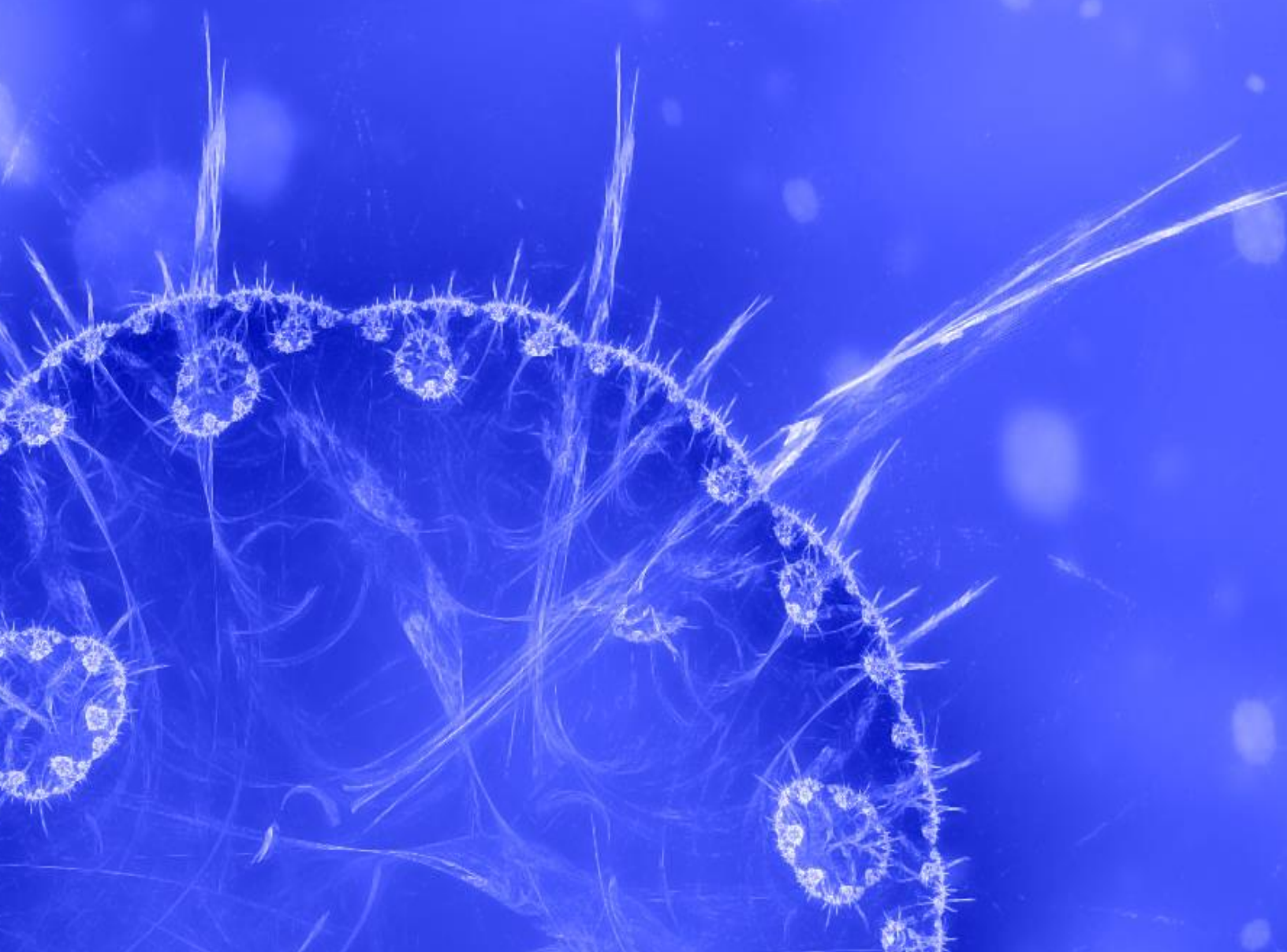


مقدمه‌ای بر

سیستم های پیچیده

محمد رضا شعبانعلی



تقديم به نخستين موجودى كه روزى در درونش،
جهان را چيزى متفاوت از آنچه بود تصور كرد.
و پس از آن روياء، از خود پرسيد:
پس چرا دنيا آن گونه نيست؟

و نيز،

تقديم به همهمى موجوداتى كه پس از او،
سعى كردند پاسخى براى آن سوال بيابند.



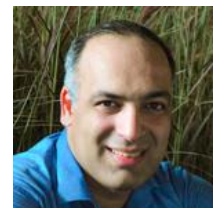
مقدمه پیش از تألیف	۶
حکایت	۹
راه رفتن با دو پای جهان‌بینی و ابزار	۱۲
بی‌شمار	۱۵
مرور چند نمونه از سیستم‌های پیچیده	۱۶
چرا امروز بیش از گذشته به شناختن سیستم‌های پیچیده نیازمندیم؟	۱۸
به چه سیستمی، یک سیستم پیچیده می‌گویند؟	۲۵
توصیفات ساختاری سیستم‌های پیچیده	۲۶
توصیفات رفتاری سیستم‌های پیچیده	۳۰
دو فضای فکری متفاوت برای مواجهه پیچیدگی	۵۱
پارادایم‌ها و ساختار تحولات علمی	۵۷
فرانسیس بیکن	۶۳
گالیله: حرفی درست برپایه‌ی استدلالی نادرست	۷۱
استخوان‌های غلتان	۸۵
این چندوجهیِ پوچ تاریخ‌ساز	۸۶
بازی تاس گالیله – مثالی مناسب برای درک انتروپی و پیچیدگی	۸۹
آمار، دانشی که مستقل از احتمالات رشد کرد	۹۳
پارادایم دنیای کوکی	۱۰۰
هم‌نشینی کوتاهی با بولتزمن، نیوتونِ علف‌ها	۱۰۵
زمان به کدام سمت می‌رود؟	۱۰۸
بولتزمن و جهان کوکی	۱۰۹
انتروپی، همان بی‌نظمی نیست	۱۱۵
بولتزمن، کلاوزیوس، کارنو، کتری آب و ماشین بخار	۱۱۶
نگاه بولتزمن به انتروپی	۱۲۱
درباره مفهوم تصادفی بودن	۱۲۷

تصادفی بودن یک مدل است	۱۳۰
قانون دوم ترمودینامیک	۱۳۲
انتروپی – فصل مشترک جهان ماقبل اتمی با جهان بعد از کشف اتم	۱۳۵
شنون و یک راه دیگر که به انتروپی ختم می شود	۱۳۸
شنون و سومین مسیری که به انتروپی رسید	۱۳۹
بیابید عددی را که انتخاب کرده ام حدس بزنید	۱۴۰
چرا به سراغ روش باینری می رویم ؟	۱۴۲
مسئله‌ی خوب یا مسئله‌ی خوب‌تر؟ مسئله این است	۱۴۵
ماده، انرژی، اطلاعات	۱۴۸
درباره یک لحظه‌ی کلیدی	۱۵۲
درباره واژه‌ی Swarm	۱۵۴
درباره حشرات و موجودات اجتماعی	۱۵۶
کاربرد رفتارشناسی جانداران در شناخت پیچیدگی	۱۶۶
قواعد ساده و ظهور رفتارهای پیچیده: بررسی اتولوژیک گروه ماهی ها	۱۷۱
درباره اهمیت همسایگی	۱۷۶
مفهوم همسایگی	۱۸۱
بررسی وضعیت خُرد در سوآرم ها	۱۸۲
ماشین‌های کوکی (سیستم‌های اتوماتیک سلولی)	۱۹۳
ماشین‌های کوکی سلولی در علوم مختلف کاربردهای متفاوت دارند	۱۹۴
بسیاری از راه‌ها از جان فون نویمان آغاز می شوند	۱۹۵
جان کانوی و بازی زندگی	۲۰۱
چرا مدل جان کانوی برای ما جالب است ؟	۲۰۶
کپکی که اینجا بود کجا رفت ؟	۲۱۰
در جستجوی پاسخ	۲۲۰
رابطه‌ی هوش و حل مسئله	۲۲۲
فضای جستجو، فضای پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ، بهترین پاسخ	۲۲۴

۲۲۵	کم بودن تعداد گزینه ها
۲۲۶	یک لایه ای بودن مسئله
۲۲۶	دسترسی بالفعل به تمام فضا جستجو و پاسخ
۲۲۷	شاخص وضعیت فعلی - نقشه ی شروع بهینه سازی
۲۲۹	چرا شاخص وضعیت فعلی در تحلیل سیستم های پیچیده مهم است ؟
۲۲۹	تپه نوردی انسان نابینا
۲۳۱	مسئله فروشنده دوره گرد
۲۳۱	صورت مسئله
۲۳۲	انسان ها چنین مسئله ای را چگونه حل می کنند ؟
۲۳۳	چه الگوریتم هایی برای یافتن پاسخ این مسئله وجود دارند ؟
۲۳۵	الگوریتم ژنتیکی
۲۳۹	اکولوژی
۲۴۳	شبکه ها و توپولوژی
۲۴۵	هوشمندی / زندگی / اراده چشم / آگاهی / معنا
۲۴۷	جهانی بدون مرز و مرکز

مقدمه پیش از تالیف

یک شوخی رایج بین نویسندگان این است که می‌گویند اگر می‌خواهید مقدمه‌ی یک کتاب خوانده شود، عنوان آن را فصل اول بگذارید.



من چنین نکرده‌ام؛ اگرچه امیدوارم همچنان خواننده‌ای که این کتاب را در اختیار دارد، خواندن آن را از این مقدمه آغاز کند. با این کار، بهتر خواهد توانست رویایی را که در ذهن نویسنده بوده و انگیزه‌ای را که در پس نوشتن این کتاب بوده، بهتر و دقیق‌تر درک کند.

ماه‌های پایانی دبیرستان بود که برای سخنرانی در مورد هوش مصنوعی برای بچه‌های سال‌های پایین‌تر مدرسه‌ی علامه حلی، به ساختمان سمپاد (که آن زمان در خیابان آفریقای تهران بود) دعوت شدم.

آن زمان به تازگی کتاب Artificial Intelligence: A Modern Approach نوشته‌ی راسل و نورویگ را – که با التماس و به صورت غیرقانونی از کتابخانه‌ی مرکزی دانشگاه شریف گرفته بودم – با مشقت و سختی به پایان رسانده بودم و طبیعتاً همان‌طور که از یک دانش‌آموز دبیرستانی انتظار می‌رود، صرفاً بخش‌هایی از آن را درک کرده بودم.

آن کتاب، ماه‌ها همراه روز و هم‌بستر شب من بود. برای اینکه عشق من را به دنیای برنامه‌نویسی و نرم‌افزار و هوش مصنوعی بهتر تصور کنید، کافی است در خاطر داشته باشید که وقت و توان آن سال‌های من چنان برای این موضوعات صرف شده بود که سال قبل به علت نمره‌ی پایین در درس‌های مختلف، از مدرسه‌ی علامه حلی اخراج شده بودم.

بنابراین به سادگی می‌توانید حدس بزنید که در چنین شرایطی، کتابی که به موضوع هوش مصنوعی پرداخته بود، چگونه می‌توانست ذهنم را – البته در سطح فهم یک نوجوان دبیرستانی – تسخیر خود کند.

خوب یادم هست که سخنرانی‌ام را با این پرسش آغاز کردم:

فرض کنید به کراهی دیگر گرفته‌ایم و در آنجا موجوداتی را می‌بینیم که شکلی بسیار ناشناخته و نامتعارف دارند و صحبت هم نمی‌کنند (یا اگر پیامی ارسال می‌کنند، سیگنال‌ها و حرف‌هایشان برای ما قابل درک نیست). براساس چه معیارهایی می‌توانیم بفهمیم که آنها زنده هستند یا اینکه صرفاً روبات‌هایی بسیار پیشرفته‌اند که پس از انقراض نسل موجوداتی زنده و فوق‌العاده هوشمند، بر روی آن سیاره باقی مانده‌اند؟

آن سخنرانی را در تمام این سال‌ها فراموش کرده بودم؛ تا اینکه وقتی امروز می‌خواستم برای کتاب مقدمه‌ای بنویسم، دوباره در خاطر من زنده شد. اما جالب اینکه پرسش ابتدای آن سخنرانی را هرگز فراموش نکردم و به نوعی احساس می‌کنم که بیست

سال اخیر، بخش قابل توجهی از خواندن و نوشتن و فکر کردنم، به جستجوی پاسخ آن پرسش و پرسش‌های مشابه گذشته است.

جستجوهای پراکنده و بعضاً مطالعه‌ی ساختاریافته در زمینه‌ی هوش، روانشناسی، شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک، فرکتال‌ها و نظریه‌ی آشوب، اگرچه در طول مسیرچندان مرتبط به نظر نمی‌رسیدند، اما طی سال‌های اخیر - که با نظریه‌ی پیچیدگی آشنا شدم - به اجزاء مرتبط یک نظام فکری تبدیل شدند و به همین علت به نتیجه رسیدم که وقت صرف شده برای مطالعه‌ی این نوع بحث‌ها در تمام این سال‌ها به هرز نرفته است. حاصل آن مطالعه‌ها این شده است که اجزاء نظام فکری‌ام، به شکلی ساده‌تر، منطقی‌تر و مولدتر در کنار یکدیگر قرار بگیرند. منظورم از مولد این است که این نظام فکری می‌تواند پاسخ‌های قابل اتکای بیشتری را برای سوال‌هایی که هر لحظه به ذهن ما خطور می‌کنند ارائه کند.

پرسش در مورد «زنده بودن» و «مرده بودن» و تعریف «زندگی»، تنها نمونه‌هایی از این سوال‌ها هستند. اگرچه - لاقلاً در نگاه من - این‌ها را باید از جمله‌ی ساده‌ترین و کوچک‌ترین سوال‌هایی دانست که با درک عمیق سیستم‌های پیچیده، از حیطه‌ی فلسفه خارج می‌شوند و پاسخی علمی پیدا می‌کنند.

واژه‌ی فلسفه را در اینجا به معنایی که ری کورزویل^۱ به کار می‌برد مورد استفاده قرار داده‌ام. او در کتاب چگونه یک ذهن بسازیم^۲، فلسفه را به منزلگاه میانی در جاده‌ای تشبیه می‌کند که منزل‌گاه نهایی آن جاده، علم است. ما انسان‌ها، هر جا که نمی‌توانیم با روش علمی^۳ به پاسخ پرسش‌های خود دست یابیم، به سراغ فلسفه می‌رویم.

اما پرسش‌ها قرار نیست همیشه، ساکنِ مهمان‌سرای فلسفه بمانند و به محض آن که روش علمی پاسخ آن‌ها را مشخص کرد، به سرزمین علم سفر می‌کنند و اتاق‌های مهمان‌سرای فلسفه را برای مهمان‌ها و نادانسته‌های جدیدی که زاده خواهند شد، خالی می‌کنند.

رسم است که در ابتدای کتاب‌ها، نویسندگان توضیحات مختصری در مورد هر فصل ارائه می‌کنند؛ اما از آنجا که این مقدمه، پیش از تالیف کتاب نوشته شده است، انجام چنین کاری امکان‌پذیر نیست.

بنابراین به جای معرفی فصل‌ها می‌کوشم در یک جمله، هدفی را که در این نوشته تعقیب می‌کنم توضیح دهم:

^۱ Ray kurzweil

^۲ Kurzweil, R. (2013). How to create a mind: The secret of human thought revealed. New York, NY: Penguin Books.

^۳ Scientific Method

اگر عمر و فرصتی باشد و این کتاب – که برآورد می‌کنم حجم آن از هزار صفحه فراتر رود – تکمیل شود، امیدوارم برای خواننده واژه‌ی سیستم پیچیده و موجود زنده یک معنا پیدا کند.

مترادف بودنِ زندگی و پیچیدگی را به عنوان یک استعاره – یا چیزی از جنس اشعاری که در تاریخ هزارساله‌ی حُرّافی‌های ادب فارسی کم نیست – نمی‌گویم؛ بلکه آن را به عنوان تعبیر کاملاً علمی مد نظر دارم.

لازم است تأکید کنم که نمی‌خواهم بگویم سیستم‌های زنده، یکی از انواع سیستم‌های پیچیده هستند؛ بلکه تمام این نوشته در نهایت به یکسان بودن این دو نوع سیستم معطوف است.

براین باور هستم که «زنده بودن» و «زندگی»، دو تعبیری هستند که قبل از تولد و توسعه‌ی نظریه‌ی پیچیدگی، هرگز به شکلی دقیق مفهوم‌پردازی^۴ نشده بودند و امیدوارم که نسل بعد از ما که درس‌های مدرسه و دانشگاهش براساس نظریه پیچیدگی تدوین خواهد شد، واژه‌های زنده و مرده را تعبیرهایی ادبی بداند که گذشتگان، برای توصیف سیستم‌های پیچیده‌ای که قادر به توضیحشان نبودند به کار می‌برده‌اند.

محمد رضا شعبانعلی

پاییز ۹۵

⁴ Conceptualize

حکایت

می‌گویند روزی روزگاری جوانی انگلیسی زبان در سرزمینی بیگانه گرفتار زندان شد. برای تحمل بهتر تنهایی، به هر در و دیواری می‌زد و دنبال هم‌زبانی می‌گشت.

ظاهراً بخت با او یار بود و توانست در سلول مجاور کسی را پیدا کند که انگلیسی را در حد دست و پا شکسته می‌دانست. روزهای اول به آشنایی گذشت و از تمام ظرفیت آن معدود واژه‌های مشترکی که داشتند استفاده شد. چند روزی گذشت و حرف تازه‌ای در میان نبود. مرد انگلیسی زبان از زندانی همسایه خواست تا به او زبان مادری خویش را بیاموزد.

زندانی همسایه با خوش حالی پذیرفت؛ اما برای این کار شرطی گذاشت. گفت هر چه می‌خواهی پپرس و من می‌کوشم تا واژه‌ها و جمله‌ها را به بهترین شکل ممکن به تو بیاموزم. اما هیچ پرسشی را برای بار دوم پاسخ نخواهم داد. بنابراین بکوش تا درس‌هایت را به خوبی فرا بگیری.

مرد انگلیسی زبان پذیرفت و گفت: «هر چه بگویی بر دیوار سلول خواهم نوشت تا تو را از تکرار آموزه‌های بی‌نیاز کنم» و بدین شیوه، آموزش زبان آغاز شد. نخستین روزها به واژه‌ها و عبارت‌های ساده می‌گذشت و شاگرد تازه نفس، با ذوق و شوق آنها را بر روی دیوار می‌نوشت و حفظ می‌کرد. بعد نوبت فعل‌ها و قیدها و ضرب‌المثل‌ها رسید. به تدریج مرد انگلیسی بر زبان دوم مسلط شد.

البته این کلاس درس از پشت دیوار، صرفاً به واژه‌ها و فعل‌ها و صفت‌ها و قیدها محدود نبود. در میانه‌ی درس، معلم از شگفتی‌های سرزمینش می‌گفت؛ از جنگل‌های سبز و کوه‌های سر به فلک کشیده؛ از شهرها و روستاها.

چند سالی گذشت تا مرد انگلیسی توانست با زبان جدید شعر هم بگوید و زیبایی‌های سرزمین مادری معلمش را برای او در قالب شعر توصیف کند و به این شیوه، رضایت و شادمانی او را فراهم آورد.

دوران محکومیت مرد انگلیسی به پایان رسید و او در نخستین روزهایی که بعد از زندان پا به زندگی گذاشت، تصمیم گرفت به سرزمینی که همواره از آن شنیده بود و کوه‌ها و دشت‌ها و منظره‌هایش را در شعرهایش سروده بود سفر کند و در این میان، تسلط خود را نیز بر زبان جدید بیازماید.

او به مقصد رسید و چشمانش، خسته و گمگشته، کوه‌ها و رودها و جنگل‌هایی را که باید می‌دید، جستجو می‌کرد؛ اما ظاهراً هیچ چیز سر جای خود نبود. با نخستین کسی که در آنجا دید صحبت کرد. سعی کرد به بهترین شکل ممکن، سلام و احوال‌پرسی را ادا کند و سپس با جمله‌ای که تک تک کلماتش به دقت انتخاب شده بود، در مورد منظره‌های مد نظرش سوال کرد.

شنونده، با شگفتی به او نگاه کرد. گویی که صدایش را نمی‌شنود. حتی یک کلمه را هم نفهمیده بود. مرد در اینجا فهمید آن زبانی که سال‌ها برای آموختنش وقت گذاشته بود، صرفاً زائیده‌ی خیالات همسایه‌ی زندانی‌اش بوده است. او اکنون برای یافتن هم‌زبان، باید به زندان بازمی‌گشت.

آنچه نقل کردم، روایتی آزاد از داستانی بود که درِک پارتریج^۵ در مقدمه‌ی کتاب خود درباره‌ی معمای هوش^۶ آورده است. البته من این روایت را با هدفی دیگر و تفسیری دیگر به کار می‌گیرم.

خوشحالم که لازم نیست اجازه‌ی پارتریج را هم برای نقل این روایت کسب کنیم؛ چون او خود این داستان را از فیلم دیگری که جزئیاتش را به خاطر نمی‌آورد نقل کرده است.

اگزوپری در کتاب معروف خود شازده کوچولو، جمله‌ای دارد که بسیار مشهور شده است: «زبان، سرچشمه‌ی سوء تفاهم هاست.» اما شاید بهتر باشد جمله‌ی دیگری را هم به این حرف اگزوپری بیفزاییم: «زبان سرچشمه‌ی سوء تفاهم هاست؛ خصوصاً اگر دو طرف احساس کنند بر سر معنای واژه‌ها تفاهم دارند.»

زمانی که داستان پارتریج را خواندم، بلافاصله احساس کردم که هیچ چیز به خوبی این روایت، آنچه را قصد دارم در این کتاب بگویم بیان نمی‌کند.

ما همه زندانیان بدن خویشیم. هر دوست یا همسایه یا همکار، زندانی مجاوری است که در بدنی دیگر زندگی می‌کند. زبان، قرار است فهم مشترکی از جهان برای ما بسازد. گاه این کار را ادیبان انجام داده‌اند و گاه فیلسوف‌ها. اهل علم هم به شیوه‌ای دیگر و با تکیه بر قواعدی دیگر، زبانی دیگر ساخته‌اند. اگرچه بین صاحبان این زبان‌ها تفاوت‌ها و تعارض‌های بسیار است، اما یک وجه مشترک همه‌ی این زندانیان در بند را به یکدیگر متصل می‌کند. همه‌ی این زبان‌ها از جهانی حرف می‌زنند که بیرون زندان ذهن ما وجود دارد و طبیعتاً هیچکس از بیرون زندان نیامده است تا راستی و ناراستی این همه واژه و شعرو روایت و داستان و دانسته را برای ما تایید یا تکذیب کند.

پیچیدگی در این میان، زبان دیگری پیش روی ما قرار می‌دهد که اگرچه همچون سایر زبان‌ها در دام ذهن ما گرفتار است، اما لاقلاً توانسته است پیوندی شگفت بین زبان‌های شاخه‌های مختلف علم، از فیزیک تا شیمی و از زیست‌شناسی تا انسان‌شناسی و از روانشناسی تا جامعه‌شناسی و از اقتصاد تا تکنولوژی برقرار کند.

^۵ Derek Partridge

^۶ Partridge, D. (2014). What makes you clever the puzzle of intelligence. Singapore: World Scientific Pub. Co.

از این رو، این زبان، مستقل از آنکه چه رابطه‌ای با جهان خارج دارد، این ظرفیت را دارد که به زبان مشترک همه‌ی ما زندانیان طبیعتِ انسانی تبدیل شود.

هرآنچه در ادامه‌ی این کتاب می‌آید، تلاشی برای اثبات این ادعاست.

نیوتون هرگز با سقوط سیب شگفت زده نشد. سقوط کردن برای او عادی بود. آنچه نیوتون را شگفت زده کرد، سقوط نکردن ماه بود. اینکه چرا ماه، مثل سیب سقوط نمی کند. در پاسخ به این سوال، گرانش را کشف کرد و دید که ماه هم، دائماً در یک حرکت دورانی به دور زمین، در حال سقوط است. اما مردم، نهایتاً داستانی که را دوست داشتند ساختند و روایت کردند و بر همان اساس هم فکر می کنند. آنها هنوز هم، با دیدن موجودات زنده شگفت زده می شوند. اما هرگز نمی پرسند: چرا فکر می کنیم اینترنت، شبکه های اجتماعی، سازمان، کشور و فرهنگ، زنده نیستند؟

راه رفتن با دو پای جهان بینی و ابزار

اگر نحوه ی درک انسان از محیط خود را طی هزاره های اخیر - براساس آنچه نوشته و از خود به جا گذاشته است - مرور کنیم، می توانیم شیوه ی اندیشیدن انسان را به کمک استعاره ای از جنس راه رفتن، بهتریان کنیم. راه رفتن با دو پا که یک پا، دستگاه هستی شناسی او و پای دیگر ابزارهای او است.

انسان، هزار چند گاهی جهان بینی خود را توسعه داده و یا اصلاح کرده است. سپس کوشیده است ابزارهای خود را توسعه دهد تا بتواند با تکیه بر جهان بینی خویش، تسلط بیشتری بر جهان اطراف خود پیدا کند. معمولاً ابزارهایی که طراحی کرده، اگر چه در ابتدا در خدمت جهان بینی اش بوده اند، اما در نهایت خطاها و بی دقتی ها و نادرستی های جهان بینی اش را آشکار کرده اند.

انسان، که البته به سادگی حاضر به اصلاح و تغییر دستگاه هستی شناسی خود نیست، معمولاً پس از مدتی مقاومت، جهان بینی خود را توسعه می دهد، اصلاح می کند و یا به کلی تغییر می دهد.

معمولاً حاصل این اتفاق، نیاز به ابزارها و روش های جدید است و به همین شیوه چرخ علم می چرخد و انسان، اگر چه گاه و بی گاه خود را دوباره در نقطه ی نادانی نسبت به هستی می بیند، اما خوب می داند که هر بار، یک نادانی متعالی تر و ارزشمندتر را تجربه می کند.

برای مشاهده ی نمونه ای از این شیوه ی یادگیری انسان، شاید مثالی گویاتر از نیوتون وجود نداشته باشد. اگر چه حساب دیفرانسیل و انتگرال به صورت تقریباً هم زمان، توسط لایب نیتس و نیوتون اختراع شده و حتی ظاهراً علامت مشهور مساوی (=) هم توسط لایب نیتس اختراع و پیشنهاد شده است، اما مشاهده ی مسیر اختراع حساب دیفرانسیل و انتگرال توسط نیوتون، مصداق بهتری برای بحث ماست.

کوپرنیک، گالیله و کپلر سه دانشمندی بودند که تا حد خوبی، نجوم جدید را پایه گذاری کرده بودند. کوپرنیک به مسیر حرکت سیارات توجه کرد و دید که آنها گاهی در مسیر خود به سمت عقب حرکت می کنند. گالیله - تقریباً یک تنه، علم

استاتیک و دینامیک را توسعه داده بود و کپلر، فرمول‌هایی را برای تحلیل حرکت سیارات مطرح کرده بود و می‌توانست ادعا کند که ساده‌ترین شکل معادلات حاکم بر حرکت سیارات را کشف کرده است.

نیوتون، برای مطالعه در مورد گرانش، نیازمند یک دستگاه ریاضی متفاوت و قدرتمندتر بود. او حرف‌های کوپرنیک و گالیله و کپلر را می‌فهمید و خودش هم، حرف‌ها و ایده‌های بیشتری داشت. او -ظاهراً بدون اینکه سببی بر سرش خورده باشد- در جستجوی قانونی فراگیرتر از قوانین کپلر و مشاهدات گالیله و جدول‌های کوپرنیک بود.

نیوتون که بر اساس مسیر و سرعت حرکت ماه و شتاب سقوط اشیاء، شکل اولیه‌ی قانون گرانش را تنظیم کرده بود، باور داشت که گرانش، قانونی جهانی است و فراتر از رابطه‌ی زمین و ماه است و نیروی گرانش، بین خورشید و سیاره‌های آن هم به همان شیوه وجود دارد.

اینجا بود که ریاضیات موجود، به او کمک نمی‌کرد. او نمی‌توانست تغییرات لحظه‌ای سرعت یک جسم در حال سقوط و نیز تغییر دائمی و پیوسته‌ی فاصله‌ی سیارات از خورشید را با استفاده از ریاضیات زمان خود، تحلیل کند.

فراموش نکنیم که در زمان نیوتون، هنوز یک قرن هم از ایده‌ی ارزشمند دکارت نگذشته بود و ریاضی‌دان‌ها تازه یاد گرفته بودند که مختصات یک نقطه را در قالب طول و عرض آن بیان کنند.

نیوتون، پس از ابداع حساب دیفرانسیل و انتگرال، توانست نشان دهد که قوانین کپلر، نمایش‌های متفاوتی از یک قانون پایه‌ای تر هستند و با استفاده از قانون جهانی گرانش، می‌توان همه‌ی قوانین کپلر و همه‌ی آزمایش‌های گالیله و همه‌ی جدول‌های کوپرنیک را محاسبه و استخراج کرد و شرح داد.

بدین ترتیب، ابتدا نگاه ما انسان‌ها به جهان اطراف تغییر کرد و دستگاه‌های هستی‌شناسی جدیدی در ذهن ما شکل گرفت. سپس، برای اینکه بتوانیم جهان بینی جدید را بهتر و بیشتر بفهمیم، ابزار ریاضی مورد نیاز را اختراع کردیم.

اینشتین با استفاده از ابزارهای ریاضی نیوتونی، به نتیجه رسید که جهانی که نیوتون تصویر می‌کند، شکل ساده‌شده‌ای از جهان واقعی است و ابزارهای نیوتونی کمک کردند تا مکانیک نیوتونی، به تدریج جایگاه فاخر خود را به نسل جدیدی از جهان بینی‌ها واگذار کند.

امروز، نظریه سیستم‌های پیچیده یک دستگاه جهان بینی جدید است. این نظریه بر پایه‌ی همه‌ی مشاهدات و دستاوردهای ما در علوم مختلف، اعم از ریاضیات، فیزیک، زیست‌شناسی و روانشناسی ساخته و پرداخته شده است.

اما به همان اندازه که نیوتون، جهان بینی داشت و ابزار نداشت، سیستم‌های پیچیده هم تا همین چند سال اخیر از ضعف

ابزار رنج می بردند.

شاید بتوان گفت رد پاهای دستگاه هستی شناسی مبتنی بر سیستم های پیچیده، بیش از صد و پنجاه سال است که در نوشته ها و تحلیل های زیست شناسان، فیلسوفان، ریاضیدانان و فیزیکدانان مشاهده می شود. اما تا قبل از اختراع و توسعه ی کامپیوترها، ابزاری وجود نداشت که بتوان این شیوه ی مدل سازی جهان را به شکلی دقیق تر و کاربردی تر، مورد بررسی و ارزیابی قرار داد.

اختراع ماشین های محاسبه گرو کامپیوترها برای نظریه سیستم های پیچیده، تا حد زیادی شبیه اختراع حساب دیفرانسیل و انتگرال برای مکانیک نیوتونی است.

آنچه فعلاً می توانیم بگوییم این است که نظریه سیستم های پیچیده در این سال ها، نوزادی و رشد خود را تجربه می کند و درست مانند همان سالهایی که نیوتون فیزیک خود را بنا می کرد، امروز نیز این دیدگاه جدید، آخرین دستاورد فکری انسان و ابزاری کافی برای درک قواعد حاکم بر جهان به نظر می رسد.

حالا باید ماند و دید که این جهان بینی مجهز شده به ابزار، تا چند سال یا چند دهه یا چند قرن، سایه ی خود را بر فضای علمی جهان حفظ می کند و کدام نگرش تازه، ضعف ها و محدودیت های آن را آشکار خواهد کرد.

بی شمار

منظور از «بی شمار»، الزاماً نامتناهی نیست؛ بلکه بیرون بودن از عرفِ شمارش است.

تعداد ستارگان، تعداد مولکول های یک جسم و تعداد سلول های بدن، همگی بیرون از مرز شمارش است. حتی تعداد اعضای یک شبکه اجتماعی بزرگ و جاافتاده را نیز – اگر چه در ظاهر شمردنی است – می توان فراتر از عرف شمارش فرض کرد. جایی که فرد، خود را با «جمعیت» مواجه می بیند، هویتی جدید شکل گرفته است. آن قدر جدید که ما، با وجودی که خود «غولی به نام مردم» را ساخته ایم، حاضر نیستیم بپذیریم که خود بخشی از بدنه ی آن غول بزرگ هستیم.

نقطه ی تولد پیچیدگی، همین جاست. جایی که نه سلول ها خود را به پیکر متعلق می دانند و نه پیکر حاضر است بپذیرد که چیزی فراتر از درهم جنبیدن سلول های بی شمار و درهم تنیده نیست.

همه‌ی ما شناخت جهان را با یک واقع‌گرایی کودکانه آغاز می‌کنیم. با این باور که هر چیزی، دقیقاً همان است که دیده می‌شود. فکر می‌کنیم که سبزه سبز است، سنگ سخت است و برف سرد است. اما فیزیک به ما اطمینان می‌دهد که درک و تجربه‌ی ما در مورد سبزی سبزه، سختی سنگ و سردی برف، با آنچه واقعاً در دنیای بیرون وجود دارد، تفاوت بسیار دارد.

برتراند راسل

مرور چند نمونه از سیستم‌های پیچیده

بدیهی است که در ادامه‌ی این کتاب، باید به شکلی رسمی و جدی به تعریف سیستم پیچیده و بررسی ویژگی‌های سیستم‌های پیچیده پردازیم. اما مناسب‌تر است در لحظات اول ورود به بحث، با تعریفی نسبتاً ساده از سیستم‌های پیچیده و ارائه‌ی چند مثال، فضای کلی بحث و دامنه‌ی موضوع پیچیدگی را بهتر و شفاف‌تر پیش چشم خود مجسم کنیم. معمولاً بحث پیچیدگی و سیستم‌های پیچیده^۷ را این‌گونه آغاز می‌کنند که پیچیدگی با سخت بودن و دشوارفهم بودن تفاوت دارد. ما وقتی یک ساختار یا روش مواجهه با مسئله‌ی ریاضی یا یک سیستم پیشرفته‌ی مخابراتی و الکترونیکی را درک نمی‌کنیم، آن را با صفت پیچیده توصیف می‌کنیم. این نوع مفهوم دشواری و پیچیدگی همان چیزی است که در زبان انگلیسی از آن با واژه‌هایی مانند Difficult و Complicated یاد می‌شود^۸.

سیستم‌های پیچیده معمولاً با اعضای زیاد و تعداد رابطه‌های بسیار بین این اعضا شناخته می‌شوند. مجموعه‌ی قوای محرکه یک خودرو و سیستم‌های کنترل الکترونیکی مربوط به آن را در نظر بگیرید. چنین سیستمی از چند هزار قطعه تشکیل شده است. می‌توانید این قطعات را شماره گذاری کنید و سپس رابطه‌های بین این قطعات را هم فهرست کنید؛ اینکه کدام قطعه با کدام قطعه در ارتباط است و این رابطه از چه نوعی است.

⁷ Complex systems

^۸ من زمانی برای ترجمه‌ی واژه‌ی Complicated در مقابل واژه‌ی Complex از اصطلاح «درهم‌تنیده» استفاده کردم. آن زمان در ذهنم یک سیستم کامپیوتری، سیستم محرکه‌ی خودرو یا سیستم PLC یک دستگاه صنعتی یا میکروکنترلرهای یک هواپیما را تصور می‌کردم و می‌دیدم که تعبیر درهم‌تنیده می‌تواند واژه‌ی مناسبی برای توصیف وضعیت این سیستم‌ها (که Complex نیستند اما Complicated هستند) باشد. سیستم‌هایی که به معنای علمی، پیچیده نیستند، اما اجزای آنها در رابطه‌ای پیچیده در هم تنیده شده و گره خورده‌اند و درک ساختار و نحوه‌ی عملکردشان برای فرد غیرمتخصص، چندان ساده نیست. امروز احساس می‌کنم که استفاده از تعبیر درهم‌تنیده اگرچه در بسیاری از موارد درست و منطقی است، اما فکرمی‌کنم برابردانستن Complicated و درهم‌تنیده، کمی دور از دقت و سلیقه است. گاهی اوقات، دشوارفهم بودن و تعبیرهای مشابه، بهتری برای تعریف و تفکیک سیستم‌های Complex و Complicated نقطه‌ی کتاب، احتمالاً دیگر نیازمند این واژه نخواهیم بود و در فصل‌های آتی، ابزارهای بهتری برای تعریف و تفکیک سیستم‌های Complex و Complicated خواهیم داشت. از جمله اینکه پس از معرفی مفهوم اطلاعات، خواهیم دید که سیستم‌های پیچیده نسبت به سیستم‌های Complicated، حجم اطلاعات بیشتری را در خود ذخیره می‌کنند.

احتمالاً تعداد رابطه‌ها هم مانند تعداد قطعات از چند هزار مورد بیشتر نخواهد شد. ضمن اینکه رابطه‌ها از جنس استاتیک و ایستا هستند. اگر امروز، انژکتور سوخت را از یک لوله دریافت می‌کند و آن را در داخل سیلندر می‌پاشد، فردا هم انژکتور با لوله‌ی سوخت و با سیلندر در ارتباط است. نه سوخت را از جای دیگر خواهد گرفت و نه پودر سوخت را به جای متفاوتی خواهد پاشید.

اما رابطه‌ها در یک شهر چند هزار نفری را در نظر بگیرید. شاید تعداد امان‌ها تفاوت چندانی نکند؛ اما احتمالاً تعداد رابطه‌ها بسیار بیشتر خواهد بود. ضمن اینکه امروز من از شما حرفی را می‌شنوم و به دوست خود می‌گویم و فردا حرفی را از دوستم می‌شنوم و به دوست دیگری می‌گویم و یک روز هم نکته‌ای را از یک رهگذر می‌شنوم و در جایی تکرار نمی‌کنم و به تدریج فراموش می‌شود. بگذریم از اینکه ممکن است یک شهر جمعیت بسیار بیشتر هم داشته باشد.

آنچه در اینجا می‌بینیم تعداد بسیاری از اجزاء در کنار تعداد بسیار بیشتری از رابطه‌ها است که ضمناً پویایی بیشتری هم دارند و شکل و نوع این رابطه‌ها در طول زمان تغییر می‌کند.

ما قطعاً باید سیستم‌های پیچیده را به شکلی بهتر و دقیق‌تر تعریف و بررسی کنیم. اما همین توضیحات باعث می‌شود بتوانیم چند مثال از سیستم‌های پیچیده را در ذهن خود مجسم کنیم.

سیستم‌های زیستی یکی از نمونه‌های بسیار مناسب برای مطالعه سیستم پیچیده محسوب می‌شوند. تعداد بسیار زیادی از سلول‌ها در کنار هم ارگانیسم‌ها، ارگان‌ها (اندام‌ها) و موجودات را می‌سازند که خود آنها هم با یکدیگر در ارتباط هستند. ترکیب این سیستم‌ها، سیستم‌هایی بزرگتر و پیچیده‌تر را می‌سازند و معمولاً در حدی پیچیده‌اند که ما به خوبی نمی‌توانیم مکانیزم‌های حاکم بر رفتار آنها را تشخیص دهیم و به همین علت، ترجیح می‌دهیم صفت زنده را در مورد آنها به کار ببریم. مغز انسان، خود انسان، سیستم ایمنی بدن، جامعه انسانی و اکوسیستم‌ها، از جمله مصداق‌های بسیار عالی برای سیستم پیچیده محسوب می‌شوند.

سیستم‌های اقتصادی نمونه‌ی دیگری از سیستم‌های پیچیده هستند که همه‌ی ما به نوعی آنها را تجربه کرده‌ایم؛ بانک‌ها که در تعداد بسیار زیاد با خود و با سرمایه‌گذاران و مشتریان در ارتباط هستند؛ بازارهای بورس و اوراق بهادار که تعداد بازیگران و روابط در آنها بسیار زیاد است و نیز اقتصاد کلان در یک کشور یا در سطح جهان که امان‌های متنوع و رابطه‌های پویا و متعدد را در دل خود جا داده است، نمونه‌هایی از سیستم‌های اقتصادی پیچیده محسوب می‌شوند.

سیستم آب و هوا و شرایط اقلیمی هم از جمله سیستم‌های پیچیده در جهان محسوب می‌شود. بحث‌هایی که در مورد گرمایش زمین و تهدید زندگی انسان توسط دست‌ساخته‌های انسان مطرح می‌شوند، به این سیستم پیچیده و رفتارهای آن

اشاره دارد. اگر از بحث‌های سیاسی بگذریم، بخشی از اختلاف‌های صاحب‌نظران در مورد گرمایش زمین و تغییر شرایط اقلیمی^۹ به این علت به نقطه‌ی نهایی نرسیده که سیستم مورد بررسی پیچیده است. بنابراین تعداد و تنوع رابطه‌ها در این سیستم بسیار بیشتر از حدی است که بتوان به سادگی در مورد علت‌ها و معلول‌ها و رابطه‌شان اظهار نظر کرد.

مثال‌های بسیار بیشتری هم می‌توان مطرح کرد. ترافیک در یک شهر یا در مجموعه جاده‌های یک کشور؛ اینترنت و همه‌ی چیزهایی که توسط آن به یکدیگر متصل می‌شوند؛ مجموعه کاربران یک شبکه اجتماعی دیجیتال مثل فیس‌بوک، توییتر، اینستاگرام و مجموعه کاربران یک شبکه خبراتی یا یک نرم‌افزار پیام‌رسان، هر کدام سیستمی پیچیده را تشکیل می‌دهند.^{۱۰}

البته شاید بد نباشد در همین جا به این نکته اشاره داشته باشیم که رایج است برای سیستم‌های پیچیده‌ای که انسان‌ها یا سازمان‌های انسانی جزئی از آن هستند، اصطلاح **سیستم‌های پیچیده‌ی اجتماعی**^{۱۱} را به کار برند. بنابراین، مثال‌هایی مثل اقتصاد و سیستم‌های مالی، جامعه و جامعه‌شناسی، شبکه‌های اجتماعی، دولت‌ها و سازمان‌های بزرگ غیردولتی، اگرچه به هر حال زیرمجموعه‌ی سیستم‌های پیچیده محسوب می‌شوند، اما دقیق‌تر خواهد بود اگر آنها را **سیستم‌های پیچیده‌ی اجتماعی** بنامیم.

ما در آینده به هریک از این مثال‌ها بازخواهیم گشت و البته ده‌ها مثال دیگر را هم باید مطرح و بررسی کنیم، اما همین مثال‌های محدود تا حدی فضای بحث پیچیدگی را - که در ادامه‌ی کتاب به آن می‌پردازیم - برای ما روشن می‌کنند.

چرا امروز بیش از گذشته به شناختن سیستم‌های پیچیده نیازمندیم؟

هر کس برای یادگیری سیستم‌های پیچیده، انگیزه‌ی ویژه‌ی خودش را دارد. من نمی‌توانم به عنوان نویسنده‌ی این کتاب، حدس بزنم که چه سوالاتی، خواننده را - در میان انبوهی از گزینه‌ها که برای خواندن دارد - به سمت این نوشته سوق داده است.

اما می‌توانم بخشی از انگیزه‌های خودم را از نوشتن این کتاب، شرح دهم. امیدوارم مطرح کردن آن‌ها بتواند خواننده را به

^۹ Climate change

^{۱۰} بد نیست به این نکته توجه داشته باشیم که سیستم پیچیده‌ای مثل اینترنت توسط سیستم پیچیده‌ای به نام انسان خلق شده است. چنانکه اقتصاد هم سیستم پیچیده‌ی مخلوق انسان است. در کل یکی از ویژگی‌های بسیاری از سیستم‌های پیچیده، زایش است. این سیستم‌ها می‌توانند سیستم‌هایی دیگر را بزنند و خلق کنند. اگرچه نمی‌توانیم بگوییم هر سیستم پیچیده‌ای باید بتواند زایش داشته باشد. یک سیستم پیچیده اگر بتواند بقای خودش را هم حفظ کند و به جهان خودش محدود و محصور باشد، همچنان پیچیده محسوب می‌شود.

^{۱۱} Social complex systems

همراهی عمیق‌تر و دقیق‌تر با کتاب تشویق کند.

بسیاری از جنبه‌های زندگی ما، هر روز پیچیده‌تر می‌شوند. بخشی از این پیچیدگی، به علت افزایش تعداد بازیگران در بازی‌های دنیاست.

به جهان سیاست نگاه کنید: زمانی تعداد افراد تاثیرگذار بر سیاست در سطح جهان را می‌توانستیم با خطای کمی بشماریم. فهرستی از ده، بیست، سی یا صد نام که می‌توانستند مدعی باشند سرنوشت جهان را در اختیار دارند. دو، پنج یا ده امپراتور و پادشاه، که در نگاه خود، زمین را از محل طلوعش در شرق تا غروبش در غرب، میان خود تقسیم کرده بودند.

امروز، تعداد بازیگران عرصه‌ی سیاست در سطح جهان، از شمار بیرون است. این مسئله صرفاً به خاطر ترویج نظام‌های مردمی و ظهور دموکراسی در کشورهای مختلف و تعدد ارکان قدرت نیست. بلکه به خاطر ظهور کسانی است که می‌توان آنها را خرده قدرت‌ها^{۱۲} یا خرده اثرگذاران^{۱۳} دانست.

می‌شود حدس زد که انتشار یک عکس یا یک خبر در شبکه‌های اجتماعی، به سادگی می‌تواند جریان‌های بزرگی بسازد. جریانی که می‌تواند سازنده یا مخرب باشد.

به سادگی می‌تواند خشم گروهی از مردم در گوشه‌ای از جهان به خاطر مشاهده‌ی رفتار یک دولت در نقطه‌ای دیگر از جهان را برانگیزد؛ یا به جمع‌آوری هزینه‌ی درمان کودکی در روستایی دورافتاده کمک کند. کودکی که هرگز امید نداشته صدا و تصویرش، در شهرهای بزرگ کشورش شنیده شود. البته می‌تواند به خاطر جنگ و ترور در جایی از جهان، ترس و اضطراب را در جایی بسیار دور هم ایجاد کرده یا تشدید کند.

تبدیل شدن چند قدرت بزرگ، به هزاران و میلیون‌ها خرده قدرت، برای مدل ذهنی ما که تحت تاثیر جنگ‌های جهانی و پس از آن جنگ سرد، جهان را در اختیار تعدادی ابرقدرت می‌دیدیم و می‌دانستیم، فضای کاملاً جدیدی محسوب می‌شود.^{۱۴}

اگر بپذیریم که زمانی، سه جهان بر روی این کره‌ی خاکی وجود داشته است، یا اینکه بپذیریم که سیاستمداران قرن گذشته، جهان را به سه بخش اول و دوم و بقیه تقسیم می‌کرده‌اند، امروز به طور قطع می‌توان از وجود میلیون‌ها جهان بر روی این سیاره

¹² Micro-powers

¹³ Micro-influencers

¹⁴ برای درک بهتر مدل ذهنی حاکم بر قرن بیستم (که البته ادامه‌ی مدل ذهنی حاکم در قرون گذشته است)، فقط کافی است به تعبیری مانند جهان سوم، فکر کنید. نگرشی که دنیا را به دو جهان اصلی (ناتو و کمونیست‌ها) تقسیم می‌کرد و هر چه باقی می‌ماند، سهم جهان سوم می‌شد.

سخن گفت. هر جهان، مجموعه‌ای از انسان‌ها، اصول، باورها، انتظارات، آرزوها و فرهنگ‌هاست که خود را در تعامل و گاه تقابل با جهان‌های دیگر می‌بیند و برای حفظ و بقا خود تلاش می‌کند.

ما بعد از جهان دوقطبی در دوران جنگ سرد، وارد جهان سه قطبی، پنج قطبی یا ده قطبی نشدیم. بلکه ناگهان وارد جهانی شدیم که هزاران و میلیون‌ها قطب دارد. آن قدر بزرگ و پیچیده که شاید خیلی از جوامع و گروه‌ها، هنوز حتی خودشان هم نقشی را که در سرنوشت جهان دارند، باور و درک نکرده باشند.

از بین رفتن یا کاهش اثر قدرت‌های متمرکز را نباید با بی‌سرو سامانی هم معنا فرض کرد. اتفاقاً خواهیم دید که از جمله ویژگی‌های سیستم‌های پیچیده این است که می‌توانند در عین پراکندگی گسترده‌ی درونی، هویت بیرونی پایداری را حفظ کنند.

در حوزه‌ی سیاسی-اجتماعی، مثال‌های زیادی وجود دارند؛ اما فکرمی‌کنم سوییس مثال زیبایی است که به ما یادآوری می‌کند توزیع گسترده‌ی قدرت در قالب خرده قدرت‌ها هم می‌تواند یک پیکره‌ی باثبات و بالنده ایجاد کند.

سوییس کشوری فدرالی است که با وجود مقیاس کوچکش (با جمعیتی کمتر از نصف جمعیت استان تهران و مساحتی قابل مقایسه با استان سمنان یا یزد)، از بیست و شش خرده قدرت شکل گرفته است. این خرده قدرت‌ها در اواخر قرن سیزدهم و اوایل قرن چهاردهم میلادی در قالب یک همکاری دفاعی بین چند ناحیه در کنار هم قرار گرفتند و اساس چیزی را ساختند که امروز به عنوان کنفدراسیون سوییس می‌شناسیم.

جالب اینجاست که ساختار این کشور، با ساختاری که از کشورهای فدرالی می‌شناسیم تفاوت‌های کلیدی دارد. در حدی که بسیاری از نظریه پردازان، آن را نمونه‌ی آخرین جامعه‌ی بزرگ سیاسی اقتصادی جهان می‌دانند که ساختار دولت-ملت در آن به وجود نیامده است.^{۱۵} در عین حال، می‌دانیم که این کشور، یکی از توسعه‌یافته‌ترین و پایدارترین فرهنگ‌ها و اقتصادها را خلق کرده است.

در حوزه‌ی بیولوژی، بدن انسان مثال بسیار مناسبی است. در طول این کتاب خواهیم دید که بدن انسان، جامعه‌ای با سی تا چهل هزار میلیارد عضو است که اگر چه هیچ‌یک از آنها عضو کلیدی نیستند، اما در کنار یکدیگر هویتی واحد، مستقل و پایدار را شکل می‌دهند.^{۱۶}

¹⁵ Helbling, M., & Stojanović, N. (2011). Switzerland: challenging the big theories of nationalism1. Nations and Nationalism, 17(4), 712-717.
doi:10.1111/j.1469-8129.2011.00516.x

^{۱۶} در واقع می‌توان مرگ را افول و سقوط هماهنگی و یک‌پارچگی در این جامعه تعریف کرد. چیزی که بعداً می‌بینیم از قابلیت تبدیل شدن به معیارهای عددی

ظهور سیستم‌های پیچیده را علاوه بر سیاست، اقتصاد و بیولوژی، در حوزه‌ی تکنولوژی نیز می‌توان مشاهده کرد.

توجه دقیق به نزدیک شدن انسان‌ها به یکدیگر در اثر توسعه‌ی تکنولوژی را، بی‌تردید باید به مارشال مک‌لوهان نسبت داد. او که در نیمه‌ی دوم قرن بیستم و در دوران رواج یافتن رادیو و تلویزیون زندگی می‌کرد، به این نتیجه رسیده بود که زندگی انسان به تدریج به زندگی در یک دهکده شبیه می‌شود. او در دورانی عنوان دهکده جهانی را به کار برد که هنوز اینترنت، به شکلی که ما می‌شناسیم به وجود نیامده بود. او در کتاب *درک رسانه* چنین می‌نویسد^{۱۷}:

بعد از حدود سه هزار سال، که تکنولوژی‌های مکانیکی به انفجار [انبساط] و پراکنده کردن جامعه‌ی انسانی پرداخته‌اند، دنیای غرب در حال متراکم شدن است.

در دوران مکانیکی، ما دسترسی بدن خود را به [نقاط مختلف] فضا توسعه دادیم. امروز پس از گذشت یک قرن از توسعه تکنولوژی الکتریکی، ما دسترسی فیزیکی سیستم عصبی بدن خود را گسترش داده‌ایم و جهان را در آغوش گرفته‌ایم. اگر معیار خود را سیاره‌ی زمین در نظر بگیریم، باید بگوییم که انسان مفهوم زمان و مکان را محو و ناپدید کرده است.

بعد از مک‌لوهان، باید از فریگیس کارینثی^{۱۸} نام ببریم که مفهوم *فاصله اجتماعی* را در داستان کوتاه خود به نام *زنجیرها مطرح کرد* و پایه‌گذار بحثی شد که بعداً در فضای آکادمیک، تحت عنوان *شش درجه‌ی جدایی* نام‌گذاری و شناخته شد^{۱۹}.

ساده‌ترین بیان قانون شش درجه جدایی به این صورت است که اگر فردی را در نقطه‌ای از جهان انتخاب کنید، به احتمال بسیار زیاد، من دوستی دارم که دوست دوستش، دوست دیگری داشته باشد که از طریق یکی از دوستانش با آن فرد در ارتباط است.

توجه داشته باشید که اینجا فقط از *شناختن* صحبت می‌کنیم و نه از یک *رابطه‌ی دوستی* یا عاطفی عمیق. به عبارتی این نوع آشنایی را می‌توانید چیزی در حد همین دوستی‌های رایج امروزی در شبکه‌های اجتماعی در نظر بگیرید که با یک کلیک به وجود می‌آید و با کلیک دیگر هم از بین می‌رود.

(Quantification) نیز برخوردار است.

^{۱۷} McLuhan, M. (1964). *Understanding media: the extensions of man* (p. 3). New York: McGraw-Hill.

^{۱۸} Frigyes Karinthy

^{۱۹} شاید قرار دادن نام یک داستان‌نویس در کنار نام کسی مانند مک‌لوهان که یک تحلیل‌گر محسوب می‌شود، چندان قابل دفاع به نظر نرسد. اما شاید همین که اصطلاح و عبارات مورد استفاده‌ی او در ادبیات آکادمیک باقی مانده و هنوز هم مورد اشاره و استناد قرار می‌گیرد، احتمالاً برای دفاع از این تصمیم من قابل قبول خواهد بود.

در ادامه‌ی زنجیره‌ی افرادی که به **انقباض جهان** فکر کرده‌اند، بی‌تردید باید نام کریستاکیس^{۲۰} را ذکر کرد. مفهوم **سه درجه‌ی تاثیرگذاری** که او در دنیای دیجیتال و شبکه‌های مجازی مطرح می‌کند، شکل توسعه‌ی یافته‌ی همان دیدگاهی است که قبلاً تحت عنوان **شش درجه جدایی** مطرح شده بود.

در شش درجه‌ی جدایی، ما صرفاً از رابطه‌ی ساده حرف می‌زدیم و در اینجا، از **تاثیرگذاری** صحبت می‌کنیم. کریستاکیس به ما نشان می‌دهد که اگر دوستِ دوستِ من، اضافه وزن داشته باشد، احتمال اضافه وزن داشتن من هم افزایش می‌یابد.

اگر به شکل کامل‌تری بگوییم، او با در اختیار داشتن ویژگی‌های دوستانِ دوستانِ من - حتی اگر از خود من و دوستان من اطلاعاتی نداشته باشد - می‌تواند ویژگی‌های متعددی را در مورد من کشف و استخراج کند. این ویژگی‌ها طیف گسترده‌ای از صفات و عادات‌ها، از احساسات لحظه‌ای تا عادات غذایی را شامل می‌شوند.

بر این باور هستیم که در میان کتاب‌هایی که تا لحظه‌ی نگارش این متن منتشر شده‌اند، کتاب **متصل**^{۲۱} نوشته‌ی کریستاکیس و فاولر، یکی از بهترین کتاب‌هایی است که با زبانی ساده و البته وسواسی علمی، سیستم پیچیده‌ای را که در ارتباط ما انسان‌ها از طریق تکنولوژی در سراسر کره‌ی زمین به وجود آمده است، توصیف می‌کند.

مک‌لوهان، کارینتی و کریستاکیس، تصویری شفاف و کلان‌نگار از دنیای در حال انقباض به ما نشان می‌دهند. بعدها که بیشتر در مورد مکانیک آماری بولتزمن صحبت کنیم، می‌توانیم توسعه شبکه‌های اجتماعی را تا حد زیادی شبیه فشرده کردن گاز در یک محفظه‌ی بسته در نظر بگیریم. محفظه‌ی بسته، کل انسان‌ها روی کره‌ی زمین هستند و هریک از ما نقش یکی از مولکول‌های گاز را ایفا می‌کنیم.

اگر چه، تعامل انسان‌ها با یکدیگر پیچیده‌تر از تعامل مولکول‌ها با یکدیگر است، اما آنالوژی گاز فشرده و جامعه‌ی انسانی همچنان می‌تواند در درک بسیاری از پدیده‌های امروز جامعه‌ی انسانی، به ما کمک کند. لااقل داغ‌ترو و ملتهب‌تر شدن جامعه‌ی انسانی را تا حد خوبی می‌توان با مقایسه‌ی دینامیک ارتباط انسان‌ها با یکدیگر و ارتباط مولکول‌ها در یک گاز متراکم درک کرد.

در کل، اگر بخواهم مثال‌های متفاوت و متنوعی را که در بخش قبل و اینجا مطرح کردم، زیرسقف یک اصطلاح گرد هم

²⁰ Nicholas A. Christakis

²¹ Christakis, N. A., & Fowler, J. H. (2009). *Connected: the surprising power of our social networks and how they shape our lives*. New York: Little, Brown and Co.

بیاورم، احتمالاً اصطلاح سیستم‌های بی‌سر^{۲۲} تعبیر مناسبی خواهد بود.

هر چه تمرکز در سیاست، اقتصاد، مدیریت، فرهنگ، جامعه، شبکه‌های اجتماعی و زیست‌شناسی کمتر می‌شود و منابع و فرصت‌ها به شکل گسترده‌تری توزیع می‌شوند، سخت‌تراز قبل می‌توانیم برای سیستم‌ها مرکزیت قائل شویم.

شاید استفاده از جملات ویل دورانت، بتواند پایان مناسبی برای بحث فعلی من باشد.

ویل دورانت در کتاب داستان فلسفه^{۲۳} خود، توضیح می‌دهد که فلسفه باید از برج عاج خود پایین بیاید و زندگی انسان‌های عادی را مورد توجه قرار دهد.

این نگرشی است که خود او بعداً در تالیف تاریخ تمدن هم به صورت جدی رعایت می‌کند و در توصیف آن چنین می‌گوید:

تمدن، مانند یک رودخانه است. در شکل‌گیری رودخانه، علاوه بر جریان آب، نقش ساحل هم مهم است. جریان رودخانه، معمولاً سرشار از غوغاها و نواهای بلند است. سرشار از خون انسان‌هایی که کشته می‌شوند. سرشار از سرقت‌ها. لبریز از صداها و فریادها. همان چیزهایی که تاریخ‌نویسان ثبت می‌کنند.

اما در ساحل این رودخانه، بخش مهم دیگری از تمدن هم در جریان است. بخشی که کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد. انسان‌ها خانه می‌سازند. عاشق می‌شوند. فرزندان خود را به دنیا می‌آورند. آواز می‌خوانند و شعر می‌نویسند.

من در تاریخ تمدن، به کناره‌های این رودخانه توجه می‌کنم. بخشی که معمولاً از نگاه تاریخ‌نویسان پنهان می‌ماند.

قضاوت در مورد اینکه چقدر دیدگاه ویل دورانت را می‌پسندید و با نگاه او همراه می‌شوید را به خودتان واگذار می‌کنم. اما یک چیز را می‌دانم. در گذشته‌ی تاریخ جهان، انسان‌های زیادی در کناره‌های رودخانه‌ی تمدن زندگی کرده‌اند که نامی از آنها در تاریخ نمانده است.

شاید منصفانه نباشد که مورخان را به خاطر این بی‌توجهی سرزنش کنیم. چون تاریخ را معدود افراد مشخصی می‌ساخته‌اند: تعدادی پادشاه، وزیران و فرماندهانشان. همچنان که بخش عمده‌ای از فلسفه، طب، هنر و شعر هم، توسط بزرگان مورد حمایت و مستقر در همان دربارها شکل گرفته و توسعه یافته است.

بخش قابل توجهی از انسان‌های دوران کهن، از لحاظ نقش انسانی، چندان توسعه نیافته بودند. صدها هزار نفر در سراسر

²² Headless Systems

²³ Durant, W., & Durant, W. (1926). The story of philosophy: the lives and opinions of the greater philosophers. New York: Simon and Schuster.

جهان، برای امپراطوری‌ها جنگیدند و کاخ‌های بزرگ و نمادهای بزرگ تمدن را ساختند. اما نامی از آنها باقی نمانده است. شاید کمی تلخ به نظر برسد. اما واقعیت این است که این گم‌نامی از گم‌نقشی آنها نشأت می‌گیرد. آدمی که سوار بر اسب، شمشیر جنگی را در دست می‌گرفته و به جنگ می‌رفته؛ از لحاظ نقش و اثرگذاری، از اسب یا شمشیرش متمایز نبوده و به بیان دیگر، نقش و جایگاهش کاملاً مکانیکی بوده است.

هزار سرباز در یک جنگ کشته می‌شدند و هزار سرباز دیگر فردای آن روز، به جای آنها به جنگ می‌رفتند. بی‌آنکه خللی جدی ایجاد شود و هندسه‌ی بازی بزرگان به شکلی جدی تغییر کند. فقط کافی بود که انسان‌ها هم مثل اسب‌ها زاد و ولد کنند تا به همان اندازه که اسب‌ها به علت پیری و مرگ حذف و جایگزین می‌شوند، سربازان پیرو کشته‌شدگان میدان جنگ نیز با نیروهای تازه‌نفس، جایگزین شوند.

نباید مورخ دربار چنگیز خان مغول را به خاطر ثبت هر روزه‌ی شام او و به فراموشی سپردن نام سربازان او سرزنش کرد. تاریخ آن دوران، بیش از آنکه تحت تاثیر نام سربازان باشد، در گرو شام شبانه‌ی چنگیز بوده است.

اما آیا دنیای معاصر هم شامل چنین توصیفی است؟ آیا امروز هم، می‌توان بخش مهمی از مردم جهان را - که به تعبیر ویل دورانت در کرانه‌ی رودخانه‌ی تمدن زندگی می‌کنند - کنار گذاشت و صرفاً به بررسی جریان رودخانه مشغول شد؟

اصلاً آیا امروز هم، می‌توان جریان آب را از کرانه‌ی رودخانه تفکیک کرد و به سبک ویل دورانت سخن گفت؟ آیا تشبیه تمدن به رودخانه و تفکیک **جریان و کرانه**، امروز هم قابل استفاده و قابل اتکا است؟

تمام این کتاب به شرح یک مفهوم خواهد گذشت. اینکه در دنیای امروز، انسان‌ها، اقتصادها، فرهنگ‌ها، قدرت‌ها، اتفاقات، احساسات، خوشی و ناخوشی‌ها، فقر و رفاه و ضعف و قدرت، چنان با یکدیگر در هم آمیخته‌اند که هر نوع تقسیم‌بندی و مرزبندی به شیوه‌ی کهن، می‌تواند ما را از درک بهتر آنچه در جهان اطرافمان می‌گذرد، دور کند.

اگرچه نکته‌ی بسیار مهم دیگری هم در این کتاب وجود دارد که آن را به تدریج و در فصل‌های مختلف کتاب بیشتر و بهتر درک خواهیم کرد. اینکه سیستم‌های پیچیده با وجود تنوع گسترده‌ی خود دارای ویژگی‌های مشابه بسیاری هستند. پس می‌توان از روش‌های مشابه برای درک این مجموعه‌های ظاهراً نامتشابه استفاده کرد.

شناخت سیستم‌های پیچیده به ما کمک می‌کند بهتر درک کنیم که تفاوت‌ها و فاصله‌ی ظاهری بین شاخه‌های مختلف علوم، اعم از فیزیک، زیست‌شناسی، روانشناسی، جامعه‌شناسی، تاریخ، ترمودینامیک و تکنولوژی، صرفاً از درک ناقص ما و البته متدولوژی چند قرن اخیر ما در درک و تفسیر جهان ریشه می‌گیرد و این علوم - برخلاف درک برخی از ما - از موضوعات متفاوتی صحبت نمی‌کنند.

اگر اجزای زنده‌ی تشکیل‌دهنده‌ی یک جامعه را در نظر نگیریم، نمی‌دانم ویژگی‌های یک جامعه را باید ویژگی‌های یک موجود زنده دانست؟ یا ویژگی‌های موجودی که جان ندارد؟ یا موجود سومی که در هیچ یک از این دو دسته قرار نمی‌گیرد.

هربرت اسپنسر - سال ۱۸۷۶

به چه سیستمی، یک سیستم پیچیده می‌گویند؟

قاعدتاً قبل از اینکه بحث جدی در مورد پیچیدگی و سیستم‌های پیچیده را آغاز کنیم، منطقی است تعریفی از یک سیستم پیچیده ارائه دهیم.

البته باید این واقعیت را بپذیریم که تعریف دقیق پیچیدگی (حداقل به شکل کمی) ساده نیست.

ما می‌دانیم که پیچیدگی، یک کمیت دو وضعیتی نیست که بتوانیم به سادگی بگوییم این سیستم، پیچیده است و آن سیستم پیچیده نیست. بلکه پیچیدگی یک طیف است و هر سیستمی، در جایی از این طیف قرار می‌گیرد.

اتفاقاً اگر بتوانیم به شکلی دقیق و برپایه‌ی یک روش ریاضی، شیوه‌ای برای سنجش میزان پیچیدگی یک سیستم پیشنهاد کنیم، می‌توانیم بگوییم که به منزلگاهی مهم در مسیر دانش پیچیدگی - یا حداقل به پایان این کتاب - رسیده‌ایم.

بنابراین، آنچه در اینجا مرور می‌کنیم صرفاً چند ویژگی از میان انبوه ویژگی‌های سیستم‌های پیچیده است تا بتوانیم به تدریج در ادامه، بحث را از شکل کیفی به شکل کمی تبدیل کنیم.

با توجه به اینکه تعریف سیستم‌های پیچیده، خود نیز کاری دشوار و پیچیده است، بهتر است هنگامی که تعریف سیستم‌های پیچیده را مطالعه و بررسی می‌کنید، چند نمونه از این سیستم‌ها را در ذهن داشته باشید.

برای این کار، از میان انبوه مثال‌های قابل تصور، ارگانیسم‌ها، انسان، مغز انسان، جامعه‌ی انسانی، سازمان‌ها، اکوسیستم‌های طبیعی، یک موجود تک سلولی، بازار بورس، گله‌ی حیوانات و نیز کل جهان، نمونه‌های مناسبی از سیستم‌های پیچیده محسوب می‌شوند.

قبل از اینکه تعریف‌ها، توصیف‌ها و ویژگی‌ها را مرور کنیم، مناسب است که نکته‌ی دیگری را هم مد نظر قرار دهیم:

برخی از تعریف‌های سیستم‌های پیچیده، به سراغ ساختار این سیستم‌ها می‌روند و برخی دیگر، رفتار این سیستم‌ها را تشریح می‌کنند.

شاید مثال زیر بتواند به درک بهتر تفاوت رفتار و ساختار کمک کند:

مثال توصیف براساس رفتار در مقابل توصیف براساس ساختار	
موضوع: انسان	
رفتار	ساختار
• انسان موجودی است که می‌تواند گذشته را به خاطر بسپارد و خاطرات گذشته‌اش بر روی انتخاب‌های امروزش تاثیر می‌گذارند. • انسان موجودی است که حرف می‌زند و می‌تواند افکارش را به کلمات تبدیل کند. • انسان از کلمات برای انتقال اطلاعات خود به سایرهم‌نوعانش استفاده می‌کند. • عمر انسان‌ها به ندرت از صد سال فراتر می‌رود.	• انسان موجودی است که دو پا دارد. • دودست دارد. • بدن این موجود پس از بلوغ، چیزی در حدود سی تا چهل هزارمیلیارد سلول دارد. • قد او به ندرت از دو متر فراتر می‌رود. • اندام‌های جنسی او حدوداً در میانه‌ی ارتفاع بدنش قرار گرفته‌اند. • بین ۵۰ تا ۶۵ درصد از وزن او را آب تشکیل می‌دهد.

واضح است که ویژگی‌های رفتاری هم، به هر حال در ویژگی‌های ساختاری ریشه دارند. با این حال، در سیستم‌های پیچیده، گاهی اوقات تشخیص ویژگی‌های رفتاری ساده‌تر است و گاهی اوقات، در مورد ویژگی‌های ساختاری می‌توان ساده‌تراظهار نظر کرد. بنابراین، تقسیم‌بندی فوق، اگرچه یک مرزبندی دقیق نیست، اما می‌تواند مفید باشد.

اگر تقسیم‌بندی فوق را مد نظر داشته باشید و کتابها و مقالات مربوط به سیستم‌های پیچیده را مرور کنید، بسیاری از تعریف‌ها و توصیف‌ها را می‌توانید به سادگی در یکی از دو دسته‌ی **ساختاری** یا **رفتاری** طبقه‌بندی کنید.

توصیفات ساختاری سیستم‌های پیچیده

معمولاً در توصیف ساختاری سیستم‌های پیچیده، به تعداد بسیار زیاد اجزا، تعامل پیچیده و گسترده‌ی آنها و نیاز سیستم به باز بودن و تامین منابع از بیرون، برای بقاء اشاره می‌شود.

صحبت درباره‌ی مورد سوم را به علت بحث‌ها و حاشیه‌هایش به جای دیگری از کتاب موکول می‌کنم. اما دو مورد اول را در اینجا با هم به صورت بسیار مختصر مرور می‌کنیم.

تعداد المان‌های بسیار زیاد

یکی از نخستین ویژگی‌های ساختاری سیستم‌های پیچیده، **تعداد المان‌های بسیار زیاد** است. همین‌جا هم حق دارید پرسید که «بسیار زیاد»، دقیقاً به چه معناست و از چه عددی بیشتر را می‌توان «بسیار زیاد» در نظر گرفت؟

زمانی که به بحث فرمول‌بندی سیستم‌های پیچیده برسیم، خواهیم دید که تعداد «زیاد» یا «بسیار زیاد» نیز، صرفاً در مقایسه‌ی سیستم‌ها با یکدیگر معنا پیدا می‌کند.

شما به عنوان یک سیستم پیچیده که مشغول خواندن این نوشته‌اید، یک جامعه‌ی سی و هفت هزار میلیاردی از سلول‌ها هستید. از سوی دیگر، تعداد مولکول‌های یک قطره آب، میلیاردها برابر بیشتر از تعداد سلول‌های شماست. با این حال، به نظر می‌رسد شما نسبت به یک قطره آب، موجود پیچیده‌تری باشید.

همچنین، رفتارهای یک جامعه‌ی هشتاد میلیون نفری، الزاماً از رفتارهای یک گروه هزار نفری پیچیده‌تر نیست. چه بسا شما بتوانید بسیاری از رفتارها و ویژگی‌های یک جامعه هشتاد میلیون نفری را پیش‌بینی و تحلیل کنید، اما در تحلیل و پیش‌بینی رفتارهای یک گروه هزار نفری ناتوان باشید.

بنابراین، فعلاً می‌توانیم در این مرحله بپذیریم که در سیستم‌های پیچیده، تعداد المان‌ها در حدی زیاد است که ناظر، به سادگی نمی‌تواند تک تک تعامل‌ها و رفتارها را مورد بررسی قرار داده و سهم هریک از المان‌ها را در رفتار کل سیستم به شکل دقیق و مطلق پیش‌بینی کند.

تعداد المان‌ها در سیستم‌های پیچیده، عموماً در حدی است که حذف تعداد کمی از آن‌ها، خلل جدی در عملکرد کل سیستم ایجاد نمی‌کند.

البته در اینجا هم باید مجدداً بپذیریم که بسیاری از این توصیفات، مطلق نیستند. مثلاً وقتی از یک اکوسیستم، به عنوان نمونه‌ای از یک سیستم پیچیده صحبت می‌کنیم، برخی از گونه‌ها، به عنوان گونه‌های کلیدی یا سنگ بنای^{۲۴} شناخته می‌شوند که حذف آنها می‌تواند ساختار اکوسیستم را متزلزل کرده و یا لاقط سیستم را به سمت یک نقطه‌ی پایدار کاملاً جدید سوق دهد.

جالب اینجاست که در نگاه اول، برای کسی که یک اکوسیستم را به خوبی نمی‌شناسد، ممکن است تشخیص این گونه‌های کلیدی دشوار باشد. مثلاً شاید برایتان جالب باشد که مرجان‌ها، خرس‌ها، ستاره‌های دریایی، فیل‌ها و حتی مرغ مگس‌خوار از جمله‌ی گونه‌های کلیدی در اکوسیستم کروی زمین محسوب می‌شوند.

²⁴ Keystone Species

به عبارتی، ممکن است اثر حذف نیمی از جمعیت مرغ‌های مگس خوار بر اکوسیستم کروی زمین، بیشتر از اثر ناشی از حذف تمام گاوها باشد.

در سیستم‌های پیچیده‌ی اقتصادی هم می‌توان چالش تشخیص گونه‌های کلیدی را مشاهده کرد. مثلاً اتفاقی که در اوایل قرن بیستم تحت عنوان کمونیزم در جهان روی داد، به نوعی حاصل تشخیص نادرست نقش کارآفرینان و نیز سرمایه‌داران در اکوسیستم اقتصادی جهان بود.

کارگران، از گونه‌ی دیگر (کارآفرینان و سرمایه‌داران) ناراضی بودند. آنها می‌دیدند که آن گونه، در موارد بسیار زیادی، اخلاقی عمل نمی‌کند و بقای سیستم و منافع گونه‌ی خود را به نیازها و اولویت‌های کارگران، ترجیح می‌دهد. کارگران که خود را گونه‌ی کلیدی در این اکوسیستم می‌دانستند، تصمیم به حذف گونه‌ی دیگر گرفتند و حاصل آن شد که دیدیم. سیستم‌های اقتصادی از توزیع نابرابر ثروت به سمت توزیع برابر فقر حرکت کردند و فساد و عقب‌ماندگی هم، به دردها و چالش‌های قبلی، یعنی تبعیض و رفتارهای غیرانسانی با کارگران افزوده شد.

به هر حال از این بحث، کافی است این دو نکته را به خاطر داشته باشیم:

- نکته‌ی اول اینکه در سیستم‌های پیچیده، تعداد اجزا در حدی زیاد است که حذف یکی از اجزا یا بخش کوچکی از اجزاء، به احتمال زیاد خللی جدی در عملکرد کل سیستم ایجاد نمی‌کند.
- نکته‌ی دوم هم اینکه با وجود نکته‌ی اول، همچنان می‌توان از **بخش‌های کلیدی** یا **اجزای کلیدی** حرف زد. المان‌هایی که حذف یا تغییر آنها، می‌تواند اثرات بزرگ و محسوسی بر مسیر حرکت و زندگی کل سیستم بگذارد. اگرچه تشخیص بخش‌های کلیدی همیشه ساده نیست.

تعامل گسترده اجزا با یکدیگر

ویژگی دوم در ساختار سیستم‌های پیچیده، تعامل گسترده‌ی اجزا با یکدیگر است. این تعامل، صرفاً به صورت زنجیره‌ی خطی نیست. چون زنجیره‌ی خطی، هر قدر هم که طولانی باشد، قابل ارزیابی و تحلیل است. پیچیدگی در سیستم‌های پیچیده، معمولاً از جایی آغاز می‌شود که این زنجیره‌های تعامل، در هم گره می‌خورند. به عبارتی:

- یک المان تنها از یک المان دیگر اثر نمی‌پذیرد و چند المان به صورت هم‌زمان بر روی آن اثر می‌گذارند. همچنین هر المان نیز، خود ممکن است بر روی تعدادی از المان‌ها (و نه صرفاً یک المان) تاثیر گذار باشد.
- زنجیره‌ی اثرگذاری در بخش‌های متعددی از سیستم به یک حلقه تبدیل می‌شود. یعنی اقدام، رفتار یا ویژگی یک المان، پس از طی چند مرحله (یا چند میلیون یا چند میلیارد مرحله) نهایتاً بر روی خود آن المان هم، تاثیر

می‌گذارد.

اگر مواردی را که به عنوان مثال‌های سیستم پیچیده در ابتدای بحث مطرح شد به خاطر داشته باشید، در همه‌ی آنها می‌توانید این تعامل گسترده و درهم‌تنیده را ببینید.

قرار نیست حتماً سیستم‌های ارگانیک و ارگانیسم‌ها را در نظر بگیریم. شکل حرکت دود در هوا هم نمونه‌ای از همین جنس تعامل گره‌خورده‌ی المان‌ها با یکدیگر است.

حرکت دود در هوا، شکل پیچیده‌تر حرکت براونی است. حرکتی که رابرت براون هنگام مشاهده‌ی گرده‌های گل معلق در آب در زیر میکروسکوپ مورد توجه قرار داد و بعداً اینشتین در سال ۱۹۰۵ در یک مقاله، به شرح دقیق علت شکل‌گیری آن پرداخت.^{۲۵}

در حرکت براونی، ما شاهد یک سیستم پیچیده هستیم که بخش زیادی از اجزای آن، مولکول‌های کوچکی هستند که ما آنها را نمی‌بینیم. اما بخش دیگری از سیستم هم، ذرات بزرگتری هستند که حرکت آنها، قابل مشاهده و ردیابی است.



مولکول‌ها دائماً با یکدیگر و با آن ذرات بزرگ‌تر برخورد می‌کنند. ذرات بزرگ‌تر هم در اثر حرکت خود، موقعیت مولکول‌ها را تغییر می‌دهند. حاصل این سلسله تعامل در هم‌تنیده، چیزی است که ما به عنوان حرکت گرده‌ی گل یا حرکت دود در هوا می‌بینیم.

حرکت براونی دود در هوا را می‌توان حاصل تعامل گسترده و درهم‌تنیده‌ی تعداد زیادی از مولکول‌ها (به عنوان المان‌های یک سیستم پیچیده) دانست.

جالب اینجاست که برای بسیاری از این تعامل‌ها، نمی‌توان به سادگی **آغاز و انجام** مشخص کرد. معلوم نیست که نقطه‌ی آغاز کدام حرکت بوده و نیز مشخص نیست که حرکت یا رفتاری هم که در این لحظه مشاهده می‌شود، چه رفتارهای دیگری را برخواهد انگیزد.

برای این تعامل‌ها، عموماً **سهم مشخص** هم قابل تعریف نیست. مولکولی آبی که اکنون به یک گرده‌ی گل تنه می‌زند و آن را تکان می‌دهد، نمی‌داند که چه سهمی از تکانه‌ای را که اکنون حمل می‌کند، در اثر برخورد قبلی خود با گرده‌ی گل، و

²⁵ Einstein, A., & Fürth, R. (1956). Investigations on the theory of Brownian movement. New York, NY: Dover Publications.

برخوردهایی که در ادامه، گرده‌ی گل با مولکول‌های دیگر در اطراف او داشته است، کسب کرده است.

ماجرای کلاسیک مرغ و تخم مرغ، تنها نمونه‌ای از یک سیستم پیچیده است که عقل سلیم، صرفاً «وجود داشتن» آن را می‌پذیرد و به پرورش مرغ و استفاده از تخم مرغ می‌پردازد و عقل ضعیف، احتمالاً سالها حیرت زده، غرق معمای شگفت مرغ و تخم مرغ باقی خواهد ماند.

توصیفات رفتاری سیستم‌های پیچیده

تا جایی که من در بررسی‌هایم مشاهده کردم، تا به امروز، مسیرهای زیر از رایج‌ترین مسیرهایی بوده‌اند که به دانش پیچیدگی و سیستم‌های پیچیده منتهی شده‌اند:

- فیزیک و شیمی
- زیست‌شناسی
- نظریه آشوب
- علوم اجتماعی
- نظریه اطلاعات
- هوش مصنوعی

جالب اینجاست که دانشمندان هر رشته، بر حسب سوابق و چارچوب فکری و دغدغه‌های خود، بعضاً ویژگی‌های رفتاری متفاوتی را برای سیستم‌های پیچیده پیشنهاد کرده‌اند و می‌کنند.

من در اینجا، بدون اینکه بکوشم ویژگی‌ها را بر اساس خاستگاه آنها تفکیک کنم، برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های سیستم‌های پیچیده را به صورت مختصر مورد اشاره قرار می‌دهم. در قسمت‌های بعدی کتاب، هریک از این ویژگی‌ها را به تفصیل مورد بررسی قرار خواهیم داد.

ابهام علی^{۲۶}

²⁶ Causal Opacity

نigel گولدن فلد^{۲۷} رفتار پیچیده را به شکلی ساده اما زیبا تعریف می‌کند^{۲۸}: پیچیدگی از جایی شروع می‌شود که علت و بحث رابطه‌ی علت و معلول، در شرح آنچه روی داده است، ناتوان می‌ماند.

توجه داشته باشید که در اینجا، بحث بر سر این نیست که رابطه‌ی علی وجود دارد یا ندارد. بحث در این است که ما به عنوان ناظر، نمی‌توانیم با قوای تحلیلی خود برای آنچه روی می‌دهد، یک علت قطعی، واضح و منحصر به فرد را مشخص کنیم. حتی اگر کلیه‌ی علت‌های موجود را هم بدانیم و فهرست کنیم، در تعیین و برآورد سهم هریک از آنها، ناتوان خواهیم بود.

طوفان به عنوان یک پدیده‌ی پیچیده
طوفان می‌آید و در مسیر خود، خانه‌ها و خانه‌نشین‌ها را نابود می‌کند و به زیرساخت‌های شهری آسیب می‌زند. مجموعه‌ی گسترده‌ای از خسارات به وجود می‌آید. به هر حال، طوفان یک اتفاق کاملاً طبیعی است و ما با دانش امروز خود، ریشه‌های آن را می‌دانیم. اما نمی‌توانیم سهم آنها را مشخص کنیم یا بگوییم نقطه‌ی شروع این طوفان در کدام نقطه از زمان و مکان بوده است. حرف ادوارد لورنز که بعداً به اثر پروانه‌ای هم مشهور شد و از فضای علمی به فضای داستان‌ها و افسانه‌ها هم وارد شد همین است. تغییرات بسیار کوچکی که زنجیره‌ای از اتفاق‌ها را به وجود می‌آورند؛ زنجیره‌هایی که دست در دست هم می‌دهند؛ و در نهایت رویدادی به وقوع می‌پیوندد. این همان چیزی است که به آن ابهام علی می‌گویند.

همواره باید به خاطر داشته باشیم که نقش ناظر در تحلیل این رویدادها و علت‌یابی برای آن‌ها بسیار مهم است. در گذشته‌های بسیار دور، چنین طوفانی یک مسئله‌ی پیچیده محسوب می‌شده است.

بعد، مثلاً در یونان باستان، می‌بینیم که این مسئله‌ی پیچیده حل می‌شود و مشخص می‌شود که خشم زئوس رعد و برق و سپس طوفان را برانگیخته است. البته اگر طوفان در آب باشد، ناشی از خشم پوزیدون است که احتمالاً خاطرات تقسیم قلمرو را به خاطر آورده و به اینکه زئوس همه‌ی آسمان‌ها و زمین را برای خود برداشته، اعتراض می‌کند.

در اینجا می‌بینیم که سیستم پیچیده، به یک سیستم ساده تبدیل می‌شود و مسئله برای یونانیان باستان حل می‌شود.

نزدیک به هزار سال بعد، در دوران اوج تمدن اسلامی، می‌بینیم که کسانی مانند ابوریحان بیرونی، بوعلی سینا، خوارزمی و

²⁷ Nigel Goldenfeld

²⁸ Editorial. No man is an island. Nature Physics, 5:1, 2009

دیگران، این نوع ساده‌انگاری‌ها را کنار می‌گذارند و دوباره به بررسی علمی رویدادها و اتفاقات می‌پردازند.^{۲۹}

حالا می‌بینیم که با تغییر ناظر و در واقع با تغییر دانش و نگرش ناظر، مسئله‌ی طوفان (یا هر مسئله‌ی مشابه دیگر) که قبلاً در یک نظام شفاف علی - وابسته به کوه‌های المپ - حل شده بود، به یک پدیده‌ی فیزیکی تبدیل می‌شود و این بار، به عنوان یک پدیده‌ی پیچیده مورد توجه قرار می‌گیرد. مروری کوتاه بر تاریخ توسعه‌ی علم نشان می‌دهد که ما انسان‌ها، هر زمان پیچیده بودن یک پدیده را پذیرفته‌ایم، اتفاقاً دستاوردهای ارزشمندتری در شناخت آن پدیده داشته‌ایم و هر بار، متوجه پیچیدگی یک پدیده نشده‌ایم، با توضیحات ساده‌انگارانه، از شناخت و دریافت ساختار دقیق آن پدیده، دور شده‌ایم.

روابط انسانی به عنوان یک پدیده‌ی پیچیده
مدیران یا کارکنان یک سازمان، در صورتی که روابط انسانی را به عنوان یک پدیده‌ی پیچیده نبینند، احتمالاً «علت واحد» و یا «علل اصلی و فرعی» و یا «علت‌العلل» رفتار همکاران خود را جستجو می‌کنند. کارمندی را در نظر بگیرید که امروز، با وجود دریافت نامه‌ی دعوت از سوی مدیر خود، در جلسه شرکت نمی‌کند و اتفاقاً در سازمان هم حضور دارد. مدیر ممکن است بسته به سابقه‌های قبلی، برچسب‌های مختلفی بر روی این رفتار بگذارد: اعتراض کردن، ایجاد آشوب، توهین، بی‌توجهی و بی‌دقتی، تنها نمونه‌ای از برچسب‌های این رفتار هستند. اما فراموش نکنیم که برچسب یک رفتار با علت یک رفتار تفاوت دارد. ما گاهی اوقات به اشتباه، رفتارها را برچسب‌گذاری می‌کنیم و هم‌زمان فکر می‌کنیم که علت آن رفتار را هم فهمیده‌ایم. کارمندی که پس از شش سال سابقه‌ی همکاری با سازمان، به چنین شیوه‌ای در جلسه حاضر نمی‌شود - حتی اگر خودش هم نداند یا نتواند شرح دهد - احتمالاً برای چنین تصمیمی، چندین علت خواهد داشت که هر یک، از زنجیره‌ای طولانی از علت‌ها برخاسته‌اند. عمق این زنجیره، الزاماً شش سال هم نیست. دو کارمند که قبلاً در دو سازمان متفاوت کار کرده‌اند، احتمالاً شیوه‌های متفاوتی را برای اعتراض آموخته‌اند. رفتارهایی که ما امروز می‌بینیم، ممکن است در خاطراتی ریشه داشته باشد که خودشان هم امروز، آن‌ها را به خاطر نمی‌آورند.

بحث ابهام علی را فعلاً در همین جا متوقف می‌کنیم تا بعداً به سراغ آن بازگردیم. اما این جمله‌ی کلیدی را فراموش نکنیم

^{۲۹} قرن دوم و سوم هجری شمسی (حدوداً نهم و دهم میلادی) دورانی است که دانشمندان اسلامی، به صورت گسترده به توسعه‌ی متودولوژی علمی می‌پردازند. به همان اندازه که لازم است حق یونانیان برای توسعه تفکر نقادانه و نیز فلسفه را به رسمیت بشناسیم، باید به خاطر داشته باشیم که تمدن اسلامی هم (که بخش قابل توجهی از آن در قلمرو امپراطوری وقت ایران بوده) به توسعه‌ی روش علمی و مطالعه‌ی روشمند پدیده‌ها کمک کرده است.

که ابهام، همیشه از دید یک ناظر تعریف می‌شود و در یک سیستم پیچیده، ممکن است آنچه برای من مبهم است، برای شما ابهام کمتری داشته باشد و یا اساساً مبهم نباشد.

قابلیت خودسازماندهی^{۳۰}

از نقدهای متعصبانه که بگذریم، یکی از مهم‌ترین نقدهای علمی که به نظریه‌ی تکامل داروین وارد است، جدی نگرفتن پدیده‌ی خودسازماندهی است.

داروین تمام مسیر رشد و بازآفرینی موجودات را در قالب انتخاب طبیعی می‌بیند. در نگاه داروین، یک نسل از موجودات، از طریق زاد و ولد، ترکیب ژن‌ها و جهش ژنتیکی، نسل بعدی را به وجود می‌آورند و نسل بعدی، با توجه به محدودیت منابع در محیط، با یکدیگر رقابت می‌کنند و آن نمونه‌هایی که با محیط تطبیق بهتری دارند، باقی می‌مانند^{۳۱}.

سیستمی که داروین پیشنهاد می‌کند، بسیار کندتر از واقعیت جهان است و آن را بیشتر می‌توان در مورد سیستم‌های بسیار ساده تصور کرد. هر چه سیستم‌ها پیچیده‌تر می‌شوند، قابلیت آنها در مدیریت و سازماندهی خودشان افزایش می‌یابد.

قانون ولف^{۳۲} تنها نمونه‌ای از این توانایی خودسازماندهی است: استخوان‌های ما وقتی بار بیشتری را تحمل می‌کنند، چگالی آنها به تدریج افزایش می‌یابد. اگر امروز نسل ما بار بیشتر (یا کمتر) را تحمل کند، به عنوان یک سیستم پیچیده می‌تواند خود را با این شرایط تطبیق دهد و لازم نیست ما از طریق زاد و ولد، انبوهی از فرزندان را به وجود بیاوریم تا شاید در میانشان، گونه‌ای به وجود بیاید که تراکم استخوان بیشتر (یا کمتر) داشته باشد.

در اینجا هم ماجرا دو وضعیتی نیست. یعنی ما نمی‌توانیم بگوییم که یک سیستم پیچیده قابلیت خودسازماندهی دارد یا خیر. قابلیت خودسازماندهی هم، یک طیف دارد که اگر چه ابتدای آن تا حدی قابل تصور است، اما انتهایی برای آن قابل تصور نیست.

اما به هر حال، سیستم‌های بسیار پیچیده، از قابلیت خودسازماندهی بسیار بالایی برخوردار هستند. کافی است به مغز انسان فکر کنید که در اثر تعامل با محیط و تجربه‌های بیرونی، اتصالات سیناپتیک خود را تغییر می‌دهد و اصلاح می‌کند و با تغییر این اتصالات نورونی، اطلاعات حاصل از تجربه را برای استفاده‌های بعدی در خود ذخیره می‌سازد.

³⁰ Self Organizing

^{۳۱} این مفهوم معمولاً با عنوان Natural Selection و نیز Survival of the fittest مورد ارجاع قرار می‌گیرد.

³² Wolff, J. (1986). The law of bone remodelling. Berlin: Springer.

بعداً خواهیم دید که در ادبیات سیستمی، خودسازماندهی را به شکل‌های دقیق‌تری هم تعریف می‌کنند. از جمله اینکه می‌گویند: خودسازماندهی به این معنا است که سیستم‌ها می‌توانند خود را تغییر دهند و از آنچه در محیط‌شان در ارتباط با آنها روی داده است، «یاد بگیرند».

همچنین کسانی که با نظریه‌ی آشوب‌آشنایی دارند، ترجیح می‌دهند خودسازماندهی را به صورت توانایی «باقی ماندن بر روی مرزی بین نظم و آشوب» تعریف کنند. این تعریف‌ها را در آینده با دقت و جزئیات بیشتر مرور خواهیم کرد.

البته یک نکته‌ی مهم را نباید فراموش کنیم.

برخلاف ابهام علی که به نوعی، ویژگی مشترک همه‌ی سیستم‌های پیچیده است، خودسازمان‌دهی رفتاری است که فقط در برخی از سیستم‌های پیچیده بروز می‌کند. شاید اگر بخواهیم با وسواس علمی بیشتری بگوییم، باید گفت که توانایی سیستم‌های مختلف در خودسازمان‌دهی یکسان نیست و در برخی سیستم‌های پیچیده، این توانایی در حدی ضعیف است که می‌توان فرض کرد این سیستم‌ها از توانایی خودسازمان‌دهی برخوردار نیستند.

به همین علت، کسانی که در زمینه‌ی سیستم‌های پیچیده کار می‌کنند، گاهی اوقات ترجیح می‌دهند سیستم‌های پیچیده‌ی خودسازمانده را تحت عنوان CAS (مخفف Complex Adaptive System) بررسی کنند و آنها را به عنوان زیرمجموعه‌ای از سیستم‌های پیچیده (یا CS) در نظر بگیرند.

من در این کتاب، چنین تفکیکی قائل نخواهم شد و هر دو واژه را به جای یکدیگر به کار می‌برم. چون به نظر می‌رسد که تطبیق با محیط هم، مفهومی نیست که به صورت مطلق قابل تعریف و سنجش باشد. یا لاقلاً مشاهده‌گر، می‌تواند تعریف‌های بسیار متفاوتی از این ویژگی ارائه دهد و آن را با معیارهای مختلفی بسنجد.

قابلیت هومیوستازی (هم‌ایستایی)

علاقمندان به علوم انسانی، هومیوستازی^{۳۳} را به عنوان یکی از واژه‌ها و مفاهیم کلیدی در نظریه‌ی سیستم‌ها مورد بررسی قرار می‌دهند.

اما با توجه به اینکه مفهوم هومیوستازی ابتدا در زیست‌شناسی مطرح شده و توسعه یافته است، شاید مروری کوتاه بر سابقه‌ی این مفهوم در زیست‌شناسی، کمک کند تا مفهوم و کاربرد آن را در نظریه‌ی سیستم‌ها بهتر درک کنیم.

³³ Homeostasis

قبل از اینکه لغت هومیوستازی توسط آقای والتر کنون^{۳۴} در سال ۱۹۲۶ مطرح شود، مفهوم آن در نیمه‌های قرن نوزدهم توسط یک زیست‌شناس فرانسوی به نام کلاود برنارد^{۳۵} مطرح شد.

