهٔ ارسطو، نور به مادهٔ شفاف واسطی (مانند هوا یا آب) نیاز دارد و نمی‌تواند در خلأ موجود باشد. اشیا البته فقط به این دلیل شفافیت دارند که «مادهٔ معینی» را در خود دارند که «در جسم عُلوی ابدی نیز موجود است» (شاید اتر؟ که مفهومی است که ارسطو می‌گوید از مفهوم آناگزاگوراس[1] به‌دست آورده است، [۳]، $۲۷۰^{b}۲۰ - ۲۷۰^{b}۲۵$). «فعالیت این ماده، نور است»، اما حرکت نیست. به‌علاوه، قابل دیدبودن سیاره‌ها و جانوران در شب به نور بستگی ندارد! (برای ملاحظه اغلب نکات مطرح‌شده در اینجا، ر.ک. [۴]، $۴۱۸^{a}۲۶ - ۴۱۹^{b}۲$.) نه تنها مفهوم ارسطو با مفهوم ما متفاوت است، بلکه برای آنکه حقیقتاً منظور او را از نور بفهمیم، لازم است که در پارادایم او غرق شویم. مفاهیم علمی از قبیل نور به‌طرقی برگشت‌ناپذیر تغییر می‌کنند؛ برخی نظیر اتر به‌طور کلی ناپدید می‌شوند ــ با آنکه هزاران سال حضور داشته‌اند.

مفاهیم نیز به تنهایی به‌وسیلهٔ پارادایم معین نمی‌شوند. «واقعیتهای تجربی» نیز چنین‌اند ــ داده‌های فرانسیس بیکن مشتمل‌بر سرعتهای خیالی برای حرکت ستارگان به دور زمین بود؛ گلازناپ[2] دلیل آورد که نظریه‌های مختلف، سرعتهای «مشاهده شدهٔ» مختلفی برای نور به‌دست می‌دهند. حتی داده‌هایی خام مانند «داده‌های حاصل از حواس» نیز ممکن است به‌نظریه وابسته باشند. گالیله بلافاصله پس از آنکه اکتشاف قمرهای مشتری را اعلام کرد، از دیگران خواست تا صحت رصدهای او را با استفاده از تلسکوپهایش تحقیق کنند. بسیاری نتوانستند قمرها را ببینند؛ آنهایی که توانستند چند نقطهٔ نورانی را ببینند، مطمئن نبودند که اینها محصول این دستگاه جدید باشند. تنها پس از پیدایش مبحث اپتیک تلسکوپها بود که می‌شد از صحت مشاهدات اطمینان حاصل کرد (ر.ک. [۱۹]، فصل ۹). مشاهدات حاصل از ابزارهای مدرن به‌طور قطعی «انباشته از نظریه»اند.

تغییرات پارادایم، توافق ناپذیری، و داده‌های دارای بارِ نظری، همه در آنچه یان هکینگ [۲۶] آن را «بحران عقلانیت» ــ دست‌کم برای فیلسوفان علم ــ می‌نامد، سهم داشته‌اند. آیا چیزی به‌نام استدلال علمی وجود خارجی دارد؟ آیا ذواتی که علم با آنها سروکار دارد، واقعی‌اند یا ساخته‌های انسان‌اند؟ آیا معقول است فکر کنیم که یک حقیقت آرمانی وجود دارد که علم به سمت آن میل می‌کند؟

