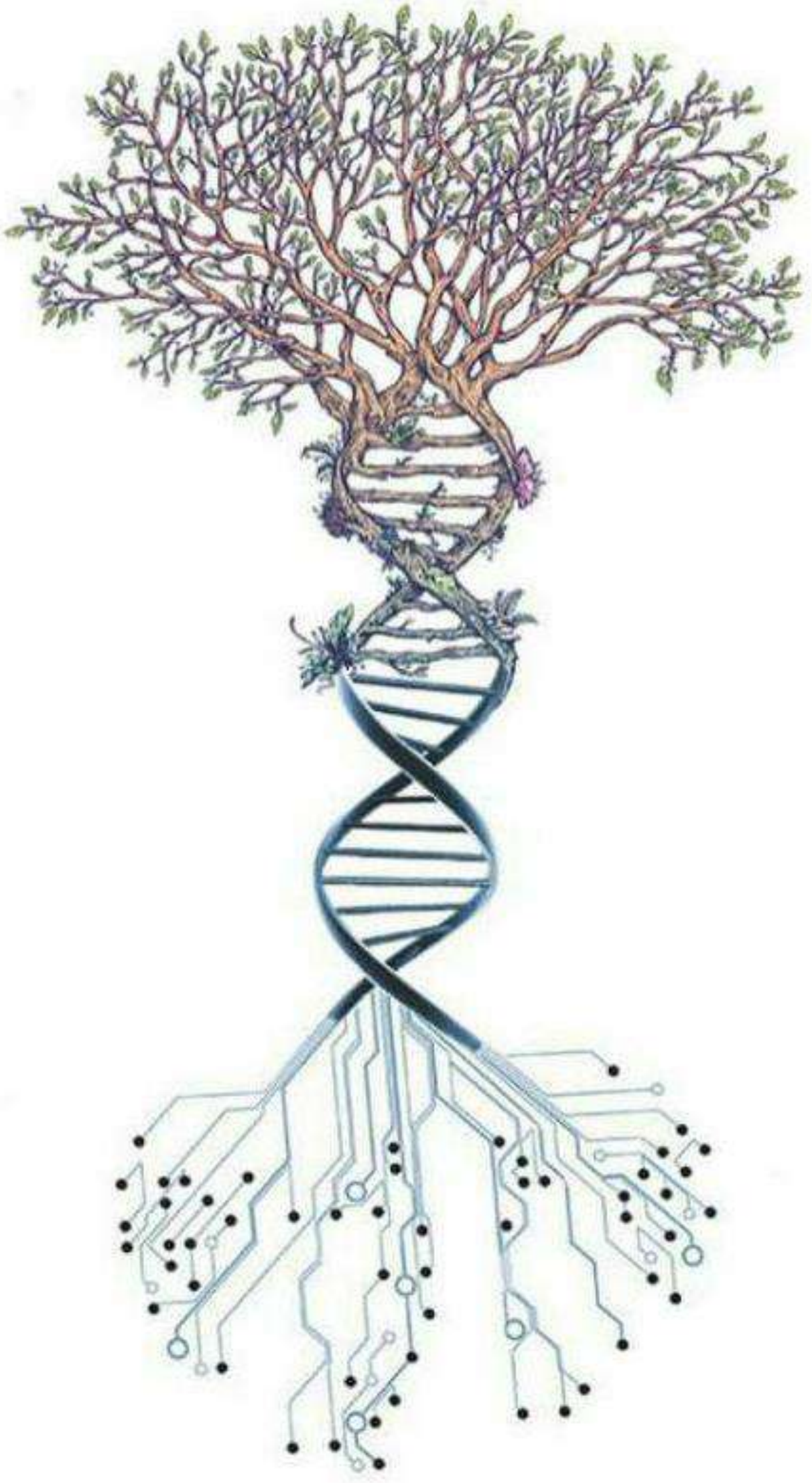
سیری در

نظریهٔ پیچیدگی

ملانی میچل

ترجمهٔ رضا امیر رحیمی



برندهٔ جایزهٔ فی بتا کاپا ۲۰۱۰

آزادی آنجاست که شک و تردید باشد.

سعید فرهادی
@degar_goonesh

#مهسا _ امینی
#زن _ زندگی _ آزادی

سیری در نظریه پیچیدگی

نویسنده: ملانی میچل

مترجم: رضا امیررحیمی

نشرنو

پیشگفتار

تقلیل‌گرایی[۱] ساده‌ترین موضوع قابل فهم در دنیاست. و به وضوح حکایت از این باور دارد که "یک کل را می‌توان به طور کامل فهمید، به شرط آن‌که اجزای آن، و نوع "جمع بستن " آنها فهمیده شده باشد."

هیچ‌کس نمی‌تواند در نیمکره چپ مغزش تقلیل‌گرایی را رد کند.

داگلاس هوفستادر، گودل، اشر، باخ:

أمیزه‌ای گرانبها و ابدی (۱) تقلیل‌گرایی از قرن هفدهم رویکرد حاکم بر علم بوده است. رنه دکارت که یکی از اولین حامیان تقلیل‌گرایی بود، روش علمی خود را به این شرح توضیح داد: "تقسیم مشکلات تحت مطالعه به اجزا، تا آنجا که امکان‌پذیر است، و تا آنجا که لازمه حل آنها به بهترین شیوه است" و "هدایت افکارم به ترتیبی معین، که با ساده‌ترین و قابل فهم‌ترین چیزها آغاز شود، و به تدریج، به عبارتی گام به گام، تا کسب دانش پیچیده‌ترین امور اوج بگیرد."(۲)

از زمان دکارت و نیوتون و سایر بنیادگذاران روش علمی مدرن، تا آغاز قرن بیستم، یکی از هدف‌های اصلی علم توضیح تقلیل‌گرایانه همه پدیده‌ها بر مبنای فیزیک بنیادی[۲] بوده است.

در سال ۱۸۹۴ فیزیکدان آلبرت مایکلسون[۳]" نظر مشهور خود را ابراز کرد: "امکان دارد اکثر اصول اساسی و با اهمیت علم به طور قطع اثبات شده باشند و پیشرفت‌های بعدی را باید عمدتا در کاربرد این اصول در تمامی پدیده‌هایی جستجو کرد که در مرکز توجه ما قرار (۳)."می گیرند این نظر او با استقبال اکثر فیزیکدانان اواخر قرن نوزدهم روبرو شد.

البته در دوره سی ساله‌ای که به دنبال این نظر سپری شد کشف نسبیت و مکانیک کوانتوم در فیزیک انقلابی به راه انداخت. اما افول رؤیای تقلیل‌گرایی نیز بر علم قرن بیستم بی‌تأثیر نبود. هم فیزیک بنیادی، و هم به‌طورکلی‌تر، تقلیل‌گرایی علمی، به رغم موفقیت‌های عظیم در توضیح امور خیلی کوچک و خیلی بزرگ، در توضیح گونه‌ای از پدیده‌های پیچیده عاجز مانده‌اند که از قضا به آن دسته از علائق ما که از مقیاس انسانی برخوردارند، از همه نزدیک‌ترند.

بسیاری از پدیده‌ها روش تقلیل‌گرا را به بن‌بست کشیده‌اند:

پیش‌بینی‌ناپذیری وضعیت آب و هوا و شرایط اقلیمی؛ ظرافت‌ها و طبیعت انطباق‌پذیر[۴] اندام‌واره‌های[۵] زنده و بیماری‌هایی که آنها را تهدید می کنند؛ رفتار اقتصادی، سیاسی، و فرهنگی جوامع؛ رشد و تأثیرات فناوری و شبکه‌های ارتباطی مدرن؛ و طبیعت هوش و دورنمای خلق آن در کامپیوترها. علوم جدیدی مانند آشوب[۶]"، زیست‌شناسی سیستم‌ها[۷]"، اقتصاد تکاملی[۸]، و نظریه شبکه[۹] به ورای تقلیل‌گرایی گذار می کنند تا توضیح دهند چگونه از مجموعه‌های بزرگ اجزای ساده، رفتار پیچیده سر می‌زند. در این شرایط عبارت "کل چیزی بیش از مجموعه اجزایش است" که تکیه‌کلام ضد تقلیل‌گراست اهمیت تازه‌ای می‌یابد.

تا میانه قرن بیستم بسیاری از دانشمندان پی برده بودند که چنین پدیده‌هایی را نمی‌توان به یک رشته علمی واحد محدود کرد، بلکه مستلزم فهمی چندرشته‌ای[۱۰] مبتنی بر بنیان‌هایی علمی هستند که هنوز ابداع نشده‌اند. پاره‌ای از تلاش‌ها برای ساخت چنین بنیان‌هایی، از جمله، شامل علم سیبرنتیک[۱۱]، علم هم‌افزایی[۱۲]، علم سیستم‌ها، و تازه در این اواخر علم سیستم‌های پیچیده بوده است.

پیشگفتار

در سال ۱۹۸۴، گروهی ناهمگون و چندرشته‌ای از بیست و چهار دانشمند و ریاضیدان در صحرای مرتفع سانتا فه[۱۳]، در نیومکزیکو[۱۴]، گرد هم آمدند تا این "ترکیب‌های[۱۵]" نوظهور علم" را به بحث بگذارند.(۴) هدف آنها بنیادگذاری مؤسسه تحقیقاتی جدیدی بود که "درباره تعداد بیشماری از سیستم‌های بسیار پیچیده و برهم‌کنش[۱۶]" که تنها در محیطی چندرشته‌ای قابل مطالعه هستند به پژوهش بپردازد" و "در مقابله با قطبی شدن فزاینده کنونی در میان گرایش‌های فکری به تقویت وحدت دانش و تشخیص مسئولیت مشترک در قبال آن(۵). بپردازد به این ترتیب انستیتوی سانتافه، به عنوان مرکزی برای مطالعه سیستم‌های پیچیده تأسیس شد.

در سال ۱۹۸۴ هنوز اصطلاح سیستم‌های پیچیده را نشنیده بودم، گرچه این‌گونه اندیشه‌ها پیش از آن به فکرم راه یافته بودند. دانشجوی سال اول دوره تحصیلات تکمیلی علوم کامپیوتر در دانشگاه میشیگان بودم، و هدفم مطالعه بر روی هوش مصنوعی بود[۱۷]؛ یعنی این‌که چگونه کامپیوترها را وادار‌یم مانند آدم‌ها فکر کنند. یکی از انگیزه‌های من درواقع این بود که بفهمم آدم‌ها چگونه فکر می‌کنند، و خردورزی، عواطف، خلاقیت، و حتی آگاهی انتزاعی از چندین تریلیون سلول کوچک مغز و ارتباط شیمیایی و الکتریکی آنها چگونه پدیدار می‌شوند. منی که عمیقا شیفته اهداف فیزیک و تقلیل‌گرا بودم، داشتم ظهور ضدتقلیل‌گرایی خاص خودم را تجربه می‌کردم، و می‌فهمیدم که گذشته از فیزیک آن روز که درباره موضوع هوش، اگرنه هیچ حرفی، حرف کمی برای گفتن داشت، حتی علم اعصاب هم که عملا بر سلول‌های مغزی متمرکز بود، درک چندانی از این که تفکر چگونه از کنش مغز پدیدار می‌شود، نداشت. رفته رفته برایم روشن می‌شد که رویکرد تقلیل‌گرایانه شناخت سخت در اشتباه است -موضوع صرفا در سطح نورون‌ها، سیناپس‌های منفرد، و مانند آنها، قابل فهم نبود.

در نتیجه، گرچه هنوز ابعاد ماجرا برایم روشن نبود، موضوع سیستم‌های پیچیده برایم جالب شده بود. درعین‌حال احساس می‌کردم رشته تحصیلی خود من، علم کامپیوتر، امکان منحصربفردی برای عرضه دارد. تحت تأثیر پیشگامان اولیه محاسبه[۱۸]'، حس می‌کردم محاسبه در مقام اندیشه، موضوعی است بسیار عمیق‌تر از سیستم‌های عامل و زبان‌های برنامه‌سازی و پایگاه‌های داده‌ها[۱۹]، و مانند آنها؛ اندیشه‌های عمیق محاسبه با اندیشه‌های عمیق حیات و هوش از نزدیک مربوط هستند. از بخت بلند من، در میشیگان در یک گروه آموزشی تحصیل می‌کردم که در برنامه درسی‌اش، "محاسبه در سیستم‌های طبیعی" به همان اندازه مهندسی نرم‌افزار و طراحی همگردان[۲۰]" از اهمیت برخوردار بود.

در سال ۱۹۸۹، در آغاز آخرین سال تحصیلات تکمیلی‌ام، از راهنمای پایان‌نامه دکترایم، داگلاس

هوفستادر، دعوت شد که در کنفرانسی در لوس‌آلاموس[۲۱]"، در نیومکزیکو، در مورد "محاسبه نوظهور[۲۲]، سخنرانی کند. (۶) او خیلی گرفتار بود و مرا به جای خودش فرستاد. از این که کارم را در چنین کنفرانس سطح بالایی ارائه کنم هم هیجان‌زده شده و هم به وحشت افتاده بودم. در این گردهمایی بود که برای اولین بار با گروه بزرگی از کسانی مواجه شدم که ذهن‌شان مشغول همان ایده‌هایی بود که من به آنها اندیشیده بودم.

پی بردم که نه تنها نامی برای این مجموعه از اندیشه‌ها دارند - یعنی سیستم‌های پیچیده - بلکه مؤسسه آنها که در سانتافه در همان حوالی قرار داشت، دقیقا همان جایی بود که می‌خواستم باشم. مصمم شدم که به هر شکلی شغلی در آنجا پیدا کنم.

پیگیری من، و بودنم در زمان و مکان مناسب به این انجامید که دعوت‌نامه‌ای دریافت کنم تا تمام تابستان را در انستیتوی سانتافه باشم.

تابستان به سال کشید و سال به سال‌هایی بیشتر. سرانجام یکی از اعضای هیئت علمی این مؤسسه شدم. افرادی از ملیت‌ها و تخصص‌های مختلف در آنجا حضور داشتند که همگی جنبه‌های متفاوت پرسش واحدی را می‌کاویدند: چگونه به فراسوی پارادایم[۲۳] سنتی تقلیل‌گرایی و به سوی فهم جدیدی از سیستم‌هایی گام برداریم که ظاهرا به طور کاستی‌ناپذیری پیچیده‌اند.

ایده نوشتن این کتاب وقتی شکل گرفت که برای سخنرانی یادبود الم در سانتافه از من دعوت شد - مجموعه سخنرانی‌های سالانه‌ای در مورد سیستم‌های پیچیده برای عموم، که به یادبود ریاضیدان بزرگ استانیسلاو الم[۲۴] برگذار می‌شود. عنوان رشته سخنرانی‌های من این بود: "گذشته و آینده علوم پیچیدگی". سردرآوردن از این که قلمرو گسترده پیچیدگی را چگونه برای مخاطبینی غیرمتخصص مطرح کنم و آنها را با آنچه تا آن زمان شناخته شده بود، و حجم دلهره‌آور آنچه که ناشناخته به جا مانده بود، آشنا سازم، چالش بزرگی بود. نقش من مانند راهنمای گردشگری در کشوری بیگانه بود که پهناور و از نظر فرهنگی غنی است. در برنامه بازدید ما زمان بسیار فشرده‌ای برای توضیح درباره پیشینه تاریخی، دیدار از اماکن مهم، و آشنا شدن با مناظر و فرهنگ قابل برنامه‌ریزی بود، و فقط در مواقع لزوم می‌بایست مطالبی از زبان بومی ترجمه شود.

این کتاب درواقع به این منظور نوشته شد که نسخه بسیار تعمیم‌یافته‌ای از آن سخنرانی‌ها باشد - نسخه‌ای از آن "گردش" که بر روی کاغذ آمده است.

کتاب درباره پرسش‌هایی است که من و عده‌ای دیگر را در جامعه سیستم‌های پیچیده، درگذشته و حال، مجذوب خود کرده است: چگونه است که آن سیستم‌هایی در طبیعت که پیچیده و انطباق‌پذیر نامیده می‌شوند _ مغزها، جوامع[۲۵]" حشرات، سیستم ایمنی[۲۶]، سلول‌ها،

اقتصاد جهانی، تکامل زیست‌شناختی - چنین رفتار پیچیده‌ای را بر مبنای قواعد زیربنایی ساده‌ای شکل می‌دهند؟ چگونه اندام‌واره‌های وابسته به هم، اما منفعت‌جو[۲۷]، می‌توانند کنار هم قرار گیرند تا در حل مسائلی همکاری کنند که بقای آنها را در کل تحت تأثیر قرار می‌دهد؟ آیا اصول یا قوانین عمومیی وجود دارد که در چنین پدیده‌هایی کاربرد داشته باشد؟ و آیا می‌توان حیات و هوش و انطباق[۲۸] را به صورت ماشین‌وار[۲۹] و محاسباتی[۳۰] فهمید؟ اگر این‌طور است، آیا واقعا می‌توانیم ماشین‌های هوشمند و زنده را بسازیم؟ اگر هم بتوانیم، آیا می‌خواهیم این کار را بکنیم؟

این را فهمیده‌ام که وقتی مرز بین رشته‌های علمی محو بشود درون‌مایه گفتار علمی نیز مبهم‌تر می‌شود. افراد فعال در رشته سیستم‌های پیچیده درباره بسیاری از مفاهیم گنگ و نادقیق حرف می‌زنند، مانند نظم خودانگیخته[۳۱]"، خودسامانی[۳۲]، و پیدایش[۳۳] (همچنین خود "پیچیدگی"(۷). هدف اصلی این کتاب فراهم کردن تصویر روشن‌تری از این است که این آدم‌ها از چه حرف می‌زنند، و طرح این پرسش است که آیا امکان دارد این‌گونه مفاهیم و روش‌های چندرشته‌ای به علمی مفید و اندیشه‌های جدیدی برای پرداختن به مشکل‌ترین مسائل پیش رو بینجامند؟، مانند گسترش بیماری‌ها، توزیع نابرابر منابع طبیعی و اقتصادی دنیا، گسترش تسلیحات و منازعات، و تأثیرات جامعه انسانی بر محیط‌زیست و آب و هوا.

فصل‌هایی که به دنبال می‌آیند گشتی با راهنما فراهم می‌کنند، که رنگ و بوی نقطه‌نظر مرا درباره ایده‌های علوم پیچیدگی با خود دارد - این ایده‌ها از کجا منشأ می‌گیرند و به کدام سو روانند. مانند هر قلمرو علمی نوظهور و رو به گسترش و حیاتی، نظرات اشخاص درباره این‌که ایده‌های اساسی کدامند، اهمیت آنها چیست، و به کجا می‌انجامند تفاوت می‌کند (و این کمترین چیزی است که می‌توان گفت(۸). از این‌رو نقطه‌نظر من ممکن است با همکارانم تفاوت داشته باشد. بخش مهمی از این کتاب توضیح برخی از آن اختلاف‌نظرهاست، و من نهایت کوششم را می‌کنم که نظری اجمالی از موضوعاتی فراهم آورم که همه ما از آنها بی‌اطلاع هستیم، یا اندک اندک داریم اطلاعی از آنها کسب می‌کنیم. چیزهایی هستند که این‌گونه علم را بسیار هیجان‌آور و لذت‌بخش و ارزشمند می‌کنند، هم برای این‌که آن را به کار ببندیم و هم برای این‌که از آن شناخت پیدا کنیم. از همه‌چیز گذشته، امیدوارم بتوانم گیرایی عمیق این ایده‌ها و مناظره‌ها، و هیجان بی‌نظیر دنبال کردن آنها را به خواننده منتقل کنم.

این کتاب پنج بخش دارد. در بخش اول زمینه‌ای را درباره پیشینه و درون‌مایه چهار حیطه موضوعی مطرح می‌کنم که برای مطالعه سیستم‌های پیچیده اساسی است: اطلاعات، محاسبه، دینامیک[۳۴] و آشوب، تکامل. در بخش‌های دوم تا چهارم توضیح می‌دهم که چگونه می‌توان در کامپیوترها[۳۵] حیات و تکامل را شبیه‌سازی کرد، و به طور عکس، خود مفهوم

محاسبه در توضیح رفتار سیستم‌های طبیعی چگونه معنی می‌دهد. علم جدید شبکه‌ها و این‌که چگونه در میان سیستم‌های بسیار متفاوت همانندی‌های[۳۶]" عمیقی را می‌یابد بررسی خواهیم کرد، سیستم‌هایی از قبیل گروه‌های اجتماعی، اینترنت، بیماری‌های همه‌گیر، و سیستم‌های سوخت و ساز[۳۷] اندام‌واره‌ها.

چندین مثال را توضیح خواهم داد که نشان می‌دهند چگونه می‌توان پیچیدگی را در طبیعت اندازه گرفت، چگونه پیچیدگی دیدگاه ما را در مورد سیستم‌های زنده تغییر می‌دهد، و چگونه این دیدگاه جدید ممکن است بر طراحی ماشین‌های هوشمند تأثیر بگذارد. نگاهی می‌اندازم به چشم‌اندازهای مدل‌سازی کامپیوتری سیستم‌های پیچیده، همچنین به مخاطرات این‌گونه مدل‌ها. سرانجام، در بخش آخر به مسئله بزرگتر جستجوی اصول عمومی در علوم پیچیدگی می‌پردازم.

برای فهمیدن آنچه به دنبال می‌آید هیچ پیش‌نیاز ریاضی یا علمی لازم نیست. در هر حال در اکتشاف‌های هر دو آنها شما را به آرامی و با دقت راهنمایی خواهم کرد. امیدوارم این کتاب هم برای دانشمندان و هم غیر دانشمندان ارزش خواندن را داشته باشد. گرچه مطلب فنی نیست، کوشیده‌ام که در همه موارد به صورت بنیادی به موضوع بپردازم. برای کسانی که خواهان مطالعه عمیق‌تری هستند، یادداشت‌ها و منابع مرجعی را برای نقل‌قول‌ها و اطلاعات اضافی برای مباحث، و اشاره به مقالات علمی فراهم می‌کنند.

آیا در مورد علوم پیچیدگی کنجکاو بوده‌اید؟ دوست دارید به این گشت با راهنما بپیوندید؟ پس بیایید گشت‌مان را آغاز کنیم.

بخش اول: پس‌زمینه و تاریخچه

علم، عالم خرد[۳۸] و عالم کلان[۳۹] را اکتشاف کرده است؛ برداشت خوبی از وضعیت آنها داریم. مرز بزرگ نامکشوف پیچیدگی است.

هاینز پاگلز، رؤیاهای خرد (۱)

فصل یکم: پیچیدگی چیست؟

ایده‌هایی را که بدین ترتیب از کنار هم گذاردن چندین ایده ساده شکل گرفته‌اند پیچیده می‌نامم؛ چیزهایی مانند زیبایی، قدردانی، انسان، ارتش، جهان هستی.

جان لاک، جستار درباره ف انسانی (۱)

برزیل: جنگل استوایی آمازون. ارتشی متشکل از نیم میلیون مورچه در حال پیشروی است. هیچ‌کس فرماندهی این ارتش را به عهده ندارد؛ فرماندهی در کار نیست. تک‌تک مورچه‌ها کمابیش کور و اندکی هوشمندند، اما مورچگان در حال پیشروی، بر روی هم توده منسجم بادبزنی شکل متحرکی را می‌سازند که به هر طعمه‌ای که بر سر راهش قرار می‌گیرد هجوم می‌برد، آن را به هلاکت می‌رساند، و به طرز کارآمدی می‌بلعد. فوج، هر چیز را که قابل بلعیدن نیست با خود حمل می‌کند. پس از یک روز غارت و انهدام هر موجود زنده قابل خوردن، در سرتاسر جنگلی انبوه به اندازه یک زمین فوتبال، مورچگان اتراقگاه شبانه‌شان را برپا می‌کنند -کلافی به مانند جوشن که از این طرف به آن طرف آن حدود نود سانتیمتر است و از بدن بهم پیوسته مورچگان کارگر ساخته شده است و نوزادان و ملکه را در پناه خود می‌گیرد. وقتی سپیده می‌زند، کلاف زنده اندک اندک آب می‌رود و مورچگان تک به تک آزاد می‌شوند تا بار دیگر جایشان را در پیشروی روزانه پر کنند.(۲)

نایجل فرانکز، زیست‌شناسی که تخصص او در رفتار مورچگان است، می‌نویسد، "تک‌تک مورچه‌های این ارتش، از جمله حیواناتی هستند که از نظر رفتاری کمترین پیچیدگی قابل تصور را دارند." و "اگر صد مورچه این ارتش را روی سطح همواری قرار دهید، روی دوایری که هیچگاه کوچک نمی‌شوند، آن‌قدر دور می‌زنند تا از خستگی (۳)". بمیرند اما نیم میلیون از آنها را کنار هم بگذارید، و این گروه در کل به چیزی تبدیل می‌شود که برخی آن را "ابراندام‌واره"[۴۰]ای می‌دانند که "هوش جمعی[۴۱]" دارد. (۲)

چگونه این اتفاق می‌افتد؟ گرچه مطالب زیادی را درباره رفتار اجتماعی مورچگان می‌دانیم، دانشمندان ساز و کارهای اساسی هوش جمعی اجتماع آنها را تمام و کمال نفهمیده‌اند. بیهوده نیست که فرانکز باز اظهارنظر می‌کند، "من ای. برکلی[۴۲] (گونه متداول ارتش مورچگان(۴) را مورد مطالعه قرار داده‌ام، و برای من اسرار سازمان اجتماعی آن به مراتب سریع‌تر از آنچه می‌توان درباره ساختار اجتماعی‌اش فهمید، افزایش می‌یابد."(۵) اسرار ارتش مورچگان نمونه کوچکی از اسرار بسیاری از سیستم‌های طبیعی و اجتماعی هستند که تصور می‌کنیم "پیچیده" هستند. هیچ‌کس به طور دقیق نمی‌داند که چگونه هر جامعه متشکل از اندام‌واره‌های اجتماعی مورچه‌ها، موریانه‌ها[۴۳]"، انسان‌ها - متشکل می‌شود تا در جمع ساختارهای تودرتویی را بسازد که احتمال بقای جامعه را در کل افزایش می‌دهد.

هیچ‌کس به طور دقیق نمی‌داند که آلات و ادوات[۴۴] سیستم ایمنی چگونه با بیماری می‌جنگند؛ چگونه گروهی از سلول‌ها خود را سازمان می‌دهند تا تبدیل به چشم یا مغز شوند؛ چگونه اعضای مستقل یک اقتصاد، که در درجه اول برای منفعت خود کار می‌کنند، بازارهای جهانی پیچیده اما ساخت‌یافته‌ای را به وجود می‌آورند؛ یا، اسرارآمیزتر از همه این‌که، چگونه پیچیدگی چیست؟

پدیده‌هایی که "هوش" و "آگاهی" می‌نامیم از شالوده‌های مادی غیرهوشمند و ناآگاه پدیدار می‌شوند.

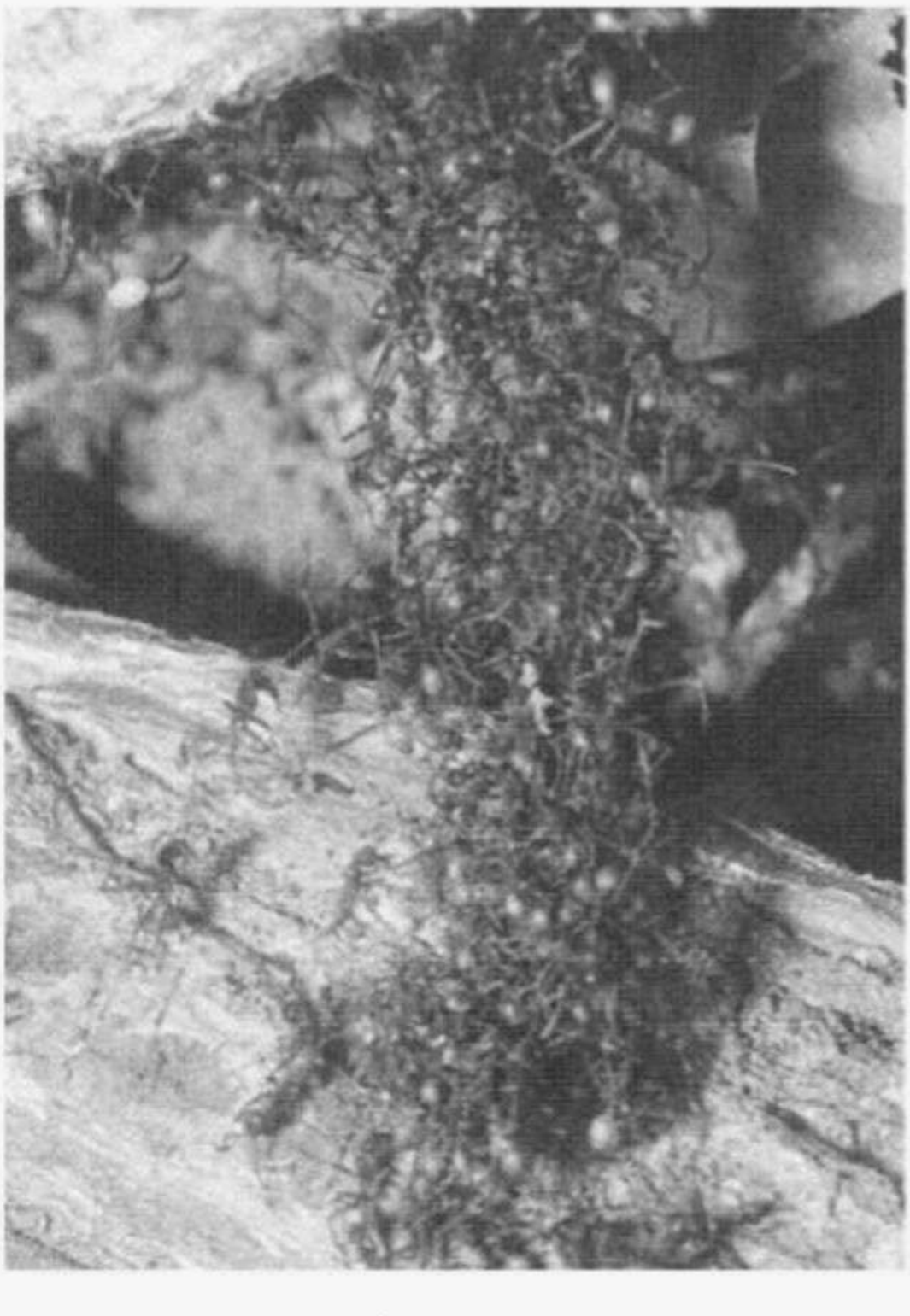
این‌گونه پرسش‌ها از جمله مباحث سیستم‌های پیچیده هستند، حیطه‌ای چندرشته‌ای از پژوهش که می‌خواهد توضیح دهد چگونه تعداد زیادی از موجودیت‌های[۴۵] نسبتا ساده، بدون برخورداری از هرگونه کنترل‌کننده مرکزی، خود را به شکل یک کل جمعی سازمان می‌دهند که الگوهایی[۴۶] را به وجود می‌آورد و اطلاعات را به کار می‌گیرد، و در مواردی تکامل می‌یابد و یاد می‌گیرد. واژه (complex l پیچیده) از ریشه لاتینی plectere می‌آید که به معنی بافتن و در هم پیچیدن است.

پژوهشگران سیستم‌های پیچیده بر این تأکید دارند که سیستم‌های پیچیده مختلف عالم، از قبیل جوامع حشرات و سیستم‌های ایمنی و مغزها و اقتصادها، همانندی‌های بسیاری دارند. بیایید موضوع را از نزدیک‌تر بررسی کنیم.

جوامع حشرات

جوامع حشرات اجتماعی از جمله غنی‌ترین و اسرارآمیزترین نمونه‌های سیستم‌های پیچیده در عالم هستند. برای مثال، یک اجتماع مورچگان می‌تواند شامل صدها تا میلیون‌ها مورچه باشد، که هر یک از آنها جانوری نسبتا ساده است که در جستجوی غذا یا واکنش ساده به سیگنال‌های شیمیایی سایر مورچه‌های اجتماع، یا مبارزه با متجاوزان و غیره، از الزامات ژنتیکی‌اش تبعیت می‌کند. اما، همان‌طور که هر مشاهده‌گر تصادفی در فضای باز می‌تواند گواهی بدهد مورچه‌های یک اجتماع، که هر کدام کنش‌های نسبتا ساده خود را به انجام می‌رسانند، در ایجاد ساختارهای پیچیده‌ای مشارکت می‌کنند که اهمیت زیادی برای بقای اجتماع در کل دارد. برای مثال، استفاده آنها از خاک و برگ و شاخه‌های کوچک برای ساخت لانه‌های عظیمی را در نظر بگیرید که استحکام و پایداری فوق‌العاده‌ای دارند، و دارای شبکه‌های بزرگی از گذرگاه‌های زیرزمینی و حجره‌های خشک و گرم و تاریکی هستند که دمای آنها را مواد در حال پوسیدن لانه و خود بدن مورچه‌ها با دقت کنترل می‌کنند. درعین‌حال، پل‌های درازی را در نظر بگیرید که گونه‌های معینی از مورچه‌ها با بدن‌های خودشان می‌سازند تا مهاجرت از یک لانه به لانه دیگر از بین شاخه‌های درخت که فاصله زیادی با هم دارند (یعنی، برای مورچه‌ها فاصله زیادی

دارند) امکان‌پذیر شود (شکل ۱-۱). گرچه در حال حاضر مطالب زیادی درباره مورچه‌ها و ساختارهای اجتماعی‌شان می‌دانیم، دانشمندان هنوز نتوانسته‌اند نه رفتار فردی و نه رفتار گروهی آنها را تمام و کمال توضیح دهند: دقیقا به چه صورت کنش‌های فردی مورچگان ساختارهای بزرگ وپیچیده را به وجود می‌آورند، چگونه مورچه‌ها به هم علامت می‌دهند، و چگونه اجتماع آنها در کل خود را با وضعیت‌های متحول انطباق می‌دهد (برای مثال، تغییر آب و هوا یا هجوم دشمن به اجتماع). و چگونه تکامل زیستی، جانورانی را شکل می‌دهد که چنین تفاوت عظیمی بین سادگی تک‌تک آنها و پیچیدگی جمعی آنها وجود دارد.



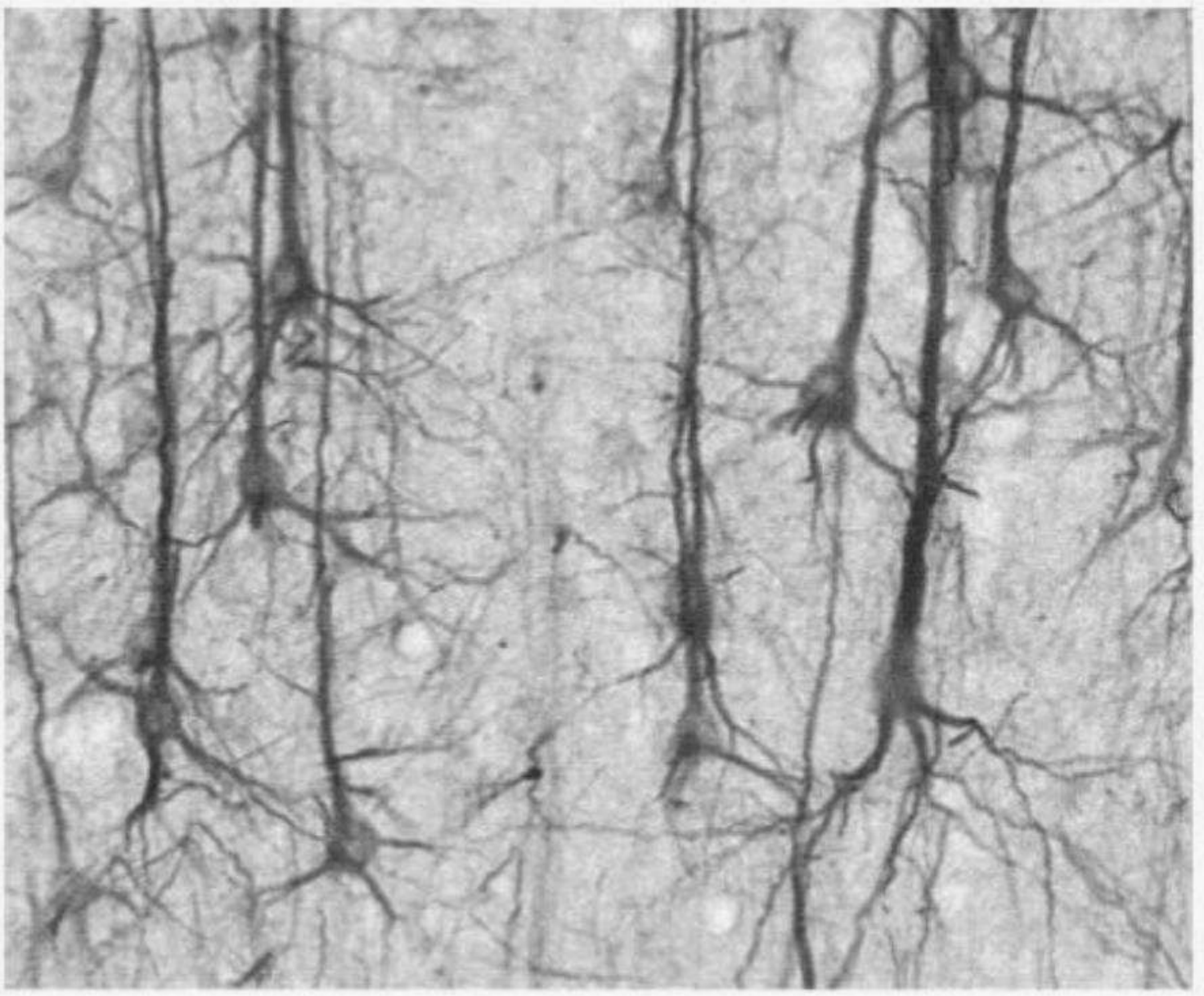
شکل ۱-۱. مورچه‌ها با بدن‌هایشان پلی می‌سازند تا به گروه امکان دهند از طریق کوتاه‌ترین مسیر از عرض یک شکاف عبور کنند.

