معمولاً در کتابهای آمار یافت می‌شود، ترسیم می‌کند و این خود زمینه‌ای اساسی برای ساختن یك منطق استقرایی رضایت‌بخش در علم فراهم می‌آورد.

فصل ۴

روش آزمایشی

یکی از خصوصیات ممّیزهٔ علم نوین در مقایسه با علم ادوار گذشته، تکیه‌ای است که بر «روش آزمایشی» می‌شود. همانطور که دیدیم کل دانش تجربی در تحلیل نهایی بر مشاهدات تکیه دارد؛ اما این مشاهدات را از دو طریق اساساً متفاوت می‌توان به دست آورد. در طریق غیرآزمایشی ما نقش منفعلی داریم. تنها به ستارگان نگاه می‌کنیم، به گلها نگاه می‌کنیم، تفاوتها و شباهتها را یادداشت می‌کنیم و درصدد کشف نظمهایی هستیم که بتوان آنها را به عنوان قوانین بیان کرد. در روش آزمایشی ما نقش فعالی داریم. صرفاً به جای ناظر بودن **عملی انجام می‌دهیم** تا نتایج مشاهداتی بهتر از آنچه که در اثر نظارهٔ طبیعت حاصل می‌شود، به دست آید. به جای اینکه صبر کنیم تا طبیعت موقعیتهایی برای نظاره عرضه کند، کوشش می‌کنیم این موقعیتها را خودمان خلق کنیم. به طور خلاصه دست به آزمایشهایی می‌زنیم.

روش آزمایشی بسیار بارور بوده است. پیشرفت عظیم فیزیك

دویست سال اخیر و به خصوص چند دههٔ گذشته بدون روش آزمایشی امکان‌پذیر نمی‌شد. ممکن است سؤال شود اگر چنین است چرا روش آزمایشی را در سایر رشته‌های علم به کار نمی‌بریم؟ در بعضی از حوزه‌ها این روش را به سادگی فیزیك نمی‌توان به کار برد. مثلاً در نجوم نمی‌توانیم سیاره‌ای را به این طرف و آن طرف هُل بدهیم تا ببینیم چه اتفاقی می‌افتد. اعیان نجومی خارج از دسترسند؛ فقط می‌توانیم به آنها نگاه کنیم و توصیفشان کنیم. بعضی از منجّمین قادرند شرایطی را در آزمایشگاه خود به وجود بیاورند که مثلاً شبیه به سطح خورشید یا ماه باشد و آنچه را که تحت این شرایط به وقوع می‌پیوندد رؤیت کنند. اما این حقیقتاً یك آزمایش نجومی نیست، بلکه آزمایشی است فیزیکی که با دانش نجومی مناسباتی دارد.

دانشمندان علوم اجتماعی به دلایل دیگری نمی‌توانند روی دسته‌های بزرگ مردم آزمایش کنند. این دانشمندان آزمایشهایی بر گروههایی از مردم انجام می‌دهند که معمولاً کوچکند. اگر بخواهیم بدانیم مردم در اثر کم آبی چه عکس‌العملی از خود نشان می‌دهند می‌توان دو یا سه نفر را تحت رژیمی بدون مایعات قرار داد و واکنش آنها را نظاره کرد. ولی این چیزی دربارهٔ عکس‌العمل اجتماع بزرگی از مردم، که آبشان قطع شده به ما نمی‌گوید. آزمایش جالبی بود اگر می‌شد مثلاً آب شهر نیویورك را یکسره قطع کرد. آیا مردم سرسام می‌گیرند یا اینکه بی‌اعتنا می‌مانند؟ آیا سعی می‌کنند که علیه شهرداری انقلابی ترتیب دهند؟ البته هیچ دانشمند علوم اجتماعی پیشنهاد چنین آزمایشی را نمی‌دهد، چون می‌داند که اجتماع به این کار اجازه نخواهد داد. مردم دانشمندان علوم اجتماعی را مجاز نمی‌دانند با احتیاجات اولیه‌شان بازی کنند.

