فلسفهٔ علم، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
سال اول، شمارهٔ اول، بهار و تابستان ۱۳۹۰، صص ٦١ ـ ٧٤

واقعیت فیزیکی در نظریهٔ الکترومغناطیس کلاسیک

محمود مختاری *

چکیده

در خصوص مفهوم میدان در نظریهٔ الکترومغناطیس ــ همچون دیگر مفاهیم فیزیک ــ رویکردهای مختلفی وجود دارد که عملیات‌گرایی و واقع‌گرایی از مطرح‌ترین آن‌ها هستند. در این مقاله ابتدا دیدگاه‌های تجربه‌گرایانهٔ کارنپ و بریجمن مطرح می‌شود و سپس نگاه واقع‌گرایانهٔ مارک لنگ براساس کتاب *مقدمه‌ای بر فلسفهٔ فیزیک* (*Lange, 2002*) وی بررسی قرار می‌شود. مارک لنگ در این کتاب به دو مسئلهٔ اساسی می‌پردازد: «چرا کنش از راه دور یک مسئله است» و «چه دلایلی برای واقعی دانستن میدان‌ها داریم؟» استدلال اصلی لنگ برای هردو مسئله، مبتنی بر فرض شهود موضعیت و ارضای این شهود است. وی فیزیک کلاسیک را در حل مسائل مربوط به وضعیت هستی‌شناختی انرژی، واقعیت میدان و موضعیت فضا ـ زمانی ناتوان می‌داند و معتقد است که همانا نظریهٔ نسبیت اینشتین است که از عهدهٔ این مسائل برمی‌آید.

در این مقاله از این ادعا دفاع می‌شود که مفهوم واقعیت میدان در حوزهٔ کلاسیکی صرفاً مبتنی بر یک پس‌زمینه و باور متافیزیکی و هستی‌شناسانه است، بنابراین با دیدگاه عملیات‌گرایی تعدیل‌شده در خصوص شناخت میدان قابل جمع است.

کلیدواژه‌ها: نظریهٔ الکترومغناطیس، موضعیت، واقع‌گرایی، عملیات‌گرایی، مارک لنگ.

۱. مقدمه

مفهوم «میدان» در نظریهٔ الکترومغناطیس، یک عبارت نظری است که مابه‌ازای مستقیماً مشاهده‌پذیر ندارد. بنابراین سؤال اساسی در مواجهه با آن این است که آیا میدان یک هویت واقعی است؟ اصولاً منظور فیزیکدانان از میدان چیست و آن را چگونه درک می‌کنند؟

* دانشجوی دکتری فلسفهٔ علم و فنّاوری، و پژوهشگر سازمان انرژی اتمی mahmoud.mokhtari@gmail.com
تاریخ دریافت: ۸۹/۱/۱۸ ، تاریخ پذیرش: ۸۹/۵/۱۷

Archive of SID
www.SID.ir

دو سنت تجربه‌گرایی و واقع‌گرایی پاسخ‌های متفاوتی برای این پرسش دارند: در دیدگاه اول، نظریهٔ الکترومغناطیس می‌تواند به‌گونه‌ای فهمیده شود که الزامی به وجود هویتی به‌عنوان میدان نداشته باشد، درصورتی‌که مطابق دیدگاه دوم این هویت باید وجود داشته باشد تا نظریهٔ الکترومغناطیس به صورتی کامل و درست فهمیده شود.

۲. مفهوم میدان در سنت تجربه‌گرایی

۱.۲ تقلیل‌گرایی کارنپ

در تجربه‌گرایی تقلیل‌گرا معنای یک عبارت نظری، قابل تحویل به یک عبارت مشاهدتی است و معتقدند که شرط لازم و کافی برای اینکه عبارت نظری Q برای شیء (یا مجموعه نقاط فضا ـ زمان) x قابل کاربرد باشد این است که وقتی x شرایط آزمون S را برآورده می‌کند پاسخ مشاهده‌پذیر O را نشان دهد (و بالعکس):

$$\forall x\,(Qx \leftrightarrow (Sx \rightarrow Ox)).$$

بنابراین، «میدان الکتریکی» در نقطهٔ a عبارت است از E نیوتن بر کولن، اگر و تنها اگر شرط ذیل برآورده شود: *اگر بار آزمون (بار واحد) در نقطهٔ a قرار گیرد، آنگاه نیروسنج نیروی وارد بر آن را E درجه نشان دهد.*

اما گزارهٔ شرطی (S→O) به چند نحو قابل تعبیر است، که هریک با مشکلی مواجه است:

۱. **استلزام مادی:** دراین‌صورت اگر مقدم نادرست باشد (یعنی شرایط آزمون S اعمال نشود) شرطی مزبور صرف‌نظر از ارزش تالی، درست خواهد بود. بنابراین، در تعریف میدان مقدار نیرو هر چقدر باشد، میدان الکتریکی E خواهد بود.

۲. **استلزام اکید:** در این تعبیر، گزارهٔ شرطی فقط هنگامی درست است که مقدم آن محقق شده باشد و تالی نیز درست باشد. اما چنین تعبیری این مشکل را در تعریف کمیات فیزیکی وارد می‌کند که فقط در صورتی آن کمیت برای یک شیء (یا مجموعه‌ای از نقاط فضا ـ زمان) معنادار خواهد بود که شیء حتماً در شرایط آزمون قرار داده شود و آن کمیت اندازه‌گیری شود.

۳. **شرطی خلاف واقع:** با این تعبیر از تعریف در علم، عبارات نظری را باید همچون عبارات تمایلی فهمید. میدان الکتریکی در نقطهٔ a برابر با E است، اگر و تنها اگر چنانچه بار آزمون در آن نقطه قرار داده می‌شد نیروی وارد بر آن E می‌بود. اما تحقیق

www.SID.ir

شرایط صدق شرطی‌های خلاف واقع یکی از مناقشه‌آمیزترین مباحث در فلسفهٔ علم است و مبنا قراردادن عبارات تمایلی نیز ــ با توجه به اینکه هدف از این نحوهٔ تعریف، تقلیل عبارات نظری به عبارات مشاهدتی بود ــ گریز مناسبی نخواهد بود.