برنارد در توصیف هومیوستازی - بدون اینکه از این واژه استفاده کند - چنین می‌گوید^{۳۶}:

موجود زنده، با وجودی که به محیط خود نیاز دارد، به نوعی مستقل از آن نیز هست. این استقلال از این واقعیت ناشی می‌شود که بافت‌ها، به نوعی یک محیط داخلی را شکل داده‌اند و از طریق مایعاتی که در سراسر بدن در گردش است، با هم هماهنگ و همراه می‌شوند و خود را [تا حدی] در برابر اثرات محیطی حفظ می‌کنند.

کار ارزشمند کلاود برنارد این بود که توجه ما را به نکته‌ی بسیار مهمی در سیستم‌ها جلب کرد و آن **یکپارچگی و به وجود آمدن هویت** در یک سیستم بود.

هومیوستازی را **هم ایستایی** هم ترجمه می‌کنند. با این حال فکر می‌کنم اگر بخواهیم از واژه‌های فارسی و عربی موجود، عبارت یا جمله‌ای معادلی برای آن بسازیم، شاید **حفظ تعادل پویای محیط داخلی یک سیستم** تعبیر مناسبی باشد. من در آینده گاهی این مفهوم را به اختصار، **تعادل پویا** خواهم نامید.

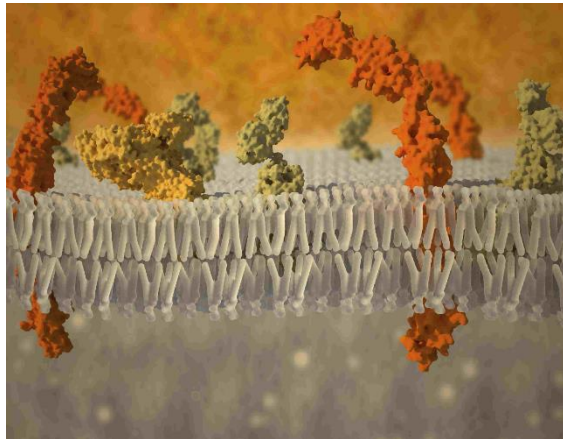
تعادل پویا، در مقابل تعادل ایستا قرار می‌گیرد. انسانی که دمای بدن او در سطح ۳۷ درجه‌ی سانتی‌گراد متعادل شده و تغییر چندانی نمی‌کند، با سنگی که در اثر تبادل حرارت در محیط در دمای ۳۷ درجه به تعادل رسیده است، یک تفاوت کلیدی دارد. تعادل سنگ کاملاً ایستا است. اما تعادل انسان پویا است. بدن انسان به صورت پیوسته در تمام لحظات در تلاش است تا دمای خود را حفظ کند.

این تفاوت را می‌توانیم در سنگ و ماشینی که هر دو که با سرعت ثابت (یک در خلاء و دیگری روی جاده) در حال حرکت هستند نیز مشاهده و تصور کنیم.

³⁴ Walter Bradford Cannon

³⁵ Claude Bernard

³⁶ Johnson, L. R., & Byrne, J. H. (2003). Essential medical physiology (p. 4). Amsterdam: Elsevier Academic Press.



سرعت ثابت سنگ، حاصل تعادل ایستا است اما سرعت ثابت خودرو، دستاورد تعادل پویا است.

شاید مناسب باشد که در بررسی پدیده‌ی هومیوستازی، اشاره‌ای هم به هومیوستازی در سلول داشته باشیم. می‌دانیم که سلول، با استفاده از غشاء سلولی^{۳۷} که یک دیواره‌ی بسیار نازک دولایه‌ای با ضخامتی در حدود ۷ یا ۸ نانومتر است، محیط داخلی خود را از بیرون جدا می‌کند.

در اینجا به طور قطع می‌توان گفت که محیط درون سلولی^{۳۸} از محیط برون سلولی^{۳۹} متمایز است و غلظت یون‌های سدیم و پتاسیم و کلر در این دو محیط می‌تواند متفاوت باشد.

یون‌ها و آب، برای عبور و مرور از محیط بیرونی به محیط داخلی و بالعکس، با مقاومت این دیواره مواجه می‌شوند و به شکلی کنترل شده، با مکانیزم‌هایی مانند دیفیوژن و فشار اسمزی رفت و آمد می‌کنند.

به نظر می‌رسد که در اینجا واقعاً حق داریم از یک **سیستم** حرف بزنیم. می‌توانیم برای سلول، یک هویت قائل شویم. برای آن مرز بینیم. می‌توانیم تلاش سلول را برای **حفظ مرزهای فیزیکی و ویژگی‌های شیمیایی**، مشاهده و ارزیابی کنیم^{۴۰}.

هومیوستازی در مورد موجودات سطح بالاتر مانند انسان، می‌تواند پیچیده‌تر باشد. در واقع، چیزی که توجه کلاود برنارد را هم جلب کرد، همین هومیوستازی پیچیده‌ی انسانی بود.

بدن انسان به عنوان یک سیستم پیچیده، پیوسته پارامترهای متعددی را کنترل می‌کند و در **تعادل پویا** نگه می‌دارد. از جمله این پارامترها می‌توان به دمای بدن، غلظت یون‌های سدیم و کلسیم و نیز سطح قند خون اشاره کرد. البته نمونه‌های هومیوستازی در بدن انسان بسیار بیشتر از این موارد است.

^{۳۷} Cell Membrane

^{۳۸} Intracellular

^{۳۹} Extracellular

^{۴۰} در صورتی که به بررسی کمی و عددی رفتار سلول‌ها علاقمند باشید، می‌توانید کتابهایی با عنوان Mathematical Physiology را جستجو و مطالعه کنید. این شاخه از علم که در مرز بین ریاضیات و فیزیولوژی قرار گرفته است، به ما کمک می‌کند درک بسیار عمیق‌تری از رفتار سلول‌ها و البته سایر اندام‌های بدن داشته باشیم.

در سطوح مختلف سیستم‌های پیچیده، می‌توانید مصداق‌های متفاوتی از هومیوستازی را ببینید. به عبارتی هومیوستازی در سطح سلولی، سطح اندام‌ها، سطح بدن انسان، سطح اجتماعی، سطح کسب و کار و نیز سطح اقتصاد ملی یا جهانی هم قابل تعریف، مشاهده و بررسی است.

بعد از این مثال‌ها و توضیحات، می‌توانیم تعریفی برای هومیوستازی ارائه کنیم:

تعریف هومیوستازی
تعریف ساده‌تر: حفظ یک وضعیت باثبات داخلی در مقابل تغییرات و نوسانات محیطی
تعریف دقیق‌تر: تمایل یک سیستم به حفظ پایداری داخلی خود از طریق فعالیت هماهنگ اجزاء سیستم و پاسخ مناسب آنها به نوسانات و محرک‌های بیرونی که می‌خواهند در وضعیت متعارف یا کارکرد متعارف آن سیستم اغتشاش ایجاد کنند.

پیدا کردن مثال‌ها و مصداق‌های هومیوستازی در طبیعت، چندان دشوار نیست. البته همان‌طور که می‌توانید حدس بزنید، هر چه محیط دچار نوسان‌ها و تغییرات شدیدتری بوده، مکانیزم‌های هومیوستازی قوی‌تری هم در موجودات شکل گرفته است. این بحث، نزدیک به همان مفهومی است که نسیم طالب هم، تحت عنوان پادشکنندگی⁴¹ مورد اشاره قرار می‌دهد. کافی است به زندگی در محیط اقیانوس‌ها فکر کنید. نوسان دما در آب بسیار کم است. اگر کمی از سطح آب پایین‌تر برویم، اثرات باد و طوفان و تغییرات شدت نور هم، به طرز محسوسی کاهش خواهد یافت. غلظت نمک تقریباً ثابت است. شناور بودن در آب طبق همان قانون کلاسیک ارشمیدس، وزن را کاهش می‌دهد.

پس شرایط زندگی در آب بسیار بیشتر از خشکی مهیا است. به همین علت است که می‌بینیم برخی از قدیمی‌ترین موجودات روی کوه‌ی زمین هم در آب‌ها رشد کرده و تکامل یافته‌اند.

شاید به همین علت است که حدود سه و نیم میلیارد سال است که زندگی بر روی زمین جریان دارد و می‌بینیم که نزدیک به دو میلیارد و نهصد میلیون سال نخست، بیشتر به زندگی تک‌سلولی و عمدتاً هم در آب اختصاص داشته است. موجودات پرسلولی، صرفاً در ششصد میلیون سال اخیر بر روی زمین زندگی کرده‌اند.

⁴¹ Antifragility

حتی در این ششصد میلیون سال هم، شکل‌های اولیه‌ی هومیوستازی بسیار ساده بوده است^{۴۲}. اسفنج دریایی و عروس دریایی نمونه‌ای از موجوداتی هستند که می‌توان با مشاهده‌ی آنها، شکل‌های اولیه‌ی هومیوستازی را مطالعه کرد^{۴۳}.

اگر مفهوم هومیوستازی در سیستم‌ها را به شکلی عمیق درک کرده باشید، احتمالاً پیشنهاد می‌دهید که ویژگی **خودسازمان‌دهی** را به عنوان یکی از مصداق‌های آن در نظر بگیریم و خودسازماندهی را به عنوان یک رفتار هم‌ارز و هم‌سطح با هومیوستازی در نظر بگیریم.

چنین انتظاری می‌تواند تا حد زیادی معقول و قابل درک باشد.

با این حال، اکثر کسانی که در حوزه‌ی پیچیدگی کار می‌کنند، ترجیح می‌دهند خودسازمان‌دهی را برای تغییر ساختار و ویژگی‌های سیستم متناسب با نیاز محیط و هومیوستازی را برای تلاش سیستم در راستای حفظ ویژگی‌های خود به رغم تغییرات محیط به کار ببرند.

من هم تصمیم گرفتم مانند اکثر مقالات و کتاب‌های پیچیدگی، هردو عنوان را در کنار هم مورد استفاده قرار دهم. چون بر این باور هستم که این کار می‌تواند در فصل‌های آینده‌ی کتاب، به بیان ساده‌تر و شفاف‌تر موضوعات و مثال‌ها کمک کند. در فصل‌های آینده، می‌توانیم هومیوستازی را در بورس، جامعه، فرهنگ، اقتصاد و سایر سیستم‌های پیچیده مورد بررسی قرار دهیم.

توانایی رشد و تکامل در مجاورت سایر سیستم‌ها^{۴۴}

از جمله ویژگی‌های دیگر سیستم‌های پیچیده، توانایی تطبیق، تغییر و تکامل در اثر مجاورت و تعامل با سایر سیستم‌های پیچیده است. این ویژگی رفتاری هم از جمله مواردی است که بسیار مورد توجه استوارت کاوفمن بوده است. او مثال می‌زند که وقتی سیستم اتومبیل‌ها تغییر و تکامل پیدا می‌کند، جاده‌ها هم به تدریج تغییر می‌کنند و البته جاده‌ها هم به نوبه‌ی خود، در شیوه‌ی طراحی نسل بعدی خودروها اثر دارند. در اینجا نوعی تکامل ناشی از تعامل^{۴۵} مشاهده می‌شود که مبنای آن

^{۴۲} دایناسورها کمتر از ۳۰۰ میلیون سال قبل، روی کره‌ی زمین زندگی می‌کرده‌اند.

^{۴۳} تا مدت‌ها فرض می‌شد که اسفنج دریایی یک گیاه است. اما امروز می‌دانیم که اسفنج، یک حیوان ابتدایی است. یکی از تفاوت‌های میان حیوانات و گیاهان، به توانایی آنها در تولید اسیدآمینه بازمی‌گردد. گیاهان می‌توانند تمام بیست نوع اسیدآمینه‌ی کلیدی مورد نیازشان را تولید کنند. اما حیوانات، به دلیل اینکه همه‌ی آنزیم‌های مورد نیاز را ندارند، نمی‌توانند تمام اسیدآمینه‌ها را تولید کنند. حیوانات سایر اسیدآمینه‌ای مورد نیاز را از طریق تغذیه به دست می‌آورند. انسان هم از این استقلال گیاهان بی‌بهره است و ۹ مورد از اسیدآمینه‌هایی را که نمی‌تواند تولید کند، از طریق تغذیه به دست می‌آورد.

^{۴۴} Coevolution

^{۴۵} Interaction-based evolution

کاملاً با تکامل مبتنی بر تقابل و رقابت - که به نام انتخاب طبیعی نیز شناخته می‌شود - متفاوت است.

این ویژگی هم، مانند بسیاری از ویژگی‌هایی که برای سیستم‌های پیچیده مطرح می‌شود، یک ویژگی کاملاً مستقل نیست. لاقلاً به نظر می‌رسد که این رفتار، چیزی فراتر از ترکیب دو ویژگی **هومیوستازی** و **خودسازمان‌دهی** نیست.

اما مطرح کردن آن به صورت مستقل، می‌تواند روشن‌گرانه باشد. چون کم نیستند کسانی که تکامل سیستم‌های پیچیده را صرفاً در رقابت و حذف سیستم‌های ضعیف‌تر می‌بینند. حال آنکه در اینجا، تاکید بر این است که گاه، سیستم‌های پیچیده در اثر مجاورت با یکدیگر، بدون اینکه جا را برای دیگری تنگ کنند یا به رقابت برای جذب منابع محدود برخیزند، می‌توانند رشد و تکامل پیدا کنند.

ظهور و پدیدار شدن ویژگی‌های جدید^{۴۶}

فکر می‌کنم، برای توضیح مفهوم **ظهور یا پدیدار شدن**، بهتر است قبل از تعریف‌های رسمی، به سراغ یک مثال بروم. این مثال کلاسیک، می‌تواند ادای احترام به بولتزمن^{۴۷} هم محسوب شود. کسانی که فیزیک خوانده‌اند، احتمالاً بولتزمن را با ثابت بولتزمن که به نوعی، رابطه‌ی بین انرژی جنبشی یک مولکول گاز و دمای آن گاز را بیان می‌کند به خاطر می‌آورند.

به دمای اتاقی که الان در آن هستید فکر کنید. فرض کنید دمای اتاق ۲۱ درجه‌ی سانتی‌گراد است. منظور من از دمای اتاق، عملاً دمای هوای محبوس داخل اتاق است. حالا من از شما می‌پرسم که این دما چگونه به وجود آمده است؟ چه می‌شود که دمای هوا افزایش یا کاهش پیدا می‌کند؟

احتمالاً شما توضیح خواهید داد که دما، حاصل حرکت مولکول‌های هوا است و به نوعی به انرژی جنبشی مولکول‌ها ربط دارد.

حالا من سوال دیگری می‌پرسم: اگر یک عدد از این مولکول‌ها را انتخاب و بررسی کنیم، دمای آن مولکول چند درجه‌ی سانتی‌گراد است؟

^{۴۶} Emergence

^{۴۷} لودیگ بولتزمن، از پیشگامان نظریه‌ی اتمی مدرن و دانش مکانیک آماری است. همکاران بولتزمن، شیوه‌ی نگرش او را چندان درک نمی‌کردند. بولتزمن وقت قابل توجهی را برای برگزاری سمینار و تبلیغ نظریاتش در دانشگاه‌های مختلف صرف کرد. اما در یافتن افراد هم‌زبان و هم‌فکر ناموفق بود و نهایتاً خودکشی کرد. راه بولتزمن را دانشجوی دکترای او پاول ارن فست ادامه داد و برای توسعه مکانیک آماری تلاش کرد. ارن فست هم نهایتاً با شلیک گلوله به مغز خود، به زندگی‌اش پایان داد. آلبرت اینشتین و نیلز بور، رابطه‌ی بسیار نزدیکی با ارن فست داشتند و گاه، در خانه‌ی او در مورد نظریه‌ی کوانتوم بحث می‌کردند. از پیگیری‌هایی که اینشتین برای سبک‌تر کردن کار ارن فست در دانشگاه انجام می‌داد، به نظر می‌رسد که در زمینه‌ی شرایط روحی او، نگرانی‌هایی داشته است.

پاسخ را می‌دانیم: یک مولکول، دما ندارد. اصلاً دما برای یک مولکول تعریف نمی‌شود. دما برای مجموعه‌ای از مولکول‌ها (آن هم وقتی تعدادشان بسیار زیاد باشد) قابل تعریف است.

می‌پرسیم: هریک از این مولکول‌ها چه سهمی در دمای ۲۱ درجه دارند؟ شما می‌گویید: هیچ سهمی ندارند. در حدی که اگر دیواری در میانه‌ی اتاق بکشیم و نیمی از مولکول‌ها پشت دیوار بمانند، باز هم دمای هوا ۲۱ درجه خواهد بود.

باز می‌پرسیم: حالا که مولکول‌ها هیچ نقشی ندارند، اگر تمام مولکول‌ها را از اتاق خارج کنیم، باز هم دمای داخل اتاق ۲۱ درجه است؟

پاسخ می‌دهید که: نه. اگر مولکول‌ها نباشند، شرایط فرق می‌کند. چون این دما، به نوعی از انرژی جنبشی مولکول‌ها نشأت می‌گیرد.

تمام بحث **ظهور**، **پدیدار شدن** و به وجود آمدن **ویژگی‌های سطح بالا**^{۴۸} همین است. شما در سطح کلان در کل سیستم پیچیده، می‌توانید ویژگی‌هایی را مشاهده، تعریف، اندازه‌گیری و بررسی کنید که برای تک تک اعضای آن سیستم، قابل مشاهده، تعریف و اندازه‌گیری نیست.

کافی است دمای یک گاز را با جرم یک گاز مقایسه کنید تا تفاوت جرم (به عنوان یک ویژگی سطح پایین) را با دما (به عنوان یک ویژگی سطح بالا) ببینید.

وقتی از جرم یک گاز صحبت می‌کنیم و مثلاً می‌گوییم که این گاز ۱۰۰ گرم وزن دارد، سهم هر مولکول در کل جرم کاملاً مشخص است. همچنین وقتی گاز را به دو بخش مساوی تقسیم می‌کنیم، جرم هم دقیقاً به دو بخش برابر تقسیم می‌شود. به عبارتی، جرم، یک ویژگی جدید نیست که در اثر کنار هم قرار گرفتن مولکول‌ها ایجاد شده باشد. بلکه صرفاً حاصل جمع جرم تک تک مولکول‌هاست که قبل از قرار گرفتن آنها در کنار یکدیگر هم وجود داشته است.

برای این رفتار سیستم‌های پیچیده، یعنی **ظهور ویژگی‌های جدید**، تعریف‌های متنوعی وجود دارد. گاهی اوقات می‌گویند که در سیستم‌های پیچیده، ویژگی‌ها و رفتارهایی بروز می‌کند که با حاصل جمع ویژگی‌ها و رفتارهای تک تک اجزاء، قابل بیان نیست. گاهی اوقات، می‌گویند که ویژگی‌هایی از این دست، زمانی پدید می‌آیند که تعداد اجزاء یک سیستم، بسیار

^{۴۸} من Emergence را به ظهور و پدیدار شدن ترجمه می‌کنم. در متن‌های عربی، دقیقاً واژه‌ی ظهور را به عنوان معادل به کار می‌برند و در فارسی هم به نظم پدیدار شدن، می‌تواند همان معنا را داشته باشد. اما به نظم ترجمه‌ی Emergent Properties به ویژگی‌های پدیدار شونده کمی ثقیل است. با وجودی که شاید ترجمه‌ی دقیقی به نظر نرسد، من از عبارت **ویژگی‌های سطح بالا** استفاده می‌کنم. احتمالاً بعداً ترجمه‌های بهتر یا واژه‌های جدیدی برای این مفهوم ایجاد می‌شود و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

زیاد باشد و به سمت بی‌نهایت میل کند. حیف است که تعریف اوکانور و کورادینی را هم نخوانده باشیم^{۴۹}:

پدیده‌هایی که در سیستم‌های پیچیده ظهور می‌کنند، بر پایه‌ی پدیده‌های سطح پایین‌تر موجود در میان اجزاء همان سیستم شکل می‌گیرند و در سطحی بالاتر [در قالب یک سازمان‌دهی و هویت جدید] مشاهده و درک می‌شوند. اما همین پدیده‌های ظهور کرده، خود مجدداً بر پدیده‌های سطح پایین‌تر اثر می‌گذارند و به نوعی آنها را محدود، کنترل یا مدیریت می‌کنند.

کسی را که دارای اعتماد به نفس است در نظر بگیرید. مهم نیست که اعتماد به نفس را چگونه تعریف و اندازه‌گیری می‌کنید.

اعتماد به نفس را به کدام یک از سلول‌هایش ربط می‌دهید؟ به کدام هورمون؟ به کدامیک از اجزای سیستم ایمنی بدن؟

به همه و به هیچ کدام. اعتماد به نفس، برای یک عضو، اندام یا سلول قابل تعریف نیست. اما از سوی دیگر، همین اعضا، اندام‌ها و سلول‌ها بوده‌اند که در کنار یکدیگر و در تعامل با یکدیگر، اعتماد به نفس را خلق کرده‌اند.

جالب اینجاست که همین اعتماد به نفس پایین یا بالا، خود می‌تواند روی نوروهای مغز، روی ترشح هورمون‌ها، روی سیستم ایمنی بدن تاثیر بگذارد.

جمله‌ی راسل اکاف، در اینجا می‌تواند الهام‌بخش باشد و بحث را به نوعی خلاصه کند: ما انسان‌ها سیستم‌ها را می‌سازیم و سپس، سیستم‌ها هستند که ما انسان‌ها را می‌سازند.

به هر حال، مستقل از این بحث‌ها - که بعداً به سراغ‌شان خواهیم رفت - فعلاً در حد بحث مقدماتی ما و قبل از اینکه وارد اصل موضوع بشویم، تعریف زیرکافی است:

تعریف ویژگی‌های سطح بالا
ویژگی‌های سطح بالا یا ویژگی‌های پدیدار شونده، ویژگی‌هایی هستند که برای کل یک سیستم تعریف می‌شوند، اما در مورد هیچ یک از اجزای آن سیستم، قابل اطلاق نبوده و برای توصیف و سنجش اجزاء، قابل استفاده نیستند. از ویژگی‌های سیستم‌های پیچیده این است که در آنها، ویژگی‌های سطح بالا، ظهور می‌کند. به عنوان مثال مغز انسان را در نظر بگیرید. شما می‌توانید برای کل مغز، بهره‌ی هوشی تعریف کنید. اما اگر از شما پرسند که بهره‌ی هوشی یک نورو چند است، قاعدتاً جوابی نخواهید داشت. چون بهره‌ی هوشی فقط برای مجموعه‌ای بزرگ از نوروها که آن را مغز می‌نامیم قابل تعریف است و نه یک یا چند نورو.

⁴⁹ Corradini, A., & O'Connor, T. (2010). Introduction. In Emergence in science and philosophy. New York: Routledge.

نظم خودجوش^{۵۰}

نظم خودجوش یا نظم خودانگیخته نمونه‌ای از ویژگی‌های سطح بالاست که در سیستم‌های پیچیده ظهور می‌کند. البته این را هم می‌فهمیم و می‌دانیم و لازم به تأکید نیست که نظم همواره به ناظر احتیاج دارد^{۵۱}. به عبارت دیگر نظم و بی‌نظمی، یک مفهوم ذهنی و قراردادی است و به شدت به ناظر بستگی دارد. فیلسوفان اسکولاستیک مسیحی، طی چند قرن بخشی از استدلال‌های نظام هستی‌شناسی خود را بر پایه‌ی مفهوم نظم قرار داده بودند. هر اتفاقی که برای انسان شیرین و دوست‌داشتنی بود، نشانه‌ای از نظم تلقی می‌شد.

خورشید صبح از شرق طلوع می‌کرد و عصر در غرب غروب می‌کرد. گیاهان در فصل‌های خاص رشد می‌کردند و درختان در مقطع مشخصی از سال برگ می‌ریختند.

آب دریا با گرمای خورشید تبخیر می‌شد و سپس با کاهش دما دوباره در قالب قطره‌های باران از آسمان به زمین فرود می‌آمد. به نظر می‌آمد همه چیز به طرز شگفت‌انگیزی منظم است.

اما سوال مهمی که وجود دارد این است که چه کسی این نظم را تشخیص می‌دهد؟ معیار سنجش این نظم کجاست؟ آیا همین که ما فکر می‌کنیم هر چیزی سر جای خودش است، یعنی نظمی برقرار است؟ آیا ما اصلاً جای هر چیز را می‌دانیم؟

天 天 天 天 天
地 地 地 地 地
玄 玄 玄 玄 玄
黃 黃 黃 黃 黃

آیا این علامت‌هایی که در تصویر روبرو می‌بینیم نظمی دارند؟

این علامت‌ها به خودی خود، شکل‌هایی نامنظم هستند. برای من و شما - که احتمالاً چینی نمی‌دانیم - نظم خاصی ندارند. مخاطب است که می‌تواند وجود داشتن یا نداشتن نظم در آنها را تعریف کند.

نظم در ذات این‌ها نیست؛ در نگاه مخاطب است^{۵۲}. احتمالاً مورچه‌ای

که از روی این کاغذ عبور می‌کند، این‌ها را کاملاً بی‌نظم خواهد یافت. اما قسمت ترسناک دیگری هم وجود دارد. به این علامت‌ها نگاه کنید:

⁵⁰ Spontaneous order

^{۵۱} مراقب باشید گرفتار غلط دیکته‌ای نشوید و ننویسید: نظم همواره به ناظم احتیاج دارد. چون اصلاً کل بحث ما این است که نظم می‌تواند ناظم داشته باشد و می‌تواند نداشته باشد.

^{۵۲} حتماً جمله‌ی معروف آندره ژید در کتاب مائده‌های زمینی را خوانده یا شنیده‌اید: «ناتانائیل، ای کاش عظمت در نگاه تو باشد، نه در آن چیزی که بدان می‌نگری». با الهام از جمله‌ی او می‌توان حرف‌های این بخش را چنین خلاصه کرد: «ناظر عزیز، نظم در نگاه توست؛ نه در آن چیزی که بدان می‌نگری.»

誠信重誠 養安有之 神體 養安有之 神體 養安有之

اینها را دیگر نه ما می‌فهمیم و نه چینی‌ها. چون هیچ معنایی ندارند. اما اگر من از شما بپرسم که اینها نظم دارند یا نه. احتمالاً خواهید گفت: بله. اینها نوشته هستند. نوشته‌هایی مربوط به آسیای جنوب شرق. چینی. ژاپنی. کره‌ای یا چیزی شبیه این.

شما حتی یک لحظه هم احتمال نمی‌دهید که من، بدون اینکه معنایی مد نظر داشته باشم، قلم در دست گرفته‌ام و اینها را نقاشی کرده‌ام (واقعاً همین است). چون قبلاً چیزی مشابه این را دیده‌اید و معنایی را به آن نسبت داده‌اید، این خط خطی‌های من را هم دارای نظم می‌بینید.

نظم، یک مفهوم کاملاً ذهنی است. اگر ما زمین را دارای نظم بزرگ می‌بینیم، ستارگان بی‌سکنه‌ای را که بی‌هیچ مخاطبی در دورترین نقاط هستی می‌سوزند چه باید بدانیم؟ آیا در مورد آنها دچار همین خطای خط چینی نشده‌ایم؟

آیا همین خطا نیست که وقتی می‌خواهیم در سیارات دیگر دنبال نشانه‌های حیات بگردیم، دنبال آب می‌گردیم؟ یعنی الگویی را که خود می‌شناسیم به آنها تحمیل می‌کنیم.

حرف من این نیست که غیر از محدود جاهایی مانند زمین و منظومه‌ی شمسی، در بخش عمده‌ای از عالم نظم وجود ندارد. حرف من این است که اصلاً در هیچ جای عالم، نظم به عنوان یک واقعیت عینی وجود ندارد. این شامل سیاره‌ی ما هم می‌شود.

نظم یک فرض شخصی است. کاملاً به سوابق ذهنی ما بازمی‌گردد. نظم بیشتر به مقوله‌ی زیبایی نزدیک است و زیبایی، به عادت، پهلوی می‌زند.



بیا بید به یک سوال دیگر فکر کنیم. آیا این بافت گیاهی نظم دارد؟

نخستین پاسخی که به ذهن می‌رسد، احتمالاً این است که: بله. نظم دارد.

اما به سوال دوم فکر کنید: آیا اصلاً نظم گیاهان، از جنس

نظم نظامی‌هاست که باید همه در یک ردیف ایستاده باشند و یک خط مستقیم بسازند؟ آیا ما به علت ترجیحات خودمان و از منظر خودمان این حالت را منظم نمی‌نامیم؟

آیا نمی‌توان گفت که این حالت، برای گیاهان کاملاً مصداق بی‌نظمی است؟

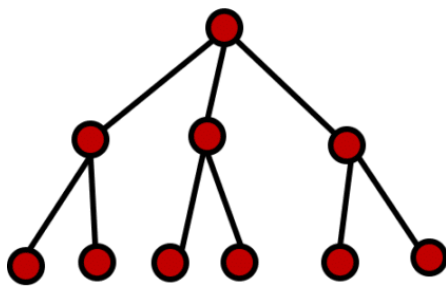
البته احتمالاً در اینجا بحث نظم طبیعی پیش خواهد آمد و مخاطب خواهد گفت که این نظم، مصنوعی است و نظم طبیعی چیز دیگری است. ما هم اگر گفتیم منظم است منظورمان نظم مصنوعی بود.

اما نظم طبیعی چیست؟ چه اتفاقی باید بیفتد تا من به نتیجه برسم که این سیستم نظم طبیعی دارد؟ یا نظم طبیعی آن مثلاً کمتری یا بیشتر شده؟

مسئله بسیار واضح است: سیستم‌ها، نه منظم هستند و نه نامنظم؛ این تعبیری است که ما به آنها نسبت می‌دهیم.

هستی زبان خودش را دارد و هر جا کلمات و نشانه‌هایش با فهم ما جور درآمد، آن را منظم می‌دانیم و هر جا نفهمیدیم آن را نامنظم در نظر می‌گیریم. چنین می‌شود که حاضر نیستیم زلزله را به اندازه‌ی طلوع خورشید، حاصل نظم طبیعت بدانیم. برایمان منطقی‌تر است بپذیریم که رفتار نادرستی در ما، این بی‌نظمی را ایجاد کرده تا اینکه بپذیریم زلزله، بخشی از نظم طبیعت است که ما نمی‌فهمیم.

همه‌ی این مقدمات را گفتم که به این جمله برسم که می‌توان شکل‌گیری نظم در هر سیستم را در یک طیف بررسی کرد که یک انتهای آن را نظم از بالا به پایین (یا نظم دیکته‌شده یا نظم سلسله‌مراتبی^{۵۳}) تشکیل می‌دهد و انتهای دیگر طیف، همان چیزی است که می‌توان آن را نظم خودجوش (یا نظم خودانگیخته یا نظم از پایین به بالا^{۵۴}) نامید.

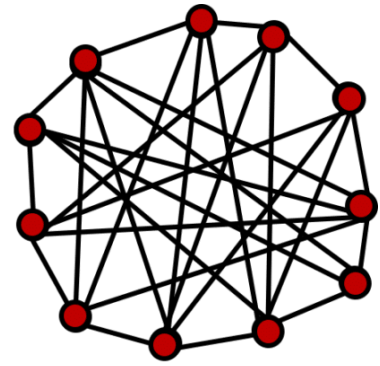


نظم دسته‌ی اول همان نوع نظمی است که ناظم دارد. یک فرد، گروه یا سیستم کنترل مرکزی در رأس آن قرار دارد و پیام‌هایی را به سطح پایینی ارسال می‌کند. هر سطح هم پیام‌ها را از لایه‌های بالاتر می‌گیرد؛ به شکل مناسب به لایه‌های پایین‌تر منتقل می‌کند و در نهایت یک هرم با سیستم کنترل و فرماندهی متمرکز شکل می‌گیرد.

⁵³ Hierarchical order

⁵⁴ Spontaneous order

شکل دومِ نظم، از پایین به بالا به وجود می‌آید. هیچ مرکزی به طور مشخص در مورد آن تصمیم نمی‌گیرد. اما رفتارها، تصمیم‌ها و برخوردهای تک تک اعضا با یکدیگر در سطح بالاتر به شکل یک الگوی منظم - از دید ما به عنوان ناظر - ظهور می‌کند. در چنین شرایطی ما نمی‌توانیم به سادگی مرکزیتی در سیستم بیابیم. اما از سوی دیگر شکل و رفتار سیستم به گونه‌ای است که ممکن است احساس کنیم نظم از بیرون سیستم به آن دیکته شده است.



رایج است که شکل این نوع سیستم‌ها را - برای اینکه در تقابل با نظم هرمی باشد - به صورت شبکه نمایش می‌دهند. اما باید به خاطر داشته باشیم که نظم خودجوش به هر شکل و الگویی می‌تواند ظهور کند.



توده‌ی مورچه‌ها و موریه‌هایی که با هم یک لانه‌ی بزرگ می‌سازند، نمونه‌ای از نظم پایین به بالا است.^{۵۵}

شکل‌هایی که ما در ابرها و در پرواز گروهی پرندگان می‌بینیم نیز، نمونه‌ی دیگری از نظم خودجوش یا نظم خودانگیخته محسوب می‌شود.

در مورد نظم خودجوش می‌توان حرف‌های بسیاری مطرح کرد و به زبان ریاضی هم به خوبی قابل تحلیل و بررسی است.

اما اگر بخواهم آن را برای خواننده در قالب یک تصویر، ترسیم کنم ترجیح می‌دهم از تصویر درخت زندگی^{۵۶} استفاده کنم.

نخستین بار که عکس این درخت را دیدم، احساس کردم بحث

^{۵۵} برخی فکر می‌کنند ملکه مورچه‌ها و موریه‌ها در سازمان‌دهی و ساختاربخشیدن به کل مجموعه نقش دارد. اما سالهاست می‌دانیم که وظیفه‌ی ملکه صرفاً زاد و ولد است و عملاً احاطه یا اطلاعی از وضعیت کلی مجموعه و ساختار آن ندارد. اگر ملکه‌ی یک توده مورچه را بردارید یا بکشید، در بلندمدت به خاطر نبودن زاد و ولد، جمعیت آن گروه کم می‌شود؛ اما رفتار کلی مجموعه همچنان هوشمندانه باقی می‌ماند و نظم خودجوشی موجود در آن حفظ می‌شود.

^{۵۶} این درخت در ساحلی به نام Kalaloch در واشنگتن قرار دارد.

نظم خودجوش به شکلی زیبا در آن به تصویر کشیده شده است.



این درخت در طول زمان، به شکلی شگفت‌انگیز بین دو توده‌ی خاک معلق مانده و به نوعی در آن‌ها چنگ انداخته است. آب را از طریق آنها دریافت می‌کند و مدت‌هاست به زندگی خود ادامه می‌دهد.

اینکه این درخت چگونه در این وضعیت قرار گرفته و چند دهه قبل، چه شده که بخشی از خاک زیر آن شسته شده و رفته است، قصه‌ای است که به کار ما نمی‌آید.

اما آنچه برای ما مهم است این نکته است که تک تک سلول‌های درخت نمی‌دانسته‌اند که چه می‌کنند. آنها بر اساس قوانینی ساده‌ی خود که تلاش برای جذب آب، مواد غذایی و املاح است، رشد می‌کنند و تارهای کشنده‌ی خود را در امتدادی که مناسب‌تر می‌بینند به پیش می‌برند. سلول قاعدتاً تصویری ذهنی از کل درخت ندارد و حتی نمی‌داند که املاح و مواد غذایی را با چه هدفی و برای چه کاری جستجو و جذب می‌کند.

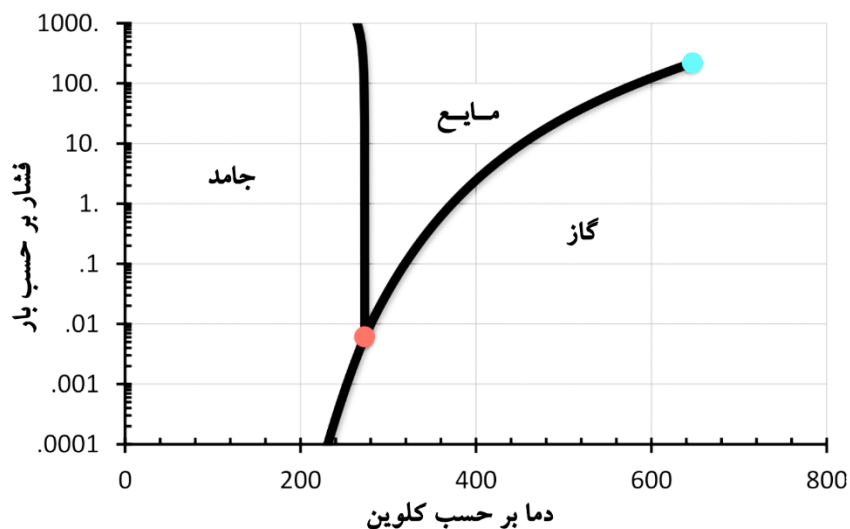
اما آنچه ما از بیرون در مواجهه با کل سیستم می‌بینیم، یک نظم شگفت‌انگیز است. حتی اگر طی یکصد سال، مثلاً دویست یا سیصد فریم عکس از این درخت بیندازیم و آنها را در قالب یک فیلم چند ثانیه‌ای ببینیم، به وضوح می‌توانیم حس کنیم که درخت هراسان از اینکه زیرپایش خالی شده، به این سو و آن سو چنگ می‌اندازد و می‌کوشد جان خود را حفظ کند. همان چیزی که باعث شده مردم محلی آن را درخت زندگی بنامند. حال آنکه می‌دانیم چیزی به نام درخت وجود ندارد و این نامی است که ما بر مجموعه‌ای از سلول‌ها که در کنار هم هستند و هریک صرفاً به تعامل با همسایگان خود مشغولند می‌گذاریم.

البته برای درک نظم خودجوش، ترمودینامیک می‌تواند نقطه‌ی شروع بهتری - در مقایسه با درخت و جنگل - باشد. شاید برای شما جالب باشد که یکی از اولین چیزهایی که بولتزمن را نیز به سمت پیچیدگی و سیستم‌های پیچیده هدایت کرد، نظم خودجوشی است که هنگام تغییر فاز در گازها و سیالات مشاهده می‌شود.

احتمالاً از درس‌های دبیرستان و دانشگاه، نمودار فاز^{۵۷} آب را به خاطر دارید. در نمودار فاز، ما دو محور عمودی و افقی داریم

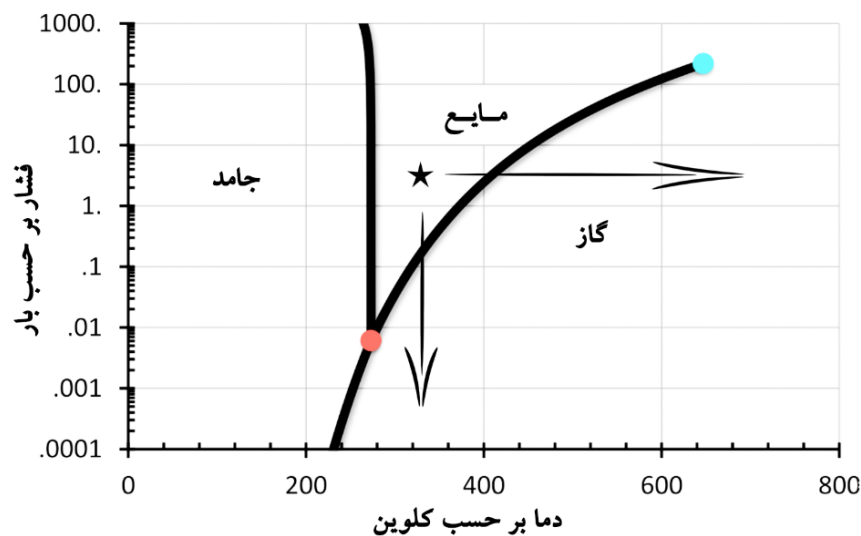
⁵⁷ Phase diagram

که یکی به فشار و دیگری به دما اختصاص یافته است. به ازاء هر دما و هر فشار می‌توانید در این نمودار ببینید که آب در چه فازی قرار دارد: مایع است؟ جامد (یخ) است؟ یا به گاز (بخار) تبدیل شده است؟



همچنین اگر تغییراتی در پارامترهای فشار و دما به وجود بیاید، با استفاده از این نمودار می‌توانید تشخیص دهید که آیا تغییری در فاز آب به وجود خواهد آمد یا خیر.

به عنوان مثال، آب در نقطه‌ای که با ستاره مشخص شده، در فاز مایع قرار دارد. اگر دمای آب را کمی افزایش دهید (حرکت به سمت راست) تغییری در فاز آب ایجاد نخواهد شد. اما در مرزی که با خط ضخیم سیاه رنگ مشخص شده، ناگهان فاز آن به گاز تغییر می‌کند.



به شکل مشابه، با کاهش فشار هم ابتدا تغییر فاز روی نخواهد داد و پس از مدتی (زمانی که فشار حدوداً به یک دهم بار

می‌برسد) آب تبخیر خواهد شد.

آب - بسته به اینکه در چه فشاری باشد - در دمای مشخصی یخ می‌بندد و در دمای دیگری تبخیر می‌شود. انواع گازها هم - بسته به فشار خود - در دمای مشخصی به مایع تبدیل می‌شوند. تغییر فاز در یک نقطه‌ی مشخص روی می‌دهد. اگر مایعی فقط چند دهم درجه بالاتر از نقطه‌ی انجماد باشد، در همه‌ی نقاط دارای فاز مایع خواهد بود و در یک نقطه‌ی کاملاً مشخص، انگار دستوری صادر شده که بر اساس آن باید منجمد شود.

هیچ سیستم مرکزی در مجموعه‌ی مولکول‌های آب برای این یخ‌بندان یا ذوب شدن و به تعبیر دقیق‌تر تغییر فاز وجود ندارد. آنچه اتفاق می‌افتد یک نظم خودجوش است که تک تک مولکول‌ها در آن نقش دارند. هریک به تغییری که در محیط روی داده پاسخ می‌دهند و آنچه در نهایت می‌بینیم، تغییر فاز ماده است.

اگر قصد دارید پیچیدگی و رابط‌های وضعیت‌های خُرد و کلان^{۵۸} را به خوبی درک کنید، آب و تغییر فاز آن نقطه‌ی ارزشمندی است که نباید به سادگی از آن عبور کنید. حتی بد نیست کمی با نمودار فاز آب، سرگرم شوید و مختصات نقطه‌های مختلف آن را بررسی کنید.

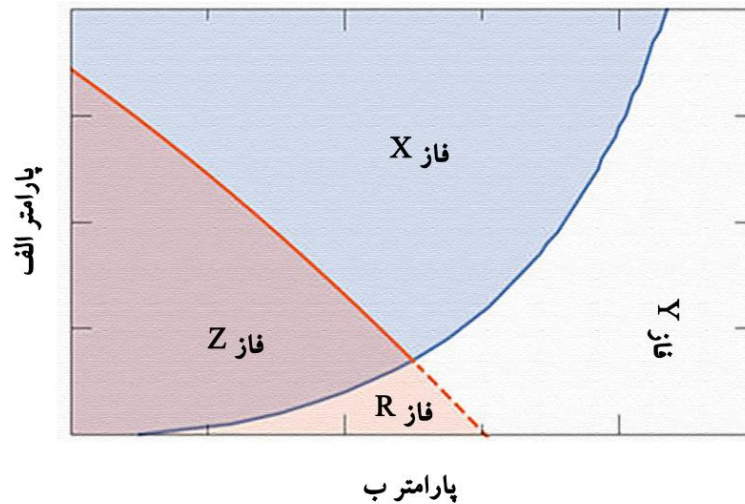
ویژگی دیگرام فاز این است که هم محورهای آن و هم سه فاز مایع و جامد و گاز در وضعیت کلان تعریف می‌شوند و در سطح خرد معنا ندارند. هیچ مولکولی نمی‌تواند برای خود دما یا فشاری را تعریف یا تعیین یا اعلام کند. برای اینکه بتوانم اهمیت این موضوع را بهتر مشخص کنم، بیا بید به این مثال فکر کنیم:

فرض کنیم شما به جای اینکه آب‌شناس باشید، تلگرام‌شناس یا اینستاگرام‌شناس هستید. کل دانش آقا یا خانم آب‌شناس در حدود دو قرن پیش این بود که می‌دانست مجموعه چند میلیون یا چند میلیارد مولکول H_2O بسته به دو پارامتر (فشار و دما) می‌تواند سه فاز مختلف داشته باشد (یخ / آب / بخار).

در دنیای امروز ما هریک از کاربران اینستاگرام (یا تلگرام) مانند یک مولکول هستند. هریک از این مولکول‌ها با تعدادی مولکول دیگر در ارتباط هستند. ما هرگز درکی از کل سیستم نداریم. حتی نقاط دورتر سیستم را هم از طریق دوستان یا دوستانِ خود یا دوستانِ دوستانِ خود درک می‌کنیم. درست همان‌طور که یک مولکول آب، کل آب را از طریق مولکول‌های اطراف یا مولکول‌های اطرافِ مولکول‌های اطرافِ خود درک می‌کند. البته این درک می‌تواند کاملاً چند لایه و عمیق باشد. اما در ذات ماجرا که ما جهان را به واسطه‌ی اطرافیان خود تجربه می‌کنیم، خللی ایجاد نمی‌کند.

^{۵۸} منظور همان Micro-state و Macro-state است.

فرض کنید بتوانیم دو پارامتر الف و ب پیدا کنیم که برای کل شبکه قابل تعریف است و برای هریک از ما به تنهایی، نه معنا دارد و نه مصداق (درست مثل دما و فشار). همچنین بتوانیم رفتار کل شبکه را به چهار رفتار کاملاً متفاوت (مثلاً X و Y و Z و R) تقسیم و طبقه‌بندی کنیم.^{۵۹}



دیاگرام فاز اینستاگرام یا تلگرام

همان قدر که جیمز وات توانست با شناخت فازهای مختلف آب و طراحی موتور بخار، موتور محرک جهان جدید باشد، شناخت این ماده‌ی جدید هم می‌تواند ما را به سطح بالاتری از درک جهان اطراف و تسلط بر آن برساند.^{۶۰}

اما باید به خاطر داشته باشیم که نظم خودجوش همیشه کاملاً توزیع شده نیست.

گاه نظم خودجوش می‌تواند در بخش‌هایی از سیستم خوشه‌ها و ساختارهایی به وجود بیاورد که بعدها ما آن را با مرکز

^{۵۹} در فصل‌های آینده‌ی کتاب، وقتی به مباحث ریاضی Phase-space برسیم، خواهیم دید که تعریف فاز برای شبکه‌های اجتماعی کاملاً مشابه هر سیستم پیچیده‌ی دیگری امکان‌پذیر است؛ اگر چه نموداری که در اینجا ترسیم کردم فرضی است و در دیاگرام فاز واقعی شبکه‌های اجتماعی، می‌توان پارامترها و فازهای بیشتری تعریف کرد. دیاگرام فاز برای مغز، سلول‌های سرطانی، سیستم ایمنی بدن، شبکه‌های اجتماعی، حیات در موجودات، تکثیر ویروس‌ها و بیماری‌ها و نیز ساختار اجتماعی قابل تعریف و محاسبه است. این محاسبه‌ها به هیچ وجه ذهنی نیستند و دقیقاً در حد محاسبات فیزیک و ترمودینامیک، بر پایه‌ی مفاهیم عینی ریاضی استوارند. حتی خواهیم دید زمانی که عکسی پیش روی ما قرار می‌گیرد و سپس آن عکس را برمی‌داریم و تصویر دیگری را نگاه می‌کنیم، تغییر ایجاد شده در مغز را می‌توان در قالب تغییر فاز محاسبه و تحلیل کرد.

^{۶۰} اگر چه برای ما انسان‌ها شاید کمی سخت باشد، اما باید بپذیریم که نقش ما در این شبکه‌ها اگر چه پیچیده‌تر از نقش مولکول در آب به نظر می‌رسد، اما عمیق‌تر نیست. مرگ هیچ‌یک از ما یا بستن اکانت هیچ‌یک از ما، فاز کلی هیچ‌یک از شبکه‌های اجتماعی را تغییر نمی‌دهد. درست همان‌گونه که حذف یک یا چند مولکول از آب، باعث تغییر فاز آن نخواهد شد. همچنین حتی فیلتر شدن یک شبکه اجتماعی در یک کشور هم، تا حد زیادی شبیه جدا کردن یک سطل آب از استخر آب و دور ریختن آن است. حجم آب استخر کاهش می‌یابد، اما نه یخ می‌بندد و نه به بخار تبدیل می‌شود.

فرماندهی اشتباه بگیریم.

مثلاً باید به خاطر داشته باشیم که این ملت‌ها بودند که در قالب یک نظم خودجوش دولت‌ها را خلق کردند. اگر چه امروز دولت بخشی از استقرار نظم در ساختارهای اجتماعی و سیاسی را در اختیار دارد، اما دولت قبل از مردم به وجود نیامده است.^{۶۱} به شکل مشابهی می‌توانیم همین مثال را در مورد نهادهای بین‌المللی مثل سازمان ملل متحد مطرح کنیم. شاید اگر امروز تصویری از جهان ترسیم کنیم، بخشی از قدرت نظم‌دهنده‌ی جهان در اختیار نهادی مثل سازمان ملل باشد. اما نباید فراموش کنیم که این سازمان ملل نبوده که ملل را به وجود آورده است، بلکه ملت‌ها بوده‌اند که سازمان ملل را ساخته‌اند. بنابراین حتی برخی از ساختارهای بسیار منسجم هم نمونه‌ای از نظم خودانگیخته محسوب می‌شوند.

اگر می‌خواهید سمت دیگر طیف را در نظر بگیرید، به یک کسب و کار فکر کنید که فردای روز تأسیس با آگاهی و اطلاع‌رسانی عمومی، نیروی انسانی خود را جذب می‌کند. در اینجا ابتدا نظم کلی تعریف شده و ساختار هم ترسیم شده است؛ سپس افراد و اجزای جدید را جستجو می‌کنند تا به هر کدام، جا و جایگاهی را اختصاص دهند.

بنابراین، اجازه بدهید طیفی را که در ابتدای این بحث به آن اشاره کردم به صورت زیر ترسیم کنم:



البته بحث نظم خودجوش می‌تواند به تنهایی موضوعی برای یک یا چند کتاب باشد و آنچه در اینجا به صورت مختصر اشاره کردم، صرفاً مثال و توضیحی در ذیل موضوع ظهور ویژگی‌ها یا Emergence بود و در آینده باید آن را به شکلی دقیق‌تر مورد بحث قرار دهیم.^{۶۲}

^{۶۱} من اینجا واژه‌ی ملت را تقریباً معادل مردم به کار برده‌ام و به نظرم در ادبیات عمومی اشکالی هم ندارد. اما قاعدتاً کسانی که اهل دقت باشند این ایراد را از من خواهند گرفت که اتفاقاً ملت‌ها بعد از دولت‌ها به وجود آمده‌اند. دولت به مفهوم مدرن آن، نمی‌تواند براقوام حاکمیت داشته باشد و نظم را حفظ کند. باید مفهومی شکل بگیرد که فراتر از قوم، قبیله، شهروند و مفاهیم مشابه آنها باشد. دولت‌ها به مردم خود ملت می‌گویند تا آنها را از مردمی که تحت نظارت دولت‌های دیگر هستند جدا کنند و بهتر و ساده‌تر با آنها تعامل داشته باشند.

^{۶۲} اگر فرصتی که در اختیار من قرار دارد ادامه پیدا کرد، باید جایی در ادامه‌ی کتاب به فردریش هایک (Friedrich Hayek) اشاره کنم. این اقتصاددان ارزشمند برنده‌ی جایزه‌ی نوبل، از جمله کسانی است که به نقش نظم خودجوش توجه زیادی داشته و مطالعات و نظریه‌هایش سهم بسیار مهمی در توسعه‌ی اقتصاد بازار

دو فضای فکری متفاوت برای مواجهه پیچیدگی

می‌توان گفت یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سیستم‌های پیچیده، ابهام علی^{۶۳} است. به این معنا که نمی‌توان به سادگی، یک رویداد را به یک علت مشخص مربوط دانست و آنها را در فضایی مجرد و جدا از بقیه‌ی سیستم مورد بررسی قرار داد. نگاهی به میتولوژی یونانی^{۶۴}، می‌تواند به خوبی مشخص کند که انسان کهن در مواجهه با پدیده‌ی پیچیدگی و سیستم‌های پیچیده چگونه عمل می‌کرده است.

او برای کاهش ابهام و خلق علت برای پدیده‌ها، به سراغ خدایان المپ رفته است. مسئولیت رویدادهای آسمانی را به زئوس سپرده و چالش‌های خانواده را هم به هرا واگذار کرده است. مسافران دریایی را به پوزیدون سپرده تا آنها را به سلامت از دریاها عبور دهد و یا در طوفان خشم خود غرق کند. زمین‌های کشاورزی را هم به دیمتر^{۶۵}، مادر زمین سپرده است و جنگ‌ها را به

داشته‌اند. البته قبل از او هم نویسندگان و متفکران بسیاری مانند فرگوسن و آدام اسمیت بودند که به این بحث پرداختند. اصلاً تمام آنچه آدام اسمیت در کتاب ثروت ملل به عنوان دست نامرئی بازار مطرح می‌کند، همین نظم خودجوش از پایین به بالاست که ما در اینجا اشاره کردیم. به هر حال، با وجودی که فردریش هایک نخستین کسی نبود که به این نکته توجه کرد، اما بیان ساختاریافته‌ی آن و خصوصاً توجه به مفهوم پیچیدگی باعث می‌شود که به او احترام خاصی بگذاریم. اگر چه در کتاب‌های پیچیدگی کمتر به این اقتصاددان ارزشمند اشاره می‌شود و جایگاهش در خور نقش ارزشمندی که داشته نیست.

⁶³ Causal Opacity

⁶⁴ معمولاً خواننده‌ی ایرانی از اینکه بسیاری از روایت‌های تاریخ اندیشه با یونان آغاز می‌شود، احساس خوبی ندارد. طبیعی است کسی که شوق وطن‌پرستی‌اش بر شوق علمی‌اش غالب باشد، ترجیح می‌دهد که تاریخ در هرزمینه‌ای، از جمله تاریخ علم، مذهب، فلسفه، ریاضیات و نجوم، با کشور خودش آغاز شود. خصوصاً اینکه ما شواهد زیادی داریم که از قدیم‌الایام وجود داشته‌ایم و احتمالاً وجود داشتن را نه تنها شرط لازم، بلکه شرط کافی برای سهم داشتن در حوزه‌های مختلف علوم نیز می‌بینیم (تقریباً شبیه اینکه امروز بگوییم، هرکس خانه‌ی بزرگی دارد، حتماً علم و فلسفه را هم به همان نسبت بهتر می‌فهمد). شک نیست که تمدن کهن ایرانی، دستاوردهای زیادی داشته است. اما لاقلاً بر اساس شواهد موجود، بیشتر آنچه وجود داشته به مدیریت لشکریان، کشورگشایی، خراج‌خواهی، توزیع منابع محدود خصوصاً آب و نیز سنت‌های عمومی و تعاملات اجتماعی باز می‌گردد. از سوی دیگر، در گفتگوها و درد و دل‌های عامیانه، رایج است که حمله‌های مختلف به ایران از جمله حمله‌ی مغول‌ها را بهانه می‌کنند تا بگویند که قبل از آن، همه چیز از فرهنگ، هنر، علم، دانش و فلسفه وجود داشته و ناگهان، آمدند و کشتند و سوختند و بردند و رفتند و ما ماندیم و این تاریخ ساکت و خالی سلسله‌های کهن. گذشته‌ای که ظاهراً جنبه‌ی کشورگشایی و سنت اجتماعی و عمران و کارهای سیویل و مهندسی‌اش، بسی ماناترو شاخص‌تر از جنبه‌های دیگرش بوده است.

شواهد تاریخی در این زمینه کم نیست. مطالعات کسانی مانند بوعلی در کتاب شفا، مشخصاً نشان می‌دهد که او هم در آن زمان، در حوزه‌های متعدد (از جمله منطق) منبعی ارزشمند تراز اندیشه‌ی یونانی به عنوان زیربنای مدل فکری خود نیافته و این مسئله را نیز صریحاً مورد تأکید قرار داده است. اگر چه بعداً می‌بینیم که در کتابی مانند اشارات و تنبیهات، آراء شخصی خود را نیز مطرح می‌کند.

به هر حال، به نظر می‌رسد در تاریخ مکتوب بشر، قدیمی‌ترین قومی که می‌بینیم به صورت نقادانه به بررسی خود، فرهنگ خود، تحلیل ذهنیت و مدل ذهنی خود پرداخته‌اند، یونانیان بوده‌اند. این صرفاً به سقراط، افلاطون و ارسطو مربوط نمی‌شود و این نوع نگرش نقادانه را با وجود همه‌ی ابهام‌های تاریخی، در کارهای پروتاگوراس و دیگران هم می‌توان مشاهده کرد. قبل از آنان، اگر چه کتاب و نوشتن در فرهنگ‌های مختلف رواج داشته است، اما کاربرد عمده‌ی آن، نامه نگاری، نصیحت‌های اخلاقی و بعضاً آموزش‌های مذهبی بوده است. به تعبیری، نوشته‌ها عمدتاً از جنس اطلاع‌رسانی و دستوری بوده‌اند؛ نه تحلیلی و انتقادی.

⁶⁵ دیمتر (Demeter) یا The Mother، الهه‌ی مادر است. تشابه آوایی بین مادر در زبان ما و دیمتر را به سادگی می‌توان حس کرد.

آرس.

بر این اساس، هم علت طوفان مشخص است و هم زلزله؛ هم باران و هم خشکسالی. اگرچه براساس آنچه تاریخ روایت می‌کند، کوه‌های المپ نیز چندان آرام و بی‌تنش نبوده‌اند و یونانیان برای اینکه پیچیدگی‌های روی زمین را ساده کنند، دستگاه پیچیده‌ی دیگری در المپ بنا کرده‌اند.

جنگ، حسادت، رقابت و بی‌اخلاقی، تنها بخشی از ویژگی‌های رب‌النوع‌های یونانی بوده و بسیاری از آنچه آنها در زمین می‌دیده‌اند، صرفاً انعکاسی از اختلاف نظرها و تعارض‌های آسمانی بوده است.

شبهه همین شیوه‌ی مواجهه با جهان را در تفکر رومیان هم می‌توان دید. اگرچه این حرف من مطلق نیست، اما المان‌های مشابه زیادی را می‌توان در میتولوژی دو قوم مشاهده کرد.

ژئوس در روم، نقش خود را به ژوپیترواگذار کرده و پوزیدون، عملاً جای خود را به نپتون داده است. آرتمیس و دایانا هم شباهت‌های زیادی دارند. اگرچه می‌توان بخشی از این شباهت‌های میتولوژیک را به تعاملات فرهنگی نسبت داد، اما این مسئله را هم نباید از نظر دور بداریم که به هر حال، همه‌ی اقوام، کمابیش با یک سیستم پیچیده دست و پنجه نرم می‌کرده‌اند و با توجه به اینکه مکانیزم یکسانی را برای تحلیل آن سیستم انتخاب کرده‌اند، چندان دور از ذهن نیست که معادلاتشان، به پاسخ‌های نسبتاً مشابهی هم منتهی شده باشد.

شیوه‌ی یونانی در نگرش به سیستم‌های پیچیده، که اوج آن را می‌توان در مُثُل افلاطونی دید، برای ساده کردن یک سیستم پیچیده، پیچیدگی‌ها را به سیستم دیگری منتقل می‌کرده است.

اگرچه افلاطون با استعاره‌ی غارنشینان و سایه، توانست رقص سایه‌های روی دیوار را توضیح دهد و احتمالاً از این کار احساس غرور هم کرده است، اما حالا او ما را با موجودات دیگری بیرون غار مواجه می‌کرد که نه تنها، دور از دسترس‌تر، بلکه پیچیده‌تر هم بودند. چنان پیچیده که حتی سایه‌شان (که به قاعده ساده‌تر است) چنین جهان پیچیده‌ای را برای ما ایجاد کرده است.

البته احتمالاً می‌توانید موضع مسیحیان در مقابل افلاطون را حدس بزنید. برای بسیاری از فلاسفه و منطق‌یون نسل اول مسیحیت، او در حد یک مسیحی که چند قرن قبل از مسیح می‌زیسته، مورد اشاره و احترام است.⁶⁶

⁶⁶ Dover, K. J., & Burstall, C. (1981). The Greeks (p. 102). Austin: University of Texas Press.

روبروی این نگرش فراکنانه^{۶۷} یونانی، نگرش فروکاهنده^{۶۸} یونانیستی است.

نخستین روایت‌های ثبت شده‌ی نگرش اتمیستی را هم، باید در یونان باستان و به طور خاص نوشته‌های دموکریتوس جستجو کرد. به عبارتی، اتمیسم هم در یونان باستان قدمتی به اندازه‌ی میتولوژی دارد. البته را هم که باید گفت که با وجود شباهت ظاهری دیدگاه اتمیستی یونان باستان با مدل اتمی قرن نوزدهم، نباید تفاوت‌های کلیدی آنها را فراموش کنیم. بحثی که در آینده در جای خود مورد توجه قرار خواهیم داد.

برای کسانی که فرصت مطالعه‌ی مستقیم آثار کلاسیک یونان را ندارند، مطالعه‌ی کارهای جانانان بارنز^{۶۹} می‌تواند بسیار مفید باشد. توضیحات بارنز در مورد دموکریتوس و افکار او شگفت‌انگیز است^{۷۰}. دموکریتوس در قرن پنجم قبل از میلاد، کتاب‌های متعددی تألیف کرده که از جمله‌ی آنها می‌توان به درباره‌ی طبیعت انسان، درباره‌ی جسم (در دو جلد)، درباره‌ی حس‌های ما، درباره‌ی طعم‌ها، درباره‌ی بوها، درباره‌ی گیاهان و درباره‌ی حیوانات اشاره کرد.

متأسفانه بخش قابل توجهی از کارهای دموکریتوس به دست ما نرسیده است و غیر از بخش کوچکی از کتاب‌هایش که باقی مانده است، سایر نوشته‌هایش را در نقل‌ها و ارجاعات کتابهای کهن دیگر خوانده‌ایم.

دموکریتوس معتقد بود که جهان از اتم و تهی‌ذرات^{۷۱} ساخته شده است: اتم‌هایی که در آشوب^{۷۲} به سر می‌برند. آن‌ها گاهی به هم برخورد می‌کنند و مجموعه‌هایی بزرگتر را می‌سازند. او زمین و همه‌ی زمینیان را حاصل این برخوردها و اتصالات اتم‌ها می‌دانست.

دموکریتوس همچنین به وجود جهان‌های متعدد باور داشت. او می‌گفت جهان‌های زیادی وجود دارند که برخی در حال

^{۶۷} معمولاً ما فراکنی را معادل Projection در نظر می‌گیریم. اما لطفاً آن را در اینجا به عنوان متضاد فروکاهیدن در نظر بگیرید. فکر می‌کنم توجیهات متعددی وجود دارد که در انگلیسی هم Inductionism به عنوان متضاد Reductionism مورد استفاده قرار بگیرد. اما متأسفانه الان بیشتر از Antireductionism و Holism استفاده می‌شود که می‌تواند اختلال معنایی جدی به وجود بیاورد. به هر حال، در فضای این متن، فکر می‌کنم فراکنی برای تبیین نگرش میتولوژیک، توصیف خوبی باشد.

^{۶۸} Reductionist

^{۶۹} Johnathan Barnes

^{۷۰} Barnes, J. (1987). Early Greek philosophy (pp. 203–253). Harmondsworth, Middlesex, England: Penguin Books.

^{۷۱} تهی‌ذرات را من ساخته‌ام تا به جای واژه‌ی Void از خلاء استفاده نکنم. چون خلاء آنچنان که دموکریتوس می‌گفت با آنچه ما می‌گوییم و می‌فهمیم فرق دارد. از نظر دموکریتوس و بسیاری از دانشمندان کلاسیک، فضای تهی و خلاء نمی‌توانست وجود داشته باشد. در نگاه آنها، «هیچ» نمی‌تواند وجود داشته باشد. همان باوری که باعث شد تا قرن‌ها بعد که خوارزمی، استفاده از عدد صفر را رواج داد، یونانیان حتی عدد صفر هم نداشته باشند. بنابراین تهی‌ذره یا Void، یک ذره است که فضای خالی بین اتم‌ها را ایجاد می‌کند.

^{۷۲} خائوس یا Chaos

رشد هستند و برخی در حال زوال. برخی ماه و خورشید ندارند.

اما برخی دیگر، تعداد زیادی ماه و خورشید دارند. او می‌گفت در دنیای اتمی هر چیزی آغاز و پایانی دارد و دنیای ما هم ممکن است در برخورد با دنیای اتمی دیگری، نابود شود و به پایان برسد.

حتی قبل از اینکه بارز برای ما توضیح بدهد، می‌توانیم موضع افلاطون را در مقابل دموکریتوس حدس بزنیم. افلاطون می‌گفت که ای کاش کلیه‌ی کتابهای دموکریتوس سوزانده شود. او می‌گفت: چگونه دموکریتوس می‌تواند خودش را قانع کند که این همه نظم، ساختار و زیبایی، صرفاً در اثر ترکیب ذرات اتم درست شده باشد^{۷۳}.

اگرچه واژه‌ی اتم و نگرش اتمی، قدمتی بیش از ۲۵ قرن دارد، اما منصفانه نیست که به این بهانه، نقش بزرگ لودویگ بولتزمن را در تعریف و تثبیت نگرش اتمیستی در فیزیک نادیده بگیریم یا کم‌اهمیت فرض کنیم.

بولتزمن در سالهای ۱۸۶۰ در شرایطی از اتم حرف می‌زد که هنوز نگرش اتمیستی و وجود اتم، در جامعه‌ی آکادمیک مورد حمله و نقد جدی بود.

در چنین شرایطی، نگرش اتمیستی در نگاه بولتزمن چنان واضح، شفاف و پذیرفته شده بود که کوشید گام‌های بعدی را بر مبنای این پیش فرض بردارد و دانش آمار و احتمال را برای درک بهتر فیزیک مواد به کار بگیرد.

تصور این نکته چندان دشوار نیست که در چنان فضایی، چنین جملاتی تا چه حد انقلابی محسوب می‌شوند:

یک سانتی‌متر مکعب گاز، در فشار یک اتمسفر در دمای متعارف، از حدود 10^{20} ذره تشکیل شده که با سرعتی قابل مقایسه با سرعت صوت حرکت می‌کنند و در هر ثانیه حدوداً 10^{34} برخورد بین آنها روی می‌دهد.

چالش‌های بولتزمن در زمان مطرح کردن این بحث‌ها بسیار زیاد و متنوع بود. او نه تنها باید از نگرش اتمیستیک دفاع می‌کرد، بلکه باید شیوه‌ی به کارگیری روش‌های آماری در تحلیل سیستم‌های پیچیده را هم به دیگران تفهیم می‌کرد.

نکته‌ی دیگری هم وجود دارد که بعداً باید به آن بپردازیم. اما فعلاً بد نیست در حد چند جمله به آن اشاره کنم که نگرش بولتزمن، به نوعی منتهی به پذیرش این دیدگاه می‌شد که زمان یک‌سویه است و صرفاً به جلو می‌رود و به عقب

^{۷۳} هندی‌ها هم تقریباً از همان قرن چهارم یا پنجم قبل از میلاد، نگاه اتمیستی را در بخشی از جامعه و جهان‌بینی خود داشته‌اند. آنها به جای اتم، از اصطلاح کالاپاس (Kalapas) استفاده می‌کرده‌اند و معتقد بوده‌اند که هشت نوع کالاپاس متفاوت وجود دارد که جهان از آنها ساخته شده است. فقط طعم اندیشه‌ی هندی هم به نوعی در این جهان‌بینی آنها وجود داشته است. اولاً معتقد بوده‌اند که این ذرات ریز (کالاپاس) به سرعت به وجود می‌آیند و به عدم می‌روند. ثانیاً بر این باور بودند که این ذرات را با تمرکز و مدیتیشن می‌توان درک و مشاهده کرد.

بازنمی‌گردد^{۷۴}.

در آن زمان، فرض بر این بود که یک طرفه بودن مسیر حرکت زمان، حتی اگر هم قابل بحث و دفاع باشد، بحثی فلسفی است و با اصول اولیه‌ی فیزیک قابل استخراج و استنتاج نیست.

کافی است مروری به کتاب پاول نائین^{۷۵} داشته باشید تا ببینید در همان سالها، ایده‌ی استفاده از ماشین زمان برای سفر به گذشته چقدر پرطرفدار بوده و تا چه حد در ادبیات عمومی مورد استقبال قرار می‌گرفته است.

به عبارتی، پذیرش این حرف که علم هنوز نتوانسته به ابزاری برای سفر به گذشته دست پیدا کند، بسیار ساده‌تر و منطقی‌تر از آن بوده که کسی یک دستگاه جهان‌بینی طراحی و پیشنهاد کند که در آن، مسیر سفر به گذشته به شکلی قطعی و منطقی، مسدود باشد^{۷۶}.

اجازه بدهید این بخش را با چند جمله از کتاب **چرا اطلاعات رشد می‌کند**^{۷۷} به پایان ببرم. سیزار هیدالگو در روایت زندگی بولتزمن، پس از اینکه به مشکلات او با همکارانش اشاره می‌کند و برخی از فشارهای اجتماعی وارد بر او را شرح می‌دهد، به یک چالش تئوریک هم اشاره می‌کند.

چالشی که شاید برای آنها که اهل علم نباشند به سادگی درک نشود. اما می‌توان یقین داشت که می‌توانسته بولتزمن را آزار بدهد:

^{۷۴} اصطلاح Arrow of time یا پیکان زمان، آن زمان در توصیف این پدیده مطرح شد و رواج یافت.

^{۷۵} Nahin, P. J. (1993). Time machines: time travel in physics, metaphysics, and science fiction (pp. 54-66). New York, NY: American Institute of Physics.

^{۷۶} حتماً به این نکته توجه دارید که سفر به گذشته و سفر به آینده، دو بحث کاملاً متفاوت هستند و ارتباط چندانی با یکدیگر ندارند.

^{۷۷} Hidalgo, C. A. (2016). Why information grows: the evolution of order, from atoms to economies. London: Penguin Books.

مشکلات بولتزمن به مسائل اجتماعی محدود نمی‌شد. او طی چند دهه کوشیده بود که ریشه‌های نظم فیزیکی را توضیح دهد. تلاش‌های او اگر چه دستاوردهای علمی ارزشمندی داشت، اما به نتیجه‌ای که انتظار داشت منجر نشد.

نظریه‌ی لودویگ بولتزمن، دقیقاً عکس آن چیزی را که قرار بود اثبات کند، ثابت کرد. تجربه‌ی روزمره‌ی بولتزمن به او نشان می‌داد که نظم در اطراف او در حال افزایش است: گل‌ها شکوفه می‌دادند؛ درختان سبز می‌شدند و جوانه می‌زدند؛ و جامعه‌ای که به سرعت صنعتی می‌شد، انواع ابزارها و وسیله‌ها را در مقیاس انبوه تولید می‌کرد. اما نظریه‌ی بولتزمن پیش‌بینی می‌کرد که نظم نباید افزایش پیدا کند؛ بلکه باید ناپدید شود. نظریه‌ی او به خوبی توضیح می‌داد که چرا گرما از جسم گرم به جسم سرد می‌رود؛ علت ناپدید شدن چرا قطره‌های شیر در قهوه چیست و چرا نجوای ما در باد محو می‌شوند.

لودویگ نشان داد که خرده‌ساختارهای طبیعت، به تدریج نظم را از بین می‌برند و مستهلک می‌کنند. اما می‌فهمید که این بخشی از داستان است و او چیزهای دیگری را نمی‌بیند و نمی‌فهمد... افزایش نظم، بولتزمن را آزار می‌داد. آزاری که تا دانشمند نباشید آن را نمی‌فهمید. او می‌دانست که نظریه‌اش چیزی کم دارد؛ اما نمی‌فهمید آن چیزی که کم است، چیست... لودویگ دیگر در جایی، از جنگیدن با مردم و با طبیعت خسته شد و تصمیم گرفت با استفاده از یک طناب، کنترل اوضاع را به دست خود بگیرد.

آنچه پس از مرگ او باقی ماند، توده‌ای از اتم‌ها بود که به شیوه‌ای آرام و مطمئن، درست همان‌گونه که تئوری‌های خود بولتزمن پیش‌بینی می‌کرد، از بدن پوسیده‌ی او جدا و پراکنده شدند.

پارادایم‌ها و ساختار تحولات علمی

تقریباً همیشه، کسانی که پارادایم‌های جدید را خلق کرده‌اند، یا بسیار جوان بوده‌اند و یا سابقه‌ی آشنایی بسیار کمی با پارادایم قبلی داشته‌اند.

توماس کوهن

بیش از نیم قرن پیش، توماس کوهن^{۷۸} کتابی در زمینه‌ی مرور تاریخ تحولِ نگرش علمی نوشت که خود، به نقطه‌ی عطفی در تاریخ تحولِ نگرش علمی تبدیل شد.

کتاب او ساختار انقلاب‌های علمی^{۷۹} نام داشت. رایج است که کتاب او را به صورت خلاصه کتاب ساختارمی‌نامند. من هم از همین شیوه‌ی ارجاع استفاده می‌کنم. البته علت این کار، صرفاً خلاصه‌نویسی و تنبلی در نگارش نیست. بلکه نوعی تأکید بر محوری بودن کتاب نیز هست. اگر یک کتاب بزرگ در تاریخ علم در مورد ساختار باشد، بی‌شک آن کتاب، متعلق به توماس کوهن است. این دیگران هستند که باید کتابهایشان را با پیشوند و پسوند صدا کنند تا به عنوان یک هویت مستقل به رسمیت شناخته شوند^{۸۰}.

مانند هر کتاب بزرگ دیگری، این کتاب منتقدان خود را نیز دارد و شاید در آن میان، کارل پوپر از مطرح‌ترین منتقدان آن دانست. اما بحث در مورد نقد پوپر و اینکه چرا با بخشی از نگرش‌های کوهن هم‌سو و همراه نیست، لااقل در این مرحله از صحبت‌های ما مفید نخواهد بود.

تولد کتاب کوهن را مدیون یک اتفاق بسیار ساده هستیم. اتفاق ساده‌ای که مسیر فلسفه‌ی علم را به جاده‌ی جدیدی هدایت کرد.

در زمانی که کوهن، مقطع ارشد خود را در دانشگاه هاروارد به پایان رساند، از او خواسته شد که در زمینه‌ی علم و تاریخ علم، کلاسی را برای دانشجویان کارشناسی برگزار کند. همچنین خواسته شده بود که محتوای این کلاس، تا حد زیادی به مرور کتابهای کلاسیک علمی اختصاص یابد.

توماس کوهن، که تا آن زمان هیچ کتاب کلاسیکی را نخوانده بود، وادار شد کتابهای ارسطو را بخواند. بسیاری از ما کتابهای

⁷⁸ Thomas Kuhn

⁷⁹ Kuhn, T. S. (1970). The structure of scientific revolutions. Chicago: University of Chicago Press.

^{۸۰} ویرایش اول کتاب در سال ۱۹۶۲ منتشر شد و البته بعداً ویرایش‌های دیگری از آن نیز به بازار آمد. ویرایشی که من به آن دسترسی داشته‌ام، مربوط به سال ۱۹۷۰ است. اگر چه در حدی که من ارجاع می‌دهم، تفاوت جدی وجود ندارد. چون صرفاً به چارچوب کلی نگرش کوهن اشاره می‌کنم.

کلاسیک را به صورت مستقیم و دست اول نخوانده‌ایم و نمی‌خوانیم، بلکه جملات و نکات دست‌چین‌شده‌ای از آن‌ها را مرور می‌کنیم.

تجربه‌ی مواجهه با یک کتاب کلاسیک به صورت مستقیم و دست‌اول، تجربه‌ای کاملاً متفاوت است که تا آن‌را لمس نکرده باشید، نمی‌توانید کیفیت آن را تصور کنید^{۸۱}.

توماس کوهن هم، نوشته‌های ارسطو در مورد فیزیک را خواند و به نتیجه رسید که این کتاب، سرشار از خطا و کج‌فهمی و اشتباه است؛ در حدی که وادار کردن دانشجویان به خواندن و مطالعه‌ی آن‌ها، در نگاه او نوعی فعالیت زائد و بی‌نتیجه به نظر می‌رسید.

تولد مفهوم پارادایم در این نقطه روی داده است. توماس کوهن، به نتیجه رسید که او، در حال مطالعه‌ی جهان‌بینی ارسطویی، با عینک نیوتونی است. بنابراین، ارسطو را یک فیزیکدان نیوتونی ضعیف، کم‌سواد و حتی شاید بی‌سواد می‌بیند. این در حالی است که دنیای ارسطو، دنیای ضعیف‌شده و خطاآلود نیوتون نیست. بلکه به کلی جهانی دیگر است و نمی‌توانیم ویژگی‌های یک جهان را با مترها، معیارها و ابزارهای جهانی دیگر بسنجیم و ارزیابی کنیم.

واژه‌ی انقلاب^{۸۲} هم که توماس کوهن در عنوان کتاب خود و البته در تمام کتابش به کار می‌برد، به همین متفاوت بودن جهان‌ها اشاره دارد. اگر مسیر علم را یک مسیر پیوسته بگیریم و نپذیریم که در آن، گسستگی‌هایی وجود دارد، همیشه می‌خواهیم گذشته را با متر امروز بسنجیم و به این شیوه، همیشه گذشتگان را افرادی سطحی، نادان، خطاکار و شاید احمق

^{۸۱} کافی است در بین بزرگان خودمان هم این نوع بررسی را انجام دهید. جملات عمیق فراوانی که از مولوی شنیده‌ایم را تصور کنید. حالا کتابی مثل فیه مافیه را بردارید و خودتان، بدون واسطه، متن تقطیع نشده را از ابتدا تا انتها بخوانید. اگر چه هم چنان فرازهای ارزشمندی در کتاب خواهید دید، اما بحث‌های زیادی هم هستند که شما را شگفت‌زده خواهند کرد. مثلاً بحث مولوی در مورد قدیم و حادث بودن جهان، چنان بی‌پایه و اساس است که انسان تعجب می‌کند یک نفر، چقدر می‌تواند نفهمد. و اگر نفهمیدن‌های دیگر در این کتاب، مثنوی و جاهای دیگر نبود، شاید تردید می‌کردیم که این شیوه‌ی نگرش به بحث، متعلق به خود مولوی باشد. اگر چه اینها به هیچ وجه از اعتبار مولوی به عنوان یک عارف و ادیب بزرگ کم نمی‌کند. چنانکه ارسطو هم، که قلب را محل اندیشیدن و مغز را محل خنک کردن خون می‌دانست (چون خون در اثر اندیشیدن قلب، گرم شده است!) همچنان از مقام شامخی برخوردار است و چنین خطاهایی در نگرش، مقام والای او را خدشه‌دار نمی‌کند. اتفاقاً این همان بحثی است که توماس کوهن به آن می‌پردازد.

^{۸۲} واژه‌ی انقلاب در فارسی، از ریشه‌ی عربی قلب و دگرگون شدن است و اتفاقاً با مفهومی که کوهن مد نظر دارد سازگارتر است. در زبان انگلیسی، Revolution از ریشه‌ی Revolt به معنای چرخاندن و واژگون شدن است و به واژگون شدن تخت شاهان اشاره داشته است. اگر چه امروزه، کم نیستند کسانی که Revolution را به معنای همان چرخیدن و به نقطه‌ی نخستن بازگشتن در نظر می‌گیرند و اشاره می‌کنند که بسیاری از انقلاب‌ها، به جای واژگونی، مسیری دایره‌وار را طی می‌کنند و به نقطه‌ی نخست بازمی‌گردند. به این معنی، شاید اگر کوهن فارسی و عربی هم می‌دانست، انقلاب را به Revolution ترجیح می‌داد، چون واقعاً دگرگون شدن نگرش‌ها مد نظر او بوده و نه واژگون شدن تخت سلطنت باورهای قبلی.

خواهیم یافت.

این در حالی است که هر بار که پارادایم عوض می‌شود، مترها، معیارها و مقیاس‌ها تغییر می‌کنند و برای شناختن نگرش علمی در هر دوران، وارد فضای فکری و فرهنگی آن دوران شویم. درست مانند کسی که به سرزمینی دیگر سفر می‌کند و حتی اگر واژه‌ای را بشنود که ظاهر آن با زبان مادری اش یکسان است، می‌داند که معنای آن را نباید الزاماً یکسان در نظر بگیرد.

واژه‌ی پارادایم داستان‌های زیادی را در دل خود پنهان دارد که اگر آنها را بدانیم، درک مفاهیم پارادایم، جابجایی پارادایم و نگرش توماس کوهن در این زمینه ساده‌تر خواهد بود.

پارادایم واژه‌ای لاتین به معنای مثال است. در واقع کوهن معتقد است که در هر دورانی، مجموعه‌ای از اصول، باورها، ارزش‌ها، نگرش‌ها و مدل‌های علمی وجود دارند که شیوه‌ی مشاهده‌ی ما و حتی شیوه‌ی ادراک ما از جهان را شکل می‌دهند. پس هر آنچه ما به عنوان پدیده‌ها، آزمایش‌ها و کشفیات علمی بررسی و مطالعه می‌کنیم، مثالی برای آن چیزی است که از قبل باور داشته‌ایم.

حیف است در اینجا از شعر زیبای مولوی یاد نکنیم که می‌گوید:

پیش چشمت داشتی شیشه‌ی کبود زان سبب دنیا کبودت می‌نمود

کسی که عینک آبی رنگ بر چشم دارد، هر شیء تازه‌ای در محیط را یک جسم آبی رنگ جدید می‌بیند و مثال جدیدی در تایید باور قدیمی که هر چه در جهان هست، آبی است. فقط کسی می‌تواند جهان را به شیوه‌ای دیگر ببیند، که عینک آبی از چشم بردارد.

اشاره وار بگویم و عبور کنم که اینجا همان تفاوت بزرگ پوپر و کوهن است. پوپر از برداشتن عینک آبی می‌گوید و کوهن توضیح می‌دهد که ما هرگز نمی‌توانیم بدون عینک به جهان نگاه کنیم. پس باید در مورد گذاشتن عینک جدید حرف بزنیم و نه نگاه بدون عینک به جهان.

پوپر معتقد است که این نگرش کوهن، به نسبی بودن علم منجر می‌شود و این موضع، اعتبار و قدرت روش علمی را برای مبارزه یا مواجهه با باورهای دیگر، تضعیف می‌کند.

به هر حال، مهم است به خاطر داشته باشیم که در ادبیات کوهن، مهم‌تر از لغت پارادایم، اصطلاح پارادایم شیفت یا جابجایی پارادایم است: مقطعی از تاریخ، که علم، دانش و نگرش از جهانی به جهان دیگر سفر می‌کند و دنیا را به شکل و شیوه‌ی جدیدی می‌بیند.

کوهن، پارادایم را به دو معنای کاملاً متفاوت به کار می‌برد:

- معنای عام و گسترده‌ی پارادایم
- معنای خاص پارادایم

آنچه ما معمولاً به عنوان پارادایم می‌شناسیم، معنای خاص آن است. به این شکل که مثلاً نگاه نیوتون و نگاه اینشتین به جهان، دو پارادایم متفاوت در نظر گرفته می‌شود.

اما پارادایم عام، مفهومی بسیار فراگیرتر دارد. به این مفروضات توجه کنید:

- بین دو راه حل که پاسخ یکسانی دارند، راه حل ساده‌تر بهتر است.
- دقت بالاتر در تحلیل، بهتر از دقت کمتر در تحلیل است.
- افزایش تعداد مثال‌ها برای یک قانون، عمق و فراگیر بودن آن را بهتر اثبات می‌کند.
- یک شیوه‌ی خوب برای ارزیابی یک دانش، ارزیابی دستاوردهای آن است.

اینها در نگاه ما بدیهی هستند و به سختی می‌توانیم زمانی را تصور کنیم، که باورها و اصول و ارزش‌های دیگری جز اینها، بر جهان علم حاکم شوند.

به هر حال، آنچه در نگرش توماس کوهن جالب است، تردید شگفت‌انگیز او نسبت به همه چیز است. همین شک و تردید است که باعث می‌شود بتواند تاریخ علم را بار دیگر مرور کند و دستاوردها و گنجینه‌های تازه‌ای را از میان دانسته‌های گذشته کشف کند و پیش چشم‌مان بیاورد.^{۸۳}

حیف است اگر فرصت نکنید و کتاب ساختار توماس کوهن را به صورت کامل نخوانید. چنانکه اگر کوهن، ارسطو را مستقیم و کامل نمی‌خواند، نطفه‌ی بحث پارادایم در ذهنش شکل نمی‌گرفت.

^{۸۳} در مورد مفهوم تردید در علم هر چه بگوییم کم گفته‌ایم. چه بسیار تردیدهای ارزشمند علمی، که در زیر روایت‌های تاریخی مدفون یا پنهان شده‌اند. شاید رنه دکارت مثال بسیار خوبی باشد. ما همه از دکارت یک جمله را به خاطر داریم: «می‌اندیشم، پس هستم». این جمله، حتی به دستاویزی برای طنز ساختن در میان نویسندگان و متفکران و حتی دانشجویان فلسفه نیز تبدیل شده است. اما جالب است که حتی مفهومی که از آن درک می‌کنیم، با معنایی که مد نظر دکارت بوده تفاوت جدی دارد. دکارت اهل تردید بود. شک دکارتی، از جمله شک‌های معروف در تاریخ است. دکارت به شیوه‌ی تحلیل کردنش تردید داشت. به شیوه‌ی استدلال کردنش تردید داشت. سعی می‌کرد در همه چیز تردید کند. می‌گفت هر بار که چیزی را می‌پذیرم، ممکن است گرفتار دام خطا و فریب شوم. آن قدر تردید را عمیق کرد تا به خودش رسید و گفت: آیا من اصلاً هستم؟ یا صرفاً فریب می‌خورم و فکر می‌کنم که هستم. بعد با خود گفت حتی اگر بخواهم فریب هم بخورم، باید فکرو اندیشه‌ای باشد که فریب بخورد. پس تا فکر می‌کنم و می‌اندیشم، می‌توانم فرض کنم هستم. دقت داشته باشید که دکارت، بودن خودش را هم، نه به عنوان یک فکت علمی، بلکه به عنوان یک فرض علمی در نظر می‌گیرد تا بتواند جهان بینی خود را بر اساس آن بسازد.

اما به هر حال، ترجیح می‌دهم برخی از کلیدی‌ترین نکات مطرح شده در کتاب ساختار را در اینجا مرور کنم تا در آینده بتوانیم بیشتر به آنها بپردازیم.

کوهن، به مکانیزم تقویت و رشد پارادایم‌ها اشاره می‌کند. او توضیح می‌دهد که همواره، تعداد زیادی از دانشمندان وجود دارند که پارادایم فعلی را آموخته و براساس آن کار کرده‌اند. راه حل مسائل متعددی را با استفاده از آن یافته‌اند و احتمالاً مسائل باقی‌مانده‌ای هم دارند که می‌کوشند در پارادایم فعلی، پاسخ‌شان را بیابند.

حالا وقتی، یک دانشمند یا محقق جدید، مطالعه‌ای انجام می‌دهد و نظریه‌ای می‌دهد یا تحقیقی می‌کند که می‌تواند بخشی از مسائل حل‌نشده‌ی آنها را در چارچوب پارادایم فعلی حل کند، مورد استقبال قرار می‌گیرد و به این شکل، درست همان‌طور که یک کریستال رشد می‌کند، قطعه‌ی جدیدی از علم، در تایید علوم قبلی و در چارچوب پارادایم فعلی، به ساختار موجود افزوده می‌شود.

فرض کنید در این میان، کسی تحقیقی کند یا نظریه‌ای مطرح کند که به شکلی کاملاً متفاوت و با پیش‌فرض‌ها و پارادایمی متفاوت، مسئله‌ای را که هم‌اکنون حل شده، مجدداً حل کند. چه کسی از او استقبال خواهد کرد؟ چه کسی به او کمک خواهد کرد تا مسائل بیشتری را حل کند و به تدریج، کریستال جدیدی حول یک پارادایم جدید شکل بگیرد؟

کسی که پارادایم جدیدی را مطرح می‌کند یا در چارچوب پارادایم جدیدی می‌اندیشد، معمولاً از جانب صاحب‌نامان، مشاهیر و دانشمندان معتبر زمان خود، خوش‌آمد نخواهد شنید. چون مسیر آنها را ادامه نداده است.

دومین بحثی که کوهن به آن اشاره می‌کند، ظهور و بروز نتیجه‌ها و چالش‌های نامتعارف و خلاف قاعده در علم است.

فرض کنید سوال و چالشی مطرح است که پارادایم فعلی نمی‌تواند به آن پاسخ گوید. یا آزمایشی انجام شده که نتیجه‌ی آن، به وسیله‌ی دانش فعلی و پارادایم فعلی قابل توجیه نیست.

اگر چنین مواردی معدود یا کم‌اهمیت باشند یا محققانی که چنین بحث‌هایی را مطرح می‌کنند، نتوانند پای آنها بایستند و به اندازه‌ی کافی از آنها دفاع کنند، احتمالاً این نهال جدید، در اثر طوفان‌های نقد و مقاومت، خواهد شکست و مسیر سابق پارادایم ادامه خواهد یافت.

اما به هر حال، زمانی می‌رسد که یا تعداد استثناء‌ها و یا اهمیت آنها و یا پشتکار یک محقق چنان زیاد است که علم، مجبور می‌شود آن بحث را جدی بگیرد. در اینجا، کوهن از واژه‌ی بحران^{۸۴} استفاده می‌کند. پارادایم فعلی با بحران مواجه شده

⁸⁴ Crisis

است. پس می‌کوشد برخی از پیش‌فرض‌های خود را تغییر دهد و شاید روش‌های متفاوتی برای مواجهه با مسئله و حل مسئله را جستجو کند. این همان پدیده‌ی پارادایم‌شیف است که به اندازه‌ی خود واژه‌ی پارادایم در مدل ذهنی کوهن، نقش و اهمیت دارد.

موضوع کلیدی دیگری که کوهن مطرح می‌کند و من هم در صفحات قبل به آن اشاره کردم، بحث قیاس‌ناپذیری^{۸۵} است. بحث پوپر و کوهن هم که اشاره‌وار از کنارش رد شدیم، به این مقوله بازمی‌گردد.

کوهن به هیچ پارادایمی اجازه‌ی قضاوت و قیاس پارادایم‌های دیگر را نمی‌دهد. چون هریک را جهانی دیگر می‌داند که پیش‌فرض‌ها، ارزش‌ها، الگوها و مدل‌هایی متفاوت را در اختیار گرفته‌اند.

او توضیح می‌دهد که دانشمندان و متفکران پارادایم‌های مختلف، حتی روی اینکه چه سوالاتی مهم است و باید جواب داده شود اتفاق نظر ندارند. پس چطور می‌توانند شیوه و روش یکدیگر را بسنجند و ارزیابی کنند؟

دومین نکته‌ای که کوهن اشاره می‌کند، تفاوت معنای واژه‌هاست که با استعاره‌ی سفر در موردش صحبت کردیم. ابوریحان، کوپرنیک، گالیله و نیوتون، همگی از آسمان سخن می‌گویند. اما آیا این واژه برای همه‌ی آنها یک معنا دارد؟

فضا واژه‌ای است که هم در ادبیات نیوتون وجود دارد و هم اینشتین. اما آیا می‌توان فرض کرد که این دو واژه‌ی یکسان در دو پارادایم، قرابت چندانی با هم دارند؟ آیا ناخودآگاه، آنچنانکه یونگ می‌گوید با ناخودآگاهی که فروید مطرح می‌کند یکسان است؟

آیا قلب، آنچنانکه ارسطو می‌گفت که قرار بود مرکز درک و ادراک باشد با قلبی که ژوردانو برونو^{۸۶} می‌گفت و قرار بود پمپی برای خون باشد، یکسان است؟ حتی اگر هر دو، واژه‌ی واحدی را برای یک اندام مشخص در بدن به کار ببرند.

نکته‌ی سومی که کوهن اشاره می‌کند از دو نکته‌ی قبل هم عمیق‌تر است. کوهن می‌گوید که کسانی که در پارادایم‌های متفاوت زندگی می‌کنند، جهان‌های متفاوتی را می‌بینند و اصلاً جهان مشترکی برای حرف زدن، اندیشیدن، سنجیدن و نقد

⁸⁵ Incommensurability

^{۸۶} ژوردانو برونو، ریاضیان، فیلسوف، شاعر و منجم بزرگ قرن شانزدهم بود که به خاطر باور به نقش مکانیکی قلب و اینکه آن را اندام اندیشیدن و ادراک نمی‌دانست و چند مورد از باورهای نجومی‌اش که با نگرش کلیسا در قرون وسطی همسوز نبود، بریان شد. بریان شدن، یکی از مجازات‌های قرون وسطی بود که فرد را بدون لباس، روی چوب می‌بستند و در فاصله‌ای روی آتش می‌گذاشتند که آتش نگیرد و حداقل دو شبانه روز زنده بماند تا بمیرد. معمولاً میخی هم در پای فرد فرو می‌کردند تا گرما به درون پایش نفوذ کند و فریادهای بلندتر بزند. چون براین باور بودند که این فریادها، باعث می‌شوند که دیگران، سرمشق بگیرند و در مسیر علم، منحرف نشوند. کلیسا در سند مربوط به مجازات او، جرمش را تکیه‌ی بیش از حد به منطق به جای درک حقیقت مسیحیت اعلام کرده است. هفدهم فوریه‌ی هر سال، به یاد هفدهم فوریه‌ی سال ۱۶۰۰ میلادی که سالگرد برونو است، اندیشمندان جهان در نقاط مختلف، یاد برونو را گرامی می‌دارند.

کردن یکدیگر ندارند.

