

## اهمیت مدل‌سازی در علم<sup>۱</sup>

رضا اخلاقی<sup>۲</sup>

دانش‌آموخته دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه فلسفه علم، تهران، ایران.

### چکیده

مفهوم مدل یکی از مفاهیم اساسی فلسفه‌ی علم و معرفت‌شناسی معاصر است. فیزیک‌دانان یک مسأله‌ی واقعی را حل نمی‌کنند، بلکه به جای آن مسأله، مدلی را به وجود می‌آورند تا به کمک آن مسأله را حل کنند. واژه‌ی مدل‌سازی در فیزیک بسیار فراگیر شده است و آموزش مدل‌سازی نمونه‌ای از کل یک برنامه‌ی آموزشی بر پایه‌ی مدل‌سازی است. با وجود این، فراگیران در کلاس‌های سنتی درس فیزیک از مفهوم «مدل» درک روشنی ندارند و در نتیجه متوجه نقش این مفهوم در فیزیک نمی‌شوند. اصول بنیادی مکانیک نیوتونی را می‌توان دستگامی از قاعده‌ها در نظر گرفت که دسته‌ای از بازی‌های مدل‌سازی را تعریف می‌کنند. هدف مشترک این بازی‌ها توسعه‌ی مدل‌هایی از پدیده‌های فیزیکی است. این نقطه‌ی شروع، رهیافتی جدید به آموزش فیزیک است که در آن به فراگیران از ابتدا یاد داده می‌شود که در علوم «نام بازی مدل‌سازی است». ایده‌ی اصلی آموزش، دستگامی از اصول صریح مدل‌سازی و روش‌هاست تا شاگردان با مجموعه‌ای بنیادی از مدل‌های فیزیکی آشنا شوند. آنها با تمرین فراوان در جهت مدل‌سازی و اعتبار بخشی به مدل می‌توانند پدیده‌های فیزیکی را توجیه، پیش‌بینی و توصیف کنند. این مقاله مبنای منطقی، فیزیکی، معرفت‌شناسی، تاریخی و آموزشی این رهیافت را تعیین می‌کند.

**واژگان کلیدی:** مدل، مدل‌سازی، یادگیری، فیزیک و مکانیک.

---

۱. تاریخ وصول: ۱۳۸۹/۴/۱۸ تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۶/۲۹

۲. پست الکترونیک: Reza\_akhlaghi67@yahoo.com

## مقدمه

بازی بزرگ علم، مدل‌سازی از جهان واقعی است و هر نظریه‌ی علمی دستگاهی از قاعده‌ها را برای این بازی تعیین می‌کند. هدف از بازی، ساختن مدل‌های معتبر اجسام و فرآیندهای واقعی است. این مدل‌ها هسته‌ی اصلی معلومات علمی را تشکیل می‌دهند. درک علوم، شناخت چگونگی ساخت و اعتباربخشی به مدل‌های علمی است. بنابراین، هدف اصلی آموزش علوم باید آموزش بازی مدل‌سازی باشد.

با توجه به این موضوع، شاگردان رها می‌شوند تا قاعده‌های بازی را از دریای جزئیات استخراج کنند همانند آموختن شطرنج که صرفاً با نگاه کردن به تخته‌ی شطرنج و قطعه‌هاست و به‌طور اسرارآمیزی روی تخته ناپدید و دوباره ظاهر می‌شوند (بی‌قاعدگی‌های عجیب، مانند قلعه رفتن و پایان ناگهانی بازی). پی بردن به کنه بازی حتی پس از دانستن قواعد به اندازه‌ی کافی دشوار است. پس تعجبی ندارد که تعداد کمی از شاگردان تکلیف قواعد را روشن می‌کنند در حالی که بیش‌تر آنها اصلاً متوجه موضوع نمی‌شوند. بیش‌تر شاگردان فکر می‌کنند که بازی، گردآوری و حفظ کردن واقعیت‌هاست. این باعث می‌شود که متوجه ساختار زیبای جهان فیزیکی که علم را آشکار می‌سازد نشوند.

هدف این مقاله روشن کردن هدف‌های آموزش فیزیک با ترسیم ساختار مکانیک نیوتونی از دیدگاه مدل‌سازی است. مقصود تسهیل آموزش مهارت‌های مدل‌سازی به عنوان اولین مهارت‌های قابل انتقال در سراسر علم است. این مهارت‌ها را می‌توان در چارچوب یک نظریه علمی خاص به دست آورد. به لحاظ تاریخی، مکانیک نیوتونی به عنوان الگویی برای نظریه علمی عمل کرده است و هنوز هم این نقش را ایفا می‌کند. در نتیجه، جهان نیوتونی همچون عرصه‌ای مفهومی است که در آن می‌توان بازی‌های مدل‌سازی را یاد گرفت. فقط با خوب یاد گرفتن بازی نیوتونی است که می‌توان محدودیت‌های آن را شناخت و به دلیل منطقی برای بازی‌های ظریف‌تر فیزیک جدید پی برد.

**الف- آموزش به روش مدل‌سازی:** معمولاً دانش‌آموزان، فیزیک را موضوعی مشکل و پیچیده می‌دانند که فقط گروه اندکی با استعدادهای استثنایی می‌توانند آن را به خوبی درک کنند. معلمان با هدایت آنها از طریق چرخه و آموزش اصول مدل‌سازی، می‌توانند درس فیزیک را به صورت مبحثی قابل درک درآورند. آموزش مدل‌سازی در حقیقت به دانش‌آموزان کمک می‌کند تا فیزیک را منسجم‌تر و نظام‌مندتر درک کنند.

**الف. ۱. نظریه‌ی مدل سازی:** نظریه‌ی مدل سازی یک نظریه‌ی کلی از دانش جاری در علوم است، که شامل فرآیندهای زیر است:

▪ **مرحله‌ی توصیف:** خروجی اصلی این مرحله، مجموعه‌ی کاملی از نام‌ها و متغیرهای توصیفی برای یک مدل است. برای توصیف شیء، باید نوع مدل در حال توسعه را انتخاب کنیم. مثلاً، یک جسم جامد می‌تواند به‌عنوان یک ذره مادی، یک جسم صلب یا یک جامد کشسان مدل سازی شود.

▪ **مرحله‌ی فرمول بندی:** برای مثال با استفاده از قوانین حرکت و برهم کنش می‌توان معادله‌های حرکت را برای مدل مکانیکی یک شیء تعیین کرد.

▪ **مرحله‌ی انشعاب:** در این مرحله خواص ویژه و کاربردهای مدل استخراج می‌شوند. مثلاً معادله‌های حرکت در مدل مکانیکی، برای تعیین مسیرها با شرایط اولیه متفاوت حل می‌شوند یا وابستگی زمانی توصیف‌کننده‌ها را تعیین می‌کنند، و یا نتایج به‌صورت تحلیلی و گرافیکی رسم و سپس تحلیل می‌شوند.

▪ **مرحله‌ی اعتبار:** این مرحله به ارزیابی تجربی مدل منشعب شده می‌پردازد. برای مثال یک مسأله‌ی کتاب درسی شامل ارزیابی منطقی نتایج عددی است.<sup>۱</sup> برای یادگیری علم، فراگیران باید با تمام جنبه‌های مدل سازی درگیر شوند. مدل سازی در علم فرآیند پیچیده‌ای است که نیازمند هماهنگی چندین نوع از فعالیت‌های مدل سازی که شامل تولید، تحلیل، اعتبار، و تعمیم مدل است می‌باشد.<sup>۲</sup>

**الف. ۲. چرخه‌ی مدل سازی:** این چرخه برای تدریس پرسش‌های علمی طراحی شده است. در این روش ترکیب و راهنمایی فعالیت‌ها به‌وسیله معلم، متفاوت از روش‌های دیگر تدریس است. در ابتدای شروع چرخه، معلم توصیفی از پدیده‌ی مورد نظر-شناسایی دستگاه‌های مرتبط، اجزا، و متغیرها- را برای فراگیران بیان می‌کند. فراگیران برای تحقیق ساختار پدیده، راهنمایی می‌شوند و معلم به‌هنگام نیاز، ابزار مناسب برای ساختار نمایش را معرفی می‌کند. طی چندین چرخه آنها می‌بینند که نتیجه‌ی هر تحقیق مدلی است که باید به‌وضوح مشخص و ارزیابی شود. آنها به‌تدریج مراحل هدایت یک تحقیق را یاد می‌گیرند و

1. Hestenes, "Toward a modeling theory of physics instruction", p.447.

2. Wells, Hestenes, Swackhamer, "A Modeling Method For High School Physics Instruction", p.633.

به‌طور پیشرفت‌کننده‌ای از معلم خود مستقل می‌شوند و به‌زودی برای بینش‌های عمیق فیزیکی آماده می‌شوند.