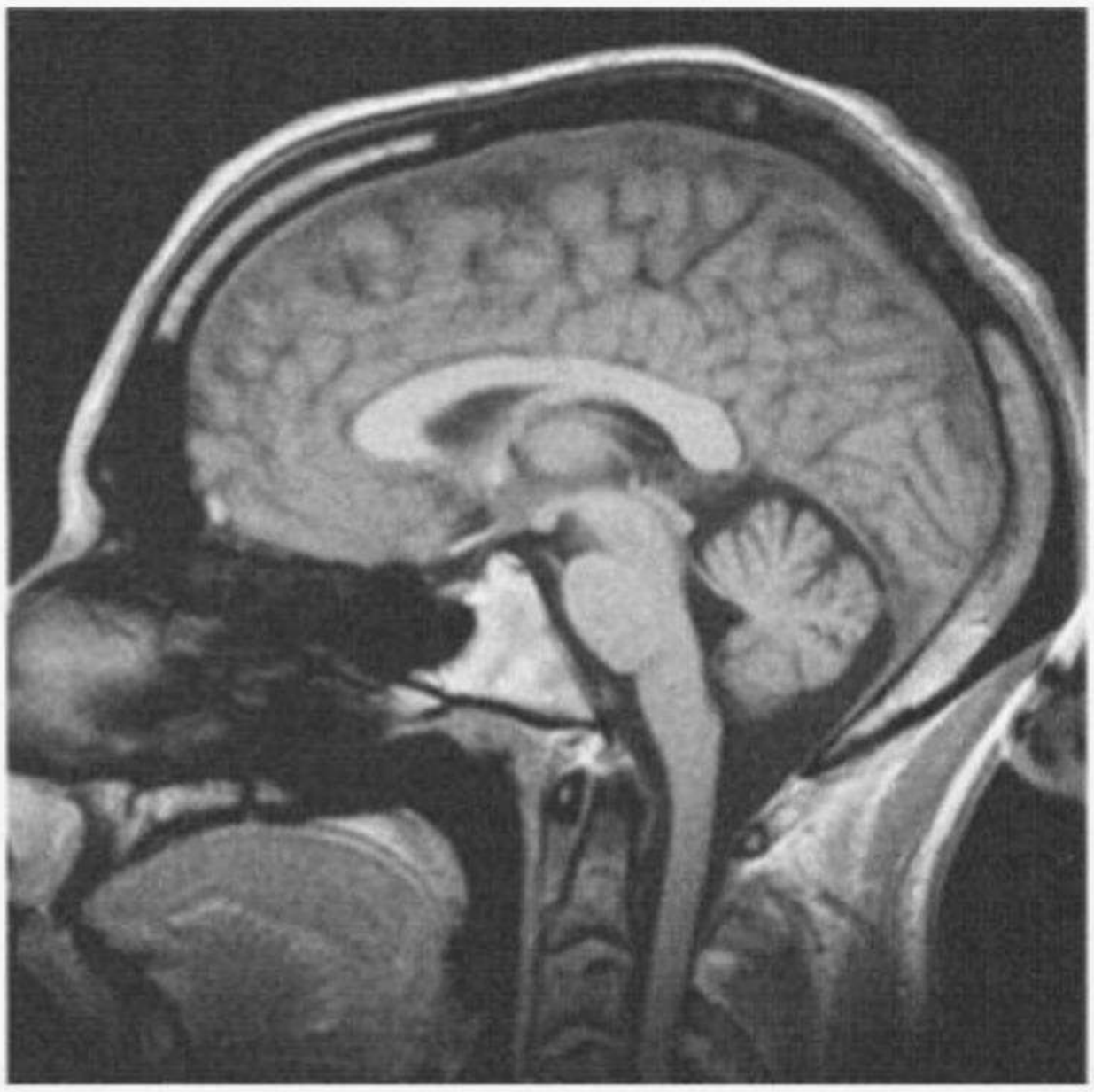
مغز

شناخت‌پژوه[۴۷] داگلاس هوفستادر، در کتابش به نام گودل، اشر، باخ، مقایسه پر دامنه‌ای بین اجتماع مورچگان و مغز به عمل می‌آورد، که هردو سیستم‌های پیچیده‌ای هستند که در آنها اجزای ساده‌ای که ارتباط صرفا ساده‌ای بین خودشان دارند، در جمع منجر به رفتار بغرنج و

پیچیده‌ای در سراسر سیستم[۴۸] ("فراگیر[۴۹]") می‌شوند. اجزای ساده مغز سلول‌هایی هستند که نورون نامیده می‌شوند. علاوه بر نورون، مغز از گونه‌های بسیار متفاوتی از سلول تشکیل شده است، اما اکثر دانشمندان مغز باور دارند این کنش نورون‌ها و الگوهای ارتباطی بین گروه‌های نورون است که سبب ادراک، اندیشه، احساسات، آگاهی، و سایر فعالیت‌های مهم و گسترده مغز می‌شود.

نورون‌ها در شکل ۲-۱ (بالا) به نمایش درآمده‌اند. هر نورون شامل سه بخش اصلی است: بدنه سلول[۵۰] (جسم[۵۱])، شاخه‌هایی که ورودی ارسالی از سایر سلول‌ها را به سلول منتقل می‌کند (دندریت‌ها[۵۲])، و تنه واحدی که خروجی سلول به سایر سلول‌ها را منتقل می‌کند (کسون[۵۳]). حدودا می‌توان گفت که هر نورون یا در وضعیت فعال (آتش کردن[۵۴]) است یا در وضعیت غیرفعال (آتش نکردن). نورون وقتی آتش می‌کند که از طریق دندریت‌هایش از سایر نورون‌ها به حد کفایت سیگنال دریافت کرده باشد.





شکل ۱-۲. بالا: منظره ذره‌بینی از نورون‌ها، که از طریق رنگ کردن قابل رؤیت شده است.

پایین: مغز انسان. چگونه رفتار در یک سطح به رفتار در سطح بعدی امکان بروز می‌دهد؟

آتش کردن شامل ارسال یک تپ الکتریکی[۵۵] از طریق آکسون است، که سپس از طریق موادی شیمیایی به نام ناقل عصبی[۵۶] به سیگنالی شیمیایی تبدیل می‌شود. این سیگنال شیمیایی به نوبه خود سایر نورون‌ها را از طریق دندریت‌هایشان فعال می‌کند. فرکانس آتش کردن و سیگنال‌های شیمیایی خروجی یک نورون ممکن است متناسب با ورودی و همچنین میزانی که به‌تازگی آتش کرده تغییر کند.

این کنش‌ها یادآور نمونه مورچه‌های یک اجتماع است: افراد (نورون‌ها یا مورچه‌ها) سیگنال‌های ارسالی از جانب سایر افراد را ادراک می‌کنند، و جمع قدرت این سیگنال‌ها وقتی که به حد کفایت رسید موجب می‌شود افراد به شیوه معینی اقدام کنند که سیگنال‌های بیشتری را به وجود می‌آورد.

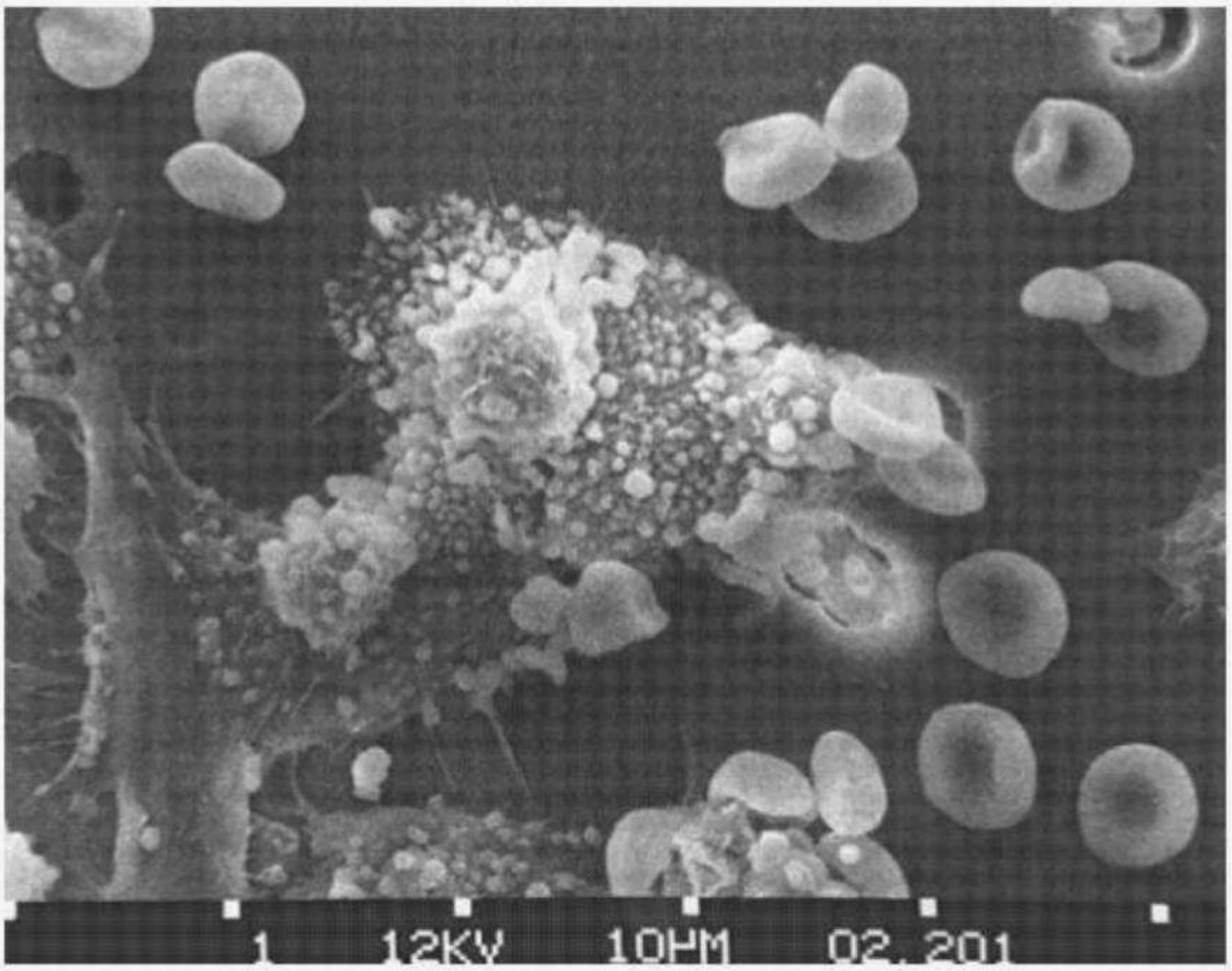
تأثیرات کلی می‌تواند بسیار پیچیده باشد. پی بردیم که شناخت ما ازمورچگان و ساختارهای اجتماعی آنها کماکان کامل نشده است؛ به همین سان، دانشمندان هنوز پی نبرده‌اند که چگونه کنش‌های شبکه‌های نورونی جداگانه یا انبوه آنها موجب رفتار مغز در مقیاس وسیع می‌شوند (شکل ۲-۱، پایین). هنوز پی نبرده‌اند که سیگنال‌های نورونی چه معنایی دارند، چگونه تعداد زیادی نورون همکاری می‌کنند تا یک رفتار فراگیر شناختی را به وجود آورند، یا چگونه به‌طور دقیق موجب می‌شوند که مغز افکار را سبک و سنگین کند و چیزهای جدیدی را یاد بگیرد. و

باز، شاید حیرت‌انگیزتر از همه این باشد که چگونه این نظام علامت‌دهی تو در تو که چنین توانایی‌های قدرتمندی دارد، در درجه اول، از راه تکامل پدید آمده است.

سیستم ایمنی

سیستم ایمنی مثال دیگری از سیستم‌هایی است که در آن اجزایی کمابیش ساده، در جمع، به رفتار بسیار پیچیده‌ای پر و بال می‌دهند که شامل سیگنال‌دهی و کنترل است، و در طول زمان در آن انطباق رخ می‌دهد.

تصویری که نشان‌دهنده پیچیدگی این سیستم است در شکل ۳-۱ آمده است.



شکل ۱-۳. سلول‌های سیستم ایمنی که در حال حمله به یک سلول سرطانی هستند.

سیستم ایمنی نیز مانند مغز، از نظر پیشرفتگی، در حیوانات گوناگون متفاوت است، اما اصول کلی حاکم بر آن در بسیاری از گونه‌ها یکسان است.

(در خون، مغز استخوان[۵۷]، گره‌های لنف[۵۸]، و سایر اندام‌ها). این مجموعه از سلول‌ها، بدون هرگونه کنترل مرکزی، به گونه‌ای مؤثر و کارا همکاری می‌کنند.

بازیگران قهرمان سیستم ایمنی سلول‌های سفید خون هستند که لنفوسیت[۵۹] نیز نامیده می‌شوند. هر لنفوسیت می‌تواند از طریق گیرنده‌های موجود بر روی تنه سلولی‌اش، مولکول‌های متناظر با مهاجمین معین احتمالی را تشخیص دهد (برای مثال، باکتری‌ها). در هر زمان، حدود یک تریلیون از این نگهبان‌ها در جریان خون در حال گشت هستند و تک‌تک آنها آماده‌اند که در صورت فعال شدن - یعنی در صورتی که گیرنده‌های خاصی از آنها، از سر

تصادف، با مهاجمی همخوان با خود[۶۰] روبرو شوند ـ زنگ خطر را به صدا درآورند. وقتی یک لنفوسیت فعال می‌شود، تعداد بسیار زیادی مولکول -پادتن[۶۱]"- ترشح می‌کند، که می‌توانند مهاجمین مشابه را تشخیص دهند. این پادتن‌ها در جریان یک مأموریت جستجو ـو‌ـانهدام در سراسر بدن حرکت می‌کنند. هر لنفوسیت فعال درعین‌حال با سرعتی فزاینده تقسیم می‌شود و لنفوسیت‌های دختری[۶۲] را به وجود می‌آورد که در شکار مهاجمین و ترشح پادتن‌ها بر علیه آنها مشارکت می‌کنند. همچنین لنفوسیت‌های دختری را به وجود می‌آورد که در گوشه و کنار پرسه می‌زنند و مهاجم خاصی را که مشاهده شده در حافظه نگه می‌دارند، و به این ترتیب در مقابل بیماری‌زاهایی[۶۳] که قبلا مشاهده شده بدن را ایمن می‌کنند.

یک گروه از لنفوسیت‌ها سلول‌های B نامیده می‌شوند B) نشان‌دهنده این است که این گونه از سلول‌ها در bone marrow (مغز استخوان) رشد می‌کنند و یک خاصیت در خور ملاحظه دارند: هر چقدر که همخوانی بین یک سلول B و یک مهاجم بیشتر باشد، سلول B سلول‌های دختر بیشتری به وجود می‌آورد که ترشح‌کننده پادتن هستند. هر یک از سلول‌های دختر، به شیوه‌ای تصادفی و از راه جهش[۶۴]، تفاوت‌های اندکی با سلول مادر پیدا می‌کند، و این سلول‌های دختر، به نسبت مستقیم این‌که به چه اندازه با مهاجم همخوان هستند، به خلق دختران خود ادامه می‌دهند. نتیجه کار نوعی از فرایند انتخاب طبیعی داروینی است، که در طی آن همخوانی بین سلول‌های B و مهاجمان اندک اندک بهتر و بهتر می‌شود، تا زمانی که پادتن‌هایی که تولید می‌شوند در جستجو ـو‌ـ انهدام ریز اندام‌واره‌های[۶۵] خاطی بی‌نهایت کارا شده باشند.

انواع متعدد دیگری از سلول‌ها در این همنوایی واکنش ایمنی مشارکت دارند. سلول‌های T (که در غده تیموس[۶۶] رشد می‌کنند) نقش مهمی در تنظیم واکنش سلول‌های B دارند. درشت‌خوارها[۶۷] در اطراف پرسه می‌زنند و به دنبال موادی هستند که مورد هدف‌گیری پادتن‌ها قرار گرفته‌اند؛ کار اصلی انهدام مهاجمان را آنها به انجام می‌رسانند. انواع دیگری از سلول‌ها بر ایمنی درازمدت‌تر تأثیر می‌گذارند. بخش‌های دیگری از سیستم هم هستند که از حمله سلول‌ها به خود بدن جلوگیری می‌کنند.

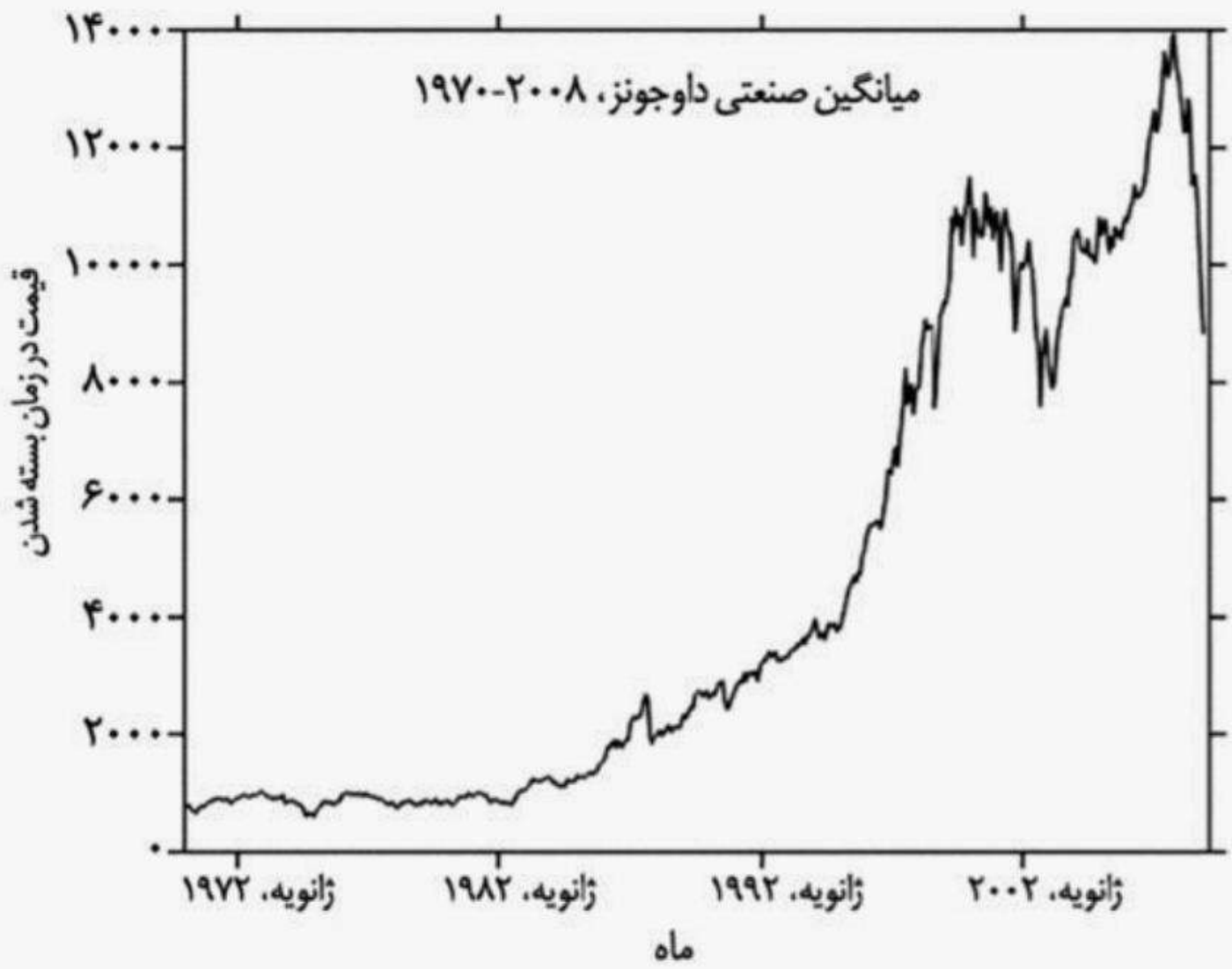
مانند مورد مغز و اجتماع مورچگان، رفتار سیستم ایمنی از کنش‌های آزاد بازیگران ساده بیشماری ناشی می‌شود که عملا هیچ‌کس مسئول آن نیست. کنش‌های بازیگران ساده - سلول‌های B، سلول‌های T، درشت‌خوارها، و مانند اینها - را می‌توان همچون نوعی از شبکه پردازش شیمیایی در نظر گرفت که در آن تشخیص مهاجم توسط سلول، موجب زنجیره‌ای از سیگنال‌ها در میان سلول‌ها می‌شود که واکنش پیچیده تو در تویی را به نمایش می‌گذارند. بسیاری از جنبه‌های سرنوشت‌ساز این سیستم پردازش سیگنال تاکنون به درستی فهمیده

نشده است. برای مثال، هنوز دقیقا نمی‌دانیم که سیگنال‌های مطرح، و کارکردهای خاص آنها کدام هستند، و چگونه با هم کار می‌کنند تا به سیستم در کل امکان دهند درباره خطرهایی که در محیط وجود دارد "یاد بگیرد" و در قبال آن خطرها ایمنی درازمدت را فراهم کند. هنوز دقیقا نمی‌دانیم این سیستم چگونه از حمله به خود بدن اجتناب می‌کند؛ یا چه چیزی موجب نواقص سیستم می‌شود _ مانند بیماری‌های خودایمن[۶۸]"، که در نتیجه آن سیستم به خود بدن حمله می‌کند؛ یا راهبردهای تفصیلی ویروس نقص ایمنی انسان[۶۹] (HIV) چیست، که می‌تواند با حمله به خود سیستم ایمنی امکانات دفاعی را دور بزند. یک بار دیگر، پرسش اساسی این است که چگونه چنین سیستم پیچیده و مؤثری در درجه اول از راه تکامل زیستی پدیدار شده است.

اقتصادها

اقتصادها سیستم‌های پیچیده‌ای هستند که در آنها اجزای "ساده و ذره‌بینی" عبارتند از آدم‌ها (یا شرکت‌ها) ی فروشنده یا خریدار اجناس، و "کل" عبارت است از رفتار جمعی، رفتار پیچیده و به سختی قابل پیش‌بینی بازارها، مانند تغییرات قیمت در نواحی مختلف کشور یا بالا و پایین رفتن ارزش‌های سهام (شکل ۴-۱). برخی از اقتصاددان‌ها تصور می‌کنند اقتصادها هم در سطح خرد و هم کلان انطباق‌پذیر هستند. در سطح خرد، افراد و شرکت‌ها و بازارها می‌کوشند با فهمیدن طرز رفتار سایر افراد و شرکت‌ها سوددهی‌شان را افزایش دهند. به لحاظ تاریخی تصور بر این بوده که این نفع شخصی[۷۰] خرد، بازارها را در کل - و در سطح کلان - به سمت وضعیت تعادلی می‌راند که در آن بهای اجناس تعیین شده است و در نتیجه هیچ راهی وجود ندارد که الگوهای تولید یا مصرف را به نحوی تغییر داد که همه از رفاه بیشتری برخوردار شوند. با ملاک سودآوری یا رضایت مصرف‌کننده، اگر شخصی از رفاه بیشتری برخوردار شود رفاه دیگری کاهش می‌یابد. فرآیندی که بازارها از طریق آن به این تعادل می‌رسند کارایی بازار[۷۱]" نامیده می‌شود. اقتصاددان قرن هجدهم، آدام اسمیت، این رفتار خودسامان[۷۲] بازارها را "دست نامرئی[۷۳]، نامید: که از کنش‌های خرد بیشمار خریدارها و فروشنده‌ها پدیدار می‌شود.





شکل ۱-۴. تک‌تک کنش‌ها در تالار بورس موجب پیدایش رفتار نه چندان پیش‌بینی‌پذیر و کلان‌مقیاس بازارهای مالی می‌شود.

بالا: بورس نیویورک.

پایین: قیمت میانگین صنعتی داو جونز (Dow Jones Industrial averagel) در زمان بسته

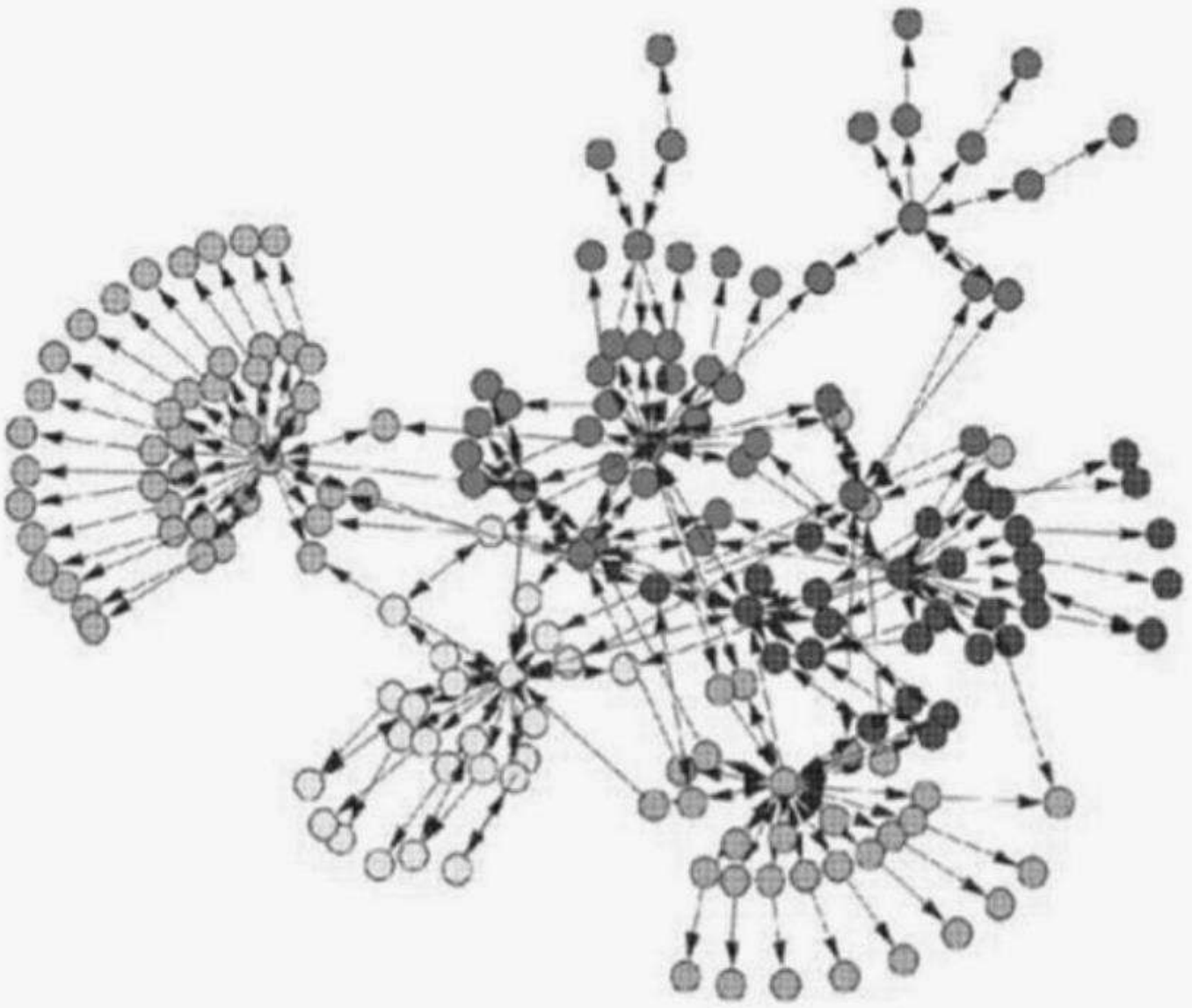
شدن بورس، که در فاصله ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۸ به صورت ماهانه ترسیم شده است.

اقتصاددان‌ها به این موضوع می‌پردازند که بازارها چگونه کارا می‌شوند، و برعکس، چه عواملی باعث می‌شوند بازارها شکست بخورند، همان‌گونه که در بازارهای واقعی دنیا رخ می‌دهد. در این اواخر، اقتصاددان‌هایی که رشته سیستم‌های پیچیده را مطالعه می‌کنند کوشیده‌اند رفتار بازار را با ملاک‌هایی توضیح دهند که مشابه ملاک‌هایی است که قبلا در تشریح سایر سیستم‌های پیچیده به کار رفته است: الگوهای پویای نه چندان پیش‌بینی‌پذیر در رفتار اقتصاد جهانی - از جمله، الگوهای حباب[۷۴] و سقوط[۷۵] بازار؛ پردازش سیگنال‌ها و اطلاعات - از جمله، در فرایندهای تصمیم‌گیری افراد خریدار و فروشنده، در توانمندی ناشی از آن برای "پردازش اطلاعات" بازار در کل، در "محاسبه" قیمت‌های کارا؛ و انطباق و یادگیری - از جمله، انطباق دادن تولید با تغییر نیازهای خریداران توسط تک‌تک فروشندگان، و تنظیم قیمت‌های جهانی توسط بازار در کل.

وب جهانی

وب جهانی در اوایل دهه ۱۹۹۰ پا به عرصه گذاشت و از آن زمان رشدی تصاعدی داشته است. مانند سیستم‌هایی که در بالا تشریح شد، می‌توان وب را همچون یک سیستم اجتماعی خودسامان تصور کرد: افراد، با کمترین یا هیچ‌گونه نظارتی کارهای ساده‌ای را به انجام می‌رسانند: ایجاد[۷۶]" صفحات وب، و برقراری پیوند[۷۷] با سایر صفحات وب. اما، دانشمندان سیستم‌های پیچیده پی برده‌اند که این شبکه در کل خواص نامنتظر کلان‌مقیاسی دارد، از جمله ساختار عمومی آن، شیوه‌ای که رشد می‌کند، چگونه اطلاعات بر روی پیوندها منتشر می‌شود و روابط هم‌تکاملی[۷۸] بین رفتار موتورهای جستجو و ساختار پیوندهای وب شکل می‌گیرد، و تمامی آنها به چیزی منجر می‌شوند که می‌توان آن را رفتار "انطباق‌پذیر" این سیستم در کل نامید.

در حال حاضر، رفتار پیچیده‌ای که از قواعدی ساده در وب جهانی پدیدار می‌شود موضوع داغی در مطالعه سیستم‌های پیچیده است. شکل ۱۵ نشان‌دهنده ساختار یک مجموعه از صفحات وب و پیوند بین آنهاست. به نظر می‌رسد در بخش عمده‌ای از وب شباهت‌هایی وجود دارد، پرسش این است که چرا؟



شکل ۵-۱. ساختار شبکه بخشی از وب جهانی

خواص مشترک سیستم‌های پیچیده

هرگاه جزئیات این سیستم‌های گوناگون را در نظر می‌گیریم کاملا متفاوت به نظر می‌آیند، اما در یک سطح انتزاعی، خواص مشترک قابل توجهی در میان آنها دیده می‌شود.

۱. رفتار پیچیده جمعی: تمامی سیستم‌هایی که در بالا تشریح کردم شامل شبکه‌های بزرگی از اجزای منفرد هستند (مورچه‌ها، سلول‌های B، نورون‌ها، خریداران سهام، پدیدآورنده‌های وبگاه ها[۷۹])، و همچنان که انتظار می‌رود از قواعد نسبتا ساده‌ای پیروی می‌کنند، بدون این‌که هیچ‌گونه کنترل مرکزی یا رهبری وجود داشته باشد. این کنش‌های جمعی اجزای بیشمار است که موجب پدیدار شدن الگوهای رفتاری پیچیده و نه چندان پیش‌بینی‌پذیر و متغیری می‌شوند که ما را مسحور خود می‌کنند.

۲. پردازش سیگنال‌ها و اطلاعات: تمامی این سیستم‌ها اطلاعات و سیگنال‌هایی را تولید می‌کنند و مورد استفاده قرار می‌دهند که هم از محیط درون و هم از محیط بیرون سرچشمه می‌گیرند.

۳. انطباق: تمامی این سیستم‌ها خود را انطباق می‌دهند، یعنی برای بهبود شانس بقا یا موفقیت - از راه یادگیری یا تکامل - رفتار خود را تغییر می‌دهند.

حال برای دانش‌واژه سیستم پیچیده تعریفی را پیشنهاد می‌کنم:

سیستمی که شبکه بزرگ اجزای آن که فاقد کنترل مرکزی هستند و مطابق با قواعد ساده‌ای

عمل می‌کنند، موجب پدیدار شدن رفتار پیچیده جمعی، پردازش اطلاعات پیشرفته، و انطباق از راه یادگیری یا تکامل می‌شود.

(بعضی‌اوقات بین سیستم‌های پیچیده انطباق‌پذیر، که در آنها انطباق نقش مهمی بازی می‌کند، و سیستم‌های پیچیده انطباق‌ناپذیر[۸۰]، مانند یک توفان شدید یا یک رودخانه خروشان، تمایز گذاشته می‌شود. چون اکثر سیستم‌هایی که در این کتاب به بحث می‌گذارم انطباق‌پذیر هستند، به این تمایز اشاره‌ای نمی‌کنم.)

سیستم‌هایی که در آنها رفتار سازمان‌یافته، بدون کنترل‌کننده بیرونی یا رهبر، پدیدار می‌شود بعضی اوقات خودسامان نامیده می‌شوند. از آنجا که قواعد ساده رفتار پیچیده را به شیوه‌ای تولید می‌کنند که چندان قابل پیش‌بینی نیست، رفتار کلان چنین سیستم‌هایی را بعضی اوقات نوظهور می‌نامند. در اینجا تعریف متفاوتی از سیستم پیچیده را می‌آورم: سیستمی که رفتارهای نابدیهی[۸۱] و نوظهور و خودسامان را به نمایش می‌گذارد. پرسش اصلی در علوم پیچیدگی این است که چگونه این رفتار خود سامان و نوظهور رخ می‌دهد. در این کتاب می‌کوشم این مفاهیم را، که به دشواری می‌توان از کارشان سردرآورد، در زمینه‌های مختلف قابل فهم کنم.

پیچیدگی را چگونه می‌توان اندازه‌گیری کرد؟

در پاراگراف‌های بالا برخی از خواص کیفی و مشترک سیستم‌های پیچیده را توضیح دادم. اما پرسش‌های کمی بیشتری به جا می‌ماند: یک سیستم پیچیده خاص دقیقا چقدر پیچیده است؟ یعنی، پیچیدگی را چگونه اندازه‌گیری می‌کنیم؟ آیا راهی وجود دارد که بگوییم یک سیستم چقدر پیچیده‌تر از دیگری است؟

اینها پرسش‌هایی اساسی است، اما پاسخ‌ها هنوز همه را راضی نکرده و کماکان منشأ مباحثات علمی بسیاری در این رشته است. همان‌طور که در فصل هفتم توضیح خواهم داد، برای پیچیدگی مقیاس"های[۸۲] متفاوت بیشماری را در نظر گرفته‌اند؛ اما هیچ یک به صورت فراگیر مورد پذیرش دانشمندان قرار نگرفته است. چند مورد از این مقیاس‌ها و سودمندی آنها، در فصل‌های مختلف این کتاب توضیح داده شده است.

اما حال که تعریفی کمی و مورد پذیرشی وجود ندارد، علم پیچیدگی چگونه می‌تواند وجود داشته باشد؟

برای این پرسش دو پاسخ دارم. اول، به رغم مقاله‌ها و کتاب‌های متعددی که شامل این دانش‌واژه‌ها هستند، هنوز نه یک علم پیچیدگی واحد وجود دارد، و نه یک نظریه پیچیدگی واحد. دوم، همان‌طور که در بخش‌های متعددی از این کتاب توضیح خواهم داد، یکی از ویژگی‌های اساسی صورت‌بندی یک علم جدید، کوشش برای تعریف دانش‌واژه‌های بنیادی آن است. مثال‌هایی از این دست را می‌توان در کوشش برای تعریف مفاهیمی بنیادی همچون اطلاعات، محاسبه، نظم[۸۳]، و حیات مشاهده کرد.

در این کتاب درباره این کوشش‌ها، در گذشته و حال، به تفصیل توضیح خواهم داد، و آنها را به کوشش‌مان برای فهم جنبه‌های متعدد پیچیدگی مربوط خواهم کرد.