بنابراین برای احتراز از مشکلات فوق در تعریف کمیات فیزیکی، تجربه‌گرایان تقلیل‌گرا شرط لازم و کافی برای تعریف عبارت نظری Q را پاسخ مشاهده‌پذیر O و محدود به وضعیتی که شرایط آزمون S اعمال شود، می‌نمایند:

$$\forall x\,(Sx \rightarrow (Qx \leftrightarrow Ox)).$$

در این‌صورت اگر شرایط آزمون محقق نشود کل شرطی، با تعبیر استلزام مادی، درست است ولی ارزش تالی نامعلوم می‌ماند و چیزی در مورد عبارت نظری Q نمی‌توان گفت. و اما اگر شرایط آزمون S محقق شود (مثلاً در مورد میدان الکتریکی وقتی‌که بار آزمون در نقطهٔ a قرار گیرد)، آنگاه آن شیء یا نقطه دارای کمیت فیزیکی Q (میدان الکتریکی برابر با E) خواهد بود اگر و تنها اگر پاسخ O به‌دست آید (نیروسنج نیروی E درجه را نشان دهد).

بدین‌ترتیب مشکلات قبلی بروز نمی‌یابد؛ ولی عبارت نظری صرفاً به وضعیت مشاهده‌پذیری آن تقلیل پیدا می‌کند. البته می‌توان پذیرفت که چون جملات تقلیلی، شرایط کاربرد عبارات نظری در وضعیت‌های خاص مشاهده‌پذیر را معین می‌کنند، بدین‌ترتیب عبارات نظری از طریق عبارات مشاهدتیِ متناظر، تأییدپذیر (و نه تحقیق‌پذیر) و لذا معنادار خواهند بود. اما مسئلهٔ اساسی در چنین رویکردی این است که اگر تفاوت عبارات نظری و مشاهدتی صرفاً در درجهٔ تأیید آن‌هاست و اولی به تبع دومی تأیید می‌شود ـ چنان‌که کارنپ نیز در مقالهٔ *آزمون‌پذیری و معنا* (کارنپ، ۱۹۳۶) اذعان دارد، پس اصولاً این تمایز محتوایی نیست و حداکثر از جنبهٔ عمل‌گرایانه حائز اهمیت است (سیلوس، ۱۹۹۹).

۲.۲ عملیات‌گرایی بریجمن

درک عملیات‌گرایانه از مفاهیم فیزیکی به این نتیجه منجر می‌شود که کمیت فیزیکی، تابع عملیات اندازه‌گیری است و لذا از آنجا که امکان فرایندهای عملیاتی مختلف با دستگاه‌ها و ترتیبات متعدد وجود دارد، به‌ازای وضعیت‌های تجربی مختلفِ ممکن در مورد یک کمیت واحد با چندگانگی مفهوم مواجه خواهیم بود. به‌جای یک مفهوم فیزیکی مثل «میدان الکتریکی» در هر نقطه با مقادیر و مفاهیم متعددی از «میدان الکتریکی» مواجه خواهیم بود.

www.SID.ir

اگر کاملاً مطابق چنین رویکردی که عبارات نظری را چیزی جز مقادیر آن‌ها در اندازه‌گیری و آزمایش نمی‌داند، بیندیشیم، اصولاً تصور فعلی مفهوم واحد و معین از کمیات فیزیکی مبنایی نخواهد داشت و باید آن‌را رها کنیم (سیلوس، ۱۹۹۹). بریجمن که یک عملیات‌گرای افراطی است این نتیجه را می‌پذیرد و قائل است که یک مقدار معین برای میدان الکتریکی در یک نقطه وجود ندارد و آنچه در دست داریم صرفاً راه‌های مختلف اندازه‌گیری میدان الکتریکی است. مفهوم میدان الکتریکی را وضع می‌کنیم (invent) و آن‌را صرفاً برای هدفی که آن‌را ابداع کرده‌ایم به کار می‌بریم و واقعیت فیزیکی به آن نسبت نمی‌دهیم (بریجمن، ۱۹۲۷، ۱۳۲). بریجمن معتقد است که میدان الکترومغناطیسی به مشاهده و اندازه‌گیری مستقیم ما درنمی‌آید و هدف نهایی ما در محاسبات نیست، اما ارتباط این مفهوم با بار الکتریکی و مفاهیم مکانیک همچون نیرو، چنان ساده است که با محاسبهٔ میدان، مسئله را حل‌شده در نظر می‌گیریم (بریجمن، ۱۹۲۷: ۱۳۶– ۱۳۷).

بریجمن در تعبیری از مفهوم میدان به‌عنوان *آنچه باعث سوءاستفادهٔ فیزیکی فراوان است*، یاد می‌کند. وی میدان را در داخل الکترون و نیز تا فاصله‌ای در خارج آن بی‌معنا می‌داند، زیرا کوچکترین واحد الکتریکی، الکترون است و هیچ راه عملی برای اندازه‌گیری نیروی وارد بر واحد بار در داخل الکترون قابل تصور نیست. بریجمن معتقد است که زبان ریاضی مطلوب هنوز بسط نیافته است و اگر چنین زبانی توسعه یابد نه تنها باید قادر باشد در مقابل وسوسهٔ نقب‌زدن به داخل الکترون مقاومت کند، بلکه باید بتواند بدون مفهوم میدان کار کند. همچنین باید آثار سیستم‌های پیچیدهٔ الکتریکی را به مؤلفه‌های نهایی که معنای فیزیکی دارند ــ یعنی یک کنش دو واحدی (dual action) بین زوج بارهای الکتریکی ــ تقلیل دهد بدون اینکه دلالتی نسبت به کنش فیزیکی در جایی که بارها نیستند داشته باشد (بریجمن، ۱۹۲۷: ۱۴۹–۱۵۰).

