استنتاج محتمل بیزی

Bayesian Abduction

یاسر سلیمی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه تهران
Yaser.Salimi@ut.ac.ir

مقدمه

فیلسوفان علم همواره در پی فرمول‌بندی روشی بوده‌اند که فعالیت دانشمندان را به‌درستی توصیف کند و تفاوت بین علم و غیر علم شامل شبه‌علم و متافیزیک را مشخص کند. اثبات‌گرایی و ابطال‌گرایی دو نمونه از این تلاش‌ها هستند. برخی فیلسوفان مانند پل فایرابند نیز به‌طورکلی منکر وجود روش مشخصی برای علم هستند. در نوشته‌ی پیشین با ابطال‌پذیری[1] و نظریات کارل پوپر آشنا شدیم. این توصیف از روش علمی هنوز هم بین دانشمندان هواداران فراوانی دارد (البته شاید دانشمندان نیز روش انجام فعالیت علمی را پیچیده‌تر بدانند، اما هنگامی‌که با عامه‌ی مردم صحبت می‌کنند این توصیف ساده را مفید می‌دانند). ریچارد فاینمن فیزیکدان پرآوازه و برنده‌ی جایزه‌ی نوبل در توصیف قاعده‌ی علم می‌گوید: «به زبانی دیگر بگویم، استثنا ثابت می‌کند که قاعده اشتباه است. این اساس علم است. اگر برای هر قاعده‌ای استثنایی وجود داشته باشد و این استثنا با مشاهدات اثبات شود، آن قاعده اشتباه است»[1]. در توصیف فاینمن از علم، تفکر ابطال‌گرایی به‌روشنی دیده می‌شود اما در میان فیلسوفان علم تعداد کسانی که ابطال‌پذیری را توصیف درست و دقیقی از روش علمی بدانند کمتر است. در این نوشته به معرفی روش جدیدی برای توصیف فعالیت دانشمندان پرداخته می‌شود.

استنتاج محتمل

در نوشته‌ی قبلی استقرا[2] و قیاس[3] معرفی شدند. استدلال استقرایی رسیدن از احکام جزئی به حکم کلی است. مثلاً از دیدن سفید بودن قوهایی که دیده‌ایم نتیجه بگیریم همه‌ی قوها سفید هستند. استدلال قیاسی گرفتن نتیجه‌ی قطعی از مقدمات است. مثلاً اگر بگوییم که سقراط انسان است و همه و همه‌ی انسان‌ها فانی هستند، پس به‌صورت قطعی نتیجه می‌گیریم که سقراط نیز فانی است؛ اما نوع دیگری از استدلال وجود دارد که به آن استنتاج متحمل[4] (اَبداکشن) می‌گویند. استنتاج محتمل در ادبیات جدید فلسفی هم‌ارز با استنتاجِ بهترین تبیین[5] در نظر گرفته می‌شود. این نوع استدلال با استقرا و قیاس متفاوت است. در استنتاج بهترین تبیین همان‌طور که از نام آن برمی‌آید، ما به شواهد نگاه می‌کنیم و فرضیه‌های مختلف را با شواهد می‌سنجیم تا ببینیم کدام‌یک بهتر از فرضیات دیگر داده‌های موجود را توضیح می‌دهد.

