



## مدل‌ها و نقش آن‌ها در

## پیش‌درآمدی بر مطالعه‌ی فیزیک

رابرت جی. شاماندا  
مترجم: منیژه رهبر

هیچ فیزیک‌دان یا مهندسی یک مسئله‌ی واقعی را حل نمی‌کند، بلکه به جای آن مسئله، مدلی را به وجود می‌آورد تا به کمک آن مسئله را حل کند. این مدل باید دو ویژگی داشته باشد: یکی این‌که به اندازه‌ی کافی ساده و قابل حل باشد، و دیگر این‌که به اندازه‌ی کافی واقعی باشد تا مفید واقع شود.

نظریه‌ها و قانون‌های فیزیک هم مدل‌اند. هنر تحلیل علمی به وجود آوردن مدل‌های مفید از واقعیت است، اعم از این‌که موضوع حل یک مسئله‌ی خاص مهندسی باشد یا جست‌وجوی قانون‌های جامع فیزیک. مدل فصل مشترک واقعیت و ذهن بشر است. چون مدل با استفاده از معیارهای انسانی بیان می‌شود، بنابراین قالب آن باید شامل مفاهیمی باشد که از داده‌های تجربی خود به دست می‌آوریم. مدل همان قدر تجلی آزمایش‌ها و طرز تفکر ماست که به واقعیت خارجی مدل‌سازی شده می‌پردازد.

ترجیح می‌دهم در جایی که دیگران معمولاً از نظریه‌ها سخن به میان می‌آورند درباره‌ی مدل‌ها صحبت کنم، زیرا واژه‌ی «مدل» بر سودمند بودن تأکید دارد. معمولاً فکر می‌کنیم نظریه نامزد حقیقی واقعی و عینی است، در حالی که مدل، بدون آن که مدعی یکتایی، کمال، و غایی بودن باشد، اطلاعات مفیدی را انتقال می‌دهد. به عنوان مثال، لقاح، تکوین، تولد، و رشد مدلی در فیزیک. در اینجا قانون گازهای کامل  $PV = \alpha T$  را در نظر می‌گیریم که بی‌گمان شما آن‌ها را در درس‌های فیزیک یا شیمی مطالعه کرده‌اید.

## تاریخچه‌ی یک مدل

می‌کند. دانشمندان چون بویل<sup>۱</sup>، چارلز<sup>۲</sup> و گی‌لوساک<sup>۳</sup>، رفتار این ابزارها را وقتی یک گاز در شرایط کنترل شده‌ای به آن‌ها متصل می‌شد بررسی کردند.

خلاصه‌ی این داستان بسیار طولانی چنین است. آزمایش‌های این دانشمندان به تدوین رابطه‌ی تجربی  $PV = \alpha T$  انجامید که در آن متغیرهای  $P$  و  $T$  به ترتیب قرائت‌های فشارسنج، دماسنج، و  $\alpha$  برای مقدار معینی از گاز ضربی ثابت است. اگر در

به رغم اندیشه‌های مجرد و پر حجم فلاسفه در طی قرون، در دوران باستان و قرون وسطی هنوز هیچ شناخت مفیدی از رفتار یک گاز وجود نداشت. احتمالاً این مدل مفید منتظر اختراع دماسنج و فشارسنج بود. در هر یک از این ابزارها از یک لوله‌ی باریک شیشه‌ای حاوی جیوه برای مشخص کردن عددی استفاده می‌شود که در شرایط مختلف ارتفاع جیوه در آن تغییر

یک گاز،  $P$ ،  $V$ ، و  $T$  را اندازه‌گیری‌های مربوط به ویژگی‌های گاز تعریف کنیم، رابطه‌ی  $PV = \alpha T$  مدل مفیدی برای رفتار آن است. گرچه تا اینجا  $P$  و  $T$  معنی فیزیکی عمیقی ندارند و تنها اعداد تولید شده توسط ابزارهای خاص‌اند. به‌طور کلی انتظار نمی‌رفت هیچ رابطه‌ای (چه رسد به این رابطه‌ی ساده) بین اعداد تولید شده به وسیله‌ی آن ابزارها (یا ابزارهای دیگر) برقرار باشد. وقتی این رابطه‌ی بین اعداد نمایان شد، فقط می‌شد سپاسگزار این خوش‌شانسی بود. این موضوع مورد یکی از مشهورترین گفته‌های انیشتین است که «غیرقابل درک‌ترین نکته درباره‌ی جهان قابل فهم بودن آن است.»