حتی وقتی که بیرحمی چندانی متوجه اجتماع نیست، غالباً

فشارهای اجتماعی نیرومندی علیه آزمایشهای گروهی وجود دارد. مثلاً قبیله‌ای در مکزیك هست که به هنگام کسوف خورشید به رقص سنتی می‌پردازد. اعضای این قبیله معتقدند که فقط به این طریق می‌توانند خدایی را که مسبّب کسوف است با خود آشتی دهند. بالاخره نور خورشید باز می‌گردد. فرض کنید گروهی قوم‌شناس کوشش کنند این مردم را متقاعد سازند که رقص مذهبیشان ربطی به بازگشت خورشید ندارد. قوم شناسان پیشنهاد می‌کنند که قبیله دست به آزمایشی بزنند و به هنگام کسوف بعدی نرقصند تا ببینند چه اتفاقی می‌افتد. افراد قبیله یاسخشان غیظ‌آلود است. این کار برایشان این خطر را در بر دارد که تا پایان زندگیشان در تاریکی به سر برند. آنها به نظریهٔ خود آنچنان قویاً معتقدند که نمی‌خواهند آن را در معرض آزمایش قرار دهند. پس می‌بینید حتی موقعی که دانشمندان خاطر جمعند هیچ زیان اجتماعی از آزمایشهایشان به بار نخواهد آمد، هنوز موانعی بر سر راهشان موجود است. دانشمند علوم اجتماعی عموماً محدود است به آنچه که می‌تواند از تاریخ و آزمایش با افراد و دسته‌های کوچك فرا گیرد. ولی البته در یك حکومت استبدادی غالباً آزمایشها روی دسته‌های بزرگتری انجام می‌گیرد، نه فقط برای آزمودن یك نظریه، بلکه بیشتر به این دلیل که حکومت معتقد است که یك شیوهٔ جدید ممکن است از یك روش قدیمی مؤثرتر باشد. دولت آزمایشهایی در مقیاس وسیع در زمینه‌های کشاورزی، اقتصاد و غیره به عمل می‌آورد. در شرایط دموکراتیك این امکان وجود ندارد که آزمایشها چنین جسورانه انجام گیرند، چون اگر نتیجه منفی باشد، دولت مجبور است که در انتخابات بعدی با خشم مردم مواجه شود.

شیوهٔ آزمایشی، به خصوص در حوزه‌هایی بارور است که مفاهیم کمّی را می‌توان به دقت اندازه گرفت. دانشمند طرح آزمایش

خود را چگونه می‌ریزد؟ مشکل است بتوان خصلت کلی آزمایشها را تشریح کرد. چون آزمایشها گوناگونند ولی مشخصات عمومی کلی در آنها یافت می‌شود.

در وهلهٔ اول کوشش می‌کنیم عوامل مربوط در پدیدهٔ مورد بررسی را تعیین کنیم. بعضی عوامل ـ ولی نه بسیاری از آنها ـ را باید نامربوط دانست و کنار گذاشت. مثلاً در آزمایش مکانیك، که در آن از چرخها و اهرمهایی استفاده می‌کنیم، ممکن است اصطکاك را نادیده بگیریم. می‌دانیم که اصطکاك وجود دارد اما تأثیراتش را آنقدر کم فرض می‌کنیم تا آزمایشها را بغرنج نکند. به شیوه‌ای مشابه ممکن است در آزمایش با اجسامی که حرکتشان کند است از مقاومت هوا صرفنظر کنیم. چنانچه با سرعتهای بالا از قبیل سرعت مافوق صوت موشك سر و کار داشته باشیم، دیگر مقاومت هوا صرفنظر کردنی نیست. کوتاه کنیم، دانشمند تنها آن عواملی را که گمان می‌دارد تأثیرشان در آزمایش ناچیزند، به کنار می‌گذارد. گاهی اوقات برای اجتناب از بغرنجی بی‌حدّ آزمایش، ممکن است حتی از عواملی که فکر می‌کند دارای تأثیرات مهم هستند نیز چشم بپوشد.