تصور کنید که به یک نمایش شعبده‌بازی می‌روید. شعبده‌باز مقابل چشمان شما یک نفر را با اره به دونیم تقسیم می‌کند و دو قسمت بدن آن فرد نیز به‌صورت عادی رفتار می‌کنند. شما می‌توانید توضیحات متفاوتی برای چیزی که مشاهده کرده‌اید را ارائه کنید. مثلاً این که شعبده‌باز واقعاً فرد را به دونیم تقسیم کرده است و فرد برخلاف قوانین زیستی سالم مانده و دوباره به شکل معجزه‌وار به هم پیوند خورده است یا این‌که چنین اتفاقی نیفتاده است و شعبده‌باز از خطاهای ادراکی و شناختی شما برای ایجاد چنین نمایش و توهم بصری بهره برده است. کدام‌یک توضیح بهتری است؟ می‌دانیم که قوانین طبیعی به‌یک‌باره متوقف نمی‌شوند و افرادی که به دونیم تقسیم می‌شوند، زنده نمی‌مانند. از طرف دیگر می‌دانیم که شغل شعبده‌بازها فریب مخاطبان برای سرگرمی است. برای همین احتمال دوم تبیین بسیار بهتری برای مشاهدات شما است. استنتاج بهترین تبیین یا استنتاج محتمل همان کاری است که کارآگاهان در هنگام کشف جرایم انجام می‌دهند. آن‌ها به جمع‌آوری شواهد می‌پردازند و سپس بهترین فرضیه‌ای که همه‌ی شواهد را توضیح می‌دهد انتخاب می‌کنند. آیا دانشمندان نیز برای فهم جهان طبیعی همین کار را می‌کنند؟

[1] Falsifiability
[2] Induction
[3] Deduction
[4] Abduction
[5] Inference to the Best Explanation

تصویر۱. فرد بعد از دونیم شدن، زنده می‌ماند یا فقط یک فریب است؟

قضیه‌ی بیز

قضیه‌ی بیز[6] قضیه‌ای است که آماردان، فیلسوف و کشیش انگلیسی قرن هجدهم توماس بیز اثبات کرد. این قضیه راهی برای ارزیابی و به‌روزرسانی احتمالات رقیب پس از دریافت شواهد جدید به ما می‌دهد. تصور کنید که یک تاس در دست دارید که نمی‌دانید سالم است یا این‌که ناقص است و به آوردن عدد خاصی مثلاً عدد ۳ تمایل دارد. تاس را پرتاب می‌کنید. اگر عدد ۳ آمد نمی‌توانید قاطعانه نتیجه بگیرید که تاس ناقص است زیرا تاس سالم هم ممکن است عدد ۳ بیاورد اما پس‌ازاین پرتاب بیشتر از قبل احتمال می‌دهید که تاس ناقص باشد. قضیه‌ی بیز راهی برای کمّی سازی این افزایش اعتماد شما به فرضیات رقیب است. این قضیه به شکل زیر نشان داده می‌شود.

$$P(H \mid E) = (P(E \mid H)P(H))/(P(E))$$

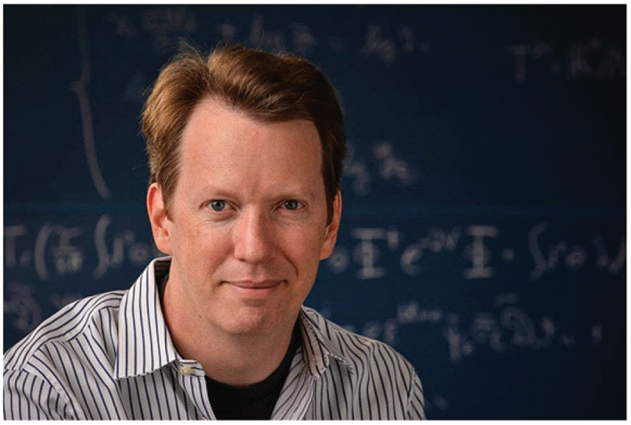
در این رابطه، H نماد فرضیه و E نماد شواهد است. P(H) را احتمال پیشین[7] و P(H | E) را احتمال پسین[8] (پس از رسیدن شواهد جدید می‌نامند. P(E | H) احتمالی است که با آن فرضیه‌ی H شواهد E را پیش‌بینی می‌کند و P(E) احتمال کلی رسیدن به شواهد E (صرف‌نظر از درستی یا نادرستی فرضیه‌ی H است) [2].