شروع هر چرخه با یک تحقیق آزمایشی همراه است. چرخه می‌تواند با نمایش مدلی برای تحلیل، یا طرح یک مسأله، موقعیتی را برای به‌کارگیری مهارت‌ها و ابزار مدل‌سازی فراهم کند. مانند تحقیق ماشین آتوود اصلاح شده که توسط ملکم ولز و همکارانش طراحی شده است. بعد از معرفی تمام قوانین نیوتون و گسترش ابزار مدل‌سازی، فراگیران می‌توانند ماشین آتوود را با تحلیل ساختار مدل بازبینی کنند. این موضوع نشان می‌دهد که چگونه درک فراگیران با کاربرد ابزار مفهومی جدید برای تحلیل غنی‌تر نسبت تجربه قبلی عمیق می‌شود.

چرخه‌ی مدل‌سازی دو مجموعه‌ی کلی از فعالیت‌های مدل‌سازی است که شامل توسعه و تعمیم مدل است. این چرخه، شکل انعطاف‌پذیر و کلی‌ای دارد که با هر موضوع فیزیک سازگار است. در فیزیک دبیرستان این چرخه شامل زمانی بین دو یا سه هفته است که حداقل یک هفته باید به هر مرحله اختصاص داده شود. در طول ترم شش چرخه بررسی می‌شود که هر کدام به یک موضوع اصلی اختصاص داده می‌شوند. محصول نهایی مرحله‌ی توسعه یک مدل ریاضی است که فراگیران می‌توانند در مرحله‌ی تعمیم آن را برای موقعیت‌های جدید به‌کار برند. در این چرخه معلم، یک برنامه و هدف ویژه برای هر فعالیت کلاسی دارد. این فعالیت‌ها شامل معرفی مفاهیم و اصطلاحات، به‌دست آوردن نتایج، ارتقای بحث‌ها، و بررسی تصورات غلط آنها است. اگرچه معلم هدف‌های آموزش و کنترل‌های برنامه کار را مشخص می‌کند ولی این کار را به‌صورت پوشیده انجام می‌دهد و نقش‌های تسهیل‌کننده فعالیت، پرسش‌گر سقراطی و داور را به عهده می‌گیرد (بیش‌تر نقش یک مربی فیزیک را دارد تا یک معلم سنتی).<sup>۱</sup>

آموزش مبتنی بر مدل را می‌توان به راه‌های گوناگون انجام داد. ریچارد هیک و آرنولد آرونز مدافعان صریح سقراط در آموزش فیزیک هستند. آنها معتقدند در این روش مربی منبع اطلاعات نیست بلکه واسطه‌ی بحث بین شاگردان است که باعث بحث بین آنها می‌شود و پرسش‌ها را بررسی می‌کنند تا شاگردان بتوانند باورهای خود را به روشنی بیان، انتقاد، و توجیه کنند. این روش دست‌کم دو امتیاز دارد که باید وارد برنامه‌ی آموزشی شود:

1. Hestenes, "Modeling Methodology for Physics Teacher", p.5.

(۱) انتقال جایگاه کنترل از معلم به شاگرد، که شاگردان را مسئول باورها و قضاوت‌هایشان می‌سازد. این روش به جای معلم-محور، شاگرد-محور است. (۲) تأمل اندیشه‌ورز را تشویق می‌کند که باعث می‌شود شاگردان شناختی از فرآیندهای فکری خود به‌دست آورند. به‌طور خلاصه، استقلال فکری را بالا می‌برد. با این همه، روش سقراطی ناب ضعف‌های جدی نیز دارد این روش به صورت نظام‌مند به اهداف خاص هدایت نمی‌شود و فاقد سازوکار ارائه ایده‌های جدید و ابزارهای مفهومی برای بهبود کیفیت گفتمان است.<sup>۱</sup>

**ب- آموزش مدل‌سازی نیوتونی:** نظریه‌ی نیوتونی، مثل هر نظریه‌ی علمی دیگر، جهانی مفهومی را تعریف می‌کند. این جهان پر از مدل‌های مفهومی اجسام واقعی و فرآیندها در جهان فیزیکی است (شکل ۱). باید بین جهان نیوتونی و جهان فیزیکی تفاوتی بارز قائل شد. بسیاری از فراگیران و کتاب‌های درسی، موفق به انجام این کار نمی‌شوند. در نتیجه، این باور گسترده وجود دارد که قانون‌های نیوتون ذاتاً در جهان فیزیکی وجود دارند و فقط، مثل موردی که کریستف کلمب قاره‌ی امریکا را کشف کرد، منتظر کشف شدن هستند اما همان‌طور که اینشتین به‌طور مکرر تأکید می‌کرد، قانون‌های فیزیک «مخلوقات آزاد ذهن بشرند».<sup>۲</sup>

قانون‌های نیوتون ابداع شدند تا برخی نظم و ترتیب‌های موجود در حرکت‌های اجسام واقعی را توصیف کنند. این نظم و ترتیب‌ها، در واقع، ذاتاً در طبیعت وجود دارند اما نمی‌توان آنها را بدون اختراع مفاهیم کافی برای توصیف‌شان کشف کرد. نتیجه‌ی مهم این مطالب آن است که اختراع مفهومی و کشف‌های تجربی همراه هم به پیش می‌روند نمی‌توان چیزی را کشف کرد که نتوان تصور کرد. همین‌طور، فراگیران باید با جهان نیوتونی آشنا شوند تا بتوانند بازتاب‌های جهان فیزیکی درون آن را تشخیص دهند و به‌عنوان ابزاری مفهومی در جهت درک جهان فیزیکی به‌کار برند. بنابراین هدف اصلی فیزیک باید آن باشد که به شاگردان کمک کند تا وارد جهان نیوتونی شوند.

پژوهش‌های آموزشی نشان داده است که بیش‌تر فراگیران قانون‌های نیوتون را حفظ می‌کنند، اما، تعداد کمی آنها را می‌فهمند. درست آن است که این سنت کتاب‌های درسی شکسته شود، و جای آن را صورت‌بندی دقیق، فشرده، منسجم، و کامل نظریه‌ی نیوتونی

1. Hake R, "Promoting Student Crossover to the Newtonian World", p. 879.

2. Hestenes, "Modeling Games in the Newtonian World", p.733.

بگیرد تا دقیقاً مشخص کند شاگردان چه چیزی را باید یاد بگیرند طراحی‌های آموزشی باید بر این مبنا باشند. صورت‌بندی جدید این قوانین در شکل ۲ بیان شده است. اولین چیزی که باید درباره‌ی جهان نیوتونی تعریف شده در شکل ۲ توجه کرد آن است که این جهان را می‌توان به ذرات تشکیل‌دهنده آنها فروکاست. ذرات نقطه‌ای در جهان فیزیکی وجود ندارند آنها اجسامی مفهومی هستند که نظریه‌ی نیوتونی به وجود آورده است. قانون‌های نیوتون آنها را تعریف می‌کنند تا ویژگی‌هایشان مشخص شود. بارزترین چیزی که اضافه شده، قانون صفرم است که ویژگی‌های سینماتیکی اولیه‌ی مکان و حرکت را مشخص و به این ترتیب مفاهیم نیوتونی فضا و زمان را تعریف می‌کند (که البته منشاء آنها در هندسه‌ی یونانی است). قانون صفرم در کتاب‌های درسی رایج تلویحاً مسلم فرض شده است. احتمالاً به این دلیل تاریخی، نیوتون و معاصرانش آن را یک قانون فیزیکی تشخیص ندادند. در این عصر توجیهی برای این حذف وجود ندارد، زیرا اینشتین نشان داد که عمیق‌ترین کمبود نظریه‌ی نیوتونی مربوط به قانون صفرم است.

قانون صفرم پیچیده‌ترین و مشکل‌ترین قانون نیوتون و البته بنیادی‌ترین آنهاست. این قانون مبنای نظری اندازه‌گیری‌های طول، جهت، و زمان را برای اندازه‌گیری‌های فیزیکی در اختیار می‌گذارد. تشریح کامل قانون صفرم شامل تعریف مفاهیم جسم صلب، چارچوب مرجع، دستگاه مرجع، همچنین نقش آنها در اندازه‌گیری است.