1. Anaxagoras 2. Glasenapp

۶. و دربارهٔ آمار چه می‌توان گفت؟

وقتی آماردانان به ماهیت علم می‌نگرند، بازتاب ماهیت آمار را در آن می‌بینند. (یک استثنای مهم دستور علم[1] [۴۳] پیرسون است که در آن، قیاس بدل به نظریهٔ احتمال؛ و استقرا مبدل به نظریهٔ آمار می‌شود (مثلاً [۷]، صص. ۶، ۷)؛ روش علمی، فرضیه‌ای-قیاسی است (مثلاً [۱۰]، [۱۷]، [۴۱]) که در آمار به واسطهٔ آزمون فرض صوری و نقد مدل، بدیهی است؛ ترکیب اینها یادآور دیدگاه ارسطو و چیزی است که جورج باکس آن را «ترقی یادگیری» می‌نامد [۱۰]. اما، چنانکه در بخش پیشین نشان دادیم، علم واقعاً این‌گونه نیست. درک ما از آمار نیز نباید این باشد (درواقع، نبرد طولانی جان توکی برای مشروعیت بخشیدن به تحلیل اکتشافی داده‌ها آسان‌تر می‌شد اگر در جامعهٔ پژوهشی آمار همفکری بیشتری در این جهت وجود می‌داشت که چارچوبهای جداگانه‌ای برای اکتشاف و برای موجه‌سازی درنظر بگیرند. برای مثال، ر.ک. [۵۱]).

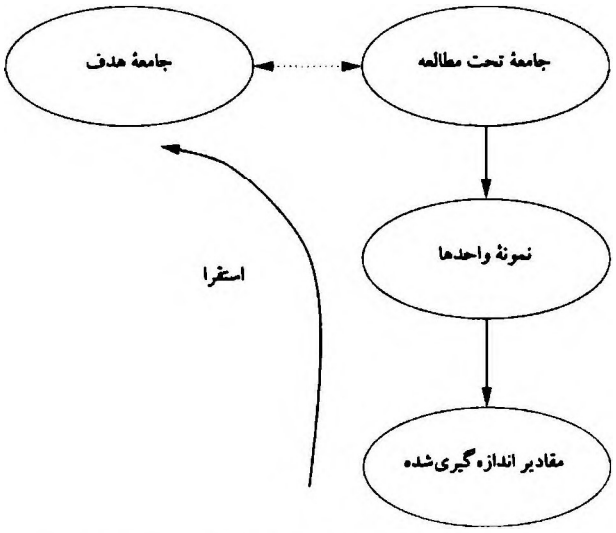
به‌طور قطع تحقیقات آماری با همان مسائلی که در بخش قبل مطرح شد، روبه‌رو هستند، اما آمار می‌تواند آسان‌تر با آنها برخورد کند. این بدان دلیل است که آمار حوزهٔ کاربرد متمرکزتری دارد. برای مثال، دو موضوع نخ‌نما شده و قدیمی در فلسفهٔ علم را به‌خاطر بیاورید: مناقشهٔ واقع‌گرا-ضدواقع‌گرا و مسألهٔ استقرا.

مناقشهٔ واقع‌گرا-ضدواقع‌گرا در این خصوص است که آیا ذوات علم واقعی‌اند یا صرفاً ساخته‌های نظری هستند. ذوات اولیهٔ تحقیقات آماری واحدهای جامعهٔ تحت مطالعه و مقادیر متغیرهایی هستند که به‌ازای آنها اندازه‌گیری می‌شوند. واحدها و گردایهٔ آنها باید با دقت کافی تعیین شوند به‌طوری که امکان انتخاب هر عضو از گردایه موجود باشد. گاهی باید تلاش قابل‌ملاحظه‌ای به‌عمل آید تا اطمینان حاصل شود که دستگاههای اندازه‌گیری مقادیر قابل اعتمادی برای متغیرهایی که قرار است اندازه‌گیری شوند، ارائه می‌کنند. در این زمینه، آماردانان به مفهوم مورد نظر هکینگ به دانشمندان واقع‌گرا بدل می‌شوند: اگر بتوانیم آنها را انتخاب کنیم و اندازه‌گیریهایی روی آنها انجام دهیم، واقعی‌اند [۲۶]؛ اگرنتوانیم، آنگاه تحقیق آماری متوقف می‌شود. اینکه بررسیهای علمی بعدی نشان دهند که آن واحدها ترکیبهایی از دیگر واحدهای «بنیادی»‌اند یا اینکه متغیرهای اندازه‌گیری‌شده را باید به‌گونه‌ای دیگر تعبیر کرد، خارج از بحث است.