این کتاب درباره جدیدترین علم است، اما درعین‌حال درباره تاریخ مفاهیمی بنیادی است که پایه این علم جدید را شکل می‌دهند. چهار فصل بعدی تاریخچه و پس‌زمینه مفاهیمی را به دست می‌دهند که در سراسر این کتاب به کار گرفته شده است.

فصل دوم: دینامیک، آشوب، پیش‌بینی

چقدر مرا خوشحال می‌کند. دوباره در آغاز باشیم، تقریبا هیچ چیز را ندانیم ...

چیز عادیی که زندگی ما را می‌سازد، چیزهایی که مردم درباره‌شان شعر می‌گویند _ ابرها، نرگس‌های زرد، آبشارها...اینها پر از اسرارند، همان‌قدرکه آسمان برای یونانی‌ها اسرارآمیز بود... وقتی تقریبا هر چیزی که تصور می‌کردید می‌دانید نادرست از کار درمی‌آید، بهترین زمان ممکن برای زنده بودن است.

تام استاپارد، آرکادیا(۱)

نظریه سیستم‌های دینامیک[۸۴] (یا پویا) درباره توضیح و پیش‌بینی سیستم‌هایی است که رفتار پیچیده و متغیری را در سطحی کلان به نمایش می‌گذارند که از کنش‌های جمعی تعداد زیادی اجزای برهم‌کنش پدید می‌آید. واژه دینامیک (Dynamic) به معنی متغیر (Changing) است، و سیستم‌های دینامیک سیستم‌هایی هستند که در طول زمان به گونه‌ای تغییر می‌کنند. چند نمونه از سیستم‌های پویا عبارتند از:

منظومه شمسی (سیاره‌ها در طول زمان موقعیت‌شان را تغییر می‌دهند) قلب یک موجود زنده (به جای این‌که آرام بگیرد به شیوه متناوبی می‌تپد) مغز یک موجود زنده (نورون‌ها به طور مداوم آتش می‌کنند، ناقل‌های عصبی از یک نورون به دیگری رانده می‌شوند، قدرت‌های سیناپس تغییر می‌کنند، و به طور معمول کل سیستم در یک وضعیت دگرگونی مداوم[۸۵] است)

بازار سهام

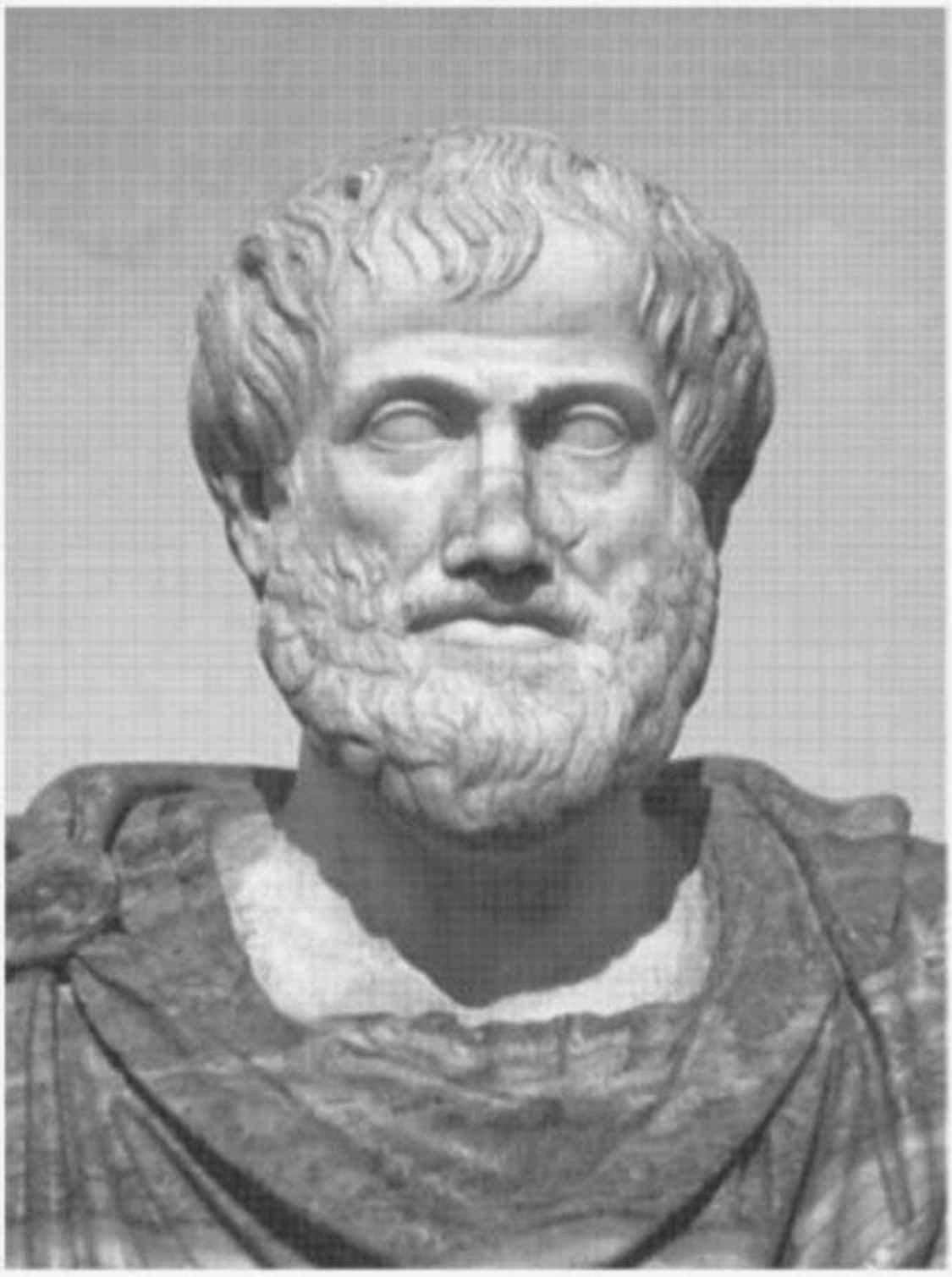
جمعیت دنیا آب و هوای جهان سیستم‌های دینامیک شامل این سیستم‌ها و اکثر سیستم‌های دیگری هستند که احتمال دارد بتوانید تصورشان را بکنید. حتی صخره‌ها در طی دوران‌های زمین‌شناختی تغییر می‌کنند. نظریه سیستم‌های پویا به‌طورکلی دراین‌باره توضیح می‌دهد که از چه راه‌هایی سیستم‌ها می‌توانند تغییر کنند، چه انواعی از رفتارهای کلان امکان‌پذیر، و چه انواعی از پیش‌بینی در مورد آن رفتارها میسر است.

نظریه سیستم‌های دینامیک، به دلیل نتایج خیره‌کننده‌ای که پژوهش آشوب - به عنوان یکی از شاخه‌های آن - فراهم آورده است، در این اواخر در علم عامه‌پسند، باب روز شده است. اما، پیشینه آن طولانی است، و همچون بسیاری دیگر از علوم، از فیلسوف یونانی ارسطو آغاز می‌شود.

سرچشمه‌های اولیه نظریه سیستم‌های دینامیک ارسطو خالق یکی از اولین نظریه‌های ثبت شده حرکت است، نظریه‌ای که به مدت ۱۵۰۰ سال به طور گسترده‌ای مورد پذیرش بود. نظریه او بر دو اصل عمده استوار بود که هر دو آنها غلط از کار درآمد. اول، او معتقد بود که حرکت بر روی زمین با حرکت در آسمان‌ها متفاوت است. او تأکید داشت که اجسام زمینی فقط وقتی چیزی آنها را وادار کند به خط مستقیم حرکت می‌کنند؛ وقتی هیچ نیرویی به کار برده نشود،

شیء به وضعیت ساکن طبیعی‌اش برمی‌گردد. اما، در آسمان، سیاره‌ها و سایر اجسام سماوی به طور مداوم در دایره‌های کاملی گردش می‌کنند که زمین در مرکز آنهاست. دوم، ارسطو معتقد بود که اجسام زمینی برحسب این‌که از چه ساخته شده باشند، به شیوه‌های متفاوتی حرکت می‌کنند. برای مثال، او معتقد بود که صخره به این دلیل به زمین سقوط می‌کند که از عنصر خاک ساخته شده، درحالی‌که دود به این دلیل بالا می‌رود که عمدتا از عنصر هواست. به همین ترتیب، اشیای سنگین‌تر، که از قرار معلوم حاوی خاک بیشتری بودند، سریعتر از اشیای سبک‌تر به زمین سقوط می‌کردند.

ارسطو (مانند بسیاری از نظریه‌پردازان بعدی) بی‌تردید کسی نبود که اجازه دهد نتایج تجربی بر سر راه نظریه‌پردازی‌های او قرار گیرند. روش علمی او این بود که اجازه دهد منطق و عقل سلیم نظریه را هدایت کنند؛ اهمیت آزمودن نظریه‌های به دست آمده از طریق تجربه مفهومی مدرن است. تأثیر اندیشه‌های ارسطو قدرتمند بود و تا قرن شانزدهم - زمانه گالیله - همچنان بر بخش عمده علم غربی تسلط داشت.



ارسطو، ۳۲۲ - ۳۸۴

@degar_goonesh

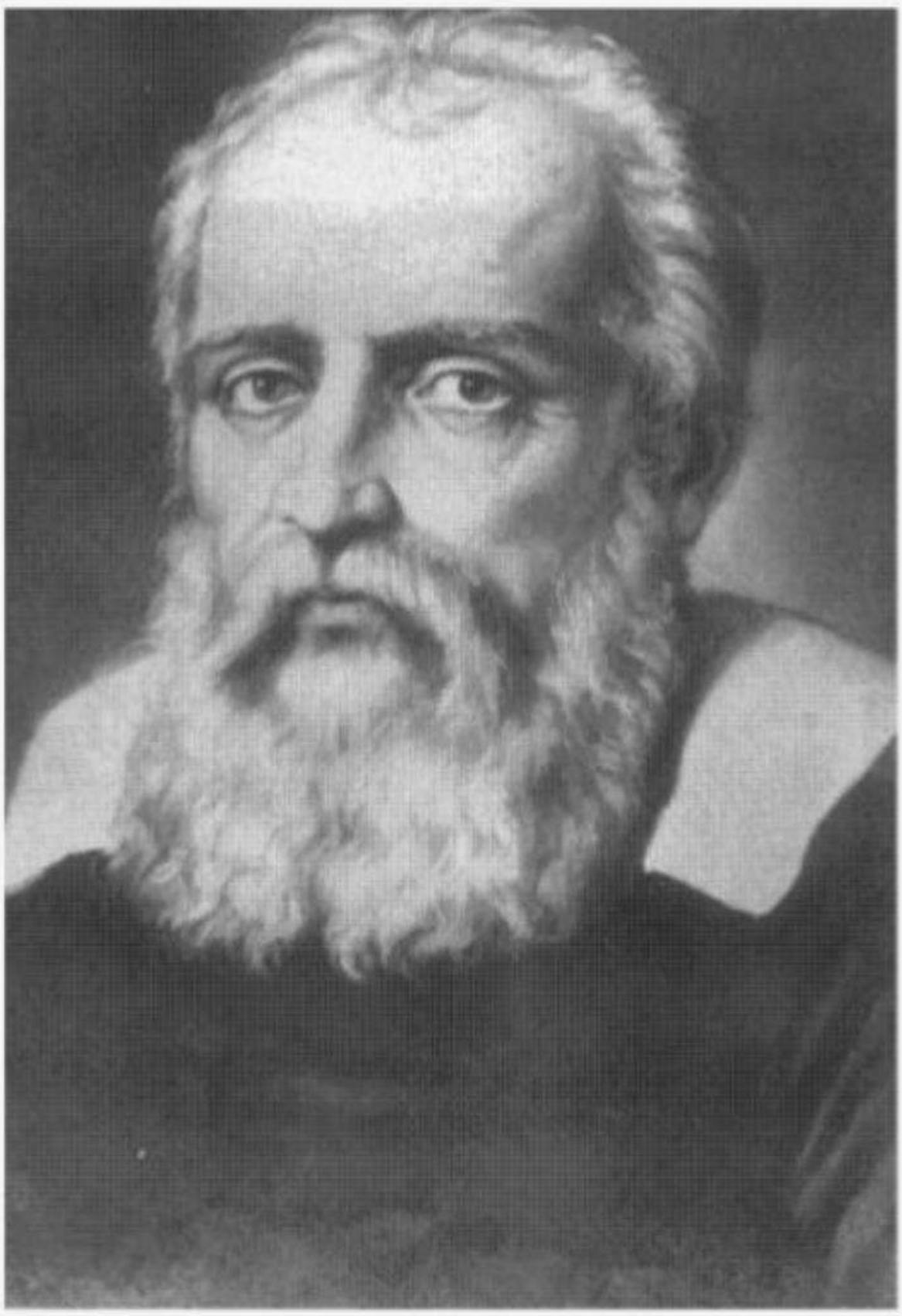
قبل از میلاد

گالیله، و سلف او کوپرنیک و معاصرش کپلر، پیشگامان علم تجربی، آزمایشی، بودند. کوپرنیک نشان داد که حرکت سیاره‌ها نه به دور زمین بلکه به دور خورشید است. (گالیله به دلیل تأیید این نظریه با کلیسای کاتولیک گرفتاری جدی پیدا کرد و سرانجام وادار شد که در ملاء عام نظرش را مردود بشمارد. در سال ۱۹۹۲ بود که کلیسا رسما پذیرفت که گالیله ناعادلانه مورد آزار قرار گرفته است.) در اوایل قرن هفدهم، کپلر کشف کرد که حرکت سیاره‌ها دایره‌وار نیست بلکه بیضوی است، و قوانینی را کشف کرد که این حرکت بیضوی را توضیح می‌دادند.

درحالی‌که کوپرنیک و کپلر پژوهش‌هایشان را بر حرکات سماوی متمرکز کرده بودند، گالیله حرکت را نه تنها در آسمان بلکه بر روی زمین نیز مورد پژوهش قرار داد، از طریق آزمایش با اشیایی که امروزه در دروس مقدماتی فیزیک به کار برده می‌شود: پاندول، گلوله‌هایی که بر روی سطح شیب‌دار به پایین می‌غلطند، اشیای در حال سقوط، نوری که با آیینه بازتاب داده می‌شود. گالیله از وسایل پیشرفته‌ای که امروزه داریم برخوردار نبود:

می‌گویند او زمان نوسان پاندول را با شمردن ضربان قلب‌اش، و تأثیرات جاذبه را با انداختن اشیایی از بالای برج خمیده پیزا اندازه‌گیری می‌کرد. این آزمایش‌ها که امروزه کلاسیک شمرده می‌شوند، در اندیشه‌های مربوط به حرکت، انقلابی به راه انداختند. به‌خصوص، پژوهش‌های گالیله به طور مستقیم با اصول قدیمی ارسطو در مورد حرکت در تضاد بود. برخلاف عقل سلیم، سکون وضعیت طبیعی اشیاء نیست؛ در عوض به نیرو نیاز است تا شیء متحرک متوقف شود. اشیای سنگین و سبک در خلأ با سرعت یکسانی سقوط می‌کنند. و شاید از همه انقلابی‌تر این‌که حرکت بر روی زمین می‌توانست برخی جنبه‌های حرکت در آسمان را توضیح دهد. با گالیله، انقلاب علمی، همراه با مشاهده‌های تجربی که شالوده آن بودند، به طور قطع به پرواز درآمده بود.

مهم‌ترین شخصیت در تاریخ دینامیک اسحاق نیوتون بود. می‌توان گفت نیوتون، که یک سال پس از مرگ گالیله به دنیا آمد، به تنهایی علم دینامیک را ابداع کرد.



گالیله، ۱۶۴۲ - ۱۵۶۴



اسحاق نیوتون، ۱۷۲۷ - ۱۶۴۳

(حکاکی یک هنرمند ناشناس)

در مسیر پژوهش‌هایش باید آنالیز ریاضی[۸۶] را هم ابداع می‌کرد، شاخه‌ای از ریاضیات که حرکت و تغییر را توضیح می‌دهد.

فیزیکدان‌ها مطالعه عمومی حرکت را مکانیک می‌نامند. مکانیک دانش‌واژه‌ای تاریخی است که به یونان باستان برمی‌گردد، و بازتاب‌دهنده این دیدگاه کلاسیک است که کل حرکت را می‌توان برحسب ترکیب کنش "ماشین"های ساده توضیح داد. (برای مثال، اهرم، قرقره، چرخ و محور).

امروزه افکار نیوتون به عنوان مکانیک کلاسیک شناخته می‌شود. مکانیک به دو عرصه تقسیم می‌شود: سینماتیک[۸۷] که توضیح می‌دهد چیزها چگونه حرکت می‌کنند، و دینامیک که توضیح می‌دهد چیزها چرا از قوانین سینماتیک تبعیت می‌کنند. برای مثال، قوانین کپلر قوانین سینماتیک هستند _ توضیح می‌دهند که سیاره‌ها چگونه حرکت می‌کنند (مداری بیضی که خورشید در یکی از دو کانون آن قرار دارد) اما نه این که چرا به این شکل خاص حرکت می‌کنند. قوانین نیوتون بنیادهای دینامیک هستند: این قوانین حرکت سیاره‌ها، و هر چیز دیگر را بر مبنای مفاهیم بنیادی نیرو و جرم توضیح می‌دهند.

سه قانون مشهور نیوتون عبارتند از:

۱. حرکت یکنواخت[۸۸]": هر شیء که در معرض نیرویی قرار نگیرد با سرعت ثابتی حرکت می‌کند.

۲. جرم اینرسی[۸۹]": وقتی یک شیء در معرض یک نیرو قرار می‌گیرد، تغییر حاصل در حرکت آن نسبت عکس با جرم آن دارد.

۳. نیروهای مساوی و متقابل: اگر شیء الف نیرویی بر شیء ب اعمال کند، ب هم باید نیرویی مساوی و متقابل بر شیء الف اعمال کند.

یکی از بزرگترین دستاوردهای نیوتون درک این بود که این قوانین نه فقط در مورد اشیای زمینی بلکه در مورد اشیای آسمانی نیز کاربرد دارد.

گالیله اولین کسی بود که قانون حرکت یکنواخت را مطرح کرد، گرچه معتقد بود که این قانون تنها در مورد اشیای روی زمین کاربرد دارد. اما نیوتون فهمید که این قانون باید در مورد سیاره‌ها هم کاربرد داشته باشد، و درک کرد که مدارهای بیضوی، که جهت حرکتی دائم‌التغییر را به نمایش می‌گذارند، مستلزم توضیحی بر مبنای نیرو، یعنی جاذبه، هستند: نیروی جاذبه بین دو شیء متناسب است با حاصلضرب جرم آنها تقسیم بر مجذور فاصله بین آنها. بصیرت نیوتون -که اکنون استخوان‌بندی علم مدرن است_ این بود که این قانون در همه جای کائنات کاربرد دارد، هم در مورد افتادن سیب‌ها، و هم در مورد سیاره‌ها. او نوشت: "طبیعت با خودش بی‌نهایت ساده و راحت کنار می‌آید. هر استدلالی که در مورد حرکت اجسام بزرگ درست باشد، در مورد کوچکترها هم درست است."(۲) مکانیک نیوتونی تصویری از یک "کائنات کوکی[۹۰]" ترسیم کرد، جهانی که با سه قانون کوک می‌شود و سپس مسیر مکانیکی‌اش را طی می‌کند.

ریاضیدان پیر سیمون لاپلاس[۹۱] متوجه معنای تلویحی این دیدگاه کوکی برای پیش‌بینی شد: در سال ۱۸۱۴ او تأکید کرد که با توجه به قوانین نیوتون و با فرض دانستن موقعیت و سرعت هر ذره در کائنات، می‌توان، در اصل[۹۲]"، هر چیزی را در تمام زمان‌ها پیش‌بینی کرد.(۳) با اختراع کامپیوترهای الکترونیک در دهه ۱۹۴۰، این "در اصل" ظاهرا به "در عمل[۹۳]" نزدیکتر شده بود. دیدگاه‌های اصلاح شده درباره پیش‌بینی اما، دو اکتشاف عمده قرن بیستم نشان دادند که رؤیای لاپلاس درباره پیش‌بینی کامل ممکن نیست، حتی در اصل. یکی از این اکتشافات "اصل عدم قطعیت[۹۴]" در مکانیک کوانتوم بود که ورنر هایزنبرگ[۹۵] در سال ۱۹۲۷ مطرح کرد، مبنی بر این‌که نمی‌توان مقدار دقیق موقعیت و اندازه حرکت[۹۶]" (جرم ضرب در سرعت) یک ذره را همزمان مشخص کرد. هر چقدر که فرد در مورد این‌که یک ذره در یک زمان معین در کجا قرار دارد مطمئن‌تر باشد، کمتر می‌تواند درباره اندازه حرکت آن بداند، و برعکس. اما، تأثیرات اصل هایزنبرگ که اکثر مردم آن را امری عجیب و جالب تلقی کردند، تنها در دنیای کوانتوم ذرات

کوچک برقرار است، و پیامد چندانی برای پیش‌بینی در مقیاس بزرگ ندارد - برای مثال، پیش‌بینی آب و هوا.

شناخت آشوب سرانجام به رؤیای پیش‌بینی کامل تمام سیستم‌های پیچیده، کوانتوم یا غیر آن، پایان داد. تعریف ایده آشوب این است که سیستم‌هایی وجود دارند - سیستم‌های آشوبناک[۹۷] - که حتی عدم قطعیت اندکی در اندازه‌گیری موقعیت و اندازه حرکت اولیه می‌تواند منجر به خطاهای عظیمی در پیش‌بینی این مقادیر شود. این امر معروف است به "وابستگی حساس به شرایط اولیه[۹۸]."

در بخشی از دنیای طبیعی چنین عدم قطعیت‌هایی اهمیت چندانی ندارند. وقتی اندازه‌گیری‌های اولیه شما واقع‌بینانه هستند اما کاملا دقیق نیستند، پیش‌بینی‌های شما هم، حتی اگر دقیقا هدف‌گیری نشده باشند، در هر حال به واقعیت نزدیک هستند. برای مثال، اخترشناسان می‌توانند گرفتگی خورشید یا ماه را کمابیش به خوبی پیش‌بینی کنند، حتی به رغم این‌که عدم قطعیت‌های نسبتا زیادی در اندازه‌گیری موقعیت سیاره‌ها وجود دارد. اما وابستگی حساس به شرایط اولیه به ما می‌گوید که در سیستم‌های آشوبناک، حتی کوچکترین خطا در اندازه‌گیری اولیه شما سرانجام خطاهای عظیمی در پیش‌بینی حرکت آینده یک شیء به وجود می‌آورد. در چنین سیستم‌هایی (توفان‌های شدید نمونه خوبی هستند) هرگونه خطا، صرف‌نظر از این‌که چقدر کوچک باشد، پیش‌بینی‌های درازمدت را به طور جدی فاقد دقت لازم می‌کند.

این‌گونه رفتار دور از انتظار است و در واقع بسیاری از دانشمندان مدت‌ها از پذیرفتن امکان چنین چیزی امتناع می‌کردند. اما، آشوب به این معنی در اختلال‌های قلبی، در تلاطم مایعات، در مدارهای الکترونیک، در چکه کردن شیرهای آب، و در بسیاری دیگر از پدیده‌های ظاهرا نامربوط، مشاهده شده است. این روزها، وجود سیستم‌های آشوبناک یک امر پذیرفته شده علمی است.

مشکل بتوان گفت که چه‌کسی اول بار به امکان وجود چنین سیستم‌هایی پی برد. امکان وابستگی حساس به شرایط اولیه را عده‌ای مدت‌ها قبل از ابداع کوانتوم مطرح کرده بودند. برای مثال، فیزیکدان جیمز کلرک ماکسول[۹۹] در سال ۱۸۷۳ این فرضیه را مطرح کرد که گروهی از پدیده‌ها وجود دارند که از "عوامل مؤثری تأثیر می‌گیرند که اندازه فیزیکی آنها کوچکتر از آن است که یک موجود متناهی[۱۰۰] به حساب بیایند، اما ممکن است نتایجی فوق‌العاده با اهمیت به بار بیاورند."(۴) احتمالا اولین مثال روشن یک سیستم آشوبناک را ریاضیدان فرانسوی هانری پوانکاره[۱۰۱] در اواخر قرن نوزدهم مطرح کرد. پوانکاره بنیان‌گذار و احتمالا پرنفوذترین تدوین‌کننده رشته مدرن نظریه سیستم‌های دینامیک بود، که پیامد

طبیعی علم نیوتونی دینامیک است. پوانکاره وقتی کوشید مسئله‌ای بسیار ساده‌تر از پیش‌بینی حرکت یک توفان شدید را حل کند متوجه وابستگی حساس به شرایط اولیه شد. او سعی کرد که به مسئله‌ای ساده‌تر یعنی به مسئله‌ای که مسئله سه جسم[۱۰۲] نامیده می‌شود بپردازد: با استفاده از قوانین نیوتون حرکات سه جرم را تعیین کند که نیروی جاذبه بر یکدیگر اعمال می‌کنند. نیوتون مسئله دو جرم را حل کرده بود، اما مسئله سه جسم بسیار دشوارتر از کار درآمد. پوانکاره در رابطه با یک مسابقه ریاضی که برای گرامیداشت پادشاه سوئد برگذار می‌شد، در سال ۱۸۸۷ به این مسئله پرداخت. جایزه این مسابقه ۲۵۰۰ کرون سوئد بود، و به کسی تعلق می‌گرفت که راه‌حلی برای مسئله چند جسم[۱۰۳] بیابد: پیش‌بینی موقعیت آتی تعداد دلخواهی جرم که تحت قوانین نیوتون یکدیگر را جذب می‌کنند.

این مسئله از این پرسش الهام گرفته بود که آیا سیستم منظومه شمسی با ثبات است یا نه: آیا سیاره‌ها در مدارهای کنونی‌شان باقی می‌مانند یا از آنها منحرف می‌شوند؟ پوانکاره کارش را از اینجا آغاز کرد که بفهمد آیا می‌توان مسئله را صرفا برای سه جسم حل کرد یا نه.

او به موفقیت کامل دست نیافت - مسئله بسیار دشوار بود. اما کوشش او به قدری چشمگیر بود که در هر صورت جایزه را نصیب او کرد. مانند مورد نیوتون و آنالیز ریاضی، پوانکاره باید شاخه جدیدی از ریاضیات را ابداع می‌کرد، جای‌شناسی[۱۰۴] جبری، که بدون آن پرداختن به مسئله اساسا امکان‌پذیر نبود. مکان‌شناسی شکل بسطیافته‌ای از هندسه است، و در جریان بررسی پیامدهای هندسی مسئله سه جسم بود که پوانکاره به امکان "وابستگی حساس به شرایط اولیه" پی برد. او کشف خود را به این شرح جمع‌بندی کرد:

اگر قوانین طبیعت و وضعیت کائنات را در لحظه اولیه دقیقا می‌دانستیم، می‌توانستیم وضعیت همین کائنات را در یک لحظه بعدی دقیقا پیش‌بینی کنیم. اما حتی اگر قوانین طبیعی هیچ راز نامکشوفی نداشتند، وضعیت اولیه را کماکان با تقریب می‌دانستیم.

اگر این امر ما را قادر می‌کرد وضعیت بعدی را با همان تقریب پیش‌بینی کنیم، این همه آن چیزی بود که نیاز داشتیم، و می‌توانستیم بگوییم پدیده را پیش‌بینی کرده‌ایم، و این که از قوانین تبعیت می‌کند. اما همیشه این گونه نیست؛ این امکان هست که تفاوت‌های کوچکی در شرایط اولیه منجر به تفاوت‌های بزرگی در پدیده نهایی شود. خطای کوچکی در اولی خطای عظیمی در دومی به بار می‌آورد. و پیش‌بینی غیرممکن می‌شود..... (۵)

به عبارت دیگر، حتی اگر قوانین حرکت را به طور کامل بدانیم، دو مجموعه متفاوت از شرایط اولیه (در اینجا: موقعیت‌ها، جرم‌ها، و سرعت‌های اشیا)، حتی اگر به مقیاس اندکی متفاوت باشند، برخی اوقات می‌توانند نتایج بی‌نهایت متفاوتی در حرکت بعدی سیستم به بار آورند. پوانکاره در مسئله سه جسم نمونه‌ای از این را یافت.



هانری پوانکاره، ۱۸۵۴-۱۹۱۲

تنها پس از ابداع کامپیوتر الکترونیک بود که دنیای علم به اهمیت این پدیده پی برد. پوانکاره، که از زمانه خود خیلی جلوتر بود، حدس زده بود "وابستگی حساس به شرایط اولیه" تلاش برای پیش‌بینی درازمدت آب و هوا را به بن‌بست می‌کشاند. وقتی در سال ۱۹۶۳ هواشناس ادوارد لورنز[۱۰۵] پی برد که حتی مدل‌های کامپیوتری ساده پدیده‌های آب و هوایی در معرض "وابستگی حساس به شرایط اولیه" هستند،(۶) حدس زودهنگام پوانکاره تا حدودی تأیید شد. حتی با وجود مدل‌های کامپیوتری آب و هوایی مدرن و بسیار پیچیده کنونی، پیش‌بینی‌های هواشناسی در بهترین حالت فقط در حد هفته بعدی به طور معقولی درست هستند. هنوز روشن نیست که آیا این حد به دلیل آشوب بنیادی در آب و هواست، یا این حد را چقدر می‌توان با جمع‌آوری داده‌های بیشتر و ساخت مدل‌های باز هم بهتر افزایش داد.

خرگوش‌های خطی[۱۰۶] در تقابل با خرگوش‌های غیرخطی[۱۰۷]"

حال بیایید "وابستگی حساس به شرایط اولیه" را دقیق‌تر بررسی کنیم.

بزرگ‌نمایی[۱۰۸] عظیم عدم قطعیت اولیه در سیستم‌های آشوبناک حقیقتا چگونه پیش می‌آید؟ خاصیت اصلی این گونه سیستم‌ها غیرخطی بودن است.

سیستم خطی با فهمیدن تک‌تک اجزای آن و بعد کنار هم قرار دادن آنها قابل درک می‌شود. وقتی دو پسرم و خود من با هم آشپزی می‌کنیم، آنها دوست دارند هنگام اضافه کردن مواد غذایی جایشان را با هم عوض کنند.

جیک دو فنجان آرد می‌ریزد. بعد نیکی یک فنجان شکر اضافه می‌کند.

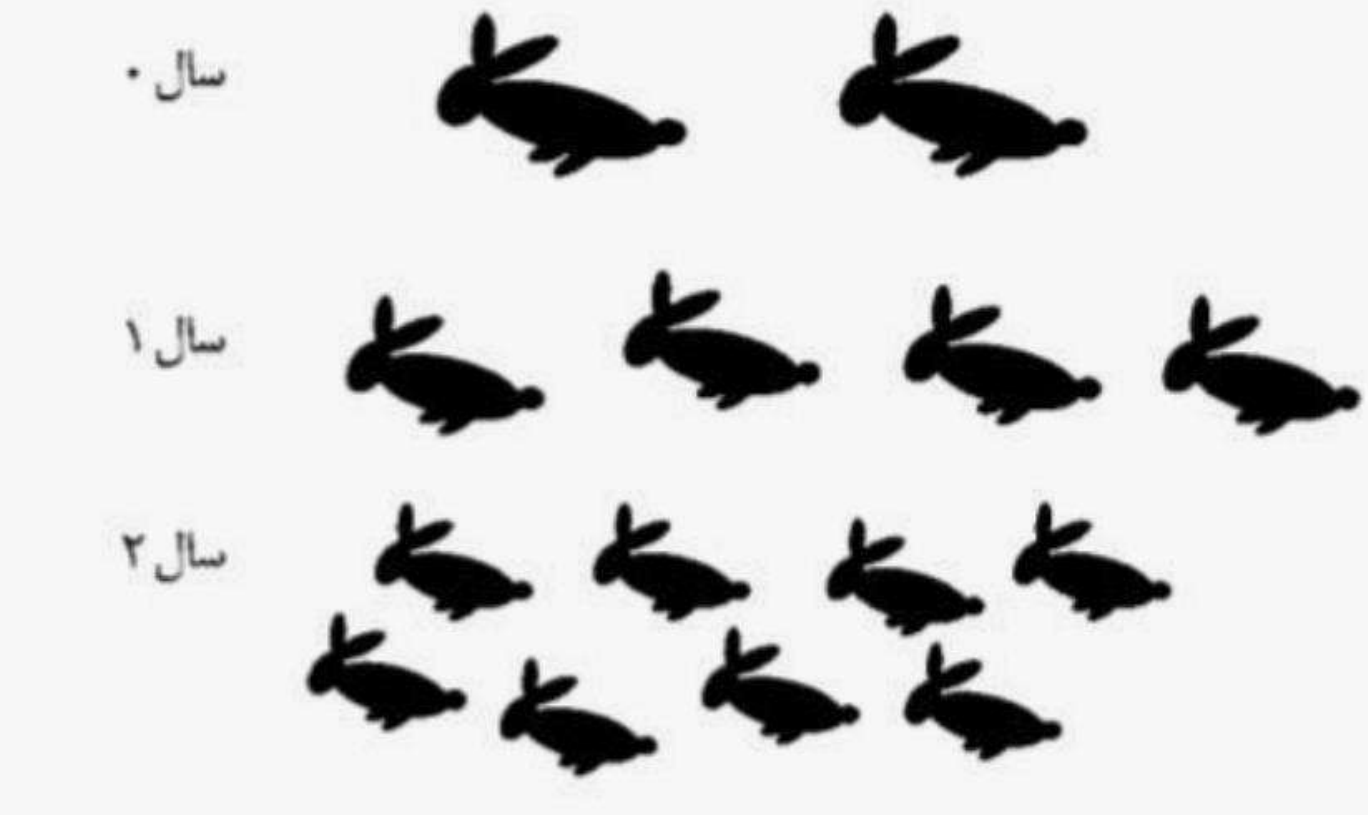
نتیجه، سه فنجان مخلوط آرد / شکر است. کل برابر مجموع اجزاست.

در سیستم غیرخطی کل با مجموع اجزا متفاوت است. جیک دو فنجان جوش‌شیرین، و نیکی یک فنجان سرکه می‌ریزد. کل این چیز منفجر می‌شود. (این امر را می‌توانید در خانه بیازمایید.) نتیجه؟ بیش از سه فنجان سرکه - جوش‌شیرین - دیوکسید کربن فش‌فش می‌کند.

تفاوت بین دو مثال این است که در اولی، آرد و شکر واقعا برهم‌کنش نمی‌کنند تا چیز جدی خلق کنند، درحالی‌که در دومی، سرکه و جوش‌شیرین برهم‌کنش (نسبتا شدید) می‌کنند تا مقدار زیادی دیوکسیدکربن به وجود آورند.

خطی بودن رؤیای تقلیل‌گرایان است، و غیرخطی بودن گهگاه کابوس آنان است. درک تمایز بین خطی بودن و غیرخطی بودن بسیار مهم و باارزش است. برای درک بیشتر این تمایز، و همچنین پدیده آشوب، اجازه بدهید با استفاده از نمایش کلاسیک سیستم‌های خطی و غیرخطی در زمینه پویایی زیستی جمعیت، دست به یک کاوش ریاضی بزنیم.

فرض کنید جمعیتی از خرگوش‌ها را دارید که زاد و ولد می‌کنند، و فرض کنید که هر سال تمامی این خرگوش‌ها جفت‌گیری می‌کنند، و هر زوج دقیقا چهار نوزاد به دنیا می‌آورند و بعد می‌میرند. رشد جمعیت، وقتی با دو خرگوش شروع شود در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است.

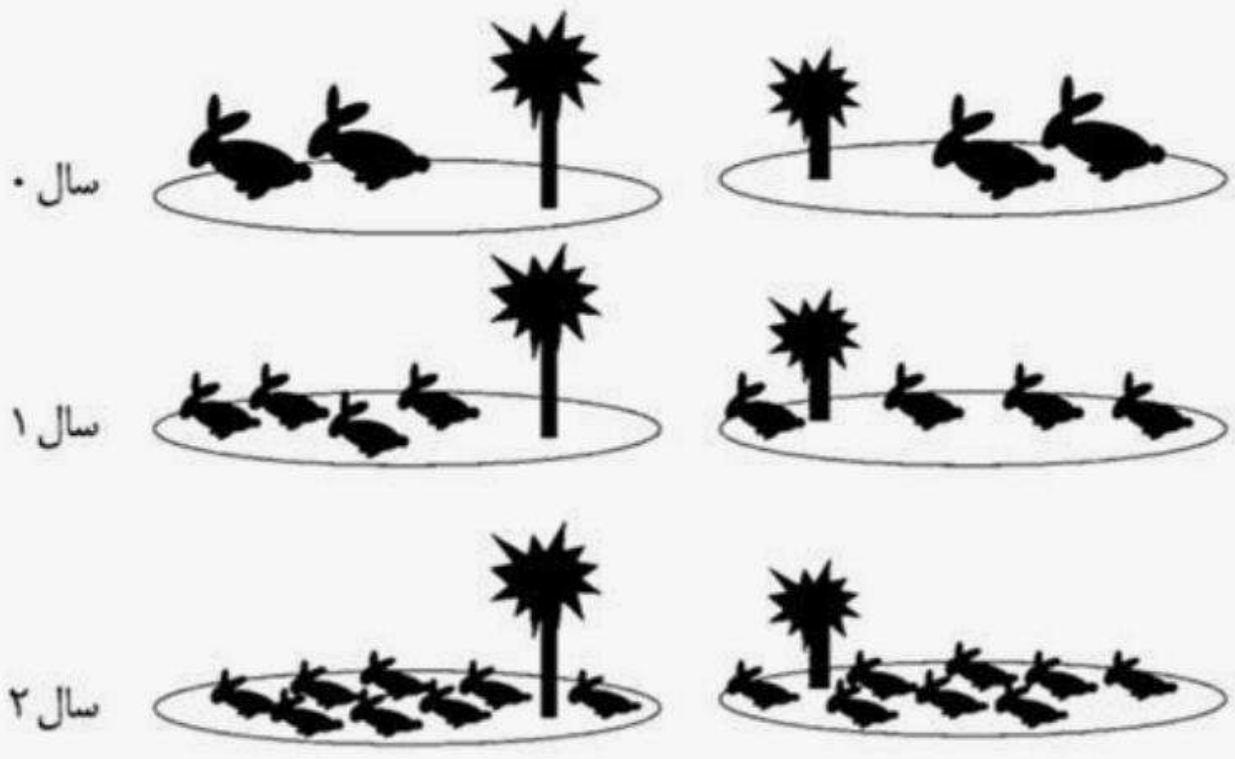


شکل ۱-۲. خرگوش‌هایی که جمعیت‌شان دو برابر می‌شود.