بیایید یک نمونه‌ی پزشکی را در نظر بگیریم. تصور کنید فردی برای تشخیص وجود یک بیماری آزمایشی داده است. نرخ شیوع این بیماری در جمعیت ۱ در هزار است؛ یعنی به‌طور متوسط از هر هزار نفر یک نفر به این بیماری مبتلا است. از طرفی این آزمایش نیز ۵ درصد مثبت کاذب دارد یعنی اگر فرد سالمی نیز آزمایش بدهد به‌احتمال ۵ درصد نتیجه‌ی آزمایش مثبت می‌شود؛ اما این آزمایش منفی کاذب ندارد. حال احتمال این‌که این فرد به آن بیماری مبتلا باشد چقدر است؟ کانمن و تورسکی این پرسش را از افراد زیادی ازجمله پزشکان پرسیدند و جواب‌ها بیشتر ۹۵ درصد یا ۵۰ درصد بود اما اگر قضیه‌ی بیز را برای حل این مسئله به کار ببریم پاسخ کمتر از ۲ درصد خواهد بود. از این رو کانِمن و تِورسکی اعتقاد داشتند که ما انسان‌ها استدلال‌گران بیزی خوبی نیستیم. دلیل اصلی چنین خطایی این است که بیشتر افراد به‌احتمال پیشین (که در اینجا ۰/۰۰۱ است) دقت نمی‌کنند.

استنتاج محتمل بیزی

در نوشته‌ی پیشین در مورد اشکالاتی که بر ابطال‌پذیری وارد است توضیحاتی ارائه شد. حال روشی را برای توصیف فرایند علم ارائه می‌دهیم که ادعا می‌شود به آنچه در واقعیت استفاده می‌شود نزدیک‌تر است. در مقابل استقراگرایی و روش قیاسی پوپر (او ابطال‌پذیری را روشی قیاسی برای علم می‌دانست)، استنتاج بهترین تبیین نیز برای توصیف روش علمی پیشنهاد شده است. البته نمی‌شود منکر شد که این روش نزدیکی زیادی به روش استقرایی دارد. برای مثال کار داروین را در نظر بگیرید. داروین شواهد بسیاری از شباهت‌های جانوران مختلف با همدیگر و سازگار شدن آن‌ها با محیط اطراف گردآوری کرد و سپس استدلال کرد که نیای مشترک و تحول جانداران از طریق انتخاب طبیعی توضیح بسیار بهتری نسبت به آفرینش دفعی و جداگانه‌ی موجودات است. این کار داروین به‌خوبی با الگوی استنتاج بهترین تبیین سازگاری دارد.

آیا قضیه‌ی بیز روشی مشابه استدلال بهترین تبیین ارائه می‌دهد؟ برخی از فیلسوفان علم در پاسخ به این پرسش جواب منفی داده‌اند و حتی این دو را باهم ناسازگار دانسته‌اند اما پیتر لیپتون ادعا می‌کند این دو نه‌تنها با هم سازگار هستند، بلکه آن‌ها به هم پیوند می‌خورند [3]. سمیر اکاشا نیز در نقد ون‌فراسن و شیوه‌ای که او این دو را باهم سنجیده است روشی پیشنهاد می‌کند که استدلال بیزی را به‌صورت گونه‌ای از استنتاج محتمل یا استنتاج بهترین تبیین ببینیم [4]. در میان دانشمندان نیز شان کرول فیزیکدان فعال در ترویج علم نیز استنتاج محتمل بیزی را مناسب‌ترین توضیح برای روش علمی می‌داند.