با مفاهیم فضا، زمان و ذره‌ای که از قانون صفرم درک می‌کنیم، مفاهیم جرم و نیرو با بقیه‌ی قانون‌های نیوتون تعریف می‌شود. هستنن با بی‌میلی سنت ذکر قانون اول، دوم و سوم نیوتون را به تعویق می‌اندازد (شکل ۲)، اما با پیروی از آرنولد زومرفلد اصل برهم‌نهی را به‌عنوان قانون چهارم مستقل از قانون‌های دیگر تعیین می‌کند و قانون پنجمی را برای تعریف ویژگی‌های نیرو تدوین می‌کند که معمولاً فقط به‌طور تلویحی وارد نظریه‌ی نیوتونی می‌شود. بنیادی‌تر از برشمردن فهرست کامل قانون‌های نیوتون، طبقه‌بندی سه‌گانه‌ی آن به قانون‌های سینماتیکی، دینامیکی، و برهم‌کنشی است. این طبقه‌بندی فراتر از نظریه‌ی نیوتونی در تمام فیزیک و در واقع، در تمام علم به‌کار می‌رود. با به‌کارگیری آن در نظریه‌ی نیوتونی، به فراگیران کمک می‌کنیم تا برای تعمیم دادن آن به تمام فیزیک آماده شوند. به لحاظ منطقی، قانون‌های برهم‌کنش باید جلوتر از قانون‌های دینامیکی قرار گیرند که فرض را بر آنها قرار می‌دهد. قانون‌های دینامیکی، برهم‌کنش‌ها را به سینماتیک مرتبط می‌سازد و به این ترتیب حرکت‌های ذره را تعیین می‌کند. باید به نقش ظریف و تقریباً غیرضروری

قانون اول توجه کرد. ذره‌ی آزاد، البته، به صورت ذره‌ای تعریف می‌شود که نیروی خالص وارد بر آن صفر است. این موضوع ضابطه‌ای برای تشخیص دستگاه‌های لخت از سایر دستگاه‌های مرجع در اختیار می‌گذارد. بنابراین گفتن این که ذرات آزاد دارای سرعت صفرند مثل آن است که بگوئیم آنها مقیاس زمانی یکنواختی را تعریف می‌کنند. این تعریف مقیاس زمان، پیش‌نیاز ضروری قانون دوم نیوتون است. قانون اول نیوتون را قبلاً به‌عنوان قانون سینماتیکی طبقه‌بندی می‌کردند، اما اکنون به‌عنوان قانون دینامیکی طبقه‌بندی می‌کنند چون یک پیش‌نیاز لازم برای قانون دوم است که در آن مفهوم نیرو دخیل است.<sup>۱</sup>

**ب-۱- بازی‌های مدل‌سازی نیوتونی:** دو نوع بازی مدل‌سازی نظری و تجربی وجود دارد. به طور کلی، بازی‌های نظری شامل توسعه و تحلیل مدل‌هاست در حالی که در بازی‌های تجربی ارزیابی تجربی مدل‌ها و استفاده از آنها، در اکتشافات فیزیکی دخالت دارد. وقتی معلوم شود که یک مدل می‌تواند پدیده‌ها را در حوزه‌ای تجربی به خوبی نمایش دهد می‌گویند (به صورت تجربی) تأیید شده است. بدیهی است که هر دو نوع بازی نظری و تجربی را باید برای اعتبار بخشیدن به کار برد. بازی‌های تجربی کاملاً در حوزه‌ی مفهومی جهان نیوتونی اجرا می‌شوند در حالی که بازی‌های نظری مربوط به جهان فیزیکی است تا آن را در جهان مفهومی روشن سازند. نظریه‌پردازان، جهان مفهومی (جهان واقعی) را می‌کاوند. (شکل ۳)

سه نوع کلی بازی نظری وجود دارد: (۱) مدل‌سازی، (۲) انشعاب مدل، و (۳) به‌کارگیری مدل. در نوع اول، هدف، ساخت مدل دارای مشخصات خاص است که از داده‌های تجربی مشاهده‌ها به‌دست می‌آید. به لحاظ تاریخی، برنده‌ی اولین بازی عظیم از این نوع، البته خود نیوتون بود. در بررسی حرکت سیارات، رابرت هوک و دیگران حدس زدند که قانون باید به صورت عکس مجذوری باشد اما نتوانستند برنده شوند زیرا مجموعه‌ی کامل قواعد را در اختیار نداشتند. گرچه دیگران برخی از قواعد را داشتند اما نیوتون نخستین کسی بود که آنها را در دستگاهی منسجم ترکیب کرد که شامل ابداع حسابان دیفرانسیل لازم برای تدوین قانون دوم حرکت بود. سپس با مهارت کامل شکل گرانشی قانون نیرو را از سه قانون سینماتیکی کپلر به‌دست آورد و توانست استدلال را معکوس کند. بدین ترتیب، اولین مدل یک دستگاه دینامیکی، یعنی ذره‌ای نقطه‌ای در خصوص نیروی

1. Ibid, p.734.

گرانشی مرکزی، را ساخت و به آن اعتبار بخشید. باید توجه داشت که مدل نیوتون با تأسی از قانون‌های کپلر که دارای حوزه‌ی اعتبار تجربی مشخصی بود خودبه‌خود اعتبار پیدا کرد. به‌کارگیری بعدی مدل نشان داد که حوزه‌ی اعتبار آن بسیار گسترده‌تر است.

بازی‌های انشعاب برای تحلیل ویژگی‌های دستگاه‌های پیچیده انجام می‌شود. نیوتون وقتی وارد این بازی‌ها شد که برهم‌نهی نیروهای گرانشی روی یک تک ذره را بررسی کرد. مثلاً او برای توجیه تحلیل خود از حرکت پرتابه باید این قضیه‌ی معروف را ثابت می‌کرد که نیروی گرانشی ناشی از زمین دارای تقارن کروی با جرم منفردی که در مرکز آن قرار گرفته باشد هم‌ارز است (نظریه‌ی خطی‌سازی و اختلال).<sup>۱</sup> البته این موضوع پرسش‌هایی را در مورد انشعاب مدل‌های پیچیده‌تر برای زمین مطرح می‌کرد که تا به امروز ذهن ژئوفیزیک‌دانان را به خود مشغول کرده است.<sup>۲</sup>

بازی‌های به‌کارگیری شامل جفت‌وجور کردن مدل‌ها با پذیرنده‌های تجربی و داده‌هاست. غالباً، یک مدل معین در حوزه‌ی تجربی اعتباربخشی شده است. بنابراین، انتظار داریم به‌کارگیری مدل برای به حساب آوردن داده‌ی جدید از آن حوزه روالی عادی باشد. اگر جفت‌وجور شدن مناسب داده‌ها با مدل صورت نگیرد، شاید این فکر مطرح شود که داده‌ها، احتمالاً به واسطه‌ی خطای تجربی، اشکال دارند. به‌کارگیری مدلی معتبر در حوزه‌ی تجربی جدید، همان‌طور که نیوتون بدون شک به واسطه‌ی به‌دست آوردن فرصت مناسب کشف کرد، می‌تواند به معلومات فیزیکی واقعاً جدید بینجامد. همان‌طور که هر فراگیر فیزیک باید بداند، نیوتون مدل دینامیکی حرکت سیاره‌ای خود را در مورد ماه و پرتابه‌ای در نزدیکی سطح زمین به کار برد و نه تنها نشان داد که این پدیده‌های متفاوت را می‌توان با یک مدل بنیادی توجیه کرد، بلکه علاوه بر آن رابطه‌های کمی بین آنها برقرار کرد. بنابراین، دلیلی به‌دست آورد که قانون جاذبه گرانشی او یک قانون عمومی نیروی گرانشی است.

بازی‌های توضیح دادن و پیش‌بینی کردن، دو بازی به‌کارگیری مورد علاقه‌اند. یک پدیده‌ی فیزیکی را تا جایی می‌توان توسط یک نظریه توضیح داد که به‌توان آن را در چارچوب آن نظریه مدل‌سازی کرد. بنابراین مدل، توضیح آن است. بیش‌تر توضیح دادن‌ها

۱. در بسط برهم‌کنش‌ها به‌صورت سری توانی، وقتی می‌گویند مدل خطی شده است که جمله‌های مرتبه‌ی اول به بعد را نادیده بگیریم. (خطی‌سازی) سپس می‌توان با استفاده از نظریه‌ی اختلال تصحیح‌های مربوط به جمله‌های مرتبه‌ی بالاتر را در بسط اصلی اعمال کرد.

2. Ibid, p.736.



فقط جزیی یا کیفی هستند که معمولاً در توضیح کیفی، مدل ذکر نمی‌شود گرچه برای کسی که نظریه را می‌داند متضمن آن است. مثلاً توضیحی مانند جزر و مدها که ناشی از جاذبه گرانشی ماه هستند اشاره صریح به مدل ندارد، ولی برای توضیح این که چرا دوره‌ی جزر و مدها نصف دوره‌ی چرخش زمین است نیازمند مدل مشخص هستیم. در بازی پیش‌بینی، معمولاً مدل واضح‌تر است زیرا برای روند تولید داده‌های شبیه‌سازی نیازمند آن هستیم.