به عبارتی، او به این نکته اشاره دارد که ذهن ما، براساس مفروضات و داشته‌های خود، آنچه را در بیرون وجود دارد ادراک می‌کند. بنابراین آزمایش‌ها، مشاهدات و حتی داده‌هایی که دانشمندان از یک محیط یا یک سیستم برمی‌گیرند، الزاماً یکسان نیستند.

چه بسا آنچه یک پارادایم، به عنوان قاعده در نظر می‌گیرد برای پارادایمی دیگر استثناء باشد. یا این که آنچه دو پارادایم به عنوان نوپزیا داده‌های خارج از نمودار کنار می‌گذارند، به عنوان خوراک اصلی پارادایمی دیگر به کار گرفته شود. در حدی که تمام داشته‌ها و داده‌های دو پارادایم قبل را نوپزیا انحراف در نظر بگیرد.

سنگی را در نظر بگیرید که به نخی آویخته است و در باد تکان می‌خورد. ارسطو آن را سنگی می‌بیند که نخ مانع سقوطش شده و گالیله آن را یک آونگ می‌بیند. این دونفر، حتی در توصیف اینکه چه دیده‌اند، اتفاق نظر ندارند. پس منطقی نیست انتظار داشته باشیم در مشاهده‌ی رویدادی واحد، پرسش‌های یک‌سان یا مشابهی را مطرح کنند.

فرانسیس بیکن

تفاوت بزرگی بین شادی و شعور وجود دارد. انسانی که می‌گوید من احساس می‌کنم که شادترین فرد روی زمین هستم. احتمالاً درست می‌گوید. چون شادی، از مقوله‌ی احساس است. اما کسی که می‌گوید من با شعورترین فرد روی زمین هستم، احتمالاً احمق‌ترین فرد روی زمین است.

فرانسیس بیکن

هر نوع مطالعه از مفهوم پارادایم را باید با نشستن در کنار فرانسیس بیکن^{۸۷} و هم‌کلامی با او آغاز کرد.

بی‌تردید می‌توان گفت که بدون بیکن، علم و دانش و نگرش انسان مسیری دیگر را می‌پیمود. از این منظر، گزاف نیست اگر جایگاهی در حد حکیمان کلاسیک تاریخ - کسانی مانند سقراط و افلاطون و ارسطو - به او بدهیم.

پدر بیکن مُهردارِ دربار انگلیس بود. این سمت را تقریباً می‌توان چیزی شبیه وزیر خزانه داری یا رییس بانک مرکزی در دنیای امروز در نظر گرفت. بیکن در نیمه‌ی قرن شانزدهم (۱۵۶۱) به دنیا آمد. او پس از تحصیل در رشته‌ی حقوق، طی کردن مدارج سیاسی، برنده شدن در انتخابات و حضور در پارلمان، نهایتاً در اوایل قرن هفدهم، در شرایطی که معتمد شاه زمان خودش^{۸۸} بود، به سمت مُهردار سلطنتی - یعنی همان سمتی که پدرش عهده‌دار آن بود - منسوب شد و عملاً نقش دست راست شاه

^{۸۷} Francis Bacon

^{۸۸} جیمز اول پادشاه انگلستان، پنج سال از فرانسیس بیکن جوان‌تر بود. بیکن هم یک سال پس از مرگ او در سال ۱۶۲۶ درگذشت. این دو به معنای لغوی و اصطلاحی، معاصر بوده‌اند.

را برعهده گرفت.

یکی از رویدادهایی که مسیر جهان را تغییر داد، جنگ قدرت بین پارلمان و پادشاه انگلیس بود. در این جنگ قدرت، فرانسیس بیکن به فساد مالی و دریافت رشوه متهم شد و از کار دولتی کنار گذاشته شد. البته رشوه گرفتن او قطعی است. شاید تنها دفاعی که می‌توان از او کرد این است که در شرایطی که رشوه‌خواری رایج و عادی بوده، چرا او را به این بهانه به فساد متهم کرده‌اند.

به هر حال، همین انفصال از خدمات دولتی به خاطر فساد مالی بود که باعث شد فرانسیس بیکن خانه نشین شود و همان کاری را که از جوانی قصد آن را داشت و بارها رویایش را مطرح کرده بود عملی سازد. او در مدت باقیمانده، بنیاد علم را برای همیشه دگرگون کرد.

جزئیات چندانی از کسانی که به او رشوه داده‌اند در تاریخ ثبت نشده؛ فقط می‌دانیم که چهار فقره دریافت رشوه در پرونده‌ی او وجود داشته است. اما بی‌تردید می‌توان گفت این چهار نفر، با اقدام غیراخلاقی خود، زمینه‌ساز تحولی بزرگ در خدمت ارزش، اخلاق و علم بوده‌اند.

بیکن، پروژه‌ای به نام *نوسازی بزرگ*^{۸۹} تعریف کرد. تصمیم گرفت در شش مجلد، همه‌ی آنچه را که برای نوسازی اندیشه‌ی بشر لازم بود، گردآوری، تالیف و تدوین کند.^{۹۰}

او خود نیز می‌دانست که چنین پروژه‌ای در عمریک انسان نمی‌گنجد. اما تصمیم گرفت این کار را تا آنجا که می‌تواند پیش ببرد.

آنچه در مجموعه‌ی *نوسازی بزرگ* کامل‌تراز سایر اجزا است و اتفاقاً بیش از همه شناخته شده است، کتاب *ارغنون* جدید^{۹۱} است. در نگاه اول، شاید نام این کتاب، ادای احترامی به ارسطو به نظر برسد. اما وقتی کتاب را می‌خوانیم، می‌بینیم که این کتاب دقیقاً نوعی تفهیم اتهام به ارسطو است و اگر چه به خود او احترام گذاشته شده، اما تمام تاکید کتاب بر این است

^{۸۹} Great Renewal

^{۹۰} مجموعه کتابهای *نوسازی بزرگ*، تنها کارهای مکتوب فرانسیس بیکن نبودند. او کتاب *جالبی* به نام *آتلانتیس* هم دارد. در آن کتاب، زندگی در جزیره‌ای خیالی را به تصویر می‌کشد. در آن جزیره حاکمیت و مدیریت در اختیار دانشمندان است و به هیچ کشیشی اجازه قدرت‌نمایی داده نمی‌شود. او در کتاب *آتلانتیس* خود ظهور برخی از اختراعات قرن‌های آتی مانند خودرو، هواپیما و رادیو را پیش‌بینی می‌کند. در واقع *آتلانتیس* او این وسایل را دارد. با توجه به اینکه بیکن در کتاب *آتلانتیس* خود، بر ساختار مدیریتی با اتکا به دانشمندان تاکید می‌کند، می‌توان آن را به نوعی با نگرش افلاطون که مدینه‌ی فاضله‌ی خویش را در اختیار فیلسوفان قرار می‌دهد مقایسه کرد.

^{۹۱} Bacon, F., Jardine, L., & Silverthorne, M. (2000). *The new organon*. Cambridge: Cambridge University Press.

که دنیای جدید را باید با عبور از افکار قدیمی کشف و تجربه کرد^{۹۲}.

توضیحاتی که فرانسیس بیکن در کتاب ارغنون جدید مطرح می‌کند، هنوز هم می‌تواند برای علاقمندان به مدل ذهنی و پارادایم‌ها، مفید و آموزنده باشد.

او در کتاب خود، به روش و اهمیت روش علمی اشاره می‌کند. البته نامی که بیشتر به کار می‌برد فلسفه‌ی طبیعی است. فرانسیس بیکن در کتابش به وجود خداوند اشاره می‌کند و تلاش برای کشف قوانین طبیعت را بزرگترین بندگی خداوند می‌داند. او در پایان کتابش دعا می‌کند که خداوند، کتابش را از شر بندگان حفظ کند.

یکی از محورهای کلیدی نگرش بیکن، بحث اعتبار و اعتبارسنجی است. تا قرن پانزدهم و شانزدهم میلادی، هنوز رایج بود که اعتبار حرف‌ها را صرفاً به اعتبار گوینده‌ی آن‌ها بپذیرند.

مثلاً چون ارسطو گفته بود که برخی انسان‌ها، ذاتاً برده‌اند، هر وقت در مقام استدلال علمی و بحث‌ها به موضوع بردگی می‌رسیدند می‌گفتند: می‌دانیم هم چنانکه ارسطو می‌گویند، برخی انسان‌ها ذاتاً برده هستند.

جالب اینجاست که هم گوینده و هم شنونده، این شیوه‌ی مباحثه و استدلال را علمی می‌دانستند و مشکلی با آن نداشتند. فرانسیس بیکن براین باور بود که هرکسی، هرچقدر هم بزرگ، تا زمانی که شواهد علمی و طبیعی برای حرف خود نداشته باشد، آنچه می‌گوید صرفاً دیدگاه اوست و نه یک نظریه‌ی علمی.

بیکن همچنین نقد مهم دیگری هم به روش سنتی داشت. او می‌گفت حکیمان کلاسیک و به طور خاص افلاطون و ارسطو، ابتدا نظریه پردازی می‌کنند و سپس می‌کوشند تمام رویدادهای جهان را براساس نظریه‌ی خود توصیف و تشریح کنند.

در حالی که روش علمی این است که ابتدا رویدادهای جهان را بررسی کنیم و سپس به روش استقراء، سعی کنیم قوانین فراگیرتری بیابیم و به تدریج یک نظریه‌ی علمی را شکل دهیم.

یکی از اصطلاحاتی که بیکن به آن علاقه‌ی زیاد دارد، اندیشیدن آرزومندانه^{۹۳} است. به این معنا که انسان‌ها، ابتدا به آرزوهایی که در مورد خود و دنیا دارند فکر می‌کنند و سپس آن قدر می‌اندیشند تا روشی برای اثبات آن پیدا کنند. او به جای

^{۹۲} این شیوه نام‌گذاری با استفاده از اسامی قدیمی و با اتکا به سابقه‌ی آنها، موارد مشابه زیادی دارد. کتاب چنین گفت زرتشت نیچه نیز داستان مشابهی دارد. عنوانش، نوعی ادای احترام به زرتشت به نظر می‌رسد. اما بعداً می‌بینیم که نیچه توضیح می‌دهد که تمام اساس فلسفه‌ی او، عبور از مفهوم نیک و بد است. چون نخستین کسی که مفهوم نیک و گفتار نیک، پندار نیک و کردار نیک را مطرح کرده زرتشت بوده، نیچه حرف‌های خود را در دهان زرتشت قصه‌اش می‌گذارد تا به نوعی از او انتقام گرفته باشد.

^{۹۳} Wishful thinking

اصطلاح خرافات، در بیشتر نوشته‌هایش از اصطلاح اندیشیدن آزمون‌دانه استفاده می‌کند.

یکی دیگر از محورهای کلیدی کتاب ارغنون جدید، بحث سوگیری‌های ذهنی است. البته فرانسیس بیکن از اصطلاح سوگیری استفاده نمی‌کند. او اصطلاح بُت^{۹۴} را به کار می‌برد.

بیکن توضیح می‌دهد که هدف علم، پاک کردن ذهن از بت‌هایی است که آن را آلوده کرده‌اند. بت‌هایی که اگر مراقب نباشیم، مغز به جای خدمت به علم و طبیعت، صرفاً می‌کوشد رضایت آنها را تامین کند.

یکی از بت‌هایی که او به آن توجه دارد، بت قبیله است. او می‌گوید انسان‌ها، یک قبیله‌ی بزرگ بر روی زمین هستند که خود را متفاوت و متمایز با همه‌ی آنچه بر روی زمین است می‌بینند. به همین علت، در تجربه‌ها و تحلیل‌ها و توصیف خود از جهان، همواره ناخواسته در خدمت این بت قرار می‌گیرند.

می‌توان گفت در نگاه بیکن، بت قبیله، همه‌ی خطاهایی هستند که در ذهن انسان - به عنوان یک گونه - وجود دارند. بعضی از این خطاها در اثر ضعف قوای ذهنی ما به وجود آمده‌اند و برخی دیگر، اتفاقاً برای زندگی ما انسان‌ها ضروری بوده‌اند.

او ویژگی روش علمی را این می‌داند که در پی کشف حقیقت عالم است و نه خدمت به انسان و خواسته‌های او.

بیکن همچنین توضیح می‌دهد که بسیاری از الگوهایی که انسان‌ها در طبیعت کشف می‌کنند یا اهدافی که برای سایر موجودات تشریح و تبیین می‌کنند، صرفاً در اثر وسوسه‌ی این بت درونی شکل گرفته است و نه بر اساس واقعیت بیرونی.

بت دیگری که فرانسیس بیکن به آن اشاره می‌کند، بت غار است. غاری که بیکن مد نظر دارد با غاری که افلاطون به آن اشاره می‌کند، هیچ ارتباطی ندارد. بیکن، خطاهای مشترک همه‌ی انسان‌ها را بت قبیله نامیده بود. سپس خطاهایی را که مختص هریک از ماست، بت غار^{۹۵} می‌نامد.

در این مدل‌سازی بیکن می‌گوید درون هریک از ما غار تاریکی است که خاطرات، باورها، عادت‌ها، خُلق و خو، تجربه‌های محیطی، شنیده‌ها و ترجیحات مان در آن قرار دارند. هیچکس، حتی خودمان به درستی با بت‌های داخل این غار آشنا نیستیم. اما بسیاری از رفتارها و قضاوت‌هایمان در خدمت این بت‌هاست و عملاً آنها بر تصمیم‌ها، رفتارها و انتخاب‌های ما حکم می‌رانند.

^{۹۴} Idol

^{۹۵} Idols of the cave

بت دیگری که بیکن به آن اشاره می‌کند، بت بازار^{۹۶} است. برای اینکه بت بازار را در نگاه بیکن بهتر بفهمیم، مناسب است ابتدا به واژه‌ی بازار و استعاره‌ی بازار در ذهن بیکن فکر کنیم.

بازار، پول و معامله چگونه به وجود آمدند؟ آیا معامله کردن خود یک هدف بود؟ آیا پول در ذات خود ارزش داشت؟ معامله کردن برای تبادل داشته‌های ما بود. پول قرار بود کمک کند تا آن چه را امروز داشته‌ایم، برای فردا ذخیره کنیم و البته بتوانیم ارزش داشته‌هایمان با دیگران مقایسه کنیم و بسنجیم. همان چیزی که اقتصاددان‌ها از آن تحت عنوان ابزاری برای تبادل^{۹۷} نام می‌برند.

بیکن همین استعاره را به دنیای کلمات می‌آورد. آیا کلمات به ذات خود ارزشی دارند؟ آیا گفتگو به خودی خود ارزشمند است؟ داشته‌های هراسانی، تجربیات ذهنی و فهم اوست. کلمات در اینجا ابزار واسط هستند و گفتگو شبیه معامله است. ما فهم خود را به دیگران می‌دهیم و بخش‌هایی از فهم دیگران را از آنها می‌گیریم و هم‌چنانکه اقتصاد و بازار، با مبادله‌های سالم، رشد می‌کنند و بالنده می‌شوند، انسان‌ها هم با گفتگوی سالم از طریق کلمات، رشد می‌کنند و به تعالی می‌رسند.

همه تجربه کرده‌ایم که در زندگی مبتنی بر بازار، گاه خود معامله و پول ارزشمند می‌شوند و فراموش می‌کنیم که قرار بوده این‌ها صرفاً ابزار باشند. کلمات و گفتگو هم گاهی برای اندیشمندان چنین کاربردی پیدا می‌کنند. یادمان می‌رود که کلمه، باید ما به ازاء بیرونی داشته باشد. کلمه خود باید به چیزی که واقعاً هست یا می‌تواند باشد اشاره کند. غیر از این، آنها که گرفتار بازی با کلمات و استدلال‌های پوچ فلسفی می‌شوند در نگاه بیکن، با آنها که سکه بر روی سکه می‌چینند و هیچ دستاوردی کسب نمی‌کنند، تفاوتی ندارند.

او همچنین از کلمات به عنوان ابزاری که هم‌زمان مفید و محدودکننده است یاد می‌کند. بیکن توضیح می‌دهد که «انسان فکر می‌کند منطق و اندیشه‌اش بر کلماتش حاکم است. حال آنکه کلماتش هم به همان نسبت بر منطق و شیوه‌ی اندیشیدن او حاکمیت دارند».

می‌توان حدس زد که اگر بیکن زنده بود و نوشته‌های کسانی مانند ویتگنشتاین را می‌خواند، چقدر با او احساس همدلی و هم‌زبانی می‌کرد. بیکن همچنین به مفهوم کلمات عینی و ذهنی^{۹۸} نیز توجه دارد و یادآوری می‌کند که مفهوم کلماتی مانند

^{۹۶} Marketplace Idols

^{۹۷} Means of exchange

^{۹۸} Objective vs. Subjective words

سبک، سنگین، کمیاب و چگال، به ادراک انسان‌ها بستگی دارد.

بت‌های نمایش^{۹۹}، عنوان مجموعه‌ی دیگری از خطاهای شناختی انسان است که بیکن آنها را مورد توجه قرار می‌دهد. استعاره‌ی تئاتر و نمایش هم از جمله استعاره‌های زیبای بیکن است. ویژگی اصلی نمایش چیست؟ اینکه عده‌ی کمی روی سن قرار می‌گیرند و صحنه را می‌سازند. نورها بر روی آنها متمرکز می‌شود و صرفاً رفتار و گفتار آن‌ها دیده و شنیده می‌شود. دیگران - همان‌ها که تماشاچی نامیده می‌شوند - در تاریکی هستند. فقط وظیفه دارند ببینند و هر جا که مناسب بود کف بزنند.

بیکن معتقد است که دنیای اندیشه هم گرفتار همین نمایش‌هاست. عده‌ای به عنوان کسانی که انجیل یا علم یا فلسفه را بهتر از دیگران می‌فهمند، صحنه‌آرای اندیشه‌ی بشر می‌شوند. دیگران باید در سکوت آنها را نظاره، تحسین و حتی تقبیح کنند.

بیکن معتقد است که راه پیشرفت علم را الزاماً مردم نادان نمی‌بندند. بلکه دانایان نسل قبل می‌بندند که حاضر نیستند کسی با اندیشه‌ی متفاوت وارد صحنه‌ی نمایش آنها شود.

او در کتاب ارغنون جدید توضیح می‌دهد که: «انسان‌ها گاهی به خاطر تلاش‌ها و دردهایی که در راه درک یا توسعه‌ی یک دیدگاه متحمل شده‌اند، به آن دلبسته می‌شوند».

فقط کمی با خودتان فکر کنید و ببینید توماس کوهن که چند قرن بعد از پارادایم می‌گفت، آیا چیزی بیش از حرف بیکن در ذهن داشت؟

حرف بیکن این بود که در فضای علمی و در بحث علمی، روش^{۱۰۰} اهمیت دارد و معیار ارزیابی ادعاهاست. هیچ انسانی، به خاطر سابقه‌اش، یا موقعیتش، اعتباری ندارد که حرفش به صرف آنکه او حرفی را زده است پذیرفته شود.

بیکن اعتبار ادعاها را بر اساس اعتبار روش استنتاج آن‌ها می‌سنجد و نه اعتبار گوینده. این همان موضعی است که بعداً کوهن هم اتخاذ می‌کند.

افراد معتبر، مرجع و ذی صلاح، الزاماً در اندیشه‌ی صلاح حوزه‌ی خویش نیستند. بسیاری از آن‌ها آگاهانه یا ناآگاهانه، برای حفظ صلاح و صلاحیت خویش می‌کوشند.

⁹⁹ Theater Idols

¹⁰⁰ Method

بیکن دو نوع اعتبار را کاذب می‌داند: یکی اعتبار ناشی از گوینده و دیگری اعتبار ناشی از باور اکثریت. او توضیح می‌دهد که اگر تمام جهان به یک حرف باور داشته باشند، اما روشی منطقی، علمی و تجربی برای اثبات به آن نداشته باشیم، هم چنان نمی‌توان آن را معتبر فرض کرد.

یادمان باشد که این حرف‌ها که امروز برای هر صاحب عقل و شعوری بدیهی به نظر می‌رسد، آن سالها چندان بدیهی نبود. گالیله هفت سال پس از مرگ بیکن، روبروی کشیشان در دادگاه ایستاده بود و در دفاع از چرخش زمین می‌گفت: چرا اگر تمام مردم جهان فکر می‌کنند زمین ثابت است، این توافق عمومی را باید به عنوان قانون علمی بپذیریم؟

تمام آنچه بیکن مطرح کرد، امروز تحت عنوان روش شناخته می‌شوند و این واژه‌ی روش یا متود، چتری است که تمام اندیشه‌ی بیکن را تحت خود پوشش می‌دهد.

بیکن به گذشتگان احترام می‌گذاشت. او کسانی مانند سقراط، ارسطو و افلاطون را اندیشمند و در جستجوی حقیقت می‌دانست. او حتی معتقد بود که ارسطو و برخی دیگر از حکیمان یونان، جزو هوشمندترین انسان‌های تاریخ بوده‌اند و چه بسا امروز نیز کمتر کسی به اندازه‌ی آنها هوشمند باشد.

اگر افلاطون تا نقطه‌ای رفت و متوقف شد، اگر ارسطو جهان را تا حد مشخصی درک و تجربه کرد، این ناشی از درک پایین یا کمبود هوش آنها نبوده؛ بلکه حاصل محدودیت در روش اندیشیدن و آزمودن بوده است.

تمام شکست‌های علمی گذشتگان در همیشه‌ی تاریخ، چه در تمام سال‌هایی که بر ما گذشته و چه در قرن‌ها و هزاره‌هایی که بر فرزندان مان خواهند گذشت، شکست روش هستند و نه شکست اندیشه.

بیکن برای ساده‌ترین چیزها آزمایش می‌کرد و روش تجربی برایش مهم بود. شاید به زبان امروزی بتوانیم بگوییم به ترمودینامیک بیش از سایر شاخه‌های فیزیک علاقه داشت. مثال‌ها و تحلیل‌های زیادی را می‌توانید در کتابش بیابید که در گروه ترمودینامیک قابل طبقه‌بندی هستند^{۱۱}.

او نهایتاً زندگی‌اش را هم بر سر تجربه کردن باخت. او می‌خواست ببیند که گوشت در سرما و انجماد تا چه مدت سالم

^{۱۱} بیکن هم، در کتاب خود اشتباهات علمی متعددی دارد. مثلاً شاید برایتان جالب باشد که وقتی از حرارت سخن می‌گوید، منشاء حرارت را حرکت و جنبش در نظر می‌گیرد. شاید تا اینجا خوشحال شوید و از عمق نگرش این دانشمند بزرگ شگفت‌زده شوید. اما در ادامه می‌بینید که برای اثبات نظرش، به این مسئله اشاره می‌کند که وقتی آتش را در جایی بسیار تنگ محبوس می‌کنید، چون نمی‌تواند حرکت کند خاموش می‌شود. البته باید به خاطر داشته باشیم که بیکن بیش از چهار قرن پیش زندگی می‌کرده و با وجود تسلط علمی‌اش در زمان خویش، هرگز ادعا نکرد که درست می‌فهمد و درست می‌گوید. او نظریه‌های علمی را صرفاً پیشنهادی به نسل آینده می‌دانست تا با تحقیق و تجربه، آنها را تایید یا رد و پاکسازی کنند. بنابراین هم چنان باید به احترامش کلاه از سر برداریم.

می‌ماند. یک زمستان برفی را به این آزمایش اختصاص داد و هرروز میزان سالم بودن گوشت در سرما را آزمایش می‌کرد. او در اثر سرما بیمار شد و فوت کرد. اما حاضر نشد مدت زمان سالم ماندن گوشت در سرما را بدون تجربه و فقط از روی حدس برآورد کند.

کتاب بیکن، هرگز تمام نشد. اگرچه به نظر می‌رسد که او هم قصد تمام کردن آن را نداشته است. این را از بحث‌های بسیار گسترده و متنوعی که نیمه کاره طرح و رها کرده می‌توان فهمید. همچنین از هدف‌های بزرگی که داشت: ثبت تمام دستاوردهای تمام تجربیات علمی و روشمند انسان‌ها در یک جلد، تنها یکی از این هدف‌ها بود.

ظاهراً سنت بسیاری از بزرگان است که کتاب‌هایشان را برای تمام شدن نمی‌نویسند. بلکه صرفاً به عنوان گزارشی از مسیر خود ثبت و مستند می‌کنند. اغراق نیست اگر بگوییم هرآنچه تا امروز علم به آن رسیده، ادامه‌ی کتاب کوچک اما اثرگذار بیکن است.

اگرچه بیکن تا پایان بحث پیچیدگی در کنار ما خواهد بود. اما اجازه بدهید این بخش را که مختص خود اوست با جملاتی از خودش در کتاب ارغنون جدید به پایان ببرم:

انسان‌ها برای اندیشیدن به موضوعات مختلف، گاهی به شباهت‌های آن موضوع‌ها توجه می‌کنند و گاهی به تفاوت‌هایشان. اما هر دو شیوه در حالت افراطی خود، به خطا می‌روند: گاهی، تفاوت‌های کم‌اهمیت را جدی می‌گیرند و گاه شباهت‌های کوچک و بی‌معنا را مهم و معنادار قلمداد می‌کنند.^{۱۲}

^{۱۲} فکر می‌کنم کمتر مهارتی را بتوان یافت که در یادگیری و توسعه‌ی نظریه‌های علمی به اندازه‌ی آنالوژی یا قیاس، حائز اهمیت باشد. در اینجا فرانسیس بیکن، به شکلی ساده اما دقیق، دو مرز خطرناک را معرفی می‌کند: «دیدن آنالوژی در جایی که آنالوژی قابل اعمال نیست و جدی نگرفتن آنالوژی در جایی که آنالوژی واقعاً قابل استفاده است».

گاليله: حرفی درست بر پایه‌ی استدلالی نادرست

ابر و باد و مه و خورشید و فلک در کارند
تا تو نانی به کف آری و به غفلت نخوری
سعدی در گلستان (سه قرن قبل از گاليله)

نمی‌خواهم باور کنم خدایی که به ما حواس، منطق و قدرت اندیشیدن را داده، انتظار داشته باشد که از این نعمت‌ها استفاده نکنیم.

گاليله (در نامه‌ی تاریخی به کریستین دو لورن)

اگر بخواهیم صفت نابغه را تنها برای یکی از دانشمندان قرون وسطی به کار ببریم، قطعاً در کنار نیوتون، گاليله هم جزو نامزدهای اصلی دریافت این عنوان خواهد بود.^{۱۳}

گاليله در میانه‌ی قرن شانزدهم یعنی در سال ۱۵۶۴ در پیزای ایتالیا متولد شد و در دانشگاه پیزا هم درس خواند. یکی از بخت‌های بزرگ بشریت این است که او چندان به توصیه‌ی پدرش توجه نکرد و به جای پزشکی که آرزوی پدرش بود، در رشته‌ی فیزیک تحصیل کرد.

^{۱۳} متأسفانه جامعه‌ی عمومی در ایران و جهان، گاليله را بیشتر به واسطه‌ی کارهای هنری مثل نمایشنامه‌ی زندگی گاليله (کار برتولت برشت) می‌شناسد. نمی‌خواهم در این زمینه موضع قطعی بگیرم. اما حیفم می‌آید بگویم که احساس می‌کنم آشنایی با تاریخ از طریق هنر و بدون مراجعه به کتاب‌های علمی و منابع تاریخی، باعث شده است که تاریخ، قربانی جذابیت روایت شود. جنبه‌های دراماتیک و جمله‌سازی‌ها و جمله‌بازی‌های تاثیرگذار، چنان بر نمایشنامه‌ی برشت غالب شده که بخش‌های زیادی از واقعیت‌های تاریخی در آن مغفول مانده است. این نوع روایت‌های کاریکاتوری از تاریخ در بسیاری از کارهای هنری مشاهده می‌شوند و شاید بتوان گفت که گریزی هم از آنها نیست.

آلن دوباتن در نخستین فصل کتاب تسلی بخش‌های فلسفه، با لحن طنزآلود - اما دقیق - همیشگی‌اش، به اثر هنری ژاک لویی داوید از دادگاه سقراط اشاره می‌کند. افلاطون در آن زمان ۲۹ ساله بوده. اما چون تصویریک جوان بیست و نه ساله آن قدرها که باید و شاید، احساسات مخاطب را برنمی‌انگیخته است، ما او را در قالب یک پیرمرد غمزده می‌بینیم. حتی می‌بینیم که نقاش قصد داشته سقراط را در حال سرکشیدن پیاله‌ی شوکران تصویر کند. اما دوست شاعرش (آندره شنیه) به او می‌گوید که این نوع تصویرسازی، تنش دراماتیک کافی ندارد. بهتر است سقراط در حال حرف زدن باشد و دستش را به سمت شوکران دراز کرده باشد.

در کشور خودمان هم طی سال‌های اخیر که تئاترهای متعددی در مورد تاریخ سیاسی، اجتماعی و ادبی اجرا شده‌اند، با جماعتی «تئاتر-برو» مواجه هستیم که شب‌های خود را در سالن‌های نمایش می‌گذرانند و روزهای خود را به روایت تاریخ صرف می‌کنند. در حالی که تنها دانسته‌های تاریخی‌شان به درام‌های تاریخی محدود می‌شود که به خاطر نگه داشتن مخاطب پای پرده، مجبورند از دقت روایت بکاهند و بر قاطعیت حکایت بیفزایند.

قطعاً هنردر ایران و جهان، محرک بزرگی برای رشد علم، دانش و نگرش بوده است. اما به شرطی که نقطه‌ی آغاز باشد و نه نقطه‌ی پایان. نمایشی که از زندگی یک شخصیت تاریخی اجرا می‌شود، وقتی اثربخش است که بتواند مخاطب را به مطالعه‌ی منابع متعدد متفاوت و بعضاً متعارض وادار کند. اما اگر صرفاً به گذران وقت و تهیه‌ی خوراک برای گفتگوی پای میز مهمانی‌ها و کافی‌شاپ‌ها منتهی شود، حاصل همان چیزی خواهد شد که این روزها زیاد می‌بینیم.

بگذریم. می‌خواستم بگویم گاليله هم، مانند بسیاری از شخصیت‌های تاریخی، قربانی جذابیت دراماتیک داستان زندگی‌اش شده و دیدگاه‌ها، دغدغه‌ها و کارهای درست و اشتباهش کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در آن زمان، فیزیکی که آموزش داده می‌شد فیزیک ارسطویی بود. مدل پیشنهادی ارسطو توانسته بود ضمن احترام به چارچوب‌های کلیسایی، کنجکاوی اندیشمندان را هم حداقل برای شانزده قرن پس از میلاد مسیح ارضا کند.

فقط با درک عظمت ارسطو در نگاه دانشگاهیان آن زمان است که می‌توانیم بزرگی گالیله را بیشتر و بهتر بفهمیم. گالیله معتقد بود که فیزیک ارسطویی، فیزیک بازی با کلمات است و ارسطو برای مشاهدات علمی فیزیکی، ارزش چندان والایی قائل نبوده است.

آن زمان، نگاهی که در نجوم مورد توجه قرار می‌گرفت، نگاه زمین‌مرکز بود. چیزی که در زبان انگلیسی به آن ژئوستریک می‌گویند. ارسطو که گالیله او را بیش از فیزیکدان، خطیبی ارجمند و توانمند می‌دانست گفته بود که وقتی اجسام را رها می‌کنی، دوست دارند به جای واقعی‌شان در مرکز جهان بازگردند. ضمناً هر چه سنگین‌تر بوده و نفوذ زمین بر آن‌ها (یا میل زمین به آنها) بیشتر باشد، قدرت و سرعت آنها در بازگشت به مرکز جهان - که همان زمین است - بیشتر خواهد بود.

معمولاً قانون گرانش ارسطو را به این صورت خلاصه می‌کنند: سرعت سقوط اجسام متناسب با وزن آنهاست.

گالیله در هجده سالگی، وزنه‌ای را از نخ آویخته بود و آن را تاب می‌داد. گاه ساعت‌ها مشغول تماشای آن می‌شد. چرا باید این جسمی که به سمت زمین پایین می‌آید در آخرین لحظه پشیمان شود و به مسیر خود ادامه دهد و از زمین فاصله بگیرد؟ آیا اراده‌ی این نخ، به اندازه‌ی اراده‌ی زمین مهم است؟ چرا با تغییر وزن وزنه‌ی آونگ، سرعت رفت و برگشت (فرکانس) آن تغییر نمی‌کند؟ مگر نوسان آونگ هم، شکلی از سقوط نیست؟

این حرف‌ها امروز برای ما ساده و واضح به نظر می‌رسند. اما فراموش نکنیم که آن زمان، چنین حرفی مورد پذیرش نبود. یکی از ویژگی‌های جالب انسان‌ها این است که وقتی به چیزی باور دارند، ترجیح می‌دهند مثال‌های بیشتری از آن را بیابند و ببینند. ضمن این که هم‌زمان از تجربه‌های دیگری که آن باورها را تأیید نمی‌کنند، فاصله گرفته و آن‌ها را به دست فراموشی می‌سپارند.

به همین علت است که مردم، هر روز با دیدن سقوط سریع اجسام سنگین و سقوط آهسته‌ی کاغذ و پر، احترام و تقدس بیشتر برای ارسطو قائل می‌شدند و هر بار هنگام عبور از کنار آونگ گالیله، سعی می‌کردند این جسم بی‌خاصیت معلق را که چندان به قواعد ارسطویی توجه نداشت، فراموش کنند.

گالیله، بر این باور بود که فیزیک، اگر به مشاهده و آزمایش متکی نباشد، ناخواسته به خرافات و جهل اتکا خواهد کرد. از این رو، مدام می‌کوشید از طریق آزمایش و مشاهده‌ی تجربه، اعتبار آموزه‌های دانشگاهی و حرف‌های بزرگان تاریخ را بیازماید.

یکی از کارهای بزرگ گالیله، تفکیک ویژگی‌های مواد به دو دسته‌ی ویژگی‌های اولیه و ثانویه بود.

ویژگی‌های اولیه، چیزهایی هستند که به سادگی قابل سنجش و مقایسه هستند. همچنین اگر انسان‌های متفاوتی آنها را اندازه بگیرند و بررسی کنند، به نتایج یکسان (یا بسیار مشابه) می‌رسند. وزن، طول، عرض و ارتفاع، نمونه‌هایی از ویژگی‌های اولیه هستند.

اما ویژگی‌های ثانویه، ویژگی‌هایی هستند که موجود زنده دیگری باید باشد و آنها را بسنجد و اگر آن موجود عوض شود، ممکن است نتیجه‌ی سنجش هم تغییر کند. رنگ و بو، نمونه‌هایی از ویژگی‌های ثانویه محسوب می‌شوند. اگر بخواهیم حرف‌های گالیله را به زبان امروز ترجمه کنیم، باید بگوییم که گالیله ویژگی‌های عینی را ویژگی‌های اولیه و ویژگی‌های ذهنی را ویژگی‌های ثانویه می‌دانست.

گالیله تاکید داشت که علم، فقط می‌تواند و فقط حق دارد در مورد ویژگی‌های اولیه حرف بزند و مطالعه کند و ویژگی‌های ثانویه تنها زمانی قابل بحث و مطالعه هستند که به ویژگی‌های اولیه قابل تبدیل و ترجمه باشند.

او در بیست و دو سالگی، مفهوم تعادل هیدروستاتیک را اختراع کرد. هم چنین انجام آزمایش‌های مختلف درباره‌ی فشار سیالات و تدوین قوانین مربوط به آن از جمله کارهای گالیله است.

گالیله به شدت به نجوم علاقه داشت و با درست کردن تلسکوپ توانست در سال ۱۶۱۰ میلادی، چهار قمر از قمرهای مشتری را به چشم ببیند. او حلقه‌های زحل را هم به چشم خود دید و فازهای مختلف چهره‌ی سیاره‌ی زهره را نیز مشاهده کرد.

اما احتمالاً وقتی نام گالیله را می‌شنوید، در کنار بحث دادگاه و چرخش زمین، تصویر دیگری هم در ذهن شما مجسم می‌شود: گالیله‌ای که به بالای برج پیزا رفته و دو جسم سبک و سنگین را رها می‌کند تا نشان دهد آنها هم‌زمان به زمین می‌رسند.

فراموش نکنیم که بر طبق فیزیک ارسطویی، جسم سنگین‌تر باید سریع‌تر به مرکز هستی - که همان زمین بود - نزدیک شود.

البته گالیله به نوعی بحث مقاومت هوا را می‌فهمید. به خاطر همین ادعایش این بود که اگر دو جسم، شکل ظاهری یکسان داشته باشند و وزن آنها متفاوت باشد، دقیقاً هم‌زمان به زمین خواهند رسید.

با مروری مختصر بر شواهد تاریخی به نظر می‌رسد که گالیله برای اثبات قانون گرانش خود، چیزی را از بالای برج پیزا به پایین پرتاب نکرده است.^{۱۴}

^{۱۴} معدود مورخانی هم که معتقدند چنین آزمایشی واقعاً روی داده است، این نکته را می‌پذیرند که چنین تجربه‌ای صرفاً جنبه‌ی نمایش داشته و گالیله استدلال خود را بر منطقی دیگر بنا نهاده است.

شیوه‌ای که گالیله مورد استفاده قرار داد را می‌توان یکی از نخستین نمونه‌های تجربه‌های ذهنی^{۱۰۵} در دوران مدرن در نظر گرفت. گالیله چنین آزمایشی را تصور کرد:

فرض کنید دو جسم از جنس مشابه و با وزن متفاوت را با ریسمان کوتاهی به یکدیگر متصل کنیم و آنها را از ارتفاع مشخصی رها کنیم.

بر اساس قانون گرانش ارسطویی، باید جسم سنگین‌تر سریع‌تر و جسم سبک‌تر کندتر سقوط کند. پس بعد از مدت کوتاهی نخ به صورت کاملاً کشیده قرار می‌گیرد و جسم سبک‌تر، حرکت جسم سنگین‌تر را کند می‌کند.

بر این اساس می‌توانیم بگوییم که سرعت سقوط این مجموعه از سرعت سقوط جسم سنگین‌تر کمتر خواهد بود.

اما باز هم بر اساس قانون گرانش ارسطویی، وقتی دو جسم را به یکدیگر متصل می‌کنیم، جسم سنگین‌تری ایجاد می‌شود که وزن آن از هر دو جسم قبلی بیشتر است. پس باید سرعت سقوط آن حتی از سرعت سقوط جسم سنگین هم بیشتر باشد.

گالیله می‌دید که قانون گرانش ارسطویی به دو نتیجه‌ی متعارض و متضاد منجر می‌شود و بر این اساس، نمی‌تواند درست باشد.

تنها حالت قابل تصور این بود که اجسام، مستقل از وزن‌شان با سرعت و شتاب یکسان سقوط کنند.

گالیله برای سنجش عملی ایده‌اش، به سراغ برج پیزا رفت؛ بلکه از روش‌های تجربی ساده‌تر و قابل اتکاتر استفاده کرد^{۱۰۶}. روش او در آزمایشگاه، استفاده از سطح شیب‌دار برای شبیه‌سازی سقوط آزاد بود.

گالیله گلوله‌های مختلف را بر روی سطح شیب‌دار قرار می‌داد و سرعت سقوط آنها را با یکدیگر مقایسه می‌کرد. چون معتقد بود که پایین غلتیدن از سطح شیب‌دار از لحاظ ماهیت تفاوتی با سقوط آزاد ندارد و با این کار صرفاً سرعت و شتاب کمتری به وجود می‌آید و اندازه‌گیری زمان رسیدن به زمین ساده‌تر می‌شود.

نگاه ارسطو به حرکت هم بخش دیگری از مکانیک ارسطویی بود که گالیله با آن مشکل داشت. تعریف ارسطو از حرکت،

¹⁰⁵ Thought Experiment

¹⁰⁶ کافی است به این نکته توجه داشته باشیم که مدت زمان سقوط آزاد یک جسم از بالای برج پیزا بر روی زمین (بدون لحاظ کردن مقاومت هوا) حدود ۳ ثانیه است. بنابراین، مقایسه‌ی سرعت سقوط از برج پیزا در آن زمان که ابزارهای اندازه‌گیری دقیق زمان وجود نداشته عملاً کاری غیرممکن (یا لاقابل غیردقیق) بوده است.

تعریفی بسیار پیچیده است. او حرکت را بالفعل شدن یک توانایی بالقوه تعریف می‌کند^{۱۰۷}. به آن توانایی بالقوه انرژی^{۱۰۸} می‌گوید. لغت انرگون^{۱۰۹} هم در ادبیات معاصر ارسطو به معنای مشغول به کار بوده است و انرژی را می‌شود آماده به کار معنا کرد. لغت انرژی که امروز در بسیاری از زبان‌های دنیا به کار می‌رود، در واقع واژه‌ای است که توسط ارسطو اختراع شده و برای نخستین بار در کتاب فیزیک او به کار رفته است.

ارسطو حرکت جسم متحرک را با واژه‌ی *ἐντελέχεια*^{۱۱۰} توصیف می‌کرد و این گونه توضیح می‌داد که جسمی که حرکت می‌کند حرکت بالقوه‌ی خود را به حرکت بالفعل تبدیل کرده است.

تا اینجا حرف‌های ارسطو زیبا و هیجان‌انگیز به نظر می‌رسند. قاعدتاً حتی آشنایی مقدماتی با فیزیک و مکانیک هم باعث می‌شود حرف‌های او ما را به یاد بحث‌های انرژی جنبشی و پتانسیل بیندازد و از اینکه کسی بیست و چهار قرن قبل، به چنین مباحثی فکر می‌کرده و چنین توصیف‌هایی برای حرکت داشته شگفت‌زده شویم.

اما اگر بخواهیم تصویر مکانیک ارسطویی را در ذهن گاليله و اثر مکانیک ارسطویی را بر پارادایم فکری حاکم بر قرون وسطی بهتر درک کنیم، بهتر است مروری به کارهای توماس آکویناس^{۱۱۱} بیندازیم.

اگرچه در این حوزه متخصص نیستم و اطلاعات عمیقی ندارم، اما در حدی که فرصت مطالعه‌ی ترجمه‌های انگلیسی آثار آکویناس را داشته‌ام، چنین فکر می‌کنم که روح علم در قرون وسطی را نمی‌توان بدون هم‌نشینی و هم‌کلامی با آکویناس لمس و درک کرد^{۱۱۲}.

با مطالعه‌ی آثار توماس آکویناس می‌توانیم اهمیت و جایگاه ارسطو را در جهان بینی کلیسا بهتر و بیشتر درک کنیم. آکویناس به ارسطو احترام می‌گذارد. البته احترامی که به ارسطو می‌گذارد به هیچ وجه با احترام شگفت‌انگیزی که ابن سینا برای ارسطو

¹⁰⁷ A., Waterfield, R., & Bostock, D. (2008). Physics. Oxford: Oxford University Press.

¹⁰⁸ Energeia

¹⁰⁹ Energon

¹¹⁰ Entelecheia

¹¹¹ Thomas Aquinas

^{۱۱۲} آکویناس از مشاهیر بزرگ دوران اسکولاستیک محسوب می‌شود. دورانی که نظریه‌های علمی تنها در صورتی مورد تایید بودند که با نظریات کلیسا در تضاد و تعارض نباشند و ترجیحاً نه تنها تضادی با نظریات نداشته باشند، بلکه تلویحاً یا تصریحاً نظریات کلیسا را تایید و تقویت کنند. آکویناس به علم (با این تعریف که گفتیم) دل‌بستگی داشت و می‌توان او را از بزرگترین و اثرگذارترین مشاهیر الهیات طبیعی در کل تاریخ دانست. الهیات طبیعی در نگاه آکویناس، به معنای پذیرش هم‌سودن الهیات و علوم طبیعی بوده است. اما امروز با مرور کارهای آکویناس می‌توانیم بگوییم عملاً الهیاتی بوده است که می‌کوشیده قوانین طبیعی را به عنوان پشتوانه‌ی دفاع از جهان بینی خود به خدمت بگیرد.

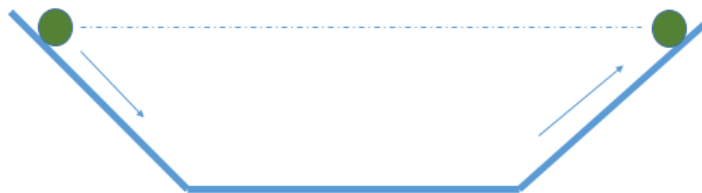
قائل است قابل مقایسه نیست. با این حال، بارها از او با نام و صفت فیلسوف یاد می‌کند و نظریات او را به دیدی نظرات کارشناسی مورد نقل و استناد قرار می‌دهد.

آکویناس اگر چه معتقد است که تعریف ارسطو از حرکت، واضح و شفاف نیست و می‌تواند حاوی تناقض‌هایی باشد، اما تاکید می‌کند که این تنها شیوه‌ای است که می‌توان حرکت را تعریف کرد و شیوه‌ی دیگری قابل تصور نیست.

وجود انرژی درونی و تبدیل شدن تدریجی آن به حرکت را - در نگاه ارسطویی - می‌توان به عنوان شکوفا شدن و ظهور داشته‌های درونی تعبیر کرد^{۱۱۳}.

فراموش نکنیم که در آن زمان، پیدا کردن توضیحی برای حرکت و چرخش دائمی ماه، خورشید و ستارگان، مسئله‌ی مهمی محسوب می‌شد. چون نگرش ارسطویی نوعی روح را حاکم بر این حرکت‌ها می‌دانست، با نگرش کلیسا که می‌خواست حضور دائمی ماوراء الطبیعت در طبیعت را مورد تاکید قرار دهد، همسو و هم‌راستا بود.

حالا با تصور کردن آن فضا، به این آزمایش گالیله توجه کنید:



گالیله می‌دید وقتی گلوله‌ای از بالای سطح شیب‌دار رها شده، شتاب می‌گیرد و به سطح افقی می‌رسد؛ دوباره تا همان ارتفاع بالا می‌رود (او اصطکاک‌ها را کم می‌کرد و گوشه‌ها را هم برخلاف آنچه من ترسیم کرده‌ام تیز نمی‌ساخت).

گالیله با تغییر دادن شیب به نتیجه‌ی جالبی رسید:

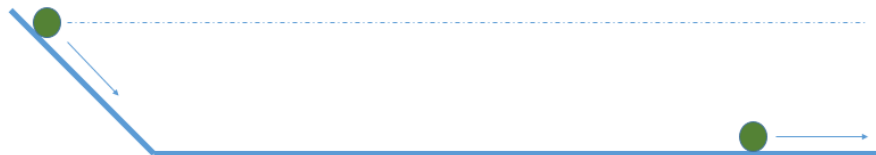


با تغییر دادن شیب، گلوله فاصله‌ی بیشتری را طی می‌کرد، چون می‌خواست باز به همان ارتفاع اولیه - که از آن رها شده بود

^{۱۱۳} در ترجمه‌های انگلیسی کارهای ارسطو هم، Entelecheia را به Actualization ترجمه می‌کنند.

- برسد.

گالیله با همین منطق به نتیجه رسید که اگر سطح شیب‌دار دوم را افقی بسازد و اصطکاک وجود نداشته باشد، حرکت گلوله هرگز متوقف نخواهد شد. چون گلوله می‌خواهد آن قدر برود تا به ارتفاع اولیه برسد و اگر تا بی‌نهایت هم برود به آن ارتفاع نخواهد رسید.



احتمالاً تا اینجا، آنچه را می‌خواهم بگویم در ذهن شما هم نقش بسته است.

اول اینکه گالیله، عملاً قبل از نیوتون به بحث اینرسی توجه داشته و قانون اول نیوتون، در واقع برپایه‌ی تجربیات گالیله شکل گرفته و صرفاً آن را در قالبی دقیق‌تر و ظریف‌تر بیان می‌کند.

دوم هم اینکه کلیسا نمی‌توانست گالیله را دوست داشته باشد. جهان گالیله بیش از حد مکانیکی بود. در جهان گالیله، اجرام آسمانی می‌توانستند روزی حرکت را آغاز کرده باشند و اکنون، بدون دخالت غیرفیزیکی در حال ادامه دادن حرکت خود باشند.

بنابراین، نخستین تضاد جدی گالیله و کلیسا، قبل از اینکه به بحث زمین‌مرکزی یا خورشیدمرکزی بازگردد، به خاطر مکانیک گالیله‌ای و گرانش گالیله‌ای شکل گرفت.

بعد از این مقدمات، می‌توانیم به سراغ قسمت مشهور داستان گالیله برویم. گالیله، نگاه خورشیدمرکز^{۱۱۴} کوپرنیک را به عنوان یک واقعیت قطعی قبول داشت.

مهم است به خاطر داشته باشیم برخلاف تصور امروزی عامه‌ی مردم، کلیسا (تا سال ۱۶۱۶) مشکل جدی با تئوری کوپرنیک نداشت. صرفاً اصرار داشت که تئوری کوپرنیک باید به عنوان یکی از انواع مدل‌های توصیف نجومی و نه به عنوان تنها مدل قابل اتکا مورد بحث و توجه قرار بگیرد^{۱۱۵}. طبیعتاً وقتی مدل کوپرنیک را به عنوان یکی از مدل‌ها می‌پذیریم، یکی دیگر از

^{۱۱۴} Heliocentric

^{۱۱۵} این نوع مواجهه‌ی کلیسا با کوپرنیک را بعداً در مواجهه‌ی کلیسا با داروین هم دیدیم. در کل، مروری بر تاریخ کلیسا - لاقابل از نگاه من - یک روند رفتاری جالب را در این «نهاد» نشان می‌دهد. کلیسا تا وقتی احساس کند که علم به جایی نرسیده، می‌گوید من «حقیقت» را می‌دانم. وقتی علم به جایی رسید و کلیسا

مدل‌ها، مدل پیشنهادی کلیسا خواهد بود^{۱۱۶}.

به همین علت است که می‌بینیم در ۱۶۱۰ که گالیله در کتاب خود، به کشف چهار قمر مشتری اشاره می‌کند، هنوز مخالفت خیلی جدی با او آغاز نمی‌شود. در حالی که به هر حال چهار قمر کشف شده بودند که به دور چیزی غیر از زمین می‌چرخیدند.

حدود دو سال گذشت تا کم‌کم منتقدان احساس کردند، بحث گالیله فراتر از یک نظریه است و او دیدگاهش را در حد یک واقعیت علمی قطعی می‌داند.

موج مخالفت با گالیله حدود دو سال بعد در ۱۶۱۲ راه افتاد. گالیله از مخالفانش می‌خواست که به آزمایشگاه او بیایند و به کمک تلسکوپ، قمرهای مشتری را ببینند.

عده‌ی زیادی از منتقدان او، معتقد بودند که نادرست بودن این بحث چنان واضح است که حتی به قدم رنجه کردن و چسباندن چشم به عدسی تلسکوپ نمی‌ارزد.

عده‌ی دیگری هم که حاضر شدند داخل تلسکوپ را تماشا کنند، ترجیح دادند آن را صرفاً اعوجاجات نوری شیطانی بدانند. البته افراد واقع‌گراتری هم بودند که به جای شیطان، گالیله را به ترسیم چند نقطه روی لنز تلسکوپ متهم می‌کردند^{۱۱۷}.

وقتی از مخالفت کلیسا با گالیله حرف می‌زنیم، باید به تعدد فرقه‌های مسیحی هم توجه کنیم. در آن زمان دو فرقه‌ی مهم قدرت سیاسی و مذهبی را در اختیار داشتند: یسوعیان^{۱۱۸} که فرقه‌ای قدرتمندتر بودند و دومینیک^{۱۱۹}‌ها که بیشتر به واسطه‌ی نگاه سنتی‌شان شناخته می‌شدند.

هنوز قدرت داشت میگوید: «علم بپذیرد که آنچه می‌گوید یک مدل است. ما هم البته یک مدل داریم».

وقتی دیگر به هیچ شکل نمی‌توان علم را انکار کرد می‌گوید: «بیایید به عقاید یکدیگر احترام بگذاریم».

^{۱۱۶} نکته‌ی دیگری هم وجود دارد که معمولاً در روایت‌های عمومی از داستان گالیله مغفول می‌ماند. گالیله هم مخالفتی با مذهب نداشته و اتفاقاً نگرشی مذهبی داشته است. اما اختلاف نظرش با کلیسا بر سر این بود که نباید تک‌تک واژه‌های کتاب مقدس را دقیقاً براساس معنای ظاهری آنها تفسیر کنیم. چون در این صورت گرفتار تضادها و تعارض‌های بسیاری خواهیم شد. منطقی است که آنها را به صورت بحث‌هایی استعاری در نظر بگیریم. نامه‌ای که گالیله به کریستین دو لورن در سال ۱۶۱۵ نوشته، نامه‌ای بسیار خواندنی در این زمینه است. اما چون از بحث من خارج است، مطالعه‌ی این نامه‌ی زیبا و ارزشمند را به خواننده واگذار می‌کنم.

^{۱۱۷} Finocchiaro, M. A., Galilei, G., & Galilei, G. (1991). *The Galileo affair: a documentary history*. New York: Leslie B. Adams, Jr.

^{۱۱۸} Jesuits

^{۱۱۹} Dominican

بررسی تفاوت این دو فرقه و اندیشه‌ها و تاریخشان خارج از حوزه‌ی بحث ماست. اما مهم این است که یسوعیان، علاوه بر تسلط مذهبی، بر حوزه‌های علمی هم تسلط داشتند.

آنها در ابتدا (سالهای ۱۶۱۳) با گالیله چندان موافق نبودند. اما وقتی خودشان تلسکوپ‌های جدیدتر و بهتری تهیه کردند و قمرهای مشتری را - که گالیله کشف کرده بود - دیدند، حرف او را انکار نکردند.

تنها بحثی که داشتند این بود که مدل خورشیدمرکزی می‌تواند یک مدل باشد. اما تمام شواهد و تجربیات ما این است که زمین ثابت است و خورشید مرکزی با شهود و تجربه سازگار نیست. حتی اینکه جایی در آسمان قمرهایی دور چیزی دیگر می‌چرخند نمی‌تواند اثباتی بر این باشد که زمین حرکت می‌کند.

آنها به گالیله گفتند که مدل خورشیدمرکزی مدل ارزشمندی برای محاسبات نجومی است و می‌توان از آن به عنوان یک ابزار استفاده کرد. اما برای اینکه معتقد باشیم این مدل فراتر از ابزار است و در مورد واقعیات دنیای بیرونی حرف می‌زند، باید شواهد علمی و تجربی بیشتری داشته باشیم.

یسوعیان که روش علمی را به خوبی می‌شناختند و به کار می‌بردند، از گالیله انتظار داشتند که در مقام دانشمند، از روش علمی قابل اتکا برای اثبات حرف خود استفاده کند.

گالیله در اینجا استدلال مهم و نادرستی را مطرح می‌کند: او با اشاره به جزر و مد دریا می‌گوید که جزر و مد، به خاطر حرکت زمین ایجاد می‌شوند. حتی اگر یک لیوان آب را هم با شتاب حرکت دهید، ارتفاع آب داخل آن تغییر خواهد کرد.

امروز می‌دانیم که استدلال گالیله کاملاً غلط بوده است و جزر و مد به خاطر گرانش ماه (و نه چرخش زمین) ایجاد می‌شود.

در سال ۱۶۱۶، ماجرا جدی‌تر شد. سازمان تفتیش عقاید یا انگیزاسیون^{۱۲۰} رسماً دستور داد که هیچ جا عقاید کوپرنیک تدریس نشود. این حکم صرفاً در مورد گالیله اعمال نمی‌شد، اما طبیعتاً گالیله هم مشمول آن بود. شاید بتوان گفت در میان معلمان آن دوران، گالیله بزرگترین معلمی محسوب می‌شد که باید به خاطر حکم ضدکوپرنیکی، سرفصل‌های آموزشی‌اش را تغییر می‌داد^{۱۲۱}.

گالیله سرنوشت ژوردانو برونو را به خوبی به خاطر داشت. چون فقط شانزده سال از بریان شدن دو شبانه‌روزی او در میانه‌ی

¹²⁰ Inquisition

^{۱۲۱} انگیزاسیون، سازمانی وابسته به کلیسا بود که به شکنجه‌های مخوف به خاطر عقاید انسان‌ها، شهرت داشت. قدرت این سازمان بیش از هر جای دیگری در شمال ایتالیا و جنوب فرانسه احساس و تجربه می‌شد.

شهرمی گذشت. به همین علت، بلافاصله دستور را اطاعت کرد و تدریس نظریه‌ی کوپرنیک را کنار گذاشت.

اما در اینجا نباید بخش‌های مهمی از تاریخ را به دست فراموشی بسپاریم.

گالیله در سال ۱۶۱۶ سفری به رم داشت و اتفاقاً در آن سفر به خوبی و با مهربانی از او پذیرایی شد. او در رم علاقمندان زیادی داشت. کاردینال روبرت بلامین^{۱۲۲} که اتفاقاً جزو هیأتی بود که دستور سوزاندن برونورا صادر کردند، با گالیله با مهربانی صحبت کرد. آنها قبلاً هم چند بار با هم قدم زده بودند و گپ‌های دوستانه‌ای داشتند.

کاردینال که یک یسوعی مطلع و وفادار به روش‌های علمی بود به او توضیح داد که تو برای نظریات شواهد علمی نداری. تا شواهد علمی کافی فراهم نکرده‌ای، آن را تدریس نکن و خودت هم نظریه‌ی خورشیدمرکز را بیشتر از یک نظریه و ابزار محاسباتی جدی نگیر.

برای اینکه مطمئن شوید آن زمان موضع کلیسا در مورد گالیله چندان منفی نبوده کافی است به نامه‌ای که روبرت بلامین برای گالیله نوشته است مراجعه کنید.

گالیله شنید که دومینیک‌ها می‌گویند گالیله به رم رفته و توبه کرده و پذیرفته که نظریاتش اشتباه است. او با کاردینال روبرت بلامین (فراموش نکنید که او برونورا سوزانده بود) صحبت کرد و گفت: شایعه شده که من توبه کرده‌ام و پذیرفته‌ام که کارهایم اشتباه بوده است. در حالی که شما فقط گفتید جایی درس ندهم. آیا می‌توانید نامه‌ای بنویسید و تایید کنید که من را وادار به توبه نکرده‌اید؟

این نامه در ششم ماه می سال ۱۶۱۶ توسط شخص بلامین نوشته شد^{۱۲۳}. بلامین توضیح داد که نه ما نه هیچ فرد دیگری در رم آزاری به گالیله نرسانده و از او هم نخواستیم تقاضای توبه و بخشایش کند. صرفاً به او توضیح داده‌ایم که دکتترین کوپرنیک در مورد زمین و خورشید با متون مقدس در تضاد است و قابل دفاع نیست. ما این نامه را به عنوان گواهی نوشته‌ایم و به او می‌دهیم.

اما گالیله همزمان کار روی کتابش را که در زمینه‌ی نظریه‌ی کوپرنیک بود آغاز کرد. آن زمان محدودیت تدریس بیشتر از محدودیت تالیف بود و گالیله فکر می‌کرد که می‌تواند به این شیوه، به تثبیت نظریه‌ی کوپرنیک کمک کند.

¹²² Robert Bellarmine

¹²³ متن نامه را به سادگی با جستجو در اینترنت می‌توانید بیابید.

او کتابش را در قالب یک گفتگو نوشت و نام این کتاب را گفتگو درباره دو سیستم اصلی نگاه به جهان^{۱۲۴} نامید. در این کتاب، نظریه‌ی کوپرنیک صرفاً به عنوان یک فرضیه مطرح می‌شد و موافقان و مخالفان در موردش صحبت می‌کردند.

او در سال ۱۶۳۰ از اداره‌ی سانسور حکومت رم، مجوز چاپ کتابش را دریافت کرد^{۱۲۵}.

در آن زمان، پاپ اربن هشتم^{۱۲۶} در راس قدرت بود. این پاپ یسوعی از دوستان گالیله هم محسوب می‌شد. حتی اگر کمی دقیق‌تر بررسی کنیم، می‌بینیم که او گالیله را به انتشار کتابش تشویق هم کرده است. تنها چیزی که پاپ از او خواست این بود که جایی در کتابش این جمله را هم بگنجانند که خداوند، جهان را به شکلی آفریده که ممکن است برای یک پدیده‌ی واحد، علت‌های متعددی قابل تصور باشد^{۱۲۷}.

گالیله اگرچه در چاپ کتابش این بخت را داشت که حتی از حمایت پاپ هم بهره‌مند شود، اما ظاهراً طبیعت با او چندان یار نبود. طاعون در همان سال در رم شایع شد و گالیله نتوانست کتابش را در رم منتشر کند. این بود که پس از مدتی انتظار، کتاب را در سال ۱۶۳۲ در فلورانس منتشر کرد (بدون اینکه مجوزی برای انتشار آن در فلورانس داشته باشد).

کتاب گفتگو، روایتی از گفتگوی سه نفر است که طی سفری چهار روزه در اطراف ایتالیا با هم همراه هستند. دو نفر از آنها متخصص تر هستند و یک نفر، فردی عامی محسوب می‌شود. این را از نام‌گذاری‌های آنها هم می‌شود فهمید.

فرد عامی، سیمپلیچیو^{۱۲۸} نام دارد و از ارسطو و بطلمیوس دفاع می‌کند. شخصیت دیگر که کمی بی‌طرف به نظر می‌رسد، ساگردو^{۱۲۹} نام دارد و شخصیت سوم - که به گالیله نزدیک‌تر است و از کوپرنیک دفاع می‌کند - سالویاتی^{۱۳۰} نام گرفته است.

¹²⁴ Galilei, G., Drake, S., Einstein, A., & Sobel, D. (2013). *Dialogue concerning the two chief world systems: Ptolemaic and Copernican*. London: The Folio Society.

¹²⁵ سانسور در آن زمان یک مقام رسمی محسوب می‌شده است. این واژه از Census به معنای آمار گرفته شده و در واقع اداره‌ای که متولی آمار بوده، متولی نظارت بر کتاب و صدور مجوز نشر کتاب هم بوده است. اگرچه واژه‌ی سانسور که ما امروز به کار می‌بریم دقیقاً از همین سمت در رم باستان گرفته شده است، اما فراموش نکنیم که آن زمان این واژه تا این حد دارای بار معنایی منفی نبوده است. درست همان‌طور که امروز می‌گوییم بروم مجوز فلان کار را بگیرم و برگردم، آن روزگار می‌گفته‌اند: یک سرب‌ه اداره‌ی سانسور بزنم و بیایم.

¹²⁶ Pope Urban VIII

¹²⁷ جزر و مد، ممکن است به علت اراده‌ی خداوند باشد یا به علت گردش زمین یا هر دو.

¹²⁸ نام Simple از Simple به معنای ساده گرفته شده و نوعی ساده‌لوحی را در خود دارد. شاید با این نام‌گذاری ولتر را به خاطر بیابورید که نام شخصیت ساده‌لوح داستان را کاندید (به همین معنای ساده‌دل) گذاشته است.

¹²⁹ Sagerdo

¹³⁰ Salviati

در کل کتاب، ساگردورا فردی هوشمند و زیرک می‌بینیم که به تدریج از موضع بی‌طرفانه‌ی خود، به سمت موضوع کوپرنیکی (که توسط سالویاتی ارائه می‌شود) میل پیدا می‌کند.

گالیله به قیدی که پاپ برای او گذاشته بود وفادار ماند و آن جمله را در کتابش گنجاند. اما ترجیح داد جمله را در دهان سیمپلیچیو بگذارد.

ماجرا به همین جا تمام نشد. گالیله تا آخرین خط از آخرین صفحه‌ی کتاب صبر کرد تا مطمئن شود که خواننده متوجه می‌شود که سیمپلیچیو، با عقاید گالیله همسو نیست. سپس آن جمله را از قول او نقل کرد.

اما باز هم طاق‌نیاورد و پایان گفتگورا به سالویاتی (خودش) سپرد. سالویاتی پس از شنیدن نحوه‌ی فکر کردن و استدلال کردن سیمپلیچیو می‌گوید: آفرین. تو چقدر معصومانه فکر می‌کنی.

می‌توانید حال پاپ را هنگام خواندن کتاب تصور کنید. او تمام حمایت خود را به خرج داده بود تا گالیله بتواند حرف‌هایش را مطرح کند. اما رفتار گالیله به شکلی بود که پاپ خود را فریب خورده و بازنده حس می‌کرد.

فقط کافی است به خاطر داشته باشید که جنبش پروتستانیسم هم آن زمان قوت گرفته بود و حساسیت بر روی این نوع نوشته‌ها زیاد بود. دادگاه تفتیش عقاید هم که ریشه در اسپانیا و شمال ایتالیا داشت، پاپ رَم را به تساهل بیش از حد با نظریه‌های مخالف متهم می‌کرد.

البته در مورد گالیله، بحث فقط تساهل نبود. بلکه معتقد بودند که گالیله با تشویق و حمایت مستقیم پاپ، کتابش را چاپ کرده است. پاپ در اینجا هم از طرف گالیله به تمسخر گرفته شده بود و هم هم کیشانش از او دلگیر بودند.

کلیسای کاتولیک، احساس کرد که تبلیغ نظریه‌ی کوپرنیک و پذیرفتن حرکت زمین از طریق این کتاب، می‌تواند بسیار خطرناک باشد. آنها حتی اعلام کردند که خطر گالیله از خطر مارتین لوتر (چهره‌ی مشهور پروتستان) هم بیشتر است.^{۱۳۱}

همه‌ی این ماجراها به تشکیل دادگاه برای گالیله منجر شد و باقی ماجراهایی که به خوبی از آنها مطلع هستید. او تحت شکنجه‌ی درجه‌ی دو قرار گرفت^{۱۳۲}. بعد از چهار بار بازجویی، توبه کرد و صرفاً به زندانی شدن در خانه (در ۱۶۳۴) محکوم شد. البته حق تالیف و تدریس از او گرفته نشد. فقط نمی‌توانست از محدوده‌ای که در آن محصور بود بیرون بیاید. گالیله

¹³¹ Biagioli, M. (2006). Galileo, courtier: practice of science in the culture of absolutism. Chicago: Univ. of Chicago Press.

^{۱۳۲} شکنجه‌ی درجه‌ی یک، تهدید به شکنجه است. شکنجه‌ی درجه‌ی دو، بردن فرد به محل شکنجه و نشان دادن ابزارهای شکنجه و شکنجه‌ی درجه سه، اعمال واقعی شکنجه است.

در ۱۶۳۸ نابینا شد و در ۱۶۴۲ فوت کرد^{۱۳۳}.

بد نیست بعد از مرور این داستان، به ماجرای خودمان بازگردیم. فرانسیس بیکن و گالیله تا پایان بحث پیچیدگی در کنار ما خواهند بود و به ما در درک بهترین مبحث کمک خواهند کرد. اما در اینجا نکته‌ای کلیدی هست که باید به خاطر بسپاریم: اگر از دادگاه نهایی گالیله - که بیشتر دادگاهی سیاسی و نوعی انتقام از رفتار او در کتابش محسوب می‌شد - بگذریم، آن چه تا قبل از دادگاه در گفتگو میان گالیله و کلیسا می‌بینیم، می‌تواند درس بزرگی را به ما بیاموزد.

گالیله حرف درستی می‌زد (چرخش زمین به دور خورشید)، اما روش استدلالی او کاملاً نادرست بود (استفاده از جزر و مد برای اثبات حرکت زمین).

کلیسا منطق درستی داشت و می‌گفت که تا شواهدی دقیق در تایید یک نظریه نیست، نباید آن را بیشتر از یک نظریه دانست، اما حاصل این نگرش نتیجه‌ای نادرست بود (سکون زمین)^{۱۳۴}.

روی کاغذ و در تئوری، روش درست همیشه به نتیجه‌ی درست می‌رسد و روش نادرست به نتیجه‌ی نادرست منتهی می‌شود. اما در دنیای واقعی می‌دانیم که ازدواج بین روش و نتیجه توسط انسان انجام می‌شود و به همین علت گاه، درست و نادرست بودن نتیجه از درستی و نادرستی روش جدا می‌شود.

مسیر علم را مغزهایی می‌سازند و هموار می‌کنند که بیکن و گالیله، همزمان دوست و مهمان‌شان باشند.

از بیکن، حساسیت به روش را بیاموزند و برای بهبود روش‌ها تلاش کنند و از گالیله، بیاموزند که وقتی شواهدی در نقص روش می‌بینند، شجاعت شکستن چارچوب‌ها را داشته باشند. به هر حال دیر یا زود، از بین جهان‌بینی و ابزار، یکی که

^{۱۳۳} درگذشت گالیله، اتفاق مهمی در تاریخ علم محسوب می‌شود. چون بسیاری از دانشمندان دیگر، پس از مشاهده‌ی روندی که از برونو به گالیله ختم می‌شد، تصمیم گرفتند به شمال اروپا (که قدرت پروتستان‌ها در آنجا بیشتر بود) مهاجرت کنند.

البته نباید فکر کنید که پروتستان‌ها حامی روش علمی بودند. اما آنها در مقایسه با جنوب اروپا، قدرت کمتری در ساختار حکومتی داشتند. آثار آن رویدادها و اتفاق‌ها (که برونو و گالیله تنها نمونه‌هایی از آن هستند) هنوز هم باقی مانده است. حتی امروز هم اگر با ترسیم خطی افقی نقشه‌ی اروپا را حدوداً به دو بخش تقسیم کنید، تفاوت‌هایی محسوس بین وضعیت شمال و جنوب قابل مشاهده است.

حتماً می‌دانید که در سال ۱۸۳۵ کلیسا کتاب‌های گالیله را از فهرست کتاب‌های ممنوعه خارج کرد و در سال ۲۰۰۰، پاپ ژان پل دوم به خاطر رفتارهای نامطلوبی که برخی از مسیحیان در دوهزارسال گذشته داشته‌اند عذرخواهی کرد. یکی از شاخص‌ترین نکات مورد اشاره در عذرخواهی پاپ، محاکمه‌ی گالیله بود.

^{۱۳۴} شبیه همین ماجرا در مورد بولتزمن هم وجود دارد. احتمالاً از تمام نوشته‌های من، عشق و علاقه و احترامی را که نسبت به بولتزمن در وجود خود حس می‌کنم لمس کرده‌اید. اما این را هم باید به خاطر داشته باشیم که دانشمندان مخالف بولتزمن - که او را تا خودکشی کشاندند - از نظر روش علمی حرف درستی می‌زدند. آنها می‌گفتند اتم در بهترین حالت، یک آنالوژی است. اینکه یک مدل توانسته مسائل بسیاری را حل کند و توضیح دهد به تنهایی باعث نمی‌شود که آن را به عنوان یک فکت بپذیریم. اتم، چیزی فراتر از یک مدل نیست؛ مگر آنکه داده‌های تجربی مستقیم بیشتری فراهم شود.

عقب مانده است، خود را به دیگری می‌رساند و انسان، یک گام در مسیر درک هستی به پیش می‌رود.

هیچ چیز را نمی‌بینید؛ مگر آنکه استعاره‌ی مناسب برای درک آن بیابید.
جمیز گلیک، کتاب آشوب

استخوان‌های غلتان

سوفوکل، شاعر یونانی در قرن پنجم قبل از میلاد، مدعی است که تاس توسط یونانیان در نبرد تروا اختراع شده است. به هر حال، کم نیستند نویسندگان و تحلیل‌گران و مورخانی که هر چه در تاریخ عقب می‌روند، نشانه‌های برتری و نوآوری را جز در میان نیاکان خود نمی‌یابند.

سوفوکل، وقتی از بخت شیرین ژئوس می‌گوید، چنین روایت می‌کند که: ژئوس، هر جور که تاس بریزد، برایش خوب می‌آید. هرودوت، به عنوان تاریخ‌نویسی با تعصب کمتر که افق جغرافیایی گسترده‌تری را مد نظر قرار می‌دهد، معتقد است که لیدیایی‌ها تاس را چند قرن قبل از آن تاریخ اختراع کرده‌اند.^{۱۳۵}

امروز می‌دانیم که مصریان باستان، دوهزار سال قبل از میلاد مسیح، در کنار انواع زیورآلاتی که در گور مردگان خود دفن می‌کردند، تاس‌هایی را هم قرار می‌داده‌اند.^{۱۳۶}

اما ظاهراً هر چه عقب‌تر می‌رویم، باز هم می‌توانیم تاس را در زندگی انسان‌ها ببینیم. بر اساس کشفیاتی که تا امروز انجام شده، حداقل ۶۰۰۰ سال است که انسان از تاس استفاده می‌کند. به عبارتی، انسان‌ها مدت‌ها قبل از اینکه اعداد را اختراع کنند، تاس را اختراع کرده‌اند.

البته جنس و شکل تاس در طول زمان تغییر کرده است. سنگ، چوب، استخوان حیوانات، عاج فیل و فلزات، از جمله موادی بوده‌اند که از آن‌ها برای ساخت تاس استفاده شده است. هم‌چنین تاس‌ها همیشه شش وجهی نبوده‌اند. در گذشته‌های دور تاس‌ها را به شکل هرم و چهاروجهی می‌ساختند.^{۱۳۷}

¹³⁵ David, F. N. (1998). Games, gods and gambling: a history of probability and statistical ideas. Mineola, N.Y.: Dover.

^{۱۳۶} کاپفر، وقتی از فلسفه لوکس‌گرایی صحبت می‌کند، معتقد است که لوکس بودن را بدون آشنایی عمیق با مصریان باستان نمی‌توان شناخت و درک کرد. آنها حتی وقتی شیشه را اختراع کردند، نخستین کاربردی که برای این محصول جدید به ذهن‌شان رسید، استفاده از آن برای نگهداری عطرهاشان بود. مصریان، به زندگی پس از مرگ اعتقاد داشتند. این باور چنان جدی بود که جسد بردگان در کنار اشراف و پادشاهان دفن می‌شد تا در جهان دیگر، از آنها مراقبت کند. پول و طلا و زیورآلات را هم همراه مردگان به خاک می‌سپردند تا پس از مرگ با پرداخت رشوه بتوانند گره‌های مسیر زندگی جاوید را ساده‌تر و سریع‌تر بکشایند.

¹³⁷ Ferentzy, P., & Turner, N. E. (2013). The History of Problem Gambling: Temperance, Substance Abuse,

به هر حال، داستان تاس‌ها و آدم‌ها^{۱۳۸} ظاهراً چنان کهن و ارتباط این دو، آن قدر قدیمی است که دانش باستان‌شناسی ما، نمی‌تواند تاریخ نخستین آشنایی آن دورا با دقت و اطمینان برآورد کند.

تاس‌ها در تمام طول تاریخ، در کنار انسان، ابهام و عدم قطعیت زندگی را به یاد او آورده و این واقعیت اجتناب‌ناپذیر را برای او شبیه‌سازی کرده‌اند.

انسان‌ها، با ریختن تاس، گاهی برده‌اند و گاهی باخته‌اند و این بازی کهن را نمادی از برد و باخت در زندگی و نتیجه‌ی غلتیدن تاس را خوش‌بختی و نگون‌بختی در رویدادهای واقعی عمر خود قلمداد کرده‌اند.

این چندوجهیِ پوچِ تاریخ‌ساز

«به نظر شما منطقی است؟ به من می‌گویند ۲۴ بار تاس بریز. اگر یک بار جفت شش آمد، تواز ما پول بگیر و اگر نیامد، همان مبلغ را به ما بده. همه‌ی دوستانم روی ۲۴ بازی می‌کنند و این بازی را سودده می‌دانند. اما من هر چه فکر می‌کنم، با این شرط، ممکن است پولم را از دست بدهم».

این سوال را در سال ۱۶۵۴، آنتوان گومبا^{۱۳۹} نجیب‌زاده‌ی فرانسوی از پاسکال پرسید^{۱۴۰}. امروز اگر یک کودک دبیرستانی پاسخ این سوال را نداند، احتمالاً در آزمون ورودی دانشگاه‌ها پذیرفته نخواهد شد. اما نباید فراموش کنیم که حدود چهار قرن قبل، پاسخ دادن به چنین پرسشی به هیچ وجه ساده نبوده است.

این تنها سوال آنتوان گومبا نبود. او به بازی بر سر شانس اعتقاد داشت و هر روز سوال‌های جدیدی برایش پیش می‌آمد. بلز

Medicine and Metaphors. New York: Springer.

^{۱۳۸} اگر چه واضح است، اما شاید بد نباشد تاکید و اقرار کنم که عنوان این فصل، با الهام از عنوان داستان موش‌ها و آدم‌ها، اثر ماندگار جان اشتین بک انتخاب شده است.

^{۱۳۹} Antoine Gombaud

^{۱۴۰} Apostol, T. M. (2007). *Calculus*. New York: Wiley.

پاسکال، در یک سلسله نامه‌نگاری با دوست خود فرما^{۱۴۱}، کوشید پاسخی برای این سوال و این نوع سوال‌ها بیابد^{۱۴۲}.

نامه‌نگاری‌های متعددی بین پاسکال و فرما انجام شد و محتوای آن نامه‌ها، امروز نخستین اثر جدی مکتوب در مورد احتمالات، «فرض» می‌شود.

البته عمده‌ا از واژه‌ی فرض استفاده می‌کنم. چون ابویوسف کندی، در قرن چهارم هجری (نهم میلادی) و حدود هشت قرن قبل از پاسکال و فرما، درکی عمیق و شگفت از مفاهیمی مشابه داشته است^{۱۴۳}.

او یکی از قدیمی‌ترین رمزنگاران و رمزگشایان تاریخ است و چندان گزاف نیست اگر او را آلن تورینگ عصر خود بدانیم. کندی، برای اینکه بتواند پیام‌های رمزگذاری شده را رمزگشایی کند، احتمال تکرار وقوع حروف و کلمات در نامه‌ها را محاسبه می‌کرد و با استفاده از این شیوه و شیوه‌هایی مشابه، کلید رمزگشایی از نامه‌ها را استخراج می‌کرد^{۱۴۴}.

^{۱۴۱} ما معمولاً پیر فرما (Pierre Fermat) را به علت دیگری به خاطر می‌آوریم. به خاطر آنچه به حدس فرما معروف است. فرما، مسئله‌ای را مطرح کرد که سیصد و پنجاه سال بعد اثبات شد. اما این مسئله را در حاشیه‌ی یک کتاب قدیمی یونانی در خانه‌اش نوشت (Arithmetica). فرما در آنجا توضیح داد که من می‌توانم این مسئله را اثبات کنم. اما چون حاشیه‌ی کتاب به اندازه‌ی کافی جا ندارد، فعلاً نمی‌توانم آن را اینجا بنویسم. هنوز گهگاه بحث می‌شود که آیا واقعاً فرما می‌توانسته آن حرف را اثبات کند یا نه. اما تقریباً همه پذیرفته‌اند که این صرفاً ادعایی زیرکانه بوده است. به همین علت آن را بیشتر به حدس فرما می‌شناسیم.

^{۱۴۲} متأسفانه پاسکال در ۳۹ سالگی به علت بیماری (ظاهراً به علت سرطان دستگاه گوارش یا تومور مغزی یا هر دو) درگذشت. مرگ زودرس این دانشمند بزرگ و متفکر ارزشمند، از جمله رویدادهای غم‌انگیز تاریخ علم است. اگر چه او در همین عمر کوتاه، تأثیر ماندگار خود را بر مسیر آینده‌ی علم گذاشت؛ اما به هر حال می‌توان تصور کرد که عمر طولانی‌تر او فرصتی ارزشمند برای نسل بشر محسوب می‌شد. به هر حال، اهل علم هم اهمیت این انسان بزرگ را فراموش نکرده‌اند و به بهانه‌های مختلف، دستاوردهای علمی به نام او مزین می‌شود. واحد فشار، پاسکال است و قانون تعادل سطوح مایع در هیدروستاتیک هم به قانون پاسکال مشهور است. هم نسلان من هم، برنامه‌نویسی را عموماً در کنار زبان BASIC با PASCAL یاد گرفته‌اند.

^{۱۴۳} Singh, S. (2009). *The code book: the science of secrecy from ancient Egypt to quantum cryptography*.

Bridgewater, NJ: Distributed by Paw Prints / Baker & Taylor.

^{۱۴۴} ظاهراً این هم از ویژگی‌های تاریخ است که هر چیزی در آن چند بار کشف و اختراع می‌شود. عدد صفر، آمار و احتمال، چرخش زمین به دور خورشید، محیط کره‌ی زمین و شبکه‌های اجتماعی دیجیتال، هر یک چند بار کشف، اختراع و استخراج شده‌اند. به هر حال، این را باید پذیرفت که اختراعات، اکتشافات، رویدادهای اجتماعی، سیاسی و فرهنگی، زاده‌ی هم‌بستری انسان‌ها و شرایط محیطی هستند. اگر چه شرایط محیطی را معمولاً به عنوان یک موجود، درک نمی‌کنیم و هم‌بستری انسان و محیط چندان برایمان قابل تصور نیست، اما در نگاه من، ازدواج انسان و شرایط محیطی، یکی از بهترین استعاره‌ها برای درک رویدادهاست. انقلاب‌ها، کشف‌ها، اختراع‌ها، حرکت‌های اجتماعی، جنگ‌ها و صلح‌ها، نه به تنهایی توسط یک یا چند فرد به وجود می‌آیند و نه صرفاً به جبر شرایط. انسان یا انسان‌هایی ظهور می‌کنند که با محیط، هم‌بستری می‌شوند و حاصل این هم‌بستری، آبستن شدن جامعه از یک رویداد است. شاید چنین نگاهی باعث شود ما همزمان از «اصالت قائل شدن برای قهرمانان» و «اصالت قائل شدن برای بستر تاریخی» فاصله بگیریم و به خاطر داشته باشیم که این دو، یک زوج پدیده‌ی مستقل نیستند. بلکه یک واقعیت واحد هستند که ما آن را دو تکه کرده‌ایم و یکی را «فرد» و دیگری را «تاریخ» نامیده‌ایم.

هویگنس^{۱۴۵}، دانشمندی که معاصر فرما و پاسکال بود با مطالعه‌ی آن نامه‌ها، توانست ساختار بهتری به این بحث بدهد^{۱۴۶} و سه سال بعد از آن مکاتبات، کتابی را در مورد احتمالات منتشر کرد. قمار و بازی بر سر شانس، در اروپای آن زمان بسیار رایج بود و به همین علت، کتاب هویگنس به صورت گسترده مورد استقبال قرار گرفت.

کتاب ژاکوب برنولی – که البته هشت سال پس از مرگش منتشر شد، گام بعدی در توسعه‌ی احتمالات محسوب می‌شود^{۱۴۷}. می‌توان انتشار این کتاب را تولد رسمی دانش احتمالات دانست.

توضیحات برنولی در فصل دوم این کتاب، تا حد خوبی تعریف علم احتمالات را از دیدگاه او، مشخص می‌کند:

هنر اندازه‌گیری احتمال هر رویداد،

با حداکثر دقت ممکن،

با این هدف که

بتوانیم در قضاوت‌ها و تصمیم‌گیری‌ها،

گزینه‌ای را انتخاب کنیم که بهتر، رضایت‌بخش‌تر، دارای مزیت بیشتر و مطمئن‌تر باشد.

نکته‌ی بسیار مهم در مورد کار برنولی این است که او پیشنهاد کرد احتمال وقوع یک رویداد، با عددی بین صفر تا یک نمایش داده شود. صفر به این معنا باشد که آن رویداد، هرگز به وقوع نخواهد پیوست و به عبارتی وقوع یک رویداد، محال است.

یک هم به این معنا باشد که آن رویداد، اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

هر عددی بین صفر تا یک، نشان می‌دهد که یک رویداد، ممکن است پیش بیاید و ممکن هم هست پیش نیاید. با در نظر گرفتن پارادایم حاکم بر قرن هفدهم، نباید ارزش رواج یافتن این نگرش را دست‌کم بگیریم.

تا آن زمان، همه چیز یا بود یا نبود. یا روی میداد و یا روی نمی‌داد. اگر هم جز این بود، سایه‌ی ابهام بر سر یک رویداد می‌نشست. همان چیزی که راه خرافات را صاف و هموار می‌کرد.

مسیری که از ابویوسف کندی تا برنولی (و بعداً گاوس و لاپلاس و بولتزمن) طی شد، به علم این قدرت را داد که به دنیای عدم قطعیت هم، پا بگذارد. حالا علم، با همان استحکام همیشگی، می‌توانست در مورد رویدادهایی که قبلاً خارج از قلمرو او محسوب می‌شدند، نظر بدهد.

¹⁴⁵ Christian Huygens

¹⁴⁶ Devlin, K. J. (2010). The unfinished game: Pascal, Fermat, and the seventeenth-century letter that made the world modern. New York (NY): Basic Books.

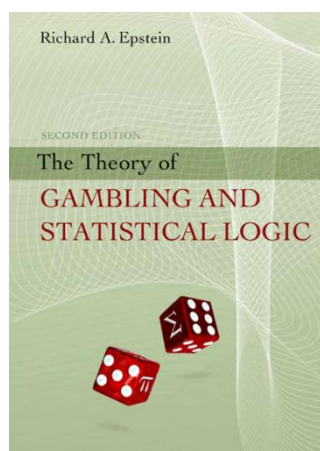
¹⁴⁷ The art of conjecture

بازی تاس گالیله – مثالی مناسب برای درک انتروپی و پیچیدگی

قوانین فیزیک بر پایه‌ی منطق شکل گرفته‌اند و حاکمیت و حکمت درباره‌ی آن‌ها غیرممکن است. وقتی تاس غلتان [به جای اینکه بر سطح بنشیند] بر روی یکی از لبه‌هایش می‌نشیند، نه به کسی بدهکار می‌شود و نه لازم است از کسی عذرخواهی کند.

جان هداک

زمانی که پاسکال نوزده ساله بود، گالیله چشم خود را بر روی این جهان بست و درگذشت. نام گالیله کمتر در فهرست توسعه‌دهندگان دانش احتمال مطرح می‌شود. شاید به این علت که دستاوردهای خودش در مکانیک و دستاوردهای پاسکال در احتمالات، برعلاقه‌ی او به بازی با تاس و نوشتن درباره‌ی این بازی‌ها سایه انداخته است.



اما به هر حال نباید نقش او را در مطرح کردن بازی بیشتر از ده^{۱۴۸} در مجامع علمی فراموش کرد. بازی بیشتر از ده به این صورت است که شما سه تاس را روی زمین می‌ریزید و اگر حاصل جمع خال‌های تاس‌ها بیشتر از ده باشد برنده هستید. اگر هم حاصل جمع برابر ده یا کمتر از ده باشد، بازنده محسوب خواهید شد.

ریشه این بازی به احتمال زیاد – مانند بسیاری از بازی‌های تاس – به دوران کهن باز می‌گردد. می‌توان تصور کرد که نیاکان ما بیکاری شبانه خود در غارها را با غلتاندن استخوان‌های شکار و شرط‌بندی بر روی آن‌ها می‌گذرانده‌اند.

اما به هر حال آن چنانکه ریچارد اپشتین در کتاب خود تحت عنوان نظریه قمار و منطق آماری^{۱۴۹} مطرح می‌کند، بازی بیشتر از ده تا قرن هفدهم تقریباً فراموش شده بود و در دوران گالیله رواج یافت و گالیله به این بازی و شکل‌های مختلف اجرای آن علاقه نشان داد.

یکی از شکل‌های تغییر یافته و رایج برای بازی با سه تاس، این بود که شرکت‌کنندگان روی حاصل جمع خاصی شرط می‌بستند و بازی می‌کردند. گاهی یک نفر هم نقش بانکدار را برعهده می‌گرفت. معمولاً نسبت شرط‌بندی به صورت ثابت تعیین می‌شد (مثلاً ۱ به ۹). اما رقم شرط‌بندی را هر کس در نوبت خود تعیین می‌کرد. فرض کنید اگر شما می‌گفتید من ۳ سکه شرط می‌بندم که حاصل جمع تاس‌هایم ده بیاید. اگر ده نمی‌آید باید ۳ سکه به بانکدار می‌دادید و اگر حاصل جمع ۱۰

^{۱۴۸} نام این بازی در نوشته‌های گالیله به صورت Passe-dix (عبور از ده) ثبت شده است.

^{۱۴۹} Epstein, R. A. (2009). The theory of gambling and statistical logic. Amsterdam: Elsevier.

می‌شد، ۲۷ سکه برنده می‌شدید^{۱۵۰}.

این مقدمات را گفتم تا صورت مسئله‌ی تاس ریختن پاسکال را مطرح کنم: فرض کنید که سه عدد تاس می‌ریزید و حاصل جمع عدد سه تاس را محاسبه می‌کنید:

- کمترین حاصل جمعی که ممکن است به دست بیاورید چند است؟
- بیشترین حاصل جمعی که ممکن است به دست بیاورید چند است؟
- محتمل‌ترین حاصل جمعی که می‌توانید به دست بیاورید چند است؟
- غیرمحتمل‌ترین حاصل جمعی که می‌توانید به دست بیاورید چند است؟

نخستین نکته‌ی واضح اما مهمی که می‌خواهم به بهانه‌ی این سوال مطرح کنم، تفاوت بین ممکن^{۱۵۱} و محتمل^{۱۵۲} است.

کمترین حاصل جمع ممکن قطعاً عدد ۳ است. شما نمی‌توانید سه تاس را روی زمین بریزید و حاصل جمعی کمتر از ۳ به دست بیاورید.

بیشترین حاصل جمع ممکن قطعاً عدد ۱۸ است. در شرایطی که با هر سه تاس عدد ۶ را به دست بیاورید. هر حاصل جمعی بیشتر از ۶ غیرممکن است.

غیرمحتمل‌ترین حاصل جمع‌ها، ۳ و ۱۸ هستند. نه به این معنا که امکان ندارد چنین حاصل جمعی دیده شود. بلکه به این معنا که احتمال مشاهده‌ی این دو حاصل جمع، از سایر موارد کمتر است.

اما درباره‌ی محتمل‌ترین چه می‌توان گفت؟ می‌توانیم حدس بزنیم که محتمل‌ترین حاصل جمع ۹ یا ۱۰ باشد. اجازه بدهید کمی درباره‌ی تمام حالت‌های ممکن برای رسیدن به حاصل جمع ۹ و ۱۰ صحبت کنیم.

^{۱۵۰} منطق کلی شرط‌بندی و قرعه‌کشی از دوران غارنشینی تا برنامه‌های امروزی مثل بخت‌آزمایی و دورهمی و خندوانه یکسان است. فقط در دورانی استخوان شکار را زمین می‌انداختند و در دوره‌ای دیگر، عدد فلان را به شماری فلان ارسال می‌کنند. قبلاً هم جایی نوشته‌ام که اگر پنج نفر دور میز قمار نشسته باشند، در کوتاه مدت ممکن است هر یک از آن پنج نفر برنده باشند. اما در بلندمدت، نفر ششم (صاحب میز قمار) برنده است. نسبت‌های شرط‌بندی (مثل همین نسبت ۱ به ۹ که اینجا گفتم) به شکلی تعیین می‌شود که در بلندمدت، بانکدار برنده باشد. همه‌ی جک‌پات‌های کازینوها هم با همین منطق طراحی می‌شوند. به همین علت است که همواره اهل فکر و منطق و افراد آشنا با ریاضیات، به ما سفارش کرده‌اند تا از این نوع فعالیت‌ها دوری کنیم. اگر چنین بحث‌هایی برای شما جالب باشد و البته به آمار، احتمالات و فرمول‌بندی مسئله‌هایی از این دست علاقه داشته باشید، کتاب اپشتین می‌تواند برایتان بسیار جذاب و آموزنده باشد.

^{۱۵۱} Possible

^{۱۵۲} Probable

حالت‌هایی که حاصل جمع تاس‌ها ۹ می‌شود					
۶؛۲؛۱	۳؛۳؛۳	۵؛۳؛۱	۴؛۳؛۲	۴؛۴؛۱	۵؛۲؛۲
حالت‌هایی که حاصل جمع تاس‌ها ۱۰ می‌شود					
۶؛۳؛۱	۴؛۳؛۳	۴؛۴؛۲	۶؛۲؛۲	۵؛۳؛۲	۵؛۴؛۱

می‌بینیم که در مقایسه با حاصل جمع ۳ که فقط یک حالت برای آن متصور است (۱؛۱؛۱) و حاصل جمع ۱۸ که برای آن نیز تنها یک حالت متصور است (۶؛۶؛۶) برای حاصل جمع ۹ و ۱۰، می‌توان شش حالت مختلف را تصور کرد.

البته نباید اشتباه کنیم و بگوییم که حاصل جمع ۹ و حاصل جمع ۱۰ به یک اندازه محتمل هستند. دقت داشته باشید که عددها می‌توانند با ترتیب‌های متفاوتی ظاهر شوند. یعنی علاوه بر ۳؛۶؛۱ باید حالت‌های دیگر مانند ۱؛۶؛۳ و نیز ۳؛۱؛۶ را هم در نظر بگیریم.

پس اجازه بدهید جدول بالا را کمی کامل‌تر کنیم:

حالت‌هایی که حاصل جمع تاس‌ها ۹ می‌شود					
۶؛۲؛۱	۳؛۳؛۳	۵؛۳؛۱	۴؛۳؛۲	۴؛۴؛۱	۵؛۲؛۲
(حالت ۶)	(حالت ۱)	(حالت ۶)	(حالت ۶)	(حالت ۳)	(حالت ۳)
حالت‌هایی که حاصل جمع تاس‌ها ۱۰ می‌شود					
۶؛۳؛۱	۴؛۳؛۳	۴؛۴؛۲	۶؛۲؛۲	۵؛۳؛۲	۵؛۴؛۱
(حالت ۶)	(حالت ۳)	(حالت ۳)	(حالت ۳)	(حالت ۶)	(حالت ۶)

تعداد حالت‌های ممکن با حاصل جمع ۹ به سادگی قابل محاسبه است:

$$۲۵ = ۳ + ۳ + ۶ + ۶ + ۶ + ۱$$

تعداد حالت‌های ممکن با حاصل جمع ۱۰ را هم به شکل مشابهی می‌توان محاسبه کرد:

$$۲۷ = ۶ + ۶ + ۶ + ۳ + ۳ + ۳$$

بنابراین حاصل جمع ۱۰ محتمل‌تر از حاصل جمع ۹ است. با توجه به اینکه هر یک از تاس‌ها ۶ وضعیت مختلف دارند محاسبه‌ی تعداد کل حالت‌های ممکن هم بسیار ساده است $۶^۳ = ۲۱۶$.