پیدایش مدل  $PV = \alpha T$ ، گام بزرگی به پیش بود. توجه کنید که گام اولیه‌ی سرنوشت‌ساز تدوین مجموعه‌ای از مفاهیم برحسب پرسش‌های معناداری از طبیعت بود که شاید طبیعت به‌طور معناداری به آن‌ها پاسخ می‌داد. این مفاهیم در طبیعت نیارمیده‌اند و منتظر آن نیستند تا کسی با نگاه کردن منفعلانه آن‌ها را کشف کند. بلکه باید به‌طور فعال آن‌ها را خلق کرد. این وضعیت نشان می‌دهد که خواص مواد چگونه آشکار می‌شود و چگونه وجود آن خواص قابل اندازه‌گیری را از روی واقعیت‌های مفید تعریف می‌کنیم. آن‌ها ساخته‌های بشرند که می‌توان برحسب آن‌ها پرسش‌های معناداری از طبیعت کرد و پاسخ‌های طبیعت را خواند، و این شناخت را به صورت مدل‌های مفید و آزمون‌پذیر سازمان‌دهی کرد.

هر یک از این مفاهیم به صورت کمی - به شکل اعدادی که دستگاه اندازه‌گیری نشان می‌دهد - در طبیعت وجود دارند. قانون تجربی گازها رابطه‌ای ساده (و بسیار مفید) بین اعداد  $(P, V, T)$  است که ابزارهای اندازه‌گیری ما تولید کرده‌اند. این یک مدل تجربی است. اعدادی که ابزارهای اندازه‌گیری تولید کرده‌اند هیچ معنایی عمیق‌تر از تصویر مدل مفهومی دستگاه مورد اندازه‌گیری و تأثیر آن بر اندازه‌گیری ندارند.

بویل در سال‌های ۱۶۰۰ در حالی آزمایش‌های خود را انجام می‌داد که کشیش‌های زائر (مسیحون‌های مذهبی) آمریکا را مستعمره می‌کردند. اما تا اواسط سال‌های ۱۸۰۰ که آمریکایی‌ها علیه بردگی می‌جنگیدند طول کشید تا ژول<sup>۵</sup> نظریه‌های (مدل‌های)

مکانیک نیوتونی و اتم‌گرایی (که مورد مجادله‌ی شدید بود) را با هم تلفیق کرد تا مدل مفهومی گاز کامل را به صورت دستگاهی از ذرات نقطه‌ای دارای حرکت کاتوره‌ای تدوین کند. در این مدل  $P$  به طور کاملاً طبیعی با مفهوم نیروی نیوتونی در ارتباط است و رفتار فشارسنج جیوه‌ای را توجیه می‌کند. اما، کمیت تجربی  $T$  «دمای» گاز که دماسنج تولید می‌کند تعریف مکانیکی از پیش تعریف شده‌ای را تداعی نمی‌کند.

در اینجا با مورد شگفت‌انگیزی از توان حیرت‌آور و باورنکردنی علم تحلیلی مبتنی بر تجربه روبه‌رو می‌شویم که برهم کنش ثمربخش فیزیک نظری و تجربی است. قانون‌های نیوتون، مدل مفهومی ژول را به این نتایج بسیار روشنگر رهنمون شد که مقدار عددی حاصل ضرب  $PV$  برای گاز ژول با انرژی جنبشی کل ذرات دارای حرکت کاتوره‌ای متناسب است. بنابراین، مدل مفهومی ژول به دمای  $T$  در رابطه‌ی  $PV = \alpha T$  به عنوان یک ویژگی ساخت بشر گاز، معنایی عمیق‌تر می‌بخشد: دما معیاری از حرکت کاتوره‌ای ذرات گاز می‌شود.

## مدلی از مدل‌ها

بنابراین مدل ریاضی  $PV = \alpha T$  دارای شالوده‌های تجربی و مفهومی است. من آن را به عنوان الگویی برای نشان دادن ویژگی‌های مدل در فیزیک ارائه می‌دهم.

- ۱) مدل ساخت بشر و محصول آزمایش و تصور ماست.
- ۲) مدل کمی است و از ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری ماده صحبت می‌کند که آزادانه تعریف می‌شوند.
- ۳) مدل هم به لحاظ تجربی و هم از نظر مفهومی سودمند است و تساوی عددی آزمون‌پذیری را نشان می‌دهد که شامل اعداد تولید شده توسط ابزارهای اندازه‌گیری مشخص است، و چارچوبی مفهومی را برای نسبت دادن معنایی عمیق‌تر به این اعداد در اختیار می‌گذارد.