تصویر ۲. شان کرول، فیزیکدان آمریکایی

[6] Bayes' Theorem
[7] Prior
[8] Posterior

استنتاج محتمل بیزی روشی برای کمّی کردن استنتاج محتمل است. در استنتاج محتمل بیزی ما برای هر یک از فرضیات یا نظریات رقیب یک اعتبار[9] پیشین قائل هستیم. سپس احتمال[10] حصول شواهدی را بر اساس درست بودن این فرضیات استنتاج می‌کنیم. در صورت حصول این شواهد یا حصول‌نیافتن آن، طبق قضیه‌ی بیز میزان اعتبار فرضیه‌ها به‌روزرسانی می‌شوند که به آن اعتبار پسین می‌گویند. مثلا تصور کنید قبل از کشف ذره‌ی بوزون هیگز ما دو نظریه‌ی رقیب داشتیم که یکی وجود داشتن بوزون هیگز بود و دیگری وجود نداشتن آن. حال شتاب‌دهنده‌ی ذرات سرن برای آشکارسازی این ذره دست‌به‌کار می‌شود. فرض کنید اگر این ذره وجود داشته باشد احتمال کشف شدن آن توسط شتاب‌دهنده ۸۰ درصد باشد (و درنتیجه احتمال کشف نشدن آن ۲۰ درصد). اگر این ذره وجود نداشته باشد احتمال کشف شدن آن ۱۰ درصد (ممکن است خطایی رخ دهد یا سیگنالی به‌اشتباه به وجود بوزون هیگز تعبیر شود) و احتمال کشف نشدن آن ۹۰ درصد است. حال شتاب‌دهنده‌ی سرن دست‌به‌کار می‌شود و نتیجه کشف بوزون هیگز است. در این حالت میزان اعتباری که برای فرضیه‌ی وجود بوزون هیگز داریم بیشتر از پیش می‌شود و اعتبار وجودنداشتن آن کاهش می‌یابد. برای مثال اگر ابتدا احتمال وجودداشتن و وجودنداشتن بوزون را برابر می‌دانستیم (هردو برابر با ۵۰ درصد) پس از کشف این بوزون، اعتبار وجود بوزون به ۸۹ درصد افزایش پیدا می‌کرد و اعتبار وجودنداشتن آن به ۱۱ درصد کاهش می‌یافت.

هیچ روش عینی برای تعیین اعتبار پیشین وجود ندارد. تنها قاعده‌ای که باید رعایت شود این است که مجموع اعتبار پیشین فرضیات رقیب باید برابر با یک شود. اگر میزان اعتبار پیشین یک فرضیه را صفر یا یک (۰ یا ۱۰۰درصد) در نظر بگیریم، هیچ مقداری از شواهد نمی‌تواند مقدار آن را تغییر دهد اما ازآنجایی‌که علم بر اساس شواهد پیش می‌رود، یک دانشمند خوب اعتبار هیچ فرضیه‌ای را صفر یا یک در نظر نمی‌گیرد. همچنین با توجه به قضیه‌ی بیز اگر مقدار $P(E \mid H)$ را یک قرار دهیم همان روش فرضیه‌ای-قیاسی حاصل می‌شود. اگر این مقدار را برابر صفر قرار دهیم هم همان ابطال‌پذیری پوپر را نتیجه می‌دهد و احتمال پسین را به صفر می‌رساند و فرضیه را ابطال می‌کند. پس برای بهره بردن از مزیت‌های این روش بهتر است از مقادیر صفر و یک دوری کنیم.