این توجه بریجمن به کنش دو بار الکتریکی ناشی از همان دیدگاه وی مبنی بر این است که هیچ پدیده‌ای نمی‌توان یافت که شاهدی بر وجود میدان الکتریکی باشد، مگر همان عملیاتی که در تعریف میدان وارد شده است و لذا مشاهدهٔ عمل یک بار بر روی بار دیگر تنها شاهد فیزیکی(Physical evidence) ما برای وجود میدان است.

بریجمن تصریح می‌کند که *مفهوم مترادف است با مجموعهٔ چند عملیات متناظر* (بریجمن، ۱۹۲۷: ۵). تا قبل از ظهور نظریهٔ نسبیت، مفاهیم فیزیکی براساس ویژگی‌هایشان تعریف و معین می‌شدند، اما اکنون در فیزیک از چنین ویژگی‌های مطلق و واقعی در

www.SID.ir

طبیعت بحث نمی‌شود و همهٔ مفاهیم در طبیعت با آزمایش و اندازه‌گیری کشف می‌شوند و برحسب عملیات تعریف می‌شوند. بنابراین می‌توان نظریهٔ نسبیت خاص اینشتین و نحوهٔ تفسیر و مرتبط کردن پارامترهای مندرج در معادلات ریاضی با مفاهیم نظریهٔ فیزیکی را الهام‌بخش عملیات‌گرایی بریجمن دانست. به‌عنوان مثال، زمان یکی از کمیات مهم فیزیکی است که برای جایگزینی مقدار آن در یک رابطهٔ ریاضی فیزیکی باید دست به اندازه‌گیری بزنیم، به‌ویژه در نظریهٔ نسبیت خاص، زمان و هم‌زمانی کاملاً وابسته به سیستم مرجع و عملیات اندازه‌گیری‌اند.

اگر قبل از نظریهٔ اینشتین، هم‌زمانیِ دو رویداد، ویژگی آن دو رویداد بود اکنون مطابق نظریهٔ نسبیت، دو رویدادی که از دید یک ناظر هم‌زمان اتفاق می‌افتند، ممکن است نزد ناظر دیگر هم‌زمان نباشند. هم‌زمان‌کردن دو ساعت نیز مستلزم عملیات و روش خاصی است که این در واقع بریجمن را به شأن عملیاتی معنای «هم‌زمانی» و سپس اهمیت عملیاتی معنا (Operational significance of meaning) به‌طور عام راهنمایی نمود (بریجمن، ۱۹۳۶).

اینشتین در مورد «جرم» دو مفهوم عملیات‌گرایانهٔ متمایز را شناسایی کرد: ۱) «جرم لَختی» که با واردکردن نیروی معینی به جسم و اندازه‌گیری شتاب آن از طریق قانون دوم نیوتن تعریف می‌شود، و ۲) «جرم گرانشی» که از طریق قراردادن جسم بر روی یک ترازو تعریف می‌شود. بی‌توجهی به تمایز این دو نوع جرم ناشی از این واقعیت بود که دو اندازه‌گیری مزبور همواره عملاً نتایج یکسانی به‌دست می‌دهند.

اینشتین مطابق اصل هم‌ارزی (Principle of Equivalence) نشان داد که این همسانی نتایج، ناشی از یکی‌بودن این دو مفهوم در سطحی عمیق‌تر است و با بسط این ادعا نظریهٔ نسبیت عام را ارائه کرد. یعنی وی برای رسیدن به نسبیت عام، رویکرد عملیات‌گرایانه در تعریف مفاهیم را کنار گذاشت و به همین دلیل مورد انتقاد بریجمن قرار گرفت: «اینشتین درس‌ها و بینش‌هایی را که خودش در نسبیت خاص به ما آموخت به نسبیت عام منتقل نکرد»(بریجمن، در: شلیپ، ۱۹۸۲: ۳۳۵).

دو مشکل مهم در رویکرد عملیات‌گرایانه وجود دارد: اول‌آنکه به اذعان خود بریجمن همهٔ معرفت ما نسبی است (بریجمن، ۱۹۲۷: ۲۵)، و دیگر اینکه مطابق چنین رویکردی، استفاده از مفاهیمی که نتوان آن‌ها را برحسب عملیات توصیف یا گزارش کرد ممکن نخواهد بود (بریجمن، ۱۹۲۷: ۳۱). البته بریجمن معتقد بود که اصولاً عملیات اندازه‌گیری باید به‌طور منحصربه‌فردی مشخص شود (بریجمن، ۱۹۲۷: ۱۰) اما عملیات‌گرایی وی در

www.SID.ir

نهایت فحوایی شخص‌گرا (solipsist) دارد. این امر به‌ویژه در نوشته‌های متأخر بریجمن برجسته‌تر می‌شود و او سخن از «علم شخصی» (Private science) به میان می‌آورد. (بریجمن، ۱۹۳٦: ١٤)

۳. رویکرد واقع‌گرایانه به مفهوم میدان

بریجمن معتقد بود که واقعی‌دانستن میدان‌ها فرضیه‌ای است که علی‌الاصول توسط مشاهده قابل آزمون است، ولی تاکنون از نظر تجربی توجیه (justified) نشده است. از این منظر، نظریهٔ واقعی‌بودن میدان‌ها شبیه نظریهٔ وجود حیات هوشمند در یک جایی از جهان است که تاکنون با آزمون مشاهدتی و تجربی تأیید نشده و لذا هر مشاهده و تجربه‌ای نیز مستقل از چنین فرضیه‌ای قابل توضیح است.