فهم این موضوع ساده است که جمعیت در هر سال دو برابر می‌شود، بدون آن که حدی داشته باشد (که به این معناست که خرگوش‌ها به سرعت نه تنها این سیاره، بلکه منظومه شمسی، و کائنات را به اشغال خود درمی‌آورند).

این یک سیستم خطی است: کل مساوی با جمع (۷). اجزاست از گفتن این حرف منظورم چیست؟ بیایید جمعیت چهار خرگوش را در نظر بگیریم و آنها را در میان دو جزیره جداگانه تقسیم کنیم، در هر جزیره دو خرگوش.

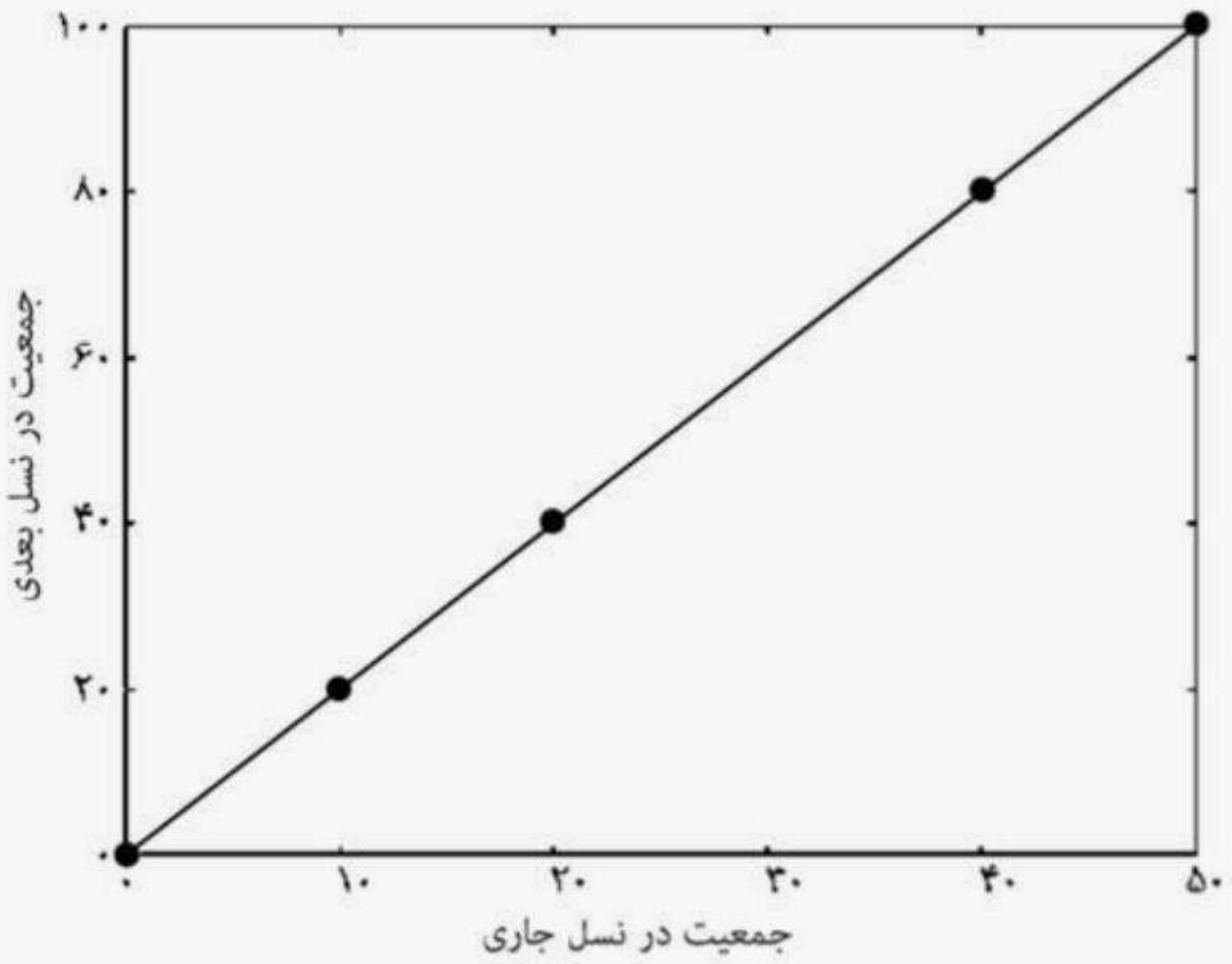
سپس اجازه بدهید خرگوش‌ها به تولیدمثل بپردازند. رشد جمعیت در طول دو سال در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲. خرگوش‌هایی که جمعیت‌شان دو برابر می‌شود و در دو جزیره تقسیم شده‌اند.

هر یک از دو جمعیت هر سال دو برابر می‌شود. اگر جمعیت دو جزیره را به هم اضافه می کردید، همان تعداد خرگوش را داشتید که وقتی آنها را جدا نکرده بودید ـ یعنی اگر همه در یک جزیره زندگی کرده بودند.

اگر منحنی رابطه این دو را در صفحه مختصاتی ترسیم کنید که محور افقی آن جمعیت سال جاری و محور عمودی جمعیت سال بعد را نشان می‌دهد، یک خط مستقیم به دست می‌آورید (شکل ۳-۲). دانش‌واژه سیستم خطی از اینجا ناشی می‌شود.

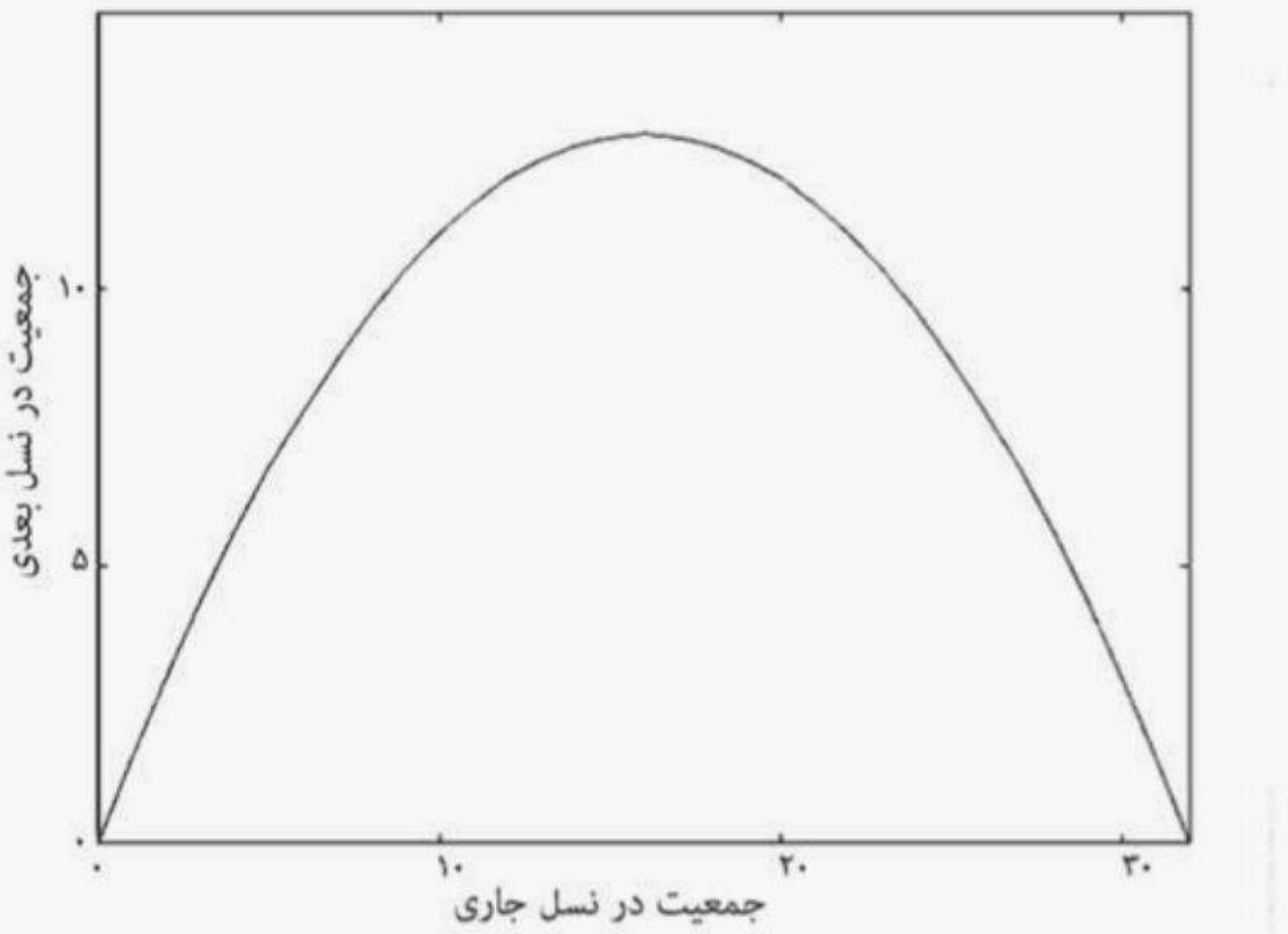


شکل ۲-۳. منحنی نشان می‌دهد که بر مبنای مدل خطی، تعداد جمعیت در هر سال چگونه وابسته به تعداد جمعیت در سال پیش از آن است.

اما وقتی به طور واقع‌بینانه حدی برای رشد جمعیت قائل شویم چه اتفاقی می‌افتد؟ این ما را ملزم می‌کند که قاعده رشد را غیرخطی کنیم. مثل قبل فرض کنید که هر سال هر زوج خرگوش چهار بچه به دنیا می‌آورند و بعد می‌میرند. اما حال فرض کنید که برخی از بچه‌ها قبل از این‌که تولیدمثل کنند، به دلیل جمعیت زیاد بمیرند. زیست. جمعیت‌شناسان[۱۰۹] برای تشریح رشد جمعیت در شرایطی که جمعیت زیاد است از معادله‌ای استفاده می‌کنند که مدل منطق‌گرا[۱۱۰] نامیده می‌شود.) در اینجا واژهٔ مدل به معنای یک فرمول ریاضی است که رشد جمعیت را به شکلی ساده نشان می‌دهد.

به منظور استفاده از مدل منطق‌گرا برای محاسبه نسل بعدی جمعیت، باید تعداد جمعیت نسل حاضر، میزان موالید، میزان مرگ و میر (احتمال این‌که یک فرد به دلیل جمعیت زیاد بمیرد) و حداکثر ظرفیت تحمل[۱۱۱] (حد مطلق افزایش جمعیت که زیستگاه می‌تواند تحمل کند) به مدل منطق‌گرا داده شود.

معادله واقعی مدل منطق‌گرا را نمی‌آورم (در یادداشت‌ها آمده است)، اما رفتار آن را می‌توانید در شکل ۲-۴ ببینید. (۹)



شکل ۲-۴. در شرایطی که میزان موالید مساوی ۲، میزان مرگ و میر مساوی ۰.۴، و ظرفیت تحمل مساوی ۳۲ است. منحنی بر مبنای محاسبه مدل منطق‌گرا نشان می‌دهد تعداد جمعیت هر سال چگونه وابسته به تعداد جمعیت سال قبل است. برای سایر مقادیر این

پارامترها نیز منحنی به شکل سهمی خواهد بود.

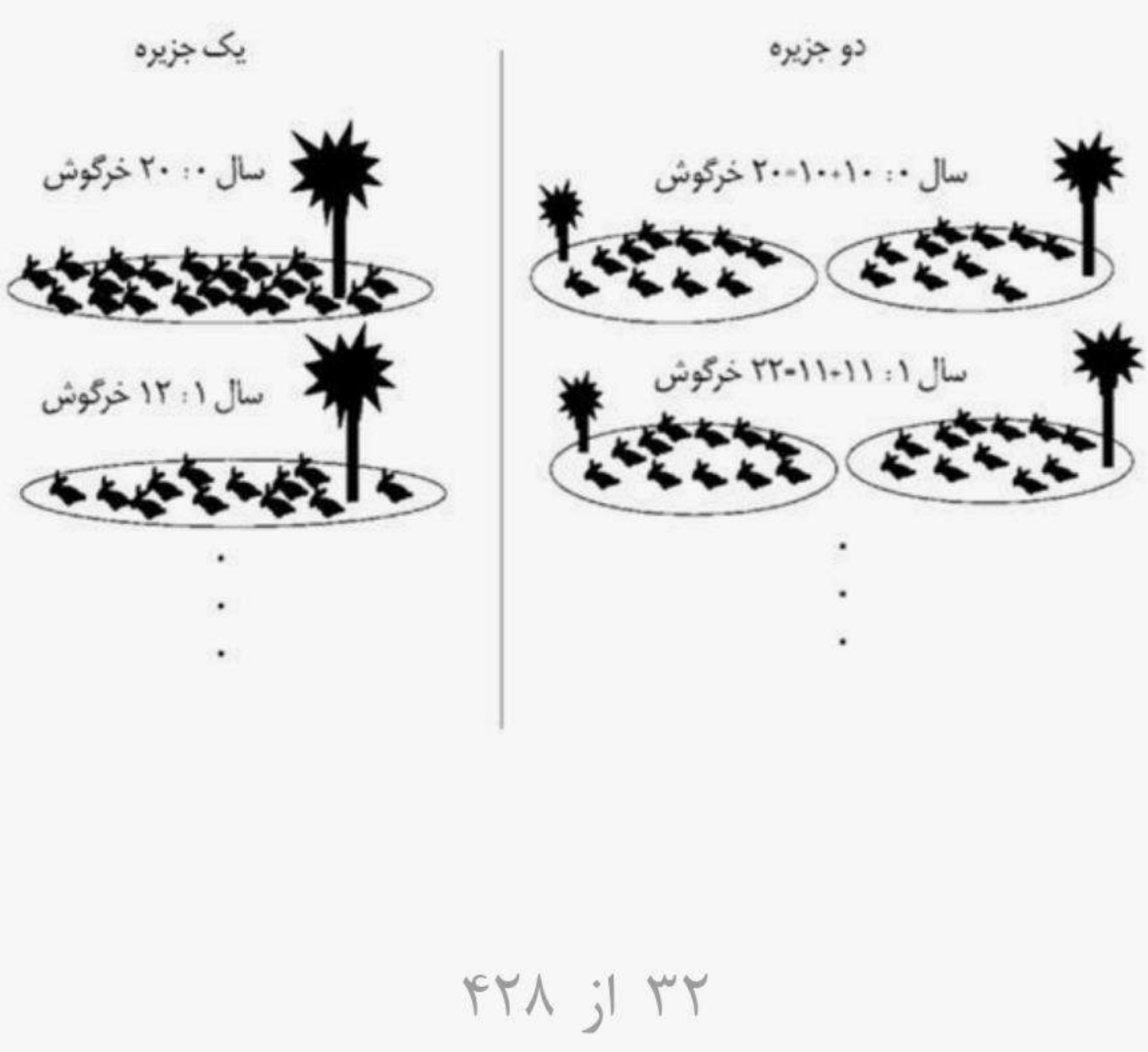
یک دقیقه صبر کنید ببینم! چگونه می‌توانیم ۰.۲۵ خرگوش داشته باشیم، و حتی کمتر از آن ۰.۰۱۸۱۶ خرگوش؟ روشن است که در زندگی واقعی چنین چیزی ممکن نیست، اما این یک مدل ریاضی است، و کسری از خرگوش را ممکن می‌کند. این امر محاسبه ریاضی را آسان‌تر کرده، و کماکان پیش‌بینی معقولی از جمعیت واقعی خرگوش‌ها را به دست می‌دهد.

این فرایند محاسبه مکرر تعداد جمعیت بعدی، که هر بار با تعداد جمعیت بلافاصله قبلی آغاز می‌شود، "تکرار مدل[۱۱۲]" نامیده می‌شود.

اگر میزان مرگ و میر را دوباره مساوی ۰.۴ قرار دهیم و ظرفیت تحمل را به ۶۴ برسانیم چه اتفاقی می‌افتد؟ مدل به ما می‌گوید که اگر با بیست خرگوش شروع کنیم، تا سال نهم جمعیت به مقدار بیست و چهار می‌رسد و بعد ثابت می‌ماند.

احتمالا از این مثال‌ها پی برده‌اید که رفتار پیچیده‌تر از وقتی است که هر سال جمعیت را صرفا دو برابر می‌کنیم. دلیل این امر آن است که به خاطر مرگ ناشی از فراوانی جمعیت، مدل غیرخطی است. منحنی آن به جای این‌که یک خط باشد سهمی است (شکل ۴-۲). بر مبنای مدل منطق‌گرا، رشد جمعیت با جمع اجزا کاملا مساوی نیست. برای نشان دادن این امر، اجازه بدهید ببینیم اگر جمعیتی از بیست خرگوش را در نظر بگیریم و آن را به دو گروه ده‌تایی تقسیم کنیم و مدل را برای هر جمعیت تکرار کنیم چه اتفاقی می‌افتد. (۲ = میزان موالید، ۰.۴ = میزان مرگ و میر، مانند اولین مثال در بالا) نتیجه در شکل ۵-۲ نشان داده شده است.

در سال اول، جمعیت اولیه بیست خرگوش به دوازده خرگوش کاهش یافته، اما هر کدام از جمعیت اولیه ده خرگوش در حال حاضر یازده خرگوش دارد، در مجموع بیست و دو خرگوش. رفتار کل به وضوح مساوی جمع رفتار دو جزء نیست.



شکل ۲-۵. جمعیت خرگوش که در میان دو جزیره تقسیم شده، و از مدل منطق‌گرا تبعیت می‌کند.

نگاشت منطق‌گرا

بسیاری از دانشمندان و ریاضیدانانی که این‌گونه امور را مورد مطالعه قرار داده‌اند از شکل ساده‌تری از مدل منطق‌گرا به نام نگاشت منطق‌گرا استفاده کرده‌اند که شاید مشهورترین معادله در علم سیستم‌های پویا و آشوب باشد. (۱۰) با ترکیب تأثیرات میزان موالید و میزان مرگ و میر در قالب یک عدد به نام،R مدل منطق‌گرا ساده می‌شود. و تعداد جمعیت با مفهومی مربوط به نام "کسری از ظرفیت تحمل" که x نام می‌گیرد جایگزین می‌شود.

با در نظر گرفتن این مدل ساده، دانشمندان و ریاضیدانان موضوع رشد جمعیت، ظرفیت تحمل، و هر چیز دیگر مربوط به دنیای واقعی را بی‌درنگ و به کلی فراموش می‌کنند، و خیلی ساده در رفتار حیرت‌آور خود این معادله غرق می‌شوند. ما هم همین کار را می‌کنیم.

معادله را در زیر آورده‌ام، x مقدار کنونی x و x مقدار آن در گام زمانی بعدی است[۱۱۳].

$$x_{t+1} = Rx_t(1 - x_t)$$

معادله نگاشت منطق‌گرا را آورده‌ام تا به شما نشان دهم چقدر ساده است. درواقع یکی از ساده‌ترین سیستم‌هایی است که ماهیت آشوب را نشان می‌دهد: "وابستگی حساس به شرایط اولیه". نگاشت منطق‌گرا از طریق مقاله‌ای که زیست-ریاضیدان[۱۱۴] رابرت می در سال ۱۹۷۱ در مجله معتبر نیچر[۱۱۵] منتشر کرد، مورد توجه زیست. جمعیت‌شناسان قرار گرفت. (۱۱) پیش از آن چندین ریاضیدان از جمله استانیسلاو الم، جان فون نویمن، نیکولاس متروپولیس، پال اشتاین، و میرون اشتاین این مسئله را به تفصیل تحلیل کرده بودند.(۱۲) اما این نگاشت و عملا زمانی شهرت یافت که در دهه ۱۹۸۰ فیزیکدان میچل فایگن‌بام[۱۱۶]" آن را برای نشان دادن خواص فراگیری به کار برد که در گروه بسیار بزرگی از سیستم‌های آشوبناک دیده می‌شود. نگاشت منطق‌گرا به دلیل سادگی ظاهری و پیشینه غنی‌اش یک وسیله عالی برای معرفی کردن مفاهیم اصلی مربوط به نظریه سیستم‌های پویا و آشوب است.

وقتی مقادیر R را تغییر می‌دهیم نگاشت منطق‌گرا رفتار خیلی جالبی بروز می‌دهد. اجازه بدهید با R = ۲ آغاز کنیم. این هم ضروری است. x که را در ابتدا بین صفر و یک، برای مثال ۰.۵، در نظر بگیریم. اگر این اعداد را به نگاشت منطق‌گرا وارد کنیم، حل معادله نشان می‌دهد که x مساوی ۰.۵ است.،x و از آن به بعد هم، ۰.۵ می‌شوند. در نتیجه اگر R = ۲ و جمعیت از مقدار نصف حداکثر شروع شود، همیشه در آن مقدار ثابت می‌ماند.

حال بیایید x = ۰.۲ را امتحان کنیم. برای محاسبه این مورد می‌توانید از ماشین‌حساب استفاده

کنید. (من از ماشینی استفاده می‌کنم که تا هفت رقم بعد از اعشار را نشان می‌دهد.) نتایج جالب‌تر می‌شوند:

$$x_0 = ۰/۲$$
$$x_1 = ۰/۳۲$$
$$x_2 = ۰/۴۳۵۲$$
$$x_3 = ۰/۴۹۱۶۰۱۹$$
$$x_4 = ۰/۴۹۹۸۵۸۹$$
$$x_5 = ۰/۵$$
$$x_6 = ۰/۵$$

همان نتیجه نهایی (x = ۰.۵ دائمی) به دست می‌آید اما در این مورد برای رسیدن به آن به پنج تکرار نیاز است.

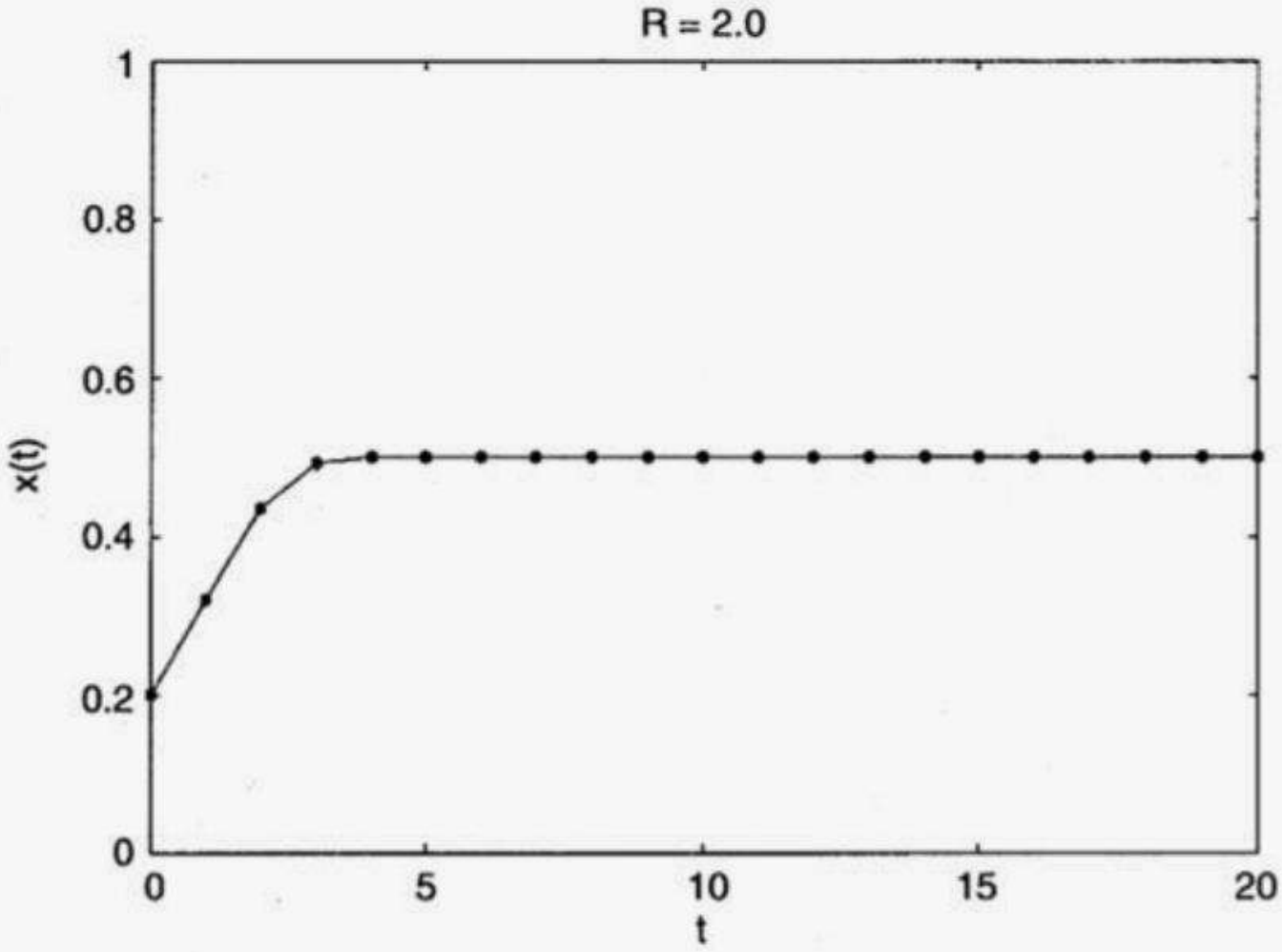
دیدن این نتایج به فهم موضوع کمک می‌کند. منحنی x, در هر زمان t برای ۲۰ گام زمانی در شکل ۶-۲ نشان داده شده است. نقاط را با خطوطی به هم وصل کرده‌ام تا بهتر نشان داده شود که چگونه وقتی ۴ افزایش می‌یابد، x به سرعت به ۰.۵ میل می‌کند.

اگر x بزرگ باشد، مثلا ۰.۹۹ باشد، چه اتفاقی می‌افتد؟ شکل ۷-۲ منحنی به دست آمده را نشان می‌دهد.

بار دیگر همان نتیجه نهایی پیش می‌آید، اما مسیر رسیدن به آن طولانی‌تر و چشمگیرتر است.

احتمالا تا حالا حدس زده‌اید: اگر R = ۲ باشد، x همیشه در نهایت به ۰.۵ می‌رسد و در آنجا ثابت می‌ماند. مقدار ۰.۵ نقطه ثابت[۱۱۷] نامیده می‌شود:

این که چه مدت طول می‌کشد تا به آنجا برسید بستگی به این دارد که از کجا آغاز کنید، اما وقتی به آنجا برسید، ثابت می‌مانید.



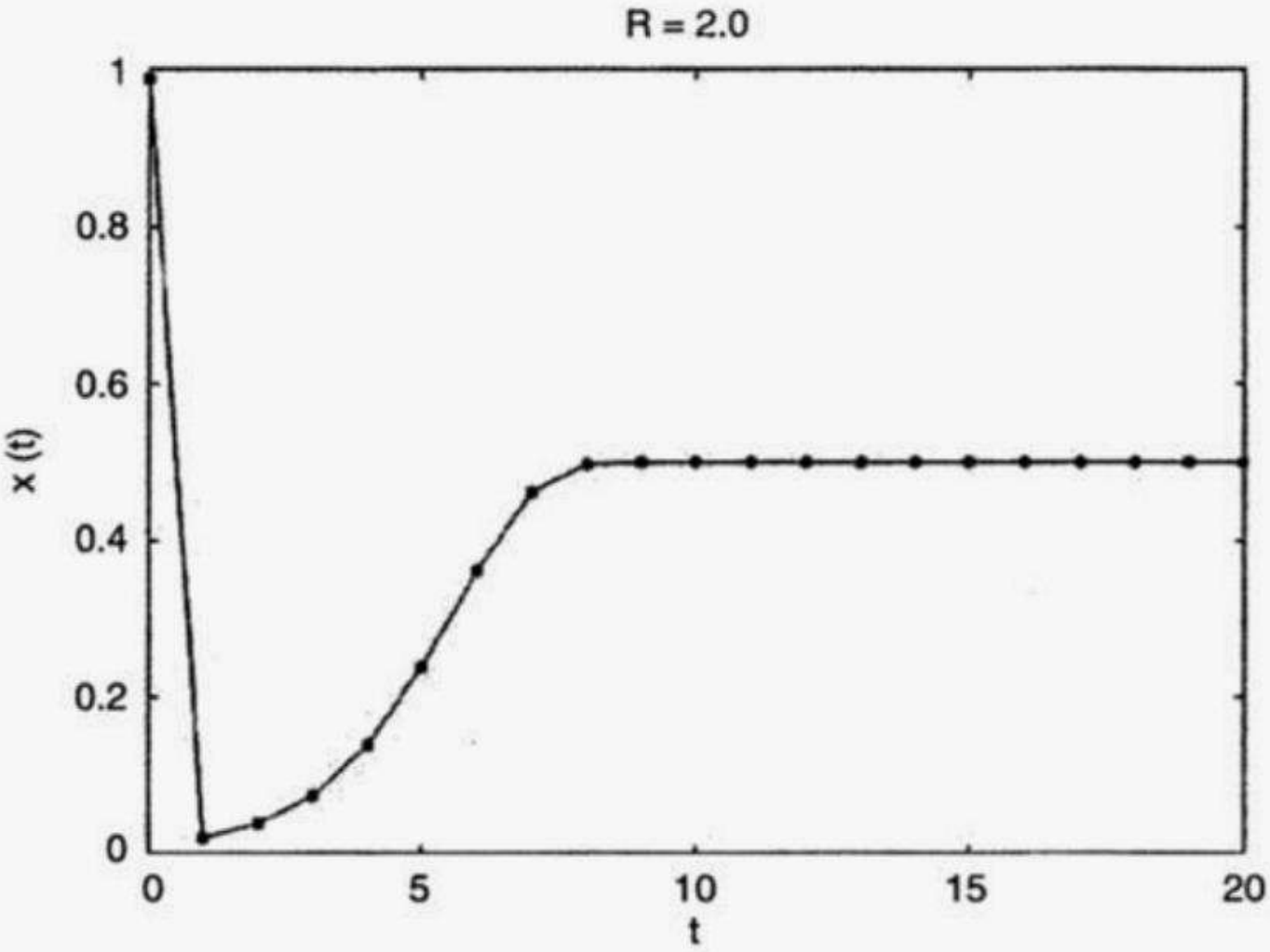
شکل ۲-۶. رفتار نگاشت منطق گرا وقتی R = ۲ و x = ۰.۲ است.

اگر مایل باشید، می‌توانید یک مجموعه محاسبات برای R =۲.۵ انجام دهید، در این حال پی می‌برید که این سیستم نیز همیشه به نقطه ثابتی می‌رسد، اما این بار نقطه ثابت ۰.۶ است.

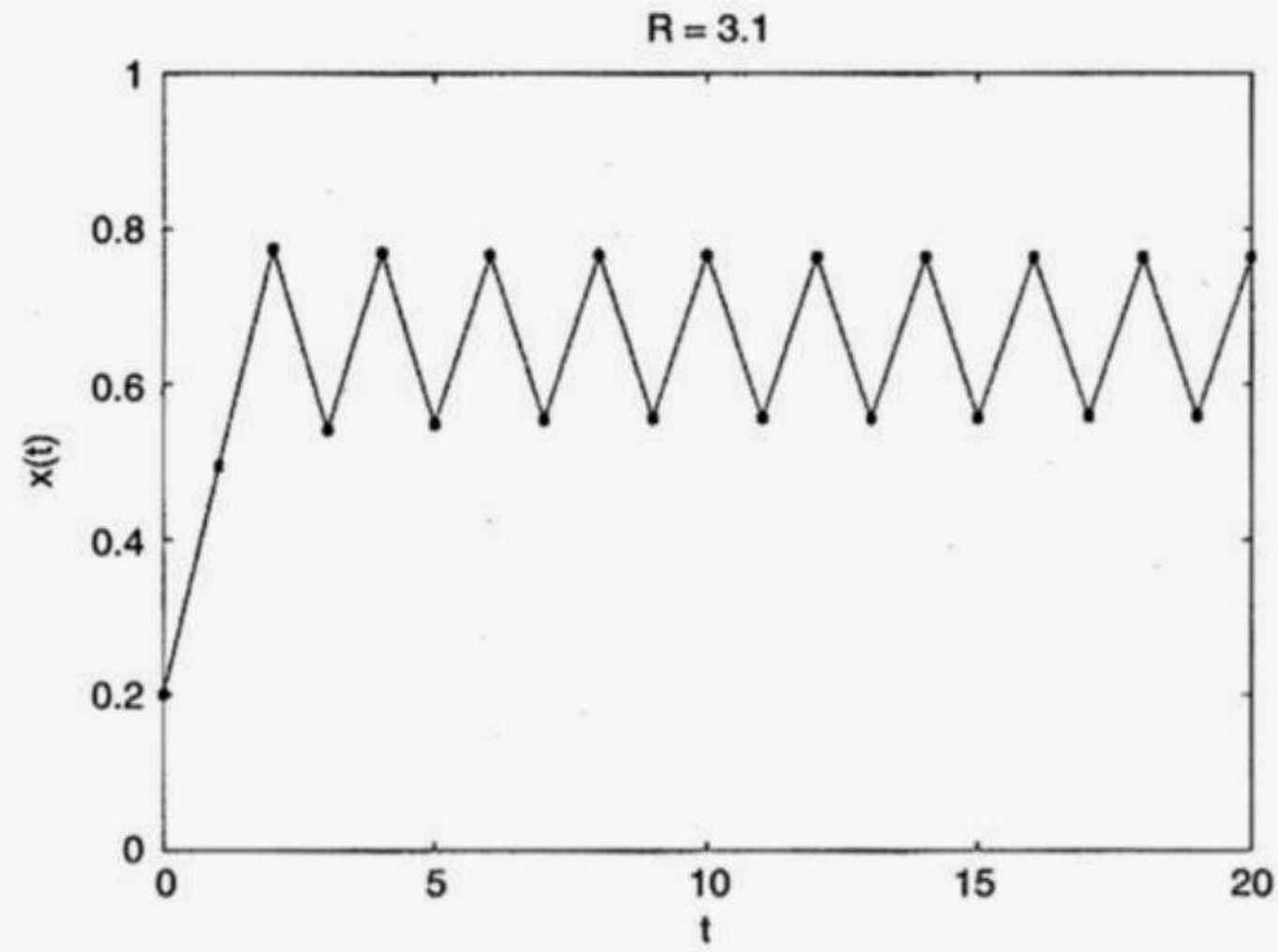
برای کمی تفریح بیشتر، فرض می‌کنیم R.= ۳.۱ حال رفتار نگاشت منطق گرا بغرنج‌تر می‌شود. فرض می‌کنیم x.= ۰.۲ منحنی مربوط در شکل ۲-۸ نشان داده شده است.

در این مورد x هرگز در یک نقطه ثابت نمی‌ماند؛ در عوض سرانجام بین دو مقدار به نوسان می‌افتد، که تصادفا ۰.۵۵۸۰۱۴۱ و ۰.۷۶۴۵۶۶۵ هستند.

اگر اولی به فرمول داده شود دومی حاصل می‌شود، و برعکس. در نتیجه این نوسان برای همیشه ادامه پیدا می‌کند.