بازی‌های تجربی را می‌توان به صورت بازی‌های به‌کارگیری مدل طبقه‌بندی کرد. به‌کارگیری، مولفه‌ی تجربی مدل‌سازی است. فرق بازی‌های به‌کارگیری تجربی با بازی‌های به‌کارگیری نظری که ذکر شد آن است که هدف آنها آزمودن و اعتبار بخشیدن به مدل‌هاست. این صورت‌بندی، هدف اصلی فعالیت تجربی نیازمند توجیه است تا نتوان آن را برای بسیار محدود بودن چشم‌انداز تجربی یا نظری‌اش کنار گذاشت.

فعالیت تجربی دارای دو جزء اصلی است: (۱) طراحی و تفسیر آزمایش‌ها، (۲) گردآوری و تفسیر داده‌ها. مارتی دویچ در پاسخ به این واقعیت که آزمایش‌گر کار خود را با تصویر سازمان‌یافته‌ای از ارتباط بین رویدادهای صورت گرفته چگونه آغاز می‌کند؟ بیان می‌کند: «رهیافت به مسأله با ذهن کاملاً باز که گمان می‌رود با برخورد کسی که کار را به صورت بدون جهت‌گیری از ارتباطها آغاز می‌کند فرق دارد. او کار خود را با این باور شروع می‌کند که تمام رویدادهای مربوطه به‌جز رویدادی که آزمایش می‌خواهد بررسی کند کاملاً شناخته شده‌اند یا دست‌کم بر مبنای تصویر پیش‌انگاشته می‌توان آن‌ها را توجیه کرد. بدون این تصویر، آزمایش بدون شک نمی‌توانسته در مرحله‌ی اول به ذهن کسی خطور کند.»<sup>۱</sup>

علاوه بر نقش شهودی که دویچ متصور است مدل‌ها در هر دو فعالیت نقش اساسی دارند. در نتیجه، در معرض قواعد بازی مدل‌سازی قرار می‌گیرند. ابتدا گردآوری و تفسیر داده‌ها را در نظر بگیرید که معمولاً اندازه‌گیری خوانده می‌شود. برای کامرلینگ اونز اصلاح اندازه‌گیری‌ها بازی ناب علم بود. بنیادی‌ترین اندازه‌گیری‌ها در فیزیک اندازه‌گیری طول و زمان است. نظریه‌ی زیربنایی این اندازه‌گیری‌ها چنان تثبیت شده و معتبر است که به‌ندرت به‌عنوان نظریه تشخیص داده می‌شود. حتی پیش از اینشتین متوجه شده بودند که نظریه نیاز به اعتباربخشی تجربی دارد. تدوین صریح این نظریه چیزی جز قانون صفرم نیست. این قانون قاعده‌هایی را برای اندازه‌گیری‌های سینماتیکی طول و زمان مشخص می‌کند. و گرچه

1. Deutsch, "Evidence and Inference in Nuclear Research", p. 96-106.

مبانی نظری را در اختیار می‌گذارد اما در کارهای جدید، قانون‌های فیزیکی دیگری دخیل هستند که گستره و دقت اندازه‌گیری‌های سینماتیکی را زیاد می‌کنند. در اندازه‌گیری‌ها فاصله‌های بسیار زیاد همچنین اندازه‌گیری‌های در کوچک مقیاس نظریه‌ی الکترومغناطیسی ضروری است در حالی که در اندازه‌گیری‌های با ساعت‌های اتمی باید از نظریه‌ی کوانتومی استفاده کرد. چیزی به نام اندازه‌گیری فیزیکی بدون زمینه‌ی نظری وجود ندارد.

اهمیت تحلیل و تفسیر در اندازه‌گیری به اندازه‌ی دستورالعمل‌هایی است که در گردآوری داده‌ها به کار می‌رود؛ بدون آنها داده‌ها معنایی ندارند. داده‌ها تا آن‌جا اهمیت دارند که به مدلی مفهومی مربوط می‌شوند. آزمایشی که در اعتباربخشی یا بی‌اعتبار کردن مدلی سهیم نباشد بی‌فایده است گرچه شاید مدل پیش از انجام آزمایش تدوین نشده باشد. به لحاظ تاریخی، اولین مثال مهم به کارگیری مدل در تفسیر داده‌ها، تحلیل کپلر از داده‌های تیکو براهه در مورد حرکت سیارات بود. او اولاً نشان داد که داده‌های دقیق‌تر تیکو را نمی‌توان به مدل کوپرنیکی برازش داد و ثانیاً برای معنی‌دار کردن اندازه‌گیری‌ها باید از مدل استفاده کرد. چون پیش از آن هرگز کسی شق سینماتیکی دیگری را برای حرکت دایره یکنواخت در نظر نگرفته بود، کپلر مجبور شد برازش خودش را برای داده‌ها اختراع کند. این شق سینماتیکی درخشان به صورت دستگاهی از روابط عملی موسوم به قوانین کپلر تدوین شده است. نکته‌ی مهم در این‌جا این است که اگر تیکو روش‌ها و استفاده از ابزارها، یعنی دقت اندازه‌گیری نجومی را بهبود نبخشیده بود کپلر هرگز نمی‌توانست مدل خود را اختراع و اعتباربخشی کند.

**ب. ۲. پرجمعیت کردن جهان نیوتونی:** جمعیت جهان نیوتونی را انواع گوناگون مدل‌هایی تشکیل می‌دهد که فیزیک‌دانان درگیر در بازی‌های نیوتونی به وجود آورده‌اند. آنها می‌خواهند چگونگی و چرایی امور را بیان کنند. پیش از نیوتون جست‌وجوی علت‌های غایی باعث پیشرفت چندانی در علم نشده بود. او وقتی مفهوم شناخته شده‌ی نیرو را جایگزین تصور مبهم علت کرد این جست‌وجو را به صورت یک برنامه‌ی پژوهش علمی کارآمد درآورد، از همین روی هدف جست‌وجوی نیروهای بنیادی شد. برنامه‌ی او، که در مقدمه پرنیکیپیا مطرح شده است را می‌توان به‌عنوان بازی مدل‌سازی به صورت زیر بیان کرد:

ب. ۱.۲. بازی برهم کنش نیوتون: (۱) از حرکت های اجسام مادی، نیروهای وارد بر آنها را مدل سازی کنید. (۲) از این نیروها حرکت های آنها در وضعیت های جدید را پیش بینی کنید (شکل ۴).

دکارت برای جست و جوی علت های غایی پیشنهاد کرد که تمام اجسام مادی از بخش های ساده نشدنی (اتم ها) تشکیل شده اند و تمام تغییرات صرفاً بازآرایی این بخش ها هستند؛ به عبارت دیگر، هر تغییری قابل فروکاستن به حرکت است. بدون شک این ایده ی عظیم، نیوتون را در بین چیزهای دیگر متقاعد ساخت که علم حرکت (مکانیک) کلید شناخت طبیعت است. با توجه به نظریه ی نیوتونی که هر تغییری ناشی از برهم کنش است، فیزیک دانان به این فرضیه ی عظیم رسیدند که تمام ویژگی های جسم مادی از برهم کنش های اجزای ساده ی تشکیل دهنده ی آن ناشی می شود. این روایت محکمی از نظریه ی اتمی معروف است. به نظر می رسد که این مطلب در مقیاس وسیع صادق باشد، اما فیزیک دانان هنوز مشغول ارزیابی آن هستند. کار ارزیابی به علت تنوع عظیم مواد، دشوار است. طبعاً می توان آن را به عنوان بازی مدل سازی چنین بیان کرد:

ب. ۲.۲. بازی فروکاست ماده: برای انجام این بازی در سطوح مختلف، به مدل های مختلف و با پیچیدگی های متفاوت نیاز داریم تا ویژگی های ماده از خواص اجزای تشکیل دهنده ی آن همانند بازی برهم کنش به دست آوریم. دانش آموزان باید با مدل های مختلف آشنا باشند. گرچه نمی توان از آنها انتظار داشت که این مدل ها را ابداع کنند اما با جدا کردن آنها و مشاهده ی چگونگی کار هر بخش و به کارگیری آنها در شرایط مختلف، باید آرام آرام بیاموزند.

البته، مدل های جسم و مدل های برهم کنش را باید همراه هم به کار برد، زیرا در جهان نیوتونی برهم کنش ها ویژگی های اجسام هستند. برهم کنش های درونی وارد مدل های اجسام گسترده می شود. از سوی دیگر، برهم کنش های بیرونی را می توان به صورت های نامحدود بر یک جسم اعمال کرد. ترکیب مدل جسم با مدل برهم کنش یک مدل دینامیکی است. تنوع مدل های دینامیکی ممکن، بیش تر از آن است که بتوان آنها را مرور کرد. در عوض، یک راهبرد کلی برای توسعه ی این مدل ها در جدول خلاصه شده است. این جدول تفاوت های مطرح شده در بخش بازی های مدل سازی نیوتونی را جمع بندی می کند. تمام نظریه های فرعی مکانیک، مانند نظریه ی جسم صلب، مکانیک پیوستار و دینامیک شاره ها، اختصاص به مدل های گوناگون دارد.