۴) ثمربخش بودن تجربی یک مدل را تأیید تجربی تعیین می‌کند، و وقتی ثمربخشی آن تأیید شد، معتبر باقی می‌ماند و مدل‌های جامع‌تری آن را به عنوان موردی خاص دربر خواهد گرفت.

۵) ثمربخشی مفهومی یک مدل می‌تواند موضوعی

هنر تحلیل  
علمی، به  
وجود آوردن  
مدل‌های مفید  
از واقعیت  
است



فرهنگی، بنیادین و حتی مربوط به سلیقه‌ی شخصی باشد (که اغلب چنین است).

## محدودیت‌های مفهومی

بدیهی است که مدل‌های مفهومی از داده‌های تجربی تولید می‌شوند. وقتی چشمان خود را می‌بندم تا به دقت جسمی مثلاً قطعه‌ای از میوه، میز، یا صورت خود را حس کنم می‌کوشم مجسم کنم اگر حس بینایی نداشتم چه تصویری در مورد آن پیدا می‌کردم؟ اگر تنها از حس لامسه استفاده می‌کردم چه نوع مدل مفهومی در کشف یک واقعیت می‌ساختم؟ (سعی کنید بدون کمک گرفتن از حس بینایی شکل یک شی را مجسم کنید). چگونه می‌توانستم زبان فردی بینا را درک کنم؟ شخص بینا نمی‌تواند با استفاده از هیچ روشی تجربه‌ی آگاهانه خود از نور در برابر تاریکی را به من منتقل کند چه رسد به قرمز در برابر سبز را. مدل‌های مفهومی ما فقط می‌توانند با مقایسه‌ها و استعاره‌های ضعیف و سست رابطه برقرار کنند، اما مدل‌های تجربی قادرند با ابزارهای اندازه‌گیری، این عمل را بدون هیچ ابهامی انجام دهند.

مدل‌های مفهومی تابع شخص ناظر و محدودیت‌هایش هستند. وقتی یک فیزیک‌دان رفتار واقعی را می‌کاود، در واقع می‌کوشد مدل‌های مفهومی با معنایی از واقعیت را با استفاده از مواد خامی ابداع کند که در آزمایش‌های انسانی شکل گرفته‌اند. هرچه فیزیک‌دان عمق بیشتری را بکاود، بیشتر درمی‌یابد که برای ساختن مدل مفهومی رفتار واقعیت بر مبنای معیارهای انسانی باید در انتزاعی کردن و بارور ساختن ایده‌های خود سازندگی و خلاقیت هرچه بیشتری به کار برد.

دلیلی ندارد انتظار داشته باشیم این فرایند به‌طور نامحدود تداوم یابد. اما منطقی است پیش‌بینی کنیم در فراتر از سطح معینی از تحلیل، رفتار واقعیت را نتوان برحسب معیارهای انسانی، حتی با هوشمندی فزاینده‌ی کافی برای ابداع تساوی‌های عددی حاصل از اعداد خوانده شده توسط ابزارهایمان، به صورت دقیق مدل‌سازی کرد. گذشته از هرچیز، ابزارهایمان همان قدر سطحی هستند که حواسمان.

اکنون تقریباً به این مانع مفهومی برخورد کرده‌ایم. مدل‌های ریاضی نظریه کوانتومی حتی قدرت تخیل اینشتین را

به چالش می‌طلبید. او هرگز نتوانست مدل مفهومی شایسته‌ای را از واقعیت‌های نهفته در ورای این معادله‌های ریاضی تصور کند. هنرهای جدید و موسیقی از نظر «عجیب بودن» پس از فیزیک در مرتبه‌ی دوم قرار می‌گیرند، گرچه هنرها از هر محدودیتی آزادند، در حالی که فیزیک به شدت تحت تأثیر محدودیت مفیدبودن تجربی قرار می‌گیرد.