شکل ۲-۷. رفتار نگاشت منطق گرا برای R = ۲ و x۰ =۰.۹۹



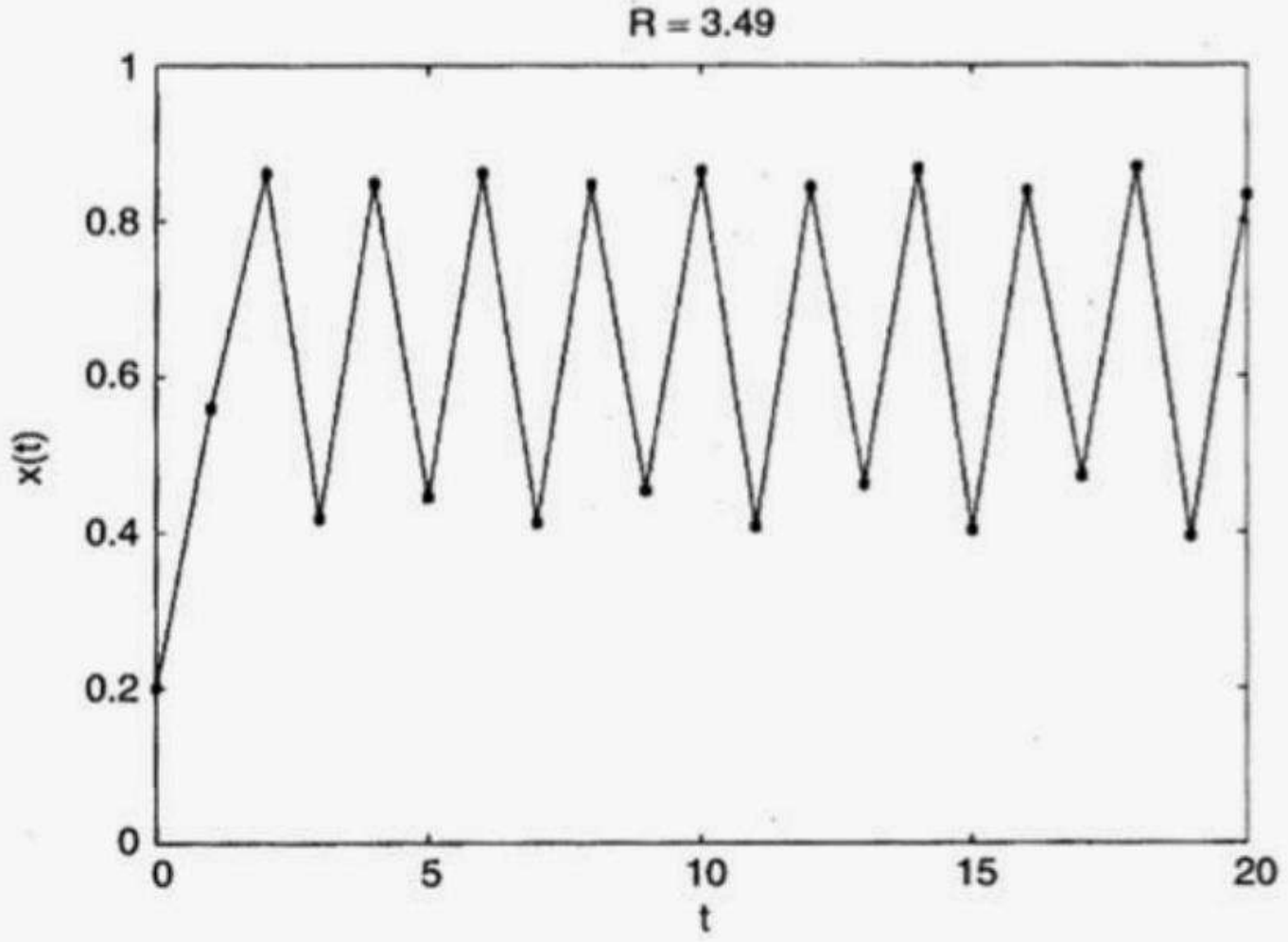
شکل ۲-۸. رفتار نگاشت منطق گرا برای R = ۳.۱ و x۰=۰.۲

صرف‌نظر از این که چه مقدار به x داده بشود، سرانجام این نوسان پیش می‌آید. این نوع از رفتار نهایی (نقطه ثابت یا نوسان) "جلب‌کننده[۱۱۸]" نامیده می‌شود، چون با مسامحه می‌توان گفت، هر شرط اولیه‌ای سرانجام "جلب آن می‌شود."

برای مقادیر R کمتر و نزدیک به ۳.۴، نگاشت منطق گرا رفتار مشابهی را نشان می‌دهد. پس از

چند بار تکرار، سیستم بین دو مقدار مختلف نوسان می‌کند (جفت مقادیر نهایی به ازاء هر مقدار R متفاوت خواهد بود.) چون سیستم بین دو مقدار نوسان می‌کند گفته می‌شود که دوره تناوب‌اش[۱۱۹] مساوی با ۲ است.

اما در مقداری بین R = ۳.۴ و R = ۳.۵ یک تغییر غیرمنتظره رخ می‌دهد. هر مقداری به x داده شود، سیستم سرانجام به جای دو مقدار بین چهار مقدار متمایز به نوسان می‌افتد. برای مثال، اگر داشته باشیم R = ۳.۴۹ و x۰ = ۰.۲، نتایج به دست آمده را در شکل ۹-۲ می‌بینیم.



شکل ۲-۹. رفتار نگاشت منطق‌گرا برای R = ۳.۴۹ و x۰=۰.۲

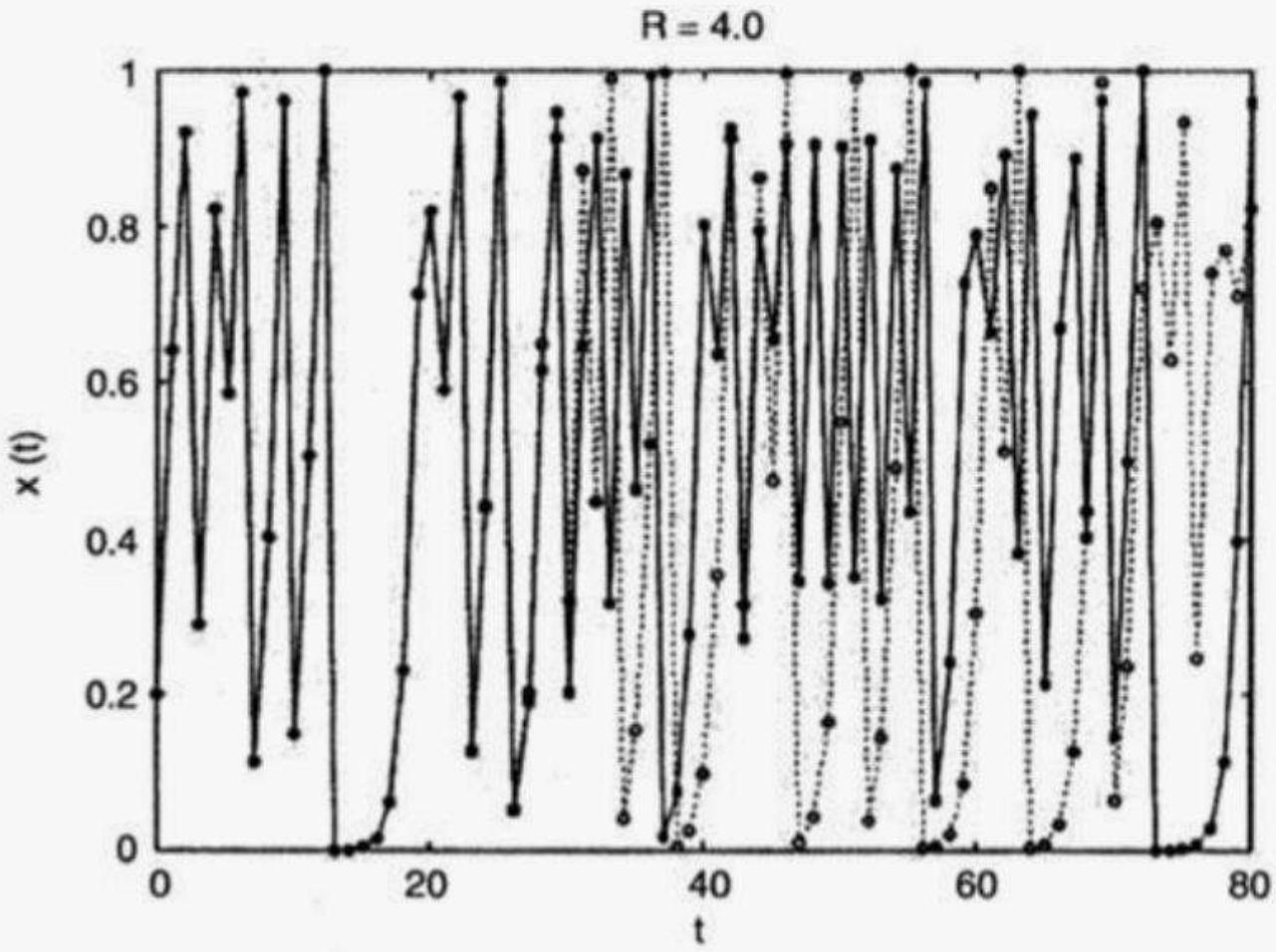
در واقع، مقادیر x بین چهار مقدار مختلف با سرعتی نسبی به نوسان می‌افتد (که اگر به موضوع علاقه داشته باشید، تصادفا مقادیر تقریبی آن عبارتند از ۰.۸۷۲، ۰.۳۸۹، ۰.۸۲۹، و ۰.۴۹۴) یعنی، در مقداری از R بین ۳.۴ و ۳.۵، دوره تناوب نوسان نهایی به طور غیرمنتظره از ۲ به ۴ دو برابر شده است.

در جایی بین R = ۳.۵۴ و R = ۳.۵۵ دوره تناوب به طور غیرمنتظره باز هم دو برابر می‌شود، و به ۸ جهش می‌کند. جایی بین ۳.۵۶۴ و ۳.۵۶۵ دوره تناوب به ۱۶ جهش می‌کند. جایی بین ۳.۵۶۸۷ و ۳.۵۶۸۸ دوره تناوب به ۳۲ جهش کند. پس از افزایش‌های کوچکتر و کوچکتر، R دوره تناوب دوباره و دوباره دو برابر می‌شود، تا زمانی که مقدار R تقریبا ۳.۵۶۹۹۴۶ می‌شود، که در این حال دوره تناوب تقریبا بی‌نهایت است. قبل از آن نقطه، رفتار نگاشت منطق‌گرا تا حدودی قابل پیش‌بینی بود. اگر مقدار R را به من می‌دادید، می‌توانستم رفتار درازمدت نهایی را از هر نقطه آغاز x۰ به شما بگویم:

رسیدن به نقاط ثابت وقتی R کوچکتر و نزدیک ۳.۱ است، دوره تناوب دو وقتی R بین ۳.۱ و ۳.۴

است، و به همین ترتیب.

وقتی R تقریبا ۳.۵۶۹۹۴۶ است، مقادیر x دیگر در نوسان نیستند، در عوض دچار آشوب (۱۳). می‌شوند در اینجا معنای آن را توضیح می‌دهم. اجازه بدهید رشته مقادیر ۲x ،۱x، ۰x و غیره را خط سیر[۱۲۰] x بنامیم. در مقادیری از R که آشوب به دنبال می‌آید، دو خط سیر که از مقادیر بسیار مشابه ۰x آغاز می‌شوند، به جای این‌که به نقطه ثابت یکسانی همگرا شوند، یا نوسان کنند، در عوض گام به گام از هم واگرا می‌شوند. در R=۳.۵۶۹۹۴۶ این واگرایی به آهستگی رخ می‌دهد، اما یک وابستگی حساس چشمگیرتر وقتی رخ می‌دهد که R = ۴.۰ باشد. ابتدا ۰x = ۰.۲ را در نظر می‌گیرم و نگاشت منطق‌گرا را تکرار می‌کنم تا یک خط سیر را به دست آورم. سپس با یک ۰x جدیدی کار را دوباره آغاز می‌کنم، که با قرار دادن یک ۱ در محل دهمین رقم اعشار آن را اندکی افزایش می‌دهم، ۰x = ۰.۲۰۰۰۰۰۰۰۰۱، و بار دیگر نگاشت منطق‌گرا را تکرار می‌کنم تا دومین خط سیر را به دست آورم. در شکل ۱۰-۲ اولین خط سیر، منحنی تیره با دایره‌های سیاه است، و دومین خط سیر خط روشن با دای ره‌های باز است.



شکل ۱۰ـ۲. دو خط سیر نگاشت منطق‌گرا مربوط به R = ۴/۰ : x_0 = ۰/۲ و x_0 = ۰/۲۰۰۰۰۰۰۰۰۱

دو خط سیر بسیار نزدیک به یکدیگر شروع می‌شوند (آن‌قدر نزدیک که خط سیر پیوسته اولی، جلو دید ما را از خط نقطه‌چین دوم می‌گیرد)، اما بعد از ۳۰ یا همین حدود تکرار، رفته رفته به شکل چشمگیری واگرا می‌شوند، و در فاصله کوتاهی، دیگر پس از آن هیچ رابطه‌ای بین آنها وجود ندارد. منظور از "وابستگی حساس به شرایط اولیه"، همین است.

تا اینجا سه طبقه متفاوت از رفتار نهایی (جلب‌کننده) را دیدیم: نقطه ثابت، تناوبی، و آشوبناک

(جلب‌کننده‌های آشوبناک را بعضی اوقات "جلب‌کننده‌های شگفت[۱۲۱]" نیز می‌نامند.) نوع جلب‌کننده یکی از شیوه‌هایی است که به کمک آن نظریه سیستم‌های دینامیک رفتار یک سیستم را مشخص می‌کند.

بیایید یک دقیقه‌ای مکث کنیم و در نظر بگیریم که رفتار آشوبناک واقعا چقدر چشمگیر است. نگاشت منطق‌گرا معادله‌ای بی‌نهایت ساده و کاملا قطعی[۱۲۲] است: هر tx به یک و فقط یک مقدار

$$x_{t+1}$$

ربط داده می‌شود. و با وجود این، خط سیرهای آشوب‌زده که با توجه به مقادیر معین،R از این نگاشت به دست می‌آیند، خیلی تصادفی به نظر می‌رسند - آن‌قدر که برای تولید اعداد شبه تصادفی در کامپیوترها از نگاشت منطق‌گرا استفاده می‌شود. بدین ترتیب تصادفی بودن[۱۲۳]" می‌تواند از یک سیستم بسیار ساده قطعی پدیدار شود.

افزون بر این، به ازای مقادیری از R که آشوب را به وجود می‌آورند، اگر هرگونه عدم قطعیت در شرط اولیه x۰ وجود داشته باشد، زمانی می‌رسد که در ورای آن مقدار آتی را نمی‌توان پیش‌بینی کرد. این امر در مورد R = ۴ در بالا نشان داده شد. اگر مقدار دهمین اعشار، یا بعد از آن، را در x۰ ندانیم - محدودیت کاملا محتملی در بسیاری از مشاهدات تجربی ـ در t = ۳۰ یا حدود آن، مقدار tx, غیرقابل پیش‌بینی است. در بسیاری از مقادیر R که آشوب به دنبال می‌آید، عدم قطعیت در هر محل رقم اعشاری، x۰ هر قدر هم که در بسط اعشاری دور از ممیز اعشاری باشد، منجر به پیش‌بینی‌ناپذیری در بعضی مقادیر t می‌شود.

رابرت می، زیست-ریاضیدان، این خواص کمابیش حیرت‌آور را جمع‌بندی می‌کند، که واگویه گفته پوانکاره است:

این واقعیت که این معادله ساده و قطعی (۱) {یعنی نگاشت منطق‌گرا} می‌تواند خط سیرهای پویایی داشته باشد که شبیه نوعی پارازیت تصادفی است، پیامدهای عملی نگران‌کننده‌ای دارد.

برای مثال، به این معنی است که نوسان‌های به ظاهر نامنظم در داده‌های آماری[۱۲۴] در مورد یک جمعیت جانوری لزوما نباید نشانه بی‌نظمی‌های یک محیط غیرقابل پیش‌بینی یا خطاهای نمونه‌برداری باشند: این بی‌نظمی‌ها ممکن است ناشی از رابطه رشد جمعیت سخت قطعی، مانند معادله (۱) باشند... به جای آن، امکان این مشاهده وجود دارد که در یک نظام آشوب‌زده، شرایط اولیه‌ای که به میزان دلخواه نزدیک به هم هستند، منجر به خط سیرهایی شوند که پس از مدت زمانی به اندازه کافی طولانی، به طور گسترده‌ای واگرا شوند. یعنی این‌که، حتی اگر مدل ساده‌ای داشته باشیم که تمامی پارامترهای آن دقیقا مشخص باشند، پیش‌بینی درازمدت در هر صورت غیرممکن است. (۱۵) در یک کلام، وجود آشوب در یک سیستم حاکی از این است

که پیش‌بینی کامل به شیوه لاپلاس غیرممکن است، نه تنها در عمل بلکه همچنین در اصل، چون هرگز نمی‌توانیم x۰ را تا بی‌نهایت رقم اعشار بدانیم.

این یک نتیجه منفی تام و تمام است، که همراه با مکانیک کوانتوم، دیدگاه خوش‌بینانه قرن نوزدهمی درباره کائنات کوکی نیوتونی را که در مسیری قابل پیش‌بینی تیک و تاک می‌کرد به دست فراموشی سپرد.

اما آیا می‌توان از نگاشت منطق‌گرا درس مثبت‌تری فراگرفت؟ با توجه به این‌که هدف نظریه سیستم‌های دینامیک، کشف اصولی درباره سیستم‌هایی است که در طول زمان تغییر می‌کنند، آیا نگاشت منطق‌گرا می‌تواند کمکی برای رسیدن به این هدف بکند؟ درواقع پژوهش‌های عمیق‌تر بر روی نگاشت منطق‌گرا و نگاشت‌های مربوط به آن به نتایج ژرف و حیرت‌آوری منجر شده‌اند - که همانا کشف ویژگی‌های فراگیر[۱۲۵] سیستم‌های آشوبناک است.

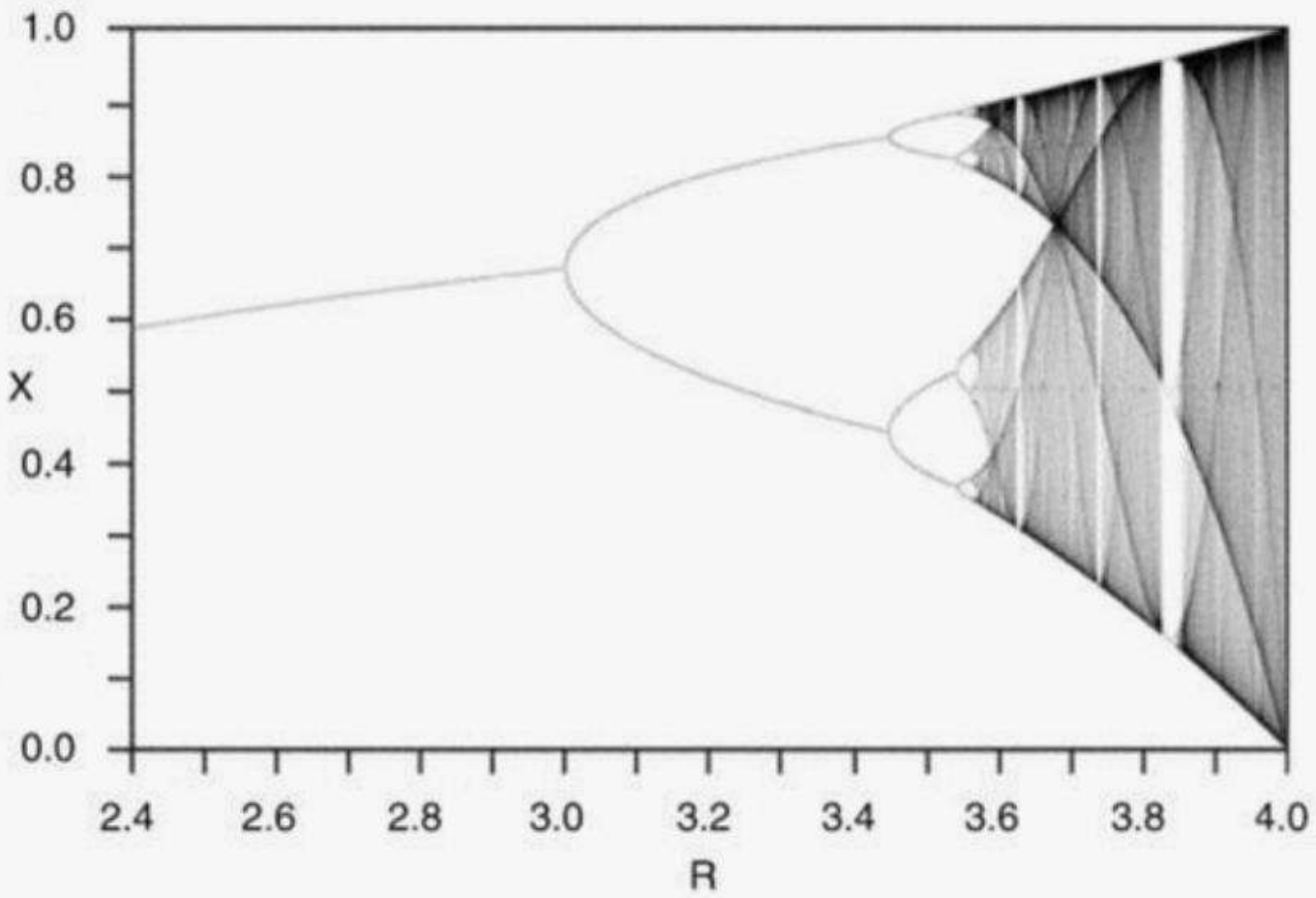
دانش‌واژه آشوب، به آن صورتی که در توضیح سیستم‌های دینامیک با "وابستگی حساس به شرایط اولیه" به کار می‌رود، برای اولین بار توسط فیزیکدانان تی. وای. لی و جیمز یورک وضع (۶). شد این دانش‌واژه مناسب به نظر می‌رسد: معنی گفتاری واژه "آشوب" تصادفی بودن و غیرقابل پیش‌بینی بودن را می‌رساند، یعنی همان کیفیت‌هایی که در نسخه آشوب‌زده نگاشت منطق‌گرا شاهد بودیم. اما، برخلاف آشوب گفتاری، در آشوب ریاضی، نظمی اساسی خود را نشان می‌دهد، که به شکل ویژگی‌های فراگیری است که در طیف گسترده‌ای از سیستم‌های آشوبناک مشترک هستند.

اولین ویژگی فراگیر: مسیر دوره مضاعف[۱۲۶] به آشوب

در آن اکتشاف‌های ریاضی که در بالا به انجام رساندیم، مشاهده کردیم که وقتی R از ۲.۰ به ۴.۰ افزایش داده شد، تکرار نگاشت منطق‌گرا برای یک مقدار معینی از R، ابتدا یک نقطه ثابت، سپس یک نوسان دوره تناوب دو، سپس دوره تناوب چهار، سپس هشت، و به همین منوال، را به بار آورد، تا جایی که آشوب پیش آمد. در نظریه سیستم‌های دینامیک، هر یک از این دو برابرشدن‌های ناگهانی دوره تناوب دوشاخگی نامیده می‌شود. این توالی دو شاخگی‌ها که به آشوب می‌انجامد "مسیر دوره مضاعف به آشوب" نام گرفته است.

این دوشاخگی‌ها اغلب در نمودار دوشاخگی[۱۲۷] خلاصه می‌شود که جلب‌کننده‌ای را که سیستم به آن منتهی می‌شود همچون تابع یک "پارامتر کنترل" مانند R ترسیم می‌کند. شکل ۲-۱۱ یک چنین نمودار دوشاخگی را در مورد نگاشت منطق‌گرا به دست می‌دهد. محور افقی R را نشان می‌دهد.

برای هر مقدار R مقادیر نهایی (جلب‌کننده) x ترسیم شده است. برای مثال، برای R = ۲.۹، x به جلب‌کننده ثابت x = ۰.۶۵۵ می‌رسد. در R = ۳.۰، x به جلب‌کننده دوره تناوب دو می‌رسد. این را می‌توان اولین نقطه دو شاخگی نمودار به حساب آورد، که در آن جلب‌کننده‌های نقطه ثابت جایشان را به جلب‌کننده‌های دوره تناوب دو می‌دهند. وقتی R جایی بین ۳.۴ و ۳.۵ قرار دارد، نمودار دوشاخگی به جلب‌کننده دوره تناوب چهار را به نمایش می‌گذارد، و به همین منوال، با دو برابر شدن بیشتر دوره تناوب، هجوم آشوب در زمانی فرامی‌رسد که R تقریبا مساوی با ۳.۵۶۹۹۴۶ است.



شکل ۲-۱۱. نمودار دوشاخگی برای نگاشت منطق‌گرا، که در آن جلب‌کننده به صورت تابعی از R ترسیم شده است.

مسیر دوره مضاعف به آشوب یک پیشینه غنی دارد.) دوشاخگی دوره مضاعف از همان اوایل

دهه ۱۹۲۰ در معادلات ریاضی مشاهده شد، و زنجیره‌ای از دوشاخگی‌های مشابه را پی.جی. مایربرگ[۱۲۸]، ریاضیدان فنلاندی، در دهه ۱۹۵۰ توضیح داد. نیکولاس متروپولیس، میرون اشتاین و پال اشتاین، که در آزمایشگاه ملی لوس آلاموس[۱۲۹] پژوهش می کردند، نشان دادند که نه تنها نگاشت منطق‌گرا بلکه هر نوع نگاشت که گراف آن به شکل سهمی است از مسیر دوره مضاعف مشابهی پیروی می‌کند. در اینجا "به شکل سهمی[۱۳۰]" به این معنی است که منحنی نگاشت تنها یک پشته[۱۳۱]" دارد. به بیان ریاضی "تک وجهی[۱۳۲]" است.

دومین ویژگی فراگیر: ثابت فایگن‌بام کشفی که در میان امور عام ریاضی جایگاه شناخته‌شده‌ای به مسیر دوره مضاعف بخشید، در دهه ۱۹۷۰، و توسط فیزیکدان میچل فایگن‌بام صورت گرفت. فایگن‌بام، که تنها از یک ماشین‌حساب برنامه‌پذیر[۱۳۳] بهره می گرفت، فهرستی از مقادیر R تهیه کرد که در آنها دوشاخگی‌های دوره مضاعف رخ می‌دهد (و در آن = به معنای "تقریبا مساوی با" است):

$$R_1 \approx ۳/۰$$
$$R_2 \approx ۳/۴۴۹۴۹$$
$$R_3 \approx ۳/۵۴۴۰۹$$
$$R_4 \approx ۳/۵۶۴۴۰۷$$
$$R_5 \approx ۳/۵۶۸۷۵۹$$
$$R_6 \approx ۳/۵۶۹۶۹۲$$
$$R_7 \approx ۳/۵۶۹۸۹۱$$
$$R_8 \approx ۳/۵۶۹۹۳۴$$
$$\vdots$$
$$R_\infty \approx ۳/۵۶۹۹۴۶$$

در اینجا، R۱ متناظر است با دوره تناوب

$$(۲ =) ۲^{۱}$$

، ۲R متناظر است با

دوره تناوب

$$(۴ =) ۲^{۲}$$

، و به‌طور کلی

$$R_n$$

متناظر است با دوره تناوب

$$۲^n$$

نماد

$$\infty$$

("بینهایت") برای نشان دادن هجوم آشوب مورد استفاده قرار می‌گیرد - خط سیری که دوره تناوب بی‌نهایت دارد.

فایگن‌بام متوجه شد که وقتی دوره تناوب افزایش پیدا می‌کند، مقادیر R به هم نزدیک‌تر و نزدیک‌تر می‌شوند. یعنی برای هر دوشاخگی، R باید کمتر از دفعه قبل که به دوشاخگی بعدی رسید افزایش پیدا کند. این واقعیت را در نمودار دوشاخگی شکل ۱۱-۲ می‌بینید: وقتی R افزایش پیدا می‌کند، دوشاخگی‌ها به هم نزدیک‌تر و نزدیک‌تر می‌شوند. با استفاده از این اعداد، فایگن‌بام سرعتی[۱۳۴] را که در آن دوشاخگی‌ها نزدیک‌تر و نزدیک‌تر می‌شوند، یعنی سرعت همگرایی مقادیر R را اندازه‌گیری کرد. او کشف کرد که این سرعت (تقریبا) مقدار ثابت ۴.۶۶۹۲۰۱۶ است. این امر به این معنی است که وقتی R افزایش پیدا می‌کند، هر دو برابر شدن دوره تناوب، ۴.۶۶۹۲۰۱۶ برابر سریعتر از قبلی رخ می‌دهد.

این واقعیت جالب بود اما تکان‌دهنده نبود. وقتی فایگن‌بام سایر نگاشت‌ها را بررسی کرد، اوضاع بسیار جالب‌تر شد - فراموش نکنیم که نگاشت منطق‌گرا تنها یکی از نگاشت‌های متعددی است که تحت مطالعه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در بالا ذکر کردم، چند سال قبل از این‌که فایگن‌بام این محاسبات را انجام دهد، همکاران او در لوس آلاموس - یعنی متروپولیس، اشتاین، واشتاین - نشان داده بودند که هر نگاشت تک‌وجهی از زنجیره دوره مضاعف مشابهی پیروی می‌کند. گام بعدی فایگن‌بام این بود که سرعت همگرایی برخی دیگر از نگاشت‌های تک‌وجهی

را محاسبه کند. او از نگاشت سینوسی شروع کرد، معادله‌ای مشابه نگاشت منطق‌گرا که از تابع سینوسی مثلثاتی استفاده می‌کند.



میچل فایگن‌بام

فایگن‌بام گام‌هایی را که در بالا مطرح کردم تکرار کرد: مقادیر R را در دوشاخگی دوره تناوب مضاعف در نگاشت سینوسی محاسبه کرد، و بعد سرعت همگرایی این مقادیر را محاسبه کرد. و پی برد که سرعت همگرایی ۴.۶۶۹۲۰۱۶ است.

فایگن‌بام حیرت‌زده شده بود. سرعت یکسان بود. آن را در مورد سایر نگاشت‌های تک‌وجهی هم آزمایش کرد. باز هم یکسان بود. هیچ‌کس، حتی فایگن‌بام، به‌هیچ‌وجه، انتظار این را نداشت. اما وقتی کشف صورت گرفته بود، به سراغ انکشاف یک نظریه رفت که توضیح می‌داد چرا مقدار مشترک ۴.۶۶۹۲۰۱۶، که دیگر ثابت فایگن‌بام نامیده می‌شد، فراگیر است - که در اینجا به این معناست که در تمامی نگاشت‌های تک‌وجهی یکسان است. این نظریه از تکنیک ریاضی

@degar_goonesh

پیشرفته‌ای استفاده می‌کرد که عادی‌سازی مجدد[۱۳۵] نامیده می‌شود و در اصل در رشته نظریه کوانتوم میدانی تدوین شده و بعدها در حیطه دیگری از فیزیک به کار گرفته شده بود: پژوهش گذارهای حالتی[۱۳۶] و سایر "پدیده‌های بحرانی[۱۳۷]"". فایگن‌بام آن را با نظریه سیستم‌های دینامیک سازگار کرد، که از آن پس به سنگ بنای فهم آشوب تبدیل شده است. (۱۸) روشن شد که این امر تنها یک کنجکاوی ریاضی نیست. در سال‌هایی که از کشف فایگن‌بام گذشته است، نظریه او در چندین آزمایش تجربی در سیستم‌های فیزیکی دینامیک مورد تأیید قرار گرفته است، از جمله در جریان مایعات، مدارهای الکتریکی، لیزر، و واکنش‌های شیمیایی.

زنجیره‌های دوره مضاعف در این‌گونه سیستم‌ها نیز مشاهده شده است، و مقادیر ثابت فایگن‌بام، در مراحلی مشابه آنچه در بالا دیدیم، محاسبه شده است. در اغلب موارد، اندازه‌گیری آنچه برای مثال، با مقادیر R در این‌گونه آزمایش‌ها متناظر باشد، بسیار مشکل است، اما با وجود این، مقادیر ثابت فایگن‌بام که در این آزمایش‌ها به دست می‌آید با خطای قابل قبولی به مقدار تقریبی ثابت فایگن‌بام، یعنی ۴.۶۶۹۲۰۱۶ نزدیک است. موضوع قابل ملاحظه‌ای است، چون نظریه فایگن‌بام، که این عدد را به دست می‌دهد، تنها دربرگیرنده ریاضیات محض است، و نه فیزیک. همان‌طور که همکار فایگن‌بام، لئو کادانوف[۱۳۸]، گفت: "بهترین اتفاقی که می‌تواند برای یک دانشمند پیش بیاید، پی بردن به این است که چیزی که در ذهن او اتفاق افتاده دقیقا متناظر با چیزی است که در طبیعت اتفاق می‌افتد."(۱۹) سیستم‌های کلان مقیاس، از جمله آب و هوا، هنوز مشکل‌تر از آنند که مستقیما آزمایش شوند، از این‌رو هیچ کس دوره مضاعف یا آشوب را در رفتار آنها مورد مداقه قرار نداده است. اما، مدل‌های کامپیوتری معینی از آب و هوا مسیر دوره مضاعف به آشوب را به نمایش گذارده‌اند، و به همین‌سان مدل‌های کامپیوتری سیستم‌های قدرت الکتریکی، قلب، ناپایداری خورشیدی[۱۳۹]، و بسیاری سیستم‌های دیگر. (۲۰) واقعیت قابل ملاحظه‌تری در این داستان وجود دارد. همانند بسیاری از کشف‌های علمی مهم، گروه پژوهشی دیگری، به طور مستقل و تقریبا همزمان به همان نتایج فایگن‌بام رسیدند. این گروه شامل دانشمندان فرانسوی پیر کولت[۱۴۰] و چارلز ترسر[۱۴۱]" بودند، که آنها هم برای مطالعه زنجیره دوره مضاعف از تکنیک عادی‌سازی مجدد استفاده کردند و فراگیری ۴.۶۶۹۲۰۱۶ در سیستم‌های تک‌وجهی را کشف کردند. (۱) شاید فایگن‌بام واقعا اولین کسی بود که این را کشف کرد و توانست به صورت روشن‌تر و گسترده این نتیجه را در میان جامعه علمی جهانی منتشر کند. و به این دلیل است که عمده شهرت نصیب او شد. اما، در بسیاری از مقالات علمی، به این نظریه با عنوان "نظریه فایگن‌بام-کولت-ترسر" و به ثابت فایگن‌بام با عنوان "ثابت فایگن‌بام-کولت-ترسر" اشاره می‌کنند. در این کتاب به چند مثال دیگر از اکتشاف‌های مستقل و همزمان اشاره می‌کنم که ایده‌هایی را به کار گرفتند که در یک زمانه معین "در هوا موج

می‌زدند".

کشف و فهم آشوب، همان‌طور که در این فصل نشان داده شد، منجر به بازنگری در بسیاری از اعتقادهای اساسی علم شده است. برخی از این ایده‌های جدید را که دانشمندان معدودی در قرن نوزدهم به آنها باور داشتند، در زیر می‌آورم.

رفتار به ظاهر تصادفی می‌تواند در سیستم‌های قطعی نیز پدیدار شود، بی‌آن‌که هیچ‌گونه عامل خارجی تصادفی نقش داشته باشد.

به دلیل "وابستگی حساس به شرایط اولیه"، پیش‌بینی رفتار برخی از سیستم‌های ساده قطعی در درازمدت، حتی در اصل، غیرممکن است.

گرچه جزئیات رفتار یک سیستم آشوبناک را نمی‌توان پیش‌بینی کرد، در خواص فراگیر متداول در مجموعه بزرگی از سیستم‌های آشوبناک نوعی "نظم در آشوب" دیده می‌شود، مانند مسیر دوره مضاعف به آشوب، و ثابت فایگن‌بام. از این‌رو، با این‌که در سطح جزئیات "پیش‌بینی غیرممکن می‌شود"، برخی جنبه‌های سطح بالای سیستم‌های آشوبناک واقعا قابل پیش‌بینی هستند.

به طور خلاصه، رفتار کلان متغیر و نه چندان پیش‌بینی‌پذیر از صفات بارز سیستم‌های پیچیده است. نظریه سیستم‌های دینامیک برای مشخص کردن چنین رفتارهایی با ملاک‌های دو شاخگی‌ها، جلب‌کننده‌ها، و خواص فراگیر شیوه‌های تغییر سیستم یک واژگان ریاضی فراهم می‌کند.

پژوهشگران سیستم‌های پیچیده به طور گسترده‌ای از این واژگان بهره می‌برند.

نگاشت منطق‌گرا مدل ساده‌ای برای رشد جمعیت است، اما مطالعه تفصیلی این نگاشت و مدل‌های مشابه به دگرگونی عمده‌ای در فهم علمی نظم، تصادفی بودن، و پیش‌بینی‌پذیری انجامیده است. این امر قدرت مدل‌های ابده را نشان می‌دهد - مدل‌هایی که برای مطالعه از طریق ریاضیات یا کامپیوتر کاملا ساده هستند، اما به هر حال خواص بنیادی سیستم‌های طبیعی پیچیده را به نمایش می‌گذارند. در این کتاب مدل‌های ایده[۱۴۲] نقشی اساسی دارند، همانطور که در علوم سیستم‌های پیچیده نقشی اساسی دارند.

توصیف پویایی یک سیستم پیچیده تنها یک گام در فهم آن است.