توسعه‌ی مدل‌های دینامیکی قلب مکانیک است. با این همه، اغلب می‌خواهیم بر جنبه‌ی خاصی از مدل‌ها، مانند آنچه در طبقه‌بندی برهم‌کنش‌ها انجام دادیم، تمرکز کنیم. همین کار در طبقه‌بندی فرآیند مدل‌ها (جدول ۲) نیز انجام می‌شود که تمرکز آن معمولاً بر ویژگی قانون پایستگی است. نکته‌ی مهم این‌که مدل‌های سینماتیکی پایه در جدول ۲، از جمله مدل‌های کپلر، از این نوع هستند زیرا با این مدل‌ها بود که بازی برهم‌کنش نیوتون آغاز شد.

**ب.۳. شکستن و ساختن قواعد:** شرودینگر بازی علم را چنین توصیف کرده است: «علم یک بازی است – اما بازی همراه با واقعیت، بازی با کاردهای تیز شده است. اگر مردی تصویری را به دقت ۱۰۰۰ تکه کند، شما وقتی معما را حل می‌کنید که قطعه‌ها را به صورت تصویر اولیه درآورید. در موفقیت یا شکست، دو عامل هوشمند رقابت می‌کنند. در یک مسأله‌ی علمی، طرف دیگر بازی خداوند متعال است. او علاوه بر تعیین مسأله، قواعد بازی را نیز ابداع می‌کند – اما این قاعده‌ها کاملاً شناخته شده نیستند، بلکه نیمی از آنها را باید شما کشف یا استنتاج کنید. آزمایش، تیغ آب‌دیده‌ای است که آن را با موفقیت در برابر ارواح تاریکی در اختیار دارید – و یا شما را بی‌شرمانه شکست می‌دهد. عدم موفقیت، در تعداد قاعده‌هایی است که خداوند به صورت همیشگی مقدر کرده و تعدادی که ظاهراً ناشی از لختی ذهن شماست در حالی که حل مسأله تنها در صورتی امکان‌پذیر می‌شود که ذهن خود را از محدودیت‌هایش آزاد کنید. این شاید هیجان‌انگیزترین بخش بازی باشد زیرا در این‌جا در مقابل مرز بین خود و پروردگار تلاش می‌کنید – مرزی که شاید وجود نداشته باشد. شاید به شما واقعاً این آزادی داده شده باشد که هر گره‌ای را باز کنید. اراده‌ی طبیعت را، نه با شکستن یا غلبه بر آن، بلکه با تمایل به آن خواست خود گردانید.»<sup>۱</sup>

بنابراین، کشف قاعده‌های بازی طبیعت یعنی شناخت آن و چگونگی کارکرد عالم، بازی غایبی علم است. حریف شما پروردگار است اما، همان‌طور که اینشتین مشاهده کرد، او بدخواه نیست اگرچه دقیق است. هدف بازی غایبی جاه‌طلبانه‌تر از آن است که عملی باشد، بنابراین علم به آمیزه‌ای از بازی‌های کم‌اهمیت‌تر تقسیم شده است که هدف هر یک از آنها مدل‌سازی حوزه‌ی محدودی از جهان فیزیکی است.

1. Schrodinger, W. Moore, *Life and Thought*, Cambridge U. Press, Cambridge, 1989, p.348.

بازی‌های نیوتونی تنها بازی‌های فیزیک نیستند اما تمام بازی‌های دیگر، شق‌های دیگر آن هستند. فیزیک‌دانان با انجام ماهرانه‌ی بازی‌های نیوتونی قاعده‌ها را آزمایش کرده‌اند تا کشف کنند در کجا با شکست مواجه می‌شوند و کوشیده‌اند با امتحان کردن قاعده‌های جدید بازی را بهبود بخشند. در این فرآیند شکستن و ساختن قواعد، بازی‌های عظیم دیگری در فیزیک به وجود آمده‌اند. بررسی این بازی‌ها برای مشخص کردن تفاوت قواعد آنها با قاعده‌های نیوتون در شکل ۲ آگاهی‌بخش است.

**ب. ۱.۳. بازی‌های ماکسولی:** الکساندر پوپ زمانی که اظهار داشت «خداوند گفت: بگذار نیوتون باشد، و نور همه جا را گرفت!» در اشتباه بود. در واقع چیزی چون نور در جهان نیوتونی ذرات مادی وجود ندارد، بلکه آن را ماکسول با نظریه‌ی الکترومغناطیسی نور به وجود آورد. نیوتون با معرفی یک موجود مفهومی جدید، یعنی میدان الکترومغناطیسی، که همراه با ذره‌های مادی به‌عنوان جزء بنیادی مدل‌های فیزیکی به کار گرفته می‌شد، جهان نیوتونی را گسترش داد. اولین پیروزی بازی جدید ماکسولی وقتی نصیب هاینریش هرتز شد که مدل الکترومغناطیسی ماکسول را با امواج نور اعتبار بخشید.

**ب. ۲.۳. بازی‌های نسبیت اینشتین:** اینشتین متوجه شد که الکترودینامیک ماکسولی به جهان نیوتونی برازش نمی‌یابد و این مسأله را تا وجود نقصی در قانون صفرم دنبال کرد. شکل نیوتونی قانون صفرم نمی‌تواند سینماتیک اجسام در سرعت‌های نسبی زیاد را به درستی مدل‌سازی کند. اینشتین با اصلاح دقیق مفهوم زمان در قانون صفرم این مسأله را حل کرد. قانون صفرم در واقع، مدل فضا-زمان است. مینکوفسکی نشان داد که اصلاحات اینشتین قانون صفرم را به مدل فضا-زمان تغییر می‌دهد که در آن فاصله‌ی خاصی بین فضا-زمان وجود ندارد؛ بنابراین، این یک هم‌جوشی هندسی با سینماتیک است. بازی‌های نسبیت خاص در این صحنه‌ی فضا-زمان اجرا می‌شوند. نظریه‌ی نسبیت عام اینشتین اصلاح بیش‌تر قانون صفرم و نمایش گرانش به صورت خمیدگی فضا-زمان است. رویای او آن بود که شاید تمام برهم‌کنش‌ها را بتوان به همین ترتیب به هندسه فروکاست. فیزیک‌دان‌ها هنوز این رویا را دنبال می‌کنند.<sup>۱</sup>

**ب. ۳.۳. بازی‌های کوانتومی:** مکانیک کوانتومی از این‌رو به وجود آمد که نظریه‌ی نیوتونی نتوانست مدل‌های کافی برای اجسام بسیار کوچک مانند اتم‌ها و الکترون‌ها به وجود آورد.

1. Hestenes, " Modeling Games in the Newtonian World ", p.741.

مکانیک کوانتومی با قانون صفرم جور در نمی‌آید بلکه مفاهیم بنیادی ذرات، میدان‌ها و برهم‌کنش‌ها را تغییر می‌دهد. به عبارت دیگر، بازی‌های کوانتومی با همان تخته‌ی قبلی اما با قطعه‌ها و حرکت‌های متفاوت انجام می‌شود. جهان کوانتومی جهان مفهومی جدیدی است که جمعیت آن را اجسام عجیب و فرآیندهای غیرعادی تشکیل می‌دهند. بازی‌های کوانتومی پیروزی‌های عظیم بسیاری به دست آورده‌اند اما محدودیت‌های قواعد آن هنوز بررسی می‌شوند.

بازی‌های عظیم فیزیک، مانند بازی‌های نیوتونی، بازی‌های مدل‌سازی هستند بنابراین دارای تمام جنبه‌های کلی روش علمی جمع‌بندی شده در شکل ۳، مانند مدل‌سازی، انشعاب، به‌کارگیری، و اعتباربخشی هستند. راهبردهای مدل‌سازی کلی و روش‌ها در تمام بازی‌ها مؤثرند. اما هر بازی روش‌های مدل‌سازی خاص خود را دارد بنابراین مهارت زیاد در یک بازی، الزاماً باعث مهارت و مانند آن در بازی دیگر نمی‌شود.