به بیان دیگر می‌توانیم بگوییم احتمال اینکه حاصل جمع سه تاس برابر ۹ شود، تقریباً ۱۱٪/۶ است و احتمال اینکه

حاصل جمع برابر ۱۰ شود حدود ۱۲٪/۵ خواهد بود. با توجه به اینکه فقط ۱ حالت از این ۲۱۶ حالت می‌تواند به حاصل جمع ۳ منتهی شود، می‌توان گفت احتمال به دست آوردن حاصل جمع ۳ حدوداً ۵٪/۵ خواهد بود.

توجه داشته باشید که ما در این نوع مسئله‌ها مجبور نیستیم حتماً تاس ۶ وجهی داشته باشیم. در ادبیات احتمال و بحث‌های مرتبط به اعداد تصادفی، وقتی مثلاً از تاس ۱۰ وجهی صحبت می‌کنیم، منظورمان یک مکانیزم است که می‌تواند بین ده عدد مختلف، یکی را انتخاب کند و به ما تحویل دهد. ضمناً احتمال انتخاب هریک از این ده عدد نیز با سایر اعداد برابر است. بنابراین تاس ۶ وجهی که در هروجه آن عددی بین یک تا شش حک شده، شبیه یک ابزار قرعه‌کشی منصفانه بین شش عدد است که روی شش قطعه کاغذ نوشته شده‌اند و در گلدانی ریخته شده‌اند.

با توجه به اینکه در فصل‌های آینده کتاب با مسئله‌ی گالیله کار داریم، اجازه بدهید در اینجا یک قرار بین خودمان بگذاریم. هر جا که n عدد تاس m وجهی داشته باشیم که اعداد یک تا m (یا اعداد صفر تا $m-1$) روی آن‌ها حک شده است و قرار است تعداد حالت‌هایی که حاصل جمع آنها S می‌شود را محاسبه کنیم، من این تعداد را به صورت زیرنمایش می‌دهم:

$$\text{GPD}(n, 1, m, S)$$

حرف‌های G و P و D را از نام‌های گالیله و Passe-Dix گرفته‌ام. به شکل مشابه اگر عده‌های صفر تا $m-1$ روی وجه‌های مختلف تاس نوشته شده باشد، از شکل نمایش زیر استفاده می‌کنم:

$$\text{GPD}(n, 0, m-1, S)$$

برای کسانی که آنالیز ترکیبی بلدند، محاسبه‌ی این تابع دشوار نیست. اما من با این روش، از فرمول‌نویسی ترکیبی دوری می‌کنم. امیدوارم این کار باعث شود متن کتاب ساده‌تر و خواناتر شود.

بنابراین، اجازه بدهید برخی از حرف‌های صفحه‌های قبل را دوباره با نمادگذاری جدید بنویسم:

$$\text{GPD}(3, 1, 6, 9) = 25$$

$$\text{GPD}(3, 1, 6, 10) = 27$$

$$\text{GPD}(3, 1, 6, 3) = \text{GPD}(3, 1, 6, 18) = 1$$

پیشنهادم این است که قبل از رد شدن از این بحث، به عنوان تمرین و به صورت دستی، مقدار $\text{GPD}(3, 1, 6, 5)$ را حساب کنید.

قبل از اینکه بحث جلوتر برود، مهم است که برای همیشه تفاوت زوج‌های ممکن و غیرممکن در برابر محتمل و غیرمحتمل را به خاطر بسپاریم. چه بسیار چیزهایی که ما آن‌ها را غیرممکن می‌نامیم، در حالی که صرفاً غیرمحتمل هستند. همچنین نمونه‌های فراوانی را – حتی در میان فیلسوفان – می‌توان یافت که به خاطر توصیف علت روی دادن یک رویداد غیرمحتمل به سراغ توضیحاتی رفته‌اند که ماهیتاً غیرممکن هستند.

توسعه دانش بشری هم نشان می‌دهد که چه بسیار غیرممکن‌ها که بعداً مشخص شده غیرمحتمل بوده‌اند (مثل سفر به سیاره‌های دیگر برای کسی که در قرون گذشته زندگی می‌کرد) و نیز چه غیرمحتمل‌هایی که با پیشرفت علم، غیرممکن شناخته شدند. ماشین زمان – که بتواند ما را به گذشته ببرد – قبلاً غیرمحتمل محسوب می‌شد. امروز با تلاش بولتزمن و بسیاری دیگر از دانشمندان می‌دانیم که ماشین زمان با توانایی سفر به گذشته غیرممکن است و اگر هم بخواهیم درباره‌ی احتمال ساخت چنین ماشینی صحبت کنیم، صرفاً می‌توانیم از سفر به آینده سخن بگوییم.^{۱۵۳}

آمار، دانشی که مستقل از احتمالات رشد کرد

قبل از اینکه وارد بحث‌های تخصصی‌تر بشویم، لازم است که بین آمار به عنوان سرشماری و آمار به عنوان علم استخراج ویژگی‌های یک گروه، جامعه یا مجموعه‌ای از نمونه‌ها، تفاوت و تمایز قائل شویم.

آمار در فارسی از آماریدن به معنای شماریدن و شمردن گرفته شده است. آماریدن واژه‌ای متعلق به فارسی میانه است. همان چیزی که در عربی به احصاء معروف است و سرشماری هم تقریباً همین معنا را می‌دهد.

امپراطوری ایران، از قدیمی‌ترین ممالک در آمارگیری محسوب می‌شده است. روبرت کاپلان در کتاب خواندنی خود در مورد تاریخ شکل‌گیری عدد صفر، تصویری از آمارگیران دوران داریوش را نشان می‌دهد.^{۱۵۴} آنها روی تخته‌های گلی، تعداد هدایایی را که از نقاط مختلف امپراطوری ارسال می‌شد، به شکل یک گزارش آماری به داریوش ارائه می‌کردند.^{۱۵۵}

^{۱۵۳} اگر به چنین موضوعاتی علاقه مند باشید و بخواهید آنها را به زبانی ساده و جذاب بخوانید، به نظم کتاب Time Travel نوشته‌ی James Gleick یک گزینه‌ی مناسب محسوب می‌شود.

^{۱۵۴} Kaplan, R. (2000). *The nothing that is: a natural history of zero*. Oxford: Oxford University Press.

^{۱۵۵} کاپلان حدس می‌زند که دایره‌ی توخالی که ما به عنوان صفر به کار می‌بریم، از همین جا نشأت گرفته باشد. وقتی در مقابل نام یک حاکم فضای خالی وجود داشته، می‌توانسته به این معنا باشد که هنوز هدایای او سرشماری نشده‌اند. اما دایره‌ی توخالی یعنی اینکه چیزی وجود نداشت که سرشماری کنیم. البته تا

شکل‌گیری و توسعه دانش آمار مدرن، ظاهراً به قرن پانزدهم و شانزدهم میلادی در اروپا بازمی‌گردد^{۱۵۶}. مراجعه به نوشته‌ها و سبک تحلیل فرانسیس بیکن نشان می‌دهد که او علاقه‌ی زیادی داشته است که جامعه را نیز با ابزارهایی علمی مورد شناسایی و تحلیل قرار دهد^{۱۵۷}.

اگر علوم طبیعی مانند فیزیک و ریاضی را علمی سخت^{۱۵۸} و علوم انسانی را علمی نرم^{۱۵۹} در نظر بگیریم، به نظر می‌رسد که ترجیح فرانسیس بیکن این بوده است که علوم انسانی را هم در همان حد علوم طبیعی، به شکلی سخت و مستدل و مبتنی بر مطالعه و تجربه بنا کند. اصطلاح بدن طبیعی^{۱۶۰} و بدن سیاسی^{۱۶۱} که فرانسیس بیکن به کار می‌برد، از این نگرش ریشه می‌گیرد.

به عبارتی، فرانسیس بیکن در همان حد که بدن انسان را موضوع مطالعه‌ی علوم طبیعی می‌دانست، بدنه‌ی سیاسی جامعه را هم قابل مطالعه و بررسی می‌دید و شاید اگر عمرش و ابزارهایش یاری می‌کردند، در این مسیر گام‌های بیشتری برمی‌داشت. البته به نظر می‌رسد توماس هابز هم که کتاب لویاتان^{۱۶۲} را نوشت، در این زمینه از فرانسیس بیکن تأثیر پذیرفته است و می‌توان

جایی که من فهمیدم، کاپلان این را به عنوان حدس مطرح می‌کند. یا اگر منبعی برای این تحلیل دارد، در متن کتاب به آن اشاره نمی‌کند.^{۱۵۶} مطالعه‌ی من در حدی نیست که بتوانم به صورت قطعی این حرف را مطرح کنم. عمده‌ی کتابهای غربی، ریشه‌ی علم آمار به شکل امروزی آن را در اروپا یافته‌اند. من هم به اندازه‌ی مطالعات محدودم، احساس می‌کنم که نوع دغدغه، نگرش و چالش‌هایی که در ریاضیات اسلامی وجود داشته، بسیار متفاوت بوده است. ریاضیاتی که مورد علاقه‌ی ما بود، بیشتر از جنس جبر و هندسه و مثلثات بوده و کسانی مثل خوارزمی، خیام، شرف‌الدین طوسی، ابو محمد خجندی و خواجه نصیرالدین طوسی، همگی بیشتر روی این سه حوزه متمرکز بوده‌اند. شاید بتوان علت این علاقه را در اهمیت نجوم نزد مسلمانان جستجو کرد. به هر حال، دستاوردهای ریاضی مردم خاورمیانه و هند در آن دوران کم نیست و بخش مهمی از میراث ریاضی جهان را تشکیل می‌دهد. اما در زمینه‌ی آمار تحلیلی، لااقل من نمونه‌ای پیدا نکردم. ریاضیات شرق دور را هم در حدی نمی‌شناسم که در قالب نفی یا اثبات (و حتی حدس) در مورد آن نظری بدهم.

¹⁵⁷ Bacon, F., Spedding, J., Ellis, R. L., & Heath, D. D. (2011). The works of Francis Bacon. Cambridge: Cambridge University Press.

¹⁵⁸ Hard Science

¹⁵⁹ Soft Science

¹⁶⁰ Natual Body

¹⁶¹ Political Body

^{۱۶۲} احتمالاً اگر به مطالعه‌ی یک کتاب کلاسیک در زمینه‌ی فلسفه سیاسی علاقمند باشید، این کتاب که با زحمت دکتر بشیریه به فارسی هم ترجمه شده گزینه‌ی خوبی است. لویاتان نامی است که از یکی از داستان‌های تورات گرفته شده و اشاره به غولی بزرگ و شگفت‌انگیز دارد. هابز، دولت را که از مردم برمی‌خیزد، یک غول بزرگ با ماهیتی متفاوت از مردم می‌داند که البته مردم برای تأمین امنیت و کاهش نزاع بر سر منابع، باید گردن به اطاعت از این غول بگذارند.

به نظرم اشتباه نیست اگر بگوییم توماس هابز، یکی از نخستین آثار مستند و مستدل با منطق Emergence را نوشته است. چون دولت را با وجودی که از ملت برمی‌خیزد، یک گونه‌ی اجتماعی متفاوت می‌بیند و واقعاً بدن سیاسی این غول را درست مانند یک دانشمند علوم طبیعی، مورد بررسی و تحلیل قرار می‌دهد.

نوع قلم‌زنی او در این زمینه را ادامه‌ی نگرش فرانسیس بیکن دانست^{۱۶۳}.

اما اگر بخواهیم از آمار در علوم اجتماعی و تحلیل آماری به سبکی که امروز می‌شناسیم و حرف می‌زنیم سخن بگوییم، باید به سراغ جان گرانت در همان قرن هفدهم برویم.

لویاتان در دهه‌ی پنجم قرن هفدهم و کارهای جان گرانت^{۱۶۴} حدود یک دهه بعد، منتشر شده است. کارها و مطالعات او اگرچه امروز ساده به نظر می‌رسند اما در زمان خودش چنان کلیدی بودند که هنوز هم، علوم مختلف می‌کوشند گرانت را به نفع خودشان مصادره کنند.

جامعه‌شناسان او را در تاریخ جامعه‌شناسی و تحلیل‌های جمعیت‌شناسی مورد بررسی قرار می‌دهند. سیاستمداران و محققان علوم سیاسی، او را یک سیاست‌گذار و سیاست‌گرم‌دین می‌دانند. ریاضیدانان او را نقطه‌ی شروع عصری جدید در علم آمار معرفی می‌کنند و الان هم، من به آرامی در تلاش هستم که برای او جایگاهی مناسب در تاریخ علم پیچیدگی دست و پا کنم.

کتاب کلیدی او، مشاهدات^{۱۶۵} نام داشت. البته نام کامل کتاب، مشاهداتی طبیعی و سیاسی بر اساس سندهای مرگ و میر بود^{۱۶۶}.

گرانت گزارش‌های مرگ و میر را که به صورت هفتگی در لندن ثبت و ضبط می‌شدند مورد بررسی قرار داد و سعی کرد از این گزارش‌ها، شاخص‌های متعددی را استخراج کند.

او نرخ مرگ و میر در رده‌های سنی مختلف، نرخ سرایت بیماری‌های واگیردار کشنده، نرخ زاد و ولد و امید زندگی نسل‌های مختلف در لندن را محاسبه و منتشر کرد. کتاب او در طی چند سال متوالی پنج بار ویرایش و به روز شد و اگر بخواهیم از ادبیات رایج امروزی استفاده کنیم، کتاب او یکی از نخستین تلاش‌های مکتوب در تبدیل داده‌ها^{۱۶۷} به اطلاعات^{۱۶۸} بوده است.

¹⁶³ Bunce, R. E. R. (2003). Francis Bacon, Thomas Hobbes, philosophy, and history (doctoral thesis).

¹⁶⁴ John Graunt

¹⁶⁵ Observations

¹⁶⁶ Natural and Political Observations made upon the Bills of Mortality.

¹⁶⁷ Data

¹⁶⁸ Information

دلم می‌خواهد در اینجا با وجودی که ممکن است گرفتار دام ناهمزمانی^{۱۶۹} شویم، کمی توضیح دهم که چرا کتاب مشاهدات تا این حد مهم و تاریخ‌ساز محسوب می‌شود.

ارزش کار گرانت به این بود که کوشید به جامعه به عنوان یک هویت مستقل از افراد جامعه نگاه کند. واضح است که او می‌دانست جامعه، بدون قرار گرفتن فرد فرد انسان‌ها در کنار یکدیگر معنا پیدا نمی‌کند و شکل نمی‌گیرد.

اما به این نکته هم توجه داشت که کنار هم قرار گرفتن انسان‌ها، موجودی با هویتی جدید را می‌سازد که می‌تواند ویژگی‌ها و رفتار خاص خودش را داشته باشد.

اجازه بدهید یک مثال ساده بزنیم.

ما به سادگی می‌توانیم در مورد متوسط قد افراد جامعه صحبت کنیم. مثلاً بگوییم که متوسط قد ایرانیان، فرضاً ۱۷۵ سانتی‌متر است. اگر یک فرد از جامعه را جدا کنید، باز هم می‌توانید در مورد قد او صحبت کنید.

حالا به کار گرانت توجه کنید. او نرخ رشد جمعیت جامعه را به صورت منظم حساب می‌کرد. به عبارتی نرخ زاد و ولد و نرخ مرگ و میر را در کنار هم قرار می‌داد و از اختلاف این دو، نرخ رشد جمعیت را محاسبه می‌کرد.

حالا ما با یک ویژگی در سطح کلان جامعه مواجه هستیم که در سطح خرد قابل تعریف نیست. من می‌توانم بگویم نرخ رشد جمعیت در ایران دو درصد است. اما نمی‌توانم از شما بپرسم: ببخشید. رشد جمعیت شما چقدر است؟ یا رشد جمعیت پدرتان چقدر است؟

^{۱۶۹} ناهمزمانی را به عنوان ترجمه‌ی Anachronism به کار می‌برم. منظوم این است که واژه‌ای را که در دوره‌ای رایج نبوده، در مورد رویدادهای آن دوره به کار ببریم. اولین بار که متوجه شدم آناکرونیزم یک سبک حرف زدن و بیان رویدادها و تشریح تحلیل‌هاست، زمانی بود که در جلسه‌ای توضیح دادم که سیاست‌های امام علی نهایتاً به نقطه‌ای رسید که ایشان را ترور کردند. بعد دیدم مخاطبان کمی با شنیدن این واژه راحت نیستند. در عین اینکه مشخصاً می‌دانیم ایشان ترور شده‌اند. علت راحت نبودن ما این است که ترور، واژه‌ای مدرن است و به آن زمان تعلق ندارد.

البته مثال‌های دیگری از آناکرونیزم هم در ادبیات ما وجود دارد. دکتر علی شریعتی قرائت خود از زندگی ابوذر را با عنوان ابوذر، خداپرست سوسیالیست عرضه می‌کند. استفاده از صفت سوسیالیست با فاصله‌ی حدود ده قرن از تاریخ تولد این اصطلاح، نمونه‌ی دیگری از آناکرونیزم محسوب می‌شود. نمونه‌ای از تلاش گسترده‌ی شریعتی برای ارائه‌ی یک قرائت سوسیالیستی از ایدئولوژی اسلامی.

آناکرونیزم گاهی می‌تواند مفید و گاهی گمراه‌کننده باشد. مفید از این جهت که وقایع غبارگرفته یا عادی شده‌ی تاریخ را برای ما زنده می‌کند. گمراه‌کننده از این جهت که بار معنایی واژه‌های مدرن را نیز به دوران کهن می‌برد و از این رو، باید با دقت و وسواس آن را به کار برد. نمی‌دانم در تئاتر و سایر هنرها، چه نامی برای این کار می‌گذارند. اما من وقتی در نمایشنامه سقراط، دیدم که افلاطون با کت و شلوار و کراوات روی صحنه آمده، حس کردم که از ابزار آناکرونیزم برای انتقال یک پیام استفاده شده است.

گران‌ت، به سراغ معیارهایی رفت که در سطح کلان^{۱۷۰} تعریف می‌شدند، اما در سطح خرد^{۱۷۱} قابل تعریف و سنجش نبودند. لازم است مجدداً تکرار کنم که مشخصاً این پارامترهای کلان، از دل رفتارها در سطح خرد، ایجاد می‌شوند و برمی‌خیزند. اما حرف اصلی این است که ما می‌توانیم در سطح کلان، پارامترها و رفتارهایی را ببینیم که در سطح خرد مصداق مشخصی ندارند.

این نوع مطالعات و استخراج چنین آمارهایی، در نگاه انسان امروزی ساده و واضح به نظر می‌رسد. اما در زمان گران‌ت، این نوع مطالعات چندان باب طبع پیروان کلیسا نبود.

آنها احساس می‌کردند که این نوع محاسبات و سنجش‌ها، عملاً دخالت در کار خداوند است. یا آنچنان که فیلیپ بال^{۱۷۲} نقل می‌کند، این ریاضیدانان خداشناس می‌خواهند خدا را هم به بند معادلات خویش بکشند^{۱۷۳}.

خصوصاً اینکه گران‌ت معتقد بود که اقتصاد سیاسی باید بر پایه‌ی آمار اجتماعی بنا شود. اگر حاکمان یک کشور، می‌خواهند تصمیمی بگیرند و چارچوب جدیدی تعریف کنند؛ یا این که قانون‌هایی را وضع/حذف کنند، باید ابتدا اثرات آن‌ها را به شکل عددی برآورد کنند. او برای سنجش اثر این تصمیم‌ها و سیاست‌گذاری‌ها، بررسی شاخص‌هایی مانند سلامت، مرگ و میر و نرخ رشد جمعیت را پیشنهاد کرد.

در نگاه گران‌ت، حاکم وقتی می‌تواند از سیاست‌های خرد خود دفاع کند که آثار کلان این سیاست‌ها مثبت و قابل دفاع باشد. تصور کنید که در آن دوران، حاکم سیاست‌گذاری می‌کرد. اگر تبعات آن مثبت بود، افتخار را به نفع خود مصادره می‌کرد و اگر منفی بود، بار مسئولیت آن را بر دوش مشیت و خواست الهی می‌گذاشت. در چنین فضایی می‌توان درک کرد که حرکت گران‌ت، جدای از علمی بودنش، نوعی تلاش برای تغییر انقلابی در پارادایم سیاست و سیاست‌گذاری بوده است. به هر حال، گران‌ت هم در ۱۶۷۴ مرد و به بخشی از آمارهای مرگ و میر که به صورت منظم تنظیم و منتشر می‌کرد تبدیل شد.

¹⁷⁰ Macro-scale

¹⁷¹ Micro-scale

¹⁷² Ball, P. (2006). Critical mass: how one thing leads to another. New York: Farrar, Straus and Giroux.

^{۱۷۳} اگر درک چنین پارادایمی - که آمار را هم مخالفت با کلیسا می‌داند - برایتان ساده نیست، کافی است به کسانی فکر کنید که در کشور خودمان تا همین اواخر هم، هواشناسی را نوعی دخالت در کار خداوند می‌دانستند. امروز هم از بارور کردن ابرها چندان استقبال نمی‌کنند و مطالعاتی مثل شبیه سازی انسان یا تلاش برای از بین بردن مرگ را تلاش‌هایی خلاف اراده‌ی حاکم برهستی می‌دانند. اینکه چنین تلاش‌هایی دستاوردی دارد یا ندارد، اینکه این تلاش‌ها اخلاقی است یا نه، اینها بحث دیگری است. حرف من در اینجا مخالفت ریشه‌ای افراد گذشته‌گرا با چنین تلاش‌هایی به بهانه‌ی مخالفت با قوانین هستی است. البته خوب می‌دانیم که قوانین هستی، نامی است که انسان بر درک خود از هستی می‌گذارد. وگرنه پذیرش اینکه موجوداتی که خود یک زیرسیستم از سیستمی بزرگتر هستند در مورد قوانین حاکم بر آن سیستم بزرگتر به صورت مطلق نظر دهند، حتی اگر هم درست باشد، قطعاً علمی نیست.

کار او را ویلیام پتی ادامه داد و به تدریج واژه‌ی ریاضیات سیاسی^{۱۷۴} را به دامنه‌ی واژگان فرهنگ سیاسی انگلستان افزود.

در اینجا هم منظور از ریاضیات سیاسی، ریاضیاتی است که سیاست و سیاستمداران باید تصمیم‌های خود را بر آن استوار کنند. شاید نادرست نباشد اگر قرن هفدهم و هجدهم در اروپای غربی و به طور خاص انگلیس را قرن گذار از سیاست گذاری سلیقه‌ای به سیاست گذاری مبتنی بر برنامه و ارقام بدانیم.

البته در اینجا هم، همچنان سلیقه دخیل است. اما لااقل حاکمان و سیاست‌گذاران می‌دانند که حتی اگر سلیقه‌ای عمل می‌کنند، به هر حال باید در چارچوب آمار و ارقام و برپایه‌ی سنجش نتایج تصمیم‌ها، از برنامه‌ها و سیاست‌های خود دفاع کنند.

لازم به ذکر است که همه‌ی مخالفان و منتقدان گرانت و پتی، سیاستمداران و اهل کلیسا نبودند. مخالفان کلیسا هم با آنها در برخی زمینه‌ها مخالفت داشتند. از جمله نقدهای منتقدان – که منطقی هم به نظر می‌رسد – این بود که اگر می‌خواهید شاخص‌های کلان را برای جامعه استخراج کنید، همه چیز را در جمعیت، زاد و ولد و مرگ و میر بنینید.

مخالفان می‌گفتند مدل ذهنی گرانت و پتی تحت تاثیر کلیسا و کتاب مقدس است. چون در کتاب مقدس تصریحاً و تلویحاً به رشد جمعیت و اهمیت آن اشاره شده و اساساً در دوران کهن، مهم‌ترین معیار سنجش یک جامعه، تعداد «رأس» انسان‌هایی بوده است که در آن جامعه زندگی می‌کرده‌اند^{۱۷۵}.

بحث تاس‌ها و آدم‌ها را می‌توان بسیار بیشتر از آنچه اینجا اشاره شد، بسط داد. اما آنچه برای من از مرور این بحث مهم بود، نخستین تلاش‌های انسان برای خلق و به کارگیری دانش‌های آمار و احتمال است. این تلاش‌ها، اگر چه امروز واضح به نظر می‌رسند و نمی‌توان فرد باسوادی را یافت که آنها را نقض یا رد کند، اما زمانی مخالفت مستقیم با مذهب و کلیسا فرض می‌شدند.

انسان، چنان عاشق نگاه رازآلود خود به جهان اطراف شده بود که نمی‌توانست به سادگی، نگرش‌های دیگری را که مبنای

¹⁷⁴ Political arithmetic

^{۱۷۵} اگر چند صد سال یا چند هزار سال به عقب بازگردید، نمی‌توانید به سادگی کسی را مجاب کنید که مثلاً کشور شما صد میلیون نفر جمعیت دارد و توسعه نیافته و عقب مانده است. کاش جمعیت شما مانند کشور یا قوم دیگری یک میلیون نفر بود، اما رفاه و آسایش بیشتری داشتید. در دوران کهن، هنوز جمعیت شاخصی مهم و حتی شاید مهم‌ترین شاخص بود. حتی اگر جمعیت با کاسه‌ی گدایی هر روز در مقابل کاخ پادشاه صف می‌کشیدند، هنوز این وضعیت در مقایسه با حکومت خلوتی که در معبرهای کسی رفت و آمد نمی‌کند و در دربارش تردد چندانی نیست مطلوب‌تر و دوست‌داشتنی‌تر محسوب می‌شد. مفهوم رفاه، توسعه و آسایش، مفاهیم مدرنی هستند که در قرون اخیر شکل گرفته‌اند. قبل از آن عملکرد حاکمان عموماً بر اساس گستره‌ی قلمرو جغرافیایی و نیز میزان جمعیتی که تحت سیطره‌ی آنها بود، سنجیده می‌شد.

عظمت جهان را در قواعد دیگری می‌جستند و می‌یافتند تحمل کند.^{۱۷۶}

^{۱۷۶} اگر قصد داشتید روند توسعه‌ی دو علم آمار و احتمال و ورود آنها به حوزه‌ی علوم انسانی، اقتصاد، سیاست و دموکراسی را دنبال کنید، حتماً نام کندورسه را هم جستجو کنید و مطالعات او را هم بخوانید. کندورسه از جمله شهیدانی است که انسان در راه استوار کردن بنای آزادی، دموکراسی و مبارزه با استبداد تقدیم تاریخ کرده است. از جمله کارهای زیبای او، تلاش برای ارزیابی ریاضی **خرد جمعی** است. کندورسه با استفاده از دانش آمار و احتمال، کوشید نشان دهد که اگر در یک جامعه، هریک از مردم بتوانند گزینه‌ی صحیح در یک انتخابات را با احتمال بیش از ۵۰ درصد تشخیص دهند، افزایش تعداد رای دهندگان می‌تواند به بهبود کیفیت تصمیم‌گیری دموکراتیک کمک کند. او در این زمینه و زمینه‌های مشابه، مطالعات بسیاری کرده است و این مطالعات و محاسبات، از جمله اقدامات بزرگ زیربنایی قرون جدید است که باعث شده امروز دموکراسی به عنوان یک واقعیت اجتناب‌ناپذیر در سیاست کشورها پذیرفته شود.

هر فعالیت علمی، یا از جنس فیزیک است یا از جنس جمع کردن تمبر.

ارنست رادرفورد

پارادایم دنیای کوکی

جمع کردن تمبرهای پستی در قرن نوزدهم و بیستم، تفریحی جذاب بود. در عین اینکه داشتن کلکسیون تمبرکاری لوکس و تجملی محسوب می شد، منتقدان و کسانی که این نوع جمع آوری ها و کلکسیون سازی ها را مفید و ارزشمند نمی دانستند، اصطلاح جمع کردن تمبر را به عنوان نماد کار بیهوده در جمله ها و حرف های خود به کار می بردند.

با این مقدمه، درک مفهومی که در کلام ارنست رادرفورد پنهان شده ساده تر است. علم به دو بخش تقسیم می شود: فیزیک و سرگرمی.

البته این را هم باید طنز روزگار دانست که رادرفورد که چنین فیزیک را می ستود و کشفیات متعددی در زمینه ی هسته ی اتم داشت، در نهایت جایزه ی نوبل شیمی را دریافت کرد. علمی که در نگاه او جزو سرگرمی ها محسوب می شد.

موضوع این فصل، ظهور علم به معنای مدرن است. علمی که دیگر خود را در خدمت کلیسا نمی دید و وظیفه ی دانشمند را خدمت به دانش می دانست، نه کشیش.

حرف رادرفورد، نمونه ای از شعارهای علم مدرن محسوب می شود. علمی که به فکت و فیزیک ایمان دارد و هرچیزی جز آن را لفاظی و بازی با کلمات می داند.

اما دوران علم مدرن، حداقل دو قرن قبل از رادرفورد و دوستانش در قرن هفدهم میلادی آغاز شده است.

قرن هفدهم، قرن گالیله، فرانسیس بیکن، دکارت و نیوتون بود و این گروه از دانشمندان و فیلسوفان با ایستادن بر دوش متفکران پیش از خود و نگاه به دنیا از ارتفاعی بالاتر، زمینه ی شکل گیری و رشد علم به معنای مدرن آن را فراهم کردند^{۱۷۷}.

منصفانه - و واقع بینانه - نیست که قرن هفدهم را صرفاً با نام دانشمندانش بشناسیم و به نهادهایی که در آن زمان، زمینه ی شکل گیری علم جدید را فراهم کردند بی توجه باشیم. تاسیس انجمن سلطنتی در نیمه های قرن هفدهم اتفاق کوچکی نبوده و این انجمن، یکی از زیربناهای مهم توسعه علم در آن دوران بوده است.

^{۱۷۷} ظاهراً این تعبیر را نخستین بار، برنارد شارتر فیلسوف فرانسوی در قرن دوازدهم به کار برده است. اگر چه ما آن را معمولاً با نام نیوتون به خاطر می آوریم. نیوتون هم از تعبیر مشابهی استفاده کرده و متواضعانه و البته واقع گرایانه می گوید: اگر من افق های دورتری را دیدم، علتش این بود که بر شانه ی غول ها ایستادم. او با این تعبیر، می کوشد احترام گذشتگان را حفظ کرده و بر نقش آنها در تولد و توسعه مدل نیوتونی تاکید کند.

شعار انجمن سلطنتی در آن دوران، **نولیوس این وربا بود**^{۱۷۸}. این حرف اگر چه امروز ساده به نظر می‌رسد، اما نباید فراموش کنیم که در پایان چند قرن انجماد فکری اروپا، حرف بسیار مهمی محسوب می‌شد. قرونی که در آن، حرف‌ها اعتبار خود را از گوینده‌ی خود می‌گرفتند.

کشیش‌ها معیار ارزیابی صحتِ حرف‌های علمی بودند. علم، یعنی چیزی که کشیشان تأیید می‌کردند و جهل، هرآن چیزی که کشیش‌ها درستی آن را نمی‌پذیرفتند. از کشیشان حتی انتظار نمی‌رفت که برای حرف‌های خود، شواهدی در دنیای بیرون داشته باشند. این فضا دست آن‌ها را برای داستان‌بافی و خیال‌پردازی درباره‌ی طبیعت و رد کردن حرف‌های اندیشمندان باز می‌گذاشت.

اگر چه دانشمندان بسیاری در بازپس گرفتن تخت سلطنت علم از کشیشان نقش داشتند، اما شاید بتوان نیوتون را نماد این گروه از دانشمندان دانست. نیوتون ادامه‌ی مسیری است که فرانسیس بیکن مطرح کرد. بیکن تأکید کرد که روش و متد مهم است و نیوتون و دیگران هم در عمل نشان دادند که علم و دستاوردهای علمی باید اعتبار خود را از روش بگیرند، نه از کشیش، کلیسا و گوینده.

برای کسانی که مطالعه‌ی دوران گذار از شبه علم به علم را دوست دارند، قرن هفدهم میلادی می‌تواند یکی از جذاب‌ترین بخش‌های قرون اخیر باشد. کافی است نوشته‌های نیوتون را مرور کنید تا ببینید این نماد فیزیک جدید، چگونه همچنان به برخی جادوگران و کیمیاگران گذشته و معاصر خود، اشاره می‌کند و ارجاع می‌دهد^{۱۷۹}.

^{۱۷۸} عبارت Nullius in verba را می‌توان به این صورت ترجمه کرد که حرف مهم نیست یا حرف هیچکس مهم نیست. بلکه اهمیت اصلی در فکت‌ها و تجربه‌هاست. معیار سنجش صحت حرف‌ها نیز اعتبار گوینده‌ی حرف نیست و باید به مصداق‌های تجربی یک ادعا توجه کرد.

^{۱۷۹} من چند سال پیش در وبلاگم، مطلبی در مورد نیوتون و جعبه‌ی فلزی‌اش نوشته بودم که با توجه به مربوط بودن آن به این بحث، به عنوان پاورقی در اینجا می‌آورم:

جعبه فلزی را باز کردند. کاغذها، مانند اسناد با ارزش بانکی، یکی پس از دیگری بیرون آورده شدند. هیجان جمع را فرا گرفته بود. دست نوشته‌های نیوتن پس از سه قرن، در حراجی در لندن در سال ۱۹۳۶ عرضه شد. نوشته‌هایی که قبل از آن هرگز منتشر نشده بودند. جان کینز (که ما او را به بنیانگذاری یک مکتب اقتصادی می‌شناسیم) از عاشقان نیوتن بود. او خبر حراج را دیر شنید و وقتی رسید، بخش‌های زیادی به فروش رفته بود.

او تعدادی از برگه‌ها را خرید و در همانجا به تبادل و معامله‌ی برگه‌ها با کلکسیونرها پرداخت. آنقدر این کار را انجام داد تا بخشی از نوشته‌های نیوتن به صورت پیوسته جمع‌آوری شد. بخشی که از نظریه بی‌اهمیت‌تر بود و حاضر شده بودند با او معامله کنند. احتمالاً بسیاری از ما در مورد متن دست نوشته‌ها حدس‌هایی داریم: قوانین گرانش. پیش‌بینی‌هایی در مورد آینده فیزیک، ریاضی و البته شاید هم نامه‌های عاشقانه.

اما دست نوشته‌ها حاوی این مطالب بودند: تلاش‌های گسترده نیوتن برای کیمیاگری و ایجاد طلا از سایر عناصر. او مدت‌ها دنبال سنگ فلاسفه گشته بود. او کوشیده بود جادوی اعداد را کشف کند و با مطالعه حرکت ستارگان، آینده زندگی خود و دیگران را پیشگویی کند. قانون گرانش نیوتن، یکی از محصولات جانبی

به هر حال بهتر است با عبور از حاشیه‌ها به اصل ماجرای نیوتون و شگفت‌انگیزی که بر تمام تاریخ پس از خود گذاشت بپردازیم.

جهان نیوتون، جهانی ساده است. جهانی که در آن همه چیز را می‌توان به ذرات کوچک‌تر خرد کرد و رفتار بزرگ‌ترین اجسام شناخته شده - از جمله خورشید و ماه - هم، به کمک همان قواعد ساده‌ای توجیه می‌شود که مسئولیت سقوط یک سیب بر زمین را بر عهده دارند.

نیوتون، پیچیدگی جهان در نگاه انسان‌ها را تا حد زیادی کاهش داد. در نگاه او همه‌ی آنچه می‌بینیم، مجموعه‌ای از ذرات است که به واسطه‌ی نیروی گرانش در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند.

در دنیای نیوتونی، طلوع و غروب خورشید دیگر به اندازه‌ی قبل رازآلود و شگفت‌انگیز نبود. همچنانکه خسوف و کسوف هم دیگر انسان‌ها را نمی‌ترساند و رویدادی کاملاً واضح و طبیعی به نظر می‌رسید. شهاب‌سنگ‌ها اجرامی متحرک در آسمان بودند که در اثر نیروی گرانش و اینرسی خود حرکت می‌کردند. آبشارها، در اثر گرانش سقوط می‌کردند، رودها در اثر وزن قطرات آب به سمت دره‌ها و دریاها روان می‌شدند.

جهان نیوتون بیش از آنکه بر پایه‌ی اراده‌ای پنهان بنا شده باشد، بر پایه‌ی قواعدی بنا شده بود که برخی آشکار و برخی پنهان بودند. ضمن اینکه به نظر می‌رسید با قدرت گرفتن علم و نگاه آینده‌نگر (به جای نگاه گذشته‌نگر که کلیسا ترویج می‌کرد)

زندگی کیمیاگرانه او بوده است.

بله. واقعیت تاریخی این است که نیوتن زندگیش را برای کیمیاگری گذاشته بود و آن را بیشتر از فیزیک و ریاضی دوست داشت. کینز بعد از مطالعه دست نوشته‌ها، ده سال بعد در ۱۹۴۶ آنها را به دانشگاه کمبریج (محل تحصیل نیوتن) هدیه داد تا این نوشته‌های او هم، مانند فرمول گرانش، حقیقت عمیق دیگری از هستی را برای ما آشکار کند:

«دانستن‌ها و توهم‌ها»، «فهمیدن‌ها و نفهمیدن‌ها» همه بخشی از واقعیت ما هستند. اگر مهم‌ترین قوانین حاکم بر هستی را نیز بفهمی و برای دیگران آشکار کنی، هنوز ممکن است در لایه دیگری، در تلاش برای شعبده بازی و خلق ثروت باشی! و این لایه‌های مختلف، از ارزش تو کم نمی‌کند.

نیوتن نابغه‌ای منحصر به فرد با دغدغه‌هایی متعالی در حد کهکشان‌ها و عالم هستی نبود. او هم انسانی بود مثل ما. او هم گاه در تشخیص علم و شبه علم ناتوان می‌شد. او هم رویاهای کودکانه در سر داشت. دلش می‌خواست عناصر دیگر را به طلا تبدیل کند و یک شبه ثروتمند شود.

خیلی‌ها درباره انتشار یادداشت‌های کیمیاگرانه نیوتن تردید داشتند و می‌ترسیدند با این کار، از ابهت تاریخی او کاسته شود. پندارشان چنین بود که نباید گذاشت تصویری که از نیوتن در ذهن هاست بشکند و او از برجی که برایش درست شده بود، پایین بیاید.

در مقابل اما گفتند: قرار نیست انسان‌ها را تنها از یک منظر ببینیم، اتفاقاً حالا می‌توان بیشتر از قبل به او احترام گذاشت؛ چون انسانی عادی بود مثل ما، ولی با پشتکار زیاد. او زندگیش را برای کشف طلا گذاشت و حاصل تلاشش اگر چه طلا نبود، اما قانونی طلایی بود.

کینز سخنرانی خود را در انجمن سلطنتی لندن چنین به پایان برد:

از آشکار شدن این برگه‌ها هراس نداشته باشید. ما دیر یا زود باید بیاموزیم که انسان‌ها را با همه «فهمیدن‌ها» و «نفهمیدن‌ها» نشان تحسین کنیم و نکوداشت آنان، نیازمند تحریف واقعیتشان نباشد.

آینده‌ای درخشان برای علم قابل تصور است. روزهایی نه چندان دور که همه‌ی اسرار هستی، کشف شده و قواعد پنهان هم یکی پس از دیگری آشکار می‌شوند.

برای درک عمق اثر مکانیک نیوتونی بر تفکر قرن هفدهم و قرون پس از آن، کافی است نوشته‌های جان لاک و رابطه‌ی این دو دانشمند با یکدیگر را مرور کنید^{۱۸۰}.

جان لاک، چنان به نیوتون و هویگنس احترام می‌گذاشت که در مقدمه‌ی کتابش در مورد ادراک انسانی^{۱۸۱} توضیح می‌دهد که در دورانی که کسانی مانند نیوتون و هویگنس زندگی می‌کنند، منطقی است کسی چون من، چیزی ننویسد و مسیر را برای آن‌ها خلوت و باز نگه دارد.

او در مدل پیشنهادی خود از ذهن انسان معتقد است که فکرها را هم مانند اجرام فیزیکی می‌توان به اجزا و ایده‌های خردتر و کوچک‌تر تقسیم کرد. هر ایده را هم می‌توان خردتر کرد تا به المان‌های اصلی آن یعنی دریافت‌های انسان از محیط برسیم. به عبارتی او به جای اتم، به صدا، نور، رنگ، دما و دریافت‌های مشابه توجه می‌کرد و معتقد بود که ترکیب آن‌ها ایده‌ها را می‌سازد و فکرها هم از ترکیب ایده‌ها شکل می‌گیرند.

جان لاک به جای نیروی گرانش، به نیروی تداعی توجه کرد و گفت همان‌طور که گرانش، اجرام و سیارات و ذرات را در کنار هم نگه می‌دارد، تداعی هم ایده‌ها و افکار را کنار هم نگه می‌دارد و به این شکل، کهکشان تفکر هر فرد شکل می‌گیرد^{۱۸۲}.

نگرش نیوتونی، به تدریج دنیای مبهم قبلی را به جهانی کاملاً مکانیکی نزدیک می‌کرد. به دنیایی که شبیه ساعت کار می‌کرد و قواعد و قوانین فیزیک بر آن حاکم بودند.

همین نگرش بود که باعث شد ارنست رادرفورد، مطالعه‌ی هر علمی جز فیزیک را تفریح و سرگرمی بداند.

جالب اینجاست که این نگرش مکانیکی، چند قرن دوام پیدا کرد. شاید به این علت که مذهبی و لامذهب، می‌توانستند خواسته‌های خود را در آن بیابند. مخالفان مذهب، احساس می‌کردند که نگرش کلیسایی دیگر جایگاهی ندارد و

¹⁸⁰ Rogers, G. (1978). The Empiricism of Locke and Newton. Royal Institute of Philosophy Lectures, 12, 1-30. doi:10.1017/S0080443600002569

¹⁸¹ Locke, J., & Yolton, J. W. (1974). An essay concerning human understanding. London: Dent.

^{۱۸۲} کلمه‌ی کهکشان، کلمه‌ی جان لاک نیست و من آن را به کار برده‌ام. اما کاملاً با مدل ذهنی او تطبیق دارد. من هنوز هم در بسیاری از گفته‌ها و نوشته‌های خودم تعبیر کهکشان فکری و منظومه فکری را به کار می‌برم و می‌گویم که برای آشنایی با انسان‌ها، نباید به یک جمله، یک حرف یا یک نوشته‌ی آنها اکتفا کنیم. بلکه باید بخش زیادی از گفته‌ها، نوشته‌ها و اندیشه‌های آن‌ها را بخوانیم و بشنویم و بشناسیم. اینجا فرصت خوبی بود تا به جان لاک، به خاطر اینکه این تعبیر را از او اقتباس کرده‌ام، ادای دین کنم.

شگفت‌انگیزترین رویدادهای عالم (حرکت ستاره‌ها و سیارات) به جای آنکه با اراده‌ای پنهان توصیف شوند، صرفاً حاصل گردن نهادن سنگ‌هایی معلق در فضا به قواعد فیزیک نیوتونی هستند.

موافقان مذهب (شامل خود نیوتون) هم معتقد بودند که جایگاه رفیع‌تری برای خداوند ساخته‌اند. حالا خدا به جای اینکه بر طبق روایت کشیشان، دست اندرکار روزمرگی‌ها باشد، قانون‌گذار عالم هستی بود و عالمی را بنا کرده بود که مثل ساعت، دقیق و منظم کار می‌کرد.

شاید همین که مدل علمی توانسته بود دل کلیسا و دشمنانش را همزمان به دست بیاورد باعث شد که علم، با غرور بر تخت سلطنت بنشیند و حاکمیت بلامنازع قرن‌های پس از خود را - حداقل تا میانه‌های قرن بیستم - در اختیار بگیرد.

چه کسی از آینده خبر دارد؟ اجازه دهید فضای تحقیقات را از همه سو باز کنیم. از دگماتیسم فاصله بگیریم. چه در قالب نگاه اتمیستی به دنیا و چه در قالب مخالفت با نگاه اتمیستی به دنیا. بولتزمن – سخنرانی‌هایی در مورد نظریه گازها

چیزی را درست می‌دانید مطرح کنید. آن را به شکلی شفاف بنویسید و تا آخرین نفس از آن دفاع کنید. بولتزمن

همنشینی کوتاهی با بولتزمن، نیوتونِ علف‌ها

دومین سخنی که در بالای این صفحه از بولتزمن نقل کردم، برای او صرفاً یک شعار نبوده است. می‌توان پذیرفت که زندگی بولتزمن به تمامی در همین قاعده خلاصه شده است.

شاید بهتر باشد گفتگو درباره‌ی بولتزمن را از کمی قبل‌تر آغاز کنیم و به یک قرن قبل از بولتزمن برویم. جایی که ایمانوئل کانت در تلاش بود تا جهان را بهتر بفهمد.

همان‌طور که می‌دانید کانت سه‌گانه‌ی معروفی دارد که هر سه از جنس نقد هستند. در یکی به نقد استدلال‌های عقلی^{۱۸۳} پرداخته و دیگری را به نقد استدلال‌های مبتنی بر عمل در شرایط واقعی^{۱۸۴} اختصاص داده است. در سومین رساله هم به نقد قضاوت^{۱۸۵} پرداخته است.^{۱۸۶}

آنچه در اینجا برای من جالب و دوست‌داشتنی است و فکر می‌کنم باید در مطالعه‌ی سیر تاریخی شکل‌گیری دانش پیچیدگی به آن توجه کرد، سومین کتاب از سه‌گانه‌ی انتقادی کانت است. یعنی آنها که به نقد قضاوت می‌پردازد.

تلاش جدی کانت برای اینکه از پیش‌داوری فاصله بگیرد، در این کتاب به شدت مشهود است. همچنین نگاه کنجکاو او به دنیای اطراف را می‌توان در مثال‌های طبیعی که از حوزه‌ی فیزیک و زیست‌شناسی در لابه‌لای بحث‌هایش مطرح می‌کند

¹⁸³ Critique of the pure reason

¹⁸⁴ Critique of the practical reason

¹⁸⁵ Critique of judgment

¹⁸⁶ برای کسانی چون من که تخصص فلسفه ندارند و آن مطالب جزئی که از فلسفه می‌دانند هم به کتابهای دینی مدرسه بازمی‌گردد، نام کانت، از جمله نامهای پرابهتی است که به سادگی نمی‌توان به آن نزدیک شد. البته باید بپذیریم که زحمت مترجمان گرامی و وسواسی که در انتقال معنای تک تک واژه‌ها دارند نیز در این ترسناک شدن کانت بی‌تاثیر نبوده است. بر سر همین که Pure را باید ناب ترجمه کرد یا محض یا صاف یا مجرد یا خالص چنان بحث‌ها شده و می‌شود که واقعاً شنیدنش هم نگران‌کننده است. البته این دغدغه‌ی امانت‌داری خوب است؛ اما شکل افراطی آن باعث شده که ترجمه انگلیسی برخی از کتاب‌های کانت برای مخاطبی که انگلیسی نمی‌داند بسیار مفهوم‌تر و جذاب‌تر از فهم نسخه‌ی فارسی کارهای کانت برای فارسی‌زبانان مادرزاد باشد.

حس کرد.

خواننده در مطالعه‌ی این اثر کانت، به این باور می‌رسد که او به نزدیک‌تر کردن علوم و رشته‌های علمی علاقمند است. کانت تمایلی ندارد رشته‌های علمی را بی‌هوده گسترش دهد و از هم دور کند و بین آنها دیوار بکشد. بخشی از تلاش‌های او هم برای تدوین مبانی تفکر به همین علاقه بازمی‌گردد.

او همچنین، تمایلی ندارد که بی‌حد و حساب، هر مفهومی را که به عقل فیلسوفان می‌رسد به جهان اطراف تحمیل کرده یا در آن تزریق کند.

این نگرش را در بخش‌های متعددی از نوشته‌هایش می‌بینید. از جمله آنجا که وقتی می‌خواهد از هدفِ کلِ طبیعت به عنوان یک سیستم حرف بزند، به این مسئله اشاره می‌کند که ما صرفاً با تکیه بر یک آنالوژی از دنیای ذهنی خود به دنیای بیرونی، به این نتیجه رسیده‌ایم که باید در هر چیزی که می‌بینیم، هدف و علتی هم تزریق کنیم.

او البته نفی نمی‌کند که این کار، گاهی برای درک بهتر محیط مفید است. کانت اگر چه از واژه‌ی مدل نام نمی‌برد، اما اگر بخواهیم حرف‌های او را به زبان امروزی ترجمه کنیم باید بگوییم که کانت، هدفمند فرض کردن سیستم‌ها را یک نوع مدل‌سازی می‌داند. این مدل‌سازی توسط انسان برای درک بهتر محیط انجام شده و لازم نیست که حتماً در محیط هم، چنین چیزی وجود داشته باشد.

همه‌ی اینها را به عنوان یک مقدمه گفتم تا حق کانت در جمله‌ای که اینجا از او نقل می‌کنم پایمال نشود. او در کتاب نقد قضاوت چنین می‌گوید:

صرفاً با تکیه بر اصول علم مکانیک، نمی‌توانیم وجود و سازمان‌دهی موجودات را توضیح دهیم. نه تنها از توضیح دادن آنها ناتوانیم، بلکه حتی نمی‌توانیم آنها را در حد آشنایی اولیه درک کنیم. این مسئله چنان قطعی به نظر می‌رسد که ما می‌توانیم با جسارت کامل بگوییم منتظر ماندن یا امید داشتن به اینکه روزی نیوتون دیگری بیاید و برای طبیعت - ولو یک ساقه‌ی علف آن - قوانین طبیعی تعریف و تدوین کند، پوچ و بی‌هوده است.

پس از مرگ کانت، تنها چهل سال زمان لازم بود تا نیوتون علف‌ها به دنیا بیاید.

لودویگ بولتزمن، در سال ۱۸۴۴ به دنیا آمد. اگر می‌خواهیم باورها و نگرش انسان‌ها را بهتر درک و تحلیل کنیم، مناسب است که به معاصران آنها و نیز کسانی که قبل و بعد از آنها آمده‌اند و رفته‌اند هم توجه داشته باشیم.

جی جی تامسون حدود دوازده سال پس از بولتزمن و اینشتین حدود سی و پنج سال بعد از تولد او به دنیا آمد. کارل مارکس، بیست و شش سال قبل از بولتزمن متولد شده و چارلز داروین در لحظه‌ی تولد بولتزمن، سی و پنج ساله بوده است.

این چهار نفر را عمداً انتخاب کرده‌ام. تامسون، کسی است که کشف الکترون را به او نسبت می‌دهند و می‌توان کارهایش را نخستین نمونه‌های شیمی محاسبه‌ای^{۱۸۷} دانست. اینشتین هم کسی است که توانست به واژه‌ی زمان، مفهوم تازه‌ای ببخشد.

اما فراموش نکنیم که اگر بولتزمن و چند نفر دیگر از فیزیک‌دان‌ها نبودند، راه برای امثال تامسون، اینشتین و بعداً دیگرانی چون فاینمن هموار نمی‌شد.

از سوی دیگر، می‌توانید حدس بزنید که دو کلمه‌ی رایج در دوران نوجوانی و جوانی بولتزمن، تکامل^{۱۸۸} و تاریخ بوده‌اند. قبل از او هگل، از منظر خود به فلسفه‌ی تاریخ نگاه کرده بود و مارکس جوان هم می‌رفت تا تاریخ و اقتصاد را به هم گره بزند و مکتبی نو درافکند.

هنگامی که بولتزمن به سن سخنرانی کردن، درس دادن و نوشتن رسید و مخاطبان خود را پیدا کرد، دیدگاه داروین در فضای فکری آن دوران - با وجود همه‌ی مخالفت‌ها و ممانعت‌ها - جایگاهی باثبات یافته بود.

نام مهم دیگری را هم نباید فراموش کنیم: رودلف کلاوزیوس، فیزیکدان بزرگ آلمانی که نخستین نطفه‌های قانون دوم ترمودینامیک توسط او شکل گرفته بود.

این اسم‌ها را از آن جهت مورد اشاره قرار دادم که من، علاقه‌ی خاصی به بولتزمن دارم و داستان جدی نظریه‌ی پیچیدگی در نگاه من، از بولتزمن شروع می‌شود.

اما درست نبود که تاکید زیاد بر بولتزمن در صفحات قبلی و آتی این کتاب، بر نام بزرگانی که مسیر او و دیگران را هموار کرده‌اند سایه بیندازد.

¹⁸⁷ Computational Chemistry

^{۱۸۸} کسانی که کمی حساس باشند، احتمالاً ترجیح می‌دهند به جای تکامل، از واژه‌ی فرگشت استفاده کنم. معمولاً هم این‌گونه استدلال می‌شود که کلمه‌ی Evolution در ذات خود، معنای بهتری را بدتر شدن را ندارد. فقط به این نکته اشاره می‌کند که یک سیستم از حالتی به حالت دیگر، Evolve می‌شود. اما تکامل، به نوعی با کامل شدن در ارتباط است و این فرض در دل آن پنهان است که وضعیت فعلی همواره بهتر از وضعیت قبلی است و Evolution عملاً به عنوان حرکتی رو به کمال، تعبیر می‌شود.

قبلاً هم در جاهای دیگر گفته‌ام که فکر می‌کنم انتخاب تطور در زبان عربی به عنوان معادل Evolution، بسیار هوشمندانه و دقیق بوده است. چون صرفاً به این نکته اشاره دارد که سیستم، از طوری به طور دیگر تغییر وضعیت می‌دهد. اگر چه گفته می‌شود که فرگشت هم (مربک از فرو گشت) چنین دارای معنای خنثی است، اما احساس می‌کنم پیشوند فر، در زبان فارسی بالاتر رفتن و بهبود را نیز جایی در عمق خود پنهان دارد. شاید باید در فارسی از واژه‌ی دگرگشت به عنوان معادل تطور یا Evolution استفاده کرد. اما من، با همان تکامل راحت‌تر هستم و به نظرم ساده‌تر است که خواننده‌ی گرامی، اگر احساس می‌کند که واژه‌ی تکامل گمراه‌کننده است، هر جا این واژه را دید در دل خود آن را دگرگشت بخواند.

به همین علت، کوشیده‌ام به برخی از بزرگان معاصر بولتزمن نیز - حتی اگر در حد نام بردن - اشاره کنم.

زمان به کدام سمت می‌رود؟

شاید اسم بردن از دانشمندان مختلف و جمع و تفریق تاریخ تولدها شما را خسته کرده باشد. بنابراین شاید بد نباشد پیش از آنکه وارد بحث‌های دقیق تربشویم، یک بازی فکری را با هم مرور کنیم. این بازی، هم نوعی تنوع موضوعی محسوب می‌شود و هم ذهن‌مان را برای بحث‌های آتی در مورد انتروپی، نظم و بی‌نظمی، آماده‌تر می‌کند.

فرض کنید روی ۱۰۰ عدد کارت، به ترتیب اعداد یک تا صد نوشته شده است. کارت‌ها را ابتدا به ترتیب کنار هم قرار داده‌اند. یک نفر دسته‌ی کارت‌ها را به دست گرفته و آن‌ها را (به اصطلاح اهل ورق) بُرمی‌زند و جابجا می‌کند. هر بار نتایج برزدن را بر روی یک تخته یا یک برگ کاغذ می‌نویسند و ثبت می‌کنند. به عبارتی، دقیقاً ترتیب صد کارت را بعد از هر بار بُرخوردن ثبت می‌کنند. این کار (بُرخوردن کارت‌ها) دویست مرتبه تکرار می‌شود.

سوال من اینجاست:

اگر این ۱۰۰ عکس آخر را (از مرحله‌ی ۱۰۱ تا ۲۰۰) به ترتیب واقعی یا به ترتیب معکوس به شما نشان دهند و شما در محل آزمایش نبوده باشید، آیا می‌توانید تشخیص دهید که ترتیب عکس‌ها واقعی است یا به صورت معکوس به شما ارائه شده است؟

ما دوباره در همین بحث به این سوال بازخواهیم گشت. اما سوالی که مطرح کردم، سوال کلاسیک بحث انتروپی نیست. بنابراین، اجازه بدهید اشاره‌ای به همان مثال‌های کلاسیک زمان بولتزمن و کلازیوس داشته باشم^{۱۸۹}.

یک میز بلیارد را در نظر بگیرید که روی آن تنها دو توپ وجود دارد. فرض کنیم میز اصطکاک ندارد. یعنی در اثر حرکت توپ‌ها، سرعت آنها کاهش پیدا نمی‌کند. ما یکی از دو توپ را با چوب به سمت توپ دیگر حرکت می‌دهیم و آنها با هم برخورد می‌کنند و دوباره از هم جدا می‌شوند.

ما از این کار، فیلمبرداری کرده‌ایم. اما قسمت اول فیلم را که چوب بلیارد به توپ خورده، برش می‌دهیم و حذف می‌کنیم.

بیا بید دوباره به همان سوال بازی ورق فکر کنیم:

^{۱۸۹} البته من روایت داستان را کمی مدرن‌تر تعریف می‌کنم. بنابراین، لطفاً در دل‌تان نگویید که زمان بولتزمن دوربین فیلمبرداری وجود نداشته است.

اگر فیلم را در جهت معکوس پخش کنند، آیا می‌توانید این مسئله را بفهمید؟

به عبارتی، می‌توانید جهت زمان را در فیلم بیلارد ضبط شده تشخیص دهید؟

قوانین نیوتون، نسبت به زمان متقارن هستند. به این معنا که ما واقعاً نمی‌توانیم بفهمیم که فیلم در جهت درست پخش شده یا نه.

حالا بگذارید بازی را سخت‌تر کنیم:

- اگر سه توپ یا چهار توپ روی میز بیلارد قرار داشته باشد پاسخ شما چیست؟
- درباره‌ی هشت توپ چگونه فکر می‌کنید؟

احتمالاً پاسخ را حدس می‌زنید: دیگر می‌توانیم بفهمیم که فیلم به شکل معکوس پخش شده است.

به عنوان یک حالت خاص، فرض کنید شش توپ کنار هم هستند و شما با توپ هفتم به آن ضربه می‌زنید. اگر فیلم معکوس را برای یک مخاطب پخش کنید، قاعدتاً او به سادگی می‌تواند متوجه شود که روند زمانی در فیلم، وارونه شده است.

به عبارتی:

وقتی در سیستم فقط دو ذره داریم، زمان می‌تواند برگشت پذیر باشد. اما هر بار یک ذره به سیستم اضافه می‌کنیم، برگشت پذیری زمان غیرممکن‌تر می‌شود.

البته محاسبات و معادلات بولتزمن بسیار پیچیده‌تر و جدی‌تر از این حرف‌هاست. اما همین مثال‌های ساده می‌تواند تصویری اولیه از اصطلاح پیکان زمان^{۱۹۰} – که توسط بولتزمن مطرح شد – در اختیار ما قرار دهد.

قبلاً هم به این نکته اشاره کردم که تا زمان بولتزمن، اگر این سوال مطرح می‌شد که آیا بازگشت یا سفر به گذشته امکان پذیر است، فیلسوفان برای پاسخ‌گویی به این سوال به میدان می‌آمدند.

این بار بولتزمن (یا همان نیوتون علف‌ها) کاغذ به دست با انبوهی از معادله‌ها و محاسبه‌ها آمده بود تا هم به این سوال پاسخ داده و فضا را برای فیلسوفان و کشیشانی که می‌خواستند پاسخ را در تخیلات خویش بیابند تنگ کند.

بولتزمن و جهان کوکی

¹⁹⁰ Arrow of time

سخنرانی‌های بولتزمن در مورد نظریه‌ی گازها، بخش مهمی از جهان‌بینی و فلسفه‌ی او را برما آشکار می‌کند. بولتزمن در آن سخنرانی‌ها چند جمله دارد که تا حد زیادی می‌تواند ما را با نوع نگرشش آشنا کند^{۱۹۱}:

اگر از من پرسید که بعداً قرن ما چه نامیده خواهد شد؟ قرن آهن یا قرن بخار یا قرن الکتریسته؛ من بی‌تردید خواهم گفت: قرن نگاه مکانیکی به طبیعت. قرن داروین.

او در همان سلسله سخنرانی‌ها در مورد نظریه گازها، زمانی که به بحث انتروپی می‌رسد، جمله‌های جالبی مطرح می‌کند:

کشمکش و تنازع اصلی بین موجودات زنده، بر سر عنصرها نیست. همه‌ی آن عنصرهایی که ارگانسیم‌ها از آنها ساخته شده‌اند به وفور در هوا و آب و خاک وجود دارند. حتی برای انرژی هم نیست. انرژی به شکل گرما در همه‌ی ما موجود است و متأسفانه به چیز خاصی هم تبدیل نمی‌شود.

دعوا و رقابت بر سر انتروپی است. این انتروپی از طریق جریان انرژی که از سوی خورشید به سمت ما روان است، از خورشید گرم به زمین سرد می‌رسد. گیاهان، برای اینکه بهترین استفاده را از این انرژی بکنند، برگ‌هایشان را به اندازه‌ای که می‌توانند بزرگ می‌کنند و آن انرژی را به شیوه‌ای که ما هنوز کشف نکرده‌ایم، مورد استفاده قرار می‌دهند.

تا زمانی که خورشید سرد نشده و به دمای زمین نرسیده، این جریان ادامه دارد. زندگی زمینی، صرفاً یک آشپزخانه‌ی بزرگ شیمیایی است که انرژی سنتزهای خود را از خورشید دریافت می‌کند. دنیای حیوانات، حاصل فعالیت این آشپزخانه‌ی بزرگ است.

چه چیزی بولتزمن را به این نگاه رساند؟ نقطه‌ی آغاز او کجا بود که نقطه‌ی پایانش در اینجا قرار گرفت؟ من، مستقل از اینکه از لحاظ تاریخی در زندگی بولتزمن چه گذشته است، ترجیح می‌دهم مبداء توسعه‌ی نگرش او در دو مفهوم وضعیت خرد^{۱۹۲} و وضعیت کلان^{۱۹۳} در نظر بگیرم.

کلمه‌ی وضعیت در اینجا بسیار کلیدی است. مهم است که از اصطلاح سطح خرد و سطح کلان استفاده نکنیم (یا لااقل اگر چنین می‌کنیم، از ابتدا به بی‌دقتی پنهان در آن، توجه داشته باشیم).

اصطلاح سطح^{۱۹۴} برای ما ناآشنا نیست. وقتی به مدیران سطح بالا یا لایه‌ی بالا در سازمان اشاره می‌کنیم، به خوبی می‌دانیم که صرفاً بخشی از مدیران یا اعضای سازمان را مد نظر داریم.

به عبارتی می‌توان گفت یک سازمان حاصل جمع سطوح پایین، سطوح میانی و سطوح ارشد است. سطح و لایه مفاهیمی

¹⁹¹ Broda, E. (1995). Ludwig Boltzmann: man, physicist, philosopher. Woodbridge (Conn.): Ox Bow Press.

¹⁹² Microstate

¹⁹³ Macrostate

¹⁹⁴ Level

هستند که سلسله مراتب^{۱۹۵} را کاملاً در خود پنهان کرده‌اند.

اما وقتی بولتزمن از وضعیت کلان و وضعیت خرد صحبت می‌کند، مفهوم متفاوتی را در ذهن دارد.

منظور بولتزمن این نیست که وضعیت گاز، حاصل جمع این دو وضعیت است. گاز دقیقاً در هر لحظه، هم در وضعیت خرد قابل بررسی است و هم در وضعیت کلان. این دو وضعیت، صرفاً یک نام‌گذاری هستند. این نام‌گذاری هم برای این اساس انجام می‌شود که ناظر از چه نقطه‌ای به سیستم نگاه می‌کند. سازمان را می‌توان به دو سطح پایین و بالا یا سه سطح پایین و میانی و بالا تقسیم کرد. اما گاز، به سطح خرد و سطح کلان، تقسیم نمی‌شود.

جان کلام بولتزمن در همین جاست: گاز هست. فقط هست؛ همین. این ما هستیم که گاهی به وضع خرد و گاهی به وضع کلان آن نگاه می‌کنیم.

یک مثال خوب برای درک بهتر وضعیت خرد و کلان، بازی تاس گاليله است که قبلاً درباره آن صحبت کرده‌ایم. وقتی می‌گوییم حاصل جمع سه عدد تاس ۱۰ شده است، عدد ۱۰ وضعیت کلان این مجموعه را نشان می‌دهد. طبیعتاً ۲۷ حالت خرد متفاوت وجود دارد که همگی می‌توانند در وضعیت کلان، عدد ۱۰ را ایجاد کنند. اما وضعیت کلان در تمام این ۲۷ حالت ثابت است. چون قرار گذاشته‌ایم که آن را فقط با حاصل جمع سه عدد بسنجیم. تابع $GPD(3,1,6,10)$ رابطه‌ی بین وضعیت خرد و کلان این سیستم را مشخص می‌کند.

بولتزمن می‌کوشد به شکل مشابهی بین دو وضعیت خرد و کلان در یک ماده رابطه برقرار کند. بولتزمن بر این باور بود که چون این دو وضعیت به یک موجود یا ماده اشاره دارند، نباید کاملاً از یکدیگر مستقل باشند. باید بتوان از ویژگی‌های وضع خرد

¹⁹⁵ Hierarchy

به ویژگی‌های وضع کلان رسید.

ممکن است خواننده‌ای که این داستان را می‌شنود و می‌خواند، با خود بگوید که: ضمن احترام به بولتزمن و همه‌ی زحمت‌هایش، این ماجرای وضعیت خرد و وضعیت کلان آن قدرها هم شگفت‌انگیز نیست که به شکلی حماسی مورد اشاره قرار گیرد و بولتزمن به خاطرش تعظیم و تقدیس شود.

اما نباید فراموش کنیم که بولتزمن زمانی در مورد اتم‌ها حرف می‌زد که بسیاری از فیزیک‌دان‌های برجسته هنوز وجود اتم را قبول نداشتند^{۱۹۶}. فقط کافی است به خاطر داشته باشیم که بولتزمن در سال ۱۹۰۶ خودکشی کرد و اینشتین در سال ۱۹۰۵ در یک مقاله با استفاده از قواعد مکانیک آماری، به شکلی دقیق توضیح داد که حرکاتی براونی می‌توانند ناشی از برخورد مولکول‌ها باشند.

در واقع محاسبات اینشتین، تاییدی دیگر بر مدل اتمی بولتزمن بود. زمانی که اینشتین تازه به این نتیجه رسید، بولتزمن حدود ۳۰ سال بود که دانشگاه به دانشگاه، می‌چرخید و در این زمینه سخنرانی می‌کرد و مسخره‌اش می‌شد و خسته از همکارانش، به خودکشی و رها کردن بازی زندگی فکر می‌کرد.

با توجه به این توضیحات، بهتر است حرف بولتزمن در مورد وضعیت‌های خرد و کلان و رابطه‌ی این دو وضعیت را در قالب جمله‌های زیر به خاطر بسپاریم:

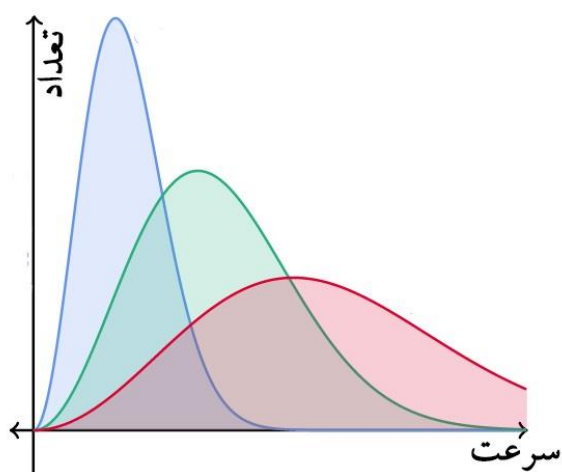
با وجودی که ما صرفاً از وضعیت کلان یک گاز اطلاع داریم، می‌توان فرض کرد که این گاز از ذرات بسیار ریزی به نام اتم تشکیل شده است که با مطالعه و بررسی وضعیت خرد (تک تک آنها) می‌توان این وضعیت کلان را بهتر فهمید و توصیف کرد.

حالا می‌توانیم راحت‌تر در مورد مفروضات بولتزمن حرف بزنیم.

بولتزمن می‌گوید: بیایم فرض کنیم که گاز، از ذرات بسیار کوچکی تشکیل شده که به شکل گلوله‌ها یا توپ‌های الاستیک هستند و در تعداد بسیار زیاد، در حال حرکتند. این ذرات مدام با هم برخورد می‌کنند و قوانین نیوتون در مورد آنها کاملاً صادق است. اگر وضعیت خرد گاز (موقعیت و سرعت تمام ذرات آن) را بدانیم، می‌توانیم - یا باید بتوانیم - شاخص‌های وضعیت کلان (از جمله دما و فشار) را براساس آن‌ها محاسبه و استخراج کنیم.

¹⁹⁶ Lindley, D. (2015). Boltzmann's atom: the great debate that launched a revolution in physics. Place of publication not identified: Free Press.

طبیعی است که بولتزمن قصد نداشت بنشیند و سرعت و موقعیت تک تک مولکول‌ها را حساب کند. بلکه با محاسبات آماری، می‌کوشید توزیع سرعت مولکول‌ها را محاسبه کند. به عبارتی بگوید که اگر مولکول یک گاز را به صورت تصادفی در یک لحظه در نقطه‌ای از یک اتاق پیدا و بررسی کنیم، سرعت محتمل آن ذره (یا مولکول یا اتم) چقدر خواهد بود^{۱۹۷}. ما امروز پاسخ بولتزمن به این سوال را به عنوان توزیع بولتزمن-ماکسول می‌شناسیم.



قاعداً جزئیات ریاضی این توزیع - حداقل در این فصل از کتاب که هنوز وارد ریاضیات نشده‌ایم - مفید و جذاب نخواهد بود.

فقط کافی است بدانیم که در توزیع بولتزمن-ماکسول، محور افقی سرعت مولکول‌ها و محور عمودی تعداد مولکول‌هاست. به عبارتی، می‌توان گفت اگر مساحت زیر هر نمودار را معادل تعداد مولکول‌های یک گاز در نظر بگیریم، با انتخاب یک سرعت مشخص، ارتفاع نمودار، تعداد مولکول‌هایی را که با آن سرعت در حال حرکت هستند نشان می‌دهد.

هر سه نمودار فوق، مربوط به یک گاز، اما در دماهای متفاوت هستند. نقطه‌ی پیک (ماکسیمم) نمودار، نشان می‌دهد که بیشترین تعداد مولکول‌های گاز، با چه سرعتی در حال حرکت هستند.

همان‌طور که می‌بینید در نمودار صورتی رنگ، سرعت متوسط مولکول‌ها بیشتر از سرعت متوسط مولکول‌ها در نمودار آبی رنگ است. به عبارتی، نمودار قرمز رنگ، وضعیت گاز را در دمایی بالاتر (در مقایسه با نمودار آبی رنگ) نمایش می‌دهد.

بسیار مهم است به این نکته توجه داشته باشیم که آنچه ما در توزیع بولتزمن-ماکسول می‌بینیم، وضعیت خرد یک سیستم است. اینکه از شاخص‌های وضعیت خرد چگونه می‌خواهیم به شاخص‌های وضعیت کلان برسیم، مسئله‌ی مستقلی

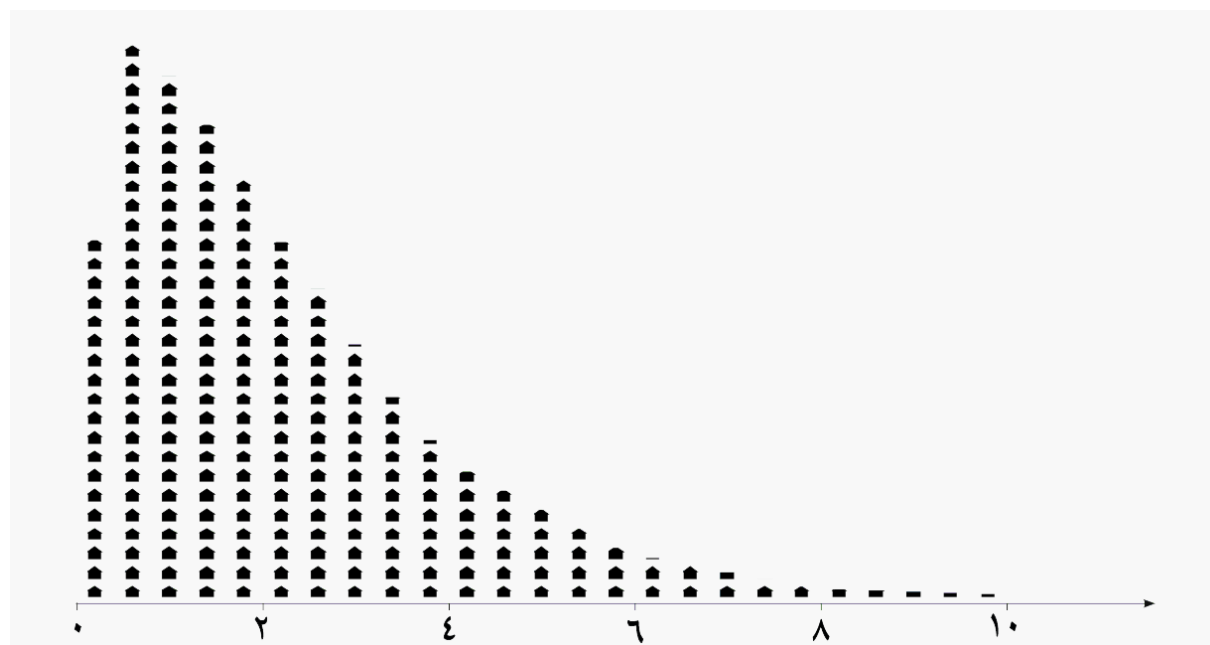
^{۱۹۷} در اینجا نکته‌ی ظریفی وجود دارد که ممکن است از نگاه ما پنهان بماند. بولتزمن شکل متفاوتی از آمار و احتمال را به کار گرفته است که استفاده از آن، قبل از بولتزمن رایج نبود. استفاده‌ای که راه را برای مکانیک کوانتومی نیز هموار کرد. وقتی حرف از آمار و احتمال می‌شود، بسیاری از ما این مفاهیم را در جامعه‌های آماری با جمعیت زیاد تصور کرده و درک می‌کنیم. اما بولتزمن وقتی از توزیع سرعت حرف می‌زند، آن را در مورد یک اتم هم به کار می‌برد. او در محاسبات و معادلات خود، حتی وقتی از یک اتم صحبت می‌کند، اتمی با توزیع سرعت X را در نظر می‌گیرد. شاید در سطح مقدماتی که ما الان درگیر آن هستیم، این تمایز به چشم نیاید یا مهم به نظر نرسد، اما فقط کافی است فکر کنید که در میان ما انسان‌ها، علاوه بر اینکه می‌گوییم ۵۰٪ جمعیت جهان را زنان تشکیل می‌دهند، کسی بگوید: انسانی را در نظر بگیرید که توزیع جنسی او چنین و چنان است. چنین نگاهی فضا را برای محاسبات و معادلات و تحلیل‌ها بسیار گسترده می‌کند.

است که باید جداگانه بررسی و تحلیل شود.

بولتزمن چنان به مولکول‌های گاز نزدیک می‌شود که تک تک آنها را می‌بیند و آمار آنها را ثبت می‌کند. او دقیقاً می‌داند – یا فرض می‌کند می‌داند – که سرعت در گاز چگونه توزیع شده است. به عبارتی مثلاً می‌توانید از او بپرسید: «آقای بولتزمن. الان دمای گاز ۴۰ درجه سانتی‌گراد است. چند درصد مولکول‌ها سرعتی بین ۳۰۰ تا ۳۲۰ متر بر ثانیه دارند؟». بولتزمن بر اساس فرمولی که برای توزیع سرعت (و در واقع انرژی جنبشی) در گازها استخراج کرده است، می‌تواند جواب شما را بدهد.^{۱۹۸}

نکته‌ی مهم این است که دما و فشار و انتروپی، از جمله ویژگی‌هایی هستند که در وضع کلان، ظهور می‌کنند و پدیدار می‌شوند. به بیان دقیق‌تر، در وضعیت خُرد اساساً قابل تعریف نیستند. ارزش کار بولتزمن این است که توانست بین این شاخص‌های سطح کلان و ویژگی‌های سطح خرد در گاز، رابطه برقرار کند.

برای اینکه اهمیت و عظمت کار بولتزمن را بهتر تصور کنیم، فرض کنید نمودار زیر به شما داده شده است:



این نمودار کاملاً فرضی است. اما مثلاً توضیح زیر در مورد آن به شما داده شده است:

^{۱۹۸} توسعه‌ی علم در دهه‌های بعد نشان داد که توزیع بولتزمن هم، کاملاً دقیق نیست. اما اگر گاز در شرایط متعارف باشد و چندان به سمت دماهای بسیار بالا یا بسیار پایین سوق داده نشود، خطای توزیع بولتزمن بسیار جزئی و قابل اغماض است.

خانه‌هایی که بین صفرو دو قرار گرفته‌اند، نشان‌دهنده‌ی تعداد خانوارهایی هستند که ماهیانه بین صفرتا دومیلیون تومان درآمد دارند.

به همین شیوه، خانوارهایی که بین دو تا چهار میلیون در ماه درآمد دارند هم، ترسیم شده‌اند. همین شیوه برای دسته‌های درآمدی دیگر هم ترسیم شده و آخرین دسته، بین هشت یا ده میلیون تومان درآمد ماهیانه دارند.

اولین نکته‌ای که شما بعد از آشنایی با بولتزمن به خاطر دارید این است که این نمودار به خودی خود، وضع کلان جامعه را نشان نمی‌دهد. بلکه صرفاً وضع اقتصاد کشور را در سطح خرد نشان می‌دهد.

حالا سوال بعدی که از شما پرسیده می‌شود این است که چه پارامتری در سطح کلان می‌توانید برای این جامعه تعریف کنید که از جنس درآمد نباشد؛ اما بر اساس توزیع درآمد محاسبه و استخراج شود. همان‌طور که دما در سطح خرد قابل تعریف نیست، اما نهایتاً بر پایه‌ی توزیع سرعت مولکول‌ها در سطح خرد شکل می‌گیرد.

شاید با این سوال و سوال‌های مشابه، بهتر بتوانیم قدرت ذهن بولتزمن را در تصور کردن آن مفاهیم مجرد - آن‌هم در شرایطی که نه جامعه و نه همکارانش با او همراه و هم قدم نبودند - درک کنیم^{۱۹۹}.

انتروپی، همان بی‌نظمی نیست

بعید می‌دانم بدون آشنایی با ترمودینامیک و تاریخی که بر آن گذشته است، بتوانیم به درک درستی از نظریه اطلاعات و پس از آن، به درکی عمیق از نظریه پیچیدگی و سیستم‌های پیچیده برسیم. در میان مباحث مطرح در علم ترمودینامیک، بحث انتروپی برای ما از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است.

این مسئله صرفاً یک نظر شخصی نیست. تا این لحظه، هنوز کتابی در حوزه نظریه اطلاعات^{۲۰۰} ندیده‌ام که در نمایه‌ی پایانی آن، نام بولتزمن و فرمول انتروپی او وجود نداشته باشد.

^{۱۹۹} من معمولاً برای اینکه این موضوع را در گفتگوهای روزمره بهتر توضیح بدهم، از یک مثال ساده و ابتدایی استفاده می‌کنم: از دوستانم می‌پرسم که آیا می‌توانید یک ویژگی در سطح کلان برای مردم ایران بگویید؟ معمولاً پاسخ‌هایی مثل مهربان بودن، دروغ‌گو بودن، مهمان‌نواز بودن، تیزهوش بودن، خنگ بودن و مواردی مانند اینها می‌شنوم. بعد می‌گویم: تمام این ویژگی‌ها برای یک فرد هم تعریف می‌شود. یک انسان هم می‌تواند دروغ‌گو، مهربان، تیزهوش یا کم‌استعداد باشد. آیا می‌توانید یک ویژگی یا صفت کلان برای جامعه‌ی ایرانی بگویید که در مورد یک فرد ایرانی، معنا نداشته باشد و قابل استفاده نباشد؟ کار بولتزمن از این جنس است. او برای جامعه‌ی اتم‌های گاز، صفت انتروپی را مطرح می‌کند، بدون اینکه برای یک اتم (بر اساس مدل او) این ویژگی قابل طرح یا تعریف یا اندازه‌گیری باشد.

قاعدتاً در طول بحث‌های آینده در این کتاب، بارها به سراغ انتروپی خواهیم رفت. بنابراین در اینجا قرار نیست وارد پیچیدگی‌های انتروپی شویم و همین که اطلاعاتی مقدماتی در مورد رابطه‌ی انتروپی و بولتزمن به دست بیاوریم کافی است. با وجودی که درس رسمی دانشگاهی‌ام را در حوزه‌ی مکانیک خوانده‌ام و قاعدتاً زمان قابل توجهی پای درس ترمودینامیک نشسته‌ام و افزایش و کاهش انتروپی سیستم‌ها را محاسبه کرده‌ام، احساس می‌کنم سیستم آموزش دانشگاهی علاقه یا میل یا انگیزه‌ی چندانی به تفهیم دقیق این مفهوم مهم و ارزشمند ندارد.

البته قطعاً تعداد زیادی از دانشجویان مهندسی محاسبه‌ی انتروپی را فرا می‌گیرند و مثال‌های استاندارد آن را هم حفظ هستند. اما انتروپی به معنای عمیق و جدی آن، موضوعی چنان مهم بود و چشم را به روی جهان باز می‌کرد که عملاً بولتزمن را به خودکشی رساند و بعداً شنون را به نظریه‌ی اطلاعات.

به نظر نمی‌رسد که آنچه ما در دانشگاه‌ها به عنوان انتروپی می‌آموزیم، تأثیری محسوس - چه سازنده و چه مخرب - بر جای گذاشته باشد. شاید به همین علت است که وقتی انتروپی را به بی‌نظمی تعبیر می‌کنند و با آن مترادف می‌دانند، حتی آنها که درس این بحث‌ها را هم خوانده‌اند، چندان حوصله‌ی مخالفت یا لااقل توضیح و تشریح دقیق تر بحث را ندارند.

بولتزمن، کلاویوس، کارنو، کتری آب و ماشین بخار

دوران بولتزمن دورانی بود که مفهوم انرژی به تدریج در ادبیات فیزیک و ادبیات عمومی، جایگاهی فاخر پیدا می‌کرد. فیزیک قرن‌ها تأکید داشت که نباید هر چه را نمی‌توان دید، به قلمرو اسرار ربط داد. به عبارتی، تفکیک بین نادانسته‌ها و رازهای یکی از دغدغه‌های مهم فیزیک و به طور کلی علوم تجربی بوده و هست.

در مقابل، کلیسا هر نادانسته‌ای را فرصتی ارزشمند می‌دانست تا مهر تأیید دیگری بر تفسیر رازآلوده‌ی خود از جهان هستی بیافزاید.

حتماً می‌توانید به سادگی حدس بزنید که در چنین شرایطی، مفهوم انرژی تا چه حد در هر دو اردوگاه، مورد استقبال قرار گرفته است. به نظر می‌رسید بسیاری از آنچه فیزیک هنوز نفهمیده و متافیزیک همواره ادعا کرده است، در پس این واژه نهفته باشد. کافی است به آثار یونگ و فروید مراجعه کنید تا ببینید چقدر از این مفهوم تأثیر پذیرفته‌اند^{۲۰۱}.

از سوی دیگر، فیزیک‌دان‌ها هم می‌توانستند بگویند که آنچه شما به عنوان اسرار پنهان می‌گفتید و می‌دانستید، صرفاً

^{۲۰۱} انرژی‌های مردانه، انرژی‌های زنانه، انرژی آرکتایپ‌ها، انرژی‌های روانی، انرژی فکری، انرژی غریزی و ده‌ها استعاره و تعبیر دیگر که در ادبیات یونگ و فروید دیده می‌شوند، همگی نشان می‌دهند که این واژه، ابزار ارزشمندی برای دانشمندان و نویسندگان، حتی در خارج از حوزه‌ی فیزیک و ترمودینامیک بوده است.

مکانیزم‌های ناشناخته‌ی فیزیکی بوده‌اند و هر چه مفهوم انرژی را بیشتر بفهمیم، قلمرو ناشناخته‌ها تنگ‌تر و کوچک‌تر می‌شود.

بیایید با هم، به نیمه‌های قرن نوزدهم فکر کنیم. زمانی که جیمز ژول، در مورد رابطه‌ی کار و انرژی مطالعه می‌کرد^{۲۰۲}. بحث بقای انرژی در زمان ژول، حرف تازه‌ای نبود. محاسبه‌ی انرژی جنبشی و پتانسیل از اوایل قرن هجدهم کاملاً رایج و شناخته‌شده و قابل درک بود.

آنچه ماجرا را دشوار می‌کرد، بحث اصطکاک در سیستم‌ها بود. چیزی که باعث می‌شد همیشه بخشی از انرژی جنبشی و پتانسیل هدر رود و همواره – بسته به میزان اصطکاک – نتایج معادل فیزیکی روی کاغذ، با نتایج آزمایش‌های واقعی فاصله داشته باشد.

تقریباً واضح بود که آنچه از انرژی جنبشی (یا پتانسیل) در قالب اصطکاک از بین می‌رود، به گرما تبدیل می‌شود. اما اینکه چنین چیزی واضح است، با اینکه ادعایی را به روش علمی، مطالعه و بررسی و اثبات کنیم، تفاوت بسیار دارد. بخش قابل توجهی از ترمودینامیک قرن نوزدهم، به مطالعه‌ی یک سوال اختصاص یافت: رابطه‌ی بین کار (نیرو و جابجایی) و انرژی با “گرما” چیست؟ آیا می‌توانیم گرما را دقیقاً شکل دیگری از انرژی در نظر بگیریم؟

برای پاسخ به این سوال، دیگر کافی نبود که بگوییم انرژی اجسام متحرک به علت اصطکاک در قالب گرما هدر می‌رود. لازم بود کسی بگوید: میزان گرمای تولید شده، دقیقاً مساوی انرژی مکانیکی تلف شده است.

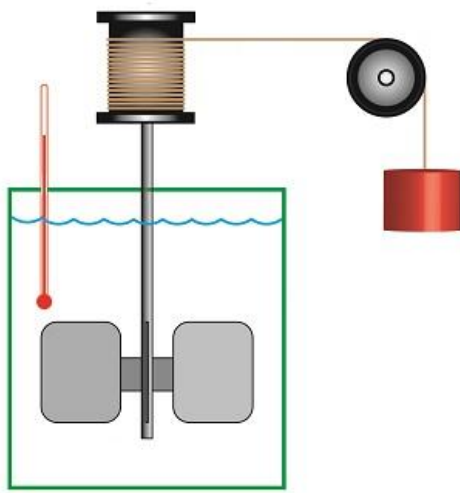
این ادعا، اگر ثابت می‌شد به آن معنا بود که گرما دقیقاً شکل دیگری از همان انرژی مکانیکی است که از زمان نیوتون در فیزیک محاسبه و استخراج می‌شده است.

اگر چه افراد مختلفی در این زمینه مطالعه کردند، اما امروز نام جیمز ژول را بیش از هر کس دیگری با این بحث به خاطر می‌آوریم.

ژول دستگاهی ساده، اما خلاقانه اختراع کرد. او وزنه‌ای را با طناب آویخت و از روی قرقره‌ای رد کرد و آن قرقره را به یک پروانه‌ی گردان داخل ظرف آب متصل کرد و وزنه را رها کرد تا چند متر پایین بیاید و پروانه را بچرخاند.

^{۲۰۲} آن آقای ژول، همان کسی است که به احترامش، هنوز هم انرژی را با واحد ژول می‌سنجند.

او افزایش دمای آب را اندازه گرفت تا ببیند آیا انرژی تلف شده دقیقاً با گرمای ایجاد شده در آب برابر است یا نه.



بعد از آزمایش ژول و آزمایش‌های مشابهی که دیگران انجام دادند، مشخص شد که قلمرو کار و انرژی (علم مکانیک) را نباید جدای از قلمرو حرارت (علم ترمودینامیک) در نظر گرفت. ظاهراً گرما، شکل دیگری از کار مکانیکی بود. اگر چه هنوز چیزهای زیادی در مورد آن نمی‌دانستیم.

نمونه‌هایی که کار مکانیکی در آن به گرما تبدیل می‌شود، بسیار است. ما دائماً این تبدیل کار به گرما را تجربه می‌کنیم. حتی بدون داشتن کوچک‌ترین وسیله‌ی آزمایشگاهی، کافی است کمی دستان خود را به هم بساییم یا کمی بدویم، تا تبدیل شدن کار مکانیکی به گرما را ببینیم.

اما آنچه روند علم ترمودینامیک و پس از آن علم نظریه اطلاعات را شکل داد، عکس این ماجرا بود. بحث تبدیل شدن گرما به کار مکانیکی فرایندی بود که نگاه انسان به محیط اطراف را به طرز شگفت‌انگیزی باز کرد.

بیایید به کتری آبی که روی اجاق می‌جوشد، یا شکل رسمی‌تر و کاربردی‌تر آن یعنی موتور بخار فکر کنیم. اینها نمونه‌هایی واضح و مفید از تبدیل انرژی گرمایی به کار محسوب می‌شوند. البته قاعدتاً در مورد کتری آب، تنها اتفاقی که می‌افتد تکان خوردن درب کتری است. اما به هر حال کتری و ماشین بخار، شفاف‌ترین مثال تبدیل انرژی گرمایی به کار مکانیکی هستند.

یکی از بهترین نوشته‌هایی که می‌توانند در این زمینه، تصویری مناسب و دقیق از فضای فکری حاکم بر میانه‌ی قرن نوزدهم برای ما ترسیم کنند، مقاله‌های سعدی کارنو^{۲۰۳} هستند.

بسیاری از ما با شنیدن نام کارنو، به یاد ماشین کار دائم می‌افتیم. اما آنچه - در خارج از فضای فیزیک دانان و گفتگوهای عمومی - کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد، نقش کارنو در تفکیک دما و انرژی گرمایی و شفاف کردن این بحث به کمک چیزی است که امروز، به نام موتور حرارتی کارنو می‌شناسیم.

²⁰³ Carnot, S. (2009). Reflections on the motive power of fire: and other papers on the second law of thermodynamics by É. Clapeyron and R. Clausius. Mineola, NY: Dover Publ.

کارنو تاکید می‌کرد:

اینکه می‌گوییم گرما به کار مکانیکی تبدیل می‌شود تعبیر درستی نیست. گرما نمی‌تواند همیشه به کار مکانیکی تبدیل شود؛ این اختلاف دما است که می‌تواند کار مکانیکی ایجاد کند.

انرژی گرمایی از جنس گرم‌تر به جسم سردتر می‌رود و در این مسیر، اگر مکانیزم درستی طراحی کنیم، می‌توانیم از آن کار هم بگیریم. نباید انرژی گرمایی را با دما اشتباه بگیریم.

حرف کارنو، ظاهراً حرف ساده‌ای است که وقتی می‌شنویم، واضح و حتی بدیهی به نظر می‌رسد. اما واقعیت این است که بسیاری از ما هنوز هم آن را عمیقاً درک نمی‌کنیم یا به اهمیت آن چندان توجه نمی‌کنیم.

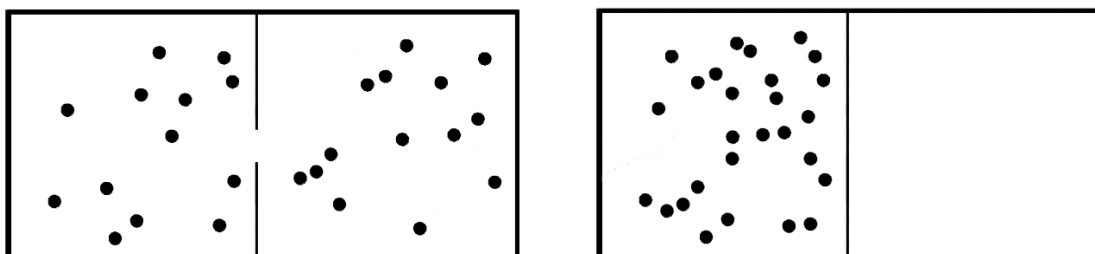
دغدغه‌ی کارنو همان نکته‌ای است که کلاویوس آن را به خوبی درک می‌کرد و به بهترین شکل قابل تصور، مفهوم آن را توسعه داد و به مفهوم انتروپی رسید. می‌توانیم بگوییم انرژی حرارتی به دو شکل به درد بخور و به درد نخور وجود دارد.

جنس بحث کارنو، شبیه پتانسیل الکتریکی است. این اختلاف پتانسیل است که مهم است و نه میزان پتانسیل. در اینجا هم، این اختلاف دما است که مهم است و نه میزان انرژی گرمایی.

اجازه بدهید کمی علمی‌تر بگوییم: گاهی اوقات، انرژی حرارتی را می‌توان به کار تبدیل کرد و گاهی اوقات نمی‌توان به کار تبدیل کرد.

در هر سیستم بسته‌ای که در نظر بگیرید، بخشی از انرژی داخلی آن قابل تبدیل به کار و بخشی دیگر غیرقابل تبدیل به کار است. سهم این انرژی گرمایی غیرقابل تبدیل در یک سیستم، همان چیزی است که انتروپی نامیده می‌شود.

مثال‌های کلاسیک برای توضیح این پدیده بسیار است. اما من این مثال را بیشتر از بقیه دوست دارم:



یک سیستم بسته حاوی یک گاز را مطابق شکل بالا (سمت راست) در نظر بگیرید. وقتی می‌گوییم سیستم بسته است،

منظورمان این است که هیچ تبادلی با جهان اطراف ندارد. حتی می‌توان فرض کرد جهانی بیرون از این سیستم وجود ندارد.