در مورد استقرا، می‌توان مسأله را برای آمار به‌طور شسته‌رفته به دو جزء تفکیک کرد (ر.ک. شکل ۱۳). در نهایت، علاقهٔ آماردان معطوف به جامعهٔ هدف است، زیرا به مسائل مورد توجه علمی به‌معنی گستردهٔ آن، نزدیک‌تر از همه است. این جامعه ممکن است نامتناهی، شاید هم ناشمارا، باشد و تعریف آن ممکن است دربرگیرندهٔ عبارتهایی مانند «همهٔ واحدها اکنون و در آینده» باشد. استخراج نتایجی دربارهٔ این جامعه اغلب مستلزم استدلالهایی فرآماری خواهد بود زیرا بر مشابهتها، و اختلافهای بین جامعهٔ هدف و جامعهٔ تحت بررسی مبتنی خواهد بود. در چنین استدلالهایی ممکن است سرانجام نتوان از اصل «یکنواختی ماهیت» هیوم [۲۹، ص. ۸۹]، و بنابراین از آنچه فلاسفه باعنوان «مسألهٔ استقرا» از آن یاد می‌کنند، اجتناب کرد.

چنین مسائل مهمی، وقتی توجه آماردان معطوف به استخراج نتایجی دربارهٔ جامعهٔ تحت مطالعه می‌شود، رنگ می‌بازند. مطابق تعریف، همهٔ جامعه‌های تحت مطالعه از نظر اندازه متناهی‌اند و انتخاب تصادفی واحدها برای تشکیل نمونه، امکان‌پذیر است. انتخاب تصادفی قوی‌ترین زمینه‌ها را

1. *Grammar of Science*



شکل ۱۳ استقرا از مجموعهٔ مقادیر اندازه‌گیری‌شده به جامعهٔ هدف

برای استنباط استقرایی فراهم می‌آورد. هرگاه، به‌هر دلیل، از انتخاب تصادفی استفاده نشده باشد، باید اقامهٔ دلیل شود که یا تقریبی به‌قدرکافی نزدیک انجام شده است یا اینکه خود نمونه از لحاظ صفات مورد نظر به جامعهٔ تحت مطالعه (یا هدف) شبیه است. مورد اخیر بسیار شبیه به اقامهٔ دلیل برای انتقال نتایج از جامعهٔ تحت مطالعه به جامعهٔ هدف است و ممکن است به همان دشواری باشد. در هر یک از دو حالت، استدلالها تا حد زیادی فرآماری خواهند بود.

خوانندهٔ نقاد ممکن است تصور کند که ساختار پیشنهادی ما برای آن طراحی شده است که همهٔ مسائل دشوار را به عالم «فرآماری» محول کند. اما ارائهٔ این ساختار به منزلهٔ جارو کردن آن مسائل به زیر فرش نیست. برعکس. این موارد حلقه‌هایی بالقوه ضعیف در زنجیرهٔ استنباط‌اند که آمار چیزی برای گفتن دربارهٔ آنها دارد [این امر مانع از انجام بررسیهای بیشتر آماری در مورد این مسائل (مثلاً، تحقیقات بیشتر دربارهٔ خطای مطالعه) نیست]. ساختار پنج‌مرحله‌ای، قالبی برای هر تحقیق آماری است و لذا کاربردپذیری آن را می‌توان به‌عنوان معیاری برای تعیین حدود و ثغور آمار تلقی کرد. به‌علاوه، این ساختار به ما اجازه می‌دهد که نقاط قوت و ضعف را در استدلال آماری شناسایی کنیم؛ در برخی تحقیقات، حتی استدلالهای ضعیف ممکن است تنها استدلالهای موجود باشند. به‌طور خاص، این ساختار راهبرد سودمندی برای یافتن اطلاعات دربارهٔ جامعه‌ها و صفات آنهاست.