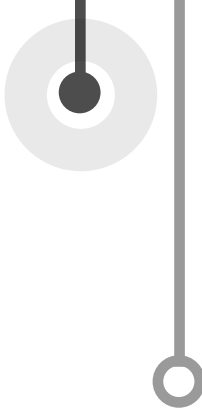
## استانداردها، سلیقه، و زیبایی

فرض کنید بر اثر کشتی شکستگی در جزیره‌ای خالی از سکنه گرفتار شده‌اید و چون کار دیگری ندارید تصمیم گرفته‌اید علم فیزیک را از نو بسازید. تصمیم می‌گیرید ابتدا استانداردهای اندازه‌گیری بازه‌های مکان و زمان را انتخاب (طراحی) کنید. چطور باید میله‌ی اندازه‌گیری استاندارد و ساعت استاندارد را انتخاب کنید؟ این پرسشی از نوع «گره‌ی کور» است: یعنی همه دوست دارند این استانداردها از قبل در دسترس باشند، به طوری که بتوان آزمایش‌ها (هم آزمایش‌های فیزیکی و هم آزمایش‌های ذهنی) را برای پرسش از طبیعت انجام داد، پاسخ‌هایش را خواند و به نظریه‌ای در مورد رفتار ماده دست یافت. اما انتخاب ساعت استاندارد و میله‌ی اندازه‌گیری مستلزم شناخت قابل ملاحظه از رفتار ماده است. مثلاً انتخاب ساعت استاندارد مستلزم این نظریه است که سازوکار ویژه‌ای با آهنگ ثابت تیک‌تاک می‌کند. البته، سازگاری منطقی نظریه را به این نتیجه‌گیری می‌رساند. انتخاب نظریه‌ها و استانداردها به طور تفکیک‌ناپذیری درهم تنیده‌اند.

محظوری که در بالا به آن اشاره شد تضعیف‌کننده نیست، بلکه فقط باید واژه‌ی «نظریه» (انتخابی برای واقعیت عینی مطلق) را با واژه‌ی «مدل» (روش مفیدی برای توصیف واقعیت بر مبنای معیارهای انسانی) جایگزین کرد. از این نظر، انتخاب یک ساعت صرفاً وجود پارامتر قابل اندازه‌گیری (t) را تعریف می‌کند که به عنوان مبنای خطی زمان برای توصیف تحول پدیده‌ها به کار می‌رود. روند تمام پدیده‌های دیگر را با توالی تیک‌های این ساعت مقایسه می‌کنیم.

بدیهی است انتخاب استانداردها موضوعی اختیاری است. معیار انتخاب ما براساس واقعیت نیست، بلکه صرفاً بر مبنای

تمرینش  
بودن تجربی  
یک مدل را  
تأیید تجربی  
تعیین می‌کند،  
و وقتی  
تمرینش  
آن تأیید شد،  
معتبر باقی  
می‌ماند



## معیار انتخاب ما بر اساس واقعیت نیست، بلکه صرفاً بر مبنای مفید بودن است

اندازه‌گیری جدید را با ویژگی‌های «نسبیتی» عجیب طراحی کنیم، اما نتیجه‌ی جالب توجه آن بود که شگفتی‌های جدید فقط فرهنگی بودند. ساعت‌ها و مترهای عادی رفتار نسبیتی داشتند و گستره‌ی وسیعی از پدیده‌ها، حتی آن‌هایی که با معادله‌های ماکسول تفاوت بسیار داشتند، را می‌شد به صورت بسیار ساده‌ای توصیف کرد. مورد پذیرش عام قرار گرفتن نسبیت سریع و آسان نبود، اما امروز نسبیت نه تنها به لحاظ تجربی و مفهومی سودمند شده است، بلکه زیبا هم هست!

جست‌وجوی زیبایی همواره عامل محرکی در مدل‌های ماست و گاهی مانند مورد نسبیت انیشتین، به نظر می‌رسد که زیبایی تنها انگیزه باشد. امروز بسیاری از افراد مانند اینشتین از جست‌وجوی زیبایی شهودی در جنبه‌های کوانتومی فیزیک جدید ناامید شده‌اند. زیبایی نظریه‌ی کوانتومی، برخلاف نسبیت، هنوز از درک غریزی انسان می‌گریزد. شاید با گذشت زمان سلیقه‌مان تغییر کند، اما این تغییر باید با معطوف کردن توجه‌مان به مدل‌ها به جای نظریه‌ها آغاز شود. فیزیک هیچ پاسخ‌نهایی و آرام‌کننده‌ای را ارائه نخواهد کرد.