مثال کلاسیک انتروپی این است که می‌گویند در سمت راست، می‌توان از انرژی گرمایی موجود در سیستم، خروجی مکانیکی گرفت (مثلاً فرض کنید دیواره‌ی میانی را سوراخ کنیم و یک پروانه‌ی کوچک در آنجا بگذاریم. یا اینکه کل دیوار (مشابه پیستون در موتورهای احتراق داخلی) به سمت راست حرکت کند.

در حالت سمت چپ بخشی از دیواره برداشته شده و گاز در هر دو نیمه پخش شده است. با توجه به اینکه در هر دو مورد، هیچ تبادل حرارتی با محیط بیرون نداشته‌ایم، می‌دانیم که سیستم در وضعیت چپ و راست، دارای انرژی گرمایی یکسانی است. با این حال این راه می‌دانیم که انرژی در وضعیت سمت چپ، قابل تبدیل به کار مکانیکی نیست.

این همان مفهومی است که آن را با انتروپی بیان می‌کنیم و می‌گوییم **انتروپی سیستم در وضعیت سمت چپ بیشتر از انتروپی سیستم در وضعیت سمت راست است.**

شاید همین مثال کلاسیک و مثال‌های مشابه آن باعث شده‌اند که برای بسیاری از ما، **انتروپی با بی‌نظمی مترادف باشد.** این نوع تعبیر انتروپی به بی‌نظمی، اگرچه در سطوح اولیه‌ی مسائل فیزیک و مکانیک چندان گمراه‌کننده نیست، اما باعث می‌شود نتوانیم به سادگی از انتروپی در ترمودینامیک به انتروپی در نظریه اطلاعات حرکت کنیم.

کلاویوس توضیح می‌دهد که در انتخاب واژه انتروپی، کوشیده است هم به ریشه‌های یونانی توجه داشته باشد و هم بکوشد واژه‌ای بسازد که با کلمه‌ی انرژی، هم‌وزن و هم‌آوا باشد.

براساس آنچه کوپر نقل می‌کند^{۲۰۴}، کلاویوس تایید داشت که مفهوم انتروپی هم در حد انرژی مهم است. از سوی دیگر بر این باور بود که برای نام‌گذاری پارامترهای مهم علمی، باید به سراغ زبان‌های کهن رفت. چون ریشه‌های آنها توسط افراد بیشتری در جهان، قابل درک است.

آنچه ما – در خارج از کلاس ترمودینامیک – از انتروپی می‌دانیم، معمولاً تعریفی است که کلاویوس در قالب قانون دوم ترمودینامیک ارائه کرده است: گرما هرگز به خودی خود از جسمی که دمای پایین‌تر دارد به جسمی که دمای بالاتر دارد نمی‌رود.

کلاویوس در توصیف این وضعیت، مفهوم انتروپی را مطرح می‌کند و اینکه در سیستم‌های بسته، انتروپی همواره یا ثابت

²⁰⁴ Cooper, L. N. (1981). An introduction to the meaning and structure of physics. Providence, RI: Peleus Press (c/o Leon N. Cooper, Physics Dept., Brown University).

می‌ماند و یا افزایش پیدا می‌کند. به عبارتی، تقارن نیوتونی - آنچنانکه در آغاز این بحث مورد اشاره قرار دادم - در مقیاس‌های بزرگ وجود ندارد.

جهان، جهت دارد. در نهایت، فرایندها به شکلی انجام می‌شوند که انتروپی یک سیستم بسته، افزایش پیدا کند و جهت معکوس، به خودی خود طی نمی‌شود.

کلاویوس، همچنین فرمول انتروپی را هم (که همان گرمای منتقل شده در فرایند تقسیم بردمای فرایند است) برای نخستین بار مطرح کرد.

ممکن است بعضی از ما روایت آقای کلونین از قانون دوم ترمودینامیک را شنیده باشیم. او تاکید می‌کند که اگر چه کار، می‌تواند به تمامی به گرما تبدیل شود، اما گرما هرگز نمی‌تواند به صورت کامل به کار تبدیل شود. به عبارتی، همیشه بخشی از عمل تبدیل کار به گرما، بازگشت ناپذیر است.

به هر حال، در این قسمت از بحث که در مقدمه‌ی پیچیدگی هستیم، قاعدتاً مرور مجدد این مباحث نه لازم است و نه مفید. خواننده‌ای که علاقمند باشد می‌تواند نخستین کتاب ترمودینامیک را که در اطراف خود پیدا می‌کند ورق بزند و توضیحات بیشتری در مورد انتروپی بخواند.

نگاه بولتزمن به انتروپی

آنچه تا اینجا مطرح کردیم، نگاه ترمودینامیکی به مفهوم انتروپی بود که کسانی مانند کلاویوس و گیسیس به آن توجه کردند. اما بولتزمن همین مفهوم انتروپی را به شکل دیگری درک و تعریف می‌کرد که برای آنچه ما در نظریه اطلاعات و بررسی سیستم‌های پیچیده نیاز داریم بسیار مفید است.

به خاطر داریم که مفاهیم کلیدی در مدل بولتزمن، **سطح خرد** و **سطح کلان** هستند. برای اینکه بتوانیم روایت بولتزمن از انتروپی را بهتر درک کنیم، برای چند دقیقه در ذهن خود از ترمودینامیک و پیچیدگی و هر موضوع دیگری که تا اینجا مطرح کرده‌ایم فاصله بگیرید.

کلاسی را در نظر بگیرید که در آن ۶ دانشجو و ۶ صندلی وجود دارد. فرض کنید مدرس صرفاً وضعیت کلان کلاس را می‌بیند و جزئیات برای او مهم نیست. کلاس از نظر مدرس فقط دو وضعیت دارد: همه نشسته‌اند و درس شروع شده و هنوز همه نشسته‌اند و درس شروع نشده است.

بنابراین وضعیت کلان کلاس را می‌توانیم با یک پارامتر ساده‌ی دو وضعیتی بیان کنیم (وضعیت صفر = کلاس هنوز رسماً

شروع نشده؛ وضعیت یک = کلاس رسماً شروع شده).

وضعیت یک (شروع شدن رسمی کلاس) می‌تواند در سطح خُرد به شکل‌های متفاوتی اتفاق بیفتد.

هریک از دانشجویان می‌توانند روی صندلی متفاوتی بنشینند. اگر صندلی‌ها در یک ردیف به صورت خطی چیده شده باشند، می‌توانیم بگوییم در کل ۷۲۰ وضعیت مختلف برای نشستن دانشجویان متصور است.

حالا اجازه دهید یک داستان فرضی را در نظر بگیریم: یک بار در فاصله‌ی بین دو کلاس، دانشجویان دو نفر از دوستان‌شان را از کلاس دیگر به این کلاس دعوت می‌کنند تا با هم غذا بخورند. آن دو نفر هم دو صندلی از راهرو به داخل کلاس می‌آورند و وقتی می‌روند، صندلی‌ها در کلاس باقی می‌ماند.

اکنون کلاس در سطح کلان، هنوز همان دو وضعیت را دارد. اما وضعیت یک (کلاسی که رسماً شروع شده) متناظر با بیش از ۲۰۰۰۰ وضعیت مختلف است. چون تعداد صندلی‌ها بیشتر شده و عملاً دانشجویان حق انتخاب بیشتری دارند و همیشه هم دو صندلی می‌توانند خالی بمانند.

تعبیر بولتزمن از انتروپی چنین است:

متناظر با یک وضعیت کلان، چند وضعیت خرد می‌توان در نظر گرفت؟

می‌توانیم پارامتری مانند انتروپی را تعریف کنیم که نشان‌دهنده‌ی تعداد وضعیت‌های خُرد قابل تصور، متناظر با یک وضعیت کلان باشد.

با تعریف بولتزمن، آوردن صندلی اضافی به کلاس، انتروپی کلاس را افزایش داده است.

دقت کنید که وقتی از وضعیت خُرد و وضعیت کلان صحبت می‌کنیم، باز هم به نوعی گرفتار مفروضاتِ ناظر هستیم.

به عنوان مثال، در ماجرای کلاس که من در اینجا مطرح کردم، اگر چه صریحاً نگفتم، اما یک فرض مشخص و مهم در آن وجود داشت: استاد تک تک دانشجویان را می‌شناسد و هر دانشجویی او با دانشجوی دیگر تفاوت دارد.

فرض کنید استاد دانشجویانش را در حد شش رأس گوسفند می‌دید که به هر حال باید یک جلسه‌ی کلاس را برای آنها برگزار کند. در چنین حالتی – به فرض آنکه ما گوسفندها را یکسان بدانیم و نخواهیم تفاوت بین آن‌ها را ببینیم – برای استاد وقتی کلاس با شش دانشجو و شش صندلی رسماً تشکیل می‌شود، صرفاً یک وضعیت خُرد قابل تصور است: وضعیتی که صندلی‌ها پرهستند. از نظر او وضعیت کلان صرفاً می‌تواند با یک وضعیت خُرد متناظر باشد.

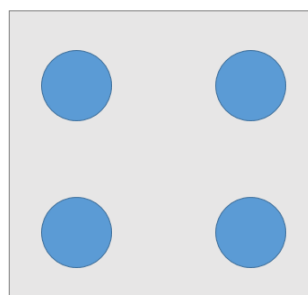
در چنین حالی مثلاً وقتی یک صندلی به تعداد صندلی‌های کلاس افزوده می‌شود و ما هفت صندلی و شش دانشجو داریم، تنها چیزی که به چشم استاد می‌آید، محل صندلی خالی است. بنابراین کلاس رسمیت یافته با هفت دانشجو، نهایتاً می‌تواند با هفت وضعیت خرد متناظر باشد؛ بسته به اینکه صندلی خالی در کجا قرار گرفته است.

در هر دو حالت، افزایش صندلی‌های خالی، انتروپی کلاس را در نگاه استاد افزایش می‌دهد. اما مقدار افزایش، تابع شیوهی نگرش استاد به سیستم کلاس است.

به خاطر داشته باشید که حتی فرض اینکه در کلاس شش دانشجو وجود دارند، دقیقاً توصیف من و شما و آن استاد به عنوان ناظر سیستم است.

می‌توانیم مسئله را به این صورت ببینیم که توده‌هایی از میلیارد‌ها مولکول و اتم در فضای کلاس پراکنده هستند و انتروپی را بر این اساس حساب کنیم.

اجازه بدهید در اینجا از یک مثال کلاسیک ترمودینامیک استفاده کنیم تا بحث مان کمی شفاف‌تر شود^{۲۰۵}.



فرض کنید یک ماده‌ی چهار اتمی داریم که الان میزان انرژی گرمایی موجود در آن معادل ۵ واحد است. به عبارت دیگر مجموعاً ۵ واحد انرژی بین این ۴ اتم توضیح شده است.

البته ما در اینجا نمی‌دانیم به هر اتم چقدر انرژی رسیده؛ اما می‌دانیم که حاصل جمع انرژی موجود در این ماده‌ی ۴ اتمی، ۵ واحد است. مثلاً ممکن است یک اتم همه‌ی ۵ واحد انرژی را داشته باشد و سه اتم دیگر اصلاً حامل انرژی نباشند. یا اینکه دو اتم هر یک دو واحد انرژی داشته باشند و یک اتم دیگر هم یک واحد انرژی داشته باشد.

می‌توان خرده وضعیت‌های اتم‌ها از نظر انرژی در این ماده را به صورت‌های زیر نمایش داد:

$$(1,1,1,2)$$

$$(5,0,0,0)$$

$$(2,1,1,1)$$

$$(3,2,0,0)$$

^{۲۰۵} کسانی که ترمودینامیک آماری یا مکانیک آماری خوانده‌اند، قاعدتاً این مثال یا مشابه آن را در نخستین جلسه‌های کلاس خود شنیده‌اند.

به نظر شما برای این ماده‌ی ۴ اتمی که ۵ واحد انرژی دارد چند خرده وضعیت قابل تصور است؟ این سوال کاملاً شبیه مسئله‌ی گالیله است و می‌توانیم تعداد این حالت‌ها را با $GPD(4,0,5,5)$ نمایش دهیم. مقدار این تابع برابر ۵۶ است.

حالا فرض کنید ماده‌ی ۴ اتمی دیگری داریم که تنها یک واحد انرژی دارد. در وضعیت خرد ۴ حالت مختلف برای اتم‌های این ماده قابل تصور است:

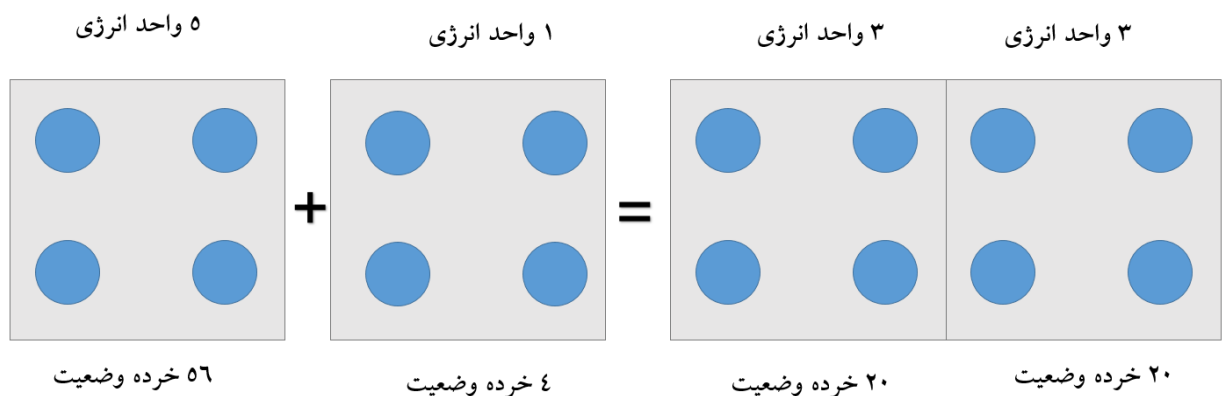
$$(1,0,0,0) \quad (0,1,0,0) \quad (0,0,1,0) \quad (0,0,0,1)$$

اگر علاقه داشته باشید از فرمول بندی خودمان استفاده کنیم می‌توانیم بنویسیم:

$$GPD(4,0,1,1)=4$$

حالا فرض کنید این دو ماده را کنار هم قرار می‌دهیم تا تبادل انرژی انجام دهند و به این صورت بعد از گذشت زمان کافی با دو ماده‌ی ۴ اتمی مواجه خواهیم شد که هر کدام ۳ واحد انرژی دارند (چون به هر حال کل انرژی ما ۶ واحد بوده و طبق قانون اول ترمودینامیک نه انرژی جدیدی خلق شده و نه انرژی موجود از بین می‌رود).

تعداد خرده وضعیت‌های هریک از این دو ماده را می‌توانیم با $GPD(4,0,3,3)$ نمایش دهیم که مقدار آن برابر ۲۰ است. ب. گذارید ببینیم دقیقاً چه اتفاقی افتاد:



قبل از تبادل حرارت، ما یک سیستم دو بخشی داشتیم که بخشی از آن ۵۶ خرده وضعیت و بخش دیگر ۴ خرده وضعیت داشت. با ضرب کردن این دو در یکدیگر می‌توانیم بگوییم قبل از تبادل حرارت ۲۲۴ حالت مختلف قابل تصور بوده است.

بعد از تبادل حرارت، دو سیستم داریم که هریک ۲۰ خرده وضعیت دارند. بنابراین با ضرب کردن اینها در هم می‌توانیم

ببینیم که ۴۰۰ خرده وضعیت جدید وجود دارد^{۲۰۶}.

البته می‌توانید به علت یکنواخت بودن توزیع انرژی بعد از تبادل حرارت، عدد ۴۰۰ را به شکل دیگری هم محاسبه کنید:

$$\text{GPD}(8,0,6,6) = 400$$

حرف بولتزمن دقیقاً همین بود. اینکه ما از حالتی که کلاً با ۲۲۴ خرده وضعیت متناظر بود، بعد از تبادل حرارت به وضعیتی رسیدیم که ۴۰۰ خرده وضعیت متفاوت برای آن ممکن است^{۲۰۷}. اگر فرض کنیم تعداد خرده وضعیت‌ها نشان‌دهنده‌ی انتروپی یک سیستم است، می‌توانیم بگوییم در این تبادل حرارت، انتروپی افزایش یافته است.

اینکه تعداد حالت‌ها را با چه فرمولی به انتروپی تبدیل کنیم، بحث فرعی ماست. بولتزمن ترجیح داد از لگاریتم استفاده کند:

$$S = k \log W$$

در فرمول بالا، S نشان‌دهنده‌ی انتروپی است و k صرفاً یک ضریب تناسب است. W نیز تعداد حالت‌های قابل تصور در وضعیت خُرد برای سیستمی است که وضعیت کلان خود را ثابت نگه داشته و حفظ کرده است^{۲۰۸}.

با توجه به اینکه لگاریتم، یک تابع افزایشی است و با افزایش W مقدار آن نیز افزایش پیدا می‌کند، همچنان همان فرض اولیه‌ی بولتزمن برقرار است که با افزایش تعداد حالت‌های ممکن (یا قابل تصور) انتروپی افزایش پیدا می‌کند.

در اینجا می‌توانیم به یک نکته درباره‌ی مزیت استفاده از لگاریتم اشاره کنیم. ویژگی مهم لگاریتم - مستقل از اینکه بر چه مبنایی محاسبه شود - این است که می‌توان لگاریتم حاصل ضرب دو عدد را به صورت حاصل جمع لگاریتم آن دو عدد نوشت. یعنی:

^{۲۰۶} برای دوستانی که کمتر با ریاضیات ترکیبی کار کرده‌اند، این دقیقاً مشابه یک مسئله‌ی کلاسیک است که دو گروه دانش‌آموز در کنار هم نشسته‌اند. گروه اول می‌توانند به X حالت مختلف کنار هم بنشینند و گروه دوم به Y حالت. برای محاسبه‌ی کل حالت‌هایی که مجموعه‌ی دانش‌آموزان می‌توانند صف بایستند کافی است X را در Y ضرب کنیم.

^{۲۰۷} فرق ممکن و محتمل را هم قطعاً به خاطر داریم.

^{۲۰۸} (در مثال کلاس، w در حالت تفاوت بین دانشجویان ۷۲۰ و در حالت یکسان دیدن دانشجویان ۷ است و در حالتی که دو صندلی اضافه

آمده ۲۰۱۶۰ می‌شود. به عبارت دیگر: تعداد شیوه‌های قابل تصور برای نشستن دانشجویان؛ وقتی کلاس به شکل رسمی برقرار است).

$$\text{Log}(XY) = \text{Log}(X) + \text{Log}(Y)$$

ما در همین مثال ساده دیدیم که ماده‌ی چهار اتمی اول ۵۶ حالت و ماده‌ی ۴ اتمی دوم، ۴ حالت داشت و برای اینکه کل حالت‌ها را محاسبه کنیم، آن‌ها را در هم ضرب کردیم. با لگاریتم گرفتن، این ضرب به جمع تبدیل می‌شود و مفهوم لگاریتم، خطی‌تر خواهد بود.

یعنی می‌توانیم بگوییم ماده‌ی اول به اندازه‌ی $\text{Log}(56)$ انتروپی دارد و وقتی کنار ماده‌ای که به اندازه‌ی $\text{Log}(4)$ انتروپی دارد قرار می‌گیرد، انتروپی آنها با هم جمع می‌شود. حالا که انتروپی خطی شده است می‌توانیم آن را مثل جرم یا انرژی، جمع و تفریق کنیم یا از خارج شدن انتروپی از سیستم یا ورود انتروپی به سیستم حرف بزنیم.

این فرمول ظاهراً ساده – که البته اصلاً ساده نیست – آن قدر مهم بوده و هست که روی سنگ قبر بولتزمن در گورستان مرکزی وین ثبت شده است و اگر اهتانات به اتریش افتاد، قطعاً ارزش دارد لحظاتی را در کنار او و فرمول انتروپی بگذرانید.



پیشنهاد می‌کنم به عنوان تمرین، دائماً به سیستم‌های موجود در اطراف خود نگاه کنید و بکوشید تغییرات انتروپی آن‌ها را در شرایط مختلف بسنجید و حدس بزنید. ما به مقدار عددی انتروپی کاری نداریم. نکته‌ی مهم این است که بتوانیم تشخیص دهیم در هر وضعیتی، آیا انتروپی افزایش یافته یا کاهش پیدا کرده است.

مثلاً شاید شما هم در مجالس وعظ و خطابه شنیده باشید که خطیب‌ها معمولاً با نشستن پراکنده‌ی مردم در سالن مشکل دارند و با روش‌های مختلف همه را تشویق می‌کنند تا بلند شوند و جلوتر بیایند و بنشینند. وقتی جمع مخاطبان در فضای کوچک‌تری می‌نشینند، تعداد حالت‌های مختلف نشستن محدودتر می‌شود و عملاً سخنران، برای جمعی با انتروپی پایین‌تر سخنرانی می‌کند.

درباره مفهوم تصادفی بودن

بحث تصادفی بودن^{۲۰۹} از جهات بسیاری با نظم و بی‌نظمی شباهت دارد. اما به علت ماهیت ریاضی آن و نیز به این علت که در آینده باید به نظریه‌ی آشوب^{۲۱۰} هم پردازیم، احساس کردم بهتر است زیر عنوانی مستقل، کمی بیشتر در موردش صحبت کنیم.

فکر می‌کنم تقریباً در تمام جهان، تصادفی بودن را با انداختن سکه می‌شناسند و یاد می‌گیرند. در شکل پیچیده‌تر، گاهی از سکه به تاس هم می‌رسند تا به جای دو وضعیت تصادفی، شش وضعیت تصادفی در اختیار داشته باشند. اجازه بدهید ما با همان سکه سرگرم باشیم. چون برای بحث‌مان در این مرحله کافی است.

قاعدتاً سکه‌ی سالم که به درد بازی می‌خورد، سکه‌ای است که وقتی آن را به هوا پرتاب می‌کنیم، احتمال افتادن آن از پشت و رویکسان باشد. البته در عمل، زمانی می‌توانیم در مورد سالم بودن یک سکه قضاوت کنیم که آن را دفعات بسیار زیادی پرتاب کرده باشیم.

فرض کنید سکه‌ای به شما بدهند و از شما بپرسند به نظرتان سالم است یا نه. شما آن را پنج بار پرتاب می‌کنید و هر پنج بار به پشت بر زمین می‌افتد. آیا می‌توانید بگویید این سکه خراب است^{۲۱۱}؟ قاعدتاً نمی‌توانید بگویید. به خاطر اینکه یک سی و دوم (حدود ۳٪) احتمال دارد که یک سکه‌ی کاملاً سالم هم دقیقاً پنج مرتبه متوالی، از پشت بر زمین بیفتد.

البته احتمالاً شما در این حالت، برای بار ششم هم سکه را پرتاب می‌کنید. اگر این بار هم از پشت افتاد، باز هم نمی‌توانید به صورت قطعی بگویید سکه خراب است. فقط احتمال خراب بودن سکه افزایش یافته است. چون در مورد سکه‌ی درست هم، حدود ۱/۵٪ این احتمال وجود دارد که دقیقاً شش مرتبه‌ی متوالی از پشت بیفتد.

در کل، کسی که واقعاً احتمالات را بفهمد و باور داشته باشد، اگر صد بار سکه را پرتاب کند و هر صد بار هم سکه از پشت بیفتد، به صورت قطعی نمی‌گوید که این سکه خراب است. بلکه خواهد گفت: این سکه، به احتمال بسیار بسیار زیاد، خراب است.

²⁰⁹ Randomness

²¹⁰ Chaos theory

^{۲۱۱} در انگلیسی از اصطلاح Fair Coin استفاده می‌شود. ما در احتمالات فارسی برای درست و خراب بودن سکه، از اصطلاح ناآریب و آریب استفاده می‌کنیم.

اگر عمر عالم هستی را نامحدود یا بسیار زیاد فرض کنیم، بالاخره روزی کسی این تجربه را داشته یا خواهد داشت که یک سکه سالم را صد بار پرتاب کند و به خاطر اینکه هر صد بار، سکه از پشت افتاده، به اشتباه در این دام بیفتد که سکه خراب و تقلبی است.

در اینجا بولتزمن تعبیری دارد که من آن را بسیار دوست دارم. بولتزمن این تعبیر را به شکل‌های مختلف، بارها مطرح کرده و با قطعیت می‌توانم بگویم که یکی از دغدغه‌های ذهنی‌اش بوده است.

احتمالاً مثالی که در مورد سکه مطرح کردم، برای شما بسیار تئوری و غیرکاربردی به نظر می‌رسد. با خودتان می‌گویید این مثال‌ها فقط روی کاغذ معنا دارند. در دنیای واقعی اگر کسی ده بار سکه‌ای را انداخت و سکه هر ده بار از پشت (یا از رو) افتاد، قاعدتاً سکه‌ی دیگری را برای بازی انتخاب می‌کند.

حرف شما را می‌فهمم. ضمن اینکه اگر خودتان گرفتار چنین سکه‌ای شوید، یک یا دو یا ده بار بیشتر آن را پرتاب می‌کنید و بالاخره با اطمینان بالایی در مورد مناسب یا نامناسب بودنش تصمیم می‌گیرید.

اما اجازه دهید سوال را به شکل دیگری بپرسم:

فرض کنید در بالکن خانه نشسته‌اید.

یک نفر سکه‌ای را پیش چشمان شما ده مرتبه پرتاب می‌کند و هر ده دفعه، سکه دقیقاً از یک سمت بر زمین می‌افتد. می‌خواهید سکه را برای یازدهمین بار پرتاب کنید که اشتباهاً از بالکن پایین می‌افتد و دیگر آن را پیدا نمی‌کنید.

بنابراین، هرگز فرصت آزمایش یازدهم و دوازدهم را با آن ندارید و عملاً سکه را از دست داده‌اید.

آیا هنوز می‌توانید به صورت قطعی بگویید که این سکه، یک سکه‌ی نادرست بوده است؟

از نظر علم احتمال، شما هرگز نمی‌توانید چنین قضاوتی داشته باشید. حتی اگر الان می‌گویید که می‌شود چنین قضاوتی داشت، من سوال را کمی سخت‌تر می‌کنم.

می‌خواهند بگردند و سکه را پیدا کنند. اما گفته‌اند اگر سکه پیدا شد و آزمایش کردند و معلوم شد که سکه‌ی درست و سالمی بوده، شما را اعدام خواهند کرد (گرفتار یک پادشاه هستید که به ریاضیات علاقه‌مند بوده اما اخیراً از نظر روانی بیمار شده است). آیا هنوز حاضرید در مورد ناسالم بودن سکه نظر قطعی بدهید؟^{۲۱۲}

^{۲۱۲} بولتزمن می‌گوید سکه‌ی عالم هستی، صرفاً یک بار افتاده است (بعداً توضیح بدهم که بولتزمن می‌گفت ما Universe داریم. اگر Multiverse داشتیم می‌شد

ممکن است هنوز هم با این بحث راحت نباشید و احساس کنید که چنین ماجراهایی خسته کننده و تئوریک هستند.

اجازه بدهید خاطره‌ای از یک کارگاه آموزشی تعریف کنم که در آنجا خودم، مفهوم تصادفی بودن را با تمام وجود یاد گرفتم. هم به بحث سکه مربوط است و هم کمک می‌کند تا حدی بحث نظم و بی‌نظمی را مرور کنیم.

در یک کارگاه آموزشی حدود بیست نفر بودیم. معلم به هریک از ما چند برگ کاغذ سفید جدول بندی شده داد و از ما خواست تا برای روز دوم کارگاه، یک تکلیف انجام دهیم.

باید یک سکه نورا – که به ما می‌داد – هزار مرتبه پرتاب می‌کردیم و هر بار می‌نوشتیم که سکه از رو افتاد یا از پشت. روی برگه‌ها هم از یک تا هزار شماره گذاری شده بود تا مقابل هر عدد، نتیجه را بنویسیم.

فکر می‌کنم صد یا صد و پنجاه بار این کار را انجام دادم. بعد احساس کردم که چنین کاری منطقی نیست. سکه را کنار گذاشتم و جدول را به صورت تصادفی پر کردم. باید H (رو) و T (پشت) می‌گذاشتم. سعی کردم تا حد امکان ترکیبی تصادفی درست شود: HHTHTHTTTH. همه چیز کامل شد و فردا تکلیف را تحویل دادم.

کارگاه یک تنفس نیم ساعته داشت و وقتی برگشتیم، اسم ۱۲ نفر ما (شامل من) روی اسلاید بود. کسانی که تقلب کرده بودند. به همه چیز فکر کردم: حتی به رنگ نوشتن و میزان فشار دادن خودکار.

اما حرف معلم بسیار ساده بود. در پنج بار متوالی که سکه را پرتاب می‌کنیم، احتمال HHHHH یا TTTTT حدود ۶ درصد است. اما در کل لیست من، حتی یک بار TTTTT یا HHHHH نبود. واقعیت این است که من مراقب بودم تعداد Hها و Tها تقریباً برابر باشد (۴۹۹ بار H و ۵۰۱ بار T را استفاده کرده بودم). اما احساس کرده بودم چند T یا چند H پشت هم غیرطبیعی است.

یادم هست که از همین بحث‌های ریاضی مطرح کردم و به استاد گفتم که به هر حال، این احتمال وجود دارد که هزار بار سکه پرت کنیم و هرگز پنج بار متوالی یک جور زمین نیفتد.

استاد هم با لبخند گوش داد و پرسید، احتمال اینکه در یک کارگاه بیست نفری، این اتفاق برای ۱۲ نفر بیفتد چقدر است؟ سکوت کردم و درس ادامه پیدا کرد.

اما آن روز تعریف تصادفی بودن که استاد گفت بسیار خوب در ذهنم ثبت شد و خصوصاً فهمیدم که تصادفی بودن را با

احتمال اشتباه نگیرم (بگذریم از اینکه تازه احتمال را هم با نظم و بی‌نظمی اشتباه گرفته بودم).

او گفت: اینکه سکه‌ی شما به تعداد برابر از پشت یا رو بیفتد، اینکه توزیع یک پدیده نرمال باشد یا نباشد، به تصادفی بودن یا نبودن ربط ندارد. این هم که ظاهر یک مجموعه منظم باشد یا نباشد، صرفاً به قضاوت شما بستگی دارد.

تصادفی بودن یک تعریف کاملاً عینی^{۲۱۳} دارد: وقتی در یک سلسله رویداد متوالی، دانستن آنچه در لحظات گذشته روی داده، به شما در پیش‌بینی دقیق رویدادی که دقیقاً در گام بعدی روی خواهد داد کمک نکند.

فرض کنیم الان می‌خواهیم سکه‌ای را پرتاب کنیم. به شما می‌گویند که ده دفعه‌ی قبل سکه به ترتیب به صورت HTTTHHHTTH بر زمین افتاده است. آیا می‌توانید بگویید این بار از کدام سمت بر زمین خواهد افتاد؟

در بهترین حالت، شما می‌توانید بگویید که اگر سکه را صد بار بیاندازی، حدس می‌زنم تعداد دفعاتی که از روی افتد حدوداً ۵۰ مرتبه و تعداد دفعاتی که از پشت می‌افتد هم در همین حدود باشد. البته ممکن است کمی بالا و پایین شود. به عبارتی، پرتاب سکه باید به دفعات بسیار زیاد تکرار شود تا بتوانیم کمی در مورد توزیع اتفاقات آن، اظهار نظر کنیم. اما در مورد یک مرتبه پرتاب سکه می‌توانیم اظهار نظر قطعی کنیم؟

البته همین تعریف هم اما و اگرهای متعددی دارد که بعداً به آن خواهیم پرداخت. اما مهم‌ترین چالش آن این است که آیا این گزاره (پیش‌بینی پذیر بودن گام بعدی بر اساس رویدادهای قبلی) به صورت ریاضی و علمی هم قابل سنجش است؟ به عبارتی، به فرض که به عنوان یک تعریف، آن را بپذیریم. اما آیا می‌توانیم در عمل هم آن را بسنجیم و از آن استفاده کنیم؟ البته این تعریف هم اما و اگرهایی دارد که بعداً به آنها خواهیم پرداخت. اما یک نکته‌ی مهم در مورد آن وجود دارد که به بحث ما و بولتزمن مربوط می‌شود و باید در اینجا در موردش صحبت کنیم.

تصادفی بودن یک مدل است

آیا قواعد حاکم بر پرتاب سکه، با قواعدی که بر حرکت ستاره‌ها و سیارات و پرتاب ماهواره‌ها حاکم است تفاوتی دارد؟ به نظر نمی‌رسد تفاوتی وجود داشته باشد.

آیا اگرما دقیقاً وزن و ابعاد و توزیع جرم سکه را بدانیم و بتوانیم مقاومت هوا را اندازه بگیریم و محاسبه کنیم و موقعیت دقیق سکه را هم کنترل کنیم، نمی‌توانیم محاسبه کنیم که سکه چگونه بر روی زمین خواهد افتاد؟ پاسخ این سوال مثبت است.

²¹³ Objective

می‌توان پیش‌بینی کرد. محاسبات انداختن سکه بر روی زمین قطعاً از محاسبه‌ی پرت کردن و انداختن کاوش‌گر کاسینی بر روی زحل ساده‌تر است. اگر این کار را نمی‌کنیم صرفاً به این علت که چنین محاسبه‌ای فایده‌ای ندارد و هزینه کردن برای چنین محاسبه‌ای، قابل دفاع نخواهد بود.

حالا به سوال دیگری فکر کنیم: آیا اگر یک سکه واقعاً به شکل درست و دقیق تولید شده باشد، آیا می‌توانیم از انداختن سکه برای به دست آوردن نتایج تصادفی استفاده کنیم؟ به عبارتی، من یک سری هزارتایی از یک رویداد دوحالتی (H/T) می‌خواهم که هر رویداد آن، مستقل از گذشته‌ی سری باشد^{۲۱۴}. آیا پرتاب سکه روش خوبی برای تولید این سری هزارتایی است؟

فکرمی‌کنم اکثر کسانی که این نوشته را می‌خوانند قبول دارند که پاسخ این سوال مثبت است و چنین روشی، قابل اتکا است. در اینجا چه اتفاقی افتاده؟ ما در وضعیت خُرد (سطح مولکول‌های سکه و جریان هوا و دست ما که سکه را پرت می‌کند و زمین که سکه روی آن می‌افتد) با یک پدیده‌ی کاملاً مکانیکی و جبری روبرو هستیم^{۲۱۵}. اما در وضعیت کلان، یعنی زمانی که یک رشته از H و T داریم، با زنجیره‌ای تصادفی مواجه هستیم. یعنی هر پرتاب، کاملاً از پرتاب‌های قبل مستقل است^{۲۱۶}.

بولتزمن، عکس این کار را در مورد گازها انجام داد. او در وضعیت کلان، کاملاً گاز را مکانیکی و جبری می‌دید. فشار، دما و حجم، با قطعیت قابل اندازه‌گیری و کنترل بودند. نشانه‌ی این قطعیت هم اینکه ما قبل از اینکه ساختار مولکولی گازها را بشناسیم، بخار را در سیستم‌های مکانیکی خود به خدمت گرفته بودیم.

اما در وضع خرد، بولتزمن فرض کرد که ذرات گلوله‌ای کوچکی (همان مولکول‌ها) وجود دارند که به صورت تصادفی حرکت می‌کنند. به عبارتی تصادفی بودن یا Randomness را در وضع خُرد پذیرفت تا در وضع کلان، بتواند خروجی کاملاً مکانیکی و قابل پیش‌بینی از آنها بگیرد.

البته ممکن است خواننده بگوید که جای هر مولکول را هم می‌شود دانست (حداقل به صورت تئوری). سرعت آنها را هم می‌شود دانست. پس این فرض که در وضع خرد، ما با یک سیستم تصادفی مواجه هستیم نادرست است. در آن لایه هم همه چیز کاملاً مکانیکی و Deterministic و قابل پیش‌بینی است. این حرف هم نادرست نیست.

^{۲۱۴} ترجیح می‌دهم فعلاً در اینجا از واژه‌ی Stochastic استفاده نکنم. اگر چه می‌تواند واژه‌ی دقیق‌تری باشد.

^{۲۱۵} در اینجا Deterministic می‌تواند تعبیر درست و دقیق‌تری باشد. نمی‌دانم بعداً جایگزین خواهم کرد یا نه.

^{۲۱۶} اصطلاحاً می‌گویند باید Process Randomness را از Product Randomness تفکیک کرد. اینکه فرایند، تصادفی هست یا نه و اینکه، نتیجه‌ی فرایند تصادفی هست یا نه، دو بحث مستقل هستند که عموماً آنها را با یکدیگر اشتباه می‌گیرند یا به عنوان یک پدیده‌ی واحد، مورد بحث قرار می‌دهند.

جواب درست این است که: **تصادفی بودن یا تصادفی نبودن یک مُدل است**. این ویژگی در واقعیت سیستم نیست. اتفاقاً در بسیاری از موارد، هر دو مدل می‌توانند نتیجه‌های درستی داشته باشند.

مهم این است که بولتزمن در یک لایه، رفتار مکانیکی می‌دید و برای پیش‌بینی آن، مناسب دید در لایه‌ی دیگر، توزیع حرکت در سیستم را تصادفی فرض کند. مثل هر مدل‌سازی دیگری، اینجا هم دغدغه‌ی مفید بودن وجود دارد و نه درست بودن.

این نگاهی است که در آینده در تحلیل سیستم‌های پیچیده و به طور خاص سوآرم^{۲۱۷}‌ها به آن خواهیم پرداخت. اینکه گاوها و زنبورها و موریه‌ها و انسان‌ها، به جبر کاری را انجام می‌دهند یا اختیار، یک فرض است. وقتی برای کل جامعه انسان‌ها، گله‌ی گاوها، برای زنبورها و موریه‌ها، برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری می‌کنیم، سوال درست این است که کدام فرض به تحلیل سیستم بیشتر کمک خواهد کرد؟ این سوال، در فضای حل مسئله و تحلیل سیستم، کاملاً درست و کاربردی است. اما مهم است به خاطر داشته باشیم که در عالم واقع، ما به ازاء بیرونی نداریم^{۲۱۸}.

قانون دوم ترمودینامیک

فعلاً قصد ندارم در اینجا به شکلی دقیق و مشخص به مبانی قانون دوم ترمودینامیک بپردازم. بلکه صرفاً می‌خواهم برخی از شکل‌های ساده‌ی آن را روایت کنم. ساده‌ترین و کلاسیک‌ترین روایتی که می‌توان از قانون دوم ترمودینامیک ارائه کرد به صورت زیر است: گرما بدون دخالت بیرونی همواره از جسم گرم به جسم سرد منتقل می‌شود و برای اینکه عکس این روند شکل بگیرد، باید انرژی صرف شود. همان کاری که یخچال انجام می‌دهد و انرژی گرمایی را از غذایی که سردتر است می‌گیرد و به محیطی که گرم‌تر است منتقل می‌کند.

اما در این روایت – که قدیمی‌ترین شکل بیان قانون دوم ترمودینامیک است – جزئیات بسیاری حذف شده و به همین علت، نمی‌تواند تصویری کامل و دقیق از قانون دوم برای ما ترسیم کند.

روایت دیگری وجود دارد که یک پله دقیق‌تر است. در این روایت، قانون دوم ترمودینامیک در مقایسه با قانون اول و در کنار آن تعریف می‌شود. قانون اول ترمودینامیک را معمولاً به عنوان قانون بقای انرژی می‌شناسیم. این قانون توضیح می‌دهد که در

²¹⁷ Swarms

²¹⁸ ندارد به این معنا نیست که پاسخ را نمی‌دانیم. پاسخ واقعاً وجود ندارد. چون اصل سوال نادرست و بی‌معنا است. ما چیزی به نام استقلال از رویدادهای قبلی را تعریف کرده‌ایم که عملاً با تعریف ناظر، قابل تعریف و سنجش است. بنابراین، چنین استقلالی در ذات سیستم وجود ندارد. در نگاه ناظر است. به همین علت، شاید در مسیر تاریخ، طرفداران هر دو نگرش، همواره برای اثبات نگاه خود، شواهد بسیار داشته‌اند و نتوانسته‌اند بر یکدیگر پیروز شوند. چون بحث، یک دیدگاه است و دیدگاه، به ذات خود بر اساس نقطه‌ی دیدن و ویژگی‌های بیننده معنا پیدا می‌کند. امروز، اگر چه نگاه غالب در کوانتوم بر این است که در پایین‌ترین سطح، می‌توان تصادفی بودن واقعی را تجربه کرد. اما به نظر می‌رسد که همواره باید به خاطر داشته باشیم که در آنجا هم با یک مدل مواجه هستیم.

یک سیستم ایزوله، انرژی نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود، بلکه از شکلی به شکل دیگر تبدیل می‌شود.

اگر بگوییم قانون اول ترمودینامیک درباره‌ی کمیت انرژی صحبت می‌کند، می‌توانیم بگوییم که قانون دوم ترمودینامیک، درباره‌ی کیفیت انرژی حرف می‌زند. اینکه مقدار کل انرژی در یک سیستم ثابت است، اما کیفیت انرژی به تدریج کاهش پیدا می‌کند.

قانون اول ترمودینامیک درباره‌ی کمیت انرژی صحبت می‌کند و قانون دوم، به کیفیت انرژی می‌پردازد.

طبیعی است در این نقطه پرسیم که کیفیت انرژی یعنی چه و بر چه اساسی می‌توانیم کیفیت انرژی را تشخیص دهیم و افزایش و کاهش آن را بسنجیم؟

همان‌طور که در بحث سعدی کارنوا اشاره شد، در فضای ترمودینامیک، انرژی که بتوان از آن کار کشید و به عبارت دقیق‌تر، انرژی قابل تبدیل به کار، انرژی باکیفیت محسوب می‌شود. کار را هم به همان معنای ساده‌ی فیزیکی‌اش، یعنی اعمال یک نیرو و ایجاد جابجایی در اثر اعمال نیرو در نظر می‌گیریم.

وقتی سعدی کارنومی گفت که نمی‌توان ماشین کار دائم ساخت، پیام حرفش این بود که نمی‌توانیم چرخه‌ای دائمی بسازیم که انرژی را تبدیل به کار و کار را تبدیل به انرژی کند. چون راندمان هیچ دستگاهی ۱۰۰٪ نیست و فاصله‌ی راندمان واقعی با راندمان ۱۰۰٪، بخشی از انرژی است که کیفیت خود را از دست می‌دهد.^{۲۱۹} به همین علت، می‌توانیم بگوییم قانون دوم، به ما ناکارآمدی، ضعف و مرگ تدریجی سیستم‌ها را یادآوری می‌کند. چون هم‌زمان با فرایندهای ترمودینامیک، همواره بخشی از انرژی باکیفیت را برای همیشه از دست می‌دهیم.^{۲۲۰}

اما روایت دیگری که به فضای بحث ما نزدیک‌تر است، نگاه به قانون دوم ترمودینامیک از منظر تغییرات انتروپی است. قانون دوم ترمودینامیک را می‌توان به این شکل نیز بیان کرد:

^{۲۱۹} رایج‌ترین و ساده‌ترین روایتی که ما از این اتلاف انرژی داریم، تبدیل شدن انرژی به گرما یا مصرف شدن انرژی در اثر اصطکاک است. اما تعبیر دقیق‌تر این است که بگوییم همواره بخشی از فرایند، بازگشت‌ناپذیر است و یا اینکه بگوییم بخشی از انرژی به شکلی مصرف می‌شود که دوباره نمی‌توان از آن برای تولید کار استفاده کرد.

^{۲۲۰} با توجه به اینکه ما نه مرکز جهان هستیم و نه مبداء جهان و نه مقصد جهان، بهتر است از واژه‌هایی که محور سنجش آنها، انسان است دوری کنیم. اما یک تعبیر ساده، بسیار غیردقیق و البته دارای سوگیری این است که بگوییم همه‌ی فرایندهای ترمودینامیک در جهان، زباله‌های غیرقابل بازیافت تولید می‌کنند. انرژی غیرقابل تبدیل به کار، از نظر ما انسان‌ها، چیزی از این جنس است. باز هم می‌گوییم که باید به خاطر داشته باشیم که دنیا هیچ جا اعلام نکرده که وظیفه‌ی انرژی این است که به کار تبدیل شود و اگر انرژی این کار را انجام نداد، ما می‌توانیم آن را زباله بنامیم. حتی هیچ منطقی وجود ندارد که جهان با انتروپی بالا را شکلی ضعیف‌شده یا پایین‌تر از جهان با انتروپی پایین بدانیم.

انتروپی یک سیستم ایزوله و بسته، همواره ثابت می‌ماند یا رو به افزایش است.^{۲۲۱}

در واقع، اگر می‌خواهیم انتروپی یک سیستم کاهش پیدا کند، باید روی آن کار انجام دهیم و چون برای انجام کار، به انرژی نیاز داریم و در تبدیل انرژی به کار هم (به خاطر ۱۰۰٪ نبودن راندمان) همواره کیفیت بخشی از انرژی کاهش پیدا می‌کند، عملاً حفظ انتروپی در یک سیستم یا کاهش انتروپی آن، با افزایش انتروپی در محیط بیرون سیستم همراه است.



نمی‌دانم تجربه‌ی ساختن کریستال نمک یا شکر (نبات) را در خانه داشته‌اید یا نه. ما نخ‌ی را داخل آب اشباع شده با نمک یا شکر قرار می‌دهیم و به تدریج دور هسته‌ی اولیه، کریستال‌ها شکل می‌گیرند.

در این فرایند، مشخصاً حس می‌کنیم که انتروپی شکر (یا نمک) کاهش یافته است. شکر و نمک در ساختار جامد کریستالی در مقایسه با حالت شناوری در آب، بی‌تردید در سطح انتروپی پایین‌تری قرار دارند.

اما فراموش نکنیم که کریستال نبات وقتی تشکیل می‌شود که بخش زیادی از آب ظرف تبخیر شده و در فضا ناپدید می‌شود. به عبارت دیگر، کاهش مقدار مشخصی از انتروپی شکر و نمک، به قیمت افزایش قابل توجه انتروپی در آب حاصل شده است.^{۲۲۲}

معمولاً کسانی که برای نخستین بار با بحث انتروپی مواجه می‌شوند، بلافاصله این سوال در ذهن‌شان شکل می‌گیرد که پس در مورد کروی زمین چه می‌گوییم؟ به نظر می‌رسد شکل‌گیری و رشد حیات در کروی زمین، مشخصاً به معنای کاهش انتروپی است. مولکول‌ها و اتم‌های پراکنده دور هم جمع می‌شوند و میکروارگانیسم‌ها و ارگانیسم‌ها و ارگان(اندام)‌ها و انسان‌ها و سوپراارگانیسم‌ها (گروه‌هایی از موجودات اجتماعی مثل جامعه‌ی مورچه‌ها، موریانه‌ها یا انسان‌ها) را می‌سازند.

وقتی در یک سالن بزرگ، یک مهمانی بزرگ برقرار است و هر کس در هر جا که می‌خواهد ایستاده، اگر به تعداد مهمان‌ها صندلی بگذارید و از هر کس بخواهید که حتماً روی یک صندلی بنشینند، بی‌تردید انتروپی مهمانی را کاهش داده‌اید.^{۲۲۳}

^{۲۲۱} توضیح واضح‌تر است. اما به خاطر داشته باشیم که بسته بودن سیستم در ترمودینامیک به این معناست که جرم به سیستم وارد نمی‌شود و از آن خارج نمی‌شود. وقتی هم از ایزوله بودن صحبت می‌کنیم، یعنی نه می‌توان روی سیستم کاری انجام داد (مرزهای آن را جابجا کرد) و نه می‌توان با آن تبادل انرژی انجام داد.

^{۲۲۲} این حرف من خیلی غیر دقیق است. اما برای عزیزانی که تجربه‌ی محاسبات ترمودینامیکی را ندارند، می‌تواند مناسب باشد: ما برای گردآوری مولکول‌های نمک که در یک لیوان پراکنده بودند در اطراف یک نخ، اجازه دادیم مولکول‌های آب از فضای محدود لیوان خارج شوند و در تمام جهان پراکنده شوند.

^{۲۲۳} البته می‌دانیم که در بسیاری از مهمانی‌ها عده‌ای همواره مسئول افزایش انتروپی هستند و مدام دست همه را می‌گیرند و به «وسط» دعوت می‌کنند تا مطمئن

وقتی هم که انبوهی مولکول و اتم در کنار یکدیگر می‌نشینند و بدن ما را می‌سازند، عملاً به هر مولکول جایگاه و صندلی داده‌ایم و شکل‌گیری حیات در یک سیستم به معنای کاهش انتروپی در آن سیستم است.

این حرف کاملاً درست است. اما نباید فراموش کنیم که قانون دوم ترمودینامیک از یک سیستم ایزوله و بسته سخن می‌گوید. ما برای اینکه اتم‌ها و مولکول‌های بدن خودمان را در این مهمانی کنار هم بنشانیم و انتروپی پایین بدن را حفظ کنیم، به غذا خوردن و کسب انرژی نیاز داریم. بگذریم که این مهمانی هم ابدی نیست و به تدریج سطح انتروپی افزایش پیدا می‌کند تا جایی که مولکول‌ها و اتم‌ها، صندلی‌ها را به کناری پرت می‌کنند و به رقص درمی‌آیند و زندگی آزادانه‌ی خود را آغاز می‌کنند. همان چیزی که ما به آن، مرگ ارگانیسم می‌گوییم.

همین مثال کسب انرژی برای زنده ماندن، در سطح بزرگ‌تر هم صادق است. کروی زمین انرژی خود را از خورشید می‌گیرد و این انرژی کمک می‌کند که سطح انتروپی در زمین حفظ شده و کاهش پیدا نکند. اگر موجودات این کره، با بی‌توجهی به محیط زیست، خودکشی نکنند، باز هم قرار نیست عمر ابدی وجود داشته باشد و روزی با تمام شدن این منبع انرژی بیرونی (خورشید)، عملاً باید افزایش تدریجی انتروپی کل سیستم را به عنوان سرنوشت محتوم آن بپذیریم.

حالا شاید بد نباشد چند سطری را که از بولتزمن، در ابتدای این فصل آوردم دوباره بخوانیم. اگر این جمله‌ها در نگاه شما عمیق‌تر و دوست‌داشتنی‌تر از ابتدای فصل به نظر برسند می‌توانم امیدوار باشم که وقتی که برای مطالعه‌ی این حرف‌ها گذاشتید، بی‌هوده نبوده است:

کشمکش و تنازع اصلی بین موجودات زنده، بر سر عنصرها نیست. همه‌ی آن عنصرهایی که ارگانیسم‌ها از آنها ساخته شده‌اند به وفور در هوا و آب و خاک وجود دارند. حتی برای انرژی هم نیست. انرژی به شکل گرما در همه‌ی ما موجود است و متأسفانه به چیز خاصی هم تبدیل نمی‌شود.

دعوا و رقابت بر سر انتروپی است. این انتروپی از طریق جریان انرژی که از سوی خورشید به سمت ما روان است، از خورشید گرم به زمین سرد می‌رسد. گیاهان، برای اینکه بهترین استفاده را از این انرژی بکنند، برگ‌هایشان را به اندازه‌ای که می‌توانند بزرگ می‌کنند و آن انرژی را به شیوه‌ای که ما هنوز کشف نکرده‌ایم، مورد استفاده قرار می‌دهند.

تا زمانی که خورشید سرد نشده و به دمای زمین نرسیده، این جریان ادامه دارد. زندگی زمینی، صرفاً یک آشپزخانه‌ی بزرگ شیمیایی است که انرژی سنتزهای خود را از خورشید دریافت می‌کند. دنیای حیوانات، حاصل فعالیت این آشپزخانه‌ی بزرگ است.

انتروپی – فصل مشترک جهان ماقبل اتمی با جهان بعد از کشف اتم

این بحث و این نوع بحث‌ها، چیزهایی بود که در ذهن بولتزمن می‌گذشت.

معمولاً هم سخنرانی‌هایش با گازها شروع می‌شد و با بحث‌های نامربوط دیگر به پایان می‌رسید. وگرنه قابل تصور نیست که چرا باید سخنرانی در مورد نظریه گازها، با توزیع بولتزمن - ماکسول شروع شود و در همان جلسه، با بحث درباره تکامل طبیعی داروین به پایان برسد.

بولتزمن، جهان را نه منظم می‌دید و نه نامنظم. او معتقد بود که انسان، فهم خودش را بر جهان تحمیل کرده است. به همین علت، می‌کوشید با شاخص‌هایی عینی تر جهان را اندازه بگیرد و ببیند و بسنجد. انتروپی یکی از همین معیارها بود.

تا اینجا مهم است که دو نکته را به خاطر بسپاریم: یکی اینکه از واژه‌ی نظم، در بحث پیچیدگی استفاده نکنیم و اگر هم لازم شد استفاده کنیم، به خاطر داشته باشیم که نظم، صرفاً به معنای الگوهای آشنا است و منطقی‌تر است که بگوییم منظورمان از نظم، نظم در نگاه چه کسی است.

دوم اینکه به یک نکته‌ی مهم توجه داشته باشیم. مفهوم انتروپی، جهان ماقبل اتمی را به جهان مابعد اتمی متصل می‌کند. زمانی که کلاویوس و کلونین، از انتروپی حرف می‌زدند و آن را محاسبه می‌کردند، همه چیز برای آنها در وضعیت کلان یا مقیاس بزرگ وجود داشت. آنها گرما را اندازه می‌گرفتند. دما را می‌سنجیدند. زمان را می‌فهمیدند. جرم را کنترل می‌کردند و در یک کلام، موضوع آزمایش و ابزار آزمایش و آزمایش‌گر، همگی کمابیش در یک مقیاس بودند.

بولتزمن، فرض دیگری را به جهان فیزیک افزود. آن فرض این بود که ماده (به طور خاص، گاز) از ذرات بسیار کوچک‌تری تشکیل شده که ما آنها را نمی‌بینیم.

او مقیاس محاسبه را در سطح اتم‌ها و مولکول‌ها برد. اگرچه او بین اتم و مولکول، تفاوت چندانی قائل نمی‌شد. همه چیز را به صورت توپ‌های الاستیک کوچکی می‌دید که براساس قوانین نیوتون حرکت می‌کنند و به هم برخورد می‌کنند و ما بی‌آنکه حرکت و برخورد آنها را ببینیم، اثر این حرکت‌ها و برخوردها را می‌بینیم.

بولتزمن، با این نگاه جدید، توانست انتروپی را در مقیاس اتمی تعریف کند. انسان در حالی از قرن نوزده به قرن بیست وارد شد که ترمودینامیک ماقبل اتمی، ظهور مکانیک اتمی را می‌دید و آنچه این دو دنیای مستقل را با هم آشتی می‌داد، تعریف انتروپی بولتزمن بود.

این فصل را در شرایطی به پایان می‌بریم که سه مفهوم زیربرایمان معنای یکسانی ندارند:

- **نظم و بی‌نظمی** (که براساس انتظارات و تجربیات گذشته و تعریف ناظر معنا پیدا می‌کند)

- انتروپی که رابطه‌ی بین وضعیت خرد و وضعیت کلان یک سیستم و تعداد و تنوع وضعیت‌های خرد را بیان می‌کند.
- تصادفی بودن که به رابطه داشتن یا نداشتن یک رویداد با رویدادهایی که قبل از آن روی داده اشاره دارد.

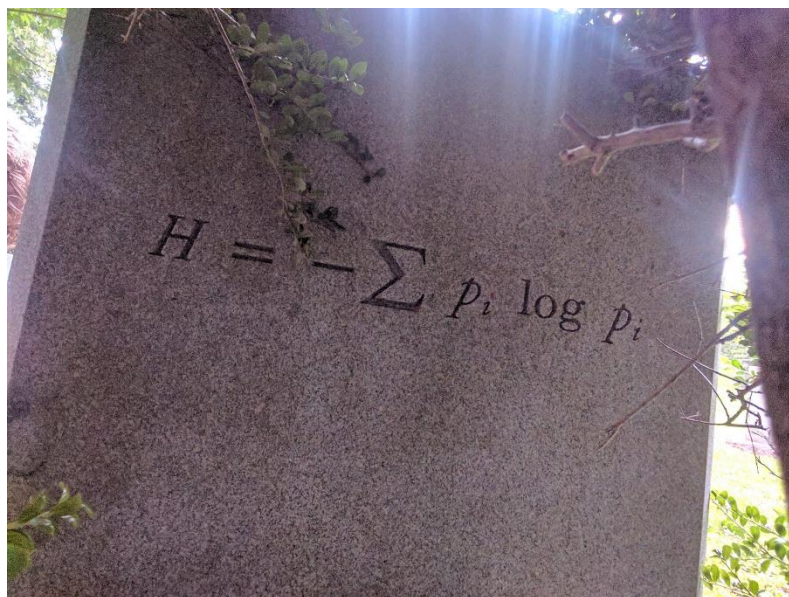
من می توانم زمانی را تصور کنم که ما انسان ها نسبت به روبات ها دقیقاً همان وضعیتی را داریم که امروز سگ ها نسبت به ما دارند.

دوگانه ی گذشته و آینده، با توجه به مفهوم دانش و کنترل قابل درک است. ما درباره ی گذشته دانش داریم. اما کنترلی بر روی آن نداریم. از سوی دیگر، ما در مورد آینده چیزی نمی دانیم، اما می توانیم آن را کنترل کنیم. کلود شنون

شنون و یک راه دیگر که به انتروپی ختم می شود

سنگ قبر بولتزمن در وین، تنها سنگ قبری نیست که روی آن یک فرمول لگاریتمی نوشته شده است. در کمبریج هم می توانید سنگ قبر دیگری را بیابید که روی آن فرمولی برپایه ی لگاریتم نقش بسته است.

البته این بار باید به پشت قبر بروید و شاخه ها را کنار بزنید تا فرمول انتروپی شنون را ببینید. به هر حال این جا محل دفن یک متخصص رمزنگاری است و نباید انتظار داشته باشید به سبک بولتزمن، نوشته ای درشت و بزرگ دقیقاً پیش چشمان تان ظاهر شود.^{۲۲۴}



^{۲۲۴} ظاهراً فرزندان شنون دوست داشته اند این فرمول در قسمت جلوی سنگ قبر باشد. اما بتی همسرش گفته متواضعانه تر است که این فرمول پشت سنگ باشد. آن کس که بخواهد، آن را خواهد یافت. به بتی می توان حق داد که در چنین مواردی تصمیم بگیرد. نقش او – که خود ریاضیدانی مستعد و هوشمند بود – در دستاوردهای شنون و آن چه امروز به نام شنون می شناسیم کم نبوده است.

لازم است به خاطر داشته باشیم که شنون در سال ۲۰۰۱ فوت کرد و این که دوباره فرمول لگاریتمی مشابهی بعد از صد سال روی یک سنگ قبر ثبت می شود می تواند نشانه ای از این باشد که انتروپی و نظریه اطلاعات، یک قرن تمام دل مشغولی دانشمندان بزرگ جهان بوده است.^{۲۲۵}

زندگی شنون خواندنی های بسیار دارد و اینکه آن قدر عمر کرد تا کاربردی شدن بخش مهمی از دستاوردهای علمی اش را ببیند، به جذابیت این داستان می افزاید. اما من از روی آن عبور می کنم و به سراغ بحث خودمان می روم. قطعاً کسانی که به مطالعه ی زندگی دانشمندان علاقه مند باشند، مرور زندگی نامه ای را که جیم سونی و راب گودمن تنظیم و منتشر کرده اند جذاب خواهند یافت.^{۲۲۶} (همین مسئله ی سنگ قبر را هم در کتاب سونی و گودمن دیدم. در نوشته های قبل از آن ها به چشمم نخورده است).

شنون و سومین مسیری که به انتروپی رسید

مهم است که به خاطر داشته باشیم قبل از شنون، دو مسیر متفاوت فیزیکدانان را به انتروپی رسانده بود. اولین مسیر را کسانی مانند سعدی کارنو و کلاوزیوس و کلونین با طرح قانون دوم ترمودینامیک هموار کردند.^{۲۲۷}

باید به این نکته توجه داشته باشیم که در زمان این دانشمندان هنوز نگاه اتمی در فیزیک وجود نداشت و همه چیز در سطح ماکرو بررسی و سنجیده می شد. بنابراین می توانیم بگوییم نخستین بار انتروپی در وضعیت ماکرو دیده شد. بدون اینکه دیدن و تجربه کردن آن به آشنایی با ساختار ماده نیاز داشته باشد.

زمانی که بولتزمن بحث انتروپی را مطرح کرد، از موضوع دیگری حرف می زد که به وضعیت خرد یا میکروسکوپی ماده مربوط بود. می توانیم بگوییم او پارامتر جدیدی را تعریف کرده بود که در فرایندهای ترمودینامیک بسته، ثابت می ماند یا افزایش پیدا می کرد. مدتی طول کشید تا بولتزمن به این قطعیت رسید که

^{۲۲۵} عکس سنگ قبر را از اکانت @ritchiewilson در توییتر برداشته ام.

^{۲۲۶} Soni, J., & Goodman, R. (2017). A mind at play: How Claude Shannon invented the information age. New York, NY: Simon & Schuster.

^{۲۲۷} سعدی کارنو که او را پدر علم ترمودینامیک نیز می دانند در ۳۶ سالگی به علت ابتلا به بیماری وبا مرد و بخش مهمی از دست نوشته هایش را از ترس وبا به همراه خودش دفن کردند. او واژه ی انتروپی را به کار نبرده؛ اما بازگشت ناپذیری را پیش از دیگران مطرح کرد. مشخصاً کارنو قانون دوم ترمودینامیک را به خوبی درک می کرده و همین که با وجود جوان مرگ شدن عنوان پدر علم ترمودینامیک را از آن خود کرده می تواند جایگاه او و نگاه و نگرش او را در دنیای فیزیک نشان دهد.

آنچه او در حالت میکروسکوپیک محاسبه می کند، همان چیزی است که کسانی مثل کلاوزیوس در حالت ماکروسکوپیک اندازه گیری و بررسی کرده اند.

اجازه بدهید این مسئله را به یافتن دوراه مختلف به یک شهر تشبیه کنم:

فرض کنید عده ای جاده ی تازه و جذابی پیدا کرده اند و هنگام طی کردن آن جاده به شهری ناشناخته رسیده اند. آنها سفرنامه ای هم نوشته اند و وضعیت این شهر جدید را - که انتروپی نامیده اند - توصیف کرده اند.

شما آن سفرنامه را خوانده اید و در گشت و گذارهای خود به شهری می رسید که ویژگی هایی مشابه همان شهر داخل سفرنامه را دارد. اما چون می بینید که شکل و ظاهر جاده ی ورودی شما با آنچه گردشگران قبلی از ورودی شهر انتروپی گفته اند تفاوت دارد، مدتی طول می کشد تا با جستجو و بررسی بیشتر مطمئن شوید که از صرفاً راهی متفاوت به همان شهر قبلی رسیده اید. این تقریباً وضعیتی است که بولتزمن در رسیدن به شهر انتروپی تجربه کرد.

نکته ی جالب داستان ما در این است که کلود شنون، سومین گردشگری بود که از مسیری متفاوت به شهر مورد نظر ما رسید. البته او به کلی سرزمینی متفاوت را جستجو می کرد. به همین علت دیرتر از بولتزمن برایش مشخص شد که او هم به همان شهر انتروپی رسیده است.

اگرچه تفاوت هایی در نگاه بولتزمن و شنون به انتروپی وجود دارد، اما این تفاوت ها آن قدر کم و شباهت ها آن قدر زیاد بوده است که دانشمندان هر دو حوزه ی ترمودینامیک و مخابرات، پذیرفته اند که نام یکسان انتروپی را برای این مفهوم به کار ببرند.

بیایید عددی را که انتخاب کرده ام حدس بزنید

بیایید به یک بازی ساده فکر کنیم. من یک عدد بین ۱۰۰ و ۲۹۹ انتخاب کرده ام و از شما می خواهم با پرسیدن چند سوال، عددی را که من انتخاب کرده ام بیابید. البته یک شرط مهم هم داریم: من پاسخ سوال شما را فقط با بله و خیر خواهم داد.^{۲۲۸}

شما روش های مختلفی دارید که به جواب برسید. اجازه بدهید بعضی از این روش ها را مرور کنیم:

روش مکانیکی

^{۲۲۸} زمانی که ما کودک بودیم، بازی بیست سوالی با چنین چارچوبی اجرا می شد. یکی از ما یک شیء را انتخاب می کرد و طرف مقابل سعی می کرد با کمترین بیست سوال که پاسخ شان فقط بله یا خیر بود آن شیء را حدس بزند. رایج ترین سوال هم در ابتدای بازی این بود که می پرسیدیم: توی جیب جا میشه؟ نمی دانم که این بازی هنوز هم رواج دارد یا نه. اما بخش مهمی از کودکی ما را به خودش اختصاص داد و بر اساس آن چه در این سال ها آموخته ام، حدس می زنم می توانسته تاثیر مثبتی هم بر توانایی های ذهنی ما داشته باشد.

ساده ترین روش - که البته سریع ترین روش نیست - روش مکانیکی است. به نظرم این روش را می توان جستجوی کور^{۲۲۹} هم نامید. شما از عدد صد شروع می کنید و از من سوال می پرسید:

- صد؟

- نه

- صد و یک؟

- نه

- صد و ده؟

- نه

- ...

موفقیت شما در این روش قطعی است. اما ممکن است مجبور شوید نزدیک به دویست سوال پرسید.

روش جستجوی تصادفی

یک روش دیگر هم وجود دارد. اینکه شما اعداد بین ۱۰۰ تا ۲۹۹ را روی کاغذ بنویسید و داخل یک جعبه بیندازید. سپس به صورت تصادفی کاغذها را بیرون بکشید و هر بار پرسید که عدد انتخابی من آن است یا نه.

روش مبتنی بر باقیمانده ها

می توانید یک عدد خاص را انتخاب کنید و باقیمانده ی تقسیم عدد من بر آن را پرسید. فرض کنیم عدد ده را انتخاب کرده باشید:

- باقیمانده ی تقسیم عدد تو بر ۱۰، صفر است؟

- نه (تا همین جا ده درصد گزینه ها را حذف کرده اید).

- باقیمانده تقسیم عدد تو بر ۱۰، یک است؟

- نه (باز هم ده درصد دیگر حذف شد).

- باقیمانده تقسیم بر ۱۰، دو می شود؟

- بله.

²²⁹ Blind Search

حالا شما می دانید عدد انتخاب شده ی من در مجموعه ی زیر است:

$$\{292, 282, \dots, 132, 122, 112, 102\}$$

روش باینری (دو دویی)

احتمالاً اکثر ما از روش های قبل استفاده نمی کنیم و مستقیماً به سراغ روش باینری می رویم. یعنی محدوده ی ۱۰۰ تا ۲۹۹ را به دو بخش تقسیم می کنیم و می پرسیم که عدد انتخاب شده از ۲۰۰ بزرگ تر است یا کوچکتر.

فرض کنیم که بفهمیم عدد انتخاب شده از ۲۰۰ کوچک تر است. حالا فاصله ی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ را به دو بخش تقسیم می کنیم و همین فرایند را تکرار می کنیم.

چرا به سراغ روش باینری می رویم؟

همه ی ما به طور شهودی می دانیم که روش باینری (تقسیم کردن مکرر محدوده ی هدف به دو بخش مساوی) روشی هوشمندانه برای پرسیدن سوال هاست. اما چگونه می توانیم به صورت دقیق و شفاف، علت انتخاب این روش را توضیح دهیم؟

چرا اگر کسی دقیقاً به صورت مکانیکی از ۱۰۰ تا ۲۹۹ را بپرسد، راه حلش را غیرمنطقی یا احمقانه فرض می کنیم؟

وقتی از طرف مقابل می پرسیم آیا عدد ۱۰۰ را انتخاب کرده ای به احتمال ۵٪/۵ پاسخ بله دریافت می کنیم و به احتمال ۹۵٪/۵ پاسخ خیر دریافت خواهیم کرد. به عبارتی احساس می کنیم جواب این سوال را تا حد زیادی می دانیم و با مطرح کردن آن، بخشی از فرصت پرسیدن سوال را تلف کرده ایم.

وقتی هم درباره باقیمانده بر ۱۰ می پرسیم، به احتمال ۱۰٪ پاسخ مثبت و به احتمال ۹۰٪ پاسخ منفی دریافت خواهیم کرد. اوضاع از قبل بهتر است. اما همچنان پاسخ را تا حد خوبی حدس می زنیم (احتمال اینکه پاسخ منفی بشنویم بیشتر است). ما دوست داریم سوالی بپرسیم که به هیچ وجه نتوانیم پاسخ آن را حدس بزنیم. بنابراین باید سراغ سوال هایی مانند سوال های زیر برویم:

- آیا بزرگ تر یا مساوی ۲۰۰ است؟ (۵۰٪ پاسخ مثبت و ۵۰٪ پاسخ منفی)
- آیا عددی که انتخاب کرده ای فرد است؟ (۵۰٪ پاسخ مثبت و ۵۰٪ پاسخ منفی)

البته علاوه بر دو روش بالا، روش های دیگری هم وجود دارند که می توانند با همان سرعت آنها جواب بدهند. اگر چه شاید اجرای آنها کمی سخت تر باشد. مثلاً می توانید یک جدول ده در بیست ترسیم کنید و اعداد بین ۱۰۰ تا ۲۹۹ را به صورت

تصادف در خانه های آن بنویسید. سپس جدول را از وسط به دو نیمه تقسیم کنید و یکی از جدول ها را به طرف مقابل نشان بدهید و بگویید آیا عددی که انتخاب کرده ای در این صفحه هست؟

بسته به پاسخ مثبت یا منفی (که احتمال هر کدام باز هم ۵۰٪ است) یکی از دو نیمه را دور می اندازید و با نیمه ی دیگر همین کار را انجام می دهید^{۲۳۰}.

به نظری می رسد هر سه روشی که الان مطرح کردم یک ویژگی مشترک دارند. ما در هر سه مورد نمی توانیم حدس بزنیم که احتمال شنیدن پاسخ مثبت بیشتر است یا منفی.

اگر سوالی بپرسیم که می دانیم کدام سمت آن محتمل تر است، عملاً کمی فرصت سوزی کرده ایم. هر چه پاسخ محتمل را بهتر بدانیم، فرصت بیشتری را سوزانده ایم.

این همان تعریفی بود که شنون را به سمت فرمول انتروپی اش سوق داد:

فرض کنید به طرف مقابل اجازه داده اید بین گزینه های ۱ و ۲ و ۳ تا N یکی را انتخاب کند.

همچنین فرض کنید احتمال انتخاب کردن گزینه ی ۱ برابر p_1 ، احتمال انتخاب گزینه ی ۲ برابر p_2 و به همین ترتیب احتمال انتخاب گزینه ی n برابر p_n باشد.

پس از اینکه او یکی از گزینه ها را انتخاب کرد، شما حداکثر به چند سوال نیاز دارید تا بفهمید کدام را انتخاب کرده؟

ضمناً پاسخ سوال های شما از دو حالت خارج نخواهد بود: بله / خیر.

شنون تعداد سوال ها را به صورت زیر برآورد می کند (همان چیزی که روی سنگ قبرش نوشته شده):

$$H = - \sum p_i \log p_i$$

بیایید یک بار دیگر به مسئله ی خودمان فکر کنیم.

من دویست گزینه ی مختلف دارم که احتمال انتخاب هریک از آنها $\frac{1}{200}$ است (چون قرار است انتخاب را کاملاً تصادفی

^{۲۳۰} کسانی که با دسته ی ۵۲ تایی ورق، شعبده بازی می کنند چند بازی بلدند که منطقش تا حدی شبیه همین شیوه است. البته آنجا تقسیم بندی ۴ دسته ی ۱۳ تایی، کارشان را ساده تر می کند.

انجام دهم). بنابراین همه ی p_i ها دقیقاً برابر $\frac{1}{200}$ خواهند بود:

$$H = - \sum_{n=100}^{n=299} \frac{1}{200} \log \frac{1}{200} = 200 \cdot \frac{1}{200} \log 200$$

حاصل این محاسبه (اگر لگاریتم را بر پایه ی دو حساب کنیم) $7/64$ است. چون خرده سوال نداریم می توانیم بگوییم که ۸ سوال برای رسیدن به عدد مورد نظر لازم است.

ما در دنیای دیجیتال مفهوم بیت را می شناسیم که تنها دو وضعیت صفر و یک (بله / خیر) دارد و می توانیم به جای هشت سوال، بگوییم که برای یافتن پاسخ به هشت بیت اطلاعات نیاز داریم.

در چنین فضایی راحت تر می توانیم درک کنیم که چرا می گویند انتروپی شنون معیاری برای سنجش نقص اطلاعات ماست. وقتی طرف مقابل یک عدد بین ۱۰۰ تا ۲۹۹ انتخاب کرده و من نمی دانم که چه عددی را انتخاب کرده، اطلاعات من در این زمینه به اندازه ی هشت سوال (بخوانید: هشت بیت) از او کمتر است.

با همین ادبیات می توانیم بگوییم که چرا روش مکانیکی روش خوبی نیست. اولین سوالی که من می پرسم به احتمال $\frac{1}{200}$ پاسخ مثبت و به احتمال $\frac{199}{200}$ پاسخ منفی دارد. پس حجم اطلاعاتی که در پاسخ به این سوال دریافت می کنم به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$H = - \sum p \log p = - \left(\frac{1}{200} \log \frac{1}{200} + \frac{199}{200} \log \frac{199}{200} \right) = 0.045$$

سوال های بعدی هم اطلاعات چندان بیشتری نخواهند داشت. البته کمی انتروپی آنها افزایش پیدا می کند. مثلاً سوال دوم به احتمال $\frac{1}{199}$ پاسخ مثبت و به احتمال $\frac{198}{199}$ پاسخ منفی خواهد داشت. اما به هر حال این حجم اطلاعات همچنان بسیار پایین است.

اگر قرار باشد من حدود هشت بیت اطلاعات را با سوال هایی بپرسم که پاسخ هر کدام از آنها چند صدم بیت ارزش دارد، طبیعی است که مجبور می شوم تعداد سوال های بسیار بیشتری بپرسم.

مسئله‌ی خوب یا مسئله‌ی خوب‌تر؟ مسئله این است

بحث انتروپی شنون را می توان از زوایای مختلفی نگاه کرد. یکی از کاربردهای اصلی - که خود شنون هم بیشتر به آن توجه داشت - بحث ارتباطات و ارزیابی ظرفیت کانال های ارتباطاتی است. این که ببینیم در مبداء چقدر اطلاعات داریم و با احتساب نویز و اختلالات مسیر، برآورد کنیم که به چه حجمی از ترافیک برای تبادل آن اطلاعات نیاز خواهیم داشت^{۲۳۱}.

طبیعتاً ریاضی دان ها و فیزیک دان ها هم از منظر خود و بسته به نیازشان به انتروپی شنون نگاه می کنند.

من در عمده‌ی بخش های آتی این کتاب، با انتروپی شنون صرفاً در حد برآورد کیفی از یک شاخص کمی برخورد خواهم کرد. به عبارت دیگر، قرار نیست بارها و بارها به سراغ فرمول لگاریتمی انتروپی بازگردیم. اما مهم است که عمیقاً بفهمیم و درک کنیم که با افزودن چند صندلی خالی به یک کلاس، انتروپی آن افزایش پیدا می کند.

هم چنین لازم است به خوبی این مسئله را لمس کنیم که انسان ها، تا زمانی که می توانند انتروپی خود را - به عنوان یک سیستم - کنترل کنند، «زنده» نامیده می شوند و وقتی ظرفیت این کار را از دست دادند، توسط هم نوعان خود به خاک سپرده می شوند.

بنابراین، چه در اینجا و چه در بخش های دیگر کتاب که به سراغ انتروپی می رویم، کافی است خواننده جنبه‌ی مفهومی آن را مد نظر قرار دهد و به صورت شهودی درک کند. اگر هم جایی کمی وارد جزئیات بیشتر مسئله ها می شویم، صرفاً به همین نیت است.

با این مقدمات، به سراغ مسئله‌ی مانتی هال می رویم. این مسئله امروز یک مسئله‌ی کلاسیک محسوب می شود و با جستجوی کوتاهی در وب می توانید هزاران مقاله در موردش بیابید^{۲۳۲}. مانتی هال نام مجری یک نمایش تلویزیونی است و مسئله‌ی مانتی هال هم از نام او گرفته شده است^{۲۳۳}.

اگر بخواهیم از حاشیه ها بگذریم، بخش مورد نظر ما قسمتی است که شرکت کننده باید وارد فرایندی شبیه بخت آزمایی شود. سه درِ بزرگ روبروی او قرار دارد و پشت یکی از آن ها یک خودرو گران قیمت قرار دارد. پشت درهای دیگر چیز خاصی نیست:

^{۲۳۱} حتماً به خاطر داریم که عنوان مقاله‌ی کلیدی شنون هم به همین حوزه اشاره داشت: A mathematical theory of communication.

^{۲۳۲} معمولاً در کتاب ها و نوشته های رسمی، این مسئله با عنوان MHP مورد اشاره قرار می گیرد. MHP مخفف Monty Hall Problem است.

^{۲۳۳} با عنوان Let's make a deal می توانید درباره این نمایش جستجو کنید.



شرکت کننده در برنامه، یکی از این درها را انتخاب می کند. اما مجری قبل از باز کردن آن، یک کار ساده انجام می دهد. یکی دیگر از درها را - که طبیعتاً خالی است - باز می کند. حالا از شرکت کننده می پرسد که آیا هنوز همان در اول را انتخاب می کند یا ترجیح می دهد انتخاب خود را تغییر دهد؟

این مسئله را می توان از زوایای مختلفی نگاه کرد.

زاویه ی اول، مربوط به فردی است که آشنایی خاصی با آمار و احتمال و ریاضی ندارد. چنین فردی احتمالاً به صورت تصادفی تصمیم می گیرد که انتخاب خود را حفظ کند یا تغییر دهد. شاید هم - اگر کمی مثل برخی از مردم ما غرق در خرافات باشد - بگوید: «این اولی را نیت کرده ام. اصلاً دیشب خواب دیده ام که پشت این در، جایزه ی من را گذاشته اید. من تحت هیچ شرایطی در دیگری را انتخاب نمی کنم.»

زاویه ی نگاه دوم، مربوط به کسانی است که مفهوم انتروپی شنون را درک می کنند. با توجه به اینکه انتروپی شنون، کم بود اطلاعات من را نشان می دهد، می توانیم بگوییم من به عنوان کسی که با مسئله مواجه شده ام، همواره ترجیح می دهم مسئله ای با انتروپی پایین تر را انتخاب و حل کنم.

ما در ابتدای نمایش، سه وضعیت خُرد داریم که احتمال برابر دارند:

- وضعیت ۱ به احتمال $\frac{1}{3}$: ماشین پشتِ درِ اول است.
- وضعیت ۲ به احتمال $\frac{1}{3}$: ماشین پشتِ درِ دوم است.
- وضعیت ۳ به احتمال $\frac{1}{3}$: ماشین پشتِ درِ سوم است.

پس اگر انتروپی شنون را برای سیستمی با توزیع احتمال $X(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ حساب کنیم می توانیم بگوییم این مسئله، یک مسئله ی $1/58$ بیتی است.

واضح است که وقتی یکی از درها توسط مجری باز می شود، چیزی که نمی دانسته ام بر من آشکار می شود. بنابراین می توانیم بگوییم که بعد از باز شدن، مسئله ی جدیدی روبروی من قرار گرفته که انتروپی پایین تری نسبت به گذشته دارد.



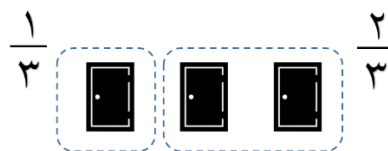
بنابراین منطقی نیست که من بر راه حلی که برای مسئله ی متفاوتی با انتروپی بالاتر داشته ام، پافشاری کنم و باید بپذیرم که با مسئله ی جدیدی مواجه شده ام.

تا این مرحله شنون و انتروپی او از داخل گور یک پیام مهم برای ما دارند: بر روی انتخاب قبلی ات پافشاری نکن. اکنون تو با سیستم جدیدی مواجه هستی که انتروپی کمتری دارد. فضای بازی عوض شده است. اما در این جا دو سوال به وجود می آید:

- آیا به صورت قطعی، انتخاب خودم را تغییر دهم؟ مثلاً اگر در اول را انتخاب کرده بودم و اکنون می دانم پشت در دوم چیزی نیست، حتماً در سوم را انتخاب کنم؟
- یا اینکه یک بار دیگر انتخابی تصادفی انجام دهم؟ یعنی با انداختن سکه بین در اول و در سوم، یکی را انتخاب کنم؟

از این مرحله به بعد، سواد احتمالات به دردمان می خورد. ساده ترین توضیحی که می توان برای این مسئله ارائه کرد به صورت زیر است:

ما در لحظه ی شروع نمایش با چنین وضعیتی مواجه بودیم:



احتمال اینکه ماشین گران قیمت پشت در اول (که ما انتخاب کرده ایم) باشد، یک سوم بود. طبیعتاً دو سوم هم احتمال داشت که ماشین پشت آن در نباشد و پشت بقیه ی درها باشد.

قاعدتاً چون ماشین در طول نمایش جابجا نمی شود، این احتمال در تمام مدت یکسان است: یک سوم پشت در اول و دو

سوم پشت بقیه درها. پس با باز کردن در دوم یا سوم، من الان دو انتخاب دارم:

- در اول را انتخاب کنم که در این صورت می دانم احتمال برد من یک سوم است.
- گروه دوم درها (مجموعه در دوم و سوم) را انتخاب کنم که در این صورت احتمال برنده شدنم دو سوم خواهد بود. خوش بختانه مجری یکی از درها را باز کرده است. بنابراین اگر گروه دوم درها را انتخاب کنم، مشخص است که از بین آن دو در، کدام را به عنوان گزینه انتخاب خواهم کرد.

به عبارت دیگر، راه حلی که همواره برای مسئله‌ی موتنی هال مطرح می شود این است که تحت هر شرایطی، انتخاب خود را تغییر داده و در دیگر را انتخاب کن.

طبیعتاً این جا دوباره می توانیم گریزی هم به شنون و انتروپی اش بزنیم. مجری با باز کردن یکی از درها ما را از مسئله‌ای با توزیع $X(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ به مسئله‌ی جدیدی با توزیع $Y(\frac{1}{3}, \frac{2}{3})$ رساند. اگر انتروپی مسئله‌ی جدید را محاسبه کنیم، می بینیم که مسئله‌ی جدید، حدوداً ۹۲٪ بی‌تی است.

با محاسبه‌ی اختلاف ۹۲٪ و ۵۸٪ می توانیم بگوییم باز کردن یکی از درها توسط مجری، حدود ۶۶٪ بیت به ما اطلاعات داده است یا به بیان دیگر، او به کمک باز کردن در، حدود ۴۲٪ مسئله‌ی ما را حل کرده و به ما کمک کرده است^{۲۳۴}.

تا این نقطه فکر می کنم مشخص شده که چرا عنوان این بخش را «مسئله‌ی خوب یا مسئله‌ی خوب‌تر» گذاشته‌ام. به هر حال، هر دو مسئله‌ای که در این جا با آن‌ها مواجه هستیم، مسئله‌های خوبی هستند. چون قرار است شانس خود را در به دست آوردن یک خودرو به کمک آن‌ها بیازماییم. اما از میان این دو مسئله، یکی «خوب‌تر» است. آن هم مسئله‌ای که انتروپی پایین‌تری دارد و نادانی من نسبت به آن، کمتر است.

ماده، انرژی، اطلاعات

بد نیست در پایان این فصل، چند نکته را مرور کنیم. این نکته‌ها تازه نیستند و در طول بحث، به بهانه‌های مختلف به آن‌ها اشاره کرده‌ام. اما حدس می‌زنم اکنون در این نقطه، مرور آن‌ها به درک بهترشان کمک کند.

^{۲۳۴} در این جا لازم است باز هم پیش فرض کلی مسئله‌های احتمال را یادآوری کنم. نظریه‌ی احتمال و ابزارهای مبتنی بر احتمال، نتیجه را در بلندمدت و در صورت تکرار یک فرایند، بهتر می‌کنند. اگر فقط یک بار این بازی را انجام دهید، ممکن است شما در اول را انتخاب کنید و خودرو پشت آن باشد. بنابراین پس از تغییر انتخاب، گزینه‌ی ارزشمند را از دست خواهید داد. حرف اصلی این است که اگر مثلاً ۱۰۰ یا ۱۰۰۰ بار در این مسابقه شرکت کنید، به نفع شماست که به عنوان یک استراتژی ثابت، پس از اینکه مجری یکی از درها را باز کرد، انتخاب خود را تغییر دهید.

قبل از هر چیز، این را به خاطر داشته باشیم که انتروپی، یک ویژگی پدیدار شده است. این ویژگی در سطح خرد وجود نداشته و در سطح کلان ظهور کرده است. انتروپی درست مانند دما، به کل سیستم تعلق دارد و نه به اجزاء سیستم. انتروپی برای یک مسئله تعریف می شود؛ درست همان گونه که دیدیم انتروپی مسئله‌ی مانتی هال، ۱/۵۸ بیت است. اما نمی توانیم آن را به اجزاء خرد کنیم و مثلاً بگوییم پشت هردر، ۵۳/۰ بیت انتروپی وجود دارد.

انتروپی، درست مثل دما، روحی است که درون یک سیستم دمیده می شود: در هیچ جای سیستم نیست؛ اما برای کل سیستم قابل تعریف و محاسبه است و نشانه های آن هم مشاهده می شود.

انتروپی و اطلاعات را می توان به عنوان واژه هایی مترادف به کار برد. چون همان طور که دیدیم، انتروپی بیشتر به این معناست که سیستم چیزهای بیشتری را در خود پنهان کرده است یا به بیان دیگر، ابهام بیشتری در آن وجود دارد. یا به شکل دیگر می توان گفت که انتروپی بیشتر در یک سیستم، به معنای جهل بیشتر ما نسبت به آن سیستم است.

اما مهم است به خاطر داشته باشیم که این جا اطلاعات مفهومی فراتر از داده و دیتا است. اجازه بدهید در این جا مثالی از هیدالگو^{۲۳۵} را وام بگیریم: فرض کنید یک فلش مموری دارید و روی آن دیتای خود را ذخیره کرده اید. من بایت به بایت آن را برمی دارم و یک عدد کاملاً تصادفی به جایش می نویسم. این کار تقریباً شبیه فرمت کردن فلش مموری است. الان داده های شما از بین رفته، اما اطلاعات بیشتری روی فلش وجود دارد. به بیان دیگر، انتروپی مجموعه اعدادی که اکنون روی فلش ذخیره شده بالاتر است.

برای کسانی که اهل عکاسی هستند، مثال ساده تری دارم. به این دو عکس نگاه کنید:

²³⁵ Hidalgo, C. A. (2016). Why information grows: The evolution of order, from atoms to economies. London: Penguin Books.



من در تصویر سمت راست با استفاده از فوتوشاپ، کمی نویز اضافه کرده‌ام. تقریباً می‌توان اثر این کار را شبیه عکاسی با ایزوی بالا دانست. ما عکس چپ را عکس با کیفیت تری می‌دانیم. اما اطلاعات بیشتری در عکس سمت راست وجود دارد. چون همین نویز، حجم قابل توجهی اطلاعات به عکس افزوده است. انتروپی عکس سمت راست بیشتر از عکس سمت چپ است. اگر چه ما احتمالاً عکس سمت چپ را بیشتر از عکس سمت راست دوست داریم.

اگر فوتوشاپ دارید می‌توانید کمی نویز به عکس اضافه کنید و آن را ذخیره کنید. خواهید دید که حجم عکس به راحتی دو تا سه برابر افزایش می‌یابد. انتروپی و اطلاعات موجود در عکس افزایش یافته است. اگر چه این اطلاعات، از نظر ما به عنوان ناظر، ارزشمند نیستند و ناخواسته و ناخوشایند محسوب می‌شوند.

فرض کنید من از کسی می‌خواهم که کتاب‌های کتابخانه‌ام را تمیز کند. هر طبقه از کتابخانه‌ی من به موضوع مشخصی اختصاص یافته است. او می‌آید و چون چندان سر رشته‌ای از کتاب و کتاب‌خوانی ندارد، کتاب‌ها را به سلیقه‌ی خودش و یا به صورت تصادفی می‌چیند. فرض کنید یک عکس از کتابخانه قبل از تمیز شدن و یک عکس از کتابخانه بعد از تمیز شدن داشته باشیم. محتوای ماده‌ای که می‌بینیم تفاوتی نکرده. حتی می‌توان گفت محتوای انرژی هم تفاوت چندانی نکرده است.^{۲۳۶} اما در این میان چیزی تغییر کرده است. نظم کتاب‌ها از بین رفته است. من امروز نسبت به کتابخانه‌ام ناآشنا تر از دیروز هستم و اطلاعات کمتری درباره آن دارم. یا می‌توان گفت: کتابخانه در مقایسه با دانسته‌های من (موقعیت کتاب‌ها) امروز اطلاعات بیشتری در خود پنهان کرده است. چون دیگر نمی‌دانم هر کتابی کجاست. اگر اطلاعات را به معنای رایج آن در نظر بگیریم، اطلاعات و دانش داخل کتاب‌ها تغییر نکرده است. اما اگر اطلاعات را آن چنان که شنون می‌فهمید تعریف

^{۲۳۶} به شرط آن که دما چندان تغییر نکرده باشد و مرکز جرم کتاب‌ها هم تقریباً همان جای قبلی باشد.

کنیم، باید بگوییم که حجم اطلاعات موجود در کتابخانه افزایش پیدا کرده است.

ما در کودکی با ماده آشنا شدیم. ماده کاملاً ملموس و مشهود بود. کمی بزرگ تر که شدیم، فهمیدیم که انرژی هم هست. اگر چه خودش دیده نمی شود، اما آثارش وجود دارد و نمی توان آن را نادیده گرفت.

به نظر می رسد که باید دوگانه‌ی ماده و انرژی را به سه گانه‌ی ماده و انرژی و اطلاعات تبدیل کنیم. سومین مورد هم به اندازه‌ی همان دو مورد دیگر واقعی است. اما به دلیل اینکه از تعامل ماده و انرژی پدیدار می شود، ما گاهی اوقات به اندازه‌ی ماده و انرژی برایش اصالت قائل نیستیم.

فرض کنید به کسی بگویید هوا سرد شده و او بگوید: دما توهمی بیش نیست. دما اصلاً وجود ندارد. آن چه هست انرژی جنبشی مولکول هاست. ضمن اینکه دما برای هیچ مولکولی قابل تعریف و اندازه گیری نیست. دما یک قرارداد است.

همه‌ی این حرف ها درباره دما درست است. ولی وقتی سردمان می شود، یقین داریم که چیزی در جایی تغییر کرده است. چیزی که واقعی است و به صورت دقیق و عددی قابل سنجش است. انتروپی (اطلاعات) هم، تا حد زیادی وضعیت مشابهی دارد.

ویژگی هایی که در سطح کلان ظهور پیدا می کنند، گرفتار دو دسته مخاطب افراطی می شوند: گروه اول آن هایی هستند که وجود و ظهور این ویژگی ها را جدی نمی گیرند و گروه دوم کسانی هستند که این پدیده ها را در حد فهم خود، نازل می کنند و برایشان ماهیتی مشابه ماده و انرژی در نظر می گیرند. زنده بودن نمونه ای از این ویژگی های ظهور یافته است که یا توسط آن هایی که نگاه مادی دارند به کلی نادیده انگاشته شده و یا توسط آن هایی که نگاه معناگرا دارند، بیش از حد جدی گرفته شده است.^{۲۳۷}

^{۲۳۷} بحث زنده بودن و موضوع خودآگاهی قطعاً نیازمند چند فصل جداگانه هستند. این جا اشاره ای کردم تا در خاطرمان بماند و به دست فراموشی سپرده نشود.

رفتار کندذهن‌ها هم، اگر به شکل درستی در کنار یکدیگر قرار بگیرند، می‌توانند نتایجی هوشمندانه به بار بیاورند.

کوین کلی

ملت‌ها؟ ملت یعنی چه؟ منظورت چیست؟ انسان‌ها فقط مثل حشره کنار هم هستند. این تاریخ‌نویسان هستند که به گروه‌های انسانی نام می‌دهند و آن‌ها را ماندگار می‌کنند.

هنری دیوید ثورو

درباره یک لحظه‌ی کلیدی

هرزمان از اصطلاح **لحظه‌ی کلیدی** استفاده می‌کنم، زنگی در مغزم به صدا درمی‌آید که این واژه می‌تواند غلط‌انداز باشد. به خوبی می‌دانم و می‌فهمم که هیچ لحظه‌ای کلیدی نیست. لحظه‌ها فقط یکی پس از دیگری می‌آیند و می‌روند و هریک مانند آجری بر جای خود می‌نشینند تا لحظه‌ی بعدی بر روی آن بنا شود.

البته انسان‌ها لحظه‌های کلیدی را دوست دارند. بسیاری از آنها تولد خود را جشن می‌گیرند و آن را لحظه‌ای کلیدی می‌دانند. حتی کم نیستند کسانی که بر اساس ماه تولد، ویژگی‌های مثبت و منفی رفتاری و شخصیتی خود را توجیه می‌کنند.

قبلاً جایی نوشته بودم که لحظه‌ی تولد، بیش از آنکه اطلاعاتی در مورد شما به دست دهد، اطلاعاتی در مورد والدین‌تان به دست می‌دهد. شاید اگر انسان‌ها قرار بود لحظه‌ای کلیدی داشته باشند و جشن بگیرند، باید به لحظه‌ای که نطفه‌شان شکل گرفت فکر می‌کردند.