نمونه‌های زیادی از PPDAC ممکن است در یک جستار علمی پیش آیند. گاهی یک دنبالهٔ PPDAC درون دیگری آشیان دارد، مثلاً، وقتی که به تحقیق در یک فرایند اندازه‌گیری یا یک قرارداد نمونه‌گیری درون مطالعه‌ای بزرگ‌تر مشغولیم. در موارد دیگر دنباله‌های PPDAC یکی پس از دیگری یا به موازات هم پیش می‌آیند. نکتهٔ مهم آن است که هر PPDAC به‌عنوان ساختاری خطی از «مسأله» به «نتیجه‌گیری» بر خود متکی است. عرضه‌داشتی دوری نظیر آنچه در [۵۳] آمده گمراه‌کننده است و جستار علمی را با روش آماری، مشتبه می‌کند.

۷. نتیجه‌گیری

آمار دربارهٔ روش علمی و تغییر پارادایم و توافق‌ناپذیری آن نیست؛ بلکه دربارهٔ تحقیق در پدیده‌ها با توجه به ارتباطشان با واحدهای جامعه است. روش آماری، به‌گونه‌ای که ما توصیف کردیم روش علمی نیست (آنها که می‌خواهند این نکته را بیشتر بشکافند، می‌توانند دیدگاهی موافق را در [۵۱] ملاحظه کنند). پرسشهای مطرح‌شده در بخش ۵ هر اندازه هم که مجذوب‌کننده باشند، پرسشهای ما نیستند. حسن کار در همین است؛ شواهد تجربی تا به‌امروز حاکی از آن‌اند که این پرسشها ممکن است اصلاً قابل رفع و رجوع نباشند.

فرایند پنج‌مرحله‌ای PPDAC با زبان وابسته به آن و زیرمرحله‌هایش، چارچوب خوبی برای توصیف تحقیقاتی از قبیل تحقیق مایکلسن است، به‌خصوص برای آنها که پیچیدگیهای آمار را فرامی‌گیرند. مهم‌تر از آن، ما اعتقاد داریم که در برنامه‌ریزی و اجرای مؤثر یک تحقیق تجربی، این چارچوب برای تضمین اینکه موضوعات مهم حداقل درنظر گرفته‌شده‌اند، بسیار ارزشمند است ــ و در مورد هر تحقیق آماری وضعیت بدین‌گونه است. گرچه سازماندهی جزئیات به‌طرق دیگری هم همواره امکان‌پذیر است، به عقیدهٔ ما هر چنین سازماندهی اساساً با ساختار PPDAC یکسان خواهد بود و اینکه این سازماندهی روش آماری را درخود خواهد داشت.

کارل پیرسون تقریباً درست گفته بود: قضیهٔ علم هرچه باشد، می‌توانیم بگوییم که وحدت آمار تنها در روش آن خلاصه می‌شود و نه در مواد تشکیل‌دهندهٔ آن. این روش است که باید به گسترده‌ترین صورت اشاعه یابد.

مراجع

1. ALEXANDER, A. F. O'D. (1970). James Bradley. In *Dictionary of Scientific Biography* (C. C. Gillispie, ed.) **2** 387-389. Scribner's, New York.
2. ARISTOTLE. Nicomachean ethics. In *The Complete Works of Aristotle: The Revised Oxford Translation* (J. Barnes, ed.) **2** 1729-1867. Princeton Univ. Press (1984). (Translated by W. D. Ross with revision by J. O. Urmson.)
3. ARISTOTLE. On the heavens. In *The Complete Works of Aristotle: The Revised Oxford Translation* (J. Barnes, ed.) **1** 447-511. Princeton Univ. Press (1984). (Translated by J. L. Stocks.)
4. ARISTOTLE. On the soul. In *The Complete Works of Aristotle: The Revised Oxford Translation* (J. Barnes, ed.) **1** 641-692. Princeton Univ. Press (1984). (Translated by J. A. Smith.)
5. ARISTOTLE. Sense and sensibilia. In *The Complete Works of Aristotle: The Revised Oxford Translation* (J. Barnes, ed.) **1** 693-713. Princeton Univ. Press (1984). (Translated by J. I. Beare.)
6. BACON, F. (1620). Novum organum. In *Novum Organum: With Other Parts of the Great Instauration* (P. Urbach and J. Gibson, ed.) 33-293. Open Court, Chicago. (1994 translation.)
7. BARNETT, V. (1982). *Comparative Statistical Inference*, 2nd ed. Wiley, New York.
8. BEECKMAN, I. (1629). Folio 340, 19 March 1629. In *Journal Tenupar Isaac Beeckman de 1604 à 1634* (C. de Waard, Ed.) **3** 112. Nijoff, The Hague (1939-1953).
9. BIPM, (1983). *Comptes Rendus des Séances de la* 17^{e} *CGPM*. BIPM, Sévres, France.
10. BOX, G. E. P. (1976) Science and statistics. *J. Amer. Statist. Assoc.* **71** 791-799.
11. CHATFIELD, C. (1995). *Problem Solving. A Statistican's Guide*, 2nd ed. Chapman and Hall, London.
12. COHEN, I. B. (1940). Roemer and the first determination of the velocity of light. *Isis* **31** 327-379.
13. COTTER, C. H. (1968). *A History of Nautical Astronomy*. North-Holland, Amsterdam.
14. DEMING, W. E. (1953). On the distinction between enumerative and analytic surveys. *J. Amer. Statist. Assoc.* **48** 244-255.