به باور کرول برخلاف نظر پوپر، دانشمندان هیچ‌گاه یک نظریه‌ی محکم را به خاطر یک داده‌ی تجربی کنار نمی‌گذارند. برای مثال در سال ۲۰۱۱ آزمایشی انجام شد که نتایج آن نشان می‌داد نوترینوها با سرعتی بیش از سرعت نور حرکت می‌کردند. چنین نتیجه‌ای ناقض نسبیت خاص انیشتین است که یکی از نتایج آن می‌گوید هیچ اطلاعاتی نمی‌تواند با سرعتی بیش از سرعت نور منتقل شود؛ اما این آزمایش چندان هیجانی در فیزیکدانان ایجاد نکرد و بیشتر آن‌ها به آن بی‌اعتنا بودند و باور داشتند که اشتباهی در آزمایش رخ داده است. بعدها مشخص شد که واقعاً اشتباهی رخ داده است و همچنان مورد نقضی برای نظریه‌ی نسبیت خاص پیدا نشده است؛ اما آیا بی‌اعتنایی دانشمندان به این نتیجه تجربی بودن علم را زیر سؤال نمی‌برد؟ اگر روش علم را استنتاج محتمل بیزی بدانیم اصلاً چیز عجیبی نیست. نظریه‌ی نسبیت خاص به دلیل موفقیت‌هایی که داشته همواره توسط شواهد تأیید شده است و بنابراین اعتبار آن بسیار بالا رفته است. برای همین یک آزمایش منفرد نمی‌تواند اعتبار آن را به‌صورت محسوسی کاهش دهد.

تصویر ۳. اگر این بازی را انجام داده باشید، ناخودآگاه از استنتاج محتمل استفاده کرده‌اید.

نقد استنتاج محتمل بیزی

مانند تمام توصیف‌های دیگر از روش علمی، نقدهایی به استنتاج متحمل بیزی وارد شده است. یکی از نقدها این است که (برخلاف مثال پزشکی که قبلاً گفته شد) در این روش اعتبارهای پیشین عینی نیستند و چیزی ذهنی (سابجکتیو) به روش علمی اضافه شده است که با روحیه‌ی علمی ناسازگار است. کرول در پاسخ می‌گوید که علم یک فعالیت انسانی است و در فعالیت‌های انسانی چنین چیزی ناگزیر است. همچنین در آغاز گرچه اعتبارهایی که افراد مختلف برای فرضیات رقیب قائل می‌شوند ممکن است متفاوت باشد، اما هرچه شواهد بیشتر شود ازآنجاکه میزان احتمال وقوع شواهد در صورت درست بودن فرضیات عینی است، میزان اعتباری که درنهایت برای فرضیات در نظر می‌گیریم همگرا می‌شود. به‌عبارت‌دیگر هرچه شواهد بیشتر باشد نظر دانشمندان به یکدیگر نزدیک‌تر خواهد شد. در مورد فرضیاتی که هنوز شواهدی در تأیید یا رد آن‌ها نیست اختلاف‌نظر طبیعی است و واقعاً وجود دارد. برای همین استنتاج محتمل بیزی توصیفی از واقعیت

[9] Credence
[10] Likelihood

فرایند علمی ارائه می‌دهد؛ اما ایراد دیگر این است که تعیین خود احتمالات که قرار است عینی باشند هم کار ساده‌ای نیست و ممکن است در مورد آن اتفاق‌نظر وجود نداشته باشد.

ایراد دیگر مسئله‌ی شواهد قدیمی[11] است؛ یعنی شواهدی که پیش از ایجاد نظریه وجود داشته‌اند. برای مثال پس از آن که انیشتین نظریه‌ی نسبیت عام خود را فرمول‌بندی کرد، به محاسبه‌ی میزان حرکت تقدیمی مدار سیاره‌ی عطارد پرداخت. میزان این حرکت تقدیمی از سال‌های پیش مشخص بود و مکانیک نیوتونی توضیحی برای آن نداشت. هنگامی‌که انیشتین فهمید که مقداری که نظریه‌ی او پیش‌بینی می‌کند با مقدار مشاهده‌شده مطابقت دارد قلبش به تپش افتاد و در آن لحظه تأیید بزرگی بر نظریه‌اش دریافت کرد؛ اما مطابق قضیه‌ی بیز این شواهد نباید تغییری در میزان اعتباری که انیشتین برای نظریه‌اش قائل بود ایجاد کند؛ زیرا احتمال وقوع شواهد (P(E)) در مخرج کسر سمت راست) در اینجا برابر با یک است چون این شواهد قطعاً به وقوع پیوسته است. برای همین میزان اعتبار پسین نمی‌تواند بیش از اعتبار پیشین شود. آیا انیشتین اشتباه می‌کرده است یا استنتاج محتمل بیزی چیزی را از قلم انداخته است؟