وقتی عوامل مربوطه را تعیین کردیم، آزمایشی طرح می‌کنیم که در آن پاره‌ای از این عوامل ثابت و بقیه قابل تغییرند. فرض کنید با ظرف پر از گازی سر و کار داریم و می‌خواهیم درجه حرارتش را تا حدّ امکان ثابت نگاه داریم. بدین منظور ظرف را در مخزن آب خیلی بزرگتری غوطه‌ور می‌کنیم. (گرمای ویژهٔ گاز نسبت به گرمای ویژهٔ آب آنقدر کم است که حتی اگر درجهٔ حرارت گاز لحظه‌ای، مثلاً به واسطهٔ انقباض یا انبساط تغییر کند، به سرعت به مقدار سابقش بازمی‌گردد). ممکن است بخواهیم جریان برق خاصی با مقدار ثابت داشته باشیم. شاید این کار را بتوان با یك آمپرسنج انجام داد، به این

ترتیب که اگر مشاهده کردیم جریان برق بالا و پایین می‌رود مقاومت مدار را برای ثابت نگاهداشتن جریان تغییر می‌دهیم. با چنین روشهایی می‌توان مقادیری را ثابت نگاهداشت تا با تغییر دادن مقادیر دیگری ببینیم چه اتفاقی می‌افتد.

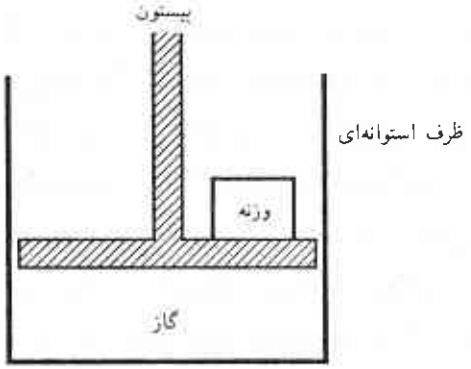
هدف نهایی، یافتن قوانینی است که همهٔ مقادیر مربوطه را به هم مرتبط می‌کند؛ اما اگر عوامل بسیار باشند کار ما شاق است. بنابراین در آغاز کار هدف خود را محدود می‌کنیم به قوانین پایین مرتبه که فقط بعضی از این عوامل را به هم ربط می‌دهد. اگر با K کمیّت سر و کار داریم ساده‌ترین گام نخستین ترتیب آزمایشی است که در آن $K-2$ کمیّت ثابت نگاهداشته شود. این به ما دو کمیّت M_1 و M_2 را می‌دهد که قابل تغییرند. پس ما یکی را تغییر می‌دهیم تا رفتار دیگری رؤیت شود. شاید وقتی M_1 بالا رود M_2 سقوط کند. یا شاید با ازدیاد M_1، M_2 اول بالا رود و بعد تنزل کند. مقدار M_2 تابعی است از مقدار M_1 که می‌توان آن را به صورت یك منحنی بر روی کاغذ آورد و حتی ممکن است معادله‌ای برای این تابع نوشت. به این ترتیب به قانون محدودی دسترسی پیدا می‌کنیم: اگر مقادیر M_3، M_4، M_5... ثابت باشند، آنگاه وقتی M_1 بالا رود، M_2 طبق معادلهٔ خاصی تغییر می‌کند. اما این صرفاً آغاز کار است. آزمایش خود را ادامه می‌دهیم و با تنظیم $K-2$ عامل دیگر، چگونگی تغییرات یك جفت کمیّت دوم را به صورت تابع و متغیّر مشاهده می‌کنیم. بعداً به همین شیوه با تغییر دادن سه کمیّت و ثابت نگاهداشتن بقیه، آزمایشهای بیشتری انجام می‌دهیم. در بعضی از موارد ممکن است از روی قوانین مربوط به جفتها، چگونگی بعضی یا همهٔ قوانین سه کمیّتی را حدس بزنیم. سپس هدف خود را متوجه قوانین چهار کمیّتی و بالاخره عمومی‌ترین قوانین که همهٔ عوامل مربوطه را در بر می‌گیرد و گاهی

اوقات بسیار بغرنجند، می‌کنیم.

به عنوان یك مثال ساده آزمایش زیر را که با گازی انجام می‌گیرد در نظر بگیریم. مشاهدهٔ ناقصی نشان داده است که درجهٔ حرارت، حجم و فشار یك گاز غالباً تغییر می‌کند. می‌خواهیم بدانیم که این سه کمیّت چگونه با هم مرتبطند. عامل مهم دیگر خود گازی است که به کار می‌بریم. ممکن است بعداً با گازهای دیگرنیز آزمایش انجام دهیم، اما فعلاً این عامل را ثابت نگاهداشته و به هیدروژن خالص اکتفا می‌کنیم. هیدرژن را در ظرفی استوانه‌ای (رجوع کنید به شکل ۴ـ۱) با یك پیستون متحرّك، که وزنه‌ای بر روی آن قرار دارد، می‌ریزیم، حجم گاز را به آسانی می‌توان اندازه گرفت و فشارش را با تغییر دادن وزنهٔ روی پیستون کم و زیاد کرد. درجهٔ حرارت گاز با وسایل دیگری تنظیم و اندازه‌گیری می‌شود.