14B DESCARTES, R. (1934). Letter to Beeckman, August 22 1634. In *Oeuvres de Descartes* **1** 307-312. (C. Adam and P. Tannery, eds.) 1969, Librairie Philosophique J. VRIN, Paris.

15. DRAKE, S., ed. (1957). *Discoveries and Opinions of Galileo*. Anchor Books, Doubleday, New York. (Translated with an introduction and notes by Stillman Drake.)
16. DRAKE, S. (1978). *Galileo at Work: His Scientific Biography*. Univ. Chicago Press.
17. DURBIN, J. (1987). Statistics and statistical science. *J. Roy. Stat. Soc. Ser. A* **150** 177-191.
18. EDGEWORTH, F. Y. (1885). Methods of statistics, In *Proceedings of the Silver Jubilee of the Royal Statistical Society* 181-217.
19. FEYERABEND, P. (1988). *Against Method*, rev. ed. Verso of New Left Books, New York.
20. FISHER, R. A. (1925). *Statistical Methods for Research Workers*. Oliver & Boyd, Edinburgh. (13th ed. published 1958.)
21. GALILEI, G. (1610). The starry messenger, In *Discoveries and Opinions of Galileo* (G. S. Drake, ed.) 21-58.
22. GALILEI, G. (1615). Letter to Madame Christina of Lorraine Grand Duchess of Tuscany concerning the use of Biblical quotations in matters of Science. In *Discoveries and Opinions of Galileo* (S. Drake, ed.) 173-216.
23. GALILEI, G. (1938). *Two New Sciences Including Centers of Gravity anf Force of Percussion*. Univ. Wisconsin Press, Madison (1974). (Translated, with introduction and notes, by Stillman Drake.)

24. GAUKROGER, S. (1995), *Decartes: An Intellectual Biography.* Clarendon, Oxford.

25. GOOD, I. J. (1988). Scientific method and statistics. In *Encyclopedia of Statistical Sciences* **8** 291-304. Wiley, New York.

26. HACKING, I. (1985). *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science.* Cambridge Univ. Press.

27. HAHN, G. J. and Meeker, W. Q. (1993). Assumptions for statistical inference. *Amer Statist.* **47** 1-11.

28. HAND, D. J. (1994). Deconstructing statistical questions. *J. Roy. Statist. Soc. Ser. A* **157** 317-356

29. HUME, D. (1739-1740). *A Treatise on Human Nature.* Oxford Univ. Press. [Analytical Index by L. A. Selby Bigge (1888); 2nd ed. (1978), with text revised and notes by P. H. Nidditch.]

30. KENDALL, M. G. and STUART, A. (1958). *The Advanced Theory of Statistics* **1**. *Distribution Theory.* Griffin, London. [First published in 1943; revised in 1958 with A. Stuart.]