اما در همین جا هم، اگر کمی دقیق‌تر فکر کنیم، با کمی فاصله از سیستم به آن نگاه کنیم، می‌بینیم که لحظه‌ی شکل‌گیری نطفه هم، به اندازه‌ی لحظه‌ی تولد، **غیرکلیدی** است. هزار اتفاق ریزو درشت، از دیررسیدن یک تاکسی تا بوق بی‌موقع یک قطار، می‌توانست سرنوشت ما را به شکل دیگری رقم بزند.

شاید کمی تلخ به نظر برسد. اما هیچ لحظه‌ای کلیدی نیست. نه برای ناظر بیرونی، که حتی برای خود ما. آنچه ما لحظه‌ی سرنوشت‌ساز می‌نامیم، خود بردوش لحظه‌ی دیگری نشسته است و آن لحظه نیز خود، بر لحظه‌ی دیگری تکیه کرده است.

با این حال، شاید هنوز حق داشته باشیم از اصطلاح **لحظه‌ی کلیدی** استفاده کنیم. به شرطی که در دل خود بدانیم منظورمان صرفاً لحظه‌ای است که در یاد مانده است. چنانکه ثبت یک عکس، لحظه‌ای را از لحظه‌های قبل و بعد از آن، متمایز می‌کند (البته در ذهن دوربین ما و نه در جهان خارج) و یک سکانس از یک فیلم، به بخشی از خاطرات سینمایی ما تبدیل می‌شود. گاه بعداً فیلم‌نامه به کلی فراموش می‌شود، اما آن سکانس یا آن دیالوگ، در ذهن مان ماندگار می‌شود.

این حرف‌ها را به دو منظور مطرح کردم. یکی برای اینکه ذهن‌مان برای بحث پیوستگی و گسستگی در سیستم‌ها - که باید در فصل‌های آتی مطرح کنم - آماده شود و دیگری اینکه به خودم مجوز بدهم در ادامه‌ی این نوشته، از اصطلاح **لحظه‌ی کلیدی** استفاده کنم (و البته مطمئن باشم که بعداً به درک غیرسیستمی از رویدادها متهم نخواهم شد).

خواننده‌ای که سال‌های نخستین دهه‌ی هشتاد شمسی را تجربه نکرده است، شاید به سادگی نتواند تصویری را که اکنون ترسیم می‌کنم تصور کند.

آن سال‌ها، اینترنت فراگیر نبود. دسترسی به اینترنت بسیار محدود بود و دانلود در حجم بالا هم (منظورم از حجم بالا چند مگابایت است) عملاً فرصتی کم‌یاب بود. یکی از روش‌های دستیابی به منابع دیجیتال، دستفروش‌هایی بودند که در میدان‌های اصلی شهر - از جمله میدان انقلاب تهران - CDهایی را تحت عنوان **کتابخانه دیجیتال** می‌فروختند.

چند هزار فایل PDF از کتاب‌های مختلف - عموماً حوزه‌ی کامپیوتر و گه‌گاه حوزه‌های دیگر - روی یک CD بود و دستفروش فریاد می‌زد که یک کتابخانه را یک جا در یک سی‌دی بخرید و ببرید. اگر کمی بالای بساط‌شان می‌ایستادی، معمولاً می‌شنیدی که می‌گفتند اگر سی‌دی غیراخلاقی هم می‌خواهی دارم.

در نخستین سال‌های ورود به بازار کار - پس از پایان دوران کارشناسی - کنار یکی از این بساط‌ها ایستاده بودم که یک **کتابخانه دیجیتال از همه‌ی علوم نظرم را جلب کرد**. روی آن نوشته بود: از کامپیوتر تا زیست‌شناسی. انواع زبان‌های برنامه‌نویسی. آموزش نرم‌افزارهای روز.

آن کتابخانه‌ی دیجیتال را خریدم و در میان کتابهایش - غیر از عناوین مربوط به برنامه‌نویسی و الکترونیک که همیشه برایم جذاب بوده و هست - یک کتاب متفاوت دیدم. عنوان آن چنین بود: ^{۲۳۸}Swarm Intelligence.

ایستادن بر بساط آن دستفروش را شاید بتوانم یکی از لحظه‌های کلیدی زندگی‌ام بنامم. اگر چه در واقع، باید دنبال لحظه‌هایی باشم که در نهایت باعث شدند هنگام دیدن آن بساط، کنارش بایستم و محصولات آن دستفروش را بررسی کنم.

اما حیفم می‌آید تاکید نکنم که خریدن آن CD و خواندن آن کتاب در روزهای پس از آن، جزو لحظه‌هایی است که در مرور سال‌های گذشته، بیش از بسیاری از لحظات کم‌اهمیت دیگر - مثل روز اعلام نتایج دانشگاه - با به خاطر آوردنش، لبخند بر لبانم می‌نشیند.

²³⁸ Eberhart, R. C., Shi, Y., & Kennedy, J. F. (2001). Swarm intelligence c:y Russell C. Eberhart, Yuhui Shi, James Kennedy. Morgan Kaufmann.

می دانم که اگر واژه‌ی سوارم (Swarm) را در آن سال نخوانده و ندیده بودم، احتمالاً اکنون زندگی کاملاً متفاوتی را - در مقایسه با آنچه اکنون دارم - تجربه می کردم. همه‌ی این مقدمه را گفتم تا وارد تعریف واژه‌ی Swarm شوم.

درباره واژه‌ی Swarm

قبل از هر چیز باید تکلیف خودمان را با واژه‌ی Swarm مشخص کنیم. با توجه به اینکه در فارسی، ما در مورد گروه‌های جانداران، با محدودیت جدی واژه مواجه هستیم، تصمیم دارم به جای Swarm Intelligence از اصطلاح هوش گروهی استفاده کنم.^{۲۳۹} در فصل‌های آتی که هوش و خرد، بار معنایی مثبت‌شان را نزد شما از دست دادند، احتمالاً با خیال آسوده‌تر از واژه‌ی خرد جمعی هم استفاده خواهیم کرد.^{۲۴۰}

زندگی جمعی حشراتی مانند مورچه‌ها، موریان‌ها و زنبورها، قرن‌هاست که برای انسان‌ها جذاب بوده است.

تقسیم کار بین موریان‌ها، مکانیزم یافتن غذا و جابجایی آن توسط مورچه‌ها و ارتباط برقرار کردن زنبورها با یکدیگر برای رفتن به محل جدید، چنان برای انسان‌ها جذاب بود که حتی عده‌ای فکر می کردند این حشرات، از مکانیزم‌های ارتباطی و رای مکانیزم‌های متعارف برای برقراری تماس با یکدیگر استفاده می کنند.

معمولاً در فرهنگ‌های کهن هم، نسبت به این حشراتی که به صورت گروهی زندگی می کنند، به علت همین ویژگی که شاید بتوان آن را هوش جمعی نامید - احترام و توجه خاصی وجود داشته است.

^{۲۳۹} از انتخاب این معادل، راضی نیستم. اما به نظرم، مفهوم را تا حد خوبی منتقل می کند. در زبان انگلیسی، هر گروهی از حیوانات که در کنار هم قرار می گیرند، نام متفاوتی پیدا می کنند. مثلاً شیرها (Lions) وقتی در کنار هم قرار می گیرند با اصطلاح Pride of lions مورد اشاره قرار می گیرند. در مورد ماهی‌ها از اصطلاح School استفاده می شود (School of fishes). در مورد پرندگان، Flock هم رایج است. برای مارها، از اصطلاح Quiver هم استفاده می شود (A quiver of cobras). برای الاغ و گاو و حیوانات مشابه، اصطلاح Herd و در مورد مورچه‌ها از Colony و Swarm استفاده می شود. در مورد زنبورها هم، اصطلاح Swarm به کار می رود. شتر مرغ‌ها، کانگروها و بعضاً گاوها، اصطلاح Mob هم رواج دارد. تا جایی که می دانم ما بیشتر از گله‌ی حیوانات و گروه حیوانات یا گروه حشرات استفاده می کنیم. فقط باید یادمان باشد که در ادبیات پیچیدگی، معمولاً Swarm وقتی به کار می رود که اجزای سیستم، هوشمندی و اختیار کمی داشته باشند (مثل مورچه / زنبور) و وقتی اجزای سیستم هوشمندی و اختیار بیشتری دارند (مثل گاوها) از اصطلاح Mob یا Herd استفاده می شود.

به همین علت، در مورد انسان‌ها هم از اصطلاح Mob و Herd بیشتر استفاده می شود. من در فارسی برای آسایش مخاطب، در هر دو مورد از اصطلاح گروه انسان‌ها و گروه حشرات استفاده می کنم. اما شما در مورد انسان همواره گله‌ی انسان بخوانید تا دقت علمی مان بیشتر باشد.

^{۲۴۰} البته دیده‌ام که در مقاله‌های فارسی از اصطلاح هوش ازدحامی هم استفاده شده است. اما به نظرم در این ترجمه، سلیقه‌ی چندانی به کار گرفته نشده است. ازدحام در فارسی دارای بار معنایی منفی است. در حالی که Swarm کاملاً خنثی است. حتی اگر قرار بود به سراغ چنین واژه‌هایی برویم، احتمالاً تجمع واژه‌ی مناسب‌تری بود. چون معنای آن به ازدحام نزدیک است و بار معنایی آن هم چندان منفی نیست. البته این تعبیر هم همچنان گمراه کننده است. چون ما دقیقاً در Swarm با یک هوش توزیع شده مواجه هستیم که هیچ مرکزیتی ندارد. به هر حال، من همچنان از هوش گروهی استفاده می کنم و لاقلاً در لحظه‌ی نگارش این جملات، آن را تعبیر مناسب‌تری می دانم.

اگر می‌خواهید عمق شگفت‌زدگی انسان در برابر زندگی جمعی حشرات را - که به توسعه‌ی باورهای فرافیزیکی در مورد حشرات هم کمک کرد - درک کنید، کافی است کارهای مارتین لیندائر^{۲۴۱} را بررسی کنید.

این حشره‌شناس که سال‌ها روی زنبورها و مکانیزم‌های ارتباط آنها و معنای رقص زنبورها و پیام‌های ارتباطی میان آنها کار کرد، زیربنایی را ساخت که بعدها برای مطالعات بیشتر در مورد رفتارهای گروهی حشرات، مورد استفاده و استناد قرار گرفت. بررسی کارها و مطالعات لیندائر نشان می‌دهد که رفتار گروهی زنبورها، حداقل تا دهه‌ی پنجاه میلادی هنوز برای ما بسیار رازآلود بوده است^{۲۴۲}.

به عبارت دیگر، جمله‌ای که از کوین کلی در ابتدای این فصل نقل کردم (تقریباً با این مضمون که موجودات کودن و خنگ در کنار یکدیگر می‌توانند گروهی هوشمند را بسازند)، برخلاف آنچه برای یک مخاطب عام، صرفاً در حد جمله‌ای ادبی به نظر می‌رسد، واقعیتی علمی است که درک آن برای ما صرفاً طی سه دهه‌ی اخیر امکان پذیر شده است.

کلمه‌ی Swarm در خارج از فضای حشرات، به عنوان الگو گرفتن از شیوه‌ی زندگی و تصمیم‌گیری حشرات در حوزه‌ی تکنولوژی و نیز فعالیت‌های انسانی، نخستین بار توسط کریستوفر لنگتون مورد استفاده قرار گرفت^{۲۴۳}.

نام لنگتون را از لحاظ بزرگی در ادبیات هوش مصنوعی و درک علمی مفهوم هوش و زندگی، باید در کنار نام‌های بزرگی مانند آلن تورینگ^{۲۴۴} و جان فون نویمان^{۲۴۵} قرار داد. اگر چه متأسفانه به اندازه‌ی آنها شناخته شده نیست^{۲۴۶}.

²⁴¹ Martin Lindauer

^{۲۴۲} کتاب یوجین ماری با عنوان روح مورچه‌های سفید - که بعداً توسط موریس مترلینگ هم سرقت شد و با عنوان زندگی موریه‌ها منتشر شد - نشان می‌دهد که از نخستین سال‌هایی که انسان، پیچیدگی زندگی اجتماعی برخی حشرات را مورد توجه قرار داد و کوشید اسرار زندگی و مکانیزم سازمان‌دهی آنها را کشف کند، شاید هنوز یک قرن نگذشته باشد.

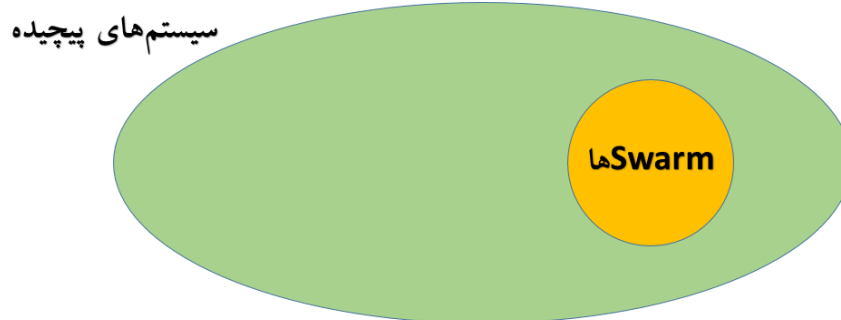
²⁴³ Christopher Langton

²⁴⁴ Alan Turing

²⁴⁵ John von Neumann

^{۲۴۶} لنگتون از جمله بنیان‌گذاران حوزه‌ی Artificial Life است. تحلیل، شبیه‌سازی و تولید آزمایشگاهی زندگی، از جمله حوزه‌های مورد علاقه‌ی او بود و فعالیت‌های بسیار ارزشمندی هم در این زمینه انجام داد. او مدتی نسبتاً طولانی هم در مرکز سنتا فی (Santa Fe) به فعالیت تحقیقاتی خود ادامه داد و قبل از اینکه وارد هزاره‌ی جدید شویم، آنجا را ترک کرد. لنگتون فوت نکرده، اما هیچ اطلاع خاصی از او در دسترس نیست و در سکوت زندگی می‌کند. در لحظه‌ای که این مطلب را می‌نویسم به تدریج به هفتاد سالگی نزدیک می‌شود. در ادامه‌ی این کتاب، نمونه‌های مشابه دیگری هم خواهیم دید. به هر حال، با وجودی که لنگتون ظاهراً در انتشار تحقیقات و مطالعات خود با محدودیت روبروست، حتی مقالات و کتابهای او (که آخرین نمونه‌ی آنها مربوط به سال ۱۹۹۵ است و توسط انتشارات دانشگاه MIT منتشر شده) هنوز کاملاً خواندنی هستند و حرف‌های بسیاری هست که جز در کتاب‌های او، نمی‌توان به آن عمق و زیبایی آنها را در جای دیگری پیدا کرد. خصوصاً اصطلاح Edge of Chaos (لبه‌ی آشوب) یکی از بحث‌های اوست و می‌تواند الهام‌بخش باشد.

بحث در مورد Swarm را می‌توان زیرمجموعه‌ای از پیچیدگی و سیستم‌های پیچیده دانست.



در سیستم‌های پیچیده، الزامی وجود ندارد که هریک از المان‌ها، از اختیار و انتخاب و قواعد تصمیم‌گیری بهره‌مند باشند. اما وقتی از هوش جمعی و هوش گروهی و سوارم حرف می‌زنیم، تلویحاً این فرض را پذیرفته‌ایم که هریک از المان‌های سیستم، به نوعی از هوش یا انتخاب یا قدرت تصمیم‌گیری برخوردار هستند^{۲۴۷}.

بنابراین، مثلاً بحث در مورد گازها اگرچه زیرمجموعه‌ی بحث سیستم‌های پیچیده است، اما در بحث هوش گروهی مطرح نمی‌شود. اما برخلاف گازها، بحث در مورد گاوها (و البته پرندگان، انسان‌ها، بورس، جنبش‌های اجتماعی و موارد مشابه) همگی زیرمجموعه‌ی بحث هوش گروهی یا Swarm Intelligence محسوب می‌شوند.

درباره حشرات و موجودات اجتماعی

اگر به جانورشناسان و به طور خاص حشره‌شناسان مراجعه کنید، خواهید دید که تقسیم‌بندی‌های بسیار دقیقی از رفتارهای اجتماعی حشرات وجود دارد و اهل علم، تلاش و مجاهدت بسیاری به خرج داده‌اند تا دریچه‌ی ذهن ما را به جهان حشرات بگشایند. دستاوردهای این تلاش هم کوچک نبوده است. چنانکه گریمالدی معتقد است که یکی از پیچیده‌ترین زندگی‌های اجتماعی که ما کشف کرده‌ایم به حشرات تعلق دارد^{۲۴۸}.

سطوح مختلفی برای زندگی اجتماعی در حشرات تعریف می‌شود که از جمله‌ی آنها می‌توان به زندگی در سطح شبه

^{۲۴۷} حتماً به این نکته توجه داریم که مفاهیم انتخاب، هوش و قدرت تصمیم‌گیری، درست مانند مفاهیم جبر، زندگی، مرگ و سایر مفاهیم مشابه، صرفاً نسبت به یک ناظر مشخص تعریف می‌شوند و ممکن است با تغییر ناظر، مفهوم و میزان و شکل آنها، کاملاً تغییر کند.

^{۲۴۸} Grimaldi, D. A., & Engel, M. S. (2006). Evolution of the insects. Cambridge: Cambridge Univ. Press.

اجتماعی^{۲۴۹}، زندگی در سطح نیمه اجتماعی^{۲۵۰} و زندگی اجتماعی واقعی^{۲۵۱} اشاره کرد.

در زندگی اجتماعی واقعی - که مورچه‌ها و موربانه‌ها و زنبورها نمونه‌هایی از آن هستند - تقسیم وظیفه و طبقات اجتماعی وجود دارد. این طبقات، معمولاً به تقلید از آنچه در جامعه‌ی انسانی رواج داشته، کاست^{۲۵۲} نامیده می‌شوند. برخی قواعد رفتاری ساده در گروه‌های حشرات اجتماعی وجود دارد که حاصل آنها در سطح کلان اجتماعی، در قالب رفتارهایی بسیار پیچیده و هوشمندانه بروز می‌کند.

معمولاً سه ویژگی زیر در میان حشراتی که زندگی کاملاً اجتماعی دارند مشهود است^{۲۵۳}:

- از فرزندان جوان جامعه مراقبت می‌کنند. حتی اگر فرزند مستقیم آنها نباشند.
- تقسیم کار بین آنها وجود دارد (که عملاً به شکل‌گیری طبقات اجتماعی منجر می‌شود)
- نسل‌ها هم‌پوشانی دارند. به عبارتی، همه چیز از طریق ژن منتقل نمی‌شود و بخشی از رفتارها هم از نسل قبل آموخته می‌شوند^{۲۵۴}.

برای درک هوشمندی حشرات اجتماعی، موربانه‌ها نمونه‌ی خوبی هستند. این موجودات، بیش از سیصد میلیون سال است که بر روی زمین زندگی می‌کنند و اگرچه حتی غذای گونه‌ای از دایناسورها هم بوده‌اند، اما این توانایی را داشته‌اند که باقی بمانند و انقراض نسل شکارچیان درشت‌هیکل خود را به نظاره بنشینند.

در مورد حشرات و رفتارهای اجتماعی آنها، می‌توان حرف‌ها و حکایت‌های بسیاری گفت. اما قاعدتاً در این کتاب، بخشی از روایت زندگی حشرات جذاب است که در زندگی انسانی و ارتقاء کیفیت ابزارهای انسان، مفید و الهام‌بخش باشند. بنابراین اجازه دهید، صرفاً اشاره‌ی کوتاهی به رفتار مورچه‌ها در پیدا کردن غذا بپردازیم.

فرومون‌ها - ابزار تصمیم‌گیری در جامعه‌ی مورچه‌ها

²⁴⁹ Quasisocial

²⁵⁰ Semisocial

²⁵¹ Eusocial

²⁵² Caste

²⁵³ Crespi, B. J., & Yanega, D. (1995). The definition of eusociality. *Behavioral Ecology*, 6(1), 109-115. doi:10.1093/beheco/6.1.109

^{۲۵۴} به این نوع یادگیری، یادگیری عمودی غیرژنتیکی گفته می‌شود. قبلاً به بهانه‌های مختلف، اصطلاح یادگیری افقی را به کار برده‌ام. یادگیری که میان افراد هم‌نسل روی می‌دهد و در مورد انسان‌ها، مطالعه و گفتگو، مصداق‌هایی از آنها محسوب می‌شود.

اگر به خاطر سپردن نام فرومون^{۲۵۵} برای شما ساده نیست، بهتر است آن را به واسطه‌ی شباهتش با هورمون به خاطر بسپارید. هورمون‌ها در درون بدن موجودات تولید می‌شوند و از طریق خون در بدن ما جابجا می‌شوند تا رفتارهای ما را تنظیم کنند. اما فرومون‌ها، از بدن موجودات ترشح می‌شوند و توسط گیرنده‌های بیرونی موجودات دیگر - که هم‌گونه‌ی آنها هستند - حس می‌شوند و به این طریق رفتار سایر اعضای جامعه تاثیر می‌گذارند^{۲۵۶}.

اجازه بدهید روایتی ساده شده - اما درست - از نحوه‌ی مسیریابی غذا در مورچه‌ها را با هم مرور کنیم:

مورچه‌ها از جمع جدا می‌شوند و هر کدام از یک مسیر به سمت غذا حرکت می‌کنند. آنها تمام مسیر خود را با فرومون علامت‌گذاری می‌کنند. هر مورچه، پس از اینکه غذا را برداشت، از همان مسیری که با فرومون علامت‌گذاری کرده باز می‌گردد.

حالا فرض کنید دو مورچه از دو مسیر متفاوت به سمت غذا رفته‌اند. یکی مسیر کوتاه‌تری را انتخاب کرده و زودتر به محل اولیه بازمی‌گردد.

الان مسیری که او رفته دو مرتبه (در رفت و برگشت) به فرومون آغشته شده. اما مسیری که مورچه‌ی دیگر رفته (و هنوز برگشته) تنها یک مرتبه به فرومون آغشته شده است.

پس مورچه‌ی جدیدی که می‌خواهد حرکت کند، مسیر کوتاه‌تر را (که دوبار آغشته شده) طی خواهد کرد.

البته در عمل، مورچه‌ها غذا را دست به دست می‌کنند. همچنین ممکن است وقتی مسیرشان مسیر مورچه‌ی دیگری را قطع کند، براساس میزان فرومون، مسیر آن مورچه را ادامه دهند.

ضمن اینکه عملاً کنترل ترافیک هم اتفاق می‌افتد. اگر یک مسیر شلوغ باشد یا مورچه‌ها به تقاطع برسند یا مانعی در مسیر به وجود بیاید، مورچه‌ها در میان گزینه‌های باقی مانده، همچنان بهترین را انتخاب خواهند کرد^{۲۵۷}.

تصور اینکه همین ایده‌ی ساده، تا چه حد می‌تواند در مدیریت ترافیک در اینترنت و شبکه‌های مخابراتی مفید باشد، چندان

²⁵⁵ Pheromone

^{۲۵۶} اگر عمر و فرصتی بود و بحث‌ها جلوتر رفت، باید در مورد اینکه چگونه لایک و کامنت در شبکه‌های اجتماعی، نقش فرومون‌ها در جامعه‌ی حشرات را ایفا می‌کنند و چگونه می‌توان از رفتار حشرات برای مدیریت رفتار گروهی انسانی استفاده کرد، بنویسم. روزی که یک فصل کامل در این باره نوشتم، این پاورقی را حذف خواهم کرد.

²⁵⁷ Second best alternative

دشوار نیست.

یکی از بحث‌های مهم در بسترهای اطلاعاتی و ارتباطی، مسیریابی^{۲۵۸} است. حتی در ساده‌ترین جستجوی اینترنتی یا یک مکالمه‌ی تلفنی ساده هم، بسته‌های اطلاعاتی در راه، باید چند بار دست به دست شوند.

مستقل از اینکه این بسته‌ها چه هستند و در چه نوع شبکه‌ای جابجا می‌شوند، برای این المان‌های واسطه‌ای مسیریاب، از اصطلاح روتر^{۲۵۹} استفاده می‌شود. به عنوان مثال، در بستر اینترنت، روتر با دریافت بسته‌های اطلاعاتی، مقصد آنها را می‌خواند و سپس تصمیم می‌گیرد که از میان مسیرهای موجود، بسته را از کدام مسیر به سمت مقصد روانه کند.

با توجه به اینکه تعداد مسیرهای قابل تصور برای انتقال یک بسته از نقطه‌ی مبدا به مقصد، ممکن است بسیار زیاد باشد، می‌توانید حدس بزنید که روش فرومون مورچه‌ها تا چه حد می‌تواند برای مدیریت ترافیک مفید واقع شود.

اهمیت این الگوریتم، وقتی بیشتر حس می‌شود که در یک مسیر ترافیک بسیار وجود دارد یا اصلاً قطعی کامل به وجود می‌آید و پیدا کردن مسیر دوم - از منظر ریاضی - می‌تواند مسئله‌ای دشوار و زمان‌بر باشد.

میر و بوناو در مقاله‌ای که در نشریه Harvard Business Review منتشر کردند، مثالی دیگر از کاربرد مکانیزم فرومون در شبیه‌سازی هوش گروهی مورچه‌ها را مورد بحث قرار داده‌اند.^{۲۶۰}

آنها به مشکل حمل بار توسط خطوط هوایمایی South West اشاره می‌کنند. مشکل خط هوایی این بوده که بخش مهمی از ظرفیت حمل بار، مورد استفاده قرار نمی‌گرفته است. چنانکه نویسندگان اشاره می‌کنند، تنها حدود ۷٪ ظرفیت استفاده می‌شده و ظرفیت باقیمانده، بلااستفاده بوده است.

شاید برای شما جالب باشد که همزمان، مشکل جدی در حمل و جابجایی بار وجود داشت. چون بعضی مسیرها بسیار شلوغ و برخی دیگر بسیار خلوت بودند و تعدادی از ترمینال‌ها به گلوگاه تبدیل شده بودند.

استفاده از سیستم تعیین مسیر بار - مشابه چیزی که مورچه‌ها استفاده می‌کنند - کمک کرد که خط هوایی به این نتیجه برسد که برای ارسال یک بسته از شهر الف به شهر ب، الزاماً بهترین گزینه استفاده از پرواز مستقیم بین الف و ب نیست.

در شرایطی که برداشتن بار در مبدا و تخلیه و تحویل بار در مقصد زمان‌بر است و ترمینال‌ها به گلوگاه تبدیل شده‌اند،

²⁵⁸ Routing

²⁵⁹ Router

²⁶⁰ Bonabeau, E., & Meyer, C. (2001, May). Swarm Intelligence: A Whole New Way to Think About Business. Harvard Business Review.

اقتصادی تر است که بار در شهرالف به مقصد شهری دیگر (مثلاً ج) ارسال شود و از شهر ج توسط پرواز دیگری به شهر ب برسد.

تصور اینکه شکل های پیچیده تر پیاده سازی سیستم هوش گروهی مورچه ها، چگونه می تواند به گوگل مپ برای پیدا کردن بهترین مسیر در ترافیک شهری کمک کند، یا بار محاسبه بین چند پردازنده تقسیم شود، چندان دشوار نیست.

البته می دانیم که پیاده سازی الگوریتم ها و استفاده از آنها در فضاهای مختلف، ظرافت ها و پیچیدگی های بسیاری دارد. اما آنچه محور اصلی بحث ما در هوش گروهی است، این است که قواعد ساده برای موجودات ساده در مقیاس بزرگ می تواند به رفتارهایی پیچیده و هوشمندانه تبدیل شود که از بیرون، دستاورد یک مغز پیچیده و قدرتمند به نظر می رسند.

ادوارد ویلسون - یکی از بهترین منابع درک مفهوم سوارم

در میان تمام کسانی که در لحظه ی نوشتن این مطلب زنده اند، بی تردید کسی بهتر از ادوارد ویلسون، حشرات اجتماعی را نمی شناسد. این را حتی کسانی که منتقد او هستند - مانند ریچارد داوکینز - بارها مورد تاکید قرار داده اند.

ویلسون اکنون سالهای پایانی نهمین دهه ی زندگی خود را می گذراند و بزرگترین دانشمند علم مورچه شناسی یا مرمکولوژی^{۲۶۱} است.

قطعاً اینکه ویلسون بزرگترین مورچه شناس تاریخ انسان است، خود افتخار بزرگی است. اما ویژگی های رفتاری، نوع نگاه، قدرت تحلیل و شیوه ی مواجهه ی او با مسائل و چالش ها، خود حاوی درس های بسیاری برای ماست.

به همین علت تصمیم گرفتم به جای اینکه نام او را در یکی از پاورقی های کتاب پیچیدگی بیاورم، عنوان مستقلی را به او اختصاص دهم^{۲۶۲}.

ویلسون، علاقه ی بسیاری به زندگی در بیرون خانه داشته و دارد و همین زندگی در دنیای آزاد^{۲۶۳} به او در شناسایی و درک بیشتر حیوانات و حشرات، کمک کرده است.

ویلسون، در دوران کودکی با یک اتفاق ناخوشایند هنگام ماهی گیری، به چشم راست خود آسیب می زند و پس از مدتی طی

²⁶¹ Myrmecology

^{۲۶۲} نمی دانم که این کتاب کامل خواهد شد یا نه. اما اگر روزی کامل شد، شاید باید این فصل به عنوان یک پیوست در انتهای کتاب باشد.
^{۲۶۳} به نظرم با سبک تربیتی امروز کودکان در شهرهای مدرن، که والدین کودکان را لحظه به لحظه همراهی می کنند و نیز، با در نظر گرفتن انبوه تکنولوژی ها و کسب و کارهایی که ثانیه به ثانیه رفتار ما در فضای دیجیتال را ثبت و ردگیری می کنند، تعبیر دنیای آزاد برای قدم زدن و راه رفتن و بازی کردن در کوچه و خیابان، خصوصاً اگر موبایل همراه مان نباشد تعبیری درست و دقیق است.

یک عمل جراحی عدسی چشم او برداشته می‌شود. برای کسی که عاشق طبیعت و حیوانات است، از دست دادن یک چشم به معنای کاهش توانایی در تشخیص دقیق شکل سه بعدی و حجم حیوانات است و می‌توان تصور کرد که از دست دادن این توانایی برای کسی که عاشق حیوانات و زیست‌شناسی است چه خسارت بزرگی محسوب می‌شود.



اما عکس‌العمل ویلسون جالب است. او تصمیم می‌گیرد به بررسی حشرات ریزتر مثل مورچه‌ها بپردازد. چون مشکل تشخیص ندادن حجم و ابعاد سه بعدی در مورد موجودات کوچک‌تر، بسیار کمتر است و البته تیزبینی چشم چپ او هم، ابزار دیگری بود که توانست به شناخت حشرات، کمک شایانی نماید.

نمی‌دانیم اگر ویلسون چشم راست خود را از دست نمی‌داد و تمرکزش از روی حیوانات و جانوران بزرگ به

مورچه‌ها و حشرات اجتماعی منتقل نمی‌شد امروز، علم در جهان در چه وضعیتی بود. اما به هر حال، تمرکز او بر روی حشرات و به طور خاص مورچه‌ها، ضمن اینکه باعث شد مسئولیت جمع‌آوری حشرات برای موزه جانورشناسی تطبیقی دانشگاه هاروارد بر عهده‌اش گذاشته شود، به تدریج باعث شد به درک عمیقی از زندگی اجتماعی حشرات دست پیدا کند.



فیلم مستند ارباب مورچه‌ها^{۲۶۴} فرصتی است که بیننده هم‌زمان با مورچه‌ها و ویلسون بیشتر آشنا شود. من چند دقیقه از این فیلم را که در آن ویلسون می‌کوشند عملکرد فرومون‌ها را نمایش دهد برای شما انتخاب کرده‌ام.

شاید اگر کسی بخواهد یک کتاب از ویلسون را - صرفاً برای آشنایی اولیه با او - بخواند، نامه‌هایی به یک دانشمند جوان^{۲۶۵} بهترین گزینه باشد. البته برخی از کسانی که این کتاب را خوانده‌اند، ضمن تحسین محتوای کتاب، به خاطر نوع انتظاری که حاصل از عنوان کتاب بوده است، کمی سرخورده شده‌اند.

فکر می‌کنم این خوانندگان انتظار داشته‌اند کتاب، دارای چارچوبی بسیار شفاف و صلب باشد. شاید هم انتظار داشته‌اند

²⁶⁴ Lord of the Ants

²⁶⁵ Wilson, E. O. (2013). Letters to a young scientist. New York, NY: Liveright, W.W. Norton.

دقیقاً هشتاد و پنج نکته یا صد و چهار نکته برای مخاطب فهرست شود. ویلسون اگر چه کتاب را واقعاً به سبک نامه شروع می کند، اما در میانه‌ی راه به این سبک چندان وفادار نمی ماند و بارها وارد فضای خاطره گویی و زندگی نامه نویسی می شود. بنابراین خواننده‌ای که به سرعت به پایان این کتاب نسبتاً کوچک دوست صفحه‌ای می رسد ممکن است با خود بگوید که ای کاش در این نامه‌ی نسبتاً مختصر که قرار بود نقشه‌ی راهی برای طی کردن مسیر علم باشد، تا این حد به حواشی پرداخته نمی شد.

در باور من، مروری کوتاه به سایر کتابهای ویلسون نشان می دهد که او به خوبی با شیوه‌های مختلف نگارش آشناست و قلم به خوبی رام اوست. بنابراین، منطقی تر است فرض کنیم ویلسون هم، مانند بسیاری از بزرگان دیگر، در نقل جزئیات زندگی خود، هدف آموزش را دنبال می کند و نباید حاشیه رفتن‌های او را ناشی از پرگویی یا پریشان فکری بدانیم.

اما در میان انبوه نوشته‌ها و تحلیل‌های ارزشمندی که ویلسون به ذخیره‌ی دانش بشری افزوده است، در فصل‌های آتی کتاب پیچیدگی، دو کتاب دیگر از ویلسون بیشتر به کار ما خواهد آمد و بارها به آنها ارجاع خواهیم داد.

یکی کتابی که تحت عنوان ²⁶⁶ Consilience یا وحدت دانش است که من ترجیح می دهم آن را به همگرایی بین علوم طبیعی و علوم انسانی ترجمه کنم و از این به بعد در فصل‌های آتی کتاب پیچیدگی، از آن تحت عنوان کتاب همگرایی نام خواهم برد ²⁶⁷. این کتاب، فقط به بحث سوآرم مربوط نیست و می تواند ابزار مناسبی برای درک عمق فلسفی دانش پیچیدگی باشد.

اما به هر حال، ویلسون را بیشتر به عنوان پدر علم سوسیوبایولوژی ²⁶⁸ یا زیست‌شناسی اجتماعی می شناسند. اگر چه این اصطلاح قبل از او هم به کار رفته بوده، اما تلاش و مطالعات او و کتاب ارزشمندی که در این زمینه تالیف کرده، بی شک او را شایسته‌ی عنوان بنیان‌گذار علم زیست‌شناسی اجتماعی کرده است ²⁶⁹.

ویلسون، محتوای کتاب زیست‌شناسی اجتماعی را به سه بخش اصلی و هر بخش را به چند فصل فرعی تقسیم کرده است.

²⁶⁶ Wilson, E. O. (2007). *Consilience: the unity of knowledge*. Cambridge: International Society for Science and Religion.

²⁶⁷ چند سال پیش، به این حدس رسیده بودم و طی دو یا سه سال اخیر به این باور رسیده‌ام که به وجود آمدن علوم انسانی، ناشی از ضعف علوم طبیعی بوده و اگر دستاوردهای امروز تکنولوژی و فناوری اطلاعات و به خصوص شبکه‌های اجتماعی (به عنوان یک لابراتوار بزرگ از گله‌های انسانی) و نیز داده‌های حاصل از سنسورهای ردیابی عددی انسان، در کنار سایر علوم دقیقه مانند ریاضی و فیزیک قرار گیرد و ابزارهایی مانند تحلیل اطلاعات حجیم و دانش پیچیدگی و شناخت سوآرم هم به کمک مان بیاید، در آینده‌ی نه چندان دور، چیزی به نام علوم انسانی - که خود را در در تقابل و یا لااقل در استقلال از علوم طبیعی می داند - وجود نخواهد داشت. پس می توانید تصور کنید که دیدن عنوان Consilience حتی قبل از اینکه کتاب را باز کنم و عناوین فصل‌ها و محتوای آن را بخوانم، تا چه حد شوق و تحسینم را برانگیخته است.

²⁶⁸ Sociobiology

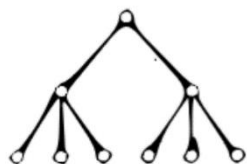
²⁶⁹ Wilson, E. O. (2002). *Sociobiology: the new synthesis*. Cambridge, Mass: Belknap Press of Harvard University Press.

فکر می‌کنم همین تقسیم‌بندی و عنوان‌هایی که برای هر بخش انتخاب شده، راهنمایی ارزشمند برای درک بهتر علم زیست‌شناسی اجتماعی باشد. ضمن اینکه این بخش‌بندی‌ها برای کسی که قصد داشته باشد برای حل مسائل پیچیده، از شبیه‌سازی الگوی سوآرم استفاده کند هم، مفید است.

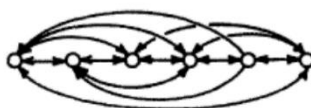
بخش اول کتاب، به **تکامل اجتماعی** پرداخته است. ویلسون بحث خود را با تعریف دقیق واژه‌های گروه، جامعه و کلونی آغاز می‌کند و مفاهیمی مانند ارتباطات، هماهنگی و کنترل و قاعده‌مندی در جوامع را بررسی می‌کند. مفاهیمی مانند تطبیق با محیط، تاثیر محیط بر تکامل و تاثیر تغییرات فرد و تکامل فرد بر رفتارها و مشخصه‌های جامعه، از جمله بحث‌های ارزشمندی است که بخش اول کتاب به آن اختصاص یافته است.

بخش اول بیشتر به مفهوم‌پردازی، تعریف واژه‌ها و معرفی المان‌های مدل‌سازی جانوران می‌پردازد. نمودار زیر، از جمله تصاویری است که نویسندگان برای بیان بهتر مفاهیم اولیه جامعه‌شناسی حیوانات بکار گرفته است.

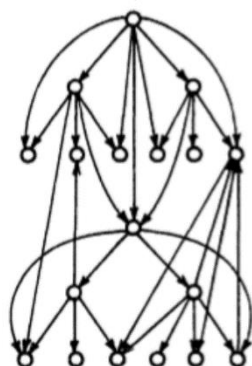
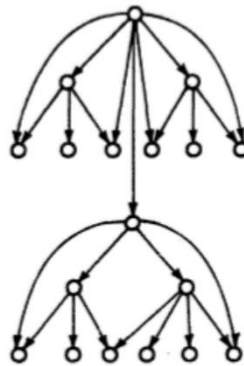
ارتباط در گروه‌های نظامی انسان‌ها



ارتباط بین ماهی‌ها



ارتباط در میان پرندگان

ارتباط بین شامپانزه‌ها
هنگام جنگارتباط بین میمون‌ها
هنگام جنگارتباط بین بایون‌ها
هنگام جنگ

بخش دوم کتاب، به **مکانیزم‌های اجتماعی**^{۲۷۰} اختصاص پیدا کرده است. بحث‌هایی مثل یادگیری، اجتماعی شدن، ارتباطات، اقتصاد پیام‌رسانی، شکل‌گیری اطلاعات در جامعه‌ی حیوانی، خشونت و قلمروخواهی از جمله مفاهیمی

هستند که در این بخش از کتاب مورد بحث قرار گرفته اند.

بخش سوم کتاب، از جمله بخش های چالش برانگیز کار ویلسون بوده است. این بخش به گونه های اجتماعی می پردازد و ماهی ها، پرندگان، فیل ها، پستانداران و انسان ها را مورد بحث قرار می دهد. آخرین فصل از بخش سوم کتاب، جایی است که ممکن است مقاومت ذهنی برخی خوانندگان را برانگیزد. عنوان این فصل، از زیست شناسی اجتماعی به جامعه شناسی است. جایی که ویلسون می کوشد مدل خود در مورد جانداران اجتماعی را که در یک سمت آن مورچه ها قرار دارند، در سمت دیگر تا جامعه ی انسانی گسترده کند.

تفکر ویلسون در اینجا دو دسته مخالف دارد. اگر فرصت کافی برای تکمیل این کتاب باشد، قاعدتاً باید در فصل های پایانی، به تفصیل به این بحث ها پردازم و در آنجا شرح دهم که ذهن من به عنوان خواننده، در عمده ی نقدها و مخالفت هایی که در برابر ویلسون وجود دارد، با او همراه است.^{۲۷۱}

اما فعلاً در اینجا به صورت خلاصه بگویم که دو گروه مخالفان ویلسون، هر دو مانند خود او طرفدار حوزه ی تکامل هستند و یکی از آنها، یعنی داوکینز، از جمله مطرح ترین دانشمندان زنده در این حوزه است.

منتقد اول او، اردوگاهی است که شاخص ترین فرد آن، استیون گولد^{۲۷۲} است. گولد مشخصاً روش علمی ویلسون را نقد نمی کند. بلکه به تبعات حرف ویلسون انتقاد دارد. او می گوید که نگاه ویلسون می تواند مروج نژادپرستی باشد. همچنین تاکید دارد که نقش فرهنگ و تعاملات اجتماعی در تکامل رفتارهای اجتماعی توسط ویلسون نادیده گرفته شده است.

اگر بخواهیم بسیار ساده و غیردقیق بگوییم، گولد می گوید نگاه ویلسون باعث می شود کسانی بپذیرند که رفتار یک قوم و گروه، می تواند به کلی متفاوت از یک قوم و گروه دیگر باشد و شاخه ای متفاوت از رشد و تکامل را طی کند. این درحالی است که گولد معتقد است فرهنگ انسان ها چنان در هم تنیده است که نمی توان چنین مرزهایی را بین گروه های اجتماعی (مثلاً ملت ها یا اقوام مختلف) ترسیم کرد.

اینکه کدام دیدگاه می تواند درست باشد و اساساً آیا واقعاً حرف های ویلسون به نتیجه ای که گولد می گوید منتهی می شود یا نه، بحث مستقلی است.

اما آنچه برای من مهم است و فکر می کنم برای هر دانشجوی دیگر رشته ی پیچیدگی هم باید مهم باشد این است که علم،

^{۲۷۱} فکر می کنم وقتی بحث اختلاف نظر بزرگان مطرح است، گفتن اینکه من با این موافقم یا با آن مخالفم، یا من طرفدار این هستم یا طرفدار آن نیستم، چندان پخته نیست. منطقی تر است بگوییم ذهن ما، حرف کدام را بهتر می فهمد و با کدامیک، بهتر همراه می شود. بیش از این را صرفاً متخصصان باید بگویند.

^{۲۷۲} Stephen Jay Gould

در ذات خود، به هیچ کس و هیچ چیز بدهکار نیست. علم موظف نیست نتیجه‌ای به دست بیاورد که ارزش‌های فعلی، اصول فعلی، رفتارها و باورهای فعلی را تایید کند.

نقش علم توصیف است. تجویز را اقتصاددان‌ها و سیاستمداران و سایر کسانی که در حوزه‌ی خط‌مشی‌گذاری فعالند، انجام خواهند داد. علم اگر تعهدی دارد، به روش علمی است و دیگر هیچ.

از این منظر، برای من خواندن حرف‌های گولد آزادهنده بود و اگر به خاطر نوشتن این مطالب نبود و لازم نبود که مطالعات دست اول داشته باشم، حاضر نمی‌شدم وقتم را به خواندن حرف‌های کسی بگذرانم که دستاوردهای نظریه‌های علمی را بر اساس اصول و ارزش‌ها و چارچوب‌های ذهنی خود (و نه بر اساس روش مورد استفاده)، در ترازوی قضاوت قرار می‌دهد.

منتقد دیگر ویلسون، ریچارد داوکینز است. شاید در میان زندگان، نام هیچ کس به اندازه‌ی داوکینز، نام چارلز داروین را تداعی نکند. کتاب ژن خودخواه او و البته ده‌ها کتاب و مقاله‌ی دیگری که در ادامه نوشته، همگی حول این باور شکل گرفته‌اند که نقش کلیدی در تکامل بر عهده‌ی ژن‌هاست.

داوکینز هم در کتاب خود^{۲۷۳} و هم در مقدمه‌ای که بر کتاب سوزان بلک مور^{۲۷۴} نوشته است مشخصاً برای ژن اصالت قائل است. به عبارتی، او دستاورد تکامل را انسان نمی‌داند. بلکه ژنوم انسان می‌داند. در نگاه داوکینز، انسان بستری است که ژن از طریق آن خود را تکثیر می‌کند. همان نگاهی که بعداً در کتاب بلک مور هم در مورد ایده‌ها می‌بینیم^{۲۷۵}.

این در حالی است که نگاه ویلسون که بر مبنای سوآرم شکل گرفته است، تکامل را در چند سطح می‌بیند که تکامل در سطح ژن‌ها صرفاً یکی از آنهاست.

اگر چه به نظر می‌رسد که حرف ویلسون با ذات نگرش ژن محور داوکینز تفاوت و حتی تعارض داشته باشد، اما داوکینز در نقد ویلسون، به جای اینکه بر نگرش خود تاکید کند، توضیح می‌دهد که برای تعمیم نگاه داروینی از سطح ژن به سطح گروه و جامعه و نیز برای استفاده از آموخته‌های جامعه‌ی مورچه‌ها برای ارائه‌ی مدلی برای تکامل چند سطحی در میان انسان‌ها و

²⁷³ Dawkins, R. (2016). The selfish gene: 40th anniversary edition. Oxford: Oxford University Press.

²⁷⁴ Blackmore, S. J. (2000). The meme machine. Oxford: Oxford University Press.

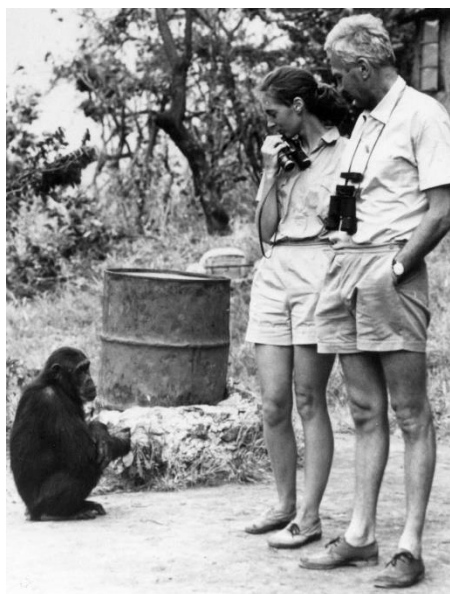
^{۲۷۵} حرف کلیدی بلک مور این است که می‌توانیم با دو مدل متفاوت، جوامع انسانی را بفهمیم. یک مدل، همان شیوه‌ی کلاسیک است که در آن، انسان‌ها از ایده‌ها برای بقای خود ورشد و توسعه‌ی جامعه‌ی انسانی استفاده می‌کنند. اما در علم ممیتیک، مدل دیگری انتخاب می‌شود. بلک مور، انسان‌ها را ابزار و بستری برای ایده‌ها می‌داند. به عبارتی، فرض می‌کند که این ایده‌ها هستند که از انسان‌ها برای تکثیر و انتقال ورشد خود استفاده می‌کنند.

زمانی که فیلم وی مثل وندتا (V for Vendetta) را دیدم، جایی جمله‌ای با این مضمون داشت که: [انسان‌ها با گلوله می‌میرند اما] ایده‌ها ضدگلوله هستند. این جمله‌ی فیلم، همیشه برای من، حرف‌های بلک مور و نگاه او به جهان را تداعی می‌کند.

گروه‌های جانداران، باید الگویی دقیق‌تر وجود داشته باشد و مفهوم‌پردازی عمیق‌تری انجام شود.

مستقل از اینکه مدل تکامل چندسطحی ویلسون را بپذیریم یا نگاه داوکینز و تکامل ژن محور او را بهتر درک کنیم، واقعیت این است که اگر قرار است از دانش پیچیدگی برای تحلیل رفتارهای گروهی انسان‌ها در شهرها، گروه‌ها، شبکه‌های اجتماعی، نرم افزارهای پیام‌رسان، تصمیم‌گیری‌های جمعی، امواج فرهنگی و اجتماعی و سایر تعامل‌های انسانی در مقیاس گسترده و چندسطحی استفاده کنیم، ویلسون حرف‌هایی بیشتر از داوکینز برای ما خواهد داشت و ابزارهای بهتر و قدرتمندتری در اختیارمان قرار خواهد داد.

کاربرد رفتارشناسی جانداران در شناخت پیچیدگی



روی شامپانزه‌ها اسم نگذار. اگر برای آنها به جای اسم کد بگذاری کمتر گرفتار سوگیری ذهنی می‌شوی. این توصیه‌ای بود که جین گودال²⁷⁶ در سال‌های نخست تحصیل و تحقیق در کمبریج از محققان آن دانشگاه، می‌شنید.

البته این توصیه هرگز اجرا نشد. چنانکه در توضیح عکسی که او با استادش روبرت هایند²⁷⁷ دارد، نوشته شده است: جین، روبرت و ملیسا. در حالی که در عکس دو انسان بیشتر نمی‌بینیم.

نام جین گودال با شامپانزه‌ها عجین شده است. فیلم‌ها و مستندهای متعددی در مورد او تولید شده و اشتباه نیست اگر بگوییم در دوران معاصر نقشی بی‌بدیل در حفظ حیات شامپانزه‌ها و بهتر دیده شدن و فهمیده شدن آنها داشته است. گودال در خاطرات خود می‌گوید هنگامی که به کمبریج وارد شد تا رفتارشناسی جانداران را بیاموزد، قلم، کاغذ و یک دوربین دوچشمی دست دوم، تنها دارایی‌های او بود.



او برای شامپانزه‌ها اسم گذاشته بود و صرفاً رفتارهای آنها را ثبت

²⁷⁶ Jane Goodall

²⁷⁷ Robert Hinde

می‌کرد^{۲۷۸}.

گودال به خاطر دارد که یک بار در یادداشت‌های خود در مورد یک شامپانزه نوشته بوده: وقتی فلینت، برادر فی فی به دنیا آمد، فی فی به بقیه‌ی جوانان گروه که به فیلینت نزدیک می‌شدند حسادت می‌کرد. روبرت هاینده او می‌گوید: جین. توحق نداری بگویی فی فی حسادت می‌کرده. حسادت یک واژه‌ی ذهنی است. قابل تعریف و سنجش نیست. ضمناً یک رفتار انسانی است. باید مراقب باشی در دام آنترپومورفیسیم^{۲۷۹} گرفتار نشوی.

گودال - که غرور یک دختر جوان در مواجهه با یک استاد زیبارو و جذاب را داشته و می‌کوشیده آن را حفظ کند - می‌گوید: «استاد. این واقعاً حسادت می‌کند. وقتی حسادت می‌کند، چرا باید از کلمه‌ی دیگری استفاده کنم؟»

روبرت هاینده او پاسخ می‌دهد: «پس حداقل بنویس: فی فی به شکلی رفتار کرد که اگر انسان بود، احتمالاً ما به این رفتار صفت حسادت را نسبت می‌دادیم.»

جمله‌ی روبرت هاینده کمی کمک می‌کند تا فضای رشته‌ی اتولوژی^{۲۸۰} را که خود او استاد برجسته‌ی آن بود و گودال دانشجوی دکترای همین رشته محسوب می‌شد، بهتر تصور کنیم^{۲۸۱}.

برای اینکه فضای اتولوژی را بهتر درک کنیم لازم است فضای فکری و فرهنگی دوران تولد و رشد این رشته را بهتر بشناسیم و

²⁷⁸ Peterson, D. (2008). Jane Goodall: the woman who redefined man. Boston, MA: Houghton Mifflin.

²⁷⁹ آنترپومورفیسیم (Anthropomorphism)، به معنای انسان انگاری حیوانات یا اشیاء است. به عبارتی، یعنی صفاتی را به موجودات غیرانسان نسبت دهیم که در انسان‌ها مشاهده و تجربه کرده‌ایم. خودرویی که خسته شده، موبایلی که قاطی کرده، سگی که می‌خندد و گیاهی که با خوردن آب جان گرفته، همگی نمونه‌هایی از آنترپومورفیسیم محسوب می‌شوند. البته اگر بیش از حد نگران آنترپومورفیسیم باشیم، ممکن است در دام آنتی آنترپومورفیسیم گرفتار شویم. یعنی احساسات و رفتارهایی که بین ما و سایر موجودات مشابه است را نتوانیم یا نخواهیم به آن‌ها نسبت دهیم. مثلاً ممکن است واقعاً یک سگ از دیدن صاحب خود خوشحال شود، اما وقتی صاحب سگ چنین تعبیری را به کار می‌برد از سوی دیگرانسان‌ها به این خطا متهم شود که رفتار و احساسات سگ را براساس احساسات انسانی نام‌گذاری و تفسیر کرده است. من بعداً باید در کتاب پیچیدگی به این بحث برگردم. چون فکر می‌کنم هوش و شعور و زنده بودن، از جمله صفت‌هایی هستند که به خیلی از موجودات دیجیتالی امروزی - از جمله اینترنت و شبکه‌های اجتماعی - قابل اطلاق هستند. اما برخی انسان‌ها از روی تعصب و نادانی و برخی دیگر از ترس گرفتار شدن به دام آنترپومورفیسیم، حاضر نیستند چنین صفت‌هایی را در مورد آنها به کار ببرند. حتی اگر چنین کنند، این نوع صفت‌ها را از جنس استعاره می‌دانند و نه یک واقعیت فیزیکی در دنیای بیرونی.

²⁸⁰ Ethology

²⁸¹ روبرت هاینده در روزهای پایانی سال ۲۰۱۶ میلادی درگذشت. یکی از نکاتی که باعث ناراحتی من شد این بود که وقتی نام او را برای نخستین بار خواندم و دیدم و جستجو کردم، متوجه شدم که تنها چند روز از مرگ او گذشته است. شبیه همین اتفاق در مورد کریستوفر هیچنز هم افتاد. منطق، احساس ناراحتی برای پیدا کردن یک نفر پس از مرگ او را - خصوصاً اگر قرار نباشد هرگز او را ببینی - نمی‌پذیرد. اما برای ما و ما هستیم که بسیاری از ما چنین حسی را تجربه کرده‌ایم. البته باید خوشحال باشیم که در مورد ویلسون و بسیاری از نام‌های دیگری که در این کتاب آمده و خواهد آمد، بخت ما من یار بوده تا همزمان با زنده بودنشان حرف‌هایشان را بخوانم و بشنوم و احساس بهتری را تجربه کنم.

بدانیم. دهه های نخستین قرن بیستم، دورانی بود که داروین و داروینیسم سهم مهمی از فضای علمی و فکری جهان را به خود اختصاص داده بود^{۲۸۲}.

کسانی که در دفاع یا رد بحث تکامل صحبت می کردند، الزاماً افراد مطلعی در این زمینه نبودند^{۲۸۳}. همین باعث شده بود که از یک سو، دانشمندان آشنا به تکامل مشغول به پاسخ گویی به اتهاماتی شوند که اساساً ربطی به آنها نداشت و از سوی دیگر، این نگرانی وجود داشته باشد که نگاه کیفی و داستانی به موضوع، موجب انحراف از روش علمی شود^{۲۸۴}.

دانش اتولوژی در این فضا به وجود آمد. معمولاً آن را به رفتارشناسی جانوران ترجمه می کنند. اما من ترجیح می دهم از رفتارشناسی جانداران استفاده کنم تا شامل همه ی ما بشود. خصوصاً با توجه به اینکه در فصل های آینده ی کتاب، می خواهم از کاربرد اتولوژی در تحلیل رفتار انسان ها در پلتفرم های اجتماعی صحبت کنم.

اگر کتابهای رایج در زمینه ی اتولوژی^{۲۸۵} را ورق بزنید یا در اینترنت واژه ی اتولوژی را جستجو کنید، به سه نام خواهید رسید. سه نفر که به خاطر فعالیت خود در این حوزه در سال ۱۹۷۳ به صورت مشترک جایزه ی نوبل در فیزیولوژی و پزشکی را دریافت کردند:

- کارل فون فریش^{۲۸۶}
- کونراد لورنز^{۲۸۷}
- نیکولاس تینبرگن^{۲۸۸}

^{۲۸۲} منظوم این نیست که همه داروینیست بودند. بلکه منظوم این است که نمی توانستی از آن صرف نظر کنی و داروین و داروینیسم را نبینی. بسیاری از نویسندگان و متفکران و حتی غیرنویسندگان و غیرمتفکرانی که تریبونی در اختیار داشتند، در مخالفت و یا در موافقت با آن نگاه حرف می زدند و اظهارنظر می کردند.

^{۲۸۳} هنوز هم چه در ایران و چه در کشورهایی که مردم بیشتر از ما اهل مطالعه و یادگیری و فکر کردن هستند، کم نیستند کسانی که تکامل لامارکی را توضیح می دهند و فکر می کنند در حال توضیح تکامل داروینی هستند. احتمالاً جایی بهانه ای پیدا خواهم کرد تا تفاوت این دو را بگویم. شاید زمانی که به بحث بهینه سازی سیستم ها یا خودسازماندهی برسیم، جایی برای این بحث باز شود.

^{۲۸۴} یکی از تهدیدهای جدی برای بحث های علمی در این است که به شکل Narration و روایت وارد ادبیات عمومی - و حتی ادبیات مختصصان - می شوند. در این حالت، دیگر از روش علمی که بنای آن بر فرضیه، پیش بینی، تجربه و اصلاح است فاصله می گیریم و کسانی موفق تری می شوند که داستان بهتری بسازند و روایت کنند.

^{۲۸۵} Ethology

^{۲۸۶} Karl von Frisch

^{۲۸۷} Konrad Lorenz

^{۲۸۸} Nikolaas Tinbergen

در شرحی که برای جایزه نوبل آنها آمده به این نکته اشاره شده است که آنها این جایزه را برای اکتشافات خود در زمینه‌ی شیوه‌ی بروز و سازماندهی الگوهای رفتار فردی و اجتماعی^{۲۸۹} دریافت کرده‌اند.

روبرت هایندهم که در ابتدای این بحث به او اشاره کردم، از شاگردان مستقیم تینبرگن است و نقش مهمی در توسعه و تدوین اتولوژی داشته است.

اتولوژیست‌ها می‌خواستند از روش علمی برای بررسی تکامل و توسعه‌ی این دانش استفاده کنند. فراموش نکنیم که در زمان تولد و رشد اولیه‌ی اتولوژی، هنوز DNA کشف نشده بود و بسیاری از بحث‌هایی که به تکامل مربوط می‌شد، عملاً بحث‌های کیفی بود. همان چیزی که باعث می‌شد برخلاف امروز، به جای نظریه تکامل از اصطلاح فرضیه‌ی تکامل^{۲۹۰} استفاده شود. اتولوژی کوشید صرفاً به رفتارهای قابل مشاهده‌ی جانداران توجه کند و به هیچ وجه به لایه‌های دیگری که شناختی از آنها نداریم وارد نشود.

به عنوان مثال، حق داریم از اصطلاح‌های زاد و ولد، حرکت به چپ، حرکت به راست، شکار کردن، خوردن، جفت‌گیری، مهاجرت، تغییر رنگ پوست، ریزش پر، دودیدن، راه رفتن، نوک زدن و جستجوی غذا استفاده کنیم. اما استفاده از اصطلاحات خشمگین شدن، حسودی کردن و انتقام گرفتن و ترسیدن، مجاز نخواهد بود.

تمرین:

شاید بد نباشد در اینجا، به رفتارهای انسان‌ها در یکی از شبکه‌های اجتماعی رایج فکر کنید و سعی کنید چند رفتار را فهرست کنید.

همچنین فکر کنید که چه چیزهایی را حق ندارید در فهرست رفتارها قرار دهید هر چه نام می‌برید باید دارای تعریف شفاف بوده و قابل مشاهده و اندازه‌گیری باشد. پس از تعریف شما، هر فرد دیگری هم باید بتواند آن رفتارها را مشاهده و اندازه‌گیری کرده و گزارش دهد.

اتولوژیست‌ها می‌کوشیدند گونه‌های مختلف جانداران را بر اساس رفتارهایشان تشخیص دهند و تفکیک کنند.

²⁸⁹ For their discoveries concerning organization and elicitation of individual and social behaviour patterns.

^{۲۹۰} در اوایل کتاب در یک پاورقی توضیح دادم که به نظرم تکامل و فرگشت به یک اندازه به عنوان ترجمه‌ی Evolution همراه‌کننده هستند. به همین علت علاقه ندارم از واژه‌ی فرگشت استفاده کنم. امیدوارم زمانی، کلمه‌ی پیشنهادی خودم یعنی دگرگشت رایج شود و یا لاقلاً از کلمه‌ی زیبا و گویای عربی تطور استفاده کنیم. تا آن زمان، همچنان همین تکامل را به کار می‌برم که به گوش و چشم خواننده آشناتر است.

به بیان دیگر، براساس شباهت‌های رفتاری میان یک گروه از جانداران، یک گونه را تعریف کنند و براساس تفاوت‌های رفتاری میان یک گروه از جانداران با گروه دیگر، تفاوت بین گونه‌ها را تشخیص دهند و اندازه بگیرند.

حاصل این بررسی‌ها می‌تواند به نمودارهای طبقه‌بندی گونه‌ها منتهی شود. این نمودارها در میان جانورشناسان به **کلادوگرام**^{۲۹۱} مشهور هستند.

طبیعی است این شیوه، در مقایسه با شیوهی قدیمی که صرفاً به شکل ظاهری حیوانات و جانداران توجه می‌کرد علمی‌تر و دقیق‌تر است. اما احتمالاً می‌توانید حدس بزنید که با توسعهی علم ژنتیک از یک سو و نیز علم نورولوژی از سوی دیگر، عملاً اتولوژی کارکرد کلاسیک خود را از دست می‌دهد.

این نگاهی است که ویلسون هم به آن معتقد بوده است. گفته می‌شود که ویلسون، در سال ۱۹۷۵ پیش‌بینی کرده بود که اتولوژی به زودی از بین خواهد رفت^{۲۹۲}. چون بخش‌هایی از آن که با مکانیزم رفتار کار دارد در نورولوژی بررسی خواهد شد و بخش‌های دیگر هم در سوسیوبیولوژی - که خود او بنیان‌گذاری کرده است - مورد بحث قرار خواهد گرفت.

اما امروز می‌دانیم که اتولوژی در زیست‌شناسی و جانورشناسی باقی مانده و اتفاقاً یک علم در حال رشد محسوب می‌شود. البته کارکرد آن بسیار تغییر کرده است. امروز دغدغه‌ی اتولوژی، بیشتر از اینکه به ترسیم کلادوگرام و بررسی درخت تکامل محدود شود، بررسی کمی رفتار فردی و گروهی جانداران است.

اگر چه کسانی مثل ویلسون در مورد سوآرم‌ها بسیار حرف زده‌اند و نظریه‌پردازی‌های ارزشمندی انجام داده‌اند، اما اگر بخواهید از روش روایت‌سازی و علت‌پردازی فاصله بگیرید و رفتار سوآرم‌ها را به شکل کاملاً عددی و ریاضی بررسی کنید، همچنان باید به سراغ اتولوژیست‌ها بروید.

اجازه بدهید به علت اهمیت این نکته، آن را به شکلی دقیق‌تر توضیح دهم:

سوسیوبیولوژیست‌ها، وقتی از گروه موریانه‌ها یا زنبورها یا ماهی‌ها حرف می‌زنند، درست مانند یک جامعه‌شناس به رفتارهای آنها و طبقات اجتماعی آنها و تعاملات آنها نگاه می‌کنند. خود جامعه‌شناسی در مورد انسان‌ها هم، هنوز تا حد زیادی یک علم کیفی است.

اما فرض کنید شما می‌خواهید رفتار ایرانیان را در تلگرام یا اینستاگرام یا فیس‌بوک یا توییتر بررسی کنید، یا پیش‌بینی کنید

²⁹¹ Cladogram

²⁹² Davies, N. B., Krebs, J. R., & West, S. A. (2014). An introduction to behavioural ecology. Oxford: Wiley-Blackwell.

که با آزاد شدن دسترسی به یک شبکه اجتماعی چه اتفاق‌هایی خواهد افتاد یا از رفتار یک گروه از انسان‌ها در یک پلتفرم اجتماعی، رفتار آنها را در پلتفرم دیگری که هنوز روی آن سرمایه‌گذاری نشده پیش‌بینی کنید.

احتمالاً در اینجا دست اتولوژیست‌های دیجیتال بیشتر از سوسیوبیولوژیست‌ها باز خواهد بود. آنها به روش‌های عددی مجهز هستند و می‌توانند ابزاری برای سنجش رفتارهای فعلی و پیش‌بینی رفتارهای آتی در اختیار شما قرار دهند.

قواعد ساده و ظهور رفتارهای پیچیده: بررسی اتولوژیک گروه ماهی‌ها

در ادامه‌ی معرفی بسیار مختصر اتولوژی، این بخش از بحثم را به مرور یکی از مقاله‌های کلیدی در زمینه‌ی اتولوژی ماهی‌ها اختصاص می‌دهم^{۲۹۳}.

این مقاله را براین پارتریج^{۲۹۴} در سال ۱۹۸۲ منتشر کرد. اگر چه بعد از او مقالات متعددی در زمینه اتولوژی ماهی‌ها منتشر شدند، اما فکرمی‌کنم مرور کار پارتریج از دو جهت حائز اهمیت باشد.

یکی اینکه کار او از جمله قدیمی‌ترین مطالعات علمی و دقیق در این حوزه است و باید پذیرفت که به قول معروف، الفضل للمتقدم^{۲۹۵}.

علت دیگر آنکه پاتریج از جمله نخستین کسانی است که به ظهور رفتارهای جمعی در ماهی‌ها توجه کرد و این نکته را مورد تاکید قرار داد که قواعد بسیار ساده در حرکت هر ماهی، می‌تواند به ظهور رفتارهای پیچیده در جمع ماهی‌ها منتهی شود.

معمولاً ماهی‌ها در دو ساختار متفاوت کنار هم قرار می‌گیرند. یکی از این ساختارها، وضعیتی است که در آن هیچ نوع محرک بیرونی - چه جستجوی غذا و چه تهدید خارجی - وجود ندارد.

آنها در یک جمع بزرگ بدون نظم و ترتیب خاصی می‌چرخند و می‌گردند و تعاملات اولیه اجتماعی خود را برقرار می‌کنند. در ادامه‌ی این کتاب، این وضعیت را توده‌ی ماهی‌ها^{۲۹۶} نامید.

²⁹³ Partridge, B. L. (1982). The Structure and Function of Fish Schools. Scientific American, 246(6), 114-123.
doi:10.1038/scientificamerican0682-114

²⁹⁴ Brain Partridge

^{۲۹۵} اصطلاحی عربی که در میان فارسی‌زبانان هم رایج است و تاکید دارد که برتری از آن کسی است که پیش‌تاز باشد و زودتر از دیگران گام در یک راه بگذارد.
^{۲۹۶} در انگلیسی برای این وضعیت خاص ماهی‌ها کلمه‌ی ویژه وجود دارد و به آن Shoaling گفته می‌شود.

اما وقتی ماهی‌ها تصمیم می‌گیرند دنبال غذا بروند یا محل جدیدی را کشف کنند یا متوجه می‌شوند که ماهی‌های بزرگ‌تر قصد دارند به آنها حمله کنند، ناگهان نظمی شگفت‌انگیز در میان‌شان به وجود می‌آید.

بسیاری از تصویرهایی که ما از گردش انبوه ماهی‌ها در کنار هم یا حرکت جمعی آنها می‌بینیم، به این وضعیت مربوط است. برای اینکه این وضعیت را از وضعیت قبل تفکیک کنیم، من اصطلاح **گروه ماهی‌ها** را به کار خواهم برد^{۲۹۷}.

بنابراین، تا پایان این کتاب به خاطر خواهیم داشت که **توده‌ی ماهی‌ها** و **گروه ماهی‌ها** دو اصطلاح مترادف نیستند و هر کدام به یک وضعیت اشاره می‌کنند. پارتیج برای مطالعه خود از ماهی پالاک استفاده کرد. تصویر نمونه‌ای از این ماهی را در اینجا می‌بینید:



پارتیج چنان از رفتار گروهی ماهی‌ها شگفت‌زده بود که تصمیم گرفت چند سال از زندگی خود را صرف مطالعه‌ی حرکت آنها کند. هیجان زندگی پارتیج را می‌توانید در نخستین جمله‌های مقاله‌ی او هم حس کنید:

چگونه این کار را انجام می‌دهند؟ هر کس که گروه ماهی‌ها را ببیند و حرکت آنها را تحت نظر قرار دهد، طبیعتاً چنین سوالی را خواهد پرسید.

صدها ماهی کوچک چنان به صورت گروهی و هماهنگ حرکت می‌کنند که احساس می‌کنی بهتر است آنها را یک اندام بدانی تا چند صد عضو مستقل که در یک گروه در حال حرکت و زندگی هستند.

همه در حال حرکت مستقیم هستند. ناگهان می‌بینی که گروه پیچید و مسیر دیگری را رفت. محال است حتی یک ماهی جا بماند یا برای لحظه‌ای مسیر را گم کند.

یک کوسه ماهی با شتاب به گروه آنها نزدیک می‌شود. مانند یک کره از مرکز دور می‌شوند و مسیر را برای کوسه‌ماهی باز می‌کنند. حتی دو ماهی هم با یکدیگر برخورد نمی‌کنند. کوسه‌ماهی به مسیر مستقیم ادامه می‌دهد و ماهی‌ها در قالب چند

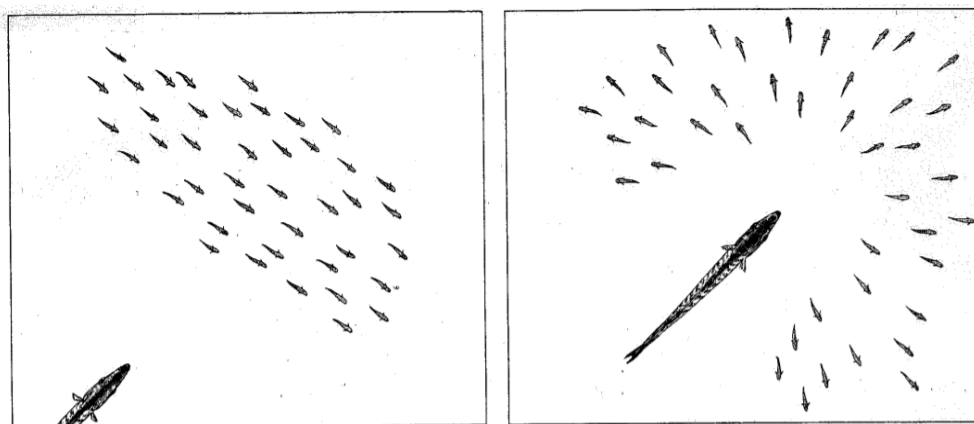
^{۲۹۷} اصطلاحی که در انگلیسی برای رفتار گروه ماهی‌ها به عنوان Schooling مطرح می‌شود، مربوط به این وضعیت است.

گروه به یکدیگر نزدیک می‌شوند و دوباره گروه‌ها هم به یکدیگر می‌پیوندند و مسیر قبلی را ادامه می‌دهند.

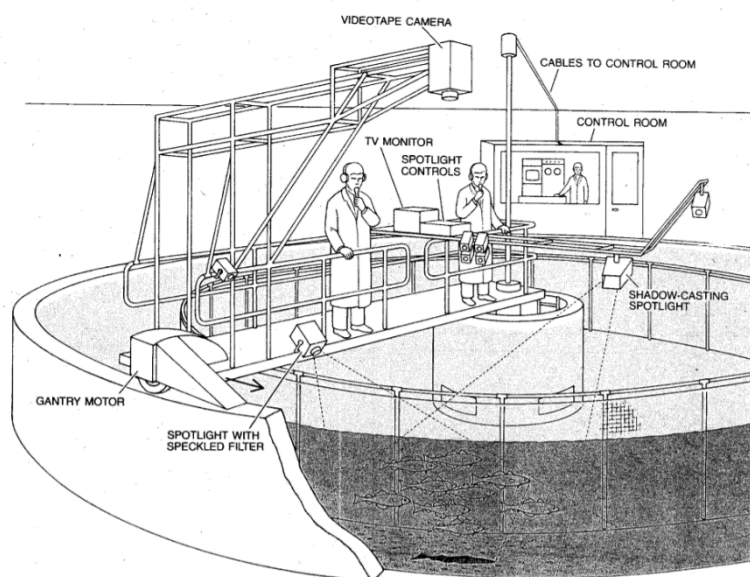
پارتریج توضیح می‌دهد که با وجود آشنا بودن رفتار جمعی ماهی‌ها برای انسان‌ها، تحقیقات کمی در مورد قواعد و الگوی حرکت آنها انجام شده و در ادامه روش تحقیق خود را شرح می‌دهد.

اجازه بدهید چند تصویر را که او در مقاله‌اش ترسیم کرده در اینجا مرور کنیم.

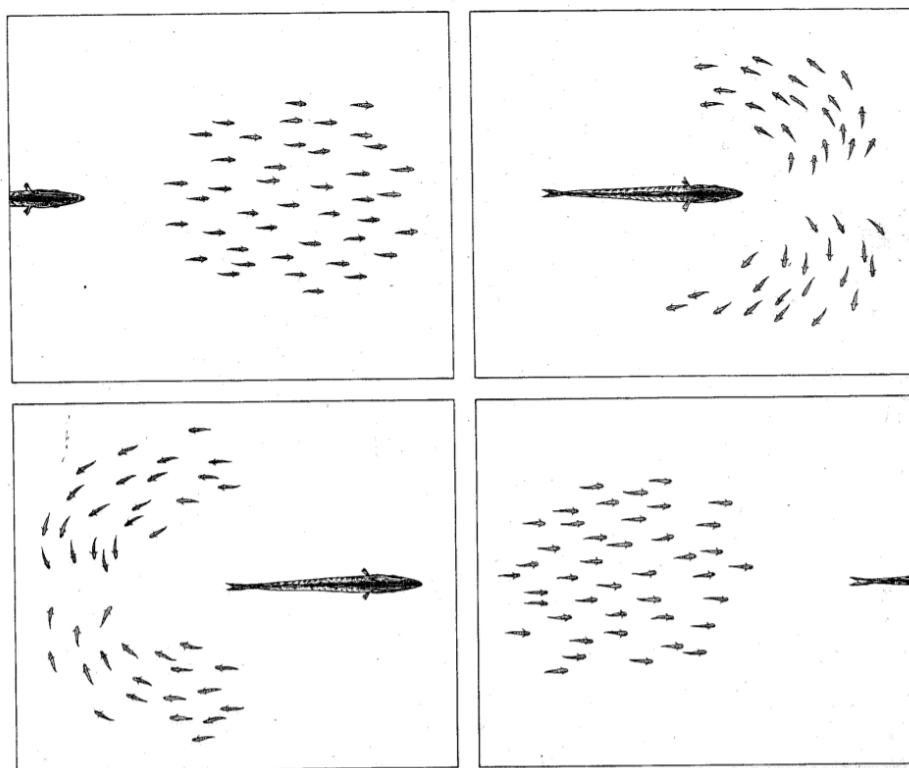
نخستین تصویر مربوط به زمانی است که ماهی‌ها با یک شکارچی سریع مواجه می‌شوند و به صورت یک کروی در حال انبساط از او دور می‌شوند.



او نموداری را هم نشان می‌دهد. در نمودار دوم، نحوه‌ی فرار کردن ماهی‌ها از دست شکارچیان بزرگ‌تر نمایش داده شده



است. شکارچیان بزرگ‌تر، طبیعتاً انعطاف‌پذیری کمتری هم دارند و نمی‌توانند به سادگی مسیر خود را تغییر دهند. ماهی‌ها هم، برای فرار از دست آنها روش هوشمندانه‌ی دیگری دارند. کمی از مسیر او دور می‌شوند و درست پشت دم شکارچی دوباره گرد هم می‌آیند و چون دور زدن برای ماهی بزرگ دشوار است، از شکار کردن آنها صرف‌نظر می‌کند و به سراغ طعمه‌ای دیگر می‌رود.



پارتیج، مخزن آبی بزرگ به قطره متر درست کرد تا بتواند رفتار ماهی‌ها را بررسی کند. او در مقاله‌اش، نحوه‌ی مطالعه و بررسی را با جزئیات کامل شرح داده است. چون جزئیات اجرایی خارج از بحث ماست، من از نقل آنها صرف‌نظر می‌کنم.

اگر چه چنان زیبا و خلاقانه هست که علاقمندان جزئیاتش را در مقاله‌ی او مطالعه و بررسی کنند.

از جزئیات بحث که بگذریم، نتیجه‌ی کار پارتیج برای ما آموزنده است. او برای تحلیل حرکت ماهی‌ها حدود ۳۵۰۰۰ فریم عکس را دانه به دانه بررسی کرد و مختصات ماهی‌ها را به یک سیستم کامپیوتری داد.

در نهایت به چند نتیجه‌ی مهم و کلیدی رسید که در اینجا آنها را مرور می‌کنیم:

- هریک از ماهی‌ها، به دوروش از محیط خود اطلاعات دریافت می‌کند. یکی چشم‌های اوست و دیگری باله‌های کناری که به سرعت حرکت آب حساس هستند و با دقت بالا می‌توانند سرعت و جهت حرکت ماهی‌های مجاور را حس کنند.
- ماهی‌ها، هیچ نوع ترجیح خاصی را در مورد فاصله با سایر ماهی‌ها نشان نمی‌دهند. به عبارتی وقتی از فاصله‌ی متوسط ماهی‌ها حرف می‌زنیم، صرفاً از یک محاسبه‌ی ریاضی صحبت می‌کنیم و نه یک قاعده‌ی رفتاری.
- ماهی‌ها فقط دو قاعده‌ی ساده را می‌فهمند و دنبال می‌کنند. قانون اول این است که اگر ماهی دیگری در جلوی آنها باشد، آن را تعقیب می‌کنند. قانون دوم هم این است که سرعت حرکت خود را با ماهی کنارشان تنظیم می‌کنند.^{۲۹۸}

آنچه مناسب است در اینجا به خاطر بسپاریم این است که رفتارهای پیچیده و هوشمندانه‌ای که ما در گروه ماهی‌ها



می‌بینیم، در وضعیت ماکرو قابل تعریف و قابل مشاهده هستند. در وضعیت خُرد، ماهی‌ها قواعد بسیار ساده‌ای دارند که عمدتاً بر پایه‌ی ژنتیک و در طول مسیر طولانی تکامل شکل گرفته و کمک می‌کند زندگی روزمره‌ی خود را بگذرانند.

^{۲۹۸} اگر مقاله‌ی پارتیج را بخوانید جزئیات بسیار بیشتری خواهید دید. از جمله اینکه وقتی اطلاعاتی که به چشم ماهی و به باله‌های ماهی می‌رسد تناقض دارد، ماهی کدام را انتخاب می‌کند. اما اینها جزئیاتی است که اگر چه برای یک اتولوژیست بسیار جذاب است، اما برای ما که می‌خواهیم پیچیدگی را بیاموزیم، در اولویت نیست.

درباره اهمیت همسایگی

انسان جزئی از یک کل است. ما آن کل را هستی نامیده‌ایم. این جزء، در زمان و مکان محدود است. خودش را، افکار و احساساتش را جدا از جهان اطراف می‌پندارد و برای خود هویتی مستقل قائل می‌شود. چیزی شبیه خطای بصری که این بار در حوزه‌ی آگاهی اتفاق می‌افتد.

اینشتین

تا این بخش از بحث، سعی کرده‌ایم از زوایای مختلف به بحث پیچیدگی نزدیک شویم و اگرچه بارها به آن نزدیک شده‌ایم، اما هنوز آن را چنانکه باید و شاید لمس نکرده‌ایم.

امیدوارم در این فصل، با بررسی مثال‌های مختلف، ارتباط میان مطالبی که در فصل‌های پیشین مطرح شده شفاف‌تر شود و به این شیوه، مسیر یادگیری مان برای فصل‌های آتی هموارتر شود.

هدفم این است که تا پایان این بخش به این سوال مهم پاسخ دهم که: «اصلاً ما چه چیزی کم داشتیم که به سراغ دانش پیچیدگی آمدیم؟ آیا جایی با مشکل یا مانعی مواجه شده بودیم؟ آیا مسئله‌ی حل نشده‌ای داشتیم؟ آیا ابزارها و مدل‌هایی که داشتیم، در توضیح برخی پدیده‌ها یا پیش‌بینی برخی رفتارها ضعیف بودند؟ آیا می‌توان گفت ما صرفاً دانش پیچیدگی را به عنوان یک ابزار طراحی و تولید کردیم تا ببینیم کجا ممکن است به کارمان بیاید؟»

معتقدم که اگر مطالب را تا اینجا با دقت و حوصله دنبال کرده باشید، پاسخ این پرسش‌ها را می‌دانید؛ یا لااقل می‌توانید حدس بزنید. با این حال منطقی است که من هم عنوانی مستقل را به این بحث اختصاص دهم تا مطمئن باشم همه‌ی ما به یک اندازه برای مطالعه‌ی ادامه‌ی این بحث آماده هستیم.

داستان نیاز به پیچیدگی را با دو مثال آغاز می‌کنم.

ایده‌ی مثال اول را از براین آرتور قرض گرفته‌ام²⁹⁹ و برای مثال دوم هم از کتاب میلرو پیچ استفاده کرده‌ام³⁰⁰. البته هر دو مثال، همچنان که نویسندگان مذکور هم در نوشته‌های خود تاکید کرده‌اند، بارها تغییر شکل پیدا کرده و توسط دیگران در مطالعات و تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته است.

من هم روایت خودم را - در حدی که به کارمان می‌آید - خواهم داشت. این را از آن جهت گفتم که تاکید کنم زیبایی و جذابیت مثال‌ها، حاصل هنر و خلاقیت گویندگان اصلی است و ضعف‌ها و ابهام احتمالی‌شان ناشی از ساختار و روایتی

²⁹⁹ Arthur, B. (2015). Complexity and the economy. Oxford: Oxford University.

³⁰⁰ Miller, J. H., & Page, S. E. (2007). Complex adaptive systems: an introduction to computational models of social life. Princeton, NJ: Princeton University Press.

است که من به آنها تحمیل می‌کنم.

ماجرای موسیقی زنده در سفره‌خانه

یک سفره‌خانه‌ی سنتی را در نظر بگیرید که هر جمعه شب در آن موسیقی زنده اجرا می‌شود. سفره‌خانه برای حدود شصت نفر ظرفیت دارد و عملاً نفر شصت و یکم از حضور در سفره‌خانه و استفاده از برنامه‌ی موسیقی زنده محروم خواهد شد. این سفره‌خانه حدود صد نفر مشتری بسیار وفادار دارد که اتفاقاً عاشق موسیقی زنده هم هستند.

بیایید به سراغ یکی از این علاقمندان - مثلاً مهسا - برویم که الان در غروب دلگیر جمعه، در خانه نشسته و با خود فکر می‌کند که امشب به سفره‌خانه سرزنم یا نزنم؟

مهسا می‌داند که اکنون نود و نه نفر دیگر غیر از او هم دارند به همین سوال فکر می‌کنند. ممکن است عده‌ای از آنها فکر کنند امشب شلوغ است و تصمیم بگیرند به سفره‌خانه سرزنند و در خانه بمانند. اگر حداقل چهل نفر از این نود و نه نفر چنین تصمیمی بگیرند، مهسا می‌تواند با خیال راحت به سفره‌خانه برود و صندلی خالی هم داشته باشد و غروب لذت بخشی را هم تجربه کند.

اما اگر تعداد زیادی از این صد نفر، احساس کنند که امشب احتمالاً سفره‌خانه خلوت است و موقع مناسبی است تا از موسیقی زنده بهره‌مند شوند، احتمال دارد مهسا جایی پیدا نکند و مجبور شود دست خالی و بی‌نتیجه به خانه بازگردد^{۳۰۱}.

این مسئله‌ی ساده یک ویژگی مهم دارد:

صد نفر باید در یک مورد - حضور داشتن یا نداشتن در یک برنامه - تصمیم بگیرند و صرفاً پس از اینکه همه‌ی آنها تصمیم گرفتند و انتخاب خود را انجام دادند، مشخص می‌شود که چه انتخابی درست و چه انتخابی نادرست بوده است.

به عبارت دیگر، در لحظه‌ی تصمیم‌گیری، هیچ گزینه‌ی درست یا نادرستی وجود ندارد. فقط پس از اینکه همه تصمیم گرفتند

^{۳۰۱} امیدوارم الان با خودتان نگویید که مهسا اگر واقعاً علاقمند باشد، می‌تواند از پنج عصر برود و پشت در سفره‌خانه بنشیند تا در را باز کنند و او به راحتی صندلی پیدا کند. چون بقیه هم احتمال دارد به چنین چیزی فکر کنند و در نهایت صرفاً یک بعد به پیچیدگی مسئله‌ی من اضافه کرده‌اید، بدون اینکه چیزی به دست آورده باشیم. شاید شما هم تجربه‌ی سفرهای آخر هفته را داشته باشید که همه فکر می‌کنند اگر ساعت هشت صبح راه بیفتند جاده‌ها شلوغ است و به همین علت تصمیم می‌گیرند ساعت شش صبح راه بیفتند و اتفاقاً ترافیک واقعی هم ساعت شش به خاطر همین سحرخیزان محاسبه‌گر به وجود می‌آید و تنبل‌های بی‌محاسبه، ساعت هشت با خیال راحت سفر خود را آغاز می‌کنند. بنابراین، لطفاً برای این مسئله، فرض کنید همه‌ی کسانی که به سفره‌خانه می‌روند، همزمان به آنجا می‌رسند و مهسا هم به خاطر تیپ شخصیتی‌اش، حتی اگر یک صندلی کم بیاید، ترجیح می‌دهد خودش از برنامه محروم شود و اجازه دهد دیگران از برنامه استفاده کنند.

می‌توانیم در مورد درست یا نادرست بودن تصمیم هر فرد اظهار نظر کنیم.

فرض کنید به همه‌ی این صد نفر، یک فرمول ریاضی داده شده که بتوانند احتمال حضور دیگران را در سفره‌خانه حدس بزنند. این فرمول می‌تواند اطلاعاتی مانند تعطیلی‌های نزدیک به آن تاریخ، دمای هوا، همزمانی برنامه‌های فوتبال و ده‌ها عامل دیگر را با هم ترکیب کند و به شما بگوید که چند درصد احتمال دارد امشب برای شما جای خالی وجود داشته باشد. وجود چنین فرمولی بسیار زیبا و جذاب به نظر می‌رسد. بخش قابل توجهی از مدل‌های مدیریتی و اقتصادی هم به معرفی و آموزش چنین فرمول‌هایی اختصاص یافته‌اند.

احتمالاً کسانی هم هستند که با بررسی نقش فاکتورهای جدید و افزودن آنها به فرمول، مدارج علمی خود را ارتقا داده‌اند. مثلاً شاید بررسی نقش عامل آلودگی هوا در تصمیم شهروندان برای حضور در سفره‌خانه، موضوع پایان‌نامه‌ی یک دانشجوی ارشد بوده باشد.

اما به یک نکته توجه کنید: چنین فرمولی وقتی می‌تواند مفید باشد که هیچ فرد دیگری به آن دسترسی نداشته باشد. به این وضعیت غم‌انگیز فکر کنید که این فرمول در اختیار هر صد نفر قرار گرفته است.

حالا همه از فرمول استفاده می‌کنند و مثلاً به نتیجه می‌رسند که امروز صندلی خالی دارند. پس همه به سفره‌خانه مراجعه می‌کنند و با صندلی‌های پر مواجه می‌شوند. از طرفی اگر فرمول به آنها بگوید که امروز صندلی خالی پیدا نخواهد شد، همه در خانه می‌مانند و فردا از مدیر سفره‌خانه خواهند شنید که دیشب حتی یک نفر هم در آنجا حضور نداشته و گروه موسیقی، برای صندلی‌های خالی برنامه اجرا کرده است.

احتمالاً با خود می‌گویید: مگر می‌شود همه دقیقاً یک فرمول داشته باشند؟ اتفاقاً معمولاً چنین فرمول‌هایی در اختیار افراد معدودی است و همین مسئله باعث می‌شود بتوانیم به آنها اتکا کنیم.

اما ماجرا اینجاست که بخش قابل توجهی از اقتصاد و مدیریت، می‌کوشند به ما فرمول‌های حاکم بر ذهن انسان‌ها را بیاموزند. به ما بگویند که دیگران چه چیزهایی را ترجیح می‌دهند و چه چیزهایی را ترجیح نمی‌دهند و در چه شرایطی چه گزینه‌هایی را انتخاب می‌کنند. بنابراین می‌توان گفت، بخش قابل توجهی از ابزارهایی که ما تا کنون طراحی کرده‌ایم، عملاً از جنس مسئله‌ی سفره‌خانه است.

حالا ممکن است حرف دیگری بزنید. مثلاً بگویید: هیچ‌کس مدعی نیست که همه دقیقاً بر اساس یک فرمول و کاملاً مکانیکی رفتار می‌کنند. این فرمول‌ها صرفاً الگوی کلی رفتار یک فرد را توضیح می‌دهند. این توجیه، بیشتر از هر حرف دیگری، شیوه‌ی مدل‌سازی ما را تضعیف می‌کند و زیر سوال می‌برد. چون عملاً می‌توان آن را به صورت این پارادوکس ترجمه

کرد: بسیاری از مدل‌های علوم انسانی و اجتماعی، اگر خیلی درست نباشند و دیگران هم آن‌ها را رعایت نکنند، می‌توانند مفید و قابل استفاده باشند.

اگر کمی وقت بگذارید و به این مسئله فکر کنید، می‌توانید متوجه شوید که یک آنالوژی بسیار جالب بین ماجرای سفره‌خانه و بسیاری از مسائل روزمره و نیز چالش‌های مدیریت و اقتصاد وجود دارد.

به این مثال‌ها توجه کنید:

- یک برنامه‌ی رادیویی اعلام کرده به قید قرعه به تعدادی از کسانی که یک پیامک مشخص را ارسال کنند جایزه می‌دهد.
- قیمت سهم یک شرکت سقوط کرده و الان سهامداران در فکر هستند که بهتر است سهم را نگه دارند یا آن را بفروشند.
- ترافیک در لاین سوم اتوبان زیادتر از لاین چهارم است و همه‌ی رانندگان هم‌زمان به این فکر می‌کنند که لاین خود را عوض کنند یا نه (بارها شده که همه با هم لاین خود را تغییر می‌دهیم و حالا لاین چهارم شلوغ می‌شود و باید در ادامه‌ی مسیر، دوباره همه‌ی خودروها به این سوال فکر کنند که بهتر است به خط سوم بازگردند یا نه).

مثال‌هایی از این دست بسیارند و در همه‌ی آنها یک ویژگی مشترک وجود دارد: تصمیم هیچ یک از بازیگران بازی، به خودی خود درست یا غلط نیست. اصلاً تصمیم درست یا غلط وجود ندارد. همه تصمیم می‌گیرند و تنها در این مرحله است که مشخص می‌شود تصمیم درست و نادرست چه بوده است.

اگر تعداد بازیگران در این مدل‌ها کم باشد، می‌توان مدل را در حد بازی سنگ، کاغذ، قیچی در نظر گرفت و از کنار آن عبور کرد. اما وقتی صدها و هزاران و بلکه میلیون‌ها نفر درگیر چنین بازی‌هایی می‌شوند، عملاً هیچ فرمول قطعی و چارچوب عقلانی برای تصمیم‌گیری و تعیین گزینه‌ی درست وجود ندارد. قاعدتاً تعیین گزینه‌ی درست پس از اینکه همه انتخاب‌هایشان را انجام دادند هم، دردی از کسی دوا نخواهد کرد.

این مسئله را می‌توانیم پیچیده‌تر هم بکنیم.

مثلاً فرض کنید هریک از این صد نفر، بیست هفته‌ی گذشته درگیر ماجرای سفره‌خانه بوده و هر هفته در مورد رفتن یا نرفتن تصمیم گرفته‌اند. حتی می‌توانید فرض کنید ماجرا آن قدر مهم بوده که هریک از این صد نفر در طول هفته به سفره‌خانه سر زده‌اند و پرسیده‌اند که تعداد حاضرین جمعه گذشته چند نفر بوده است.

دفتر خاطرات یکی از این مشتریان وفادار سفره‌خانه می‌تواند حاوی چنین گزارشی باشد:

- هشت هفته قبل، فکر کردم همه به سفره‌خانه می‌روند و من نرفتم. بعداً فهمیدم که واقعاً شلوغ بوده (چه خوب که نرفتم).
- هفت هفته قبل، فکر کردم افراد کمی به سفره‌خانه می‌روند و من رفتم. اما جا پیدا نکردم و برگشتم (چه بد که رفتم).
- شش هفته قبل، انتظار داشتم افراد کمی به سفره‌خانه بروند و باز هم رفتم. این بار واقعاً خلوت بود (چه خوب که رفتم)
- پنج هفته قبل، فکر کردم خیلی‌ها به سفره‌خانه می‌روند و نرفتم. بعداً فهمیدم خلوت بوده (چه بد که نرفتم).
- ...

حالا سوال این است که اگر هر یک از این صد نفر، چنین دفترچه‌ای داشته باشند و هر جمعه برای تصمیم‌گیری به دفتر خاطرات‌شان مراجعه کنند، روند تصمیم‌گیری چه تغییری خواهد کرد؟ اصلاً بهتر است چنین دفترچه‌ای داشته باشیم یا نبودن چنین دفترچه‌ای بهتر است؟ اگر بدانید همه چنین دفترچه‌ای دارند، شما هم این گزارش را ثبت می‌کنید؟ یا فکر می‌کنید چنین گزارشی نمی‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر کمک کند؟

سوال سخت‌تری هم وجود دارد: اگر به شما اجازه بدهند که به هر چند نفر (حتی همه‌ی نود و نه نفر دیگر) زنگ بزنید و برنامه‌ی آنها را بپرسید، آیا این کار را انجام می‌دهید؟ اصلاً این کار به شما کمک می‌کند؟ چون ممکن است بعضی به نتیجه برسند بهتر است به شما بگویند حتماً می‌روند تا شما احساس کنید شلوغ است و از رفتن صرف نظر کنید.