قبل از آغاز آزمایش، که چگونگی ارتباط سه عامل درجهٔ حرارت، حجم و فشار را تعیین می‌کند، لازم است آزمایشهای مقدماتی به عمل آوریم تا از عدم وجود عوامل مربوطهٔ دیگر مطمئن شویم. بعضی از عواملی که گمان می‌کردیم مربوطند، با این ترتیب ممکن است نامربوط از آب در آید، مثلاً اینکه آیا شکل ظرف حاوی گاز مؤثر است یا خیر؟ می‌دانیم که در بعضی از آزمایشها (مثلاً توزیع بار برقی و پتانسیل سطحی مربوطه) شکل شیء مورد نظر مهم است. در اینجا تشخیص اینکه شکل ظرف مربوط است مشکل نیست؛ تنها حجم ظرف مؤثر است. با دانشی که دربارهٔ طبیعت داریم وجود عوامل دیگر را می‌توان منتفی دانست. طالع‌بینی ممکن است وارد آزمایشگاه شود و بپرسد: «راستی سعی کرده‌اید بفهمید امروز سیارات کجا هستند؟ ممکن است موقعیت آنها تأثیری بر آزمایشتان داشته باشد.» این عامل را نامربوط می‌دانیم چون معتقدیم سیارات دورتر از آنند که

تأثیری داشته باشند.



شکل ۴ـ۱.

فرض ما در نامربوط دانستن موقعیت سیارات درست است، ولی اشتباه خواهد بود اگر فکر کنیم که می‌توان خود به خود خیلی از عوامل را به صرف بی‌اعتقادی به تأثیراتشان نادیده گرفت، البته واقعاً راهی به جز آزمایش برای تعیین این امر وجود ندارد. فرض کنید که در دوران قبل از اختراع رادیو زندگی می‌کنید و کسی جعبه‌ای روی میز می‌گذارد و می‌گوید اگر یك نفر هزار میل دورتر آوازی بخواند، این دستگاه با همان طنین و وزن برایتان همان آواز را خواهد خواند، آیا می‌توانید باور کنید؟ شاید جواب دهید: «غیرممکن است! هیچ سیمی به این جعبه متصل نیست. من از روی تجربه می‌دانم که اتفاقی در هزار میل دورتر، کوچکترین تأثیری بر وقایع این اتاق ندارد.»

این درست همان استدلالی است که در مورد بی‌تأثیری موقعیت سیارات بر آزمایشهای ما بر روی هیدرژن، کردیم! واضح است که باید خیلی مواظب بود. گاهی اوقات تأثیراتی وجود دارند که تا کشف

نشوند از آنان آگاه نیستیم. به همین دلیل درست همان قدم اول ـ تعیین عوامل مربوط ـ گاهی قدم دشواری است. به علاوه، این گامی است که غالباً در گزارشهای بررسیهای علمی صریحاً ذکر نمی‌شود. دانشمند تنها به تشریح دستگاه مورد استفادهٔ جریان آزمایش و کشفیاتش دربارهٔ روابط بین چند کمیّت بسنده می‌کند. او اضافه نمی‌کند که «به علاوه دریافتیم که فلان‌عوامل بر نتایج تأثیری ندارند». در اکثر موارد وقتی دانش کافی دربارهٔ حوزهٔ مورد بررسی موجود است، دانشمند عوامل دیگر را نامربوط می‌پندارد. ممکن است این کار درست باشد. اما در حوزه‌های جدید باید بسیار مراقب بود. البته کسی ادعا نمی‌کند که اگر در یك تجربهٔ آزمایشگاهی دستگاهمان را از ده اینچی یا ده پایی نگاه کنیم و یا هنگام رؤیت عصبانی یا مهربان باشیم، در نتیجه تأثیری گذارده می‌شود. این عوامل شاید نامربوط باشد، ولی هرگز نمی‌توان مطلقاً به آن اطمینان داشت. اگر کسی این عوامل را مؤثر بداند، باید آزمایشی ترتیب داد تا ادعاهایش رد شود.