برخی فیزیکدانان نیز معتقدند که اساساً فرض واقعی‌بودن میدان‌ها تحقیق‌پذیر نیست و به علم مربوط نمی‌شود. هر آزمایشی برای تحقیق این فرضیه با آثار میدان روی بارها سروکار دارد و این آثار با نظریهٔ کنش از دور تأخیری نیز تبیین‌پذیر هستند. لذا رویکرد واقع‌گرایانه به میدان ناشی از یک پس‌زمینهٔ متافیزیکی و مبتنی بر یک باور هستی‌شناسانهٔ تحقیق‌ناپذیر است. این دیدگاه قابل دفاع به نظر می‌رسد، چنان‌که بررسی رویکرد مارک لنگ ــ به‌عنوان یک مدافع واقعی بودن میدان ــ نیز نشان می‌دهد مهم‌ترین انگیزهٔ وی برای واقعی دانستن میدان، دفاع از شهود موضعیت (locality) است.

در واقع، از آنجا که انتظار داریم معلول E ــ چه از نظر مکانی و چه از نظر زمانی ــ با علتش C هم‌موضع باشد یا با زنجیره‌ای از علت و معلول‌های هم‌موضعِ واسطه به علت اصلی و غیرمستقیمِ خود متصل شود، اگر میدان‌های فیزیکی (گرانشی، الکترومغناطیسی و...) واقعی باشند برهمکنش‌های دو جسم که از یکدیگر فاصله دارند موضعیت فضا ـ زمانی را نقض نخواهد کرد. دراین‌صورت، *علت مستقیم* نیروی فیزیکی اعمال‌شده بر یک جسم، میدان متناظرش در محل جسم خواهد بود و نه جسمی که در دوردست است (لنگ، ۲۰۰۲: ۲ـ۳).

۱.۳ شهود موضعیت

تبیین شهود موضعیت در مورد کنشِ تماسی (Action by Contact) و بررسی قابل اعتمادبودن آن، موجب خواهد شد که به ضرورت تعریف دقیق مفهوم موضعیت فضا ـ زمانی پی ببریم.

www.SID.ir

عموماً در کنش از طریق تماس یا لمس، تصور بر این‌است که موضعیت علت و معلول نقض نمی‌شود و مشکلی وجود ندارد. اما با توجه به اینکه فضا و زمان بسیار چگال است و بین هردو نقطه یا لحظه، مکان و زمان دیگری قابل تصور و لحاظ کردن است، مثال‌های سادهٔ مکانیکی ذیل، شامل برخورد دو ذره و نیز حرکت یکنواخت یک ذره نشان می‌دهد که تصور ساده‌انگارانه از موضعیت مکانی (در مثال اول) و زمانی (در مثال دوم) با مسئله مواجه است:

وقتی‌که دو ذره با یکدیگر برخورد می‌کنند، هر ذره از مسیر یا جهت قبلی خود منحرف می‌شود. اگر دو ذره را بدون بُعد و نقطه‌ای در نظر بگیریم، لازمهٔ تماس آن‌دو این‌است که در لحظهٔ برخورد در یک نقطه قرار گیرند. اگر این دو جسم نقطه‌ای، صلب و نفوذناپذیر باشند امکان مزبور منتفی است و اگر نفوذپذیر باشند بعد از برخورد باید از درون یکدیگر عبور کنند و نه اینکه یکدیگر را منحرف کنند. اما اگر دو جسم را دو کرهٔ به شعاع r در نظر بگیریم، همان مسئله در مورد نقطهٔ برخورد (Point of Osculation, kissing point,) تکرار می‌شود: چگونه ممکن است که نقطهٔ برخورد در یک زمان توسط دو جسم صلب اشغال شود؟

جسمی را در نظر بگیرید که با سرعت یکنواخت v در حال حرکت است. مسئله این‌است که علت سرعت v جسم در لحظهٔ t’ چیست؟ اگر پاسخ داده شود که علت آن عبارت‌است از اینکه جسم قبلاً سرعت v داشته و هیچ نیروی خارجی هم به جسم وارد نشده است، این سؤال مطرح می‌شود که قبلاً یعنی *در چه زمانی*؟ سرعت جسم در هر لحظهٔ قبلی t نمی‌تواند علت مستقیم سرعت آن در t باشد زیرا همواره بین t و t’ یک شکاف زمانی وجود دارد، و اگر این فاصله صفر باشد (t= t’) سرعت جسم در یک لحظه باید علت خودش باشد و این ممکن نیست (لنگ، ۲۰۰۲: ۹ـ ۱۰).

بنابراین همواره بین معلول و علت آن فاصله‌ای وجود دارد و تصور سادهٔ موضعیت و تماس قابل دفاع نیست. پس باید مفهوم موضعیت فضا ـ زمانی را به گونه‌ای تعریف کنیم که با ایده‌های اولیه و شهود ما دربارهٔ مواردی که مصداق آن محسوب می‌شوند مطابقت داشته باشد.

مارک لنگ «موضعیت زمانی» را بدین‌صورت معنی می‌کند که رویداد E با هیچ فاصلهٔ محدود غیرصفر τ احاطه نشده باشد که طی آن هیچ مجموعهٔ کاملی از علل E رخ ندهد. این مستلزم این‌است که حداقل یکی از بی‌شمار لحظاتی که در آن C رخ می‌دهد، در بازهٔ τ از حداقل یکی از بی‌شمار لحظاتی باشد که در آن E رخ می‌دهد. وی همچنین تعریف مشابهی از «موضعیت مکانی» ارائه می‌کند که می‌طلبد حداقل یکی از بی‌شمار نقاطی که در آن C رخ می‌دهد، در بازهٔ δ از حداقل یکی از بی‌شمار نقاطی باشد که در آن E رخ می‌دهد.

www.SID.ir

اما «موضعیت فضا ـ زمانی» چیست؟ آیا صرفاً موضعیت مکانی به‌علاوهٔ موضعیت زمانی است؟ پاسخ منفی است زیرا امکان دارد هر دو موضعیت مکانی و زمانی برقرار باشند ولی از آنجا که مجموعه علت‌هایی که موجب حفظ موضعیت مکانی شده‌اند غیر از مجموعه علت‌هایی باشند که موضعیت زمانی را برقرار می‌کنند، موضعیت فضا ـ زمانی برقرار نباشد؛ بنابراین مارک لنگ، موضعیت فضا ـ زمانی را بدین‌صورت تعریف می‌کند:

برای هر رویداد E، هر بازهٔ زمانی محدود $\tau>0$ و هر فاصلهٔ محدود $\delta>0$ ، مجموعهٔ کاملی از علت‌های E وجود دارد به‌طوری‌که برای هر رویداد C در این مجموعه، موضعی که در آن اتفاق می‌افتد فاصله‌اش از موضع E بیشتر از δ نیست، *و* لحظه‌ای وجود دارد که در آن، C *در موضع قبلی* اتفاق می‌افتد، که از لحظهٔ رخداد E *در موضع بعدی* بیشتر از τ فاصله ندارد. (لنگ، ۲۰۰۲: ۱۳–۱۵)

وقتی‌که برهمکنش دو ذرهٔ باردار در نقاط A و B را در نظر می‌گیریم، لحظه‌ای که یک ذره در نقطهٔ B قرار می‌گیرد (t_0) در آن لحظه علت کنش به‌وجود آمده است و اثر آن در آنجا در همان لحظه شروع می‌شود (موضعیت فضا ـ زمانی) و این اثر در هر لحظهٔ t به فاصلهٔ $c(t-t_0)$ از علت اصلی می‌رسد (c سرعت نور است). حال اگر میدان الکتریکی واقعی باشد نیرویی که در هر لحظه به ذرهٔ واقع در A وارد می‌شود معلولِ بار آن و میدان الکتریکی در محل ذره است ــ یعنی مجموعه علت‌هایی که در هر لحظه در محل ذره قرار دارند ــ و لذا موضعیت فضا ـ زمانی برقرار است. در رویکرد میدانی، زمان تأخیری از طریق نیاز سلسلهٔ علل برای رسیدن به معلول نهایی تبیین می‌شود. اما اگر میدان واقعی نباشد، کنش از راه دور تأخیری که بین ذرات وجود دارد به‌صورت یک واقعیت بدون توجیه (Brute fact) فرض می‌شود و از آنجا که مجموعهٔ کامل علل در نزدیکی فضا یا زمان معلول وجود ندارد موضعیت فضا ـ زمانی نقض می‌شود. (لنگ، ۲۰۰۲: ۱۱۱ ـ ۱۱۲)

۲.۳ بار الکتریکی، خطوط نیرو و پتانسیل

گاوس در قرن نوزدهم میلادی در خصوص سرعت محدود انتقال آثار الکتریکی تأملاتی داشت، ولی کارهای وی اصولاً حاکی از دیدگاه کنش از راه دور در باب پدیده‌های الکترومغناطیسی است. نظریهٔ الکترومغناطیس وبر نیز مبتنی بر دیدگاه کنش از راه دور تأخیری است.

اما در دیدگاه فارادی و ماکسول، میدان به‌عنوان یک سیستم فیزیکی حامل انرژی (Energy carrying physical system) تنها واقعیتی است که می‌تواند برهمکنش بین بارهای

www.SID.ir

الکتریکی را توصیف کند و در عوض، بارها و جریان‌های الکتریکی فرعی‌اند. قانون فارادی در واقع تأیید تجربی صریحی برای وابستگی زمانی پدیده‌های الکترومغناطیسی و مفهوم میدان بود. ماکسول نیز نشان داد که سرعت فاز در معادلهٔ موج الکترومغناطیس (یعنی سرعت انتقال آثار الکترومغناطیسی) برابر سرعت نور است و نتیجه گرفت که نور به‌صورت یک موج الکترومغناطیسی انتشار می‌یابد.

در دیدگاه فارادی، اصولاً میدان‌ها تنها چیزهای واقعی بنیادی هستند و بار الکتریکی قابل حذف است. طبق قانون گاوس ($\int E.dA = 4\pi q$)، با اطلاع از شار میدان الکتریکی روی هر سطح بسته، می‌توان به بار خالص درون حجم احاطه‌شده توسط آن سطح پی برد. به عبارت دیگر می‌توان این رابطه را چنین تفسیر کرد که بار الکتریکی در یک ناحیه و واقعیت‌های مربوط به آن، چیزی غیر از واقعیت‌هایی دربارهٔ میدان الکتریکی روی سطح احاطه‌کنندهٔ بار نیستند (لنگ، ۲۰۰۲: ۱٦٥ـ١٦٦). همچنین ذرات سخت را نیز می‌توان با میدان‌ها جایگزین کرد، لذا در این دیدگاه نیروی واردشده به جسم، توسط میدان که یک مرکز را احاطه کرده است احساس می‌شود و نه توسط یک تکه ماده. در واقع مرکزِ یک میدان، مرکز هندسی چیزی نیست بلکه جایی است که شدت میدان در آن بیشینه است.

طبق تصویر فارادی، جسم گرچه در یک مکان معین است ولی محدود به آن ناحیه و مجاور آن نیست بلکه تا بی‌نهایت گسترش دارد. اینکه یک جسم معین در یک ناحیهٔ معین قرار دارد مانع از این نمی‌شود که اجسام دیگر نیز به آن ناحیه گسترش یابند و لذا همهٔ اجسام در یکدیگر نفوذ می‌کنند. جهان شامل هیچ ماده‌ای (به‌معنای جسم خُرد سخت) نیست، چون اگر سختی اجسام درشت را به سختی ذرات ریز تحویل کنیم، سختی اجسام ریز چه توجیهی خواهد داشت؟ جهان فقط شامل میدان‌هاست. (لنگ، ۲۰۰۲: ١٦٧ـ١٧٠)