ب.۴.۳. شکست بازی: توماس کوهن تفاوتی را بین پژوهش علمی عادی و انقلابی پیشنهاد کرده است که می‌توان آن را به صورت تدوین دقیق و طبیعی در بازی‌های مدل‌سازی بیان کرد. علوم عادی بازی‌های عظیم مدل‌سازی را دقیقاً مطابق قاعده اجرا می‌کنند. علم انقلابی با تجدیدنظر در قواعد، بازی‌های جدیدی را به وجود می‌آورد. چه بر سر آدم‌های سرکشی می‌آید که نمی‌خواهند طبق قاعده بازی کنند؟ معمولاً، می‌بازند! همکاران، آنها را نادیده می‌گیرند. تاریخ نشان می‌دهد که برد با تغییر قاعده‌های بازی نادر است و تنها افرادی به آن دست می‌یابند که در بازی با قواعد متداول ماهر باشند. از قرار معلوم، فقط استادان واقعی قادر به مشاهده در جایی هستند که قواعد شکست می‌خورند.<sup>۱</sup>

ب.۴. یاد دادن بازی: روش آموزش متداول فیزیک بسیار ناکارآمد است. پژوهش در زمینه‌ی آموزش نشان داده است که فراگیران با برداشتهای غلط جدی درباره‌ی حرکت و نیرو درس فیزیک را شروع می‌کنند و آموزش مکانیک فقط آن را اندکی تغییر می‌دهد. اغلب این فراگیران در شروع درس می‌توانند قانون‌های نیوتون را بیان کنند اما ارزیابی دقیق، نشان می‌دهد که حتی در پایان درس نمی‌توانند این قانون‌ها را به‌طور منسجم و به درستی به کار برند، بلکه راهنمای استدلال فراگیران هنوز برداشتهای غلط شهودی آنهاست.

۱. کوهن، توماس، ساختار/انقلاب‌های علمی، ترجمه‌ی عباس طاهری، نشر قصه، ۱۳۸۳، ص ۱۶۰.

پژوهش‌گران بسیاری این برداشت‌های غلط را مشخص و طبقه‌بندی کرده‌اند اما دو مورد از آنها اهمیت ویژه‌ای دارند (شق‌های دیگر، دریافت همگانی از قانون‌های نیوتون هستند). با نادیده گرفتن انواع و تفاوت‌های جزئی این برداشت‌های غلط، می‌توان آنها را به صورت اصول شهودی زیر فرمول‌بندی کرد:

۱- **اصل نیروی محرک:** نیرو یک ویژگی ذاتی، یا اکتسابی اجسام است که باعث حرکت آنها می‌شود.

۲- **اصل تسلط:** در برهم‌کنش بین دو جسم، جسم بزرگ‌تر یا فعال‌تر نیروی بیش‌تری وارد می‌کند.

بدیهی است اصل تسلط هم قانون اول و هم قانون دوم را نقض می‌کند در ضمن اگر قانون پنجم را در نظر بگیریم با توجه به آن هر نیرو نیازمند عاملی است. اصل تسلط ناشی از در نظر گرفتن برهم‌کنش‌ها به صورت درگیری‌هایی است که در آن، برخلاف قانون سوم نیوتون، طرف قوی‌تر برنده می‌شود. وجود این برداشت‌های غلط بسیار جدی است زیرا کمبودهای شدیدی را در مورد مفهوم نیرو نشان می‌دهد که تمام مکانیک نیوتونی مبتنی بر آن است.

یکی از ناکارآمدی‌های آموزش رایج، در نظر نگرفتن برداشت‌های غلط فراگیران است. با برخورد صریح و نظام‌مند، تعدادی از این برداشت‌های غلط بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته‌اند. با وجود این نتایج بسیار کم‌تر از چیزی است که انتظار می‌رود. به‌ویژه برداشت‌های غلط مربوط به قانون سوم نیوتون بسیار متمرّدانه است. گرچه شاید پس از آموزش متداول در ۹۰ درصد فراگیران، این مورد مشاهده شود اما کاهش آن به کم‌تر از ۶۰ درصد بسیار دشوار است. غالباً، پیشنهاد شده است که این مشکلات ناشی از عمیق بودن ریشه‌ی این برداشت‌های غلط در تجربه باشد و نباید انتظار داشته باشیم که بتوان به راحتی آنها را تغییر داد. اما در این‌جا، امکان تحلیل دیگری مطرح است.

بیش‌تر تلاش‌ها در جهت از بین بردن برداشت‌های غلط به‌طور تکه‌تکه با آنها برخورد می‌کند و هر برداشت غلط را مستقل از دیگران در نظر می‌گیرد. این رهیافت یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های بنیادی مفهوم نیرو، یعنی انسجام نظریه‌ی نیوتونی را نادیده می‌گیرد. همان‌طور که به تفصیل در بخش بازی‌های مدل‌سازی نیوتونی بیان شد. برای تعریف مفهوم نیرو، تمام قانون‌های نیوتون ضروری است. بنابراین اهمیت قانون سوم نیوتون را نمی‌توان سطری از رابطه‌اش با دیگر قوانین درک کرد. این رابطه تنها با کاربرد قانون‌ها در ساخت و

اعتبار بخشیدن به مدل‌های پدیده‌های فیزیکی خاص نمایان می‌شود. این موضوع راهبردی کلی برای برخورد با برداشت‌های غلط را مطرح می‌کند که در جای دیگر به‌عنوان آموزش مبتنی بر مدل مطرح شد.<sup>۱</sup>

کار خود را روی مواردی متمرکز می‌کنیم که اصول و روش‌ها را به‌طور آشکار با قاعده‌های نیوتون انجام می‌دهد که شامل اعتبار بخشیدن به مدل برای شرایط خاص است. به‌عبارت دیگر، بازی‌های مدل‌سازی نیوتونی را آموزش می‌دهد. آموزش باید طوری طراحی شود که تدوین روشن و آشکار، مواردی بجز مفاهیم نیوتونی را که باید تحلیل و ارزیابی شوند از فراگیران بیرون بکشد. بدین ترتیب با برداشت‌های غلط شاگردان در شرایط خاص روبه‌رو می‌شویم که در آنها جایگزین بهتری موجود است. این یکی از شرایط اولیه تغییر مفهومی است که به‌ندرت در آموزش متداول با آن برخورد می‌کنیم. باید توجه داشت که مقایسه‌ی جایگزین‌های معقول یک بخش ضروری فرآیند اعتباربخشی است. آموزش نظریه‌های فیزیکی بدون در نظر گرفتن مناسب جایگزین‌ها چیزی بیش از تلقین کردن نیست.

راهبرد کلی برخورد با برداشت‌های غلط در زمینه‌ی آموزش مدل‌سازی را می‌توان به راه‌های مختلف اعمال کرد. ملکم و لوز آن را در برنامه‌ی درسی فیزیک مبتنی بر آزمایشگاه دبیرستان به کار برده است که نتایج مستند آن در جای دیگری چاپ، و معلوم شده است که در از میان بردن برداشت‌های غلط، بسیار مؤثر است.<sup>۲</sup> یک نتیجه‌گیری مهم از این کار و موارد مشابه آن است که وقتی آموزش با برخورد مؤثری از مهم‌ترین برداشت‌های غلط، از جمله اصول نیروی محرک و تسلط به عمل آورد بیش‌تر برداشت‌های غلط دیگر بدون مداخله‌های آموزشی تحلیل می‌روند. این نتیجه‌ای است که باید پس درک کامل، فراگیران از مفهوم کلی نیرو و تلفیق آن با ساختار فکری‌شان انتظار داشته باشیم.

تأیید تاریخی قوی از رهیافت مدل‌سازی را می‌توان در بررسی توسعه‌ی مفهومی خود نیوتون به دست آورد. پژوهش‌های تاریخی اخیر بدون هیچ ارجاعی ثابت کرده است که در طی دو دهه‌ی سپری شده از پژوهش‌های اولیه‌ی نیوتون با نوشتن پرنکیپیا، نیوتون اصل نیروی محرک و سایر برداشت‌های غلط را پذیرفت. از همان سال‌های اولیه او دست‌کم

---

1. Hestenes, "A Modeling Theory of Physics Instruction", p.443.

2. Wells, M., "Findings of the Modeling Workshop Project", 1994-00:1-15, p.4.



روایت خامی از سه قانون خود را در اختیار داشت که تا اندازه‌ی زیاد ناشی از مطالعه‌ی کار دیگران و مدل سازی از برخوردهای دو ذره به دست آمده بود. با این همه، او تا تدوین پرینکیپیا، آنها را به صورت دستگاهی منسجم با فرمول بندی دقیق تمام قانون‌ها در نیاورد. شکی نیست که چالش‌های هوک و هالی برای اثبات این که سیاره‌ی در معرض نیروی عکس مجذوری در یک مدار بیضوی است، در سرعت بخشیدن به این رویداد، نقشی مؤثر داشت. علاوه بر آن، فقط پس از به کارگیری قانون سوم برای اثبات «عمومیت» قانون گرانش و مدل سازی دینامیک مفصل منظومه‌ی شمسی (بررسی شده در بخش بازی‌های مدل سازی نیوتونی) بود که قانون سوم نقش مهمی در تفکر او پیدا کرد. بنابراین، فعالیت مدل سازی باعث شد تا نیوتون نظام مفهومی منسجمی به وجود آورد و برداشتهای غلط را از میان بردارد. اما این نوع لختی فکری نبود که باعث شد نیوتون در مدت ۲۰ سال زندگی حرفه‌ای خود، باور غلط به اصل نیروی محرک را رها نکند. بلکه عامل این کار، نبود جایگزین بهتر یا دست کم شرایط لازم برای به وجود آمدن آن بود. وقتی درگیری شناختی (با چالش هوک) به وجود آمد، تغییر مفهومی نیوتون سریع و گسترده بود. به همین ترتیب، یک مسأله‌ی مهم در آموزش، تثبیت شرایط بهینه برای تغییر مفهومی سریع در شاگردان است.