31. KOBAL, Z. (1975) Ole Christensen Römer. In *Dictionary of Scientific Biography* **11** 525-527. Scribner's New York.

32. KUHN, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions.* Princeton Univ. Press. (2nd ed., 1970.)

33. LAKATOS, I. (1978). Falsification and the methodology of scientific research programmes. In *The Methodology of Scientific Research Programmes: Philosophical Papers* (J. Worrall and G. Currie, ed.) **1** 8-101. Cambridge Univ. Press. (First published in 1970.)

34. LINDBERG, D. C. (1978). Medieval Latin Theories of the Speed of Light. In *Roemer et la Vitesse de la Lumière* (R. Taton, ed.) 45-72. Librairie Philosophique J. VRIN, Paris.

35. LOSEE, J. (1993). *A Historical Introduction to the Philosophy of Science*, 3d ed. Oxford Univ. Press.

36. MADDEN, E. H., ed. (1966). *Theories of Scientific Method: The Renaissance through the Nineteenth Century.* Univ Washington Press.

37. MICHELSON, A. A. (1880). Experimental determination of the velocity of light made at the U. S. Naval Academy, Annapolis. *Astronomical Papers* **1** 109-145.

38. MICHELSON, A. A. and MORLEY, E. W. (1887). The motion of the earth relative to the luminiferous ether. *Amer. J. Sci.* **34** 333ff.

39. MICHELSON, A. A., PEASE, F. G. and PEARSON, J. (1935). Measurement of the velocity of light in a partial vacuum. *Astrophysics Journal* **82** 26-61.

40. MOORE, D. and MCCABE, G. (1993). *Introduction to the Practice of Statistics*, 2nd ed. Freeman, New York.

41. NELDER, J. A. (1986). Statistics, science and technology. *J. Roy. Statist, Ser. A* **149** 109-121.

42. NEWCOMB, S. (1882). Measures of the velocity of light made under the direction of the Secretary of the Navy during the years 1880-82. *Astronomical Papers* **3** 107-239.

43. PEARSON, K. (1911). *The Grammar of Science.* Meridian Books, New York. [First published in 1892, revised 1900, final edition in 1911. Reprinted (1957) with introduction by Ernest Nagel.]

44. POPPER, K. R. (1959). *The Logic of Scientific Discovery.* Basic Books, New York. (First English edition; original German edition published 1934.)

45. SAKELLARIADIS, S. (1982). Descartes' experimental proof of the infinite velocity of light and Huygens' rejoinder. *Archive for History of Exact Sciences* **26** 1-12.

46. SOBEL, D. (1995). *Longitude: The True Story of Lone Genius Who Solved the Greatest Scientific Problem of His Time.* Walker, New York.

47. STIGLER, S. M. (1977). Do robust estimators work with REAL data? (with discussion). *Ann. Statist.* **5** 1055-1098.

48. STIGLER, S. M. (1986). *The History of Statistics: The Measurement of Uncertainty before 1900.* Harvard Univ. Press.

49. SWENSON, L. S., Jr. (1972). *The Ethereal Aether: A History of the Michelson-Morley-Miller Aether-Drift Experiments* 1880-1930. Univ. Texas Press.

50. TATON, R. (1971). Gian Domenico Cassini. In *Dictionary of Scientific Biography* **3** 100-104. Scribner's, New York.

51. TUKEY, J. W. (1980). We need both exploratory and confirmatory. *Amer. Statist.* **34** 23-25. [Reproduced in *Collected Works of John Tukey* 4.]

52. WHEELER, D. J. and LYDAY, R. W. (1989). *Evaluating the Measurement Process.* SPC. Press, Knoxville, TN.

53. WILD, C. J. and PFANNKUCH, M. (1999). Statistical thinking in empirical enquiry. *Internat. Statist. Rev.* **67** 223-248.

54. YOUDEN, W. J. (1985). *Experimentation and Measurement.* National Science Teachers' Association, Washington, DC.

* * * * * *

• 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. اُ لدفُرد، دانشگاه واترلو، کانادا