گرچه روابط علّی هم بین امور واقع (facts) و هم بین رویدادها برقرار می‌شود، اما امور واقع مواضع فضا ـ زمانی ندارند. لنگ معتقد است که علت و معلول باید *رویداد* باشند و در مکان و زمان خاصی واقع شوند تا مسئلهٔ موضعیت فضا ـ زمانی معنا داشته باشد (لنگ، ۲۰۰۲: ٤). لذا وی معتقد است که این تصویر فارادی که هر جسم در هرجایی با همهٔ اجسام در جاهای دیگر در تماس است، گرچه به نظر می‌رسد موضعیت مکانی دو جسمی که علت و معلول‌اند را ارضا می‌کند ولی با توجه به اینکه ممکن است *رویدادها* محدود به ناحیهٔ معینی باشند، موضعیت ضرورتاً تأمین نمی‌شود. (لنگ، ۲۰۰۲: ١٦٨ـ ١٧١)

لنگ همچنین در بحث القای الکترومغناطیسی فارادی به این نکته اشاره می‌کند که آنچه نزد فارادی *واقعی* تلقی می‌شده *خطوط نیرو* بوده است. فارادی معتقد بود از آنجا که جریان

www.SID.ir

الکتریکی به علت قطع‌شدن خطوط نیروی مغناطیسی به‌وجود می‌آید، این خطوط باید واقعی باشند؛ زیرا قطع آن‌ها باعث نیروهایی (واقعی) می‌شود (لنگ، ۲۰۰۲: ۵۱). ایدهٔ خطوط نیروی الکترومغناطیسی فارادی جایگزینی برای رویکرد کنش از راه دور بود، ولی در زمان او مفهوم *میدان* چیزی غیر از همین خطوط نیرو نبود. این در حالی است که امروزه از طریق تجربیاتی همچون آزمایش معروف به دیسک فارادی می‌دانیم چنین نیست که خطوط نیروی مغناطیسی به مغناطیس متصل باشند و با آن بچرخند، این خطوط واقعی نیستند و نمی‌توانند موضعیت فضا ـ زمانی را تأمین نمایند (لنگ، ۲۰۰۲: ۵۷ و ٦١).

برای ماکسول نیز میدان مغناطیسی، واقعی و پتانسیل الکتریکی صرفاً یک مفهوم علمی بود. یک محفظهٔ فلزی خالی را که حاوی تعدادی جسم است در نظر بگیرید، اگر سطح خارجی این محفظه را باردار و بی‌بار (شارژ ـ دشارژ) کنیم، پتانسیل الکتریکی اجسام داخل تغییر می‌کند بدون اینکه هیچ اثر فیزیکی‌ای روی آن‌ها داشته باشد.[۱]

در واقع، تابع‌های پتانسیل زیادی متناظرند با میدان الکتریکی یکسان، و آنچه میدان و نیروی الکتریکی را تعیین می‌کند تغییر پتانسیل است و نه مقدار مطلق آن. پتانسیل الکتریکی نسبت به یک نقطهٔ مرجع اندازه‌گیری می‌شود و تغییر آن نقطهٔ مرجع نیز به هیچ خطای حقیقی (Factual error) منجر نمی‌شود. به عبارت دیگر پتانسیل الکتریکی یک نقطه ویژگی درونی (intrinsic) آن نقطه نیست و لذا نمی‌تواند رابطهٔ علّی با نیروی الکتریکی داشته باشد. (لنگ، ۲۰۰۲: ٤٤–٤٥)

این استدلال متداول که چون پتانسیل الکتریکی مقدار مطلقی ندارد و همواره مقدار آن نسبت به یک مبدأ بیان می‌شود، پس اصولاً غیرقابل اندازه‌گیری و مفهومی غیرواقعی (unreal) است، از نظر مارک لنگ استدلال جامعی نیست. زیرا این امکان که با پیشرفت فیزیک، ابزاری برای تعیین تجربی مقدار مطلق پتانسیل در یک نقطه کشف شود، منتفی نیست. با کشفیات بیشتر، کمّیتی که از نظر مشاهدتی دسترس‌ناپذیر فرض می‌شد، ممکن است قابل آشکارسازی شود. لنگ به‌عنوان مثال، مفهوم دمای مطلق صفر را بیان می‌کند که تصور بر این بود که اختیاری است ولی بر اثر کشف ارتباط دما با مفاهیم دیگر، صفر طبیعی و مطلق به دما نسبت داده شد (لنگ، ۲۰۰۲: ٤٦). اما به نظر می‌رسد مقایسهٔ دما و پتانسیل الکتریکی، قیاس مع‌الفارق است. یک تفاوت مهم این دو کمّیت این است که هر مقدار منفی برای پتانسیل فرض می‌کنیم ولی در مورد دما چنین نیست. مقایسهٔ پتانسیل با کمّیتی همچون ارتفاع یا سرعت، قیاس مناسب‌تری است که نشان می‌دهد اصولاً مقدار مطلق آن بی‌معناست.

www.SID.ir

مارک لنگ قائل است که اگر مقدار مطلق پتانسیل، وابسته به کشف ارتباط این مفهوم با واقعیت‌های دیگر جهان نباشد نهایتاً مفهومی معلق (dangler) خواهد بود که در واقعیت‌های دیگر تفاوتی ایجاد نمی‌کند. دلیلی برای واقعی‌دانستن آن نداریم، و اگر هم واقعی باشد در مورد آن چیزی نمی‌توانیم بدانیم و اصولاً چیزی است که برای پیش‌بینی نیروها و... نیازی نداریم در موردش بدانیم. لنگ به مفهوم سرعت مطلق اشاره می‌کند که مدت مدیدی واقعی فرض می‌شد ولی معلوم شد که مفهومی معلق است (لنگ، ۲۰۰۲: ٤٧). البته این اشارهٔ لنگ، برخلاف بیان قبلی‌اش در مورد امکان کشف معنای جدیدی برای پتانسیل مطلق در آینده، همچون دمای مطلق است.