همچنین نیاز داریم بفهمیم که این دینامیک در پردازش اطلاعات و انطباق با محیط‌های متغیر چه نقشی دارد. سه فصل بعدی پس‌زمینه‌ای را برای این موضوعات فراهم می‌کند. در قسمت‌های بعدی کتاب خواهیم دید که ایده‌های برگرفته از دینامیک چگونه با ایده‌های برگرفته از نظریه اطلاعات و محاسبه و تکامل ترکیب می‌شوند.

فصل سوم: اطلاعات

فکر می‌کنم این قانون که آنتروپی[۱۴۳] افزایش پیدا می‌کند - قانون دوم ترمودینامیک[۱۴۴] - در میان قوانین طبیعت جایگاه برتری دارد ...اگر روشن شود که نظریه شما برخلاف قانون دوم ترمودینامیک است هیچ امیدی به آن نیست؛ و جز فروپاشی واقعا حقارت‌آمیز سرنوشت دیگری نخواهد داشت.

سر آرتور ادینگتون، طبیعت دنیای مادی (۱)

اغلب گفته می‌شود که سیستم‌های پیچیده "خود سامان" هستند: برای مثال پل‌های محکم و ساخت‌یافته دست‌ساز مورچگان، درخشش همزمان کرم‌های شب‌تاب؛ بازارهای نگهدارنده هم[۱۴۵] در اقتصاد؛ و رشد اندام‌های تخصصی از سلول‌های بنیادی[۱۴۶]" را در نظر بگیرید - همه نمونه‌هایی از خودسامانی هستند. نظم از بی‌نظمی پدید می‌آید، آن‌گاه چرخش معمول رویدادها را برمی‌گرداند، که در جریان آن نظم بار دیگر فرو می‌ریزد و بی‌نظمی (یا آنتروپی) حاکم می‌شود.

روایت کاملی از این‌که چگونه چنین خودسامانی از آنتروپی سرپیچی می‌کند، در علم سیستم‌های پیچیده حکم جام مقدس[۱۴۷] را دارد. اما پیش از این‌که بتوان به این موضوع پرداخت، باید بفهمیم منظور از "نظم" و "بی‌نظمی" چیست، و آدم‌ها چگونه به اندازه‌گیری این‌گونه کیفیت‌های انتزاعی اندیشیده‌اند.

بسیاری از دانشمندان سیستم‌های پیچیده برای توصیف و اندازه‌گیری نظم و بی‌نظمی، سادگی و پیچیدگی، مفهوم اطلاعات را به کار می‌گیرند.

ایمنی‌شناس آیرن کوهن[۱۴۸] می‌گوید "سیستم‌های پیچیده بیش از سیستم‌های ساده اطلاعات دریافت می‌کنند، ذخیره می‌کنند، و به کار می‌گیرند.")

اقتصاددان اریک باین هاکر[۱۴۹] می‌نویسد: "تکامل می‌تواند حقه‌های خود را نه تنها در "شالوده DNA،* بلکه در هر سیستمی به کار گیرد که شاخص‌های پردازش اطلاعات و ذخیره اطلاعات آن مناسب (۱)". باشند فیزیکدان موری گل-مان[۱۵۰]" درباره سیستم‌های پیچیده انطباق‌پذیر گفت: "گرچه این سیستم‌ها در مشخصه‌های فیزیکی تفاوت‌های زیادی دارند، در شیوه‌ای که اطلاعات را کنترل می‌کنند مشابه هستند. این ویژگی مشترک شاید بهترین نقطه آغاز برای کاوش در چگونگی فعالیت آنها باشد."(۲) اما معنای دقیق "اطلاعات" چیست؟

اطلاعات چیست؟

این روزها واژه "اطلاعات" را همه‌جا می‌بینید: "انقلاب اطلاعاتی"، "عصر اطلاعات"، "فناوری اطلاعات" (اغلب به طور خلاصه، ("IT" "بزرگراه اطلاعاتی" و... به طور افواهی "اطلاعات" برای اشاره به هر رسانه‌ای به کار می‌رود که دانش یا فکت عرضه می‌کند: روزنامه، کتاب، مادر من که

روی خط تلفن درباره افراد خانواده غیبت می‌کند، و این روزها چشمگیرتر از همه اینترنت. به طور فنی‌تر، این واژه برای توضیح گروه عظیمی از پدیده‌ها به کار می‌رود، از خطوط انتقال فیبر نوری که سیگنال‌های ارسالی از یک کامپیوتر به کامپیوتر دیگر را در اینترنت شکل می‌دهند گرفته تا مولکول‌های ریزی که نورون‌های مغز برای ارتباط با هم از آن استفاده می‌کنند.

نمونه‌های مختلفی از سیستم‌های پیچیده که در فصل یکم مورد بحث قرار دادیم از اساس و به اشکال مختلف به انتقال و پردازش اطلاعات ربط دارند. از آغاز عصر کامپیوتر، دانشمندان کامپیوتر این تصور را داشتند که اطلاعات و محاسبه، چیزی است که نه تنها در مدارهای الکترونیک بلکه در سیستم‌های زنده نیز رخ می‌دهد.

به طور قطع، نخستین گام در فهمیدن اطلاعات و محاسبه در این‌گونه سیستم‌ها، داشتن تعریفی دقیق از اطلاعات و محاسبه است. تعریف این دانش‌واژه‌ها به صورت ریاضی تنها در قرن بیستم تحقق یافت. شگفتا که این کار از معمایی در فیزیک مربوط به اواخر قرن نوزدهم آغاز شد که پای یک "جن[۱۵۱]" را به میان می‌کشد که ظاهرا بدون صرف هیچ‌گونه انرژی کارهای زیادی را به انجام می‌رساند. این معمای کوچک بسیاری از فیزیکدانان را نگران کرد که شاید یکی از قوانین بنیادین آنها نادرست باشد. چگونه مفهوم اطلاعات از به هم ریختن اوضاع جلوگیری کرد؟ قبل از این‌که به این نکته برسیم، به تاریخچه‌ای از تصورات فیزیک از انرژی و کار و آنتروپی نیاز داریم.

انرژی، کار، آنتروپی

در حقیقت، پژوهش علمی درباره اطلاعات با علم ترمودینامیک آغاز می‌شود که درباره انرژی و برهم‌کنش‌های آن با ماده توضیح می‌دهد. فیزیکدانان قرن نوزدهم تصور می‌کردند که کائنات از دو موجودیت مختلف شکل گرفته است:

ماده (برای مثال: جامدات، مایعات، بخارات) و انرژی (برای مثال: گرما، نور، و صدا) انرژی کمابیش به منزله پتانسیل سیستم برای "انجام کار" تعریف می‌شود که با مشاهده مستقیم ما به خوبی همخوانی دارد، به‌خصوص در این عصر کارشیفتگان پر انرژی. منشأ این اصطلاح واژه یونانی انرزیا[۱۵۲]" است که درواقع به معنای "کار کردن" است. اما فیزیکدانان معنای روشنی از "کار" انجام شده یک شیء را مدنظر دارند: نیروی وارده بر این شیء ضرب در مسافتی که شیء در جهت نیروی اعمال شده حرکت کرده است.

برای مثال، فرض کنید اتومبیل شما در جاده‌ای صاف خراب شده است و باید تا نزدیک‌ترین پمپ بنزین آن را هل دهید. به لحاظ علم فیزیک، مقدار کاری که صرف می‌کنید عبارت است از نیرویی که با آن اتومبیل را هل می‌دهید ضرب در فاصله تا پمپ بنزین. در هل دادن اتومبیل، شما انرژی ذخیره‌شده در بدن‌تان را به انرژی جنبشی[۱۵۳] (یعنی حرکت) اتومبیل تبدیل

می‌کنید، و مقدار انرژی تبدیل شده برابر است با مقدار کار انجام شده به علاوه هر مقدار انرژی که، برای مثال، از طریق اصطکاک چرخ‌ها بر روی جاده، یا از طریق گرم شدن بدن‌تان حاصل می‌شود. این به اصطلاح حرارت از دست رفته با کمیتی اندازه‌گیری می‌شود که آنتروپی نامیده می‌شود.

آنتروپی میزان انرژیی است که قابل تبدیل به کار بیشتری نیست. دانش‌واژه "آنتروپی" از واژه یونانی دیگری - تروپه[۱۵۴] - منشأ می‌گیرد که به معنی "تغییر شکل یافتن به" یا "تبدیل[۱۵۵]"" است.

تا پایان قرن نوزدهم دو قانون بنیادی مربوط به انرژی، که قوانین ترمودینامیک، نامیده می‌شوند کشف شده بودند. این قوانین در مورد "سیستم‌های منزوی[۱۵۶] کاربرد دارد - سیستم‌هایی که با هیچ موجودیت بیرونی تبادل انرژی نمی‌کنند.

قانون اول: بقای انرژی. مقدار کل انرژی در کائنات ثابت است. انرژی می‌تواند از یک شکل به شکل دیگر تبدیل شود، از قبیل تبدیل انرژی ذخیره شده در بدن به انرژی جنبشی اتومبیلی که هل داده شده به علاوه حرارتی که این کنش تولید کرده. اما انرژی را هرگز نه می‌توان تولید کرد و نه نابود کرد. از این‌رو گفته می‌شود که انرژی حفظ می‌شود.

قانون دوم: آنتروپی همیشه افزایش پیدا می‌کند تا زمانی که به یک مقدار حداکثر برسد. جمع آنتروپی یک سیستم همواره افزایش پیدا می‌کند تا زمانی که به مقدار حداکثر ممکن برسد، و هرگز به خودی خود کاهش پیدا نمی‌کند مگر آنکه یک عامل بیرونی برای کاهش آن کاری انجام دهد.

همان‌طور که احتمالا متوجه شده‌اید، اتاق خودش خودش را تمیز نمی‌کند، و دانه‌هایی که بر زمین می‌ریزند، اگر به حال خود رها شوند هرگز به جعبه‌شان برنمی‌گردند. کسی یا چیزی باید کاری انجام دهد تا بی‌نظمی را به نظم برگرداند.

افزون بر این، تبدیل انرژی، مانند نمونه هل دادن ماشین، همیشه مقداری حرارت تولید می‌کند که آن را نمی‌توان به کار گرفت. به همین دلیل، برای مثال، هیچ‌کس نتوانسته است حرارتی را که در پشت یخچال تولید می‌شود جمع کند و آن را برای تولید انرژی جدیدی برای خنک کردن درون یخچال به کار گیرد تا یخچال بتواند برای خودش انرژی فراهم کند. این امر توضیح می‌دهد که چرا "ماشین حرکت ابدی" که زبانزد همگان است افسانه‌ای بیش نیست.

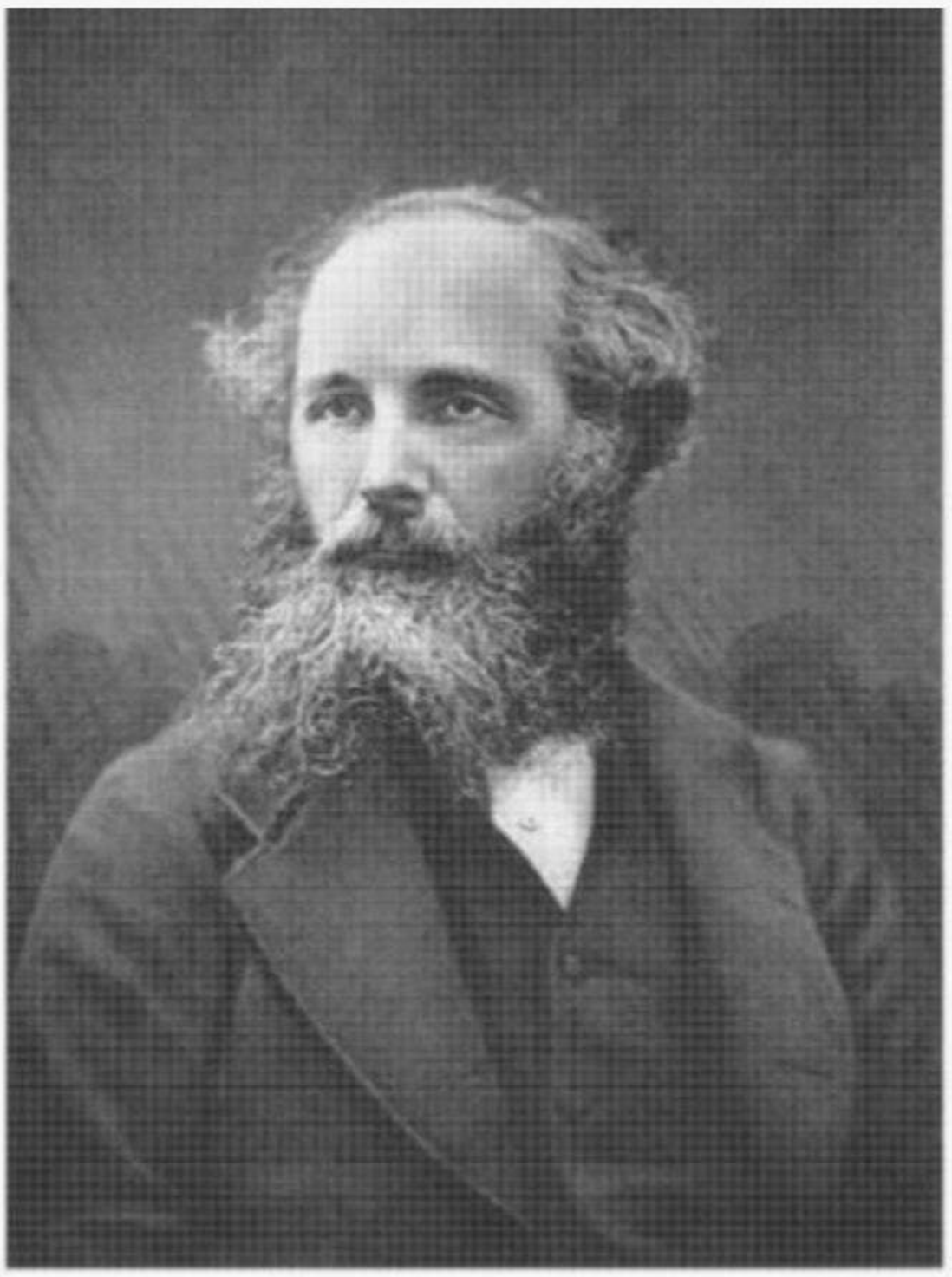
گفته می‌شود که قانون دوم ترمودینامیک "پیکان زمان[۱۵۷]" را تعریف می‌کند، چون اثبات می‌کند فرایندهایی وجود دارند که آنها را نمی‌توان در زمان به عقب برگرداند (برای مثال، برگشت خود به خودی حرارت به یخچال و تبدیل آن به انرژی الکتریکی برای خنک کردن درون آن). "آینده" به عنوان جهتی از زمان که در آن آنتروپی افزایش پیدا می‌کند تعریف

می‌شود. جالب این‌که قانون دوم تنها قانون بنیادی فیزیک است که بین آینده و گذشته تفاوت می‌گذارد. تمامی قوانین دیگر در زمان برگشت‌پذیر هستند. برای مثال، تصور کنید برهم‌کنش بین ذراتی بنیادی مانند الکترون را فیلم‌برداری می‌کنید، و سپس این فیلم را به یک فیزیکدان نشان می‌دهید. حال فیلم را به عقب برگردانید و از فیزیکدان بپرسید کدام نسخه "حقیقی" است. فیزیکدان نمی‌تواند حدس بزند، چون برهم‌کنش‌های رو به جلو و رو به عقب هر دو از قوانین فیزیک پیروی می‌کنند. این معنای برگشت‌پذیری است. درست برعکس، اگر از حرارتی که یخچال تولید می‌کند فیلمی مادون قرمز بردارید و آن را به جلو و عقب نمایش دهید، فیزیکدان جهت رو به جلو را نسخه "درست" تشخیص می‌دهد چون از قانون دوم پیروی می‌کند، درحالی‌که نسخه رو به عقب را این‌گونه نمی‌شناسد. این معنای برگشت‌ناپذیری است. چرا قانون دوم از تمامی دیگر قوانین فیزیک متفاوت است؟ این پرسشی اساسی است. همان‌طور که فیزیکدان تونی روتمن[۱۵۸] اشاره می‌کند: "این که چرا قانون دوم باید بین گذشته و آینده تفاوت بگذارد، در صورتی که تمامی قوانین دیگر طبیعت چنین نمی‌کنند، شاید بزرگترین راز فیزیک باشد."(۵)

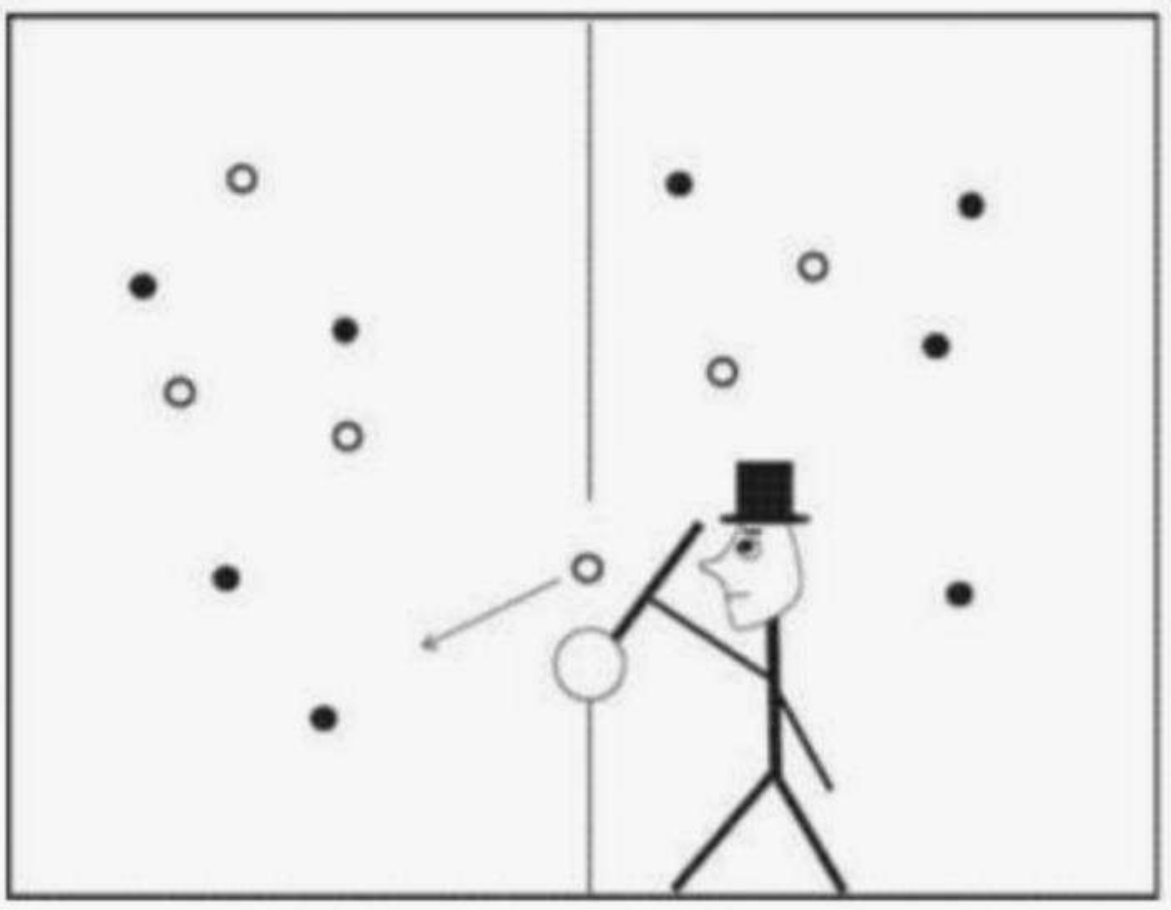
جن ماکسول

مایه اصلی شهرت فیزیکدان بریتانیایی جیمز کلرک [۱۵۹]ماکسول چیزی است که امروزه معادلات ماکسول نامیده می‌شود: بیان فشرده نظریه ماکسول که الکتریسیته و مغناطیس را یکپارچه کرد. ماکسول در مدت عمرش، یکی از معتبرترین دانشمندان به حساب می‌آمد، و امروزه در هر فهرست از پنجاه دانشمند بزرگ همه زمان‌ها جای دارد.

ماکسول در کتابش، نظریه حرارت[۱۶۰]، که در سال ۱۸۷۱ منتشر شد، تحت عنوان "محدودیت قانون دوم ترمودینامیک" معمایی را مطرح کرد. او جعبه‌ای را فرض کرد که با یک جدار به دو نیمه شده که در آن دری لولادار تعبیه شده است، همان‌طور که در شکل ۱-۳ به نمایش درآمده است.



شکل ۱-۳. بالا: جیمز کلرک ماکسول، (۱۸۷۹-۱۸۳۱)



پایین: جن ماکسول که برای ذرات سریع (سفید) که به چپ می‌روند و ذرات کند (سیاه) که به راست می‌روند در را باز می‌کند.

این در را یک "جن" کنترل می‌کند، موجودی بسیار ریز که سرعت مولکول‌های هوایی را که مثل برق از کنار او رد می‌شوند، اندازه می‌گیرد. او در را باز می‌کند تا اجازه دهد ذره‌های سریع از سمت راست به چپ روند، و زمانی که ذره‌های کند از سمت راست به آن نزدیک می‌شوند در را می‌بندد.

به همین منوال، در را برای مولکول‌های کندی که از چپ به راست حرکت می‌کنند باز می‌کند، و زمانی که مولکول‌های سریع از سمت چپ نزدیک می‌شوند آن را می‌بندد. پس از مدتی، جعبه کاملا سامان پیدا می‌کند.

مولکول‌های سریع در سمت چپ و تمامی کندها در سمت راست. بدین ترتیب آنتروپی کاهش پیدا کرده است.

طبق قانون دوم، برای کاهش آنتروپی باید کاری انجام شود، جن چه کاری انجام داده است؟ به طور قطع، او در را بارها باز و بسته کرده. اما، ماکسول فرض کرد که جن می‌تواند از یک در "کشویی" بدون اصطکاک استفاده کند، که در نتیجه باز و بسته کردن آن مستلزم کاری قابل چشم‌پوشی است که می‌توانیم آن را نادیده بگیریم. (طراحی‌های معقولی برای چنین دری پیشنهاد شده است.) آیا جن کار دیگری هم کرده؟

پاسخ ماکسول منفی بود: "سیستم داغ (سمت چپ) داغ‌تر شده و سرد (سمت راست) سردتر شده اما کاری انجام نشده است، تنها هوش یک موجود تیزبین و چیره‌دست در کار بوده است."(۶) بدون هیچ کار یا کار ناچیزی که انجام شد، چگونه آنتروپی کاهش یافت؟

آیا این قانون دوم ترمودینامیک را نقض نمی‌کند؟ جن ماکسول بسیاری از متفکران بزرگ اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم را حیرت‌زده کرد.

پاسخ خود ماکسول به معمایش این بود که قانون دوم (افزایش آنتروپی در طول زمان) درواقع به هیچ‌وجه قانون نیست، بلکه یک پدیده آماری است که در مورد مجموعه‌های بزرگ مولکول‌ها، و همچنین اشیایی که در زندگی روزمره با آنها سروکار داریم، صدق می‌کند، اما لزوما در مقیاس مولکول‌های منفرد صدق نمی‌کند.

اما بسیاری از فیزیکدانان هم‌عصر ماکسول و آنها که مدت‌ها بعد از او زندگی می‌کردند سرسختانه با این نظر مخالف بودند. اینان معتقد بودند که قانون دوم باید محترم شمرده شود؛ در عوض باید یک چیز مشکوک در جن باشد. برای این‌که آنتروپی کاهش پیدا کرده باشد، باید به شیوه‌ای ظریف و نامشخص واقعا کاری انجام شده باشد.

خیلیها سعی کردند که این تناقض را حل کنند، اما تا شصت سال بعد هیچ‌کس نتوانست پاسخی ارضاکننده ارائه دهد. در سال ۱۹۲۹، پیشرفتی صورت گرفت: فیزیکدان برجسته مجارستانی لئو سیلارد[۱۶۱] مطرح کرد که این "هوش" جن، یا دقیق‌تر گفته باشیم، کنش به دست آوردن اطلاعات از طریق اندازه‌گیری است، که کار نادیده را شکل می‌دهد.



لئو سیلارد، ۱۸۹۸-۱۹۴۶

سیلارد اولین کسی بود که رابطه بین آنتروپی و اطلاعات را تشخیص داد، پیوندی که بعدها به بنیان نظریه اطلاعات و ایده کلیدی سیستم‌های پیچیده تبدیل شد. او در مقاله مشهوری با عنوان "درباره کاهش آنتروپی در یک سیستم ترمودینامیک، با دخالت موجود (۷)، هوشمند نشان داد که فرایند اندازه‌گیری، که در طی آن جن یک "بیت[۱۶۲]" واحد اطلاعات را کسب می‌کند (یعنی اطلاعات این‌که مولکولی که نزدیک می‌شود کند یا تند است) مستلزم انرژی است و باید حداقل همان‌قدر آنتروپیی را تولید کند که با مرتب کردن مولکول‌ها در چپ و راست کاهش پیدا کرده. بدین ترتیب کل سیستم، شامل جعبه، مولکول‌ها، و جن، از قانون دوم ترمودینامیک پیروی می‌کنند.

در جریان یافتن این راه‌حل، سیلارد شاید اولین کسی بود که مفهوم یک بیت اطلاعات را مطرح کرد - اطلاعاتی که از پاسخ به یک پرسش بله / خیر (یا در مورد جن، "سریع / کند") به دست می‌آید.

در جایگاه مناسب‌تری که در قرن بیست و یکم از آن برخورداریم، واضح به نظر می‌رسد (یا

حداقل تعجبی برنمی‌انگیزد) که کسب اطلاعات مستلزم صرف کار است. اما در زمان ماکسول، و حتی شصت سال پس از او که سیلارد مقاله مشهورش را نوشت، هنوز تمایل قدرتمندی در اذهان وجود داشت به اینکه فرایندهای فیزیکی وذهنی را به طور کامل جدا از هم تصور کنند. این شهود ریشه‌دار ممکن است دلیل این باشد که چرا ماکسول، به رغم ذکاوتی که داشت، "هوش" یا "توان مشاهده" جن را در رابطه با سیستم جعبه ـ مولکول‌ها - جن نفهمید. چنین روابطی بین اطلاعات و فیزیک تنها در قرن بیستم روشن شد، و آغاز آن کشف این نکته بود که در مکانیک کوانتوم "مشاهده‌گر" نقشی کلیدی بازی می‌کند.

بعدها فیزیکدان‌های فرانسوی لئون بری‌یوان[۱۶۳] و دنی گابور[۱۶۴]"، دامنه نظریه سیلارد را گسترش دادند و به آن عمومیت بخشیدند. بسیاری از دانشمندان دهه ۱۹۵۰ و بعد از آن اعتقاد داشتند که نظریه بری‌یوان، به ویژه با توضیح مشروح این که چگونه اندازه‌گیری موجب افزایش آنتروپی می‌شود، برای همیشه به ماجرای جن پایان داده است.

اما این ماجرا هنوز پایان نیافته بود. پنجاه سال پس از انتشار مقاله سیلارد، روشن شد که در راه‌حل‌های او و بری‌یوان هم ایرادهایی وجود دارد.

در دهه ۱۹۸۰، ریاضیدان چارلز بنت[۱۶۵] نشان داد که شیوه‌های هوشمندانه‌ای برای مشاهده و یادآوری اطلاعات وجود دارد بدون این‌که آنتروپی افزایش پیدا کند - در مورد جن، این‌که مولکول هوا سریع یا کند است. استدلال چشمگیر بنت دراین‌باره برای محاسبه برگشت‌پذیر[۱۶۶] بنیانی را شکل داد که می‌گوید، در مقام نظر، هر محاسبه‌ای را می‌توان بدون صرف انرژی به انجام رساند. یافته‌های بنت ممکن است به این اشاره داشته باشد که در مورد جن بار دیگر به سر جای اولمان برگشته‌ایم، چون درواقع می‌توان اندازه‌گیری را بدون افزایش آنتروپی به انجام رساند. اما، بنت خاطرنشان کرد که قانون دوم ترمودینامیک به دلیل کشف قبلی فیزیکدان رالف لانداور[۱۶۷]"، که در دهه ۱۹۶۰ صورت گرفته بود، بار دیگر نجات یافته است: این نه کنش اندازه‌گیری، بلکه در عوض کنش پاک کردن حافظه است که لزوما آنتروپی را افزایش می‌دهد.

پاک کردن حافظه برگشت‌پذیر نیست؛ اگر پاک‌سازی درستی در کار باشد، وقتی اطلاعات از دست رفته است، بدون اندازه‌گیری مجدد نمی‌توان آن را بازسازی کرد. بنت نشان داد برای این‌که جن نقش خود را بازی کند، در نقطه‌ای از زمان باید حافظه‌اش پاک شود، و زمانی که این اتفاق می‌افتد، کنش فیزیکی این پاکسازی حرارت تولید می‌کند، و به این ترتیب به میزانی دقیقا مساوی با مقیاس آنتروپی کاهش‌یافته، که ناشی از کنش مرتب کردن جن بود، آنتروپی افزایش پیدا می‌کند.

راه‌حل لانداور و بنت برای تناقض جن ماکسول ایرادهای راه‌حل سیلارد را برطرف کرد. اما روح حاکم بر آنها یکسان بود. کنش اندازه‌گیری و تصمیم‌گیری، که مستلزم پاکسازی است، ناگزیر آنتروپی را افزایش می‌دهد، و قانون دوم نجات پیدا می‌کند. (باید اضافه کنم که هنوز فیزیکدانانی هستند که راه‌حل لانداور و بنت را نپذیرفته‌اند، جن تا امروز کماکان مورد مناقشه است.(۹)ماکسول جن خود را همچون یک آزمایش فکری ابداع کرد تا دیدگاه خود را مبنی بر این‌که قانون دوم ترمودینامیک قانون نیست بلکه پدیده‌ای آماری است به اثبات برساند. اما، مانند بسیاری از بهترین آزمایش‌های فکری علم، تأثیر جن بسیار گسترده‌تر بود: راه‌حل‌های پارادوکس جن بنیان‌های دو رشته جدید را پایه‌ریزی کرد: نظریه اطلاعات[۱۶۸] و فیزیک اطلاعات[۱۶۹].

مکانیک آماری[۱۷۰]" در چند کلمه

در بخش قبلی "آنتروپی" را به صورت میزانی از انرژی تعریف کردم که قابل تبدیل به کاری اضافی نیست، بلکه در عوض به حرارت تبدیل می‌شود. این تصور از آنتروپی را در اساس رودولف کلازیوس[۱۷۱]" در سال ۱۸۶۵ تعریف کرد.

در زمان کلازیوس، اعتقاد بر این بود که حرارت نوعی مایع است که می‌تواند از یک سیستم به دیگری حرکت کند، و دما خاصیت سیستمی است که بر جریان دما تأثیر دارد.

در طی چند دهه بعد، دیدگاه جدیدی درباره گرما در جوامع علمی پدیدار شد: سیستم‌ها متشکل از مولکول‌ها هستند، و گرما نتیجه حرکت، یا انرژی جنبشی آن مولکول‌هاست. این دیدگاه جدید به طور عمده نتیجه کار لودویگ بولتس‌من[۱۷۲] بود، که علمی را توسعه داد که امروزه مکانیک آماری نامیده می‌شود.

مکانیک آماری مطرح می‌کند که خواص کلان مقیاس (برای مثال حرارت) از خواص ذره‌بینی (برای مثال، حرکت تریلیون‌ها مولکول) پدیدار می‌شود. برای مثال، اتاقی را تصور کنید که پر از مولکول‌های متحرک هواست. یک تحلیل مکانیکی کلاسیک موقعیت و سرعت هر مولکول، همچنین تمامی نیروهایی را که بر آن مولکول اعمال می‌شوند مشخص می‌کند، و از این اطلاعات برای مشخص کردن موقعیت و سرعت آن مولکول بهره می‌گیرد. البته، اگر پنجاه کوادریلیون مولکول وجود داشته باشد، این رویکرد زمان نسبتا زیادی می‌گیرد - درواقع این کار همیشه غیرممکن است، خواه در عمل، و خواه همان‌طور که مکانیک کوانتوم نشان داده، در اصل.

رویکرد مکانیک آماری، تعیین موقعیت و سرعت و رفتار دقیق هر مولکول را کنار می‌گذارد و در عوض می‌کوشد موقعیت‌ها و سرعت‌های میانگین مجموعه‌های[۱۷۳] بزرگ مولکولی را پیش‌بینی کند.



لودویگ بولتسمن، ۱۸۴۴-۱۹۰۶

در یک کلام، مکانیک کلاسیک می‌کوشد با استفاده از مکانیک نیوتون درباره تک‌تک موجودیت‌های خرد (یعنی مولکول) حرفی بزند. ترمودینامیک قوانین موجودیت‌های کلان - حرارت، انرژی، و آنتروپی - را به دست می‌دهد، بدون این‌که اذعان کند تک‌تک مولکول‌های ذره‌بینی منشأ این موجودیت‌های کلان هستند. مکانیک آماری پلی بین این دو دیدگاه افراطی است، یعنی توضیح می‌دهد که چگونه رفتار موجودیت‌های کلان، از آمار مجموعه‌های بزرگ موجودیت‌های خرد سر می‌زند.

در رویکرد آماری مشکلی وجود دارد و آن مشکل این است که تنها رفتار محتمل سیستم را به دست می‌دهد. برای مثال، اگر تمامی مولکول‌های هوا در یک اتاق به صورت تصادفی به این طرف و آن طرف پرواز می‌کنند، به احتمال زیاد در سراسر اتاق پراکنده‌اند، و همه ما هوای کافی را برای تنفس در اختیار داریم. این چیزی است که انتظار آن را داریم و به آن متکی هستیم و هرگز ما را ناکام نکرده است. اما طبق مکانیک آماری، چون مولکول‌ها به صورت تصادفی به این

طرف و آن طرف پرواز می‌کنند، شانس خیلی کمی وجود دارد که همه آنها در یک لحظه و به طور همزمان به یک گوشه اتاق پرواز کنند. و هر کسی که اتفاقا در آن گوشه باشد با فشار شدید هوا له شود، و بقیه آدم‌ها از فقدان هوا خفه شوند. تا آنجایی که من می‌دانم، چنین اتفاقی هرگز در هیچ اتاقی نیفتاده است. اما هیچ چیزی در قوانین نیوتون وجود ندارد که بگوید این امر امکان‌ناپذیر است؛ فقط بی‌اندازه بعید است. بولتس‌من استدلال می‌کرد که اگر تعدادی کافی از موجودیت خرد برای میانگین گرفتن وجود داشته باشد، رویکرد آماری او تقریبا در همه زمان‌ها پاسخ درستی می‌دهد، و در حقیقت، عملا همین اتفاق می‌افتد. اما در زمانه‌ای که بولتس‌من علم جدید خود را صورت‌بندی می‌کرد، این گفته که یک قانون فیزیک "تقریبا در همه زمان‌ها" کاربرد دارد و نه دقیقا در همه زمان‌ها، برای بسیاری از دانشمندان دیگر مشمئزکننده بود. افزون بر این، تأکید بولتس‌من بر واقعیت موجودیت‌های خرد از قبیل مولکول‌ها و اتم‌ها نیز مورد مناقشه همکارانش بود. برخی گمان می‌کنند که رد ایده‌های او توسط اکثر دانشمندان هم‌دوره‌اش در خودکشی او در سال ۱۹۰۶، در سن ۶۲ سالگی، بی‌تأثیر نبوده است. تنها سال‌ها پس از مرگ او بود که نظراتش به نحو گسترده‌ای پذیرفته شدند.

وضعیت‌های خرد[۱۷۴] و وضعیت‌های کلان[۱۷۵] با در نظر گرفتن اتاقی که پر از هواست، در یک لحظه مفروض در زمان، هر مولکول موقعیت و سرعت معینی دارد، حتی اگر اندازه‌گیری همه آنها عملا غیرممکن باشد. در واژگان مکانیک آماری، مجموعه مشخص موقعیت‌ها و سرعت‌های دقیق در یک لحظه فرضی وضعیت خرد اتاق در آن لحظه است.

در مورد اتاقی پر از مولکول‌های هوا که به صورت تصادفی به این طرف و آن طرف پرواز می‌کنند، محتمل‌ترین نوع وضعیت خرد در یک زمان مفروض این است که مولکول‌های هوا به صورت یکنواخت در تمام اتاق پراکنده باشند. نوعی از وضعیت خرد که کمتر محتمل است این است که تمامی مولکول‌های هوا، تا حدی که امکان دارد، در یک مکان واحد، برای مثال گوشه اتاق، روی هم متراکم شوند. این ظاهرا خیلی واضح به نظر می‌رسد، اما بولتسمن به دلیل آن اشاره کرد: این که تعداد وضعیت‌های خرد امکان‌پذیر سیستم که در آن مولکول‌های هوا به صورت یکنواخت پخش شده‌اند، بیش از وضعیت‌های خردی است که در آن همه مولکول‌ها روی هم متراکم شده باشند.