ملاحظات عملی البته مانع از آنند که همهٔ عوامل مربوط را بررسی کنیم. هزاران امکان بعید ممکن است مقابل آزمایش باشند، ولی وقت برای بررسی یك یك آنها وجود ندارد. باید از عرف عام شروع کرد و تنها زمانی فرضهای اولیه را تغییر داد که یك اتفاق غیرمنتظره ما را به مربوط دانستن عاملی که قبلاً اغماض شده بود، وادار کند. آیا رنگ برگ درختان خارج از آزمایشگاه بر طول موج نوری که درآزمایشگاه به کار می‌بریم تأثیری دارد؟ آیا طرز کار بخشی از ابزار آزمایش به‌محل سکونت صاحب قانونیش در نیویورك یا شیکاگو و یا به‌چگونگی احساسش نسبت به آزمایش بستگی دارد یا نه؟ بدیهی است وقت کافی برای آزمودن این عوامل نداریم. فرض می‌کنیم که حالت روانی صاحب ابزار آزمایش هیچ تأثیر فیزیکی بر

خود آزمایش ندارد. ولی ممکن است اعضای یك قبیله با این نظر مخالف باشند. اینان ممکن است معتقد باشند که تنها اگر صاحب واقعی ابزار و نه صاحب دروغینش خواستار آزمایش باشد خدایان به انجام آزمایش کمك می‌کنند. به این ترتیب عقاید فرهنگی بر آنچه که مربوط تلقی می‌شود تأثیر می‌گذارد. در اکثر موارد دانشمند ابتدا دربارهٔ مسئله اندیشه می‌کند، عوامل قابل بررسی را براساس عرف عام حدس می‌زند و شاید با اجرای آزمایشهای مقدماتی عواملی را که به نظرش مشکوك می‌رسند جدامی‌کند.

فرض کنید که عوامل مربوط به آزمایش با هیدرژن عبارت باشند از درجهٔ حرارت، فشار و حجم. در داخل ظرف، خصلت و مقدار کل گاز ثابت می‌ماند، چون درِ ظرف را خوب می‌بندیم. دیگر می‌توانیم مناسبات بین این سه عامل را آزادانه آزمایش کنیم. اگر درجهٔ حرارت را ثابت نگهداریم و به فشار اضافه کنیم، درخواهیم یافت که حجم به طور معکوس با فشار تغییر می‌کند. یعنی اگر فشار را دو برابر کنیم، حجم گاز نصف مقدار سابقش می‌شود و اگر فشار را سه برابر کنیم حجم به $\frac{۱}{۳}$ این مقدار خواهد رسید. این همان آزمایش معروفی است که فیزیکدان ایرلندی رابرت بویل[1] در قرن هفدهم انجام داد. قانون بویل می‌گوید که اگر درجهٔ حرارت گاز محبوسی ثابت بماند، حاصل ضرب حجم و فشارش ثابت است.

در مرحلهٔ بعد فشار را ثابت نگاهداشته (با ثابت نگاهداشتن وزنه روی پیستون) درجهٔ حرارت را تغییر می‌دهیم. این بار می‌بینیم که با حرارت دادن گاز، حجم زیاد می‌شود و با خنك شدنش حجم پایین می‌آید. با اندازه‌گیری حجم و درجهٔ حرارت درخواهیم یافت که

1. Robert Boyle

حجم با درجهٔ حرارت نسبت مستقیم دارد. (این قانون را به اسم دانشمند فرانسوی ژاك چارلز[۲]، قانون چارلز می‌نامند). باید مراقب بود که درجهٔ حرارت را نه با مقیاس فارنهایت و سانتیگراد بلکه با مقیاسی که صفر آن «صفر مطلق» یا ۲۷۳ درجه سانتیگراد است اندازه بگیریم. این مقیاس را که لرد کلوین[۳] فیزیکدان انگلیسی در قرن نوزدهم معرفی کرد «مقیاس مطلق» یا «مقیاس کلوین» می‌نامند. اکنون دیگراثبات تجربی قانون عمومی، که هر سه عامل را در بر می‌گیرد، کار آسانی است. چنین قانونی را می‌توان در واقع از دو قانون اول به دست آورد؛ اما این قانون کلی نسبت به مجموع دو قانون قبل، از محتوای تجربی بیشتری برخوردار است. این قانون عمومی می‌گوید که اگر مقدار گاز محبوس ثابت بماند حاصل ضرب فشار و حجم آن مساوی است با حاصل ضرب درجهٔ حرارت و عدد ثابت R (یعنی $P\times V=T\times R$). در این معادله، R عدد ثابتی است که با مقدار گاز تغییر می‌کند. این قانون عمومی مبیّن رابطه‌ای است بین سه کمیّت و بنابراین در پیش‌بینی کردن، بسیار با کفایت‌تر از دو قانون دیگر است. اگر مقدار دو کمیّت از سه کمیّت فوق را بدانیم می‌توان سومی را پیش‌بینی کرد.