در فرآیند سرنوشت ساز اعتباربخشی به مدل و نظریه، شواهدی که نیوتون در حمایت از قانون سوم خود ارائه کرد بسیار شایان توجه است. روش متداول آموزش قانون سوم صرفاً ارائه‌ی آن به صورت قاعده‌ای است که باید به خاطر سپرده شود و فقط با به کار بردن آن عملی شود. تنها توجیه آن توسل بی قید و شرط به مرجع است. هیچ پرسشی در مورد اعتبار بخشیدن به آن مطرح نمی‌شود. پس تعجب آور نیست که فراگیران تحت تأثیر قرار نگیرند. چرا به جای آن از اصل تسلط استفاده نکنیم؟ آیا این مورد هماهنگی بیش تری با تجربه ندارد؟ بدون شک قانون سوم شایستگی توجیه کامل با تأیید ارتباط آن با دیگر قانون‌ها و بررسی شواهد تجربی مهم را دارد.

**ب.۵. استاد بازی شدن:** برای استادی در بازی‌های مدل سازی فیزیک چه باید کرد؟ آیا هرکس می‌تواند این کار را انجام دهد؟ یا نیاز به نبوغ خاص دارد؟ با بررسی زندگی فکری فیزیکدانان برجسته می‌توان چیزهایی در این مورد یاد گرفت. اینشتین با اذعان به بعد اجتماعی علم اظهار نظر کرد: «در علم ... کار هر فرد به قدری وابسته به کار پیشینیان و افراد معاصر است که به نظر می‌رسد تقریباً محصول غیرشخصی نسل او باشد و آن برداشتی درست مخالف کتاب‌های درسی است مثل این که تمام علم مکانیک را تنها یک نابغه‌ی

بزرگ یعنی نیوتون به وجود آورد. خطر این موضوع آن است که باعث می‌شود با این برداشت که دانشمندان از نژاد جداگانهای هستند و تعداد اندکی به آن تعلق دارند، جامعه را با علم بیگانه سازند.<sup>۱</sup>

بررسی دقیق شرایط تاریخی و جنبه‌های شناختی اعمال سازنده‌ای که مشخصه‌ی نبوغ است نشان می‌دهد که عامل مهم در اختیار داشتن روش اکتشافی خاص، یعنی رهیافت مفهومی منحصر به فردی است که دیگران از آن آگاه نیستند (دست‌کم، تا زمان حاضر). اگر این موضوع درست باشد، پس رمز نبوغ نیوتون چیست؟ برای پاسخ به این پرسش، ابتدا باید شواهد توانایی حرفه‌ای نیوتون را از دستاوردهایی که او را از دیگران متمایز می‌سازد؛ یعنی به وجود آوردن اصول ریاضی فلسفه‌ی طبیعی، جدا کنیم.

ب. ۱.۵. راز نیوتون: راز نیوتون را می‌توان در دو بخش ارائه کرد: (۱) او اولین کسی بود که مهارت فنی کافی برای استفاده از حسابان در مسأله‌های عملی را داشت، و (۲) او اولین کسی بود که دستگاهی کامل و منسجم از اصول را برای مدل‌سازی از جهان فیزیکی در اختیار داشت. به عبارت دیگر، او نخستین کسی بود که این فرصت را در اختیار داشت تا اولین بازی عظیم مدل‌سازی در علم را انجام دهد؛ و به این کار نیز دست زد. حاصل این شور و شوق، پرنیکیپیاست.

بزرگ‌ترین دستاورد نیوتون تثبیت قاعده‌های این بازی مدل‌سازی بود. اما توجه کنید که این موضوع چه بستگی سرنوشت‌سازی به مهارت ریاضی او داشت. قبلاً متوجه شدیم که این تثبیت چگونه سرانجام با مدل‌سازی از مسأله کپلر و تعمیم دو جسمی آن صورت گرفت. این مسأله نیازمند تمام قاعده‌های صحیح، اما به اندازه‌ی کافی ساده بود که بتوان آن را به صورت ریاضی حل کرد. بنابراین، قاعده‌های بازی نیوتونی در فرآیند ساخت و تثبیت مدل، با توجه به شرایط سازگاری ریاضی، تثبیت شد. شاید به این نتیجه‌گیری برسیم که نیوتون برای انجام دادن بازی، مجبور بود قاعده‌ها را ابداع کند.

وقتی قاعده‌ها شناخته شدند، هر کسی با مهارت فنی کافی می‌توانست به این بازی بپردازد چنان‌که بسیاری از افراد پس از آن این کار را با موفقیت زیاد انجام داده‌اند. پس بخش اصلی پرنیکیپی، سابقه‌ی اولین کسی است که این بازی را به خوبی انجام داده است. از این نظر شاید کار سازنده‌ی نیوتون کم‌تر حیرت‌انگیز به نظر برسد. استادی نیوتون در

1. Einstein, "Revolution in Science", p.439.

استدلال‌های ریاضی ما را شگفت‌زده می‌کند زیرا، روش‌های او چنان گسترده‌اند که تاکنون هیچ‌کس در آنها مهارت کافی به دست نیاورده است. جهان باید نیم قرن دیگر صبر می‌کرد تا ابزارهای ریاضی بهتر، عمدتاً توسط اوپلر، برای بهبود بخشیدن به عملکرد نیوتون توسعه یابد.

پس از این که راز موفقیت نیوتون معلوم شد، دیگران می‌توانستند در مکانیک به پای او برسند، حتی بدون نیوتون این تحول اجتناب‌ناپذیر بود زیرا پیش از نیوتون هم کوشش‌هایی در جهت به وجود آوردن مدل‌های ریاضی از پدیده‌های فیزیکی صورت گرفته بود. اگر نیوتون نبود، پیدایش مکانیک کلاسیک اندکی به تأخیر می‌افتاد، اما به هر حال برای ظهور فیزیک کوانتومی در قرن بیستم همه چیز در جای خود قرار داشت.

هدف از این مطالب کم اهمیت جلوه دادن دستاوردهای نیوتون نیست، بلکه فقط می‌خواهیم آنها را محصول کلی توان سازنده‌ی بشری بدانیم که منحصر به نیوتون نیست. این توان چیزی جز قدرت ساختن، تفسیر کردن، و به‌کارگیری مدل‌ها در جهان فیزیکی نیست. همان‌طور که در مثال مکانیک نیوتونی دیدیم، این توان را می‌توان با ابزارهای ریاضی و روش مدل‌سازی خوب طراحی شده بسیار افزایش داد. پیش از در نظر گرفتن این که این بصیرت چه کمکی به آموزش بهتر می‌کند، بد نیست آنها را در چشم‌اندازی کلی‌تر قرار دهیم.

**ب. ۲.۵. معرفت‌شناسی ساخت‌گرا:** برای تحلیل فرآیندهای شناخت‌نگر دانایی و آموختن، باید آنها را در یک چارچوب معرفت‌شناسی مناسب قرار دهیم. مدل معرفت‌شناسی دو تکه در شکل ۱ برای این منظور ناکافی است زیرا نقش مهم ذهن انسان در آن حذف شده است. بنابراین، آن را به مدل سه بخشی در شکل ۵ تعمیم می‌دهیم. این اصولاً همان مدل سه جهانی پوپر و اکلز است که در اینجا آن را با هدفی دیگر به کار می‌گیریم. در اصطلاح‌شناسی آنها جهان ۱ جهان فیزیکی را مشخص می‌کند، جهان ۲ ذهن انسانی یک فرد را مشخص می‌کند و جهان ۳ نشان‌دهنده‌ی جهان معلومات مشترک انسان‌هاست که فرهنگ نامیده می‌شود، هر چند در این جا آن را به خرده فرهنگ معلومات علمی، محدود می‌سازیم. این جهان مفهومی متشکل از مفاهیم مشترکی است که معلومات علمی را تشکیل می‌دهند.