این وضعیت، قابل قیاس با یک ماشین قمار سکه‌ای است با سه تصویر چرخان (شکل ۲-۳). فرض کنید هر یک از سه تصویر می‌توانند "سیب"، "پرتقال"، "گیلاس"، "گلابی" یا "لیمو" باشند. فرض کنید یک سکه داخل ماشین می‌اندازید و دسته را می‌کشید تا تصاویر بچرخند. احتمال این‌که هر سه تصویر با هم تفاوت داشته باشند (یعنی پولتان را از دست بدهید) بیش از این است که تصاویر یکسان باشند (یعنی برنده شوید). حال یک ماشین قمار سکه‌ای را در نظر بگیرید که پنجاه کوادربلیون تصویر دارد، می‌توانید بفهمید که احتمال این‌که همه به طور

یکسان دربیایند خیلی نزدیک به صفر است، درست مانند احتمال این‌که مولکول‌های هوا در مکان واحدی روی هم متراکم شوند.



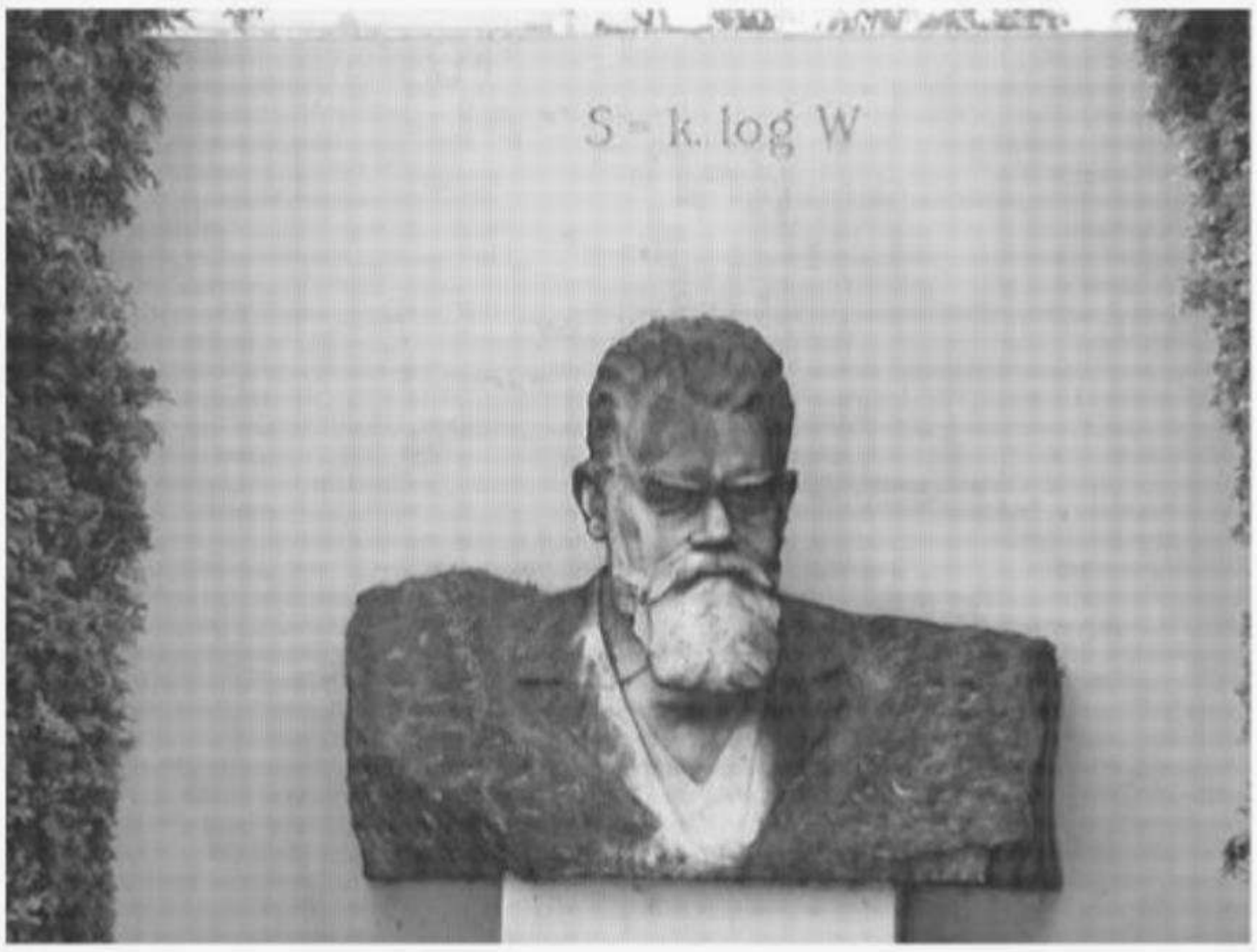
شکل ۳-۲. ماشین سکه‌ای با سه تصویر چرخان میوه، که مفاهیم وضعیت خرد و وضعیت کلان را به نمایش می‌گذارد.

نوعی از وضعیت خرد، برای مثال، "همه تصاویر یکسان هستند – برنده می‌شوید" در تقابل با "همه تصاویر یکسان نیستند - بازنده می‌شوید" یا "مولکول‌ها روی هم متراکم شده‌اند - نمی‌توانیم نفس بکشیم" در تقابل با "مولکولها یکنواخت پخش شده‌اند - می‌توانیم نفس بکشیم" وضعیت کلان سیستم نامیده می‌شود. وضعیت کلان می‌تواند با وضعیت‌های خرد متفاوت و متعددی متناظر باشد. در ماشین سکه‌ای، وضعیت‌های خرد متفاوت و متعدد شامل سه تصویر غیر یکسان هستند، که هر کدام از آنها با تک وضعیت کلان "بازنده می‌شوید" متناظرند، و تنها وضعیت‌های خرد معدودی هستند که با وضعیت کلان "برنده می‌شوید" مطابقت دارند. به این دلیل است که برد نهایی با قمارخانه‌هاست. دما یک وضعیت کلان است - با بسیاری از وضعیت‌های خرد متفاوت امکان‌پذیر مولکول‌هایی متناظر است که با سرعت‌های متفاوت حرکت می‌کنند و تصادفا میانگین آنها به دمای واحدی می‌رسد.

بولتس‌من، با بهره‌گیری از این ایده‌ها، دومین قانون ترمودینامیک را به این صورت تفسیر کرد که منظور آن واقعا این است که برای یک سیستم منزوی، محتمل‌تر آن است که در وضعیت کلانی با احتمال بیشتر قرار داشته باشد تا در وضعیتی با احتمال کمتر. هرچند که این تفسیر ممکن است توضیح واضحات به‌نظر برسد، اما شیوه‌ای نسبتا انقلابی برای اندیشیدن به موضوع بود، چون مفهوم احتمالات را دربرداشت. بولتس‌من آنتروپی یک وضعیت کلان را همچون تابعی از تعدادی وضعیت‌های خرد تعریف کرد که می‌توانند موجب آن وضعیت کلان شوند. (۱۱) برای مثال، در ماشین سکه‌ای شکل ۲-۳ که هر یک از تصویرها می‌توانند "سیب"، "پرتقال"، "گیلاس"، "گلابی" یا "لیمو" باشند، معلوم می‌شود که در مجموع ۱۲۵ ترکیب (وضعیت‌های خرد) ممکن وجود دارد، که در میان آنها پنج مورد با وضعیت کلان "همه تصویرها یکسان هستند -برنده می‌شوید" متناظرند و ۱۲۰ مورد با وضعیت کلان "همه تصویرها یکسان نیستند_ بازنده می‌شوید" مطابقت دارند. کاملا روشن است که آنتروپی بولتس‌من در وضعیت کلان آخر از وضعیت اول بالاتر است.

آنتروپی بولتس‌من از قانون دوم ترمودینامیک پیروی می‌کند. مگر این‌که کار انجام شود، در غیر این صورت آنتروپی بولتس‌من تا زمانی که به وضعیت کلانی با بالاترین آنتروپی برسد، همیشه در حال افزایش است. بولتس‌من توانست نشان دهد که در شرایط متعددی، تعریف ساده و شهودی او از آنتروپی با تعریف اصلی کلازیوس یکسان است.

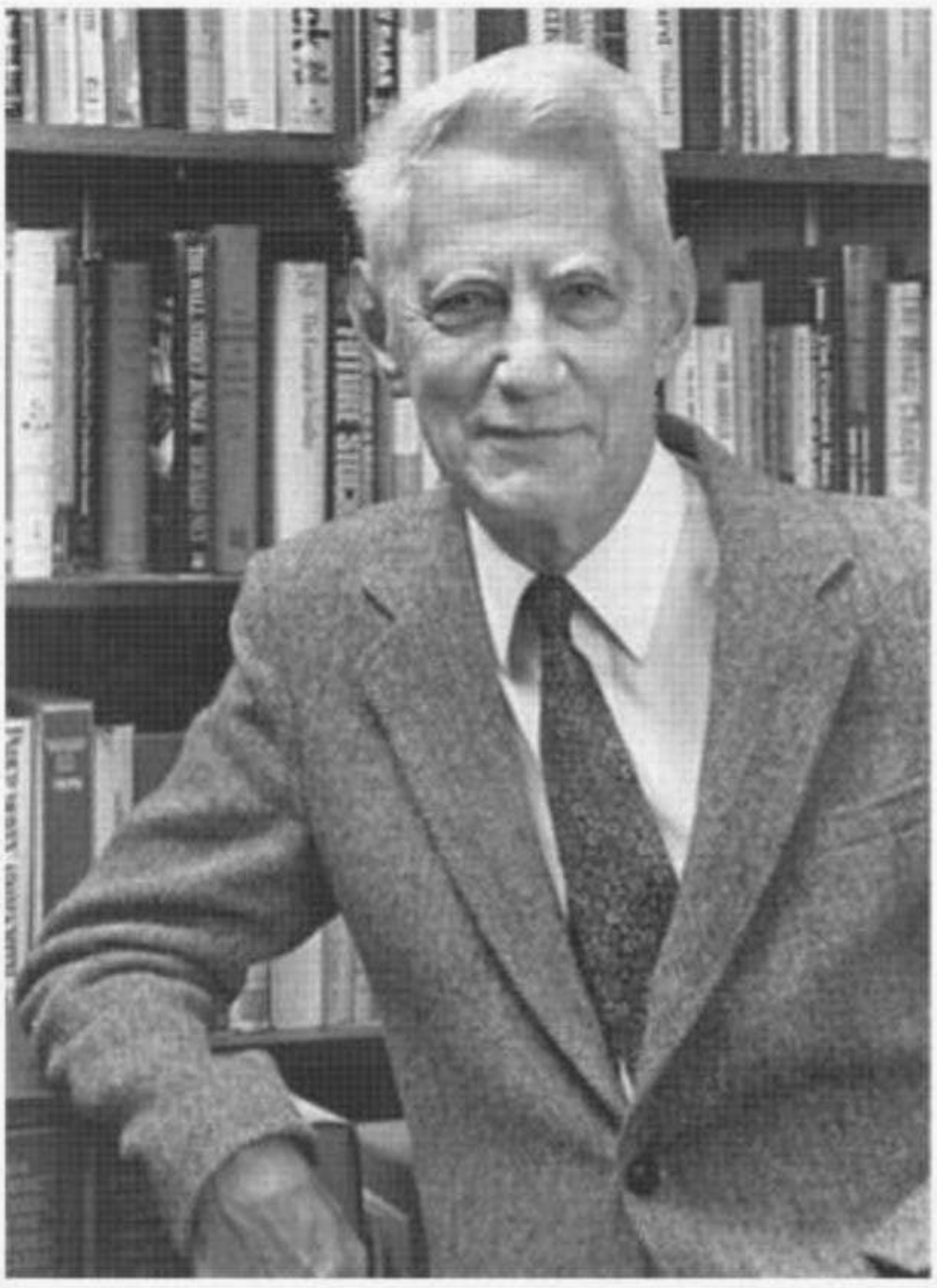
معادله اصلی مربوط به آنتروپی بولتس‌من، که امروزه برای فیزیک این‌قدر بنیادی است، روی سنگ آرامگاه بولتس‌من در وین حک شده است. (شکل ۳-۳)



شکل ۳-۳. سنگ آرامگاه بولتس‌من در وین

اطلاعات شانون

بسیاری از ایده‌های علمی بسیار بنیادی از پیشرفت‌های فناوری الهام گرفته‌اند. پژوهش‌های قرن نوزدهم درباره ترمودینامیک از چالش بهبود موتورهای بخار انگیزه گرفتند و به جلو رانده شدند. پژوهش ریاضیدان کلود شانون[۱۷۶]' در مورد اطلاعات نیز به همان صورت با انقلاب ارتباطات قرن بیستم به جلو رانده شد - به‌خصوص توسعه تلگراف و تلفن. در دهه ۱۹۴۰، شانون ایده‌های بولتس‌من را در حیطه انتزاعی‌تر ارتباطات به کار گرفت. شانون در آزمایشگاه بل[۱۷۷] کار می‌کرد، که بخشی از شرکت تلفن و تلگراف امریکا[۱۷۸]"AT&T" بود. یکی از مهمترین مشکلات AT&T این بود که چگونه سیگنال‌ها را به طور سریعتر و قابل اطمینان‌تری بر روی خطوط تلفن و تلگراف ارسال کند.



کلود شانون، ۱۹۱۶-۲۰۰۱

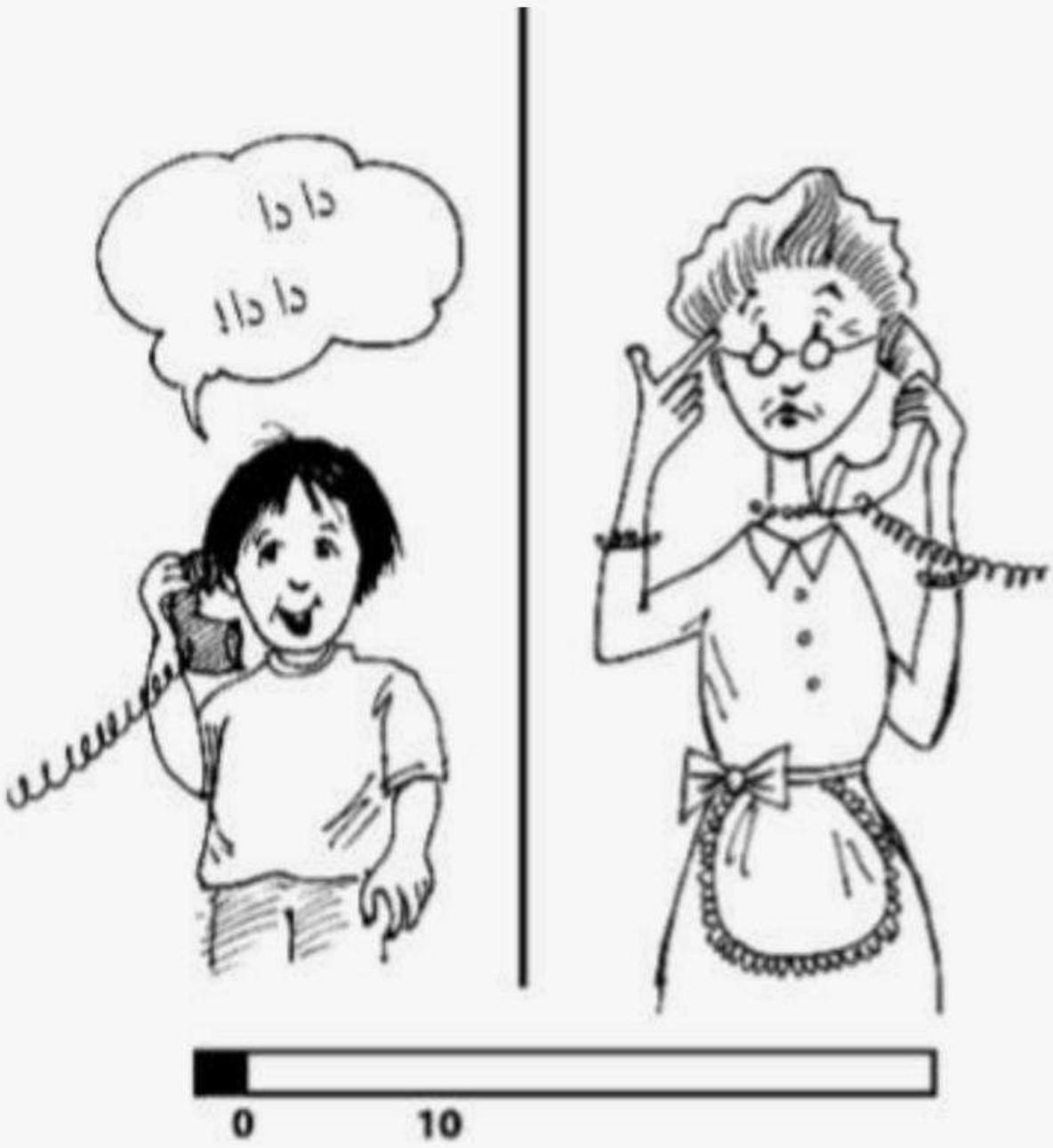
راه‌حل ریاضی شانون برای این مسئله آغاز چیزی بود که امروزه نظریه اطلاعات نامیده می‌شود. شانون در مقاله‌ای با عنوان "نظریه ریاضی (۳)"ارتباطات که در سال ۱۹۴۸ منتشر کرد، تعریف دقیقی از اطلاعات ارائه داد و یک قضیه بسیار مهم را به اثبات رساند، که حداکثر سرعت ممکن

انتقال اطلاعات را بر روی یک کانال مفروض (سیم یا رسانه دیگر) امکان‌پذیر می‌کرد - حتی در زمانی که در اثر پارازیت موجود در کانال ارتباطی در جریان انتقال خطاهایی صورت می‌گیرد. سرعت حداکثر انتقال اطلاعات ظرفیت کانال[۱۷۹] نامیده می‌شود.

تعریف شانون از اطلاعات شامل یک منبع بود که پیام‌هایی به گیرنده می‌فرستد. برای مثال شکل ۴-۳ دو مثال از یک منبع را که با یک گیرنده موجود بر روی خط حرف می‌زند نشان می‌دهد. در منطق شانون هر واژه‌ای که منبع به زبان می‌آورد یک پیام به حساب می‌آید. همان‌طور که تلفن واژه‌های ادا شده را نمی‌فهمد و تنها پالس‌های الکتریکی را منتقل می‌کند که صدا را کدگذاری می‌کنند، تعریف شانون از اطلاعات هم به طور کامل معنای پیام‌ها را نادیده می‌گیرد و تنها تعداد دفعاتی را به حساب می‌آورد که منبع هریک از پیام‌های مختلف ممکن را برای گیرنده ارسال می‌کند.

شانون پرسید: "وقتی یک منبع پیام‌هایی را برای گیرنده ارسال می‌کند چه مقدار اطلاعات منتقل می‌شود؟" با همانندانگاری با ایده‌های بولتس‌من، شانون اطلاعات یک وضعیت کلان (در این مورد یک منبع) را همچون تابعی ازتعداد وضعیت‌های خرد ممکن (در این مورد، مجموعه‌هایی از پیام‌های امکان‌پذیر) تعریف کرد که منبع می‌تواند ارسال کند. وقتی پسرم نیکی هنوز کودک نوپایی بود، تلفن را برایش نگه می‌داشتم تا با مادربزرگش حرف بزند. او عاشق حرف زدن با تلفن بود، اما می‌توانست تنها یک کلمه بر زبان بیاورد_ "دا" پیام او به مادربزرگش این بود "دا دا دا دا دا..." به عبارت دیگر وضعیت کلان نیکی تنها یک وضعیت خرد ممکن داشت (رشته‌هایی از "دا")، و گرچه وضعیت کلان بانمکی بود، اما محتوای اطلاعاتی‌اش صفر بود. مادربزرگ می‌دانست که انتظار چه چیز را باید داشته باشد. پسر دیگرم جیک هم که دو سال بزرگ‌تر بود، عاشق حرف زدن با تلفن بود، اما واژگان وسیع‌تری داشت و برای مادربزرگش از فعالیت‌ها و پروژه‌ها و ماجراهایش حرف می‌زد، و با مهارت زبانی‌اش به طور مداوم مادربزرگ را به حیرت می‌انداخت. محتوای اطلاعاتی جیک-منبع به وضوح بیشتر بود، چون می‌توانست مقدار زیادی وضعیت خرد _یعنی، مجموعه‌هایی از پیام‌های متفاوت‌تری - را تولید کند.

تعریف شانون از محتوای اطلاعات تقریبا مشابه تعریف عمومی‌تر بولتس‌من از آنتروپی بود. او در مقاله کلاسیک سال ۱۹۴۸ خود، محتوای اطلاعات را برحسب آنتروپی منبع پیام تعریف کرد. (این تصور از آنتروپی اغلب آنتروپی شانون نامیده می‌شود تا آن را از تعریف بولتس‌من از آنتروپی متمایز کند.)



درون مایه اطلاعاتی



شکل ۳-۴. بالا: محتوای اطلاعاتی (صفر) مکالمه نیکی با مادربزرگ.

پایین: محتوای اطلاعاتی بیشتر، مکالمه جیک با مادربزرگ.

پاره‌ای اوقات تعریف شانون از محتوای اطلاعات به این صورت توصیف شده است: "میزان متوسط حیرت[۱۸۰]" که گیرنده در زمان دریافت یک پیام تجربه می‌کند - که در آن "حیرت" به معنی چیزی شبیه "درجه عدم قطعیت" است که گیرنده در مورد چیزی که منبع بعدا ارسال می‌کند دارد.

مادربزرگ در مورد هر کلمه‌ای که جیک بر زبان می‌آورد به وضوح حیرت‌زده‌تر از هر کلمه نیکی است، چون از قبل می‌داند که نیکی دقیقا چه خواهد گفت، اما به آسانی نمی‌تواند پیش‌بینی کند که جیک بعدا چه خواهد گفت. بدین ترتیب هر کلمه‌ای که جیک بر زبان می‌آورد میانگین بالاتری از "محتوای اطلاعاتی" به او می‌دهد تا هر کلمه‌ای که نیکی بر زبان می‌آورد.

به‌طورکلی، در نظریه شانون، پیام می‌تواند هر واحد از ارتباط باشد، چه حرف باشد، چه کلمه، چه جمله، یا حتی یک بیت تنها (صفر یا یک). یک بار دیگر، آنتروپی (و محتوای اطلاعات) یک منبع برحسب احتمالات پیام تعریف می‌شود و ربطی به "معنای" پیام ندارد.

نتایج شانون صحنه را برای کاربرد این نتایج در بسیاری از رشته‌های مختلف آماده کرد. معروف‌ترین کاربردها در رشته نظریه کدگذاری[۱۸۱] است، که هم به فشردگی داده‌ها[۱۸۲]"

می‌پردازد و هم به شیوه‌ای که کدها[۱۸۳]" باید ساختار داده شوند تا به طور قابل اطمینانی ارسال شوند. نظریه کدگذاری تقریبا بر تمامی ارتباطات الکترونیک تأثیر می‌گذارد؛ از جمله بر تلفن همراه، شبکه‌های کامپیوتری، و سیستم مکان‌یاب جهانی (جی‌پی‌اس).

نظریه اطلاعات درعین‌حال در رمزنویسی[۱۸۴] و در رشته نسبتا جدید علم زیست-اطلاعات[۱۸۵] نقش اساسی دارد، که در آنها آنتروپی و سایر تمهیدات نظریه اطلاعات در تحلیل الگوی رشته‌های ژن[۱۸۶]" به کار می‌رود. در تحلیل زبان و موسیقی و در روان‌شناسی و استنتاج آماری و هوش مصنوعی، و بسیاری رشته‌های دیگر نیز نظریه اطلاعات کاربرد دارد. گرچه نظریه اطلاعات از مفاهیم آنتروپی در ترمودینامیک و مکانیک آماری الهام گرفته است، این موضوع هنوز مورد مناقشه است که آیا نظریه اطلاعات تأثیر متقابلی بر آنها و سایر رشته‌های فیزیک داشته است یا خیر. در سال ۱۹۶۱، مهندس ارتباطات و نویسنده، جان پیرس[۱۸۷]، به طعنه گفت: "کوشش برای پیوند دادن ارتباطات و فیزیک بیشتر جالب توجه بوده است تا ثمربخش." برخی از فیزیکدانان هنوز با او موافق هستند. اما چند رویکرد جدید به فیزیک وجود دارند که مبتنی بر مفاهیم مربوط به نظریه اطلاعات شانون هستند (برای مثال نظریه کوانتومی اطلاعات[۱۸۸] و فیزیک اطلاعات) که به مرور زمان هم ثمربخش بوده‌اند و هم جالب توجه.

همان‌طور که در فصل‌های بعدی خواهید دید، مفاهیم نظری اطلاعات ـ از قبیل آنتروپی، محتوای اطلاعات، اطلاعات متقابل[۱۸۹]، دینامیک اطلاعات، و غیره - در کوشش برای تعریف مفهوم پیچیدگی و توصیف انواع مختلف سیستم‌های پیچیده نقشی اساسی و گرچه قابل مناقشه بازی کرده‌اند.

فصل چهارم: محاسبه

Quo facto,quandorienturcontroversiae, magis disputatione opus erit inter duos philosophos, quam inter duos Computistas.Sufficienimcalamosinmanussumere sedereque ad abocos, et sibi mutuo dicere: Calculemus!

(اگر قرار بود مناقشه‌هایی پدید بیاید، نیاز به مجادله بین دو فیلسوف نهایتا به همان اندازه ضرورت می‌داشت که بین دو حسابدار. چراکه فقط کافی بود مداد در دست بگیرند، با لوح‌هایشان بنشینند، و به هم بگویند، "بیا محاسبه کنیم.")

- گ. لایب‌نیتس (ترجمه برتراند راسل (۱) مردم به طور معمول به محاسبه به عنوان چیزی فکر می‌کنند که کامپیوتر انجام می‌دهد، از قبیل محاسبه در صفحه گسترده[۱۹۰]، واژه‌پردازی، ای-میل، و مشابه آن. و معمولا به کامپیوتر به عنوان ماشینی فکر می‌کنند که روی میز (یا روی پایشان) قرار می‌گیرد، و داخلش پر از مدارهای الکترونیک است، و معمولا یک نمایشگر رنگی و یک ماوس دارد، و در گذشته‌ای دور از فناوری‌های کهنه‌ای مانند لامپ خلأ استفاده می‌کرده است.

اما، اگر برخی از مطالب دانشگاهی یا عناوین سمینارهای مربوط به نظریه پیچیدگی را با دقت بخوانید، پی می‌برید که واژه محاسبه در زمینه‌های نسبتا ناآشنایی به کار رفته است: برای مثال یک کتاب زیست‌شناسی درباره "محاسبه در سلول‌ها و بافت‌ها"، یک سخنرانی مهم درباره "محاسبه در سیستم،(۲)"ایمنی یک سخنرانی با موضوع اقتصاد درباره "ماهیت و محدودیت‌های محاسبه نامتمرکز[۱۹۱] در بازارها"، مقاله‌ای در یک مجله معتبر علمی درباره "محاسبه نوظهور در گیاهان"؛ و اینها تنها مشتی از خروار هستند.

از نخستین روزهای کامپیوتر، مفهوم محاسبه راهی طولانی را پشت سر گذاشته است، و امروزه بسیاری از دانشمندان پدیده محاسبه را همچون واقعیتی می‌بینند که در طبیعت به فراوانی دیده می‌شود. روشن است که سلول‌ها و بافت‌ها و گیاهان و سیستم ایمنی و بازارهای مالی به هیچ وجه مانند کامپیوتر روی میز شما کار نمی‌کنند. پس این گونه آدم‌ها چه منظوری از مفهوم محاسبه دارند، و چرا این نام را روی آن گذاشته‌اند.

به منظور این که صحنه را برای پاسخگویی به این پرسش در فصل دوازدهم آماده کنیم، فصل حاضر اختصاص دارد به مرور کلی ایده‌هایی درباره محاسبه و این که چه چیز را می‌توان محاسبه کرد، و مقدمات مربوط به مفاهیمی از محاسبه را توضیح می‌دهد که برای فهم سیستم‌های پیچیده طبیعی مورد استفاده دانشمندان است.

محاسبه چیست و چه چیزهایی محاسبه‌پذیر است؟

اطلاعات، به آن صورتی که شانون موشکافانه تعریف کرده، مربوط به پیش‌بینی‌پذیر بودن یک

منبع پیام است. اما در دنیای واقعی، اطلاعات چیزی است که برای معنا مورد تحلیل قرار می‌گیرد، یعنی به یاد سپرده می‌شود و با سایر اطلاعات ترکیب می‌شود، و نتایج یا کنش‌هایی را به وجود می‌آورد. در یک کلام، اطلاعات از طریق محاسبه پردازش می‌شود.

در طی سالیان معنای محاسبه به شدت تغییر کرده است. قبل از این‌که به اواخر دهه ۱۹۴۰ برسیم، محاسبه به معنای انجام محاسبات ریاضی با محاسبه دست بود. (امری که کودکان دبستانی بریتانیایی در قرن نوزدهم "جمع زدن" می‌نامیدند.) کامپیوترها آدم‌هایی بودند که چنین محاسباتی را به انجام می‌رساندند. یکی از اساتید قبلی من، آرت برکس[۱۹۲]، عادت داشت بگوید که با یک "کامپیوتر" ازدواج کرده است - اصطلاحی که در مورد زنانی به کار می‌رفت که در جریان جنگ جهانی دوم به خدمت گرفته شده بودند تا خط سیر پرتابه‌ها[۱۹۳] را دستی محاسبه کنند. آلیس برکس وقتی آرت را ملاقات کرد مشغول به کار در مقام چنین کامپیوتری بود.

این روزها محاسبه کاری است که انواع الکترونیک کامپیوتر، و همچنین به ظاهر سیستم‌های پیچیده طبیعی به عهده دارند. اما محاسبه دقیقا چیست، و تا چه حد می‌تواند ثمربخش باشد؟ آیا در اصل، کامپیوتر می‌تواند هر چیزی را محاسبه کند یا محدودیت‌هایی دارد؟ اینها پرسش‌هایی هستند که تنها در میانه قرن بیستم به آنها پاسخ داده شد.

مسائل هیلبرت و قضیه گودل

پژوهش بنیان‌ها و محدودیت‌های محاسبه، که منجر به اختراع کامپیوترهای الکترونیک شد، در واکنش به مجموعه‌ای از مسائل ریاضی انتزاعی (و غامض) شکل گرفت. این مسائل را ریاضیدان آلمانی داوید هیلبرت[۱۹۴]"، در سال ۱۹۰۰، در کنگره بین‌المللی ریاضیدانان مطرح کرد. سخنرانی هیلبرت در این کنگره فهرستی از نیات ریاضی سال نو را برای قرن جدید برشمرد که بیانگر بیست و سه مورد از مهمترین مسائل حل نشده ریاضیات بود. مسائل شماره ۲ و ۱۰ بیشترین سر و صدا را به پا کردند.

درواقع، اینها مسائلی در ریاضی نبودند، بلکه مسائلی درباره خود ریاضی بودند و این‌که با استفاده از ریاضیات چه چیز را می‌توان اثبات کرد. در مجموع، این مسائل را می‌توان در سه قسمت، به شرح زیر بیان کرد:



داوید هیلبرت، ۱۸۶۲-۱۹۴۳

۱. با ریاضیات تمام[۱۹۵] است؟ یعنی آیا می‌توان هر گزاره[۱۹۶] ریاضی را بر مبنای مجموعه محدودی از اصل‌ها[۱۹۷]" اثبات یا رد کرد؟ برای مثال، آیا اصل‌های اقلیدس در هندسه دبیرستان را به یاد می‌آورید؟ آیا به خاطر می‌آورید که بر مبنای این اصل‌ها گزاره‌هایی از قبیل "مجموعه زوایای مثلث ۱۸۰ درجه است" اثبات می‌شد؟ پرسش هیلبرت این بود: با فرض وجود مجموعه ثابتی از اصل‌ها، آیا اثباتی برای هر گزاره صادق[۱۹۸] وجود دارد؟

۲. با ریاضیات سازگاره است؟ به عبارت دیگر، آیا تنها می‌توان گزاره‌های ادق را اثبات کرد؟ مفهوم این‌که منظور از "گزاره صادق" چیست امری فنی است، اما آن را همچون امری شهودی به حال خود رها می‌کنم.

برای مثال، اگر می‌توانستیم گزاره‌هایی کاذب از قبیل ۳ = ۱ + ۱ را اثبات کنیم، ریاضیات ناسازگار[۱۹۹] بود و به دردسر بزرگی دچار می‌شد.

۳. با هر گزاره‌ای در ریاضیات تصمیم‌پذیر[۲۰۰] است یعنی آیا روال روشنی وجود دارد که قابل کاربرد در مورد هر گزاره‌ای باشد، و در زمان محدودی بتواند به ما بگوید گزاره صادق است یا

کاذب؟ ایده‌ای که در اینجا مطرح شد این است که می‌توانید به گزاره‌ای ریاضی دست یابید - از قبیل "هر عدد زوجی بزرگ‌تر از ۲ را می‌توانید به صورت جمع دو عدد اول نشان دهید" - آن را به دست یک ریاضیدان (یا کامپیوتر) بدهید که یک روش کار دقیق (یک "روال معین[۲۰۱]") را در مورد آن به کار گیرد، و در زمانی محدود پاسخ صحیح "صادق" یا "کاذب" را فراهم کند.

آخرین پرسش با نام آلمانی‌اش مسئله انت‌شابدونگس[۲۰۲]" (مسئله تصمیم) خوانده می‌شود، و به ریاضیدان قرن هفدهم گوتفرید لایب‌نیتس برمی‌گردد.

لایب‌نیتس واقعا ماشین‌حساب خودش را ساخت، و معتقد بود که انسان می‌تواند سرانجام ماشینی بسازد که قادر به تشخیص صدق یا کذب هر گزاره ریاضی باشد.

تا سال ۱۹۳۰، این سه مسئله حل نشده باقی مانده بودند، اما هیلبرت با اطمینان اظهار کرد که پاسخ در هر سه مورد "بله" خواهد بود، و بر این پای فشرد که "چیزی مانند مسئله حل‌ناپذیر وجود ندارد."(۶) اما این خوش‌بینی زودگذر از کار درآمد. خیلی زودگذر. در همان گردهمایی سال ۱۹۳۰ که در آن هیلبرت پافشاری آکنده از اعتماد خود را بر زبان آورد، ریاضیدانی بیست و پنج ساله به نام کرت گودل[۲۰۳]، با ارائه اثبات قضیه به اصطلاح ناتمامیت[۲۰۴]، دنیای ریاضیات را مبهوت کرد. این قضیه بیان می‌کرد که اگر پاسخ به پرسش ۲ "بله" باشد (یعنی ریاضیات سازگار است)، پاسخ به پرسش ۱ (آیا ریاضیات تمام است؟) باید "خیر" باشد.



کرت گودل، ۱۹۰۶-۱۹۷۸

قضیه ناتمامیت گودل به حساب[۲۰۵] نظر داشت. گودل نشان داد که اگر حساب سازگار باشد،

گزاره‌های صادقی در حساب وجود خواهند داشت که قابل اثبات نیستند - یعنی حساب ناتمام است. اگر حساب ناسازگار باشد، گزاره‌های کاذبی وجود خواهند داشت که اثبات‌پذیر هستند، و تمامی ریاضیات فرو می‌پاشد.

اثبات گودل غامض (). است اما به صورت شهودی به آسانی قابل اثبات است. گودل نمونه‌ای از یک گزاره ریاضی را مطرح کرد که به این صورت قابل برگردان به انگلیسی است: "این گزاره اثبات‌ناپذیر است."

چند لحظه‌ای به آن فکر کنید. گزاره غریبی است، چون درباره خودش حرف می‌زند - درواقع، تأکید دارد که اثبات‌پذیر نیست. اجازه بدهید این گزاره را "گزاره الف" بنامیم. حال فرض کنید که گزاره الف واقعا اثبات‌پذیر می‌بود. با این همه کاذب است (چون می‌گوید که اثبات‌پذیر نیست.) که به این معناست که یک گزاره کاذب اثبات‌پذیر است - در آن صورت حساب ناسازگار می‌شود. خب فرض کنیم عکس آن درست است، یعنی گزاره الف اثبات‌پذیر نیست. که به این معنی است که گزاره الف صادق است (چون تأکید دارد که اثبات‌پذیر نیست.) در این صورت گزاره صادقی وجود دارد که اثبات‌پذیر نیست - یعنی حساب ناتمام است. لذا حساب یا ناسازگار است یا ناتمام.

تصور این‌که این گزاره به زبان ریاضی برگردانده شود مشکل است، اما گودل این کار را به انجام رساند - پیچیدگی و درخشانی اثبات گودل در همین است، که آن را در اینجا نمی‌آورم.