سمیر اکاشا این مشکل را ناشی از فرضی در قضیه‌ی بیز می‌داند که نظریه‌پرداز را دانای کل (به لحاظ استنتاج منطقی و نه دانش تجربی) می‌پندارد؛ یعنی چنین فرض می‌کند که گویی از همان ابتدا تمام نتایج منطقی نظریه واضح و روشن است. برای همین قضیه‌ی بیز شواهد تجربی جدید را به‌عنوان شواهد می‌پذیرد، اما راهی برای ورود چیزی که می‌توانیم آن را شواهد منطقی بنامیم ندارد. کرول نیز برای پاسخ دادن به این ایراد به چیزی که متوسل می‌شود که ریچارد دیوید فیلسوف آمریکایی آن را تأیید غیرتجربی[12] می‌نامد. به باور او هنگامی چیزی در مورد نتایج منطقی یک نظریه کشف می‌کنیم، مثلاً سازگار بودن آن با نظریات پذیرفته‌شده یا شواهد قدیمی، آن را نیز باید مانند شواهد تجربی تأییدی بر نظریه بدانیم. البته نحوه‌ی محاسبه‌ی احتمالات برای این شواهد غیرتجربی چندان مشخص نیست.

مشکل دیگر برای این توضیح این است که در برخی موارد ما هنوز همه‌ی فرضیات ممکن را نمی‌دانیم. در مواردی ممکن است گزینه‌های ممکن و پیش رو محدود باشند، اما همیشه چنین نیست. برای حل این مشکل ناچار خواهیم شد یک فرضیه تحت عنوان فرضیات دیگر اضافه کنیم؛ اما دوباره این مشکل پیش می‌آید که چگونه احتمال وقوع شواهد خاصی را طبق فرضیات دیگری که نمی‌دانیم پیش‌بینی کنیم. کرول در پاسخ به این ایراد می‌گوید چنین اشکالی وارد است و این مسئله واقعاً برای دانشمندان پیش می‌آید. علم یک فرایند شسته‌رفته نیست که همیشه همه‌چیز به‌صورت ایده‌آل پیش برود.

مرزگذاری و توضیحات فراطبیعی

پوپر معیار واضحی برای تشخیص علم از غیر علم ارائه داد. اگر نظریه‌ای ابطال‌پذیر باشد، یعنی بشود شرایطی را تصور کرد که پیش‌بینی‌های یک نظریه نادرست باشد آن نظریه علمی است. به اعتقاد کرول این معیار مرزگذاری معیار ارزشمندی است اما کاملاً دقیق نیست. برای مثال بس‌گیتی کیهانی[13] را در نظر بگیرید. این فرضیه ادعا می‌کند که ممکن است در همین جهان ما مناطقی وجود داشته باشند که در آن برخی از قوانین فیزیک متفاوت باشد. این مناطق چندان از ما دور هستند که در تمام عمر کیهان هم راهی برای این‌که اطلاعاتی از آن‌ها به ما برسد وجود ندارد. برای همین ادعای وجود چنین چیزی مطابق معیار پوپر غیر علمی است؛ اما این یک مسئله‌ی علمی است که فیزیکدانان و کیهان‌شناسان در مورد آن پژوهش می‌کنند. به‌علاوه شواهدی وجود دارد که می‌تواند میزان اعتبار این ادعا را بیشتر یا کمتر کند. مثلاً اگر بدانیم ثابت کیهان‌شناختی[14] یک عدد تصادفی است، اعتبار وجود چنین نوعی از بس‌گیتی افزایش می‌یابد اما راهی برای ابطال آن نداریم. معیار پوپر گرچه نمی‌تواند معیار نهایی باشد، اما ارزش زیادی دارد. دلیل آن هم این است که این معیار دو ویژگی مهم نظریات علمی را در برمی‌گیرد. ویژگی اول قطعی بودن[15] است؛ یک نظریه‌ی علمی ادعایی واضح و مشخص در مورد طبیعت مطرح می‌کند که قابل‌انعطاف نیست. نظریه‌ای که همه چیز را توضیح دهد درواقع چیزی را توضیح نمی‌دهد. نظریه‌ی روانکاوی فروید (حداقل ازنظر پوپر) چنین بود که ادعای مشخص و غیرقابل‌انعطاف مطرح نمی‌کرد و می‌شد اتفاقات متضاد با آن را توجیه کرد. ویژگی دوم تجربه‌گرایی[16] است. هدف نهایی یک نظریه این است که مشاهدات ما را توضیح دهد. برای همین هیچ نظریه‌ای نباید بر مبناهای صرفاً غیرتجربی پذیرفته شود؛ بنابراین شاید بشود گفت اگر فرضیه‌ای این دو معیار را برآورده کند نمی‌شود آن را غیرعلمی دانست. اول این‌که امکان درست بودنش وجود داشته باشد و دوم درستی یا نادرستی آن در فهم ما از مشاهداتمان تأثیرگذار باشد[5].