۳.۳ واقعیتِ میدان و قوانین بقا

اما در نهایت، این دیدگاه که میدان‌ها واقعی هستند اساساً چگونه باید تفسیر شود؟ گزاره‌ای به‌صورت «میدان الکتریکی، اکنون در این نقطه برابر با E است» چه چیزی را توصیف می‌کند و چه چیز صادق‌ساز آن است؟

واقعی‌دانستن میدان مستلزم این معناست که گزارهٔ فوق توصیف‌کنندهٔ یک ویژگی باشد که یک چیز واقعی به نام میدان الکتریکی دارای آن است. اگر میدان غیرواقعی فرض می‌شد می‌توانستیم آن جمله را طور دیگری تفسیر کنیم؛ از جمله به‌عنوان توصیف نیروی الکتریکی وارد بر جسم باردار یا نتیجه‌ای از نحوهٔ آرایش بارهای دیگر در لحظات قبلی، که در آن‌صورت گزارهٔ مزبور صرفاً نتیجهٔ یک عملیات ریاضی روی واقعیت‌های دیگر بود(لنگ، ۲۰۰۲: ۳۸–۳۹)[1] ولی از آنجا که میدان را واقعی در نظر می‌گیریم، صادق‌ساز آن گزاره، همین ویژگی‌ای است که میدان اکنون در اینجا دارد.

اما ماهیت میدان چیست؟ آیا تمایلی (dispositional) است یا مقوله‌ای (categorical)؟ اگر میدان E تمایلی یک نقطه باشد دراین‌صورت نمی‌تواند علت موضعی نیرویی که بر یک جسم باردار در آن نقطه وارد می‌شود باشد، چنان‌که ویژگی تمایلی قابل حل‌بودن قند در آب را نمی‌توان علت حل‌شدن یک حبه قند دانست. قوانین طبیعت، ارتباط بین مبنای مقوله‌ای تمایل جسم (ساختار مولکولی بلور قند) و دریافت تحریک مناسب (قرارگرفتن در آب) از یک طرف و بروز تمایل از طرف دیگر (حل‌شدن) را برقرار می‌کنند.

لذا از آنجا که در دیدگاه واقع‌گرایانه، میدان علت نیروی وارد بر جسم است و بدین‌ترتیب است که موضعیت فضا ـ زمانی حفظ می‌شود، لذا مبنای میدان E یک ویژگی مقوله‌ای در

www.SID.ir

همان نقطهٔ فضا ـ زمانی است، اما آنچه ویژگی مقوله‌ای را در بر دارد ماده نیست بلکه چیزی از نظر هستی‌شناختی برابر با ماده(Existing on an ontological par with matter) است. (لنگ، ۲۰۰۲: ۷٤ ـ ۷۹).

ممکن است ما هرگز پی نبریم که آن ویژگی مقوله‌ای که در یک نقطه، علت آثار خاصی همچون نیروی الکتریکی می‌شود واقعاً چیست یا به چه می‌ماند. ولی نکته‌ای که مارک لنگ در این خصوص بدان اشاره می‌کند این‌است که اصولاً باید در برابر چنین تصوری مقاومت کرد که چیز بیشتری از ویژگی مقوله‌ای وجود دارد که دانستن آن موجب درک عمیق‌تری از آن ویژگی ــ نسبت به آنچه شناخت قوانین به ما می‌دهد ــ می‌شود. هیچ چیز بیشتری وجود ندارد؛ ویژگی‌های مقوله‌ای بنیادی جدای از نقش علّی آن‌ها قابل درک نیستند. (لنگ، ۲۰۰۲: ۸۰–۹۰)

بدین‌ترتیب لنگ که در دوراهی ویژگی تمایلی ـ مقوله‌ای، برای توجیه علیت و حفظ موضعیت، ویژگی مقوله‌ای را بر تمایلی ترجیح داده بود در برخورد با مشکل ماهیت علّی ویژگی‌های مقوله‌ای بنیادی (Fundamental causally relevant properties)، ناگزیر به توقف می‌شود. وی برای بیان موضع مزبور به چند مثال متوسل شده است که کمک چندانی به مستدل‌کردن این نتیجه نمی‌کند و او باید بپذیرد که تقلیل نهایی ویژگی‌های مقوله‌ای به نقش علّی آن‌ها، نوعی رضایت به همان ویژگی‌های تمایلی در سطحی دیگر است و خدشهٔ قابل ملاحظه‌ای در دیدگاه واقع‌گرایانهٔ لنگ محسوب می‌شود.

اما در رویکرد واقع‌گرایانه، حتی اگر واقعیت میدان را آن‌چنان که هست نشناسیم می‌توانیم در مورد ماهیت یا محتوای فیزیکی آن بحث کنیم. یکی از مشکلات نظریهٔ الکترومغناطیسی کنش از دور تأخیری ــ که در آن، دو جسم برهمکنش‌کننده به‌صورت یک سیستم بسته در نظر گرفته می‌شدند ــ تضاد آن با قوانین بقای انرژی و اندازهٔ حرکت (momentum) بود. اما در نظریهٔ میدان‌های واقعی، هر جسم در مکان خود مطابق با موضعیت فضا ـ زمانی با میدان الکتریکی برهمکنش و تبادل انرژی و اندازهٔ حرکت دارد، بنابراین وقتی که انرژی و اندازهٔ حرکت میدان را نیز لحاظ کنیم قوانین بقا نقض نمی‌شود. (لنگ، ۲۰۰۲: ۱۱۵)

مقدار انرژی و اندازهٔ حرکت میدان از نظریهٔ الکترومغناطیس ماکسول به‌دست می‌آید. چگالی انرژی میدان عبارت‌است از: $(E^2/8\pi)$، یعنی اگر یک حجم V داشته باشیم که میدان در آن به‌طور یکنواخت E باشد دراین‌صورت میدان در این حجم دارای انرژی کل $(V.E^2/8\pi)$ خواهد بود (لنگ، ۲۰۰۲: ۱۳٤). واقعی گرفتن میدان به تنهایی موضعیت مکانی را ارضا نمی‌کند؛ لذا لازم است حرکت پیوستهٔ انرژی را نیز لحاظ کنیم.