با این آزمایش ساده می‌توان نشان داد که چگونه ممکن است با ثابت نگاهداشتن چند عامل، به هم پیوستگی عوامل دیگری را بررسی کرد.آزمایش همچنین سودمندی مفاهیم کمّی را، که دارای اهمیت فراوانند، نشان می‌دهد. قوانینی که از این آزمایش به دست می‌آیند مستلزم توانایی ما در اندازه‌گیری مقادیر مربوطه است. در غیر اینصورت قوانین باید به شکل کیفی تدوین شوند. این نوع قوانین

2. Jacques Charles

3. Lord Kelvin

بسیار ضعیف‌ترند و در پیش‌بینی کردن سودمندی چندانی ندارند. بدون وجود مقیاسهای عددی برای فشار، حجم و درجهٔ حرارت حداکثر می‌توان گفت که یکی از این مقادیر ثابت می‌ماند، زیاد و یا کم می‌شود. به این ترتیب قانون بویل را می‌توان چنین تدوین کرد: اگر درجهٔ حرارت گاز محبوسی ثابت بماند، با ازدیاد فشار حجمش کم می‌شود و بالعکس، کم شدن فشار حجم آن را زیاد می‌کند. مسلماً این نیز یك قانون است که حتی از بعضی لحاظ به قانون بویل شباهت دارد، ولی از آنجا که ما را به پیش‌بینی مقادیر مشخصی قادر نمی‌کند از آن بسیار ضعیف‌تر است. با آن فقط می‌توانیم پیش‌بینی کنیم که کمیّتی کم یا زیاد می‌شود یا ثابت می‌ماند.

نواقص اشکال کیفی قوانین گازها موقعی آشکارتر می‌شود که قانون عمومی فوق را بررسی کنیم:

$$P\cdot V = T\cdot R.$$

این را به این شکل می‌نویسیم:

$$V = \frac{T}{P}\cdot R.$$

اگر این معادلهٔ عمومی را به طور کیفی تعبیر کنیم، می‌توان اشکال ضعیف‌تر قانون بویل و قانون چارلز را نتیجه گرفت. فرض کنید هر سه کمیّت ـ فشار، حجم، درجهٔ حرارت ـ با هم تغییر کنند و تنها مقدار گاز (و در نتیجه R) ثابت بماند. در حین آزمایش مشاهده می‌کنیم که هم درجهٔ حرارت و هم فشار زیاد می‌شود. دربارهٔ حجم چه می‌توان گفت؟ در این مورد حتی نمی‌توانیم بگوییم که حجم زیاد می‌شود، کم می‌شود و یا ثابت می‌ماند. برای تعیین این امر اجباراً باید نسبتهای ازدیاد درجهٔ حرارت و فشار را دانست. اگر درجهٔ حرارت با نسبت بیشتری از فشار زیاد شد، از فرمول بالا نتیجه می‌شود که حجم نیز زیاد می‌شود. اگر نتوانیم مقادیر عدد به فشار و درجهٔ حرارت بدهیم، تحت این شرایط نمی‌توانیم چیزی دربارهٔ حجم پیش‌بینی

کنیم.

پس می‌بینیم که چطور، اگر قوانین علم محدود به قوانین کیفی باشند، پیش‌بینی چندانی نمی‌توان کرد و توضیحاتمان از پدیده‌های طبیعت خام خواهند بود، قوانین کمّی بسیار برترند. برای نیل به این قوانینِ باید مفاهیم نیز کمّی باشند. این مبحثی است که در فصل پنجم مفصلاً بررسی می‌شود.

بخش دوم

اندازه‌گیری و زبان کمّی