با افزودن جزئیات به مسئله، به تدریج به مسائل واقعی در جامعه و اقتصاد و فضای مدیریت نزدیک‌تر می‌شویم. چون همه‌ی ما سابقه‌ای از تصمیم‌ها و انتخاب‌های گذشته در ذهن داریم و گاه و بیگاه به آنها مراجعه می‌کنیم. نظرو قضاوت دیگران را هم می‌پرسیم.

اما این نکته‌ی بسیار مهم را به خاطر بسپاریم: این جزئیات نیست که مسئله را پیچیده کرده است. مسئله از ابتدا پیچیده بود. ذات این مسئله و این نوع مسائل، چیزی نیست که بتوانیم به سادگی براساس یک فرمول مشخص و قطعی ریاضی در موردشان اظهار نظر کنیم.

بیا یاد بایستیم و سخنران را تشویق کنیم

این مثال را به نوعی از حرف‌های پیچ و میلر الهام گرفته‌ام.

در یک مراسم شرکت کرده‌اید و یک سخنرانی به پایان می‌رسد و شما به عنوان یکی از حاضرین، بسیار هیجان‌زده شده‌اید. سخنرانی بسیار زیبا و تاثیرگذار و حتی شاید فراتر از انتظار شما بوده است.

بلند می شوید و می ایستید و کف می زنید و سخنران را تشویق می کنید. اگر زیاد به سمینارها سر بزنید و تجربه های بسیاری هم در هیجان زدگی داشته باشید، حتماً متوجه شده اید که گاهی فقط شما هستید که بلند می شوید و کف می زنید (و احتمالاً به سرعت سر جای خود می نشینید).

گاهی اوقات، بخشی از حاضرین می ایستند و تشویق می کنند. زمان هایی هم هست که همه می ایستند. معمولاً وقتی تعداد کسانی که می ایستند و تشویق می کنند از حد مشخصی فراتر رود، تقریباً همه خواهند ایستاد. چون صورت چندان زیبایی ندارد که همه ایستاده باشند و شما در میان آنها نشسته باشید. باز هم به مسئله ی ساده ی دیگری رسیدیم که تحلیل آن چندان ساده نیست.

فرض کنید به شما گفته اند باید تعدادی از صندلی ها را با دوستان خود پر کنید تا در پایان سخنرانی بلند شوند و سخنران را هیجان زده تشویق کنند تا این ماجرا به همه ی جمع تسری پیدا کند. چند نفر را به سالن می برید؟ هر کدام را کجا می نشانید؟ فراموش نکنید که دوستان شما یک تفاوت مهم با سایر مهمان ها دارند. مهمان ها بلیط خریده اند و پول داده اند و آمده اند. اما هریک از دوستان شما، یک صندلی را اشغال می کنند و فرصت فروش بلیط از دست می رود. تازه احتمالاً برای حضور در برنامه و تشویق هیجان زده، حقوق هم خواهند خواست.

پس نمی توانید هر چقدر دلتان می خواهد تعداد این تشویق کنندگان هیجان زده را افزایش دهید.

شاید چنین مسائلی در ظاهر چندان مهم نباشند. اما تردید ندارم اگر کمی ذهن خود را آزاد بگذارید و تجربه ها و دانسته های خود را مرور کنید، انبوهی مثال های واقعی و کاربردی به خاطر خواهید آورد که به نوعی با این داستان هایی که گفتم آنالوژی دارند.

مفهوم همسایگی

در اینجا می توانیم به تدریج سراغ مفهوم همسایگی برویم.

در ماجرای سخنرانی، همه روی یک صندلی ننشسته اند و همه هم در یک لحظه در مورد نشستن یا ایستادن تصمیم نمی گیرند. تصمیم هر کس در هر لحظه، به تصمیم چند نفر دیگر در آن لحظه و لحظات قبل بستگی دارد. این افراد می توانند دوستان او باشند که در کنارش ایستاده اند یا کسانی که در افق دید او در صندلی های جلو قرار دارند.

این همسایه های هر نفر هستند که باعث می شوند تصمیم هر فرد مشخص شود.

در مورد سفره خانه هم، می توانیم نود و نه نفر دیگر را همسایه های هر فرد در نظر بگیریم. واضح است که در اینجا بحث ما

الزاماً همسایگی فیزیکی نیست؛ اگر چه می‌تواند چنین هم باشد. بحث ما افراد یا اجزائی هستند که روی تصمیم فرد تاثیر می‌گذارند.

مثال ماهی‌ها هم که در فصل قبل مطرح کردیم، نمونه‌ای بسیار خوب و شفاف از همسایگی بود.

مجموعه‌های بسیاری در طبیعت وجود دارند که رفتار اجزاء آنها براساس قاعده‌ی همسایگی شکل می‌گیرد. معمولاً هر کس فقط با همسایگان خود تعامل دارد و از سایر بخش‌های سیستم مطلع نیست؛ اما در نهایت همین تصمیم‌های توزیع شده به الگوهای رفتاری در وضعیت کلان سیستم منجر می‌شوند.

بررسی وضعیت خُرد در سوارم‌ها

فرض کنید اندازه و ابعاد فیزیکی ما کمابیش به اندازه‌ی یک ماهی است. بنابراین از کلیات دنیای ماهی‌ها، از بزرگی یا کوچکی آن، از شکل گروه ماهی‌ها و چیزهای دیگری که فراتر از مقیاس درک ماست خبر نداریم. برای یک ماهی، حتی گاهی گروه ماهی معنا ندارد. چون گاه تعداد ماهی‌ها آن قدر زیاد می‌شود که نمی‌توانند مرزهای گروه خود را ببینند و بدانند که این گروه در کجا آغاز می‌شود و در کجا به پایان می‌رسد.^{۳۰۲}

سوالی که می‌توان مطرح کرد این است که چه نکاتی را در رفتار هر عضو (هر ماهی) و اعضای مجاورش مد نظر قرار دهیم تا در نهایت درک بهتری از رفتارهای کل مجموعه‌ی ماهی‌ها داشته باشیم. به عبارت دیگر، چه داده‌ها و دانسته‌هایی در وضعیت خُرد، می‌تواند چشم را بیشتر و بهتر به وضعیت کلان سیستم باز کند.

برای این سوال، پاسخ‌های متنوعی وجود دارد. آنچه من در اینجا مورد استفاده قرار می‌دهم، مدل پیچ و میلر است.^{۳۰۳} پیچ و میلر هشت پرسش مطرح می‌کنند و تک تک آنها را با جزئیات بسیار، مورد بررسی قرار می‌دهند. اما فعلاً برای ما در این مرحله کافی است که آن کلیات آن پرسش‌ها را بدانیم.

من در نقل و تشریح آن پرسش‌ها، وفاداری افراطی به خرج نمی‌دهم؛ اگر چه به معنا و مفهوم آنها وفادار هستم. اما در آینده هر

^{۳۰۲} بعدها خواهیم دید که کره‌ی زمین هم در کنار سایر سیاره‌ی منظومه‌ی شمسی، مثل یک ماهی در اقیانوسی بزرگ است. همچنانکه یک یا چند کشور در میان مجموع کشورهای جهان و یک یا چند ایرانی در میان مردم ایران و یک یا چند مسلمان در جمع مسلمانان و یک یا چند بورس‌باز در میان سرمایه‌گذاران و سهام‌داران و یک یا چند بانک در میان بانک‌ها. در مسیر آینده‌ی کتاب پیچیدگی، سوارم‌ها را هم در طول زمان (تاریخ) و هم در عرض مکان (جغرافیا) مورد بررسی قرار خواهیم داد.

^{۳۰۳} Miller, J. H., & Page, S. E. (2007). Complex adaptive systems: an introduction to computational models of social life. Princeton, NJ: Princeton University Press.

یک از آنها را با دقت و به تفصیل مورد بحث قرار خواهم داد^{۳۰۴}.

سوال اول: روش‌ها و مکانیزم‌های دریافت اطلاعات

هروقت با یک سوآرم طرف هستیم، مهم‌ترین سوال این است که از خود پیرسیم هریک از اجزاء این جامعه، چه اطلاعاتی را از چه روش‌هایی و با چه ابزارهایی دریافت می‌کند؟

در مثال پارتریج، موقعیت ماهی‌های مجاور یکی از اطلاعات دریافتی بود که چشم آن را مشاهده و ثبت می‌کرد. اطلاعات دیگری که دریافت می‌شد، سرعت نسبی ماهی‌های مجاور بود که مسئولیت دریافت آن برعهده‌ی باله‌های جانبی ماهی بود.

حالا می‌توانید به سادگی حدس بزنید که وقتی به هرانسان، یک موبایل داده می‌شود و به کمک آن از طریق شبکه‌های اجتماعی، می‌تواند به صورت لحظه‌ای اطلاعاتی از محیط را دریافت کند، عملاً انسان به موجودی دیگر تبدیل شده است. چون موبایل در دست انسان، بسیار اثرگذارتر به ماهی برپیکراوست. حتی اگر دانشمندان ژنتیک اصرار داشته باشند که هنوز تغییری در گونه‌ی انسان به وجود نیامده، نباید فراموش کنیم که جامعه‌ی انسانی دیگر جامعه‌ی سابق نیست و به گونه‌ای متفاوت تبدیل شده است^{۳۰۵}.

^{۳۰۴} کار میلرو پیچ در تالیف کتابی علمی و دقیق در مورد سیستم‌های پیچیده‌ی خودسازگار قطعاً کاری بسیار ارزشمند است و لاقلاً در لحظه‌ای که در حال نوشتن این کتاب هستم، کمتر کتابی می‌شناسم که سادگی و دقت علمی و گستردگی مباحث در این زمینه را در کنار یکدیگر در یک جلد گردآورده باشد. اما چیزی که نمی‌فهمم این است که چرا این دو بزرگوار اصرار داشته‌اند مدل خود را در قالب هشت توصیه‌ی کلیدی بودا طبقه‌بندی کنند. برای هریک از هشت المان یکی از توصیه‌های بودا انتخاب شده که البته من آنها را نقل نکردم. توصیه‌های بودا هم بد نیست. از کار خوب و فکر خوب و نیت خوب و چیزهای خوب دیگر می‌گوید. اما مشاهده‌ی تلاش این دو نویسنده‌ی دانشمند در ربط دادن این تئورهای بی‌ربط به شرحی که برای هر مولفه‌ی مدل نوشته‌اند دردناک است. راستش را بخواهید اصلاً منطق پشت این تحمیل گذشته به حال یا تلاش برای ریختن حال در ظرف گذشته - آن‌هم بدون اینکه دردی از ما دوا کند - را نمی‌فهمم. در میان ما هم این چسباندن بی‌علت و تحمیلی بحث‌ها به حافظ و سعدی و مولوی و بزرگان دیگر، نمونه‌های بسیاری دارد. چند وقت پیش هم در تهران یک بیلبورد دیدم که نوشته بود دروغ نگویند. زیر آن سه عدد رفرنس داشت. نمی‌فهمم که واقعاً توصیه به دروغ نگفتن این قدر پیچیده است که مثلاً اگر رفرنس نداشت ما آن را نمی‌پذیرفتیم؟ به هر حال اینها را گفتم که بگویم این تلاش پیچ و میلر نهایتاً باعث شده دو مورد رفتار و تبادل اطلاعات (متناظر با رفتار و گفتار در توصیه‌های بودا) به دو عنوان مستقل تبدیل شوند. من هم به خاطر حفظ چارچوب‌شان همان را نقل می‌کنم و سعی می‌کنم به زحمت تفاوت ایجاد کنم. اما به نظرم این تفکیک کمکی به مدل‌سازی بهتر نمی‌کند. البته نظر مرحوم بودا را در زمینه‌ی مدل‌سازی سوآرم به سبک پیچ و میلر را نمی‌دانم.

^{۳۰۵} در آینده، وقتی به بحث شبکه‌ها و پلتفرم‌ها برسیم، می‌بینیم که اثر این تغییرات را به صورت دقیق و با مدل‌سازی ریاضی می‌توان مشاهده و تحلیل کرد. اینکه جامعه‌ی امروز آشوب‌ناک‌تر از گذشته است و پیش‌بینی رفتارهای آن به سادگی گذشته نیست؛ اینکه انسان‌های امروز گاه دشواری‌ها و فشارهای سنگین از سوی دولت‌ها را تحمل می‌کنند و گاه، در برابر اتفاقاتی ساده می‌آشوبند؛ اینکه رای و نظر مردم به سرعت در آستانه‌ی انتخابات تغییر می‌کند؛ اینکه در آمریکا عده‌ی زیادی پای صندوق‌های رای می‌روند و بیش از نیمی از آنها یک نامزد را انتخاب می‌کند و سپس دوباره بیش از نیمی از آنها از نتیجه‌ی انتخاب شگفت‌زده می‌شود، اگر چه احتمالاً رویدادی نامطلوب محسوب می‌شود، اما باید پذیرفت که رویدادی غیرمنتظره نیست. اما ترجیح می‌دهم تا زمانی که به بحث‌های

همچنین در ادامه‌ی بحث پیچیدگی، باید زمانی به این نکته‌ی مهم پردازیم که اگر بتوانیم با آموزش و پرورش و دانشگاه، به کودکان، نوجوانان و بزرگسالان پیام‌آموزیم که از میان انبوه اطلاعاتی که دریافت می‌کنند، کدام را حفظ و کدام را حذف کنند، رفتار جامعه به کلی تغییر خواهد کرد.

سوال دوم: روش‌ها و مکانیزم‌های ارسال اطلاعات

نباید اشتباه کنیم و مکانیزم‌های دریافت و ارسال اطلاعات را مشابه ببینیم.

اینکه هرالمان سیستم از چه کانال‌ها و چه شیوه‌هایی اطلاعات دریافت می‌کند، الزاماً با اینکه از چه کانال‌ها و با چه شیوه‌هایی اطلاعات خود را به سایر اجزای می‌فرستد شباهتی ندارد.

نورون‌های مغز مثال خوبی هستند. آنها از طریق دندریت‌ها اطلاعات را دریافت می‌کنند و از طریق ترمینال‌های آکسون، اطلاعاتی متفاوت - و البته وابسته به ورودی‌ها - را برای نورون‌های دیگر و سایر بخش‌های سیستم ارسال می‌کنند.

ماهی‌های مثال ما، با چشم و باله‌های جانبی، اطلاعات را دریافت می‌کنند و با حرکت کردن خود اطلاعات را به سایر اعضای جامعه ارسال می‌کنند.

باز هم در آینده باید به سراغ ابزارهای ارتباطی نوین در جامعه‌ی انسانی برویم. چون به صورت سنتی، حجم دریافت اطلاعات اکثر ما انسان‌ها، بیشتر از اطلاعات ارسالی ما بوده است. اما در فضای امروز که تولید و مصرف اطلاعات به صورت همزمان با هزینه‌ی مشابه برای اکثر ما امکان‌پذیر است، عملاً مکانیزم‌های ارسال اطلاعات هم تفاوتی ماهوی را تجربه کرده است.^{۳۰۶}

دقیق‌تر مدل‌سازی نرسیده‌ایم، وارد چنین بحث‌هایی نشوم تا ظاهر نوشته و تحلیل‌هایم، به گزارش‌های ژورنالیستی در نشریات عامه‌پسند شبیه نشود.^{۳۰۶} اصطلاح Prosumer که ترکیبی از Producer و Consumer است به همین مسئله اشاره دارد. در اینجا هم، تفاوت عادت‌های اعضای یک جامعه، در انتخاب اطلاعاتی که به دیگران ارسال می‌کنند، می‌تواند جامعه‌ای متفاوت بسازد. هر چند که در ظاهر، همه‌ی جوامع انسانی از المان‌هایی به ظاهر مشابه تشکیل شده‌اند. این بحث را بعداً باید ادامه داد. زمانی بحث خام‌ها و خان‌ها را نوشته بودم که ظاهراً کسی چندان جدی نگرفت. اما بحث خام‌ها (= خودم انجام می‌دهم یا Do it myself یا DIM) به نوعی به همین مکانیزم‌های ارسال اشاره داشت. قبلاً وقتی رویدادی اتفاق می‌افتاد، خبرنگاران حرفه‌ای بودند که آن را منعکس می‌کردند. اکثر مردم دریافت‌کننده بودند و ارسال‌کنندگان، اصول و قواعد ارسال را می‌دانستند و می‌فهمیدند. الان، توییترها و عکس‌ها و فیلم‌هایی که حاضران غیرحرفه‌ای ارسال می‌کنند، عملاً دینامیک متفاوتی را در جامعه شکل می‌دهد. می‌دانیم که DIY یا Do It Yourself یک مدل اقتصادی ارزشمند است. تولیدکنندگان موبایل می‌گویند، چرا به سراغ عکاسان بروید؟ خودتان عکاس زندگی خود باشید. کسانی مثل آمازون می‌گویند چرا برای چاپ کتاب به سراغ ناشران سنتی بروید، خودتان با پلتفرم‌هایی مثل KDP کتاب‌تان را چاپ کنید. سایت‌های آموزشی می‌گویند چرا به سراغ دانشگاه‌ها بروید. خودتان پیام‌آموزید. GPS‌ها می‌گویند چرا مسیر مناسب را از پلیس بپرسید. خودتان بیابید. برای پیشنهاد بهترین مسیر هم از اطلاعات کسان دیگری مثل خودتان استفاده کنید. تلگرام می‌گوید چرا به سراغ رسانه‌های رسمی بزرگ بروید؟ خودتان کانال تأسیس کنید. قاعداً اقتصاد DIY یا اقتصاد خام‌ها، بخش مهمی از گردش مالی امروز و فردای انسان‌ها را تشکیل می‌دهد. نمی‌توان به سادگی از توسعه‌ی آن جلوگیری کرد. حتی نمی‌توان به سادگی برچسب مفید یا مضر بر روی آن زد. اما مهم است بدانیم که جامعه‌ی انسانی که بنای خود را بر DIY می‌گذارد به موجودی متفاوت تبدیل می‌شود که ویژگی‌ها، خواسته‌ها، رفتارها و انتظاراتش به آن جامعه‌ی

اساساً اتفاقی که در دوران جدید با شکل‌گیری اینترنت اشیاء افتاده است و نیز پایین آمدن قیمت تولید سنسورها که باعث شده تعداد زیادی از آنها هر یک از ما را کنترل کرده و اطلاعات مان را به بخش‌های دیگر سیستم ارسال کند، عملاً جامعه‌ی متفاوتی را خلق می‌کند.^{۳۰۷}

سوال سوم: هریک از موجودات چه هدفی را دنبال می‌کند؟

می‌توانیم خوش‌بین باشیم و فکر کنیم که هریک از اعضای سوآرم، به منافع کل سوآرم فکر می‌کند. اما چنین فرضی بر خطاهای متعدد استوار است.

اول اینکه اصلاً یکی از اعضای سوآرم، چرا باید به منافع کل سوآرم فکر کند؟ اگر در سطح مورچه و زنبور و ماهی فکر کنیم، به نظر می‌رسد چنین سطحی از ادراک وجود ندارد. اگر سوآرم انسانی را هم در نظر بگیریم، تجربه نشان داده است که انسان‌ها هم، عموماً منافع خود را بر منافع جمع ترجیح می‌دهند. حتی مروری دقیق و موشکافانه بر کتاب‌هایی که تفکر سیستمی می‌آموزند به ما نشان خواهد داد که محرک اصلی در آموزش تفکر سیستمی هم این است که مراقب منافع سیستم باشید تا منافع خودتان در بلندمدت حفظ شود.

پیچیدگی‌های بیشتر و عمیق‌تری هم وجود دارد. آیا اصلاً منافع سوآرم قابل تعریف است؟ آیا ما می‌توانیم بگوییم به نفع یک منطقه‌ی جغرافیایی است که مردم ساکن در آن، زنده بمانند و رشد کنند؟ آیا در بلندمدت، حذف کامل مردم در یک منطقه یا مردن آنها از قحطی و گرسنگی، نمی‌تواند منافع آن منطقه را تامین کند؟ آیا اصلاً انقراض انسان‌ها به ضرر زمین است؟ آیا به تعبیر حافظ، حالا که این عالم خاکی آدمی درخور ندیده است، حق نداریم به عالمی دیگر و آدمی دیگر فکر کنیم؟^{۳۰۸}

آیا منقرض شدن گونه‌های زیادی از دایناسورها نهایتاً زمین را به وضعیت بهتری نرسانده است؟ اصلاً آیا وضعیت بهتر و بدتری برای زمین قابل تعریف است؟ به قول ویلسون، انسان‌ها به شکلی از حفظ محیط زیست حرف می‌زنند که انگار،

تاریخی که در طول هزاران سال گذشته تجربه و مشاهده کرده‌ایم، شباهت چندانی ندارد.

^{۳۰۷} در ابتدا که تکنولوژی‌های مختلف مثل ساعت هوشمند و موبایل با قابلیت سنجش ضربان قلب و گام‌شمار و اپلیکیشن‌های سنجش میزان غلتیدن در خواب عرضه شد، یک اصطلاح به شدت رایج شد: Quantified Self یا «من عددی شده». این تعبیر، بیشتر به آن معنا به کار می‌رفت که انسان‌ها دیگری می‌توانند عادات و رفتارها و پارامترهای فیزیولوژیک خود را بهتر و دقیق‌تر بررسی کنند. آن زمان، کمتر به این مسئله فکر می‌شد که ارسال انبوه این اطلاعات در بستر اینترنت به سرورهای مختلف و شرکت‌های متفاوت، همزمان با Quantified Self چیزی به نام Quantified Society هم به وجود می‌آورد. اغراق نیست اگر بگوییم «من عددی شده» هنوز به صورت کامل شکل نگرفته بود که «جامعه‌ی عددی شده» متولد شد و رشد کرد. البته این پاورقی‌ها باید هر کدام در آینده به فصلی مستقل تبدیل شوند تا توضیحات‌شان شفاف و ملموس و مفید باشد. آنها را صرفاً اینجا می‌نویسم تا خواننده بداند برای چه چنین بحثی آغاز شده و قرار بوده (یا هست) که سرانجام این صحبت‌ها چه باشد.

^{۳۰۸} آدمی در عالم خاکی نمی‌آید پدید، عالمی دیگر بیايد ساخت و ز نو آدمی

زمین نیازمند آنهاست. در حالی که انسان‌ها حداکثر می‌توانند به محیط زیست خودشان فکر کنند. سیستم ایمنی زمین، ما انسان‌ها را اتفاقی بسیار کوتاه مدت در مقایسه با عمر بلندمدت خویش می‌بیند. زمین حتی خاطره‌ی انقراض ما را هم از یاد خواهد برد؛ چنانکه امروز هم، در یافتن فسیل بسیاری از گونه‌های منقرض شده ناتوانیم.

در چنین وضعیتی، شاید حرف زدن از منافع اعضا و منافع سوآرم صرفاً یک بازی کلامی باشد. بسیار عینی‌تر است که در مورد منافع افراد حرف بزنیم تا منافع جامعه^{۳۰۹}.

پس وقتی از جامعه‌ی زنبورها حرف می‌زنیم، منطقی است پرسیم یک زنبور برای دستیابی به چه هدفی در زندگی خود تلاش می‌کند؟ همین سوال را می‌تواند در مورد ماهی و در مورد انسان هم پرسید.

سال‌هاست معلم‌های فیزیک با همین شیوه به ما درک طبیعت را آموخته‌اند. حتماً به خاطر دارید که می‌گفتند آب می‌کوشد انرژی پتانسیل خود را تخلیه کند یا تلاش می‌کند سطح خود را در دو ظرف مرتبط، برابر کند. حرف زدن از هدف‌های هر المان در یک سیستم، اتفاق تازه‌ای نیست.

سوال چهارم: هر یک از المان‌های سوآرم چه تعاملی با دیگر المان‌ها دارد؟

سوالی که در اینجا پیچ و میلر مطرح می‌کنند از جنس رفتار است و البته رفتار را هم از جنس اثرگذاری تعریف می‌کنند. اگر بخواهم از مثال ماهی‌های خودمان استفاده کنم، اینکه ماهی دیگر حرکت می‌کند و این ماهی با چشم او را می‌بیند و حرکت خود را با او هماهنگ می‌کند از جنس دریافت اطلاعات است.

اما اگر یک ماهی با حرکت خود فضا را برای ماهی دیگر تنگ کند و ماهی دوم مجبور شود مسیر خود را تغییر دهد آن را از جنس رفتار و تعامل طبقه‌بندی می‌کنیم. این نوع رفتارهای متقابل معمولاً در بستر محیط انجام می‌شوند. گاهی هم اعضای سوآرم با یک رفتار یا حرکت، تغییری در محیط ایجاد می‌کنند و این تغییر عملاً سایر اعضا را به تغییر رفتار و تصمیم سوق می‌دهد.

اگر بخواهیم شبکه‌های اجتماعی را به عنوان یک نمونه‌ی خیلی خوب از سوآرم انتخاب کنیم و مدل پیچ و میلر را در مورد آن به کار بگیریم، کاری مثل لایک کردن مطلب فرد دیگر از جنس ارسال اطلاعات است. اما ریپورت کردن یک اکانت از

^{۳۰۹} در واقع، مفهوم دولت که طی چند قرن اخیر شکل گرفته است، دقیقاً نمادی از این نگرش است. دولت، نهادی است که از دل مردم برمی‌آید تا منافع تک تک آن مردم و نه منافع جامعه را تامین کند. اساساً منافع جامعه قابل تعریف نیست و به خوبی دیده‌ایم که هرگاه سیاستمداران از منافع در مقیاس کلان حرف می‌زنند، بیشتر حزب خود را مد نظر دارند و موفقیت یک دولت، در تلاش برای تامین حقوق و منافع تک تک افراد ملت است.

جنس رفتار است. چون فضای فعالیت آن اکانت را تغییر می دهیم^{۳۱۰}.

در اینجا تاکید بر هم زمانی وجود ندارد. به عنوان مثال، ممکن است یکی از اعضای سوآرم در این لحظه رفتاری را انجام دهد که در لحظه‌ی نامشخصی در آینده رفتار و تصمیم‌ها و انتخاب‌های یک عضو یا تعدادی از اعضای دیگر تحت تاثیر قرار بگیرد.

در مثال مورچه‌ها به عنوان یکی از کلاسیک‌ترین مثال‌های سوآرم - که قبلاً به آن اشاره کردم - ترشح فرومون نمونه‌ی بسیار خوبی از رفتار است. در این لحظه یک مورچه این رفتار را انجام می‌دهد تا در لحظه‌ی دیگری مورچه‌ی دیگری هنگام مواجهه با این فرومون در محیط و بستر حرکت خود، مسیرش را انتخاب کند.

سوال پنجم: پاداش و تنبیه‌ها برای هر عضو از سوآرم

کلمه‌ی کلیدی در این بخش از بحث، دستاورد است^{۳۱۱}. به این معنا که رفتارهای هریک از اجزاء مجموعه و اطلاعاتی که دریافت می‌کند و نیز اطلاعاتی که ارسال می‌کند در نهایت برای او چه پاداش و نتیجه‌ای به همراه خواهد داشت.

اگر چه دستاورد معمولاً بار معنایی مثبت دارد، اما قرارداد بین ما این باشد که دستاورد شامل دست‌داده هم بشود^{۳۱۲}. بنابراین، هر اتفاق خوب یا بدی که برای یک عضو از اعضای سوآرم در اثر یک رفتار یا تبادل اطلاعات روی دهد را (چه مطلوب و چه نامطلوب) به عنوان دستاورد آن رفتار یا آن تبادل و تعامل در نظر خواهیم گرفت.

قاعدتاً خواننده در اینجا به این سوال فکر خواهد کرد که مطلوب و نامطلوب بودن را بر اساس چه متری معیاری می‌سنجیم؟ همان‌طور که احتمالاً حدس می‌زنید سوال سوم، یعنی هدفی که هریک از اجزاء سیستم دنبال می‌کند معیار سنجش مطلوب و نامطلوب بودن خواهد بود.

دستاورد می‌تواند مستقیم یا غیرمستقیم، همزمان یا غیرهمزمان باشد. سیر شدن - یا رهایی از گرسنگی - دستاورد مستقیم

^{۳۱۰} اینجا فضای مناسب این بحث نیست. اما وقتی به مدل‌سازی شبکه‌های اجتماعی برسم باید توضیح بدهم و خیلی دقیق صحبت کنیم که رپورت کردن با بلاک کردن یک تفاوت عمیق و ساختاری دارد. وقتی کسی یک اکانت را رپورت می‌کند در اکثر پلتفرم‌های اجتماعی اتفاق مشخصی نمی‌افتد. مگر اینکه تعداد رپورت‌ها از حد مشخصی بیشتر باشد. بنابراین به تدریج محیط یک اکانت تغییر می‌کند و تنگ‌تر می‌شود و به جایی می‌رسد که می‌بیند فضا برای فعالیتش محدود شده یا وجود ندارد. اما اگر یک صاحب یک اکانت، اکانت فرد دیگری را بلاک کند، صرفاً فرایند دریافت اطلاعات را قطع کرده است (سوال اول از سوال‌های مدل پیچ و میلر).

^{۳۱۱} اگرچه واژه‌هایی مانند Outcome و Fitness Change و Result و Payoff و Reward و Punishment و Incentive در ادبیات سوآرم به کار می‌روند و همگی کمابیش برای انتقال یک مفهوم استفاده می‌شوند؛ اما من در انگلیسی Payoff را ترجیح می‌دهم و در فارسی هر جا مفهوم Payoff در ذهنم باشد، واژه‌ی دستاورد را به کار خواهم برد.

^{۳۱۲} اگر مفهوم به دست آوردن را با دستاورد بیان می‌کنیم، به نظرم از دست دادن را هم حق داریم با دست‌داده مورد اشاره قرار دهیم.

غذا خوردن ماست و شغل بهتر، می‌تواند دستاورد غیرمستقیم تحصیلات دانشگاهی باشد.

منظور از دستاورد غیرمستقیم این است که ساختار محیط مشخص می‌کند که دستاورد تصمیم و تعامل رفتار ما چه باشد. بنابراین، ممکن است یک تصمیم یا رفتار یا تعامل مشخص امروز و در این لحظه دستاوردی متفاوت با دستاورد آن در گذشته یا دستاورد آن در نقطه‌ی دیگری از سیستم داشته باشد.

تغییر مکانیزم پاداش و تنبیه در سوآرم می‌تواند ماهیت و دینامیک رفتاری و سرنوشت آن سوآرم را به کلی تغییر دهد. باز هم شاید مثال شبکه‌های اجتماعی در عین پیچیده‌تر بودن، قابل درک‌تر باشد.^{۳۱۳}

در بسیاری از پلتفرم‌های اجتماعی، افزایش تعداد فالوورها یکی از اهداف است. اگر هم هدف اولیه نباشد، کمتر کسی را دیده‌ام که رشد فالوورها را یک شکست برای خود تلقی کند.^{۳۱۴}

اگر افزایش تعداد فالوور را از جنس دستاورد در نظر بگیریم، می‌توانیم در پاسخ به سوال پنجم پیچ و میلر بگوییم که چه رفتارهایی در پلتفرم‌های اجتماعی پاداش می‌گیرند و چه رفتارهایی به تنبیه منتهی خواهند شد.

کسانی که از پلتفرم‌های اجتماعی یا شبکه‌های ارتباطی مدرن برای ایجاد تغییر در محیط خود - جامعه، کشور، جهان - استفاده می‌کنند، دیر یا زود می‌آموزند که دستاورد واقعی از جنس ایجاد درگیری ذهنی^{۳۱۵} برای مخاطبان یا اطرافیان یا فالوورهاست و این هدف، الزاماً با هدف قبلی (افزایش مخاطب) همسو و هم معنا نیست.

همچنین کسانی که از این پلتفرم‌ها برای کسب و کار استفاده می‌کنند احتمالاً بعد از مدتی می‌آموزند که حتی اگر حرف اول در حضور دیجیتال را نرخ تبدیل^{۳۱۶} نزنند، برگ آخر بازی را قطعاً نرخ تبدیل روی میز خواهد گذاشت.

البته هنوز هم کم نیستند کسانی که نرخ تبدیل و نرخ درگیر کردن و تعداد مخاطب را هم معنا یا لااقل مربوط به یکدیگر در نظر می‌گیرند. اما فکر می‌کنم کمی تجربه‌ی زندگی آگاهانه در شبکه‌ها و پلتفرم‌های اجتماعی به هرفرد دقیق‌ی نشان خواهد داد

^{۳۱۳} قبلاً هم بارها گفته‌ام و در همین کتاب هم نوشته‌ام که این بخت خوب ما بوده است که در دوران ظهور و رشد شبکه‌های اجتماعی متولد شده‌ایم. مشاهده‌ی رشد، بلوغ و افول شبکه‌های اجتماعی متعدد از Myspace و Orkut تا Twitter و Instagram و Facebook و Stumbleupon باعث شده که ما برخی از مفاهیم دشوارفهم پیچیدگی را به سادگی ببینیم و تجربه کنیم و در نگاه من، اگر این تنها دستاورد این نوزاد تازه‌ی بشر باشد، اگر دست داده‌ی آن کل زندگی گونه‌ی بشر هم باشد، نمی‌توان آن را به سادگی یک بخت بزرگ برای اکوسیستم زمین دانست.

^{۳۱۴} من جزو همان کمترکسی‌ها هستم. قبلاً هم نوشته‌ام که بعد از مشاهده‌ی رشد فالوورها در اینستاگرام استفاده از اکانت شخصی خودم را متوقف کردم. چون متوجه شدم که زمین اشتباهی را برای زندگی انتخاب کرده‌ام.

^{۳۱۵} Engagement

^{۳۱۶} Conversion Rate

که این سه الزاماً از یک چیز حرف نمی‌زنند.

حالا به عنوان تمرین می‌توانید فرض کنید فهرستی از کل اکانت‌های فیس بوک یا کل کانال‌های تلگرام یا کل اکانت‌های توییتر در ایران یا جهان دارید. قرار است کنار هر کدام فقط یک مورد از سه مورد بالا را بنویسید. یعنی بگویید هدف اول این اکانت، درگیر کردن مخاطب است یا تبدیل کردن مخاطب یا افزایش مخاطب. حتی اگر یک اکانت هر سه هدف را تعقیب کند، می‌شود با کمی دقت قضاوت کرد که اولویت اول آن کدام است. خوشبختانه در اینجا ادعاها و اظهارنظرهای مدیران آن اکانت هیچ اهمیتی ندارد. مهم رفتار اکانت و تعاملی است که با بقیه‌ی اکوسیستم اجتماعی برقرار کرده است.

در پایان این تمرین فرضی - که انجام دادن عملی کامل آن امروز برای خواننده‌ی این نوشته امکان‌پذیر نیست - می‌توانید به سوال مهم‌تری فکر کنید:

الان شما می‌توانید سهم هریک از سه هدف را در این **سوارم دیجیتال اجتماعی** ببینید یا برآورد کنید^{۳۱۷}. حالا فکر کنید با تبلیغ یا اطلاع‌رسانی یا آموزش یا تغییر خط‌مشی یک شبکه، سهم هریک از این سه هدف تغییر کند. به سادگی می‌توانید تصور کنید که موجود **دیجیتال دیگری** شکل خواهد گرفت^{۳۱۸}.

در فصل پایانی این کتاب - که نمی‌دانم چقدر مانده تا به آنجا برسیم - در مورد **تابع دستاورد انسان‌ها** در **سوارم بزرگ انسانی** زمین صحبت خواهیم کرد. به علت تنوع مغزهای ما که خود یکی از بهترین نمونه‌های سیستم‌های پیچیده‌ی خودسازمان‌ده و یک **سوارم** از نوروها هستند، تابع‌های **دستاورد** هم برای همه‌ی ما یکسان نیست و می‌توان به این سوال پرداخت که چه گزینه‌هایی برای تابع **دستاورد** وجود دارد و هریک از ما چه سببی از آنها را انتخاب کرده‌ایم و سرنوشت این **سوارم انسانی** یا به تعبیر دقیق‌تر **سوپراورگانیسم** که بعضی به آن **جامعه‌ی بشری** نیز می‌گویند چگونه براساس این هدف‌ها تعیین خواهد شد.

سوال ششم: پیش‌بینی رفتار اعضای دیگر سوارم

آیا هریک از اعضای این **سوارم**، رفتار آتی سایر اعضا را پیش‌بینی می‌کند؟ در اینجا منظورمان از پیش‌بینی، حدس زدن

^{۳۱۷} برای آینده‌ی کتاب: یک کار زیبا در تحلیل و مقایسه شبکه‌های اجتماعی این است که ببینیم هر کدام از آنها، به صورت ذاتی اعضای خود را بیشتر به سمت کدامیک از هدف‌ها سوق می‌دهند. بزرگان ما به درستی گفته‌اند که تکنولوژی خنثی نیست. این را در مورد شبکه‌های اجتماعی و سایر پلتفرم‌های **سوارم** هم می‌توان گفت و مورد توجه قرار داد.

^{۳۱۸} فکر می‌کنم هنوز هم یک تمرین ارزشمند و عملی وجود داشته باشد. آن هم اینکه اگر در یک فضای مشخص کار می‌کنید، مثلاً وبلاگ می‌نویسید یا تدریس می‌کنید یا کالا و خدمت خاصی را می‌شناسید، به این فکر کنید که در میان مجموعه رقیبان شما، هر کدام تابع **Payoff** و **دستاورد** خود را کدام مورد از موارد بالا تعریف کرده‌اند. سپس فکر کنید که براین اساس می‌توانید چه پیش‌بینی‌هایی در مورد روندهای آینده‌ی بازار خود داشته باشید.

دقیق و درست رفتار نیست. بلکه صرفاً قرار دادن داده‌های مربوط به پیش‌بینی در کنار داده‌های مربوط به وضعیت موجود است.

اگر این نوع پیش‌بینی انجام می‌شود، چگونه بر رفتار و تصمیم‌های هر عضو از سوآرم تأثیر می‌گذارد؟

در اینجا ممکن است کسانی که کمی دقیق‌تر هستند، این سوال را نامناسب قلمداد کنند. آنها ممکن است بگویند: «مگر پیش‌بینی آینده بر اساس چیزی جز گذشته و وضعیت موجود شکل می‌گیرد؟ بنابراین پیش‌بینی کردن، یک فرایند مستقل آینده‌نگر نیست. بلکه صرفاً نوع متفاوتی از تحلیل گذشته است».

بگذارید این دیدگاه را به شکل دیگری توضیح دهم:

فرض کنید شما تا کنون ده مرتبه به من پول قرض داده‌اید.

گاهی اوقات پول را به موقع پس داده‌ام. گاهی دیر پس داده‌ام. یک مرتبه هم بخشی از پول را اساساً پس نداده‌ام و گفته‌ام توانایی بازپرداخت بدهی را ندارم.

اکنون برای یازدهمین بار از شما تقاضا می‌کنم که به من پول قرض بدهید.

شما با خود می‌گویید: «بر اساس آنچه در گذشته انجام داده و بر اساس پیش‌بینی من از نحوه‌ی رفتار در این مورد جدید، ترجیح می‌دهم به او پول قرض ندهم».

آیا در اینجا بر اساس یازده قطعه‌ی اطلاعاتی (ده تجربه و یک پیش‌بینی) تصمیم گرفته‌اید؟ یا تصمیم شما بر اساس ده قطعه‌ی اطلاعاتی (تاریخچه تعامل‌های قبلی به علاوه یک جمع‌بندی از همان‌ها) استوار است؟

پاسخی که می‌توان برای این پرسش مطرح کرد، این است که ما در اینجا از مدل‌سازی سوآرم حرف می‌زنیم. هر نوع تعریفی که مدل‌سازی را ساده‌تر و نتیجه‌ی آن را قابل‌اتکاتر کند ارزشمند است. هدف مدل‌سازی، مدل کردن ساختار یک سیستم نیست. بلکه معمولاً مدل کردن رفتار آن سیستم است^{۳۱۹}.

^{۳۱۹} این حرف من، اما و اگرهایی دارد و بحث‌ها و مثال‌های زیادی می‌توان در موردش مطرح کرد. مثلاً ممکن است کسی بگوید یک برنامه‌ی شطرنج را در نظر بگیرید که دقیقاً مانند انسان یا بهتر از انسان بازی می‌کند. برای بازی کردن هم درختی کامل از حرکت‌ها را استخراج می‌کند و بر اساس آنها تصمیم می‌گیرد. در اینجا رفتار برنامه مشابه رفتار ما انسان‌ها است. اما ساختار آن مشابه ساختار مغز ما نیست. آیا باید این مدل را دوست داشته باشیم و از آن راضی باشیم؟ اگر کسی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، برنامه‌ی شطرنجی بنویسد که ضعیف‌تر از ما بازی کند، اما مکانیزم عملکرد آن شبیه ساختار نورونی مغز ما باشد، آیا حق نداریم این برنامه را مدل‌سازی بهتری بدانیم؟ این بحث حاشیه‌های زیبا و جذاب و آموزنده‌ای دارد که می‌توان یک فصل کامل را به آن اختصاص داد. این

بنابراین، ممکن است ما در مورد پیش‌بینی رفتار سایر اعضا صحبت کنیم و بگوییم که در مورد پرواز جمعی پرندگان این نوع پیش‌بینی وجود ندارد؛ اما انسان‌ها رفتار یکدیگر را پیش‌بینی می‌کنند و پیش‌بینی آنها از رفتار فردای من بر تصمیم و رفتار امروز ایشان نقش دارد.

هر کدام از این دو مدل که تعریف و پیاده‌سازی آنها ساده‌تر باشد و نتیجه‌ی بهتری از رفتارهای کلانِ سوارم به دست دهند، ارزشمندتر هستند. مستقل از اینکه نگاه ما در مورد توانایی پیش‌بینی انسان چیست؛ یا اینکه فکر کنیم شاید کدهای ژنتیکی پرندگان، بخشی از مکانیزم‌های پیش‌بینی را در سخت‌افزار آنها تعبیه کرده است.

سوال هفتم: چه سطحی از پیچیدگی ذهنی را می‌توان برای هر عضو از سوارم در نظر گرفت؟

بعد از توضیحاتی که درباره‌ی سوال ششم مطرح کردم، احتمالاً اینجا مجبور نیستم در مورد ذهن، اشاره‌های مشابهی داشته باشم. ما در اینجا قصد نداریم تعریفی دقیق از ذهن ارائه دهیم.^{۳۲۰} بسیاری از ما فکر می‌کنیم ذهن انسان پیچیده‌تر از ذهن سگ و ذهن سگ پیچیده‌تر از ذهن مورچه است. برای یک باکتری هم که عضوی از کلونی باکتری‌هاست، معمولاً چیزی به نام ذهن در نظر نمی‌گیریم.

براین اساس، به نظر می‌رسد هر چه رفتار یک عضو از سوارم، مکانیکی‌تر و اتوماتیک‌تر و تکرارپذیرتر و پیش‌بینی‌پذیرتر باشد، پیچیدگی ذهنی آن عضو را کمتر فرض می‌کنیم.^{۳۲۱}

سوال هشتم: چه سطحی از ساده‌سازی یا پیچیده‌سازی ضروری است؟

فرض کنید شما قرار است نقش محقق‌ی را که بر روی حرکت گروه ماهی‌ها مطالعه می‌کند بر عهده بگیرید. آیا باید وزن ماهی‌ها را هم ثبت و کنترل کنید؟ آیا مصرف غذای روزانه‌ی ماهی‌ها مهم است؟ آیا عکس‌برداری از بالا کافی است یا باید

پاورقی را صرفاً از آن جهت نوشتم که خواننده بداند چالش‌های این بحث را فراموش نکرده‌ام و صرفاً به بخش‌های آتی این کتاب موکول کرده‌ام.
^{۳۲۰} البته بخش مهمی از ادامه‌ی کتاب به این بحث اختصاص پیدا خواهد کرد.

^{۳۲۱} سوال زیبایی که می‌شود به آن فکر کنیم و در فصل‌های بعد باید به آن برگردیم این است که: فرض کنید در سالن انتظار یک سازمان امنیتی فوق‌مدرن، یک حشره می‌بینید که تا کنون نمونه‌ای از آن ندیده‌اید. این حشره در یک اتاقک شیشه‌ای است و شما از بیرون به آن نگاه می‌کنید و هیچ دسترسی به آن ندارید. به شما گفته‌اند که این حشره، یک روبات بسیار هوشمند در ابعاد بسیار کوچک است که قرار است از آن برای جاسوسی استفاده شود. شما فکر می‌کنید که سازمانی که این ادعا را کرده، بلوف می‌زند و این صرفاً یک حشره‌ی بسیار کمیاب است که در داخل محفظه‌ی شیشه‌ای حبس شده است. به هر علت، یک ساعت شما را در سالن آن سازمان با حشره‌ی درون جعبه‌ی شیشه‌ای تنها گذاشته‌اند. در این مدت، با وجودی که به حشره دسترسی ندارید، رفتارش را به خوبی مشاهده می‌کنید و حتی می‌توانید به شیشه ضربه بزنید. در نهایت چگونه متوجه می‌شوید که با یک حشره مواجه هستید یا روبات؟ این نوع سوال‌ها را در قالب Mindful بودن و Mindless بودن مورد بررسی قرار می‌دهند. واضح است که Mindful و Mindless یک طیف است که در نگاه یک انسان معمولی و متعارف، انسان نماد یک انتهای آن و سنگ نماد انتهای دیگر آن محسوب می‌شود (البته قرار نیست ما تا پایان این کتاب، روی این مدل باقی بمانیم).

حرکت ماهی‌ها در سطح عمودی (به عمق کمتری یا بیشتر) را هم ثبت و اندازه‌گیری کنیم؟

فرض کنید می‌خواهیم رفتار ایرانیان در یکی از شبکه‌های اجتماعی را بررسی کنیم. به عبارتی، به جای سوآرم موریانه‌ها، سوآرم انسان‌ها را مورد مطالعه قرار دهیم. در مورد هرانسان - به عنوان المان سازنده‌ی سوآرم - می‌خواهیم به هفت سوال قبل پاسخ دهیم. آیا مهم است که ابعاد فیزیکی انسان‌ها را هم بدانیم؟ آیا لازم است از تغذیه‌ی آنها خبر داشته باشیم؟ آیا لازم است قیمت موبایلی را که از آن استفاده می‌کنند بدانیم؟ آیا لازم است سیستم عامل مورد استفاده‌شان را در معادلات و محاسبات و پیش‌بینی‌ها و قضاوت‌ها لحاظ کنیم؟ آیا موقعیت جغرافیایی انسان‌ها مهم است؟

فرض کنید تمام اطلاعات مربوط به تمام پیام‌های ارسالی و دریافتی بین تمام کاربران تلگرام یا وایبر یا لاین در سراسر جهان در اختیار شما قرار گرفته است. قصد دارید با استفاده از این اطلاعات، رفتارهای اجتماعی انسان‌ها در پلتفرم مورد مطالعه را تحلیل کنید. آیا لازم دارید که سن فرستنده و گیرنده‌ی هر پیام را هم بدانید؟

احتمالاً خواهید گفت: حالا اطلاعات را به من بدهید، خودم تصمیم می‌گیرم. اما می‌دانیم که در دنیای واقعی، تهیه‌ی هر داده‌ای هزینه دارد.

بنابراین بگذارید سوال را به شکل دیگری مطرح کنم: مجموعه‌ی اطلاعات پیام‌های ارسالی و دریافتی در طول یک سال گذشته را به قیمت ده میلیون دلار در اختیار شما قرار می‌دهند. اما سن‌ها در یک دیتابیس مستقل است که شما باید برای آن قیمت پیشنهاد کنید. چه قیمتی برای آن پیشنهاد می‌دهید؟

واضح است که با توجه به نوع مدل‌سازی شما و هدفی که از مدل‌سازی و تحلیل سوآرم دارید، ارزش اطلاعات برای شما متفاوت خواهد بود. چون من در اینجا هدف مدل‌سازی را نگفته‌ام، شما هم نمی‌توانید ارزش یک بسته‌ی اضافی اطلاعات را برآورد کنید.

اما اصل حرف، چیز دیگری است: وقتی کسب هر نوع اطلاعات و مطالعه‌ی هر نوع جزئیات، هزینه دارد. کسی که به مطالعه‌ی یک سوآرم می‌پردازد باید بتواند به درستی تشخیص دهد که چه سطحی از اطلاعات و جزئیات برای تحلیل او مناسب و مفید است.

هدف اصلی روش علمی این است که مطمئن بشوی طبیعت، تو را به شکلی فریب نداده است که به اشتباه فکر کنی در موردش چیزهایی می دانی که در واقع از آنها آگاهی نداری.

روبرت پیرسیگ

ماشین های کوکی (سیستم های اتوماتیک سلولی)

موضوع این فصل چیزی است که در ادبیات پیچیدگی Cellular Automata نامیده می شود. البته معمولاً برای سادگی تکرار و تلفظ، این تعبیر را به صورت CA خلاصه می کنند^{۳۲۲}. تا جایی که در فارسی دیده ام این عبارت را به ماشین های خودکار سلولی یا ساختارهای اتوماتیک سلولی یا چیزهایی شبیه این ترجمه می کنند.

من هم احتمالاً در بخش هایی از کتاب - که کمی جدی تر است - از تعبیر ماشین خودکار سلولی استفاده می کنم. اما حیفم می آید که گاهی تعبیر ماشین کوکی سلولی را به عنوان معادل Cellular Automata به کار ببرم. کوکی بودن در زبان ما تمام آن مفهومی را که اتوماتون در زبان انگلیسی می رساند در دل خود پنهان کرده است.

در زبان فارسی حتی واژه ای اتوماتیک هم به اندازه ی کوکی بودن نمی تواند مفهوم اتوماتون را منتقل کند^{۳۲۳}. استفاده از ماشین کوکی کمی هم با عنوان پارادایم دنیای کوکی که برای یکی از فصل های قبلی کتاب به کار بردم هم خوانی دارد.

^{۳۲۲} باید مراقب باشیم که CA به عنوان مخفف Cellular Automata را با CAS که مخفف Complex Adaptive System است اشتباه نگیریم. خصوصاً اینکه گاه در بحث پیچیدگی این دو کلمه را در نزدیکی یکدیگر می بینیم.

^{۳۲۳} ما در فارسی اتوماتیک را با بار معنایی مثبت به کار می بریم. انگار که اتوماتیک بودن نوعی هوشمندی است (به ماشین دنده اتوماتیک یا درهای اتوماتیک فکر کنید). اما کوکی بودن به معنای نوعی پاسخ ساده ی مکانیکی و کاملاً از پیش تعیین شده است و برخلاف اتوماتیک، بار معنای منفی دارد. شاید آن شعر زیبای فروغ فرخ زاد را که عروسک کوکی نام دارد خوانده یا شنیده باشید:

می توان همچون عروسک های کوکی بود

با دو چشم شیشه ای دنیای خود را دید

می توان در جعبه ای ماهوت

با تنی انباشته از گاه

سال ها در لایه لای تور و پولک خفت

می توان با هرفشار هرزه ی دستی

بی سبب فریاد کرد و گفت:

آه، من بسیار خوشبختم.

این همان جنس کوکی بودن است که واژه ی اتوماتون یا Automaton در قلب خود پنهان کرده است. پاسخی ساده که مکانیکی بودن آن به سرعت آشکار می شود.

ماشین های کوکی سلولی در علوم مختلف کاربردهای متفاوت دارند

نه تنها در تحلیل سیستم های پیچیده، بلکه در بسیاری از کتابهای علوم دیگر هم، CA یا Cellular Automata فصلی از کتاب را به خود اختصاص می دهند. اینکه عنوان ماشین کوکی سلولی یا ماشین خودکار سلولی یا اتوماتا در کتاب های مختلف وجود دارد ممکن است ما را به این نتیجه برساند که همه ی نویسندگان به یک منظور و با یک پیام یکسان این ابزار را به خدمت گرفته اند.



این در حالی است که ماشین های کوکی سلولی در رشته های مختلف علوم، کاربردهای متفاوتی دارند. فیزیک دان ها و شیمی دان ها از این ابزار برای هدف های مشابه استفاده نمی کنند. کسانی که در حوزه نرم افزار و فناوری اطلاعات به

بحث الگوریتم علاقه مند هستند، ماشین های کوکی سلولی را برای درک بهتر پیچیدگی محاسباتی^{۳۲۴} مسئله ها به کار می برند.

در زیست شناسی از ماشین های کوکی سلولی برای مدل سازی توزیع بیماری های مسری یا توسعه ی سرطان در بدن استفاده می کنند و خلاصه اینکه عنوان Cellular Automata و توضیحات اولیه ی آن که تقریباً در همه ی این علوم مشترک است، ممکن است ما را در این دام گرفتار کند که فکر کنیم با تکرار یک مسئله ی ثابت کلاسیک، صرفاً در لباسی متفاوت، مواجه هستیم.

به عنوان مثال، اگر کتاب پیچیدگی خانم ملانی میچل^{۳۲۵} را خوانده باشید، می دانید که او هم فصلی را به CA اختصاص داده است^{۳۲۶}. ایشان این بحث را در شرح مفهوم محاسبه^{۳۲۷} به کار برده اند. محاسبه، یکی از نخستین حوزه های است که ماشین های کوکی سلولی توانستند در آن جایگاه پیدا کنند.

من در این فصل، با هدف متفاوتی به سراغ ماشین های کوکی سلولی می روم. هدف اصلی من از مطرح کردن این بحث،

³²⁴ Computational complexity

³²⁵ Mitchell, M. (2011). Complexity: a guided tour. New York: Oxford University Press.

³²⁶ من ملانی میچل را صرفاً از این جهت مثال می زنم که در زمان نوشتن این کتاب، ترجمه ی آن به فارسی در بازار موجود است و احتمال بیشتری دارد که خواننده آن را دیده باشد.

³²⁷ Computation

ارائه‌ی یک مثال ساده و جذاب از تعامل ساده‌ی اجزا در یک سیستم و ظهور^{۳۲۸} رفتارهای پیچیده در اثر قواعد ساده‌ی تعامل است.

بسیاری از راه‌ها از جان فون نویمان آغاز می‌شوند

مدام به من می‌گویید که ماشین محاسبه‌گر، یک سری کارها را نمی‌تواند انجام دهد. اگر به جای حرف‌های کلی و مبهم، بتوانید به صورت بسیار دقیق بگویید که چه کاری را نمی‌تواند انجام دهد، مطمئن باشید که من ماشینی می‌سازم که آن کار را انجام دهد.

کسانی که می‌گویند ریاضی سخت است، سختی و پیچیدگی‌های زندگی را متوجه نشده‌اند. وگرنه هرگز چنین حرفی نمی‌زدند.

جان فون نویمان

می‌شود بحث ماشین‌های کوکی را بسیار مستقیم و صرفاً با اشاره‌ای کوتاه به نام نویمان آغاز کرد. اما راستش را بخواهید حیفم می‌آید حالا که به بهانه‌ی CA می‌توانم نامی از جان فون نویمان ببرم، به سادگی این فرصت را از دست بدهم.



نویمان هم زود مُرد. بسیار زود و در سن پنجاه و چهارسالگی. مثل بولتزمن و تورینگ و بسیاری از نابغه‌های عصر جدید.

ظاهراً همه‌ی این بزرگانِ علم «محاسبه» که هر سال از عمرشان ابزارها و اندیشه‌ی

انسان را چند نسل به پیش رانده است، قراری ناگفته و نانوشته دارند تا زودتر از انتظار از میان ما بروند. به این شیوه، ما هم چنان سرگرم «محاسبه» مانده‌ایم که اگر هریک از اینها اندکی بیشتر عمر می‌کردند، علم امروز در چه وضعیتی قرار داشت.

شاید یکی از اتفاق‌های تراژیک تاریخ علم جدید، نخستین گردهمایی هوش مصنوعی جهان^{۳۲۹} باشد که در سال ۱۹۵۶ و با حضور کسانی مانند ماروین مینسکی و سولومونوف و کلاود شنون و هربرت سایمون برگزار شد؛ اما نویمان دیگر چنان بیمار بود که نتوانست در رویدادی که آن را نخستین ابراز وجود رسمی هوش مصنوعی می‌دانند و قطعاً سهم نویمان هم در آن کم نبود، شرکت کند.

بعید است بتوانید در مورد روند توسعه کامپیوتر و صنعت فناوری اطلاعات بنویسید و از نویمان نام نبرید. ری کورزویل برای

³²⁸ Emergence

³²⁹ Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence

کتاب کامپیوتر و مغز^{۳۳۰} که یک سال از پس مرگ نویمان در سال ۱۹۵۸ منتشر شد، در سال ۲۰۱۲ یک مقدمه ی زیبا نوشته است^{۳۳۱}.

او در این مقدمه همه ی دستاوردهای کلیدی حوزه ی تکنولوژی در دوران معاصر را به پنج ایده نسبت می دهد. او یک سهم از این ایده ها را به آلن تورینگ و سهم دیگری را هم به کلاود شنون نسبت می دهد. اما سه سهم اصلی را حق جان فون نویمان می داند. جالب اینجاست که کورزویل که دنیا او را بیش از هر چیز با ایده ی تکینگی^{۳۳۲} می شناسد، صریحاً تأکید می کند که این ایده نیز نخستین بار به صورت جدی توسط نویمان مطرح شده است.

با این مقدمات، باید بگوییم که بحث ماشین های کوکی سلولی یا ماشین های خودکار سلولی هم نخستین بار در دهه ی چهل میلادی توسط نویمان و همکارش^{۳۳۳} مطرح شد.

البته این بحث بیش از بیست سال، در فضایی محدود باقی ماند و چندان فراگیر نشد. بعداً بحث بازی زندگی^{۳۳۴} که توسط جان کانوی^{۳۳۵} مطرح شد، کمک کرد تا بحث CA در فضای عمومی مطرح شود و به تدریج مورد توجه و استقبال قرار بگیرد. بحث کلی CA یا ماشین های خودکار سلولی این است که فرض کنید فضایی دارید که به تعداد زیادی سلول تقسیم شده است. این فضا می تواند یک بعدی، دو بعدی و به طور کلی چند بعدی باشد. به عبارتی، محدودیتی در ابعاد فضا نداریم. تنها نکته ی مهم این است که باید آن را به تعداد زیادی خانه ها یا سلول های کوچک تقسیم کنیم. تصویر زیر نمونه یک شبکه بندی سلولی دو بعدی را نشان می دهد:

³³⁰ Neumann, J. V., & Kurzweil, R. (2012). The computer and the brain. New Haven: Yale University Press.

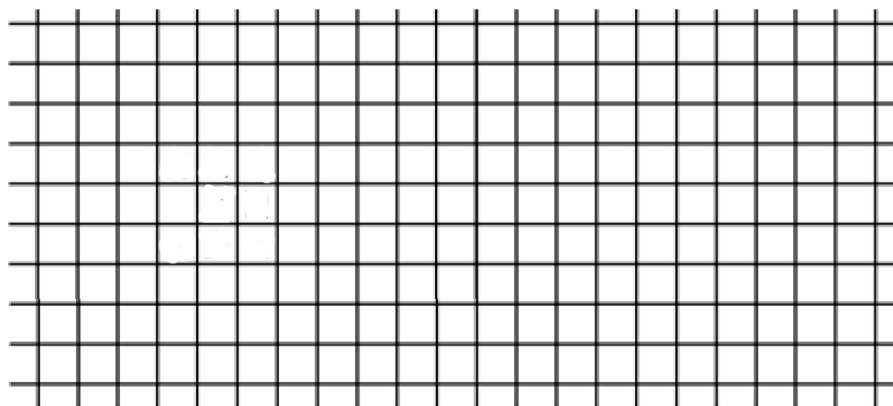
³³¹ حتی اگر حوصله ی خواندن یک کتاب کلاسیک حوزه فناوری اطلاعات را ندارید، همچنان مقدمه ی کورزویل را می توان به صورت یک متن مستقل آموزنده مطالعه کرد.

³³² Singularity

³³³ نام همکار نویمان، استانیسلاو اولام (Stanislaw Ulam) بود. دوستی نزدیک و رابطه ی عاطفی میان آن دو داستان زیبای دیگری است که بیرون از حوزه ی این کتاب است، اما فکر می کنم به خواندن و دانستنش می ارزد.

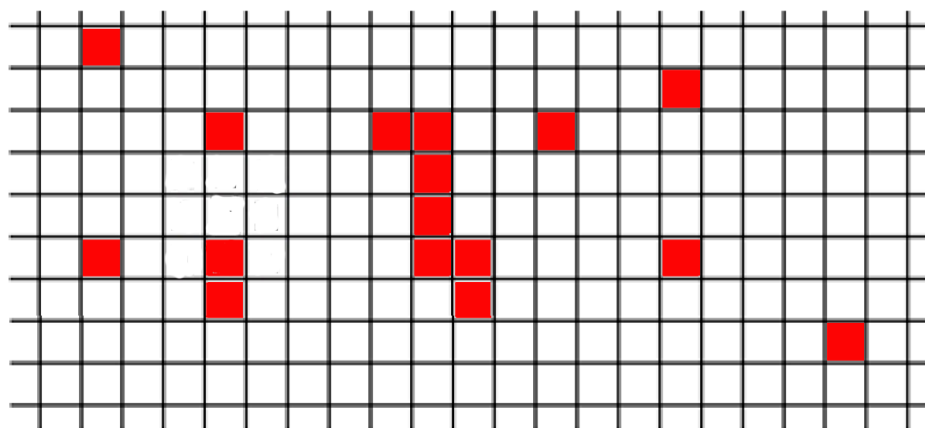
³³⁴ Game of life

³³⁵ John Conway



سپس باید مشخص کنیم که هر سلول می‌تواند چه وضعیت‌هایی داشته باشد. قاعداً ساده‌ترین حالت این است که بگوییم هر سلول تنها دو وضعیتِ فعال و غیرفعال یا صفر و یک دارد. اما می‌توانید هر چند وضعیت که لازم دارید برای سلول‌ها در نظر بگیرید^{۳۳۶}.

اگر برای هر سلول تنها دو وضعیت در نظر بگیریم، در هر لحظه می‌توان کل سیستم را به سادگی به شکل گرافیکی نمایش داد. تصویر زیر نمونه‌ای از وضعیت سیستم را نشان می‌دهد:



خانه‌های رنگی، در وضعیت فعال (یک) قرار دارند و خانه‌های سفید در وضعیت غیرفعال (صفر) هستند. این تصویر احتمالاً باید شما را به یاد بحث سوارم بیندازد. تنها محدودیتی که در اینجا وجود دارد این است که در سوارم ما، هر عضو از نظر

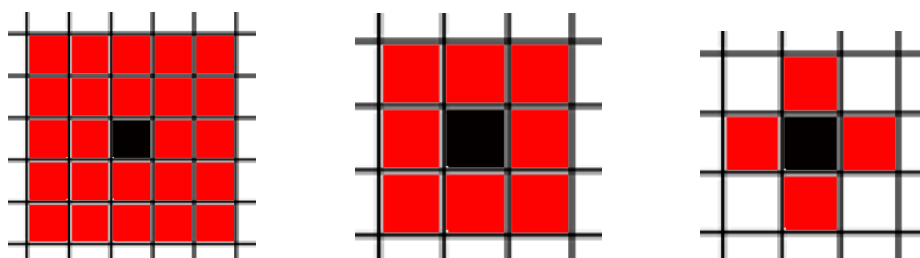
^{۳۳۶} در اینجا به بحث ما مربوط نیست. اما بعداً باید در جایی از کتاب توضیح بدهم که این مدل CA آن قدر ظرفیت و جذابیت دارد که ریچارد فاینمن پیشنهاد کرد همین مدل را با شکل متفاوتی از قواعد و تابع وضعیت، برای مدل‌سازی سیستم‌های کوانتومی به کار بگیرند. بحثی که امروز به نام QCA یا Quantum Cellular Automata مطرح است و شاید خواننده تحت عنوان محاسبه‌گرها یا کامپیوترها یا چیپ‌های کوانتومی در مورد آن شنیده و خوانده باشد.

مکانی ثابت است و تنها یک «ویژگی» آن تغییر می کند.

حتماً به خاطر دارید که عصاره ی بحث سیستم پیچیده این است که هریک از اعضا صرفاً با چند عضو در ارتباط هستند و از حالِ کلِ سیستم خبر ندارند؛ اما در نهایت کلِ سیستم در وضعیت کلان خود رفتارهایی را نشان می دهد که در وضعیت خُرد اعضا ریشه دارد. بنابراین، با توجه به آنچه در فصل های قبل آموخته ایم، حالا لازم است که چیزی به اسم مفهوم همسایگی تعریف کنیم. به این معنی که بگوییم هر سلول یا هر خانه، دقیقاً با چه خانه های دیگری در ارتباط است.

باز هم همه چیز قراردادی است و انتخاب و تصمیم گیری شما بستگی به این مسئله دارد که بخواهید در نهایت چه چیزی را مدل کنید و چه نوع سیستمی را تحلیل کنید.

هریک از مدل های زیر می توانند قراردادی برای تعیین همسایگی باشند:

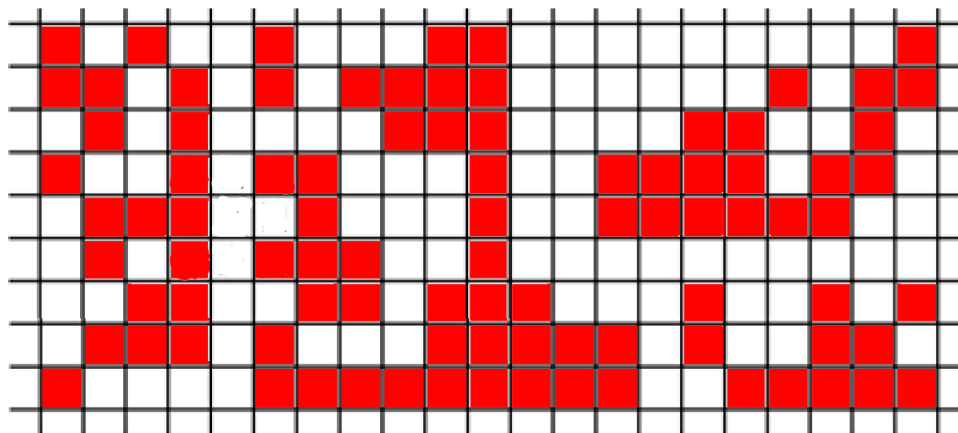


در مدل سمت راست، هر سلول با چهار سلول دیگر همسایه است. در مدل میانی، هر سلول هشت همسایه دارد و در مدل سمت چپ، برای هر سلول بیست و چهار همسایه در نظر گرفته ایم.

تا اینجا یک شبکه سلولی تعریف کرده ایم (که در مثال ما دوبعدی است). همچنین مشخص کرده ایم که هر سلول از این شبکه با چه سلول های دیگری همسایه «فرض» می شود. حالا باید بگوییم که این سلول ها چگونه با هم تبادل اطلاعات انجام می دهند یا به عبارت بهتر: وضعیت هریک از آنها چگونه از وضعیت همسایگان خود تأثیر می پذیرد.

برای اینکه تأثیرپذیری و تبادل اطلاعات را مدل سازی کنیم، اجازه بدهید یک مثال ساده را مطرح کنم:

فرض کنید قرار است در این سرزمین سلولی یک انتخابات برگزار شود و دو کاندیدا وجود دارند. برخی می خواهند به نامزد سفید و برخی به نامزد قرمز رأی بدهند. وضعیت اولیه ی آرا به صورت زیر است:

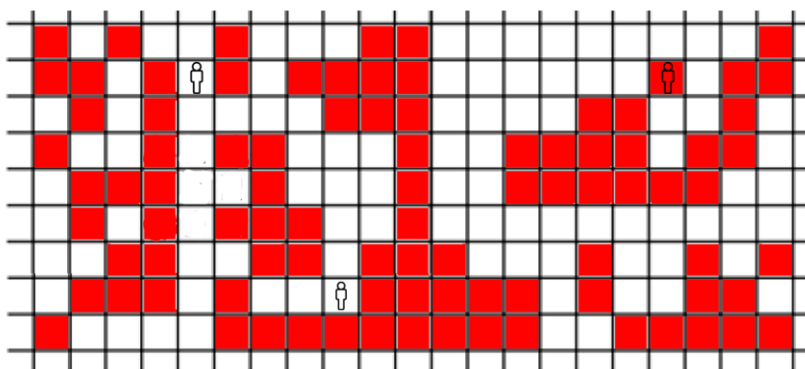


همان طور که می بینید نزدیک به نیمی از ۱۸۹ نفر در این مجموعه می خواهند به نامزد قرمز رأی دهند (دقیقاً ۹۰ نفر). اما ماجرا اینجاست که فعلاً دو ماه تا انتخابات باقی مانده و هر روز هر کس با همسایه های خود در مورد انتخاب گزینه ی اصلح صحبت می کند. فرض کنیم برای هر نفر هشت همسایه در نظر بگیریم. مردم هر روز با همه ی هشت همسایه ی خود صحبت می کنند و شب در خلوت خودشان یک بار دیگر در رأی خود تجدید نظر می کنند. قواعد تأثیرگذاری و تبادل اطلاعات را به صورت زیر تعریف می کنیم:

- اگر دقیقاً چهار نفر بخواهند به نامزد قرمز و چهار نفر به نامزد سفید رأی بدهند، او بر همان رأی روز قبل خود باقی می ماند.

- اگر بیش از چهار نفر (پنج یا شش یا هفت یا هشت) نفر بخواهند به نامزد مشخصی (سفید یا قرمز) رأی بدهند، او هم رأی خود را با آنها تطبیق می دهد.

فردا صبح دوباره همه با تصمیم جدید خود روز را آغاز می کنند و با یکدیگر در مورد انتخابات بحث می کنند. پس هر روز همه ی ۱۸۹ نفر یک بار دیگر تصمیم خود را بررسی می کنند. من به عنوان نمونه دو نفر از آنها را به شما نشان می دهم:



فردی که در سمت راست بالای تصویر نمایش داده شده، شب که با خودش خلوت می کند، می بیند که هفت نفر از همسایگانش می خواهند به نامزد سفید رأی بدهند. پس به نتیجه می رسد که شاید انتخاب خودش نادرست است و او هم فردا به عنوان مدافع نامزد سفید روز را آغاز می کند.

فردی که در قسمت پایین تصویر نمایش داده شده، رأی سفید داشته است. اما در پایان روز وقتی می بیند که شش نفر از همسایگانش به نامزد قرمز رأی می دهند. بنابراین در تصمیم خود تجدید نظر می کند و فردا در دفاع از نامزد قرمز به میدان می رود.

فردی هم در سمت چپ بالای تصویر وجود دارد که رأی فعلی او نامزد سفید است. او در صحبت با همسایگان می بیند که چهار نفر می خواهند به نامزد قرمز و چهار نفر دیگر می خواهند به نامزد سفید رأی بدهند. پس در کل به نتیجه ی خاصی نمی رسد و بر همان رأی دیروز خود - که نامزد سفید بود - باقی می ماند.

من فقط برای شما سه نفر را مثال زدم. اما در واقع هر روز همه ی ۱۸۹ نفر که در دیاگرام می بینید همین برنامه را دارند. همان طور که می بینید ماشینی کوک شده است که هر روز به تدریج وضعیت آن تغییر می کند و البته هر فرد هم فکر می کند در حال تحلیل و تصمیم گیری و تبادل اطلاعات است. اما سهم رأی نامزدهای مختلف هر روز تغییر می کند تا به تدریج به روز انتخابات برسیم و سرنوشت مجموعه مشخص شود.

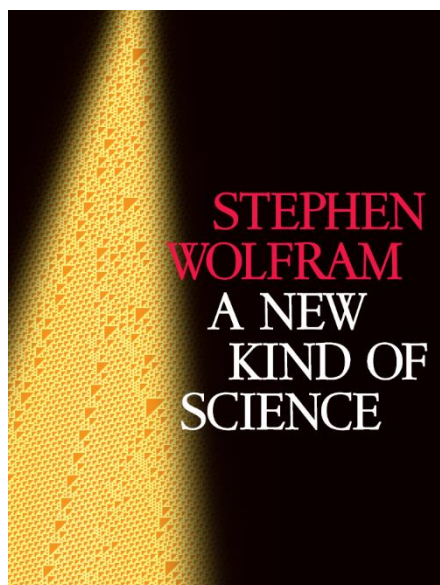
قطعاً مدل تصمیم گیری ما پیچیده تر از این مثال ساده است. اما اصل بحث این است که آنچه فون نویمان مطرح کرد، مدلی قدرتمند و دارای پتانسیل بالا بود که توانست مفید بودن خود را از طراحی ساده ی سیستم های دیجیتال، تا تحلیل تعاملات اجتماعی و حتی طراحی ساختارهای کوانتومی اثبات کند و به یکی از ابزارهای قدرتمند مدل سازی مابعد تبدیل شود.

جان کانوی و بازی زندگی

همان طور که در ابتدای همین فصل اشاره کردم، بحث ماشین های کوکی یا همان CA، توسط نویمان آغاز شد. اما دو نفر دیگر به فراگیر شدن آن کمک کردند^{۳۳۷}: استیون ولفرام^{۳۳۸} و جان کانوی.

اگرچه پایه ی کار هر دو نفر بر مدل نویمان قرار دارد، اما مسیری که این دو طی کردند متفاوت است و دستاوردهای هریک از آنها نیز کاربرد و کاربری متفاوتی دارد.

ولفرام مدل CA را در یک بُعد به کار گرفت و کانوی از همان مدل در دو بُعد استفاده کرد. بنابراین مثالی که در بخش قبل در مورد انتخابات در یک شبکه ی دو بُعدی مطرح کردم، به جنس کار کانوی نزدیک تر است.



من قصد ندارم حداقل در این بخش از نوشته، به مرور جدی و دقیق کار ولفرام بپردازم. اما از آنجا که نمی توان از بحث CA بدون ذکر نام او عبور کرد، توضیحات مختصری را در مورد ولفرام ارائه می کنم.

برای شناخت ولفرام و نگاه او به بحث CA، یک مرجع بسیار ارزشمند وجود دارد که قطعاً بهترین مرجع هم هست. او در سال ۲۰۰۲ کتابی با عنوان یک نوع علم جدید^{۳۳۹} منتشر کرد و سعی کرد در این کتاب، بخش مهمی از ظرفیت های مدل CA را در فضای یک بعدی بررسی کند.

درک مبانی کار ولفرام چندان دشوار نیست.

او به جای همان جدول دوبعدی که ما در مثال انتخابات بررسی کردیم، از یک جدول یک بعدی استفاده می کند.

^{۳۳۷} در مطالعه ی تاریخ علم و مکاتب فکری و حتی در مرور روندهای توسعه تکنولوژی در دوران معاصر، نمونه های بسیاری را می بینیم که مطرح کننده یک ایده و کسی که آن ایده را تبلیغ کرده یا به نوعی فراگیر کرده است، از یکدیگر جدا هستند. این دو نقش در مارکسیسم، تا حدی بین مارکس و انگلس تقسیم شده اند. مشابه همین تقسیم کار در ساختارهای خودکار سلولی، بین نویمان و دو نفر دیگر (ولفرام و کانوی) وجود دارد. در تکامل هم با کمی اغماض همین تقسیم نقش را بین آلفرد والاس و داروین می بینیم (البته در این مورد، هر دو نفر به صورت مستقل نظریه پرداز بوده اند. اما می شود این گونه گفت که والاس ها بدون داروین ها دیده و شنیده نمی شوند). در حوزه ی تکنولوژی هم، امروز مثال های فراوانی وجود دارد که آنها که یک راهکار جدید را خلق یا طراحی کرده اند با آنها که همان راهکار را تجاری کرده و به صورت گسترده عرضه کرده اند، الزاماً یکسان نیستند.

^{۳۳۸} Stephen Wolfram

^{۳۳۹} Wolfram, S. (2002). A new kind of science. Champaign, IL: Wolfram Media.

بنابراین اگر بگوییم جهان نویمان می تواند هر چند بعد دلخواهی را داشته باشد، جهان کانوی صرفاً دو بعد و جهان ولفرام تنها یک بعد دارد.

باز هم بگذارید به همان زبان مدل انتخابات با هم صحبت کنیم: در مدل دوبعدی انتخاباتی ما، وضعیت آینده ی هر سلول، براساس وضعیت خودش و وضعیت هشت همسایه اش مشخص می شود. اما در اینجا فضا محدودتر است و وضعیت فردای هر سلول، براساس وضعیت امروز خودش و دو همسایه اش تعیین می شود^{۳۴}.

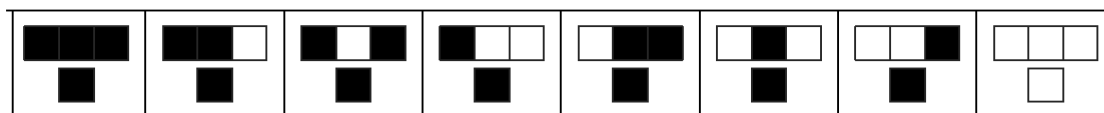


حالا می توانیم برای وضعیت اولیه ی هر خانه به صورت تصادفی، یکی از دو حالت فعال یا غیرفعال را در نظر بگیریم. مثلاً چنین وضعیتی می تواند نقطه ی شروع ماشین کوکی ولفرام باشد:



اگر به خاطر داشته باشید من در مورد مدل شبکه ی دوبعدی انتخابات، دو قانون تعریف کردم. اینجا هم باید قوانینی را تعریف کنیم.

شاید بهترین کار این باشد که دقیقاً یکی از تصاویری که خود ولفرام در کتابش استفاده می کند را نقل کنم:



خواندن این تصویر نباید برای شما دشوار باشد. ولفرام در این دیاگرام، هشت قانون را پیشنهاد کرده است.

مثلاً قانون اول از سمت راست: اگر خانه ای خاموش بود و دو خانه ی همسایه اش هم خاموش بودند، در مرحله ی بعد خاموش می ماند. یا اگر بخواهیم ترجمه انتخاباتی انجام دهیم: اگر کسی می خواست به نامزد سفید رای دهد و امروز فهمید که

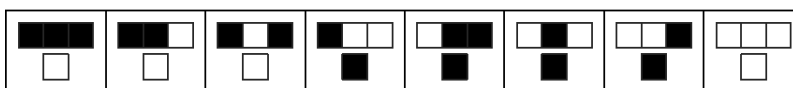
^{۳۴} برای اینکه انتهای این جدول یا شبکه را چگونه در نظر بگیریم، الگوهای متفاوتی وجود دارد. اما یکی از رایج ترین و ساده ترین فرض ها این است که جهان کانوی و ولفرام را بسته در نظر بگیریم. یعنی فرض کنید این جدول ها از چپ و راست یا بالا و پایین به هم می رسند. در واقع اولین خانه ی سمت راست را با اولین خانه ی سمت چپ، همسایه فرض کنید.

همسایه ی چپ و راستش هم به نامزد سفید رای می دهند، فردا بر همان رای خود باقی می ماند.

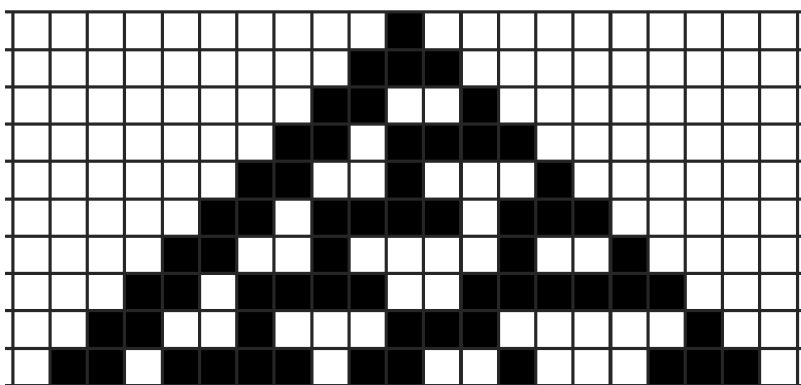
قانون دوم از سمت چپ را هم به عنوان مثال بخوانیم: اگر خانه ای روشن بود و همسایه ی چپ آن خاموش و همسایه ی راستش روشن بود، در مرحله ی بعد روشن می ماند. باز هم با ادبیات انتخاباتی همین را می نویسم: اگر کسی می خواست به نامزد سیاه رای دهد و دید که همسایه ی چپ او به نامزد سیاه و همسایه ی راستش به نامزد سفید رای می دهد، فردای آن روز بر رای خود باقی می ماند.

این مجموعه ی هشت قانون که در اینجا می بینید، کاملاً تصادفی انتخاب شده است. اما در کل، فضای ولفرام محدود است و تعداد کل قوانین همسایگی که می توان تصور کرد، در این مدل تک بعدی چندان زیاد نیست^{۳۴۱}.

ولفرام در کتاب خود، شکل های بسیار متنوعی از قوانین همسایگی را مطرح و بررسی می کند. او مدام، وضعیت های اولیه ی متفاوتی را تعریف می کند و سعی می کند ماشین های کوکی خود را بر اساس قوانین متفاوت و شرایط اولیه ی متفاوت، شبیه سازی کند. فکر می کنم مشاهده ی بخشی از کارهای ولفرام برای شما جالب باشد. او مثلاً چنین قانونی را برای همسایگی آزمایش می کند:



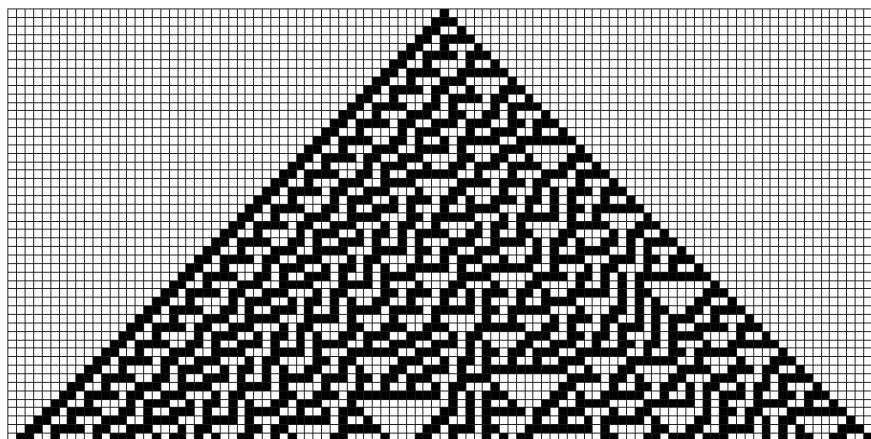
بعد وضعیت اولیه را یک خط کاملاً خالی در نظر می گیرد که فقط یک سلول در آن فعال (سیاه) است. سپس مرحله به مرحله شبیه سازی را انجام می دهد. او برای اینکه پیگیری مدل راحت تر باشد، هر مرحله را زیر مرحله ی قبل ترسیم می کند:



بد نیست به عنوان تمرین، سطر اول را نگاه کنید و با توجه به قوانین همسایگی، خودتان شکل سطر دوم و سوم و را کنترل

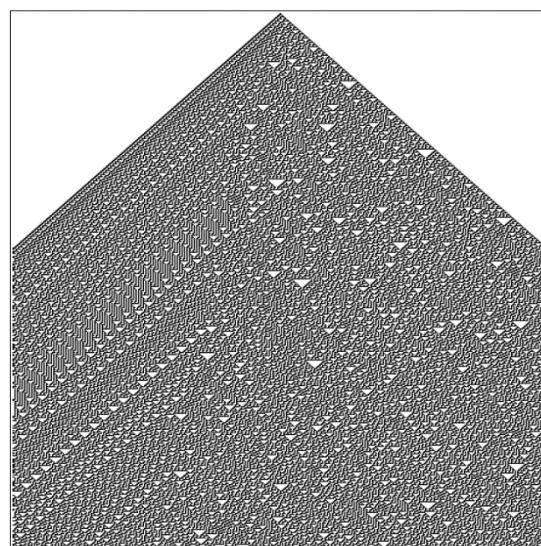
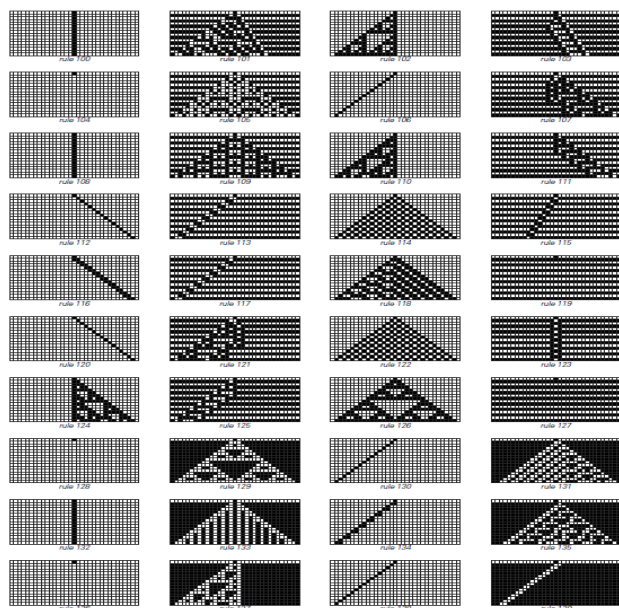
^{۳۴۱} اگر بخواهیم دقیق تر بگوییم، دقیقاً ۲۵۶ (دو به توان هشت) حالت وجود دارد.

کنید. البته ولفرام این کار را بسیار بیشتر و دقیق تر انجام می دهد:



کار ولفرام به همین جا تمام نمی شود. او شکل های بسیاری از این جهان تک بعدی را می آزماید. آنچه در اینجا می بینید

تصویر دو صفحه از کتاب اوست^{۳۴۲}:



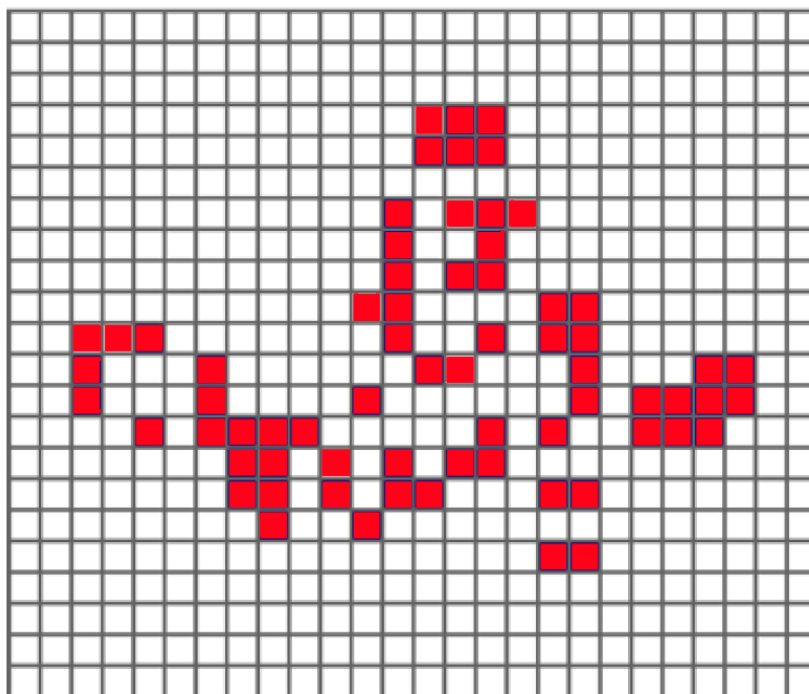
^{۳۴۲} من به عمد، از بخش های مختلف کتاب ولفرام این تصاویر را انتخاب کرده ام و نشان می دهم. کار او، نمونه ای ارزشمندی از صبر و حوصله و دقت است. چیزی که امروز کمتر جدی گرفته می شود. مطمئنم که بسیاری از ما، وقتی قاعده ای ساده ی نویمان را می بینیم، با خود می گوئیم که: «خوب. این بحث که ساده و بدیهی است؛ به سراغ بقیه ی مطالب برویم». دقت کنیم که ولفرام، دانشمند کلاسیک چند قرن پیش نیست و هنوز هم -در لحظه ی نوشتن این مطلب- زنده است. این سبک از دقت، بررسی، مطالعه و کوشش، در میان ما بسیار کم و نایاب است. چند نفر از ما حاضریم بخش مهمی از عمر خود را (مثلاً بیست سال) برای چک کردن حالت های مختلف قابل تصور از یک قانون ساده ی همسایگی در یک شبکه ی یک خطی صرف کنیم؟ فکر می کنم بسیاری از دانشجویان امروز، اگر بخواهند در دو جلسه ی درسی دانشگاهی به بررسی «یک» موضوع (مثلاً مدل های رشد و موفقیت یک کسب و کار امروزی) بپردازند، احساس می کنند بحث بیش از حد طولانی شده و باید از آن عبور کرد.

کار و لفرام بیشتر برای کسانی که می خواهند در مورد اعداد تصادفی، آشوب و نظریه اطلاعات کار کنند جذاب و مفید خواهد بود. من هم این اشاره ی کوچک و کوتاه را صرفاً به عنوان ادای احترامی به این دانشمند ارزشمند در اینجا مطرح کردم.

برای کسانی که به بحث ظهور و پدیدار شدن ویژگی ها و رفتارهای جدید در سیستم های پیچیده علاقه مند هستند، احتمالاً کار کانوی قابل درک تر است. خصوصاً اینکه نمایش بصری و شکل ظاهری آن هم برای بسیاری از ما جذاب تر است.

کانوی به جای اینکه مانند و لفرام، یک فضای یک بعدی در نظر بگیرد و ۲۵۶ مجموعه ی قانون همسایگی قابل تصور را روی آن آزمایش کند، یک فضای دو بعدی و صرفاً یک مجموعه ی قانون را در نظر گرفت. در عوض، وقتش را صرف آزمایش شرایط اولیه ی متفاوت کرد.

کانوی از صفحه ی دوبعدی شروع می کند. مثلاً می توانید شبکه ی زیر (یا همان شبکه ی مثال انتخابات) را در نظر بگیرید:



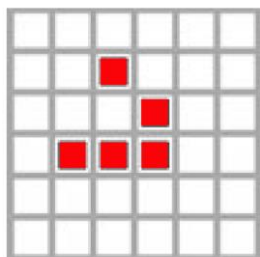
او یک وضعیت تصادفی اولیه تعریف می کند. سپس دو قانون همسایگی را روی آنها اعمال می کند^{۳۴۳}:

- اگر یک سلول، زنده باشد و در همسایگی آن دقیقاً دو یا سه سلول زنده وجود داشته باشند، آن سلول زنده می ماند. در غیر این صورت (یعنی صفر یا یک یا چهار یا پنج یا شش یا هفت یا هشت همسایه ی زنده) آن سلول می میرد.

^{۳۴۳} کانوی همه جا به جای روشن و خاموش، یا فعال و غیرفعال یا سیاه و سفید، از تعبیر زنده و مرده استفاده می کند.

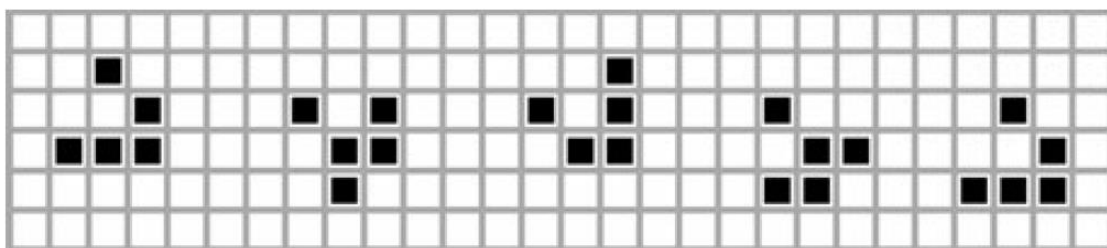
- اگر یک سلول، مرده باشد و در همسایگی آن دقیقاً سه سلول زنده وجود داشته باشد، زنده می‌شود.

همین قوانین ساده باعث می‌شوند که دینامیک بسیار پیچیده‌ای در این جهان دوبعدیِ کانوی شکل بگیرد. پیشنهاد جدی من این است که روی کاغذ، این مدل ساده را به صورت دستی بررسی کنید:



اگر فرض کنیم این وضعیت امروز ماشین کوکی ماست، وضعیت فردای سلول زنده‌ی بالا را به سادگی می‌توان حساب کرد: این سلول در اطرافش تنها یک سلول زنده دارد و قرار شد سلول زنده‌ای که دو یا سه همسایه‌ی زنده ندارد، فردا بمیرد (محاسبه‌ی وضعیت سایر سلول‌ها با شما).

اگر این کار را در چند مرحله انجام دهید، می‌بینید که با یک الگوی متحرک تکرار شونده روبرو هستیم. یعنی بعد از چهار روز، دوباره همین شکل کمی آن‌طرف‌تر ساخته می‌شود:



جان کانوی، این مدل را گلایدر^{۳۴۴} نامید.



چون در دنیای ساده‌ی دو بعدی او، مانند هواپیمای کوچک بدون موتوری است که پرواز می‌کند و متوقف نمی‌شود. طی سال‌های اخیر، انبوهی از الگوها یافته شده‌اند که در دنیای ساده‌ی جان کانوی می‌توانند رشد و زندگی کنند^{۳۴۵}.

چرا مدل جان کانوی برای ما جالب است؟

در مورد بازی زندگی بسیار گفته و نوشته‌اند. جالب اینجاست که این بازی صرفاً به قواعد جان کانوی هم محدود نمانده و

³⁴⁴ Glider

³⁴⁵ نمونه فیلم‌های مربوط به این مدل‌سازی را روی روزنوشته به عنوان فایل‌های مکمل گذاشته‌ام.

بسیاری از دانشمندان و محققان دیگر، الگوهای متنوع و قوانین متفاوتی را در مورد آن آزموده اند.