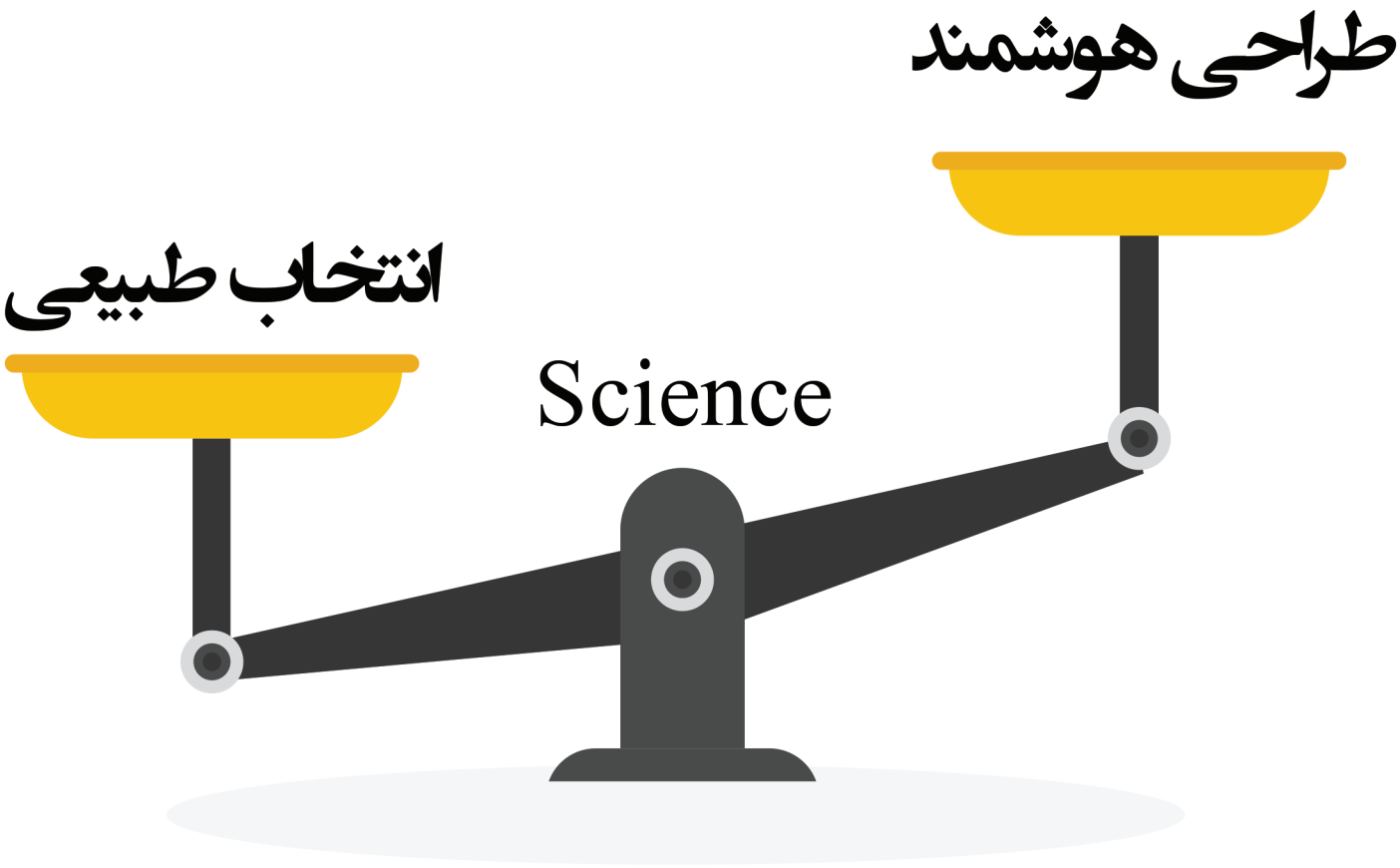
در تقابل با طراحی هوشمند، مخالفان تدریس این موضوع که آن را ورود دین به مدارس تحت نام علم می‌دانستند، به چیزی به نام طبیعت‌گرایی روش‌شناسانه[17] متوسل شدند که البته با طبیعت‌گرایی متفاوت است. طبیعت‌گرایی ادعایی درباره‌ی جهان است که می‌گوید تنها جهان طبیعی وجود دارد اما طبیعت‌گرایی روش‌شناسانه فرضی است که می‌گوید علم تنها به توضیحات طبیعی برای توضیح جهان می‌پردازد. در طبیعت‌گرایی روش‌شناسانه، علم محدود به توضیحات طبیعی است و توضیحات فراطبیعی بدون بررسی به‌عنوان غیر علمی بودن کنار گذاشته می‌شوند؛ اما در توضیحاتی که در مورد