### فیزیک شخصی شما

علم فیزیک بی‌فایده نبوده است و چیزهای زیادی را می‌توان از آن آموخت. آموختن از آن خود کردن است؛ فرایندی فعال که فقط با شنیدن و خواندن آغاز می‌شود. اغلب مجبورید به شنیده‌ها و خواننده‌های خود برگردید. اما آموختن معنادار فقط با تأمل به دست می‌آید. هر کس باید مدل‌ها و فلسفه‌ی خود را در مورد فیزیک داشته باشد. این مدل‌ها رشد می‌کنند و توسعه می‌یابند - این ساختن هرگز کامل نیست. آنچه در این مقاله بیان کردم احتمالاً مورد انتقاد دانشمندان، فیلسوفان، شاگردان، و شاید حتی خودم قرار می‌گیرد، زیرا شناخت من از فیزیک توسعه پیدا می‌کند. امیدوارم گفته‌های من زمینه‌ای برای آغاز بحث و تفکر باشد. کوشیده‌ام فلسفه‌ی فعلی خودم را برایتان شرح دهم. با گذشت زمان روایت شخصی و منحصر به فرد خود از مدل را خواهید داشت. شناخت فیزیک، حتی بیشتر از درک یک سمفونی یا نقاشی، رویارویی شخصی و منحصر به فردی از خودآگاهی با واقعیت است.

مفید بودن است. کدام انتخاب به «مطلوب‌ترین» مدل تجربی و مفهومی واقعیت می‌انجامد؟ به عبارت دیگر، مدل مفهومی باید چقدر «غیرعادی» باشد تا به لحاظ تجربی مفید واقع شود؟ واژه‌های «مطلوب» و «مفید» را باید با فرهنگ علمی رایج تعریف کنید، یعنی انتخاب آن‌ها بستگی به سلیقه‌ی شما دارد. به‌طور کلی هرچه بیشتر به این جزئیات بپردازیم که مدل تا کجا پیش خواهد رفت، به لحاظ تاریخی متوجه خواهیم شد که این موضوع فرایندی تکراری است.

بگذارید شما را با مثال شهودی (که امیدوارم بعداً به‌طور کامل مطالعه کنید) سرگرم کنم. اینشتین نخستین کسی بود که در سال ۱۹۰۵ از آزادی انتخاب میله‌ها و ساعت‌ها استفاده کرد. تعریف‌های «مطلوب» و «غیرعادی» او «روند کلی» را نشان نمی‌داد. برای اینشتین مطلوب چیزی بود که ناوردایی (یکسانی) معادله‌های الکترودینامیک ماکسول را برای ناظران بدون شتاب حفظ کند. اما عقل متعارف می‌گفت که در معادله‌های ماکسول، سرعت‌ها را باید از یک چارچوب مرجع مطلق (چارچوب «اتر») اندازه‌گیری کرد. این موضوع برای بسیاری افراد «مطلوب» بود. برای آن‌ها ساده بودن قانون‌های فیزیک برای ناظر در حال سکون مطلق قانع‌کننده بود. در واقع، هرگونه انحراف نتایج تجربی از قانون‌های فیزیک داده‌های کافی برای اندازه‌گیری سرعت مطلق را در اختیار می‌گذاشت. آن‌ها ناامید شده بودند که مدل نیوتون امکان اندازه‌گیری سرعت مطلق با آزمایش‌های مکانیکی را به آن‌ها نمی‌داد (خود نیوتون هم باید ناامید شده باشد) اما اکنون بسیار خوشحال بودند که مدل الکترودینامیک ماکسول (که شامل نور است) به آن‌ها این امکان را می‌داد که سرعت مطلق را با استفاده از آزمایش‌های اپتیکی اندازه‌گیری کنند.

اینشتین مدل مفهومی کاملاً متفاوتی را برای الکترودینامیک ماکسول در نظر گرفت. او در پی مدلی بود که در آن تمام ناظران بدون شتاب با استفاده از مقادیر عددی هم کمیت‌ها (مثلاً سرعت) از چارچوب خود بتوانند معادله‌های ماکسول را با اعتبار یکسان به کار ببرند. برای این کار او شهادت آن را داشت که اندازه‌گیری زمان و مکان را بازتعریف کند. انتظار می‌رفت که این باز تعریف، بدترین چیزهای غیرعادی را وارد مدل کند. بدون شک، انتظار داشتیم مجبور شویم ساعت‌ها و میله‌های

#### زیرنویس

1. Robert J. Sciamanda
2. Boyle
3. Charles
4. Gay-Lussac
5. Joule

#### منبع

Quantum,  
November /  
December 1986, pp  
45-47