www.SID.ir

در اصلِ بقای انرژی، مقدار کل انرژی (در زمان‌های مختلف) بقا دارد و توزیع یا حرکت انرژی مورد توجه نیست، اما اصل پیوستگی انرژی (Continuity of energy) شکل خاصی از اصل بقای انرژی است که با انرژی در یک موضع (مثلاً در میدان الکتریکی) و انتقال آن به موضع دیگر سروکار دارد. وقتی‌که انرژی از یک مکان به مکان دیگر می‌رود، فضای بین آن دو را نیز طی می‌کند و لذا این به ارضای موضعیت مکانی منجر خواهد شد (هوی‌ساید، ۱۹۲۲:.۷۳ ـ ۷٤، در: لنگ، ۲۰۰۲: ۱۳۷ــ ۱۳۸). شارش انرژی (Energy flow) مستلزم درنظرگرفتن بردار شارش(Pointing vector) برای هر نقطه است که نشان‌دهندهٔ جهت و مقدار جریان انرژی باشد. این بردار از حل معادلهٔ پیوستگی به‌دست می‌آید: (S=(c/4π)ExB) (لنگ، ۲۰۰۲: ۱۳۹۰ـ۱٤۰) همان ملاحظات بقا و... برای اندازهٔ حرکت نیز وجود دارد. (لنگ، ۲۰۰۲: ۱۵۳)

مارک لنگ اذعان دارد که واقعی‌دانستن میدان (و انرژی و اندازهٔ حرکت) گرچه مشکلاتی را از پیش روی موضعیت فضا ـ زمانی برمی‌دارد، مشکلات زیادی را نیز در پی خود می‌آورد. همچنین وی می‌پذیرد که اساساً کوششی معطوف به رد استدلالات علیه واقعی‌بودن میدان داشته و نه استدلال به نفع واقعیت میدان. و نهایتاً اینکه معتقد است فیزیک کلاسیک از حل مسائل مربوط به وضعیت هستی‌شناختی انرژی، واقعیت میدان و موضعیت فضا ـ زمانی ناتوان است و این امر بر عهدهٔ نظریهٔ نسبیت اینشتین است. (لنگ، ۲۰۰۲: ۱۵۷)

۴. جمع‌بندی

این مقاله محدود به ارائهٔ مفهوم میدان در حوزهٔ فیزیک کلاسیک بود و رویکردهای تجربه‌گرایی و واقع‌گرایی را بررسی کرد. تا آنجا که به حوزهٔ فیزیک تجربی مربوط می‌شود و هدف، شناخت میدان‌هاست، عملیات‌گرایی بریجمن به شکل تعدیل‌شده قابل دفاع است.

بدین‌ترتیب که هر کمّیتی از طریق عملیات تجربی اندازه‌گیری معین می‌شود ولی نحوهٔ اندازه‌گیری در چهارچوب معینِ معمول جامعهٔ فیزیکدانان است. این همان چیزی است که هر دانش‌آموز و دانشجو یا محققِ فیزیک انجام می‌دهد و با غیر از چنین مفهومی از کمّیات نیز سروکاری ندارد. اما بحث از واقعیت میدان به‌عنوان یک مسئلهٔ هستی‌شناسانه اصولاً مبتنی بر پیش‌فرض‌های زیادی است که ابتدا باید به این فرض‌ها توجه کرد. چنان‌که در مقاله مشخص شد، یکی از مهم‌ترین مبانی واقعی‌دانستن میدان برای طرد نظریهٔ کنش از دور تأخیری، توسل به شهود موضعیت است. بنابراین اگر موضعیت مورد سؤال و تردید

www.SID.ir

واقع شود (چنان‌که در مکانیک کوانتم) واقع‌گرایانی چون مارک لنگ باید در پی مبنای دیگری باشند.

مسئلهٔ دیگر این‌است که اصولاً چگونه می‌توان گفت که کدام کمیت فیزیکی مبنایی‌تر است، بار الکتریکی یا میدان. لنگ در بحث ویژگی‌های مقوله‌ای و تمایلی می‌پذیرد که ویژگی مقوله‌ای بنیادی جدا از نقش علّی‌اش قابل فهم نیست، بنابراین چون به نظر می‌رسد به‌سختی می‌توان یک نقش علّی را مبنایی‌تر از دیگری تلقی کرد، نمی‌توان یک ویژگی را مبنایی‌تر از دیگری دانست. در مجموع، واقع‌گرایی در خصوص میدان الکترومغناطیس کلاسیک، بیشتر با یک رویکرد عام واقع‌گرایانه و براساس پس‌زمینه و باوری متافیزیکی قابل دفاع است.

پی‌نوشت

۱. چنان‌که مثلاً در مورد گزاره‌ای همچون «هر خانوادهٔ متوسط ۲/۱ فرزند دارد» می‌دانیم که خانوادهٔ متوسط یک چیز واقعی نیست و این گزاره نتیجهٔ تقسیم تعداد فرزندان خانواده‌های واقعی بر تعداد خانواده‌هاست.

منابع

Bridgman, P. W. 1927. *The Logic of Modern Physics*, Macmillan Company.

Bridgman, P. W. 1936. *The Nature of Physical Theory*, Princeton University Press.

Bridgman, P. W. 1982 'Einstein's Theories and the Operational Point of View', in: P.A. Schilpp, ed. (1982), Albert Einstein: *Philosopher-Scientist*, Open Court, La Salle, Ill, Cambridge University Press, Vol. 2, pp. 335-354.

Carnap, R. 1936. 'Testability and Meaning', *Philosophy of Science*, 3:419-471.

Heaviside, O. 1922. *Electromagnetic Theory*, London: Benn.

Lange, M. 2002. *An Introduction to the Philosophy of Physics*, Blackwell.

Pechenkin, A. A. 2000. '*Operationalism as the philosophy of Soviet Physics*: the philosophical backgrounds of L. I. Mandelstam', Synthese, V.124: 407-432.

Psillos, S. 1999. *Scientific Realism; how science tracks truth*, Routledge.

www.SID.ir