[11] The Problem of Old Evidence
[12] non-Empirical Confirmation
[13] Cosmic Multiverse
[14] Cosmological Constant
[15] Definiteness
[16] Empiricism
[17] Methodological Naturalism

روش علمی ارائه شد درجایی الزامی نشده است که توضیحات و نظریات باید حتماً طبیعی باشند. هدف علم، یافتن توصیف درست از جهان است. اگر این توصیف شامل چیزی فراطبیعی است باید علم بتواند ما را به آن برساند. پس کرول تأکید می‌کند که روش علم را باید تجربه‌گرایی روش‌شناسانه[18] دانست. اگر فرضیات فراطبیعی بتوانند تجربیات مورد مشاهده ما را توضیح دهند و چیزی قابل‌سنجش پیش‌بینی کنند پس ما آن‌ها را مطابق روش علمی می‌سنجیم. مشکل طراحی هوشمند این نیست که علمی نیست بلکه این است که به لحاظ علمی ارزش خاصی ندارد و تکامل از طریق انتخاب طبیعی در تمام موارد توضیح بهتری برای پدیده‌ها ارائه می‌دهد.

منابع

1. The Meaning of It All, Richard Feynman, 1998.
2. The Big Picture, Sean M. Carroll, 2015.
3. Inference to the Best Explanation, Peter Lipton, Second Edition 2004.
4. Van Fraassen's Critique of Inference to the Best Explanation, Samir Okasha, 2000.
5. Beyond Falsifiability: Normal Science in a Multiverse, Sean M. Carroll, 2018.



[18] Methodological Empiricism