در میان علاقه مندان به بازی زندگی، یک زبان قراردادی برای نمایش قواعد بازی زندگی وجود دارد. براساس این زبان، قوانین کانوی را به صورت B3/S23 نمایش می دهند. B نشان دهنده ی تولد^{۳۴۶} (تبدیل یک سلول مرده به زنده) است و S به عنوان بقا^{۳۴۷} (زنده ماندن یک سلول زنده) در نظر گرفته می شود.

B3 نشان می دهد که یک سلول مرده برای تبدیل به سلول زنده، باید دقیقاً سه همسایه ی زنده داشته باشد. S23 هم می گوید که یک سلول زنده برای زنده ماندن باید دقیقاً دو یا سه همسایه ی زنده داشته باشد. در غیر این صورت، سلول (مستقل از وضعیت فعلی اش) در گام بعدی خواهد مرد.

شاید برایتان جالب باشد که مثلاً یک نفر^{۳۴۸} به جای قاعده ی پیشنهادی کانوی، مدل B36/S23 را مطالعه کرده است. یا اینکه فرد دیگری^{۳۴۹} الگوی B368/S245 را بررسی کرده است.

بازی زندگی با قواعد متنوع دیگری هم مورد بررسی قرار گرفته که برخی از مهم ترین آنها را در این جدول می آورم:

B368/S12578	B37/S23	B3678/S34678	B4678/S35678	B25/S4	B1357/S1357
B36/S245	B35678/S5678	B35/S236	B27/S0	B2/S7	B4/S01234

البته بررسی هریک از این قوانین و ویژگی ها و کاربردها و جذابیت های آنها، خارج از بحث ماست و اگر کسی علاقه مند باشد می تواند جزئیات بسیار دقیق و عالی در زمینه بازی زندگی را در مجموعه ای که به همت آداماتزکی^{۳۵۰} گردآوری شده بخواند.

فراموش نکنیم که ما قرار گذاشته ایم از کنار کارِ فون نویمان و کانوی در این زمینه به سرعت و در حد یک مثال بگذریم. آنچه می تواند برای ما جذاب و آموزنده باشد، رفتار برخی از موجودات در بازی کانوی است. این رفتار صرفاً به مدل های

³⁴⁶ Birth

³⁴⁷ Survival

³⁴⁸ Nathan Thompson

³⁴⁹ Stephen Morley

³⁵⁰ Adamatzky, A. (2010). Game of life cellular automata. London: Springer.

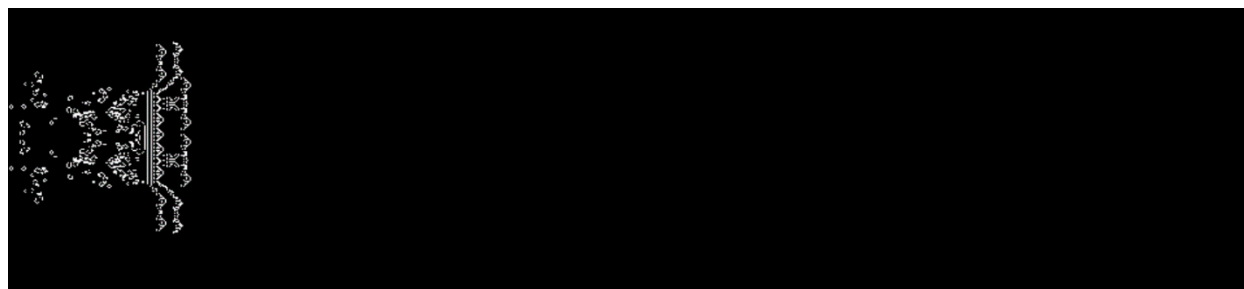
ساده‌ای مانند گلایدرها محدود نیست.



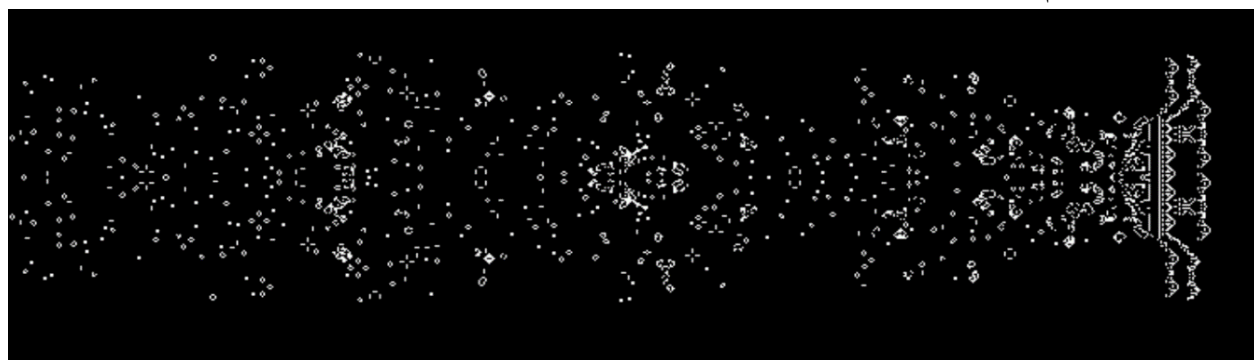
ما گاهی ترکیب‌های بسیار پیچیده‌تری را در مدل کانوی (و بسیاری مدل‌های مشابه) می‌بینیم که رفتار آنها از لحاظ سطح پیچیدگی و نظمی که - در نگاه ما - دارند، شگفت‌انگیز است. به عنوان یک مثال خوب، می‌توانید نمونه‌های Puffer Train را ببینید. این نوع الگو، در فضای دوبعدی کانوی حرکت می‌کند و پشت خود ردپایی هم باقی می‌گذارد.

فراموش نکنید که ما چون خودمان این بازی را طراحی کرده‌ایم، می‌دانیم که پشت این حرکت زیبا و پیچیده، چند قاعده‌ی ساده وجود دارد. اگردها قانون بزرگ و کوچک بر جهان بزرگ و پیچیده‌ی ما حاکم هستند، بر جهان کانوی تنها یک قانون B3/S23 حکومت می‌کند.

اما حرف اصلی این است که فرض کنید قوانین بسیار ساده و مکانیکی جهان کانوی را نمی‌دانید. مثلاً میکروسکوپی در اختیار دارید و چنین موجودی را می‌بینید:



این موجود حرکت می‌کند و پشت خود هم ردی باقی می‌گذارد و به پیش می‌رود. آیا ما احساس نمی‌کنیم که با موجودی یکپارچه روبرو هستیم؟



ما در دنیای کانوی میلیون‌ها سلول مستقل داریم که هر کدام براساس یک قاعده‌ی ساده، کوک شده‌اند و رفتار می‌کنند. اما در نگاه ناظر بیرونی، موجود یک پارچه‌ی بزرگ‌تری مشاهده می‌شود که می‌توان رفتارهایی را هم به آن نسبت داد (همین تعبیر

رد پایک نمونه‌ی خوب است).

بازی زندگی کانوی، برای ما - که کارمان ریاضی و الگوریتم‌های محاسباتی نیست - از این جهت جذاب است که یک نمونه‌ی خوب از نظم خودجوش یا نظم از پایین به بالا را پیش چشمان مان قرار می‌دهد.

اگر به دیدن این نوع الگوهای خودجوش عادت کنیم، در آینده می‌توانیم بسیاری از رفتارها و نظم‌ها و کمپین‌ها و سایر جریان‌های شبکه‌های اجتماعی را هم درک کنیم. چرا که آنها هم، حاصل تعامل تعداد زیادی انسان هستند که هریک از انسان‌ها به صورت فردی در مورد رفتارها و پاسخ‌ها و تعامل خود با محیط، تصمیم می‌گیرد و اقدام می‌کند.

کپکی که اینجا بود کجا رفت؟

نمی دانم کدامیک از جلوه های طبیعت، شما را بیشتر به هیجان می آورد و شگفتی را در وجودتان برمی انگیزد. اما برای من یکی از جذاب ترین جنبه های طبیعت، لوکوموشن^{۳۵۱} یا جابجایی مکانی^{۳۵۲} است.

مکانیزم های بسیار متنوعی برای لوکوموشن در میان موجودات وجود دارد. برخی از آنها مثل ما انسان ها روی دو پای خود حرکت می کنیم. برخی دیگر روی چهارپا حرکت می کنند.



جالب اینجاست که بسیاری از حیوانات از جمله سگ ها و گربه ها، هنگامی که سرعت حرکت خود را تغییر می دهند، الگوی استفاده از دست و پای خود را هم عوض می کنند.

مکانیزم لوکوموشن آمیب ها هم بسیار زیبا و خلاقانه است. آنها دست و پا ندارند. بنابراین، سیتوپلاسم خود را جابجا می کنند و غشاء سلولی خود را تغییر می دهند و پاها را موقت می سازند و بعد از حرکت کوچکی دوباره آن پا ناپدید می شود و در نقطه ی دیگری از بدن خود پا می سازند. به این پاها، پای کاذب^{۳۵۳} گفته می شود.

حرکت آمیبی، مختص آمیب ها نیست و به هر نوع مکانیزم حرکتی مشابه آمیب ها، لوکوموشن آمیبی گفته می شود. دانشگاه های متعددی در دنیا و نیز برخی مراکز تحقیقات فضایی، در زمینه ساخت روبات هایی که لوکوموشن آمیبی دارند، دستاوردهای ارزشمندی داشته اند.

البته همه ی مکانیزم های لوکوموشن از جنس فعال نیستند و گونه های بسیاری، از سیستم منفعل^{۳۵۴} استفاده می کنند. مثلاً برخی گونه های عروس دریایی، فقط شکل خود را تنظیم می کنند و منتظر می مانند تا موجی بیاید و آنها را جابجا کند. البته

³⁵¹ Locomotion

^{۳۵۲} اصطلاح Locomotion اصطلاح زیبایی است که از ترکیب دو مفهوم مکان (Location) و حرکت (Motion) ایجاد شده است. بسیاری از حرکت های ما از جنس جابجایی در مکان فعلی است. مثلاً وقتی می نشینیم و کف می زنیم یا وقتی یک گیاه رشد می کند یا شاخه ها و برگ های خود را به سمت نور حرکت می دهد. اما بخشی از حرکت ها با هدف جابجایی کامل موقعیت فیزیکی انجام می شوند. به این نوع حرکت ها لوکوموشن گفته می شود.

³⁵³ Pseudopodium

³⁵⁴ Passive Locomotion

اگر بخواهید هیجان لوکوموشن منفعل را تجربه کنید، بهتر است به سراغ گونه های عنکبوت بروید.

می توان گفت عنکبوت ها سیستم هیبرید دارند. در حال عادی راه می روند و لوکوموشن کاملاً فعال دارند. اما در شرایط دیگر، ترجیح می دهند از لوکوموشن منفعل استفاده کنند.



تعدادی از عنکبوت ها برای طی کردن مسیرهای طولانی، تار می بافند و آن را در هوا رها می کنند تا باد، تار را بلند کند و خودشان آویزان به تار، هر جا که باد آنها را برد می روند و سرزمین تازه ای را کشف می کنند^{۳۵۵}. این نوع سفرها می توانند از چند متر یا چند صد کیلومتر و از چند ثانیه تا چند روز به طول بیانجامند.

این مقدمه را در مورد لوکوموشن گفتم تا به ظهور لوکوموشن^{۳۵۶} اشاره کنم. اگر به شما بگویند آیا سلول بدن انسان، لوکوموشن دارد یا نه؛ احتمالاً خواهید گفت که این سلول ها در موقعیت خود ثابت هستند و جابجا نمی شوند.

اما آیا نمی توانیم از منظر دیگری به آنها نگاه کنیم؟ اینکه این سلول ها به یکدیگر چسبیده اند و وقتی می خواهند جابجا شوند، ما انسان ها حرکت می کنیم؟

آیا لوکوموشن را می توان از جنس رفتارهای پدیدار شده یا Emerged در نظر گرفت؟ به عبارت دیگر آیا باید حرکت را در همه ی موجودات چیزی از جنس جرم بدانیم؟ یا می توان آن را در کنار پدیده هایی مثل دما و فشار قرار داد؟

برای اینکه کمی به این فضا نزدیک تر شویم، باید به سراغ نوعی کپک برویم که به کپک مخاطی^{۳۵۷} مشهور است. اگر یک بار سرما خورده باشید و گرفتار آبریزش بینی شده باشید، احتمالاً اصطلاح ترشحات مخاطی را شنیده اید و می دانید. کپک مخاطی به خاطر شکل لزج و نرم و ویسکوز بودن با این صفت نامیده می شود.

چند نمونه از عکس های کپک مخاطی را در صفحه ی بعد می توانید مشاهده کنید و در ادامه به بررسی آنها می پردازیم.

^{۳۵۵} اگر علاقه مند هستید در این زمینه بیشتر ببینید و بدانید کافی است در فضای وب، کلمه های Ballooning یا Kiting را جستجو کنید. واژه ی اول از همان اصطلاح بالون خودمان گرفته شده و واژه ی دوم نیز از خانواده ی کایت است که ما در فارسی هم آن را به کار می بریم.

^{۳۵۶} Emerged Locomotion

^{۳۵۷} در متن های عمومی و غیر تخصصی، اصطلاح Slime mold را می بینید. اما اگر بخواهید مقالات رسمی و علمی دقیق تر و معتبر تر را بخوانید، پیشنهاد می کنم نام علمی این گونه ها یعنی دیکتیوس تلید (Dictyostelid) را بررسی کنید.

تصاویری از کپک مخاطی (در حالت تک سلولی و زندگی جمعی)



کپک های مخاطی در رنگ ها و شکل های مختلف در همه جا یافت می شوند. البته قاعدتاً اگر در جنگل یا مزرعه ای با فضای مرطوب باشید، احتمال دیدن آنها بسیار بیشتر است.

احتمالاً تا این لحظه هم نمونه های بسیاری از آنها را دیده اید. اما چون چشم تان به دنبال چنین موجوداتی نبوده است، از کنارشان عبور کرده اید^{۳۵۸}. اگر روزهای متوالی به یک جنگل سر بزید و محل چند کپک مخاطی را به خاطر بسپارید، متوجه خواهید شد که آنها حرکت می کنند و حتی ممکن است کاملاً ناپدید شوند و به محل دیگری بروند.

کپک های مخاطی چیزی در حدود پانصد تا ششصد میلیون سال بر روی زمین قدمت دارند و به وجود آمدن و انقراض گونه های بسیاری از گیاهان و جانوران را شاهد بوده اند^{۳۵۹}.

چرا کپک های مخاطی برای ما - که پیچیدگی را می آموزیم - جذاب هستند؟

من با دو انگیزه بحث کپک های مخاطی را در این کتاب مطرح می کنم. نخستین انگیزه این است که مکانیزم لوکوموشن در این کپک ها کاملاً از جنس پدیدار شونده یا Emerged است. دوم اینکه آنها را می توان یک سوارم با قواعدی مشابه بازی زندگی (البته قطعاً پیچیده تر از آن) دانست.

گونه های بسیاری از کپک های مخاطی، زندگی تک سلولی دارند^{۳۶۰}. اما زندگی تک سلولی و انفرادی به این معنا نیست که زندگی اجتماعی را نمی فهمند و ابزارهای تعامل اجتماعی را به کار نمی گیرند^{۳۶۱}.

کپک های مخاطی، تا زمانی که غذای کافی در اطراف خود دارند زندگی را به تنهایی ادامه می دهند. اما به محض اینکه

^{۳۵۸} کپک مخاطی، اگر چه کپک (Mold) نامیده می شود اما به کپک هایی که ما معمولاً می بینیم و می شناسیم (مثلاً کپک نان) ربطی ندارد. بسیاری از کپک ها که می شناسیم در شاخه ی قارچ ها (اگر دقیق تر بگوییم: قلمرو Fungi ها) قرار می گیرند. اما کپک مخاطی در این دسته قرار ندارد. البته به خاطر شباهت ظاهری و امکان تولید هاگ تا مدت ها در قلمرو قارچ ها طبقه بندی می شد. اکنون می دانیم که آنها نه در گروه جانوران قرار می گیرند و نه گیاهان و نه قارچ ها. عملاً قلمرویی که برای این ها باقی می ماند، آغازیان است. نخستین موجوداتی که بر روی کره زمین به وجود آمدند و از آغاز شکل گیری حیات در کره ی زمین حضور داشتند. در کل اختلاف نظر در طبقه بندی کپک مخاطی یا Slime Mold (که خود شامل چند صد گونه ی مختلف است) زیاد است و برای ما که تخصص گونه شناسی نداریم و در اینجا هم دغدغه ی دیگری داریم، شاید صرفاً به خاطر داشتن اینکه کپک مخاطی موجودی تک سلولی شبیه آمیب هاست کافی باشد (اگر خیلی حساس بودید و خواستید دقت علمی را رعایت کنید، می توانید بگویید همه ی کپک های مخاطی، در قلمرو یوکاریوت ها قرار می گیرند. چون هسته کامل در آنها شکل گرفته و ماده ی ژنتیکی آنها با غشا از سیتوپلاسم جدا شده و ساختار کامل سلولی با تعادل فیزیولوژیک دارند و عملاً یک ارگانیسم کامل محسوب می شوند).

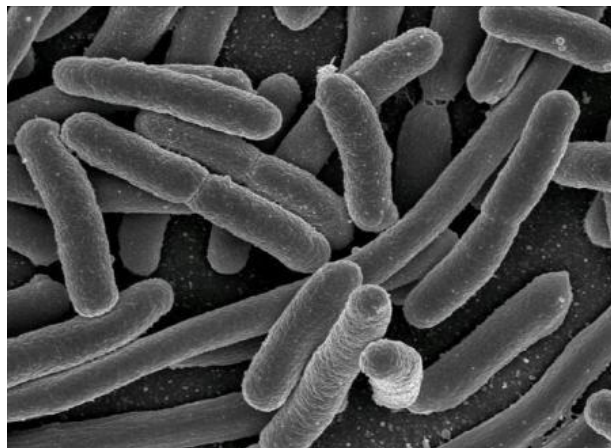
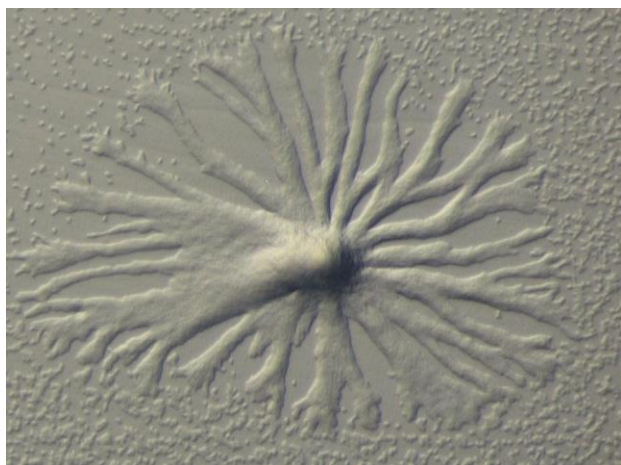
^{۳۵۹} البته شاید تعبیر «شاهد بودن» برای موجودی تک سلولی که چشم و گوش و مغز ندارد، چندان درست و دقیق به نظر نرسد. اما در ادامه که بیشتر آنها را بشناسیم، احتمالاً راحت تر چنین توصیفی را در موردشان می پذیریم.

^{۳۶۰} گونه های دیگری هم در قالب پلاسمودیوم زندگی می کنند: یک بستر سیتوپلاسمی مشترک که تعداد زیادی هسته ی سلولی در آن شناور است.

^{۳۶۱} اگر قصد داشتید جستجوی اینترنتی انجام دهید، بد نیست بدانید که بسیاری از آزمایش های انجام شده و مقالات منتشر شده روی گونه ی Dictyostelium discoideum انجام شده اند. اگر چه Slime Mold به تنهایی هم می تواند شما را به سمت برخی مقاله ها و تحقیقات جذاب در این زمینه هدایت کند.

احساس کنند تهدید محیطی وجود دارد به یکدیگر می‌چسبند و یک توده‌ی بزرگتر درست می‌کنند. تهدید محیطی برای کپک مخاطی، می‌تواند کمبود غذا یا افزایش نور باشد؛ چون کپک‌های مخاطی نور را دوست ندارند و تاریکی را ترجیح می‌دهند.

تصویر پایین سمت راست وضعیتی را نشان می‌دهد که کپک‌های مخاطی در حال نزدیک شدن و چسبیدن به یکدیگر هستند تا یک توده‌ی مخاطی را ایجاد کنند.^{۳۶۲}



حالا کپک مخاطی که از چندین هزار (و گاه چندین میلیون سلول تشکیل شده) راه می‌افتد و حرکت می‌کند و اطراف را



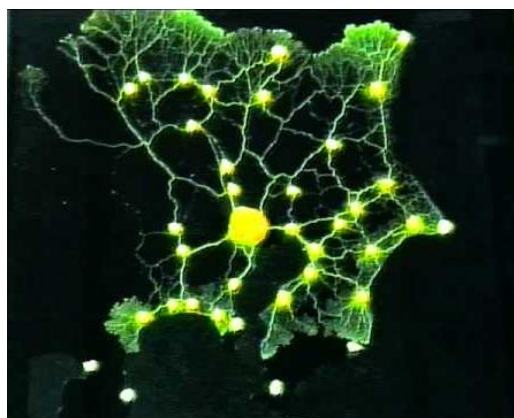
جستجو می‌کند تا نقطه‌ی مناسب‌تری را برای زندگی بیابد. احتمالاً تا اینجای بحث خسته شده‌اید و فکر می‌کنید که چرا باید این همه در مورد کپک بخوانیم و بشنویم. ماجرایی که ما از سال ۲۰۰۰ مهم و جدی می‌شود. زمانی که محقق‌ی به نام ناکاگاکاکی و همکارانش طی مقاله‌ای که در Nature منتشر شد

اعلام کردند که توانسته‌اند توده‌ای از کپک مخاطی برای پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر در یک لایرننت^{۳۶۳} استفاده کنند.

^{۳۶۲} این توده را در زبان انگلیسی Slime می‌نامند و چون یکی از واژه‌هایی که برای لجن هم به کار می‌رود Slime است، در برخی متن‌های فارسی به جای کپک مخاطی از اصطلاح کپک لجن استفاده می‌شود. اما از آنجا که لجن تعریف دیگری دارد و خارج از این مقوله است، فکر می‌کنم استفاده از اصطلاح کپک مخاطی مناسب‌تر باشد.

^{۳۶۳} ماز یا Maze یا هزارتو یا Labyrinth

آنها کپک مخاطی را در نقطه‌ای از لایبرنت گذاشته بودند و در نقطه‌ی دیگری از لایبرنت غذا قرار دادند^{۳۶۴}. کپک توانسته بود کوتاه‌ترین مسیر برای رسیدن به غذا و تغذیه از آن را پیدا کند.



بعد از این آزمایش، انبوهی از آزمایش‌های متفاوت و متنوع با کپک‌های مخاطی انجام شد^{۳۶۵}. یکی از کارهای جالب توسط آتسوشی ترو^{۳۶۶} انجام شده است. او سی و شش شهر اطراف توکیو را روی یک نقشه علامت‌گذاری کرد و روی هر شهر متناسب با جمعیت آن، برای کپک‌ها غذا قرار داد.

سپس کپک مخاطی را در محل توکیو قرار داد و منتظر ماند تا کپک مسیر خود را به شهرهای مختلف پیدا کند. این مسیر شباهت بسیار زیادی به مسیر قطارهای بین شهری حومه توکیو داشت که با مطالعات گسترده با هدف بهینه‌سازی مسیر، طراحی شده بودند.

جالب اینجاست که کپک‌ها مسیرهای فرعی هم درست می‌کردند که پهنای کمتری داشتند و معادل مسیرهای فرعی ریلی بودند که برای شرایط خاص و وجود سانحه در خط اصلی در نظر گرفته می‌شوند.

آداماتزکی و همکارش مدل سه بعدی آمریکا را درست کردند و سعی کردند شکل کلونی شدن انسان‌ها و پخش شدن آنها در نقاط مختلف آمریکا و جاده‌سازی‌ها را شبیه‌سازی کنند.

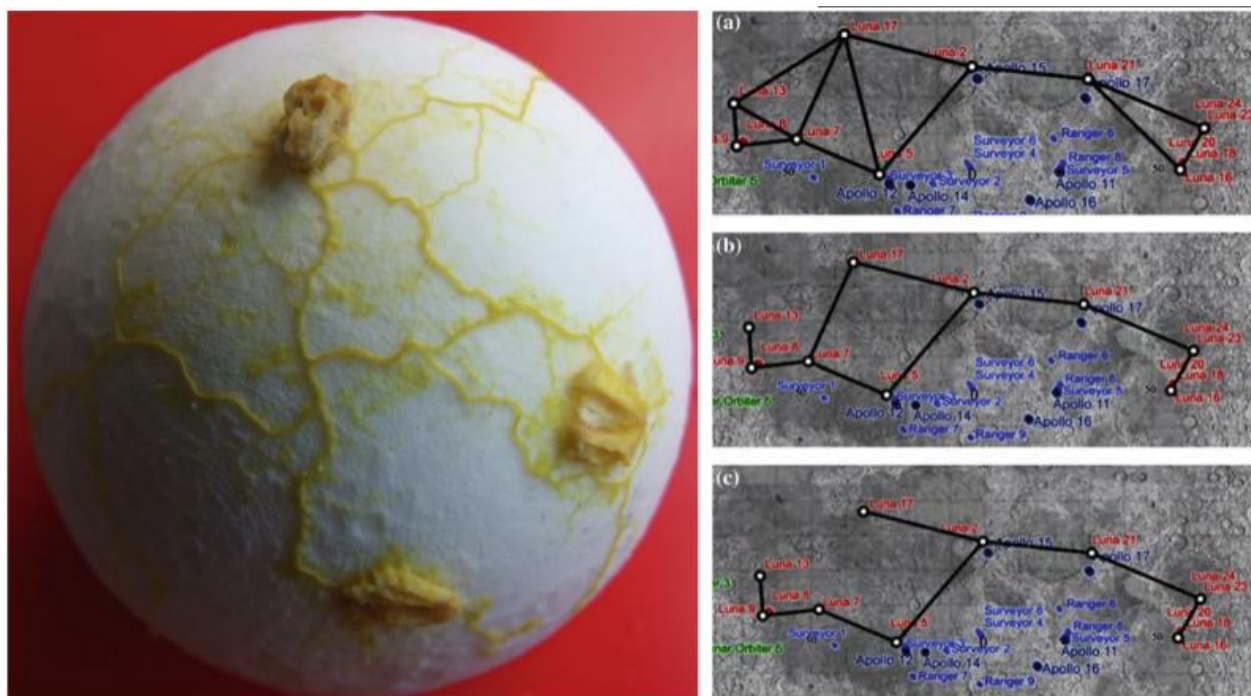


^{۳۶۴} یکی از غذاهاى مورد علاقه‌ی کپک مخاطی، جودوسریا یولاف است.

^{۳۶۵} Adamatzky, A. (2016). Advances in Physarum machines: Sensing and computing with slime mould. Cham ; Heidelberg ; New York ; Dordrecht ; London: Springer.

^{۳۶۶} Atsushi Tero

آنچه در تصویر صفحه‌ی قبل می‌بینید، نقشه سه بعدی آمریکاست و کپک‌ها را می‌بینید که در حال انتخاب و طراحی مسیرهای اصلی و فرعی مناسب هستند. در کار دیگری که آن هم توسط آداماتسکی انجام شده، می‌توانید محل ایستگاه‌های اکتشافی مختلف بر روی ماه را ببینید و کپک‌ها را که مسیر ارتباطی مناسب بین آنها را انتخاب کرده‌اند.



کپک‌های مخاطی و استفاده از حافظه‌ی بیرونی

کم نیستند کسانی که فکر می‌کنند حافظه‌ی بیرونی^{۳۶۷} یک اتفاق ساده مربوط به دوران توسعه‌ی تکنولوژی دیجیتال است. همه می‌دانیم که اگر امروز کسی موبایل خود را گم کند و از اطلاعات آن نسخه‌ی پشتیبان^{۳۶۸} تهیه نکرده باشد عملاً بخشی از حافظه‌ی خود را از دست داده است^{۳۶۹}.

در مورد کسانی که در سن من یا بزرگتر از من هستند – و زندگی در دوران ماقبل دیجیتال – را تجربه کرده‌اند، گم شدن موبایل

³⁶⁷ External memory

³⁶⁸ Backup copy

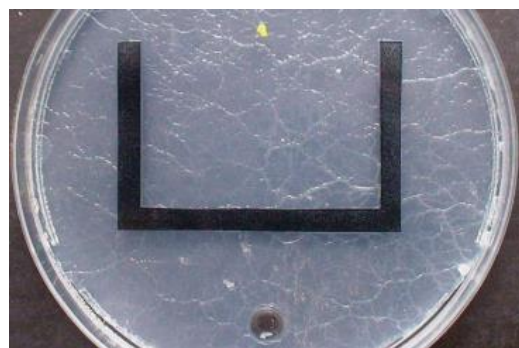
³⁶⁹ چند سالی است که ۳۱ مارس را روز جهانی بک‌آپ اعلام می‌کنند و از مردم می‌خواهند که عادت کنند حداقل یک روز در سال، از اطلاعات دیجیتال خود بک‌آپ بگیرند. اما حس نمی‌کنم بک‌آپ گرفتن به یک عادت فراگیر تبدیل شده باشد. ظاهراً بیشتر کاربران ترجیح می‌دهند به نسخه‌های بک‌آپی که سرویس‌ها و نرم‌افزارها به شکل‌های مختلف و به صورت اتوماتیک تهیه می‌کنند دلگرم باشند و مدیریت دقیق این فرایند را در اختیار خود نگیرند.

می تواند نشانه هایی شبیه آلزایمر داشته باشد. چون مثلاً من شماره تلفن قدیم خانه ی پدر و مادرم را که بیست سال پیش حفظ کردم، هنوز حفظ هستم؛ اما شماره تلفن امروز آنها را که بر روی موبایلم ذخیره کرده ام حفظ نیستم. بنابراین با گم شدن این حافظه ی بیرونی، عملاً بخش زیادی از محفوظات اخیر خود را از دست می دهم.

به هر حال، منظورم از این مثال آن است که موبایل نمونه ای از حافظه ی بیرونی است. چیزی که من زمانی در نوشته هایم از آن به عنوان مغز منفصل یا مغز ناپیوسته نام بردم و آن را در مقابل مغز متصل قرار دادم. منظورم از مغز متصل همان توده ی نورونی است که کمی کمتر از یک و نیم کیلوگرم وزن دارد و در ظرفی پراز مایع^{۳۷۰} - که به آن جمجمه می گویند - شناور است و اتفاقاً از جنبه های متعددی به کپک مخاطی شباهت دارد.

البته موبایل و ابزارهای دیجیتالی، نخستین نمونه ی حافظه ی بیرونی نیستند. نوشتن یکی از اختراعات انسان است که کمک کرد اطلاعات را در جایی بیرون مغز خود ذخیره کند. کتاب، نمونه ای از حافظه ی بیرونی است که اتفاقاً برتری های متعددی نسبت به حافظه ی درونی دارد.

اما اگر در مسیر تاریخ زمین عقب برویم می بینیم که حافظه ی بیرونی حتی قبل از حافظه ی درونی شکل گرفته و وجود داشته



است. کریس رید و همکارانش در مطالعه ی خود نشان دادند که کپک های مخاطی با علامت گذاری محیطی می توانند رفتاری مشابه حافظه - به معنایی که امروز می شناسیم - را نمایش دهند^{۳۷۱}.

آنها برای آزمودن این توانایی کپک ها، از روش دایره U شکل استفاده کردند که در رباتیک برای سنجش توانایی مسیریابی روبات ها استفاده می شود.

ایده ی کلی این است که بین کپک و غذای او، یک مانع U شکل قرار داده می شود و به کپک فرصت داده می شود تا غذای

^{۳۷۰} این مایع مغزی که به آن Cerebrospinal fluid یا CSF می گویند، یکی از ویژگی های شگفت انگیز ما و بسیاری از حیوانات است. مغز ما را اگر روی یک تکیه گاه صلب قرار دهند، نمی تواند وزن خودش را تحمل کند و شکل خود را از دست می دهد. اما به خاطر شناور بودن در CSF عملاً گرانش را به سادگی تحمل می کند؛ درست با همان مکانیزمی که ما هنگام قدم زدن در آب احساس سبکی می کنیم. حجم CSF در مغز انسان حدود ۱۲۵ سی سی است و البته روزی سه بار تقریباً به شکل کامل جایگزین و بازآفرینی می شود. ما می توانیم حدوداً در هر سه دقیقه، یک سی سی از این مایع را تولید کنیم. طبیعتاً هریک از حیوانات با توجه به نیاز خود، با نرخ متفاوتی این جایگزینی را انجام می دهند. مثلاً سگ ها در هر بیست دقیقه، گربه ها در هریک ساعت و موش ها در هر هشت یا نه ساعت می توانند یک میلی لیتر از این مایع را تولید و جایگزین کنند (طبیعتاً به حجم حیوان بستگی دارد). البته CSF کارکردهای دیگری - مثل ضربه گیری - هم دارد.

^{۳۷۱} Reid, C. R., Latty, T., Dussutour, A., & Beekman, M. (2012). Slime mold uses an externalized spatial "memory" to navigate in complex environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(43), 17490-17494. doi:10.1073/pnas.1215037109

خود را جستجو کند. ساده ترین تعریف حافظه این است که آن را به صورت مکانیزی برای ذخیره و بازیابی اطلاعات مربوط به رویدادهای گذشته در نظر بگیریم. بنابراین حافظه ی کپک باید به او کمک کند که مسیرهای قبلاً آزموده را دوباره نیازماید. این نوع حافظه را می توانیم معادل حافظه ی فضایی^{۳۷۲} بدانیم. همان قابلیت که باعث بهبود توانایی مسیریابی ما در محیط های پیچیده می شود^{۳۷۳}. البته طبیعتاً نباید انتظار داشته باشید که این کپک ها سرعت بالایی داشته باشند. سرعت حرکت آنها حدود ده تا بیست میکرومتر در ثانیه است و در آزمایشی که کریس رید انجام داد، برای پیدا کردن غذا به حدود ۵۸ ساعت زمان نیاز داشتند.



اما این را هم می دانیم که تند و کند بودن یک مفهوم کامل نسبی است و برای هراگانیزی با توجه به ویژگی ها و مقتضیات خودش تعریف می شود. اگر چنین نباشد، یوزپلنگ ها هم ما را موجوداتی کند و ضعیف خواهند دانست که احتمالاً دیر یا زود به خاطرات توانی حرکتی منقرض می شویم^{۳۷۴}. با این مقدمه و توضیحات، بد نیست کلیپ تایم لپس حرکت کپک در جستجوی غذا را ببینید.

اکنون که به انواع حافظه های بیرونی از کپک تا موبایل اشاره کردیم، احتمالاً باید به خاطر بیاورید که مورچه ها هم با استفاده از فرومون به شکلی بسیار جدی از حافظه ی بیرونی استفاده می کنند. بیرون بودن حافظه مزایای متعددی دارد که باید در آینده به صورت مستقل به آن پردازیم. اما می توانیم حداقل دو کارکرد آن را به سادگی حدس بزنیم.

نخست اینکه حافظه ی بیرونی - به جای ذخیره سازی درون شبکه ی نورونی مغز - عملاً یک سیستم ارتباطی را شکل می دهد. مورچه ها با ثبت کردن خاطرات خود به شکل فرومون، عملاً پیامی را برای مورچه های دیگر ارسال می کنند که توسط آنها به سادگی قابل درک و رمزگشایی است.

نکته ی دوم هم کارآمد بودن این سیستم از نظر مصرف انرژی است. عملاً حافظه ی هریک از مورچه ها (یا در مثال این فصل، کپک ها) در اختیار سایر مورچه ها هم قرار می گیرد و محیط به حافظه ی مشترک همه ی آنها تبدیل می شود.

³⁷² Spatial memory

^{۳۷۳} وقتی از اصطلاح بهبود استفاده می کنیم، باید معیاری هم برای سنجش آن داشته باشیم. یکی از شاخص های خوب برای سنجش توانایی مسیریابی (و بهبود آن) میزان انرژی مصرفی برای جستجوی مسیر مطلوب است.

^{۳۷۴} سرعت حرکت یوزپلنگ در مقاطع زمانی کوتاه به بیش از ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت می رسد و در حالت عادی هم متوسط سرعتش چیزی در حدود ۶۰ کیلومتر بر ساعت است. اگر هم از منظر شتاب به حرکت یوزپلنگ نگاه کنیم، صفر تا صد آن حول و حوش ۲/۶ ثانیه است که می توان آن را با بوگاتی ویرون (با موتور ۱۲۰۰ اسب بخار) مقایسه کرد.

این کارکرد را تا می توان در شبکه های ارتباطی دیجیتالی امروزی نیز مشاهده کرد. از سرویس های ایمیل تا نرم افزارهای پیام رسان همگی به نوعی از کارایی حافظه ی بیرونی اشتراکی بر روی سرویس های ذخیره سازی ابری^{۳۷۵} خود استفاده می کنند.

وقتی من یک ویدئوی صدمگابایتی را برای پنج نفر از دوستان خود ارسال می کنم، هریک از آنها ۱۰۰ مگابایت به سرویس ایمیل خود (مثلاً جیمیل) بدهکار می شوند. منظورم از بدهکار این است که جیمیل اعلام می کند آنها ۱۰۰ مگابایت از ظرفیت صندوق ایمیل خود استفاده کرده اند. من هم به خاطر نگهداری این ۱۰۰ مگابایت در قسمت ایمیل های ارسال شده به جیمیل بدهکار هستم. در نهایت با ما به گونه ای برخورد می شود که گویی جمعاً ۶۰۰ مگابایت فضا به ما تخصیص داده شده، در حالی که عدد واقعی همچنان ۱۰۰ مگابایت است.

اگر اطلاعاتی که در حافظه ی بیرونی ثبت می شوند، پردازش هم بشوند یا به نوعی بر روی یکدیگر تأثیر بگذارند، کارآمدی این سیستم بسیار بیشتر هم خواهد شد. اتفاقی که در موتورهای پیشنهاددهنده (مثل پیشنهاد محصول در آمازون یا جستجوی وب در گوگل) می افتد و نهایتاً هریک از ما با ذخیره کردن بخشی از خاطرات خود در محیط بیرونی (خاطره ی خرید، خاطره ی جستجو و رفتارهای وب گردی) عملاً چیزی ارزشمندتر به دست می آوریم.

³⁷⁵ Cloud storage services

در جستجوی پاسخ

شاید فیلسوف‌های دنیای کهن، با شنیدن «جستجوی پاسخ» به یاد نگرانی‌ها و دغدغه‌های فلسفی خود بیفتند: این که از کجا آمده‌اند و قرار است به کجا بروند.

اما گستردگی، فراگیری و قدرتمند شدن تکنولوژی باعث شد که نسل جدید – که دیگر پاسخ سوال‌هایش را نه در آسمان، که در زمین می‌جست – جستجوی پاسخ را به شکلی مکانیکی و غیرفلسفی ببیند: چیزی از جنس اکتشاف و هستی‌نوردی.

پاسخ – به تعبیر شرون بگلی – دیگر پوشیده و پنهان نبود؛ بلکه جایی در این جهان ایستاده بود؛ در انتظار کسی که آن را بجوید و بیابد.

دستاوردهای این نگاه در ابتدا ابزارهای ما را قدرتمندتر کرد: کامپیوترها و موبایل‌ها تیزهوش‌تر شدند و نرم‌افزارها توانستند به کمک ماهواره‌ها و الگوریتم‌های جستجوی خود، کوتاه‌ترین و بهترین مسیرها را در رفت‌وآمد شهری برای ما بیابند.

اما مهم‌ترین دستاورد این نگاه آن بود که به ما کمک کرد تا بتوانیم تمام هستی را یک سیستم بزرگ اکتشاف‌گر ببینیم؛ سیستمی که به دنبال پاسخ می‌گردد و البته هم‌زمان، پرسش را نیز جستجو می‌کند.

- مسائل کلاسیک بهینه سازی
- مفهوم فضای پاسخ
- منظور از فضای جستجو چیست؟
- گرفتاری در نقطه های بهینه ی نسبی
- برخی الگوریتم های جستجوی مطرح
- تکامل به عنوان یک الگوریتم برای جستجوی پاسخ
- الگوریتم ژنتیک

در داستان معروف راهنمای مسافران کهکشان، اوج هنر داگلاس آدامز را در اواخر فصل ۲۷ و اوایل فصل ۲۸ تجربه می‌کنیم. جایی که کامپیوتر ژرف‌اندیش، هفت و نیم میلیون سال در خود فرو می‌رود و در نهایت - در شرایطی که نفس در سینه‌ی همه حبس شده - پاسخ را اعلام می‌کند: پاسخ ۴۲ است.

آن‌ها که ابدیتی را در انتظار این پاسخ نشسته بودند می‌پرسند: همین؟ فقط همین؟ و آن کامپیوتر ژرف‌اندیش پاسخ می‌دهد: بله. مطمئن همین است. اما اگر بخوایم صادق باشیم باید بگویم مسئله این است که شما سوال را نمی‌دانید.

اما طنز روزگار این‌که مخاطبان و علاقه‌مندان آدامز، نکته‌ی پنهان در این ماجرا را کشف نکردند و وجود پاسخ بدون سوال را نپذیرفتند. آن‌ها فکر می‌کردند هر پاسخی باید در پی پرسشی باشد و چنین شد که گمانه‌زنی برای فهرست بلندبالایی از پرسش‌های احتمالی، آغاز شد.

خوشبختانه داگلاس مُرد و نماند تا ببیند برخی طرفدارانش می‌گویند ۴۲، تعداد سطرهای هر صفحه از نخستین انجیلی است که دستگاه گوتنبرگ، چاپ و عرضه کرده است.

رابطه‌ی هوش و حل مسئله

یکی از نشانه‌ها و معیارهای سنجش هوش را توانایی حل مسئله می‌دانند. همه دیده‌ایم که دانش‌آموزان و دانشجویانی که در حل مسائل ریاضی توانمندترند، معمولاً به تیزهوشی شناخته می‌شوند.

اما این دیدگاه، صرفاً به درس و مدرسه و دانشگاه محدود نیست. به تدریج در تجربه‌ی زندگی اجتماعی، باز هم می‌بینیم و می‌آموزیم که مهارت حل مسئله، مهارتی مهم و سرنوشت‌ساز است.

از سوی دیگر، این را هم حس کرده‌ایم و می‌دانیم که حل مسئله‌های ریاضی و حل مسئله‌های زندگی از یک جنس نیستند؛ چرا که مسئله‌های ریاضی از جنس مسئله‌های رایج زندگی نبوده و نیستند.

با همه‌ی این توضیحات، اگر بپذیریم که دستاورد نهاییِ هوش مصنوعی، باید توانایی حل مسئله باشد، منطقی است که پرسیم: چه نوع مسئله‌هایی؟

برخی مسئله‌ها مثل درست کردن یک رابطه‌ی عاطفی خراب شده یا اثبات یک قضیه‌ی هندسی، فضای جستجوی مشخص ندارند. مثلاً نمی‌توانید بگویید: اگر رابطه‌ات با شریک عاطفی‌ات خراب شده، هفده گزینه‌ی مختلف پیش روی توست و هیچ گزینه‌ی هجدهمی نیز در میان نیست. اگر هیچ یک از این گزینه‌ها، پاسخ مسئله‌ات نیست، مسئله‌ات بی‌پاسخ است و باید این رابطه را به کلی به فراموشی سپاری.



اثبات قضایای هندسی هم از این منظر، تا حد زیادی شبیه حل مسئله‌ی عاطفی است.

اما همه‌ی مسئله‌ها از این جنس نیستند. به عنوان یک مثال ساده، پازل پانزده را در نظر بگیرید. برخی از ما دوران کودکی مان را با این پازل گذرانده‌ایم. ترتیب مربع‌های پازل در هم ریخته و قرار است ما با جابجا کردن مربع‌ها، ترتیب شکل مقابل را ایجاد کنیم.^{۳۷۶}

چنین مسئله‌ای فضای جستجوی مشخص و تعریف شده دارد:

- وضعیت اولیه مشخص است.
- قواعد ثابت هم تعریف شده‌اند: در هر مرحله، بسته به موقعیت خانه‌ی خالی در جدول، تنها دو، سه یا چهار گزینه پیش روی شما قرار دارد.
- وضعیت یا وضعیت‌های مطلوب هم تعریف شده‌اند.

به همین علت می‌توانیم آن‌ها را مسئله‌های جستجوپذیر بنامیم: مبداء و مقصد مشخص هستند و قواعد حرکت بین این دو وضعیت هم معلومند. تنها باید در جستجوی مسیری باشیم که ما را از نخستین نقطه به آخرین نقطه می‌رسانند.

یکی از بزرگترین مسئله‌های جستجوپذیر که طی قرن‌های اخیر ذهن انسان را به خود مشغول کرده، شطرنج است.^{۳۷۷} در شطرنج، وضعیت اولیه تعریف شده است. قواعد حرکت هم مشخص هستند. درست است که تصویری دقیق و قطعی وضعیت مقصد نداریم؛ اما شرایط مشخصی تعریف شده که می‌دانیم وقتی آن شرایط ایجاد شوند (کیش و مات شدن پادشاه) به نقطه‌ی پایان بازی رسیده‌ایم.

البته در این بازی، دو پاسخ قابل تصور است: کیش و مات شدن سفید یا کیش و مات شدن سیاه.

دو شطرنج باز در کنار صفحه‌ی شطرنج، روبروی هم می‌نشینند و هریک، پاسخ مطلوب خود را جستجو می‌کند. آن کس

^{۳۷۶} اگر تجربه‌ی بازی با این پازل را داشته باشید می‌دانید که برخی از چیدمان‌های آن، قابل حل نیستند. مثلاً اگر در چیدمان اولیه، همه‌ی اعداد سر جای خودشان باشند و فقط جای ۱۴ و ۱۵ را عوض کنید، حتی با تعداد حرکت نامحدود هم نمی‌توانید به وضعیت اعداد مرتب شده برسید.

^{۳۷۷} برای کسانی که فضای هوش مصنوعی و نقاط قوت و ضعف الگوریتم‌ها را می‌شناسند، احتمالاً بازی Go جذاب‌تر است. خصوصاً این که کامپیوتر به تازگی توانسته انسان را در این بازی شکست دهد. اما من به خاطر رعایت سادگی، به سراغ مثال‌های ساده‌تر و کلاسیک‌تر می‌روم. شاید در آینده به بازی Go هم برگردیم.

برنده است که در این فضای بزرگ – با میلیون ها حرکت قابل تصور – زودتر از دیگری به پاسخ خود دست پیدا کند.



در بخش غالب تاریخ هوش مصنوعی، انسان ها ماشین هوشمند را وسیله ای با توانایی حل مسئله های جستجوپذیر تصور کرده اند.

به همین علت، یکی از تصاویر ذهنی ما از ماشین هوشمند، دستگاه شطرنج باز بوده است. یکی از بهترین روایت های اهمیت ماشین شطرنج باز در تاریخ هوش مصنوعی را می توانید در کتاب گری کاسپاروف تحت عنوان تفکر عمیق بخوانید^{۳۷۸}.

اگرچه همه داستان نبرد انسان و ماشین را از سال ۱۹۹۷ و شکست کاسپاروف در مقابل دیپ بلو^{۳۷۹} (ساخت شرکت IBM) آغاز می کنند، اما او خودش ترجیح می دهد روایتش از سال ۱۹۸۵ شروع شود تا به ما یادآوری کند که زمانی یک تنه در برابر ۳۲ دستگاه کامپیوتر بازی کرده و برهمه ی آن ها پیروز شده است^{۳۸۰}.

مرور جزئیات نبرد انسان و ماشین در زمین شطرنج، خارج از حوزه و حوصله ی بحث ماست. تنها نکته ی مهمی که باعث شد من به این ماجرا اشاره کنم تأکیدی بر این نکته است که ما انسان ها به صورت تاریخی بخشی از هوش و هوشمندی را در قالب توانایی حل مسئله های جستجوپذیر دیده ایم و می بینیم.

فضای جستجو، فضای پاسخ، بهینه سازی پاسخ، بهترین پاسخ

فرض کنیم که با هدف اجاره ی یک آپارتمان، جستجو در یک شهر را آغاز کرده اید. در لحظه ی نخست، تمام شهر فضای

³⁷⁸ Kasparov, G. (2018). Deep Thinking, Hodder.

³⁷⁹ Deep Blue

^{38۰} مرور حرف ها و نوشته ها و سخنرانی های کاسپاروف این حس را القا می کند که هنوز هم جایی در دلش، از این که روبروی ماشین نشسته و به نمادی ماندگار در تاریخ رقابت انسان و ماشین تبدیل شده خوشحال نیست. Deep Blue را هم هرگز فراموش نکرده است. چنان که نام کتابش را Deep Thinking گذاشته و فصلی از کتاب را هم Deeper Blue نام گذاری کرده است. کاسپاروف در اواخر کتابش به اهمیت خلاقیت در انسان می پردازد – و برخلاف آن چه در کتاب پیچیدگی خواهیم آموخت – خلاقیت را ویژگی مختص انسان می داند. به همین علت، آینده را نه در اختیار ماشین های هوشمند، بلکه در تسخیر سن تورها می بیند. موجوداتی که از ترکیب انسان و ماشین ایجاد شده و شکل گرفته اند.

جستجوی^{۳۸۱} شماست. با توجه به این که بودجه‌ی شما محدود است و احتمالاً قیدها و ترجیحات دیگری هم دارید، بخش مهمی از فضای جستجو حذف می‌شود و بخش‌هایی از شهر و تعدادی از آپارتمان‌ها به عنوان گزینه‌های قابل پذیرش باقی می‌مانند. به این زیرمجموعه از فضای جستجو، فضای پاسخ^{۳۸۲} می‌گوییم.

در یک شهر بزرگ، هرگز نمی‌توانید بگویید تمام گزینه‌های موجود در فضای پاسخ را دیده و بررسی کرده‌اید. به همین علت هرگز نمی‌توانید ادعا کنید که بهترین گزینه‌ی موجود را یافته و اجاره کرده‌اید.

معمولاً در این شرایط ما به سراغ بهینه‌سازی^{۳۸۳} می‌رویم. به این معنا که یک یا چند گزینه را که برایمان قابل قبول است انتخاب می‌کنیم و سپس به یافتن و ارزیابی سایر گزینه‌های موجود می‌پردازیم. با پیدا کردن گزینه‌های جدید، گزینه‌های ضعیف‌تر از سبد گزینه‌هایمان حذف می‌شوند و در نهایت، بین یک یا چند مورد باقی مانده، گزینه‌ی بهینه را انتخاب می‌کنیم.

در فرایند بهینه‌سازی ما به دنبال بهترین گزینه نیستیم؛ بلکه پیوسته گزینه‌ای بهتر از وضعیت فعلی را جستجو می‌کنیم. البته طبیعی است که حالت رویایی این است که بهینه‌سازی ما را به بهترین گزینه در فضای پاسخ برساند (یا نزدیک کند).

مسئله‌ی پیدا کردن خانه‌ی مناسب در سطح شهر، در مقایسه با مسئله‌هایی که ما در ماشین‌های هوشمند با آن‌ها مواجهیم بیش از حد ساده است. این سادگی سه وجه دارد:

- کم بودن تعداد گزینه‌ها
- یک لایه‌ای بودن مسئله
- دسترسی بالفعل به تمام فضای جستجو و پاسخ

در ادامه هر یک از سه ویژگی فوق را در چند سطر توضیح می‌دهم.

کم بودن تعداد گزینه‌ها

در مسئله‌ی پیدا کردن خانه، تعداد گزینه‌ها بسیار محدود است: نهایتاً در مورد چند صد هزار گزینه صحبت می‌کنیم. در یک بازی ظاهراً ساده مثل Go (با صفحه‌ی ۱۹ در ۱۹) که انسان‌ها بیش از ۲۵۰۰ سال است به آن مشغولند، تعداد

³⁸¹ Search Space

³⁸² Solution Space

³⁸³ Optimization

وضعیت های قابل تصور حدود^{۱۰۱۷} است. اندرومک کافی و همکارانش برای این که تصویری از بزرگی این عدد در اختیارمان قرار دهند، به این نکته اشاره می کنند که تعداد اتم های موجود در تمام هستی قابل مشاهده حدود^{۱۰^{۸۲}} برآورد می شود. به عبارت دیگر، اگر فرض کنیم در هریک از اتم هایی که ما از وجودشان در عالم اطلاع داریم، جهانی به بزرگی همه ی آن چه در دورترین نقاط هستی دیده ایم وجود دارد، تعداد کل اتم ها در چنین وضعیتی هنوز هم از تعداد حالت های قابل تصور در صفحه ی ۱۹ در ۱۹ بازی Go بیشتر نخواهد شد^{۳۸۴}.

یک لایه ای بودن مسئله

مسئله ی پیدا کردن خانه در شهر را می توان یک لایه ای یا حداکثر دولایه ای در نظر گرفت.

یک لایه ای بودن مسئله با این فرض است که شما تصمیم گرفته اید تمام خانه های شهر را یکی پس از دیگری بررسی کنید. اما حالا این سناریو را در نظر بگیرید:

- تصمیم می گیرید ابتدا همه ی منطقه های شهر را با هم مقایسه کرده و منطقه ی مطلوب خود را انتخاب کنید.
- سپس در منطقه ی انتخاب شده، خانه های مختلف را بررسی می کنید تا مناسب ترین خانه را بیابید.

در این حالت، مسئله ی جستجوی خانه به مسئله ای دولایه ای تبدیل شده است.

با این توضیحات، به سادگی می توانید درک کنید که وقتی از بازی شطرنج صحبت می کنیم - که گاه صدها حرکت ادامه پیدا می کند - با مسئله ای چند صد لایه ای روبرو هستیم.

دسترسی بالفعل به تمام فضا جستجو و پاسخ

در مسئله ی جستجوی خانه، همه ی گزینه های ممکن در زمان جستجوی پاسخ، به صورت کاملاً بالفعل وجود دارند. به عبارت دیگر، فضای جستجو کاملاً موجود است.

این در حالی است که در بسیاری از مسئله های واقعی که سیستم های هوشمند با آن مواجهند، گزینه ها به صورت بالفعل وجود ندارند یا لاقلاً باید طی یک فرایند، خلق شوند.

کافی است فقط به همین یک نکته توجه کنید که در شطرنج، بعد از هر حرکت، این طرف مقابل شماست که با حرکت

³⁸⁴ MCAFEE, A. (2018). MACHINE, PLATFORM, CROWD: Harnessing our digital future. S.I.: W W NORTON.

خود، مرزهای فضای تازه و گزینه های بالفعل را تعیین می کند. اگر هم بخواهید تمام گزینه های پیش روی او را نیز تصور و بررسی کنید (کاری که بسیاری از الگوریتم ها انجام می دهند) پیچیدگی جستجوی جواب، بیشتر خواهد شد.

بنابراین حتماً به خاطر داشته باشید که مثال جستجوی خانه، فقط برای درک مفهوم اصطلاح های فضای جستجو، فضای پاسخ، بهینه سازی پاسخ و پاسخ بهینه بود. اما تقریباً هیچ یک از مسئله هایی که ما با آن ها سرو کار داریم، با هر سطحی از ساده سازی در حد مسئله ی جستجوی خانه نخواهند شد.

شاخص وضعیت فعلی – نقشه ی شروع بهینه سازی

ترجمه کردن مسئله های دنیای واقعی به مسئله های قابل بررسی در دنیای ریاضیات و هوش مصنوعی، همیشه ساده نیست. خصوصاً وقتی مسئله های ما پیچیدگی های فراوان داشته باشند یا به یک سیستم پیچیده مربوط باشند.

اگر در پی گذرنامه ای برای ورود به قلمرو بهینه سازی و هوش مصنوعی هستید، شاید بتوان گفت این گذرنامه، شاخص وضعیت فعلی است.

اگر بتوانید برای سنجش وضعیت فعلی یک سیستم، یک شاخص کمی تعریف کنید، آن گاه می توانید وارد دنیای بهینه سازی بشوید و از متخصصان آن بخواهید به شما کمک کنند تا وضعیت آن شاخص را بهبود دهید^{۳۸۵}.

برای درک بهتر شاخص وضعیت فعلی، مثالی مطرح می کنم که کمی از اصل بحث ما دور است؛ اما بسیار به درک مفهوم این شاخص کمک خواهد کرد.

فرض کنید مدیریک شرکت به سراغتان می آید و می گوید: تواز امروز مشاور من هستی. به من کمک کن تا وضعیت شرکت را بهتر کنم.

روش غیرحرفه ای این است که بگویید: «حتماً. باعث افتخار من است. من ساعتی X ریال می گیرم و اگر مشکلی در پرداخت آن ندارید، از همین لحظه به عنوان مشاور در خدمت شما هستم.»

اما روش حرفه ای تر آن است که پرسید: «من قرار است چه چیزی را بهتر کنم؟ بهتر و بدتر را چگونه می سنجید؟ وضعیت فعلی را براساس چه شاخصی ارزیابی می کنید؟ تا من بتوانم برای بهتر کردن آن شاخص به شما کمک کنم؟»

^{۳۸۵} کلمه ی کلیدی این نوع جستجو و بهینه سازی، Local Search است. اما حداقل در این لحظه، حس می کنم لازم نیست بیش از این وارد ترمینولوژی تخصصی این بحث بشوم.

ممکن است مدیر به شما بگوید: «شاخص من، سود ماهانه ی شرکت است.»

این عددی است که دائماً به آن توجه دارم و بهتر شدنش برایم مهم است. توفیق است به بهبود وضعیت موجود براساس این شاخص کمک کنی.

مشاور در این حالت می تواند بگوید: «از فردا صبح از همه ی کارمندان فروش بخواه که نیم ساعت زودتر بیایند و عصر هم، یک ساعت دیرتر بروند. پاداش فروش را هم به یک سوم مقدار فعلی کاهش بده. به احتمال زیاد شاخصی که تعریف کردی بهبود پیدا خواهد کرد.»

مدیر می داند که این پیشنهاد، قابل دفاع و قابل اجرا نیست. از سوی دیگر نمی تواند به مشاور بگوید که اثرات بلندمدت هم برایش مهم است. چون مشاور، در پی شاخص وضعیت فعلی است (بهبود در بلندمدت، حرف زیبایی است؛ اما قابل سنجش نیست).

احتمال دارد مدیر داستان ما بگوید: «ما یک فرم رضایت سنجی داریم که کارکنان به صورت ماهانه در آن، رضایت خود را از محیط کار اعلام می کنند.»

بنابراین، شاخص وضعیت فعلی (Current State Index) چنین تعریف می کنیم:

$$CSI = f(P, S)$$

شاخص وضعیت فعلی، تابعی از سود ماهانه (Profit) و رضایت کارکنان (Satisfaction) است. یک برنامه ی کوچک هم نوشته ایم که اگر میزان سود و میزان رضایت را به آن بدهی، CSI را برای محاسبه می کند.

حالا لطفاً به ما کمک کن که CSI بهتر شود و ما هم در ازای این کار، به تو پول خوبی خواهیم داد.

بحث بین مدیر و مشاور در این حالت نیز ادامه پیدا خواهد کرد (چون حالا ممکن است مشاور وارد پروژه ی حراج و خالی کردن ناگهانی انبار بشود). اما در نهایت، ماجرا به این جا ختم خواهد شد که:

$$CSI = f(X, Y, Z, R, S, T, \dots)$$

و حالا قرار مشاور و مدیر شفاف است: تو باید CSI را که تابعی از چند پارامتر مختلف است، بهبود دهی.

البته می دانیم که در دنیای واقعی – جز کسب و کارهای دیجیتالی – کمتر پیش می آید که چنین تابعی به صورت صریح و دقیق تعریف شود. اما این را هم می دانیم که همه ی مدیران به صورت ضمنی، در ذهن خود چنین تابعی را دارند و

می‌کوشند با تصمیم‌های خود، آن را بهینه کنند.

چرا شاخص وضعیت فعلی در تحلیل سیستم‌های پیچیده مهم است؟

وقتی مسئله‌ی جستجو، در حد جستجوی خانه‌ای برای اجاره کردن یا خریدن یک گوشی موبایل، ساده باشد؛ طبیعتاً به تعریف و تعیین شاخص وضعیت فعلی نیاز نخواهیم داشت. مقایسه‌ی گزینه‌ها آن چنان دشوار نیست و جستجو در فضای پاسخ هم، چندان انرژی نمی‌گیرد.

اما فرض کنید قرار است به ترمیم منابع انسانی یک شرکت بزرگ بپردازید (عده‌ای را حذف کرده و افراد دیگری را جایگزین کنید)؛ یا این‌که سیاست‌های جدیدی را برای تردد خودروها در شهر تعیین کنید؛ یا این‌که اقتصاد یک کشور را مدیریت کنید؛ یا این‌که سلامت یک انسان را – به عنوان یک سیستم پیچیده – بهبود دهید؛ یا این‌که تغییراتی ژنتیکی در یک گونه‌ی جانور یا گیاه ایجاد کنید و از آن موجود تازه‌ای بسازید.

همه‌ی این‌ها مسائلی پیچیده و چندوجهی هستند و اگر از ابتدا ندانید که شاخص وضعیت موجود چیست، پس از هر اقدام، نمی‌توانید بفهمید که بالاخره وضعیت بهتر شده یا بدتر یا این‌که در همان شرایط پیشین باقی مانده است.

هم چنین براساس همان مثال مدیر و مشاور، در موارد بسیاری، افق بینایی ما محدود است. این بینایی محدود می‌تواند در حوزه‌ی زمان، مکان یا حوزه‌ی اثر سیاست‌ها و تصمیم‌ها باشد.

به عبارت دیگر، حتی به فرض این‌که علاقه‌مند باشیم افق‌های دور را در تصمیم‌ها و رفتارهای خود لحاظ کنیم و ببینیم، در عمل نمی‌توانیم این کار را انجام دهیم.

شاخص وضعیت موجود اگر به شکلی مناسب و هوشمندانه تعریف شود، می‌تواند بخشی از این نگرانی‌ها را پوشش دهد. اما دام‌ها و ضعف‌های این شیوه‌ی تحلیل وضعیت سیستم‌ها هم کم نیستند و در ادامه به آن‌ها می‌پردازم.

تپه‌نوردی انسان نابینا

این‌که شاخصی برای وضعیت موجود تعریف کنیم و پیوسته بکوشیم آن را بهتر کنیم، ایده‌ی جالب و جذابی به نظر می‌رسد. اما یک دام بزرگ هم دارد و آن، گرفتار شدن در نقطه‌های بهینه‌ی محلی^{۳۸۶} است. داستان گرفتار شدن در نقطه‌های بهینه‌ی محلی به شکل‌های مختلف در بحث بهینه‌سازی روایت می‌شود و من هم می‌خواهم به علت اهمیت این بحث، روایتی از

³⁸⁶ Local Optimum

آن را - با وجود واضح بودن اصل موضوع - در این جا بیان کنم^{۳۸۷}.

ما چرا این است که فردی نابینا، در سرزمینی ناهموار در حال حرکت است و به او دستگاہی داده شده تا در هر گام، ارتفاع فعلی اش را (مثلاً از سطح دریا) برایش بخواند. به نابینا گفته شده که مدت محدودی در اختیار دارد و هر زمان تصمیم بگیرد در جایی متوقف شود، متناسب به ارتفاع آن نقطه به او جایزه ای داده خواهد شد.

سوال این جاست که نابینا باید از چه شیوه ای برای یافتن بالاترین نقطه استفاده کند؟

ساده ترین روشی که نابینا می تواند به کار بگیرد این است که در هر نقطه ای ایستاده، به صورت تصادفی یک گام بردارد. اگر دید ارتفاعش بهتر شد، گامی دیگر بردارد و اگر چنین نشد، به جای قبلی بازگردد و همین کار را تکرار کند.

روش دیگر - با کمی تغییرات جزئی - این است که نابینا می تواند هر بار در چند جهت گام بردارد و به نقطه ی اول بازگردد. سپس براساس آن که کدام جهت، افزایش ارتفاع بیشتری ایجاد می کرد، موقعیت خود را به آن نقطه تغییر دهد و دوباره این کار را تکرار کند.

همه می دانیم که دام این الگوریتم چیست. انسان نابینا ممکن است در زمینی که قله های چند صد متری دارد، گرفتار یک تپه ی چند ده متری شود.

او به بالاترین نقطه ی تپه می رسد و به هر سو که گام بردارد، می بیند ارتفاعش کاهش می یابد. پس تصمیم می گیرد بیش از این حرکت نکند و در همان جا بماند.

ما این نقطه های بهینه ی محلی را بسیار دیده و تجربه کرده ایم. به این معنا که در جایی قرار گرفته ایم که هر تغییری، وضع را از حالت فعلی بدتر می کند. بنابراین تصمیم می گیریم وضعیت فعلی را به عنوان بهترین وضعیت موجود - حتی اگر مطلوب نیست - بپذیریم و تکان نخوریم.

قانع شدن به اصلاحات جزئی در ساختار مدیریتی نامطلوب و ترس از تغییرات شدید و عمیق، ترس از طلاق به خاطر این که وضعیت ممکن است بدتر از الان بشود و استعفا ندادن از شغلی که آن را دوست نداریم، نمونه هایی از گرفتار شدن در نقطه ی بهینه ی محلی هستند.

^{۳۸۷} این نوع داستان ها و مثال ها، در کتاب های بهینه سازی فراوانند و معمولاً با جستجوی کلیدواژه ی Hill-climbing Problem Solving به توضیحات خوبی درباره ی آن می رسید. اما من ترجیح می دهم مسئله را به گونه ای روایت کنم که نابینایی واژه ی کلیدی آن باشد. به این شیوه، در آینده دستم برای برگشتن به بحث بنیادی و نابینایی - که به نظر از زیباترین بحث های پیچیدگی است - بازتر خواهد بود.

ممکن است (فقط ممکن است) در نقطه‌ی دیگری از این سرزمین، قله‌ی بلندتری وجود داشته باشد. اما نمی‌توان با بهبود تدریجی به آن رسید و چاره‌ای نیست جزاین که دل‌کندن از نقطه‌ی بهینه‌ی فعلی را بپذیریم و قبول کنیم که تا مدتی، هر گامی که برمی‌داریم، اوضاع (شاخص وضعیت فعلی) بدتر شود.

به علت همین مسئله است که آن مدیری که مشاور خود را به بهبود تدریجی شاخص وضعیت فعلی مقید می‌کند، ممکن است سازمان خود را به یک نقطه‌ی بهینه‌ی محلی، زنجیر کند. مشاور می‌بیند که هر تغییری وضعیت را بدتر می‌کند و نمی‌تواند این ریسک را بپذیرد که از نقطه‌ی فعلی هم به طور کلی جدا شود. خصوصاً این که هیچ کس تضمینی نداده است که قله‌ی بلندتری هم در کار باشد.

مسئله فروشنده دوره‌گرد

حالا که کمی با مفهوم شاخص وضعیت فعلی آشنا شدیم، می‌توانیم یک گام به پیش برویم و مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد را بررسی کنیم.

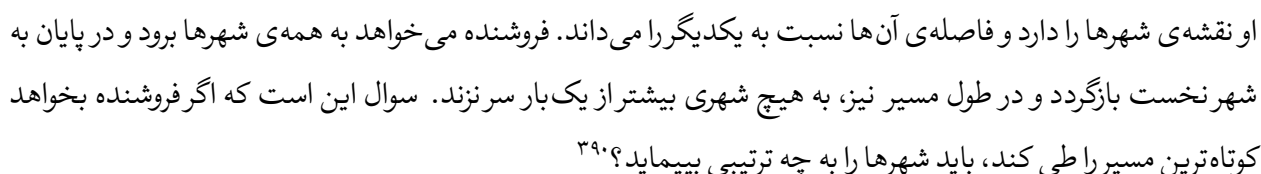
پیشاپیش باید از خواننده‌ی عزیزی که مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد را بارها به بهانه‌های مختلف در درس‌های الگوریتم و شبیه‌سازی و هوش مصنوعی خوانده و شنیده، به خاطر مطرح کردن مجدد این مسئله عذرخواهی کنم. اما هرچه فکر کردم مثالی بهتر از این پیدا نکردم که هم بتواند در آغاز مسیر با ما باشد و هم تا آخرین مراحل گفتگو درباره‌ی تکامل با ما همراه بماند.

صورت مسئله

مسئله‌ی فروشنده دوره‌گرد یا TSP^{388} مسئله‌ای کلاسیک است که شاید بتوان گفت نزدیک به دو قرن قدمت دارد³⁸⁹. صورت مسئله بر خلاف راه حل آن بسیار ساده است: یک فروشنده‌ی دوره‌گرد قرار است به تعدادی شهر سر بزند.

³⁸⁸ Travelling Salesman Problem

³⁸⁹ ویلیام روان همیلتون (که ما او را به خاطر مکانیک همیلتونی می‌شناسیم) در قرن ۱۹ این جنس مسئله را مطرح کرد. البته در ادبیات هوش مصنوعی رایج است که طرح مسئله‌ی TSP را به کارل منگر (حدود سال‌های ۱۹۳۰ میلادی) نسبت می‌دهند. چون او بود که برای نخستین بار، این مسئله را به شکلی دقیق و کامل و با چارچوب مشخص و شفاف مطرح کرد.



اگر مسئله‌ی فروشنده دوره‌گرد را چندان دوست ندارید، می‌توانید به مسئله‌ی گردش سودآور یا PTP^{391} فکر کنید. به این صورت که هزینه‌ی سفر از هر شهر به شهر دیگر را می‌دانیم. از سود حاصل از فروش در هر شهر هم اطلاع داریم. مجبور هم نیستیم الزاماً به همه‌ی شهرها سرزنیم؛ اما می‌خواهیم مسیری را پیدا کنیم که بیشترین سود را برایمان حاصل کند.

مثلاً یک بیک موتوری به خاطر تعدد مقصدها، تا اند در مبداء متوقف شده باشد و نتواند مسیر مناسب را انتخاب کند. با وجود دشواری این مسئله، تا به حال ننشیده‌ایم که هیچ انسانی به خاطر حل چنین مسئله‌ای دچار زحمت شده باشد. یا

³⁹¹ Profitable Touring Problem

چرا که ما معمولاً از خودمان انتظار نداریم بهترین پاسخ را پیدا کنیم؛ بلکه به یک پاسخ خوب راضی هستیم. همان چیزی که هربرت سایمون عنوان عقلانیت محدود^{۳۹۲} را برای آن به کار می برد. با کمی چشم پوشی از دقت علمی، می توانیم بگوییم کمال طلب ها کسانی هستند که مکانیزم عقلانیت محدود در ذهن آن ها به شکلی مناسب و اثربخش، فعال نیست.

علت دیگری هم وجود دارد که باعث شده ما انسان ها، زیر بار این مسئله یا مسئله های مشابه آن، نابود نشویم. مغز ما توانایی مهمی دارد که به نام هیوریستیک^{۳۹۳} شناخته می شود. به این معنا که از انواع تخمین ها و برآوردها و حدس ها استفاده می کند و بخش مهمی از فضای پاسخ را کنار می گذارد. در بخش باقی مانده هم، با حدس و گمان و برآوردهای سرانگشتی، راه حل مناسب را انتخاب می کند.

هرکس این روزها با تصمیم گیری و خطای شناختی آشنا باشد، می داند که درد و درمان ما انسان ها در بسیاری از انتخاب ها و تصمیم ها در همین الگوهای هیوریستیک نهفته است^{۳۹۴}.

چه الگوریتم هایی برای یافتن پاسخ این مسئله وجود دارند؟

می خواهیم الگوریتمی طراحی کنیم که این مسئله را حل کند. با کمی نمادگذاری می توان صورت این مسئله را کمی ساده تر کرد.

- فرض می کنیم هر شهر یک شماره بین ۱ تا ۱۶ دارد.
- فاصله ی هردو شهر را هم می دانیم. مثلاً می توانیم فرض کنیم $d(x,y)$ فاصله ی بین شهر شماره x و شهر شماره y را مشخص می کند.

مسیر سفر فروشنده را می توان با زنجیره ای از اعداد یک تا شانزده نمایش داد. مثلاً:

۱۴-۹-۳-۱۵-۱۶-۱۳-۱۲-۴-۲-۱-۷-۸-۶-۵-۱۱-۱۰

چون فاصله ی شهرها با یکدیگر را می دانیم، برای این زنجیره می توان شاخص وضعیت فعلی را محاسبه کرد. کافی است فاصله ی هردو شهر متوالی را استخراج کرده و همه ی فاصله ها را با هم جمع کنیم (فقط نباید فراموش کنیم که در هر زنجیر،

^{۳۹۲} Bounded Rationality

^{۳۹۳} Heuristics

^{۳۹۴} به تدریج که بحث را پیش ببریم خواهیم دید که الگویابی و معناسازی هم، میوه و حاصل همین فرایندهای هیوریستیک ذهن انسان است. شیوه ای که هم به ما در درک بهتر محیط کمک کرده و هم باعث شده که پدیده ها و روابطی را در عالم بیرون ببینیم و تشخیص دهیم که وجود خارجی ندارند.

فاصله‌ی شهر اول و آخر را هم حساب کنیم. چون براساس صورت مسئله، فروشنده می‌خواهد به شهر اول بازگردد).

اگر بخواهید این مسئله را شبیه شیوه‌ی مرد نابینا حل کنید، چه خواهید کرد؟

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، فضای پاسخ در این مسئله، چند صد میلیارد نقطه دارد. یعنی چند صد میلیارد رشته‌ی ۱۶ عددی می‌توانید درست کنید که هریک، جوابی به مسئله‌ی دورگرد است. اکنون شما می‌خواهید در این سرزمین که با چند صد میلیارد نقطه ساخته شده، قدم بزنید و بهترین پاسخ را بیابید.

در این جا گام برداشتن به معنای فیزیکی آن امکان‌پذیر نیست. اما اگر به خاطر داشته باشیم که مفهوم گام برداشتن یعنی تغییری کوچک در وضعیت موجود، آن‌گاه می‌توانیم هر تغییر کوچکی در رشته‌ی شانزده‌گانه‌ی اعداد را یک گام فرض کنیم. دوباره به رشته‌ی شهرها نگاه کنید:

۱۰-۱۱-۵-۶-۸-۷-۱-۲-۴-۱۲-۱۳-۱۶-۱۵-۳-۹-۱۴

فرض کنیم مسافتی که در این حالت طی می‌شود (شاخص وضعیت موجود)، ۱۰۰۰ واحد است. شما به صورت تصادفی، در فضای پاسخ یک گام حرکت می‌کنید. یعنی به نقطه‌ی دیگری در نزدیکی پاسخ فعلی می‌روید. مثلاً دو عدد در رشته‌ی بالا را جابجا می‌کنیم:

۱۰-۱۱-۵-۶-۸-۷-۱-۲-۴-۱۲-۱۳-۱۶-۱۵-۳-۹-۱۴

حالا دوباره بررسی می‌کنیم که شاخص وضعیت موجود چه تغییری خواهد کرد. اگر کاهش یافت و مثلاً به ۹۹۰ رسید، می‌توانیم بگوییم گام موفق‌تری برداشته‌ایم. حالا در این نقطه‌ی جدید می‌ایستیم و تغییر تصادفی دیگری انجام می‌دهیم. اما اگر دیدیم که شاخص وضعیت موجود تغییر نکرد، به وضعیت قبلی بازمی‌گردیم و دوباره تغییری در نقطه‌ی دیگر ایجاد می‌کنیم.

در این حالت می‌توان گفت که روش تپه‌نوردی انسان نابینا برای حل مسئله‌ی فروشنده‌ی دورگرد به کار برده‌ایم. واضح است که شانس موفقیت ما در این روش به دو فاکتور بستگی دارد:

- نقطه‌ی شروع اولیه
- تغییرات تصادفی که ایجاد می‌کنیم (گام‌هایی که برمی‌داریم)

اگر قصد داشته باشید این الگوریتم را به همین شکل ساده‌ای که مطرح شد پیاده‌سازی کنید، منطقی است پس از طی

چند مرحله، دستاورد خود را جایی ثبت کنید و سپس، کل بازی را از نقطه ی تصادفی کاملاً متفاوتی آغاز کنید.

با این کار، در نهایت به تعدادی پاسخ می رسید که می توانید آن ها را با هم مقایسه کنید و بهترین مورد را، به عنوان پاسخ خوب (نه بهترین پاسخ) در نظر بگیرید.

الگوریتم ژنتیکی

اگر بتوانید شاخص سنجش وضعیت فعلی را تعریف کنید (چنان که در مسئله ی فروشنده ی دوره گرد به سادگی قابل تعریف است)، می توانید به جای راهکار تپه نوردی انسان نابینا، شیوه ی دیگری را هم به کار بگیرید. شیوه ای که به خاطر الهام گرفتن از نقش ژن ها و نیز مدل داروین، الگوریتم ژنتیکی^{۳۹۵} نام گرفته است.

فرض کنیم هزار پاسخ مختلف را به صورت تصادفی برای مسئله ی دوره گرد استخراج کرده ایم. به بیان ساده تر:

فرض کنیم شماره ی شانزده شهر را در شانزده برگه نوشته ایم و داخل یک کلاه انداخته ایم و هر بار، شانزده شماره را از داخل کلاه بیرون می کشیم و به این ترتیب، یک رشته ی شانزده گانه از شهرها به دست می آید و این بازی را ۱۰۰۰ بار انجام می دهیم و به هزار رشته می رسیم.

این ۱۰۰۰ پاسخ را به صورت تصادفی به ۵۰۰ زوج تفکیک می کنیم. زوج زیریک نمونه از این ۵۰۰ زوج هستند:

P1	۱۰	۱۱	۱۲	۷	۶	۵	۴	۳	۸	۱	۲	۹	۱۳	۱۴	۱۶	۱۵
----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----

P2	۶	۵	۲	۱۵	۱۶	۱	۳	۴	۷	۸	۱۴	۱۰	۱۲	۱۳	۹	۱۱
----	---	---	---	----	----	---	---	---	---	---	----	----	----	----	---	----

فرض کنیم از ممزوج شدن هر زوج قرار است دو فرزند حاصل شود. قاعدتاً فرزندان باید از ترکیب کدهای والدین به دست بیایند. اما چگونه آن ها را با هم ترکیب کنیم؟

روش های بسیاری برای فرزندآوری وجود دارد. من صرفاً به عنوان یک پیشنهاد، روش زیر را مطرح می کنم:

نقطه ای در رشته ی کد والدین را به صورت تصادفی انتخاب می کنیم. من به عنوان یک مثال، کد هریک از والدین را بین نقطه ی چهارم و پنجم می شکم.

^{۳۹۵ ۳۹۵} در این جا بعداً باید کمی از سوابق شکل گیری این شیوه و کارهای هالند و گلدبرگ و دیگران بگویم و بنویسم.

C1	۱۰	۱۱	۱۲	۷													
----	----	----	----	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

C2	۶	۵	۲	۱۵													
----	---	---	---	----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

این دو رشته ی جدید، قرار است فرزندان آن والدین باشند. پس هریک از فرزندان (که آن ها را با C1 و C2 نشان داده ام) می توانند باقی کد خود را از والدِ دیگرشان بگیرند. یعنی C1 که بخش اول خود را از P1 گرفته، می تواند باقیمانده ی کد را با داده های P2 پر کند.

هم چنین C2 که بخش اول خود را از P2 گرفته می تواند باقی کد را با داده های P1 پر کند.

روش پر کردن را هم این طور پیشنهاد می کنم که C1 به ترتیب کدهای P2 را بخواند و هر کدام را که نداشت، به رشته ی خود بیفزاید:

C1	۱۰	۱۱	۱۲	۷	۶	۵	۲	۱۵	۱۶	۱	۳	۴	۸	۱۴	۱۳	۹
----	----	----	----	---	---	---	---	----	----	---	---	---	---	----	----	---

به

همین شیوه می توانیم C2 را هم تکمیل کنیم:

C2	۶	۵	۲	۱۵	۱۰	۱۱	۱۲	۷	۴	۳	۸	۱	۹	۱۳	۱۴	۱۶
----	---	---	---	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	----	----	----

قبلاً P1 و P2 داشتیم و الان C1 و C2 به خانواده ی آن ها افزوده شده است. پس ۱۰۰۰ کدِ اولیه ی ما، اکنون به ۲۰۰۰ کد تبدیل شده است (چون هر زوج والدین، یک زوج فرزند آورده اند).

با توجه به این که دوست داریم در بخش محدودی از فضای پاسخ گرفتار نشویم و از والدین اولیه به خوبی فاصله بگیریم، باید مکانیزمی هم در نظر داشته باشیم که بعضی از فرزندان، بتوانند مسیر متفاوتی را طی کنند.

به عنوان مثال با یک احتمال کم (مثلاً دو یا سه یا چهار درصد) به صورت کاملاً تصادفی، دو نقطه از رشته ی کد یکی از فرزندان را جابجا کنیم. در الگوریتم ژنتیک، این تغییر را با الهام از طبیعت، جهش ژنتیکی می نامند.

حالا می توانیم برای هریک از این ۲۰۰۰ نفر، یک بار شاخص وضعیت فعلی را محاسبه کنیم و در واقع، ببینیم هریک از آن ها به چه میزان، یک پاسخ خوب برای مسئله ی دوره گرد محسوب می شوند.

به هر حال، دنیای الگوریتم و برنامه نویسی هم مثل دنیای واقعی محدودیت فضا دارد و ما نمی توانیم میزبان همه ی ۲۰۰۰ نفر (والدین و فرزندان) باشیم. باید به شیوه ای، هزار نفر را حذف کنیم و کنار بگذاریم تا جمعیت پاسخ هایمان، ثابت بماند.

در این جا انتخاب با شماست تا ببینید بر چه اساس می خواهید ۱۰۰۰ پاسخ را حذف کنید. یکی از ساده ترین روش ها این است که بر اساس شاخص وضعیت فعلی، بدون توجه به این که هر کد به گروه والدین تعلق دارد یا فرزندان، هزار عضوی را که شاخص وضعیت فعلی پایین تری دارند، حذف کنیم.

پس از این کار، یک جامعه ی هزار نفری از دوره گرد ها داریم که در مقایسه با جامعه ی قبلی، در وضعیت بهتری قرار دارد.

با تکرار این شیوه (شاید برای صدها یا هزاران بار)، به تدریج می توانیم به مجموعه پاسخ های بهتری دست پیدا کنیم.

اکولوژی

سیستم ها در مسیر تکامل شان، به نقطه ای می رسند که برای خود مرز می سازند.

«من و هرآن چه جز من» برایشان معنا پیدا می کند.

«درون و بیرون» در جهان شان شکل می گیرد.

مفهوم «جهان اطراف» را تجربه و درک می کنند.

و مهم تر از همه این که می فهمند محیط شان، لبریز از سیستم هایی است که مرزهای خود را ساخته اند و جهان شان را به خود و دیگری تقسیم کرده اند.

پس من که جهان را به من و محیطم تقسیم می کنم، باید بپذیرم که خود، محیط سیستمی دیگر هستم.

بازخورد گرفتن، رقابت، همکاری، تکامل و تلاش برای بقا همگی در این فضا معنا پیدا می کنند.

این جاست که به تعبیر والاس و داروین، نه بزرگترین و نه قدرت مندترین، بلکه آن هایی که خود را بهتر با محیط شان تطبیق می دهند، باقی می مانند و جهان دیگران را می سازند.

- بازخورد و سایبرنتیک
- اهمیت مفهوم کنترل
- رقابت و همکاری و نقش محدودیت منابع در آنها
- خودسازمان دهی و مکانیزم هایی که با تنازع برای بقا توصیف نمی شوند
- چرا زندگی در مرز نظم و آشوب شکل می گیرد؟

پیشرفت انسان برای او صرفاً فرصت‌های جدید ایجاد نمی‌کند؛ بلکه محدودیت‌های جدید هم برایش به همراه خواهد داشت.

اطلاعات نه از جنس ماده است و نه انرژی. اطلاعات، اطلاعات است و باید آن را به عنوان عنصری سوم در کنار آن دو ببینیم.

گونه‌ی انسان محیط خود را چنان تغییر داده است که اکنون برای زندگی در محیط جدید، وادار شده خود را تغییر بدهد.

نوربرت وینر

اگر بخواهیم در کنار نام تورینگ و فون نویمان، نام سومی قرار دهیم که در مقیاس آنها در ساختن آنچه امروز داریم نقش داشته باشد، نوربرت وینر^{۳۹۶} یکی از بهترین گزینه‌هاست. فکرمی‌کنم کار استیوهایمز هم که زندگی‌نامه‌ی آن دو را با هم نوشت و در یک کتاب جا داد، ادعای من را تأیید می‌کند^{۳۹۷}.

نوربرت وینر در ۱۸۹۴ به دنیا آمد^{۳۹۸}. جوان‌ترین فارغ‌التحصیل دکترا در تمام تاریخ دانشگاه هاروارد است.

با مرور به تاریخ علم در قرون اخیر - با کمی اغماض و کلی‌گویی - می‌توان به این نتیجه رسید که دو نیروی بزرگ علم را به پیش برده‌اند. یکی عشق و دیگری ترس.

عشق باعث شده که برخی دانشمندان زندگی را صرف کشف دنیای اطراف خود کنند و بکوشند جهان را بهتر بشناسند. ترس باعث شده که دولت‌ها برای پیشرفت علم سرمایه‌گذاری کنند و دانشمندان را برای پیشبرد اهداف‌شان در اختیار بگیرند.

یک نمونه‌ی زیبا از این دوگانه، بولتزمن و شنون است. بولتزمن عاشق فهمیدن جهان بود و چنان به این کار مشغول شد که خود را پیش پای خود قربانی کرد. شنون اما در جنگ جهانی دوم می‌کوشید پیام‌های سری را رمزنگاری و رمزگشایی کند. جالب اینکه این هر دو در نهایت به یک نقطه رسیدند و فرمول‌های مشابهی را استخراج کردند که امروز آن را انتروپی می‌نامیم.

³⁹⁶ Norbert Wiener

³⁹⁷ HEIMS, S. J. (1987). John von Neumann and Norbert Wiener: From mathematics to the technologies of life and death. Cambridge, MA: The MIT Press.

³⁹⁸ وینر، شش سال قبل از این که نیچه بمیرد به دنیا آمد. البته این دو هیچ ارتباط خاصی با هم ندارند. اما من سال ۱۹۰۰ را نه به عنوان آستانه‌ی ورود به قرن بیستم، بلکه به عنوان سال درگذشت نیچه می‌شناسم و تاریخ‌های حوالی آن را با سال مرگ نیچه می‌سنجم.

اما نوربرت وینر از این جهت جذاب است که هر دو سبک را زندگی کرده است. او در جنگ جهانی دوم، در طراحی سیستم‌های کنترل جهت و پرتاب ضد هوایی فعال بود و در همین مسیر، تقریباً موازی با شنون و به صورت مستقل، نظریه‌ی اطلاعات را توسعه داد. اما بعد از جنگ، چنان عاشق زیست‌شناسی شد که وارد معادلات و معاملات علمی جنگ سرد نشد و ترجیح داد زندگی را به درک بهتر طبیعت با استفاده از ریاضی - ابزاری که به خوبی آن را می‌شناخت و می‌فهمید - بپردازد.

از دوران کودکی و نوجوانی آن قدر کتاب خوانده بود که چشمش گه‌گاه توانایی دیدن را از دست می‌داد. اما او همچنان از ظرفیت سیستم بینایی‌اش برای دیدن و فهمیدن استفاده کرد.

او در سال ۱۹۶۴ مرد و وقتی در کتاب‌هایش از دهه‌ی هشتاد و نود میلادی حرف می‌زند، باید مدام به خاطر داشته باشید که از قرن نوزدهم (سالهای ۱۸۸۰ و ۱۸۹۰) می‌گوید و نه قرن بیستم. اما با وجودی که اکنون نزدیک به هفتاد سال از نگارش مطرح‌ترین کتاب‌هایش می‌گذرد، هنوز می‌توانید آنها را با لذت تمام بخوانید و به ندرت حس کنید که با کتابی قدیمی مواجه هستید.

شبکه ها و توپولوژی

انسان با توسعه ی دانش و تکنولوژی، توانست نسل جدیدی از موجودات زنده را خلق کند. اقتصاد، بازار، مخابرات، اینترنت، شبکه های اجتماعی، بنگاه های اقتصادی و دولت ها، تنها نمونه هایی از فرزندانِ نوینِ انسان هستند.

فرزندانی که گاه چنان برومند شده اند که ما خود با شگفتی به آن ها نگاه می کنیم و رفتار و نگاه شان را نمی فهمیم.

وضعیتی که هر پدر و مادری در روبرویی با فرزندانش – البته در مقیاسی کوچک تر و ساده تر – تجربه می کند.

جهان گذشته را فاصله های فیزیکی می ساخت و جهان جدید را پیوندها می سازند. دیگر مهم نیست تو کجایی و من کجا هستم. مهم این است که به هم وصل هستیم یا نیستیم.

تلفن، ایمیل، دوستی های شبکه های اجتماعی، قراردادهای تجاری، معامله ها، انتقال های پولی، همگی یک ویژگی مشترک دارند: فاصله چندان مهم نیست؛ بودن یا نبودن پیوند است که اهمیت پیدا می کند.

می توان گفت نظریه شبکه ها و توپولوژی، تلاش انسان برای درک بهترِ ساخته های خویش است: فرزندانی که امروز از توانِ درکِ مادر و پدر، فراتر رفته اند.

- منظور از شبکه چیست؟
- چرا شبکه‌ها برای ما مهم هستند؟
- چرا کانکتوگرافی امروز مهم شده در حالی که قبلاً جغرافی مهم‌تر بوده؟
- چه اطلاعاتی از شبکه‌ها قابل استخراج است؟
- شبکه‌های اجتماعی را چگونه تحلیل و ارزیابی و ارزش‌گذاری می‌کنند؟
- دینامیک شکل‌گیری کمپین‌ها چیست؟
- وقتی بلاک چین را با عینک پیچیدگی نگاه کنیم، چه می‌بینیم؟

هوشمندی / زندگی / اراده

چشم / آگاهی / معنا

سیستم های پیچیده در مسیر تکامل خود، به نقطه ای می رسند که زمان و مکان را با هم پیوند می زنند. این جاست که سنگ، گیاه، انسان و اقتصاد، به تدریج از یکدیگر فاصله می گیرند.

وضعیت سنگ در این لحظه مشخص است؛ اما او نمی داند که چگونه به این جا رسیده است. در مقابل، گیاه و انسان و اقتصاد، ردپای گذشته را درون خود «حفظ» می کنند؛ همان چیزی که به آن «حافظه» می گویند.

من امروز این جا هستم؛ اما «به خاطر دارم» که دیروز در مکان دیگری بودم و احتمالاً فردا در نقطه ی دیگری خواهم بود.

حالا که من گذشته و حال را می دانم باید بتوانم آینده را دقیقاً پیش بینی کنم. اما سیستم های بسیاری هستند که در دستگاه علت و معلول من نمی گنجند. وضعیت و محیط شان را می بینم و می فهمم، اما نمی توانم رفتارشان را کامل پیش بینی کنم.

پس حتماً چیزی در درون خود دارند که از چشم من پنهان است. آن ها از خود اراده دارند و اگر اراده را به معادلاتم بیفزایم، می توانم شکاف بین «آن چه می بینم و می فهمم» و «آن چه روی می دهد و نمی فهمم» را پر کنم.

- چشم به عنوان یک دستاورد مهم در سیستم‌های پیچیده
- رابطه‌ی چشم با آن چه نوربرت وینر در سایبرنتیک می‌گفت
- چرا ما هوشمندی را فقط با معیار هوش انسانی تعریف می‌کنیم؟
- تفاوت آگاهی و هوش چیست؟
- آیا برای خودآگاهی می‌توان تعریفی علمی ارائه کرد؟
- چرا گرفتار بحث جبر و اختیار مانده‌ایم؟
- مفهوم Agency
- انسان ماشین جستجوی الگوهاست
- معنایابی، به عنوان جستجو، تعریف و تشخیص الگوها در یک سیستم است.

جهانی بدون مرز و مرکز

گذشتگان ما، قرن ها فرض کردند که خورشید به دور زمین می گردد. این فرض البته به آن ها برای معنا دادن بهتر به آن چه می دیدند کمک کرد؛ اما هم زمان باعث شد که چشم شان بر روی چیزهای بسیار بیشتری که ممکن بود ببینند بسته شود.

نگرش «زمین مرکزی» و پس از آن «انسان مرکزی» هریک نگاه ما را بر روی بخش کوچکی از واقعیت ها باز کردند و البته چشم مان را بر روی بخش بزرگ تری از واقعیت ها بستند.

خرد کردن بدن انسان به اندام ها و ارگان های مختلف و تکه تکه کردن علم به شاخه های مختلف نیز، اقدام دیگری بود که هم زمان فرصت ها و محدودیت های جدیدی را برای درک انسان و جهان در اختیار ما گذاشت.

همه ی آن چه درباره ی پیچیدگی و در فضای سیستم های پیچیده می آموزیم، باید به ما کمک کند تا به خاطر داشته باشیم که مرز و مرکز، دو مفهوم قراردادی هستند که ما برای فهم ساده تر خود و جهان اطراف به کار می بریم.

دنیا، اگر از چشم انسان به آن نگاه نکنیم، مجموعه ی بسته و پیوسته ی درهم تنیده ایست که هر روز بیشتر از پیش، خود را می شناسد و می بیند و می فهمد و شاید هم زمانی، همه ی آن چه را که دیده و فهمیده به فراموشی بسپارد.

- جهان بدون مرز در اقتصاد چه معنایی پیدا می کند؟
- نگاه بدون مرکز چگونه به درک بهتر تحولات اجتماعی و سیاسی کمک می کند؟
- چرا نگاه سنتی، به سمت توهم توطئه می رود؟
- چرا با درک پیچیدگی، به نتیجه می رسیم که کوتاه ترین راه برای رسیدن به هدف ها، پیگیری مستقیم آن ها نیست؟
- زندگی با جهان یا زندگی در جهان یا زندگی جهان؟