این مفاهیم از این نظر عینی هستند که مستقل از هر شخص خاص‌اند گرچه چیزی مانند مفهوم سوای شخصی که به آن بیندیشد، وجود ندارد.<sup>۱</sup>

شکل ۵ را به‌عنوان یک مدل ساخت‌گرا تفسیر می‌کنیم. انواع بسیاری از ساخت‌گرایی وجود دارد ولی همه‌ی آنها در این اصل اساسی مشترک هستند که معلومات ساخته می‌شوند نه کشف. این برداشت در این‌جا، فعالیت سازنده‌ی اساسی ساختن مدل‌های پدیده‌های فیزیکی است اما باید تفاوت بارزی بین مدل‌های ذهنی موجود در ادراک افراد، و مدل‌های مفهومی علم قائل شویم. مدل‌های مفهومی از مدل‌های ذهنی ساخته شده در ذهن دانشمندان نشأت می‌گیرند ولی به آنها فرمول‌بندی عینی داده می‌شود که باعث می‌شود مستقل از پدیدآورندگان شوند. برعکس، هر فرد یک مدل مفهومی را فقط با به وجود آوردن مدلی ذهنی برای نشان دادن آن درک می‌کند. اگرچه مدل‌ها به هم شبیه‌اند، اما ندرتاً یک هم‌شکلی ساده‌اند. معمولاً مدل ذهنی، جنبه‌های نامربوط خاص طرز تفکر شخص، یا در ذهن یک دانشمند با تجربه است که وارد ساختار معلومات غنی و پیچیده می‌شود و بسیار فراتر از گستره‌ی واضح مدل مفهومی است.

نظریه‌ی ساخت‌گرایی دست‌کم دو معنی ضمنی عمده دارد که از نظر آموزشی دارای اهمیت بسیارند. اول، این نظریه ایجاب می‌کند که شناخت یک عمل سازنده باشد. همان‌طور که فاینمن به صورت پندی به خود روی آخرین تخته‌ی سیاه نوشت: «آن‌چه را نتوانم به وجود آورم، درک نمی‌کنم.»<sup>۲</sup> این به معنی آن است که درک نظریه‌ی نیوتونی یک عمل سازنده‌ی از مرتبه‌ی بالا، قابل مقایسه با ابداع اولیه‌ی نیوتون است. نظریه‌ی نیوتونی را نمی‌توان صرفاً به صورت یک تصویر تلویزیونی، منتقل کرد بلکه باید آن را از نو در ذهن فراگیر به وجود آورد و فقط فراگیر می‌تواند این کار را انجام دهد. برای به حرکت درآوردن فرآیندهای سازنده، فراگیر این امتیاز را دارد که ابزارهای مفهومی و سرخ‌هایی قوی‌تر از نیوتون را اختیار کند اما نیوتون هم باید از سرخ‌ها و ابزارهای پیشینیان و معاصران خود استفاده می‌کرد. در واقع، به نظر می‌رسد که نیوتون نمی‌توانست پیش از زمان نیوتون اختراع شود زیرا پیش‌نیازهای فکری آن کافی نبودند. نیوتون باید آخرین پیش‌نیاز؛ یعنی حسابان، را خودش به وجود آورد.

1. Hestenes, "Modeling Games in the Newtonian World", p.745.

2. Feynman, R., "Feynman's Office. The Last Blackboards", *Physics Today* 42(2), 88 (1989):87-102, p.88.

این چشم‌انداز ساخت‌گرا نباید توان سازنده‌ی شاگردان را برای حل مشکلات آموزش فیزیک به خطر بیندازد. همچنین به اطلاع می‌رساند که درگیری فعال (و نه صرفاً اطاعت منفعل صرف) برای تغییر مفهومی ضروری است. البته، تاکید بر روی عمل و شرایطی که عمل در آن انجام می‌شود دارد.

### نتیجه

اغلب شاگردان مبتدی فیزیک با غلط بازی کردن وقت خود را تلف می‌کنند. آنها گمان می‌کنند بازی، گردآوری حقایق و حفظ کردنِ روال کارهاست. این موضوع باعث می‌شود که آنها ساختار فیزیک و بینش ساختار جهان فیزیکی را نبینند. درمان توصیه شده «آموزش مبتنی بر مدل» است. به شاگردان باید از ابتدا بیاموزیم که بازی فیزیک، به وجود آوردن مدل‌های معتبر از پدیده‌های فیزیکی است. آنها باید بفهمند که یک نظریه‌ی فیزیکی مانند مکانیک نیوتونی دستگاهی منسجم از اصول طراحی برای ساختن این مدل‌هاست. شاگردان باید گنجینه‌ای از مدل‌هایی را در اختیار داشته باشند و به خوبی بتوانند آنها را تحلیل کنند و بدانند چگونه کار می‌کنند و در شرایط فیزیکی گوناگون آنها را برای توصیف، پیش‌بینی، و توجیه پدیده‌ها یا طراحی آزمایش‌ها و ابزارها به‌کار برند. مدل‌ها باید مال خودشان شود؛ یعنی مدل باید به‌عنوان ابزارهای مفهومی برای درک پدیده‌های فیزیکی وارد زمینه‌ی فکری آنها گردد. انجام دادن بازی‌های مدل‌سازی باید به آنها کمک کند تا اهداف و روش‌های علم را یاد بگیرند.

آموزش مبتنی بر مدل چارچوب منسجمی از تمام این‌ها را در اختیار می‌گذارد که، چنانچه در این مقاله گفته شد، شامل فرمول‌بندی واضح روش علمی است. مربی می‌تواند با مطرح کردن پرسش‌هایی مانند «دستگاه فیزیک مورد نظر چیست؟ و چه برهم‌کنش‌هایی با محیط دارد؟ برای توصیف این دستگاه باید از چه مدلی استفاده کنیم؟ کدام ویژگی‌های دستگاه مدل‌سازی شده؟ و کدام‌یک از آنها به حساب نیامده یا نادیده گرفته شده است؟ مدل‌ها تا چه حد داده‌ها را توجیه می‌کنند؟» باعث شود تا این چارچوب وارد نظام فکری شاگردان شود. هدف ارتقای شناخت از ساختارِ معلومات و استدلال علمی، کمک به شاگردان است تا این معلومات را کسب کنند. ملکم‌ولز این روش را در فعالیت‌های پس از وقوع آزمایشگاهی به‌طور موفقیت‌آمیز به‌کار گرفته است. فعالیت‌های پس از وقوع باید جنبه‌ای منظم از بازی‌های مدل‌سازی باشد. هدف از این مقاله، مشارکت در نظریه آموزش

بر مبنای معرفت‌شناسی ساخت‌گراست. به‌عنوان مبنایی برای آموزش مبتنی بر مدل از نظریه‌ی نیوتونی و کاربردهای آن در روال بازی استفاده شده است که امید است به جلب توجه شاگرد و ارتقای شناخت او از ساختار موضوع کمک کند. در این رهیافت، گستره‌ی وسیعی از استدلال‌های فیزیکی، معرفت‌شناسی، تاریخی و آموزشی مورد استفاده قرار گرفته است. با این همه، اهمیت نظریه آموزشی در هدایت طراحی آموزشی هنوز مشخص نشده است. فراز و نشیب‌های پیاده کردن آن را نمی‌توان در این جا بررسی کرد. فقط ذکر می‌کنیم که کاربرد اولیه و ناکامل آن توسط ملکم ولز در دبیرستان نتایج دل‌گرم‌کننده‌ای داشته است اما برای اعلام پیروزی کامل هنوز کارهای زیادی لازم است در حالت ایده‌آل، این مقاله توجه خوانندگانی را به خود جلب خواهد کرد که نمی‌توانند منتظر آن شوند که کسی دیگر این کار را انجام دهد.

#### منابع

۱. کوهن، توماس.س، "ساختار انقلاب‌های علمی"، ترجمه‌ی عباس طاهری، تهران، نشر قصه، ۱۳۸۳.
2. Arons, A. B, "A Guide to Introductory", *Physics Teaching*, Wiley, New York, 1990, p. 50
3. Deutsch, M., "Evidence and Inference in Nuclear Research", In D. Lerner (ed), *Evidence and Inference* The Free Press, New York, 1957.
4. Einstein, A., Quoted in E. B. Cohen, " *Revolution in Science* ", Harvard U. Press, Cambridge MA, 1985, Chap. 28.
5. Feynman, R., "Feynman's Office. The Last Blackboards", *Physics Today* 42(2), 88 (1989):87-102.
6. Hake R., "Promoting Student Crossover to the Newtonian World." *American Journal of Physics*, 55(1987): 878-884.
7. Hestenes, D., "Modeling Games in the Newtonian World", *American Journal of Physics*.60 (8), August 1992:732-748.
8. Hestenes, D., "Toward a Modeling Theory of Physics Instruction", *American Journal of Physics*, 55(5), May 1987:440-454.
9. Hestenes, D., "A Modeling Theory of Physics Instruction", *American Journal of Physics*, 55, (1987): 440-454.