برای بسیاری از ریاضیدانان و فیلسوفانی که سخت اعتقاد داشتند که پرسش‌های هیلبرت پاسخ‌های مثبتی دارند، این ضربه بزرگی بود. همان‌گونه که ریاضیدان و نویسنده اندرو هاجز[۲۰۶] اشاره می‌کند: "این چرخش جدید و حیرت‌آوری در مسیر تحقیق بود، چون هیلبرت تصور کرده بود که برنامه‌اش به بلاتکلیفی‌ها خاتمه می‌دهد. برای کسانی که خواهان یافتن چیزی کامل و خدشه‌ناپذیر در ریاضیات بودند، این موضوعی نگران‌کننده بود...(۸)

ماشین‌های تورینگ و محاسبه‌ناپذیری

درحالی‌که گودل تیر خلاص را به پرسش‌های اول و دوم هیلبرت می‌زد، ریاضیدان بریتانیایی آلن تورینگ[۲۰۷] سومی را به هلاکت رساند. (۹)

@degar_goonesh



تورینگ،۱۹۱۲-۱۹۵۴

در سال ۱۹۳۵ آلن تورینگ بیست و سه ساله دانشجوی دوره تحصیلات تکمیلی در کیمبریج بود و تحت نظر منطق‌دان ماکس نیومن[۲۰۸] درس می‌خواند. نیومن تورینگ را با قضیه ناتمامیت تازه گودل آشنا کرد. وقتی تورینگ نتیجه‌گیری گودل را فهمید، توانست بفهمد چگونه به پرسش سوم هیلبرت، یعنی مسئله انت‌شایدونگس پاسخ دهد، و پاسخ او هم منفی بود. (۱۰)

تورینگ چگونه این را اثبات کرد؟ به یاد بیاورید که مسئله انت‌شایدونگس این پرسش را مطرح می‌کند که آیا همیشه "یک روال معین" وجود دارد که از طریق آن بتوان تصمیم گرفت که یک گزاره اثبات‌پذیر است.

منظور از "روال معین" چیست؟ اولین گام تورینگ این بود که این مفهوم را تعریف کند. به دنبال دریافت شهودی لایب‌نیتس در دو قرن و اندی پیش از آن، تورینگ با تصور یک ماشین محاسبه قدرتمند - ماشینی که نه تنها می‌تواند محاسبات عددی را به انجام برساند بلکه برای اثبات گزاره‌های ریاضی می‌تواند به درستی از نمادها[۲۰۹] استفاده کند - مفهوم خود را صورت‌بندی کرد. با تصور این که انسان‌ها چگونه محاسبه می‌کنند، او طراحی چنین ماشینی را به تصور آورد، که امروزه به ماشین تورینگ[۲۱۰] معروف است.

ماشین تورینگ به مانند طرحی کلی برای ابداع کامپیوتر الکترونیک برنامه‌پذیر مورد استفاده قرار گرفت.

مقدمه‌ای کوتاه بر ماشین تورینگ همان‌طور که در شکل ۱-۴ به نمایش درآمده است، ماشین

تورینگ شامل سه بخش است:

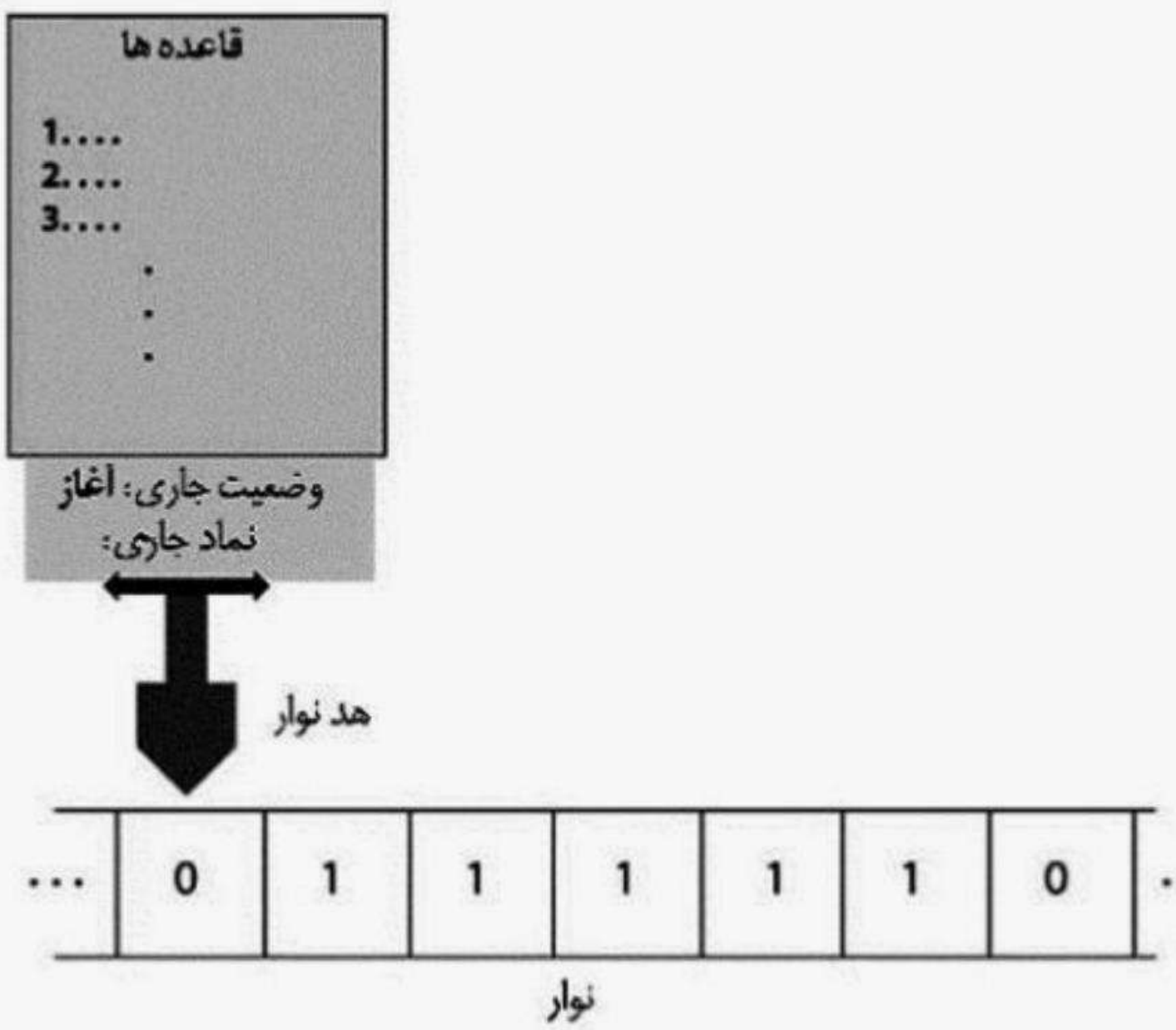
۱. یک نوار که به مربع‌ها (یا خانه‌ها) تقسیم شده است، که نمادها را می‌توان روی آن نوشت یا ازآن خواند. نوار از هر دو طرف بی‌نهایت است.

۲. یک هد متحرک برای نوار خواندن / نوشتن که نمادها را از روی نوار می‌خواند یا نمادها را بر روی آن می‌نویسد. در هر زمان، هد در یکی از چند وضعیت خود است.

۳. مجموعه‌ای از قواعد که به هد فرمان می‌دهد در گام بعدی چه کند.

هد بر روی یک خانه مشخص و در یک وضعیت آغاز خاص، کار خود را شروع می‌کند. در هر گام زمانی، هد نماد را از خانه جاری نوار می‌خواند.

سپس هد از قواعدی پیروی می‌کند که با نماد وضعیت جاری هد متناظر است. این قاعده به هد می‌گوید که چه نمادی را در خانه جاری نوار بنویسد (نماد قبلی را جایگزین کند)؛ می‌گوید که به راست حرکت کند، به چپ حرکت کند، یا در جای خود باقی بماند؛ و می‌گوید که وضعیت جدید هد چیست. وقتی هد به وضعیت خاص توقف وارد می‌شود، کار ماشین به پایان رسیده و توقف می‌کند.



شکل ۴-۱. نمایش یک ماشین تورینگ

ورودی ماشین مجموعه نمادهایی است که قبل از آغاز کار ماشین بر روی نوار نوشته شده است.

خروجی ماشین مجموعه نمادهایی است که پس از توقف ماشین بر روی نوار نوشته شده است.

یک مثال ساده یک مثال ساده همه این مسایل را روشن‌تر می‌کند. برای این‌که موضوع را واقعا

ساده کنیم، فرض کنید (به مانند یک کامپیوتر واقعی) تنها نمادهای ممکنی که می‌توانند روی نوار باشند عبارتند از ۰ و ۱، و یک نماد تهی که نشان‌دهنده یک خانه تهی بر روی نوار است. اجازه بدهید یک ماشین تورینگ را طراحی کنیم که نواری را می‌خواند که به جز تعدادی ۱ که دقیقا با دو ۰ احاطه شده‌اند (برای مثال ۰۱۱۱۱۰) بقیه خانه‌ها تهی هستند، و تعیین می‌کند تعداد ۱ ها زوج هستند یا فرد. اگر زوج باشند، خروجی نهایی ماشین بر روی نوار یک صفر خواهد بود (بقیه خانه‌ها تهی هستند). اگر فرد باشد، خروجی نهایی یک عدد ۱ خواهد بود (بقیه خانه‌ها تهی هستند). فرض کنید که ورودی نوار همیشه دو صفر است، بدون ۱ یا تعدادی ۱ در بین آنها، و بقیه خانه‌ها در دو طرف آنها تهی هستند.

هد ماشین تورینگ ما چهار وضعیت ممکن خواهد داشت: آغاز، زوج، فرد، و توقف. هد بر روی چپ‌ترین ۰ و در وضعیت آغاز، شروع به کار می‌کند.

قواعدی را تنظیم می‌کنیم که موجب می‌شود هد در هر بار یک خانه به سمت راست حرکت کند، و ۰ ها و ۱ هایی را که می‌بیند با تهی جایگزین کند.

اگر هد در خانه جاری یک عدد ۱ را بخواند، وارد وضعیت فرد می‌شود و یک خانه به راست حرکت می‌کند. اگر بار دیگر یک عدد ۱ را بخواند وارد وضعیت زوج می‌شود و یک خانه به راست حرکت می‌کند، و به همین منوال، و درحالی که ۱ ها خوانده می‌شوند هد بین وضعیت‌های زوج و فرد نوسان می‌کند.

وقتی هد یک ۰ را می‌خواند به پایان ورودی رسیده است، و هر وضعیتی که در آن قرار دارد، چه زوج باشد و چه فرد، وضعیت درست است. سپس متناظر با آن، ماشین یک ۰ یا ۱ را در خانه جاری می‌نویسد و وارد وضعیت توقف می‌شود.

قواعد حاکم بر هد نوار که این آلگوریتم را به اجرا درمی‌آورد در زیر آمده است:

۱. اگر در وضعیت آغاز هستید و ۰ را می‌خوانید، وضعیت را به زوج تغییر دهید، و این صفر را با تهی جایگزین کنید، و یک خانه به راست حرکت کنید.
۲. اگر در وضعیت زوج هستید و یک عدد ۱ را می‌خوانید، وضعیت را به فرد تغییر دهید، و ۱ را با یک تهی جایگزین کنید، و یک خانه به راست حرکت کنید.
۳. اگر در وضعیت فرد هستید و یک عدد ۱ را می‌خوانید، وضعیت را به زوج تغییر دهید، ۱ را با یک تهی جایگزین کنید، و یک خانه به راست حرکت کنید.
۴. اگر در وضعیت فرد هستید و یک صفر را می‌خوانید، ۰ را با ۱ جایگزین کنید و وضعیت را به توقف تغییر دهید.
۵. اگر در یک وضعیت زوج هستید و یک صفر را می‌خوانید، ۰ را با ۰ جایگزین کنید (یعنی آن را تغییر ندهید) و وضعیت را به توقف تغییر دهید.

فرایند آغاز کردن از نمادهای ورودی و فرصت دادن به ماشین تورینگ که با استفاده از چنین قواعدی به صورت متوالی ورودی را پردازش کند "اجرای ماشین تورینگ بر روی ورودی" نامیده می‌شود.

تعریف روال‌های معین به صورت ماشین‌های تورینگ

در مثال بالا، با فرض این که ورودی در قالب[۲۱۱] درستی است یعنی بدون ۱ یا با چندین ۱ است که با دو صفر احاطه شده‌اند، اجرای ماشین بر روی این گونه از ورودی برای هر ورودی به طور قطع یک پاسخ درست تولید می‌کند (از جمله در مورد خاصی که ۱ وجود ندارد، که عدد زوج به حساب می‌آید.) گرچه به نوعی از مد افتاده به نظر می‌آید، چاره‌ای جز این ندارید که بپذیرید این روال یک "روال معین" - یعنی مجموعه دقیقی از گام‌ها - برای حل مسئله زوج / فرد است. اولین هدف تورینگ این بود که مفهوم روال معین را خیلی مشخص کند. ایده او این بود که با فرض وجود یک مسئله خاص که قرار است حل شود، می‌توانید با طراحی یک ماشین تورینگ برای حل آن یک روال معین بسازید. ماشین تورینگ راه‌حلی برای تعریف "روال معین" بود، که تا آن زمان مفهومی مبهم و فاقد تعریفی روشن بود.

وقتی این ایده صورت‌بندی می‌شد، تورینگ ماشینی واقعی نساخت (گرچه بعدها ماشین‌های با اهمیتی ساخت). بلکه تمامی ایده‌های او درباره ماشین تورینگ صرفا با مداد و کاغذ پیاده‌سازی شد.

ماشین‌های عام تورینگ

سپس، تورینگ واقعیت حیرت‌آوری را درباره ماشین‌های تورینگ به اثبات رساند: می‌توان ماشین تورینگ عام ویژه‌ای را طراحی کرد (اجازه بدهید آن را U بنامیم) که قادر است طرز کار هر ماشین تورینگ را تقلید کند. برای این‌که U یک ماشین تورینگ M را که بر روی ورودی I اجرا می‌شود تقلید کند، U با بخشی از نوارش آغاز می‌کند که شامل رشته‌ای از ۰ ها، ۱ ها، و

تی‌هاست که ورودی ۱ را کدگذاری[۲۱۲] می‌کند و بخش دیگری از نوارش که شامل رشته‌ای از ۰ ها، ۱ ها، و تهی‌هاست ماشین M را کدگذاری می‌کند.

مفهوم کدگذاری کردن ماشین M احتمالا برای شما آشنا نیست، اما مسئله چندان سختی نیست. اول تشخیص می‌دهیم که می‌توان همه قواعد را (مانند پنج موردی که در "مثال ساده" بالا آمد) به صورت تندنوشته‌ای درآورد که شبیه این به نظر می‌رسد:

حرکت - نماد جدید - وضعیت جدید - نماد جاری - وضعیت جاری _ در این تندنوشته، قاعده ۱ بالا به این صورت درمی‌آید:

راست - تهی - زوج - ۰ - آغاز _ جداکننده "-" واقعا مورد نیاز نیست. اما خواندن قاعده را آسان‌تر می‌کند. حال برای کدگذاری کردن یک قاعده، اعداد دوگان[۲۱۳] سه رقمی را به هر یک از وضعیت‌های ممکن اختصاص می‌دهیم: برای مثال، آغاز = ۰۰۰، زوج = ۰۰۱، فرد = ۰۱۰، و توقف = ۱۰۰. به صورتی مشابه، می‌توانیم اعداد باینری سه رقمی را به هر یک از نمادهای ممکن اختصاص دهیم: برای مثال، نماد "۰" = ۰۰۰، نماد "۱" = ۰۰۱، و نماد تهی = ۱۰۰. هرگونه عدد دوگان این چنین، تا آنجایی که هر یک از آنها تنها یک نماد را نمایش دهد و در استفاده از آنها یک‌دست عمل کنیم، کار را به نتیجه می‌رساند. برای مثال، اگر از عدد دوگان یکسانی برای آغاز و "۰" استفاده کنیم مشکلی پیش نمی‌آید، چون ساختار قاعده تندنوشته بالا را می‌شناسیم، قادر خواهیم بود آنچه را کدگذاری شده است از زمینه تمیز دهیم.

به همان شکل، می‌توانیم "حرکت به راست" را با ۰۰۰، و "حرکت به چپ" را با ۱۱۱ کدگذاری کنیم. سرانجام، می‌توانیم نماد جداکننده "" را به صورت ۱۱۱ کدگذاری کنیم. بعد از آن، مثلا می‌توانیم قاعده ۱ را به صورت رشته زیر درآوریم:

۱۱۱۰۰۰۱۱۱۰۰۰۱۱۱۰۰۱۱۱۱۱۰۰۱۱۱۰۰۰۱۱۱ که صرفا کد ما را جایگزین وضعیت‌ها و نمادهای تندنوشته بالا می‌کند. قواعد دیگر نیز به همین شیوه کدگذاری می‌شوند. با پیاپی قرار دادن رشته‌های کدگذاری شده، یک رشته واحد و طولانی شکل می‌گیرد که کد ماشین تورینگ M نامیده می‌شود. برای این‌که M،U را که بر روی ورودی ۱ اجرا می‌شود تقلید کند، نوار اولیه U شامل کد ورودی I و همچنین کد M است.

در هر گام، U نماد جاری در ۱ را از قسمت ورودی نوار می‌خواند، قاعده مناسب را با گشودن کد[۲۱۴] قسمت M نوار به دست می‌آورد و آن را بر روی قسمت ورودی به انجام می‌رساند؛ در تمامی این مدت مقدار وضعیت M را (بر قسمت دیگری از نوار) ثبت می‌کند؛ این مقدار نمایانگر وضعیتی است که اگر M در زمان اجرا بر روی این ورودی مشخص بود، عملا در آن قرار می‌داشت.

وقتی M به وضعیت توقف می‌رسد، U نیز توقف می‌کند، و قسمت ورودی (اکنون خروجی)

نوارش در این حال دربرگیرنده نمادهایی است که M پس از اجرا بر روی ورودی مشخص I بر نوارش ثبت کرده است.

بدین‌ترتیب می‌توانیم بگوییم که "M، U" را بر روی ۱ به اجرا درمی‌آورد." من وضعیت‌ها و قواعد واقعی U را کنار می‌گذارم، چون بسیار غامض هستند، اما به شما اطمینان می‌دهم که چنین ماشین تورینگی را می‌توان طراحی کرد.

افزون بر این، کاری که U به انجام می‌رساند دقیقا چیزی است که یک کامپیوتر برنامه‌پذیر به انجام می‌رساند: یک برنامه M را که در قسمتی از حافظه ذخیره‌شده برمی‌دارد، و بر روی ورودی I که در قسمت دیگری از حافظه ذخیره شده به اجرا درمی‌آورد. شایان توجه است که اولین کامپیوتر برنامه‌پذیر، تنها حدود ده سال پس از آن ساخته شد که تورینگ وجود یک ماشین تورینگ عام را اثبات کرده بود.

راه‌حل تورینگ برای مسئله انت‌شایدونگس

پرسش مسئله انت‌شایدونگس را به یاد بیاورید: آیا همیشه روال معینی وجود دارد که بتواند تصمیم بگیرد یک گزاره صادق است یا کاذب؟

وجود یک ماشین تورینگ عام به تورینگ امکان داد اثبات کند که پاسخ "خیر" است. او پی برد که ورودی به یک ماشین تورینگ M می‌تواند کد یک ماشین تورینگ دیگر باشد. این معادل آن است که ورودی یک برنامه کامپیوتری، خط‌های یک برنامه کامپیوتری دیگر باشد. برای مثال، می‌توانید برای نوشتن یک برنامه کامپیوتری از یک واژه‌پرداز مانند واژه‌پرداز مایکروسافت استفاده کنید، آن را در یک فایل ذخیره کنید، و بعد برنامه "شمارش واژه[۲۱۵]" را بر روی این فایل اجرا کنید. در اینجا، برنامه شما ورودی به برنامه دیگری (شمارش واژه) است، و خروجی آن تعداد واژه‌ها در برنامه شماست. برنامه شمارش واژه برنامه شما را اجرا نمی‌کند؛ بلکه صرفا تعداد واژه‌های آن را به مانند هر فایل متن[۲۱۶] دیگری می‌شمارد.

به قیاس، می‌توانید، بدون زحمت زیاد، یک ماشین تورینگ M را طراحی کنید که تعداد ۱ها در ورودی‌اش را بشمارد و بعد M را بر روی کد یک ماشین تورینگ دوم M اجرا کند. M صرفا تعداد ۱ها در کد M را می‌شمارد. البته، ماشین تورینگ عام U می‌تواند کد M را در قسمتی از نوار که مختص "برنامه" است و کد M را در قسمت مختص "ورودی" در اختیار داشته باشد، و M را روی M را به اجرا درآورد. فقط برای این‌که خودسری کرده باشیم، می‌توانیم کد M را هم در قسمت "برنامه" و هم "ورودی" نوار U قرار دهیم، و M را وادار‌یم که روی کد خودش اجرا شود! مثل این است که برنامه شمارش واژه را روی خط‌های کد خودش اجرا کنیم، و تعداد واژه‌هایی را که در خودش دارد بشماریم. مشکلی پیش نمی‌آید!

همه این حرف‌ها ممکن است برای شمایی که در کار با کامپیوتر آزموده هستید خسته‌کننده به نظر بیاید، اما در زمانی که تورینگ اثباتش را تنظیم می‌کرد، دریافت اساسی او - یعنی این‌که

رشته ۰ ها و ۱ های یکسانی را می‌توان هم به صورت یک برنامه و هم ورودی به برنامه دیگری استنباط کرد واقعا بدیع بود.

حال آماده‌ایم که طرح کلی اثبات تورینگ را توضیح دهیم.

تورینگ با استفاده از روشی به نام "برهان خلف[۲۱۷]" اثبات کرد که پاسخ مسئله انت‌شایدونگس "خیر" است. در این روش ابتدا فرض می‌کنید پاسخ "بله" است و با استفاده از استدلال بیشتر نشان می‌دهید که این فرض منجر به تناقض می‌شود، و بدین ترتیب فرض صادق نیست.

تورینگ ابتدا فرض کرد که پاسخ "بله" است، یعنی همیشه روال معینی وجود دارد که می‌تواند تصمیم بگیرد که یک گزاره صادق است یا کاذب.

سپس تورینگ گزاره زیر را پیشنهاد کرد:

گزاره تورینگ: ماشین تورینگ،M با فرض ورودی،I پس از معدودی گام‌های زمانی به وضعیت توقف می‌رسد.

با توجه به فرض اول، روال معینی وجود دارد که به ازای مقادیر خاص M و ورودی ۱، تعیین خواهد کرد که آیا این گزاره خاص صادق است یا کاذب.

اثبات تورینگ نشان می‌دهد که این گزاره به یک تناقض می‌رسد.

شایان توجه است که ماشین‌های تورینگی وجود دارد که هرگز به وضعیت توقف نمی‌رسند. برای مثال، یک ماشین تورینگ مشابه مثال بالا را در نظر بگیرید که تنها دو قاعده دارد:

۱. اگر در وضعیت آغاز هستید و یک ۰ یا ۱ را می‌خوانید، وضعیت را به زوج تغییر دهید و یک خانه به راست حرکت کنید.
۲. اگر در وضعیت زوج هستید و یک ۰ یا ۱ را می‌خوانید، وضعیت را به آغاز تغییر دهید و یک خانه به چپ حرکت کنید.

این یک ماشین تورینگ کاملا معتبر است، اما موردی است که هیچ‌گاه توقف نمی‌کند. به زبان مدرن، کنش آن را همچون "حلقه بی‌نهایت[۲۱۸]" تعریف می‌کنیم -رفتاری که معمولا نتیجه یک اشکال در برنامه است. حلقه‌های بی‌نهایت لزوما آنقدرها واضح نیستند؛ درواقع، شیوه‌های نامحسوس بسیاری برای خلق یک حلقه بی‌نهایت وجود دارد که تشخیص آن را بسیار مشکل می‌کند.

این فرض ما که روال معینی وجود دارد که در مورد گزاره تورینگ تصمیم می‌گیرد معادل این است که بگوییم می‌توانیم یک ماشین تورینگ طراحی کنیم که آشکارساز[۲۱۹] حلقه بی‌نهایت باشد.

به طور مشخص‌تر، فرض ما می‌گوید که می‌توانیم ماشین تورینگ H را طراحی کنیم که به شرط وجود هر کد ماشین M و هر ورودی I بر روی نوار، اگر M بر روی ورودی I اجرا شود و توقف کند، در زمان محدود پاسخ "بله" می‌دهد، و اگر M وارد یک حلقه بی‌نهایت شود و هرگز توقف نکند، پاسخ "خیر" می‌دهد.

مسئله طراحی H "مسئله توقف[۲۲۰]" نامیده می‌شود. توجه کنید که خود H همیشه باید با یک "بله" یا "خیر" توقف کند. در نتیجه H نمی‌تواند صرفا M را بر روی I به اجرا دربیاورد، چون این احتمال وجود دارد که M (و از این‌رو (H هرگز توقف نکند. بنابراین H باید کارش را به شیوه‌ای نه چندان سر راست به انجام برساند.

بلافاصله روشن نیست که H چگونه کار می‌کند، اما در هر صورت فرض کرده‌ایم که H دلخواه ما وجود دارد. حال فرض کنیم که H (M, I) بر کنش اجرای H بر روی ورودی M و ۱ دلالت می‌کند. خروجی "بله" است (یعنی یک عدد ۱ بر روی نوار)، اگر M بر روی I اجرا شود و توقف کند و "خیر" است (یعنی یک عدد ۰ بر روی نوار) اگر M روی ۱ توقف نکند.

تورینگ گفت که در این حال، یک نسخه تغییر یافته از،H به نام 'H را می‌سازیم که کد یک ماشین تورینگ را به صورت ورودی می‌گیرد، و H (M, M) را محاسبه می‌کند. یعنی 'H همان گام‌هایی را به انجام می‌رساند که H برای تعیین این‌که آیا M روی کد خود M توقف می‌کند یا نه، انجام می‌دهد. اما برحسب این‌که H پس از کسب "بله" یا "خیر" چه می‌کند، H را متفاوت از آن می‌سازیم. H تنها با پاسخی بر روی نوار خود توقف می‌کند. اما H فقط وقتی توقف می‌کند که پاسخ "نه، M بر روی کد M توقف نمی‌کند" به دست بیاید. اگر پاسخ "بله، M بر روی کد M

توقف می‌کند" باشد، ‘H وارد حلقه بی‌نهایت می‌شود و هرگز توقف نمی‌کند.

شاید موضوع دارد کمی سرگیجه‌آور می‌شود. امیدوارم که تا اینجا حرف‌های مرا دنبال کرده باشید. در هر یک از دوره‌های آموزش نظریه محاسبات، این نقطه‌ای است که در آن یا دانشجویان با گفتن این‌که "نمی‌توانم از این موضوع سردربیاورم!" دست‌ها را بالا می‌برند، و یا دست می‌زنند و می‌گویند "عاشق این موضوع هستم!"

نیاز به گفتن نیست که من از دانشجویان نوع دوم بودم، گرچه در سرگردانی دانشجویان نوع اول شریک بودم. شاید شما هم مثل من باشید.

پس نفس عمیقی بکشید تا به راهمان ادامه دهیم.

حال وقت پرسش بزرگ تورینگ است.

وقتی که به ‘H کد ‘H یعنی کد خودش را به صورت ورودی بدهیم، چه خواهد کرد؟ آیا توقف می‌کند؟

در اینجا، حتی دانشجویان نوع دوم هم رفته رفته کلافه می‌شوند.

سردرآوردن از موضوع واقعا مشکل است. اما بیایید در هر صورت سعی خودمان را بکنیم.

اول، فرض کنید ‘H بر روی ورودی ‘H توقف نکند. اما در این حال به مشکلی برمی‌خوریم. به خاطر بیاورید که ‘H فقط و فقط وقتی به حلقه بی‌نهایت وارد می‌شود که ماشین تورینگ M ای که به عنوان ورودی به ‘H داده شده است چنان باشد که اجرای M بر روی M متوقف می‌شود. در نتیجه عدم توقف ‘H بر روی ورودی M این را می‌رساند که M بر روی ورودی M توقف می‌کند. دقت کنید که چه دارد پیش می‌آید؟ وقتی اجرای ‘H بر روی ورودی ‘H به توقف نینجامد، درواقع بدان معنی است که اجرای ‘H بر روی ورودی ‘H متوقف می‌شود. اما ‘H نمی‌تواند هم توقف کند و هم توقف نکند، چون به تناقض می‌رسیم.

در نتیجه، این فرض ما که اجرای ‘H بر روی ورودی ‘H متوقف نمی‌شود، غلط از کار درآمد، پس ‘H باید روی ورودی ‘H توقف کند. اما اکنون با مسئله متضاد آن روبروهستیم. ‘H فقط در شرایطی بر روی ورودی M متوقف می‌شود که M بر روی ورودی M توقف نکند. در نتیجه ‘H فقط در شرایطی روی ورودی ‘H توقف می‌کند که ‘H روی ‘H توقف نکند - که تناقض دیگری است.

این تناقض‌ها نشان می‌دهد که ‘H نه می‌تواند روی ورودی ‘H توقف کند و نه این‌که وارد حلقه بی‌نهایت شود. یک ماشین واقعی باید یکی از این دو کار را انجام دهد، بنابراین ‘H نمی‌تواند وجود داشته باشد. چون هر کاری که H به انجام می‌رساند، احتمالا به استثنای اجرای،H برای یک ماشین تورینگ امکان‌پذیر است، نشان داده‌ایم که خود H نمی‌تواند وجود داشته باشد.

بدین ترتیب - و این نتیجه بزرگی است که تورینگ گرفت - هیچ روال معینی برای حل مسئله توقف وجود ندارد. مسئله توقف نمونه‌ای است که اثبات می‌کند پاسخ مسئله انت‌شایدونگس

"خیر" است؛ برای هر گزاره ریاضی یک روال معین وجود ندارد که بتواند صدق یا کذب آن را تعیین کند.

تورینگ، با این کار آخرین میخ را بر تابوت پرسش‌های هیلبرت کوبید.

اثبات تورینگ در مورد محاسبه‌ناپذیر بودن مسئله توقف که به‌اجمال در بالا آمد، دقیقا از همان ایده اصلی گودل در اثبات ناتمامیت بودن بهره می‌برد. گودل راهی را برای کدگذاری گزاره‌های ریاضی یافت تا آنها بتوانند درباره خودشان حرف بزنند. تورینگ راهی را یافت تا گزاره‌های ریاضی را همچون ماشین‌های تورینگ کدگذاری کند تا بر روی هم به اجرا درآیند.

در اینجا، باید دستاوردهای سرنوشت‌ساز تورینگ را جمع‌بندی کنم.

اول، او با دقت تمام مفهوم "روال معین" را تعریف کرد. دوم، تعریف او، که به شکل ماشین تورینگ بود، ابداع کامپیوترهای الکترونیک برنامه‌پذیر را ممکن کرد. سوم، او امری را نشان داد که آدم‌های معدودی انتظار آن را داشتند: در مورد چیزهایی که می‌توان محاسبه کرد محدودیت‌هایی وجود دارد.

مسیر زندگی گودل و تورینگ

قرن نوزدهم زمانه باور به امکانات بی‌نهایت ریاضیات و علوم بود. هیلبرت و دیگران باور داشتند که در آستانه تحقق بخشیدن به رؤیای لایب‌نیتس هستند: کشف شیوه‌ای خودکار برای اثبات یا ابطال هرگونه گزاره، و بر این اساس نشان دادن این‌که هیچ‌چیز نیست که ریاضیات نتواند بر آن فائق بیاید.

به همین ترتیب، همان‌طور که در فصل دوم دیدیم، لاپلاس و دیگران باور داشتند که با استفاده از قوانین نیوتون، دانشمندان در اساس می‌توانند همه‌چیز جهان هستی را پیش‌بینی کنند.

در مقابل، کشف‌های اوایل تا میانه قرن بیستم در ریاضیات و فیزیک نشان دادند که عملا چنین امکانات بی‌نهایتی وجود ندارد. همان‌طور که مکانیک کوانتوم و آشوب به اتفاق هم آرزوی پیش‌بینی دقیق را فرو نشاندند، نتایج گودل و تورینگ آرزوی امکانات نامحدود ریاضیات و محاسبه را منکوب کردند. اما، در پیامد مستقیم پاسخ منفی تورینگ به مسئله انت‌شایدونگس، او صحنه را برای کشف بزرگ بعدی، یعنی کامپیوتر برنامه‌پذیر آماده کرد، که از آن زمان تقریبا هر چیزی را در شیوه‌ای که علم به پیش رانده می‌شود و در شیوه‌ای که زندگی ما سامان می‌یابد، تغییر داد.

تورینگ و گودل، پس از این‌که در دهه ۱۹۳۰ اثبات‌های‌شان را که مکمل هم بود، منتشر کردند، مسیرهای متفاوتی را در پیش گرفتند، گرچه مثل هر کس دیگری در آن زمانه، زندگی‌شان عمیقا تحت‌تأثیر ظهور هیتلر و رایش سوم قرار گرفت. گودل، به رغم رنجی که از بیماری روانی ادواری می‌کشید، تا سال ۱۹۴۰ به پژوهش‌اش در بنیادهای ریاضیات ادامه داد. در آن سال برای اجتناب از خدمت در ارتش آلمان به ایالات متحده رفت. (به گفته زندگی نامه‌نویس او، هائو

وانگ، درحالی‌که گودل خود را برای تابعیت ایالات متحده آماده می‌کرد، به یک ناسازگاری در قانون اساسی ایالات متحده پی برد، اما دوستش آلبرت اینشتین او را از این برحذر داشت که در جریان مصاحبه‌اش برای کسب تابعیت درباره این ناسازگاری بحث کند. (۱۱) گودل، مثل اینشتین، به عضویت انستیتوی صاحب‌نام "مطالعات پیشرفته دانشگاه پرینستون[۲۲۱]" درآمد و به خدمات بزرگش به منطق ریاضی ادامه داد.

اما، در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، سلامت روانی‌اش باز هم وخیم‌تر شد. در اواخر عمر دچار پارانویای حادی بود و فکر می‌کرد که می‌خواهند او را مسموم کنند. در نتیجه، از غذا خوردن اجتناب می‌کرد و سرانجام از گرسنگی درگذشت.

تورینگ هم از "انستیتوی مطالعات پیشرفته" دیدار کرد و به او پیشنهاد عضویت دادند، اما تصمیم گرفت به انگلستان برگردد. در جریان جنگ جهانی دوم، به برنامه فوق سری دولت بریتانیا برای شکستن رمز انیگما[۲۲۲] پیوست[۲۲۳] که رمز مورد استفاده نیروی دریایی آلمان در پیام‌های مخابراتی بود. با بهره‌گیری از تخصصش در منطق و آمار، و همچنین پیشرفت در محاسبه الکترونیک، او در ایجاد نوعی از ماشین‌های رمزشکن پیشگام بود که سرانجام توانستند تقریبا تمامی مخابرات انیگما را رمزگشایی کنند.

در پایان جنگ، تورینگ در ساخت یکی از اولین حسابگرهای الکترونیک برنامه‌پذیر، در دانشگاه منچستر، شرکت کرد (که ریشه در ایده او درباره ماشین تورینگ عام داشت). علائق او معطوف به پرسش‌هایی دراین‌باره شد که مغز و بدن چگونه "محاسبه می‌کنند". پس به مطالعه در مورد عصب‌شناسی[۲۲۴]" و تنکردشناسی[۲۲۵] پرداخت و پژوهش مؤثری در مورد زیست‌شناسی رشد[۲۲۶] انجام داد، و درباره امکان وجود کامپیوترهای هوشمند مطالبی نوشت. اما زندگی خصوصی او با آداب و رسوم روز خوانایی نداشت: او سعی نمی‌کرد تمایلات خاصش را پنهان کند. در دهه ۱۹۵۰ این موضوع در بریتانیا ممنوع بود؛ تورینگ به دلیل تمایلات خاص‌اش دستگیر شد و به "دارودرمانی" برای مداوای "بیماری‌اش" محکوم شد. مجوز امنیتی دولتی او هم لغو شد. این رویدادها شاید در خودکشی احتمالی او در ۱۹۵۴ بی‌تأثیر نباشد. از بازی روزگار، در شرایطی که گودل برای اجتناب از مسموم شدن (آن‌طور که تصور می‌کرد) از گرسنگی خود را به هلاکت رساند، تورینگ در چهل و یک سالگی از خوردن سیب مسموم (آغشته به سیانور) درگذشت.

فصل پنجم: تکامل

تمامی حقایق بزرگ همچون کفرگویی آغاز می‌شوند.

جورج برناردشا، أنابانسکا، امپراتریس بولشویک. (۱) قانون دوم ترمودینامیک می‌گوید که مجموع آنتروپی یک سیستم منزوی تا زمانی که به مقدار حداکثر خود برسد همیشه در حال افزایش است. همه این را به طور غریزی می‌دانند - نه تنها در فهم ما از علم، بلکه در زندگی روزمره نیز پیش می‌آید، و با برداشت انسانی از تاریخ، و همچنین با هنر و ادبیات و مذاهب عجین شده است. بودا به ما می‌گوید که "تمامی چیزهای مرکب محکوم به زوال‌اند." پیامبر کتاب عهد عتیق، اشعیا، پیشگویی می‌کند که "زمین مثل یک جامه به کهنگی خواهد (۳)". رسید شکسپیر می‌پرسد:

آه! چه‌گونه تابستان‌های دلپذیر دوام آورند، در برابر گذشت آزارنده سال‌ها، هنگامی که صخره‌های آسیب‌ناپذیر استوار نمی‌مانند، و دروازه‌های پولادین با گذشت زمان زوال می‌یابند؟

این سیر به سوی آنتروپی حداکثر، پیامی غمبار است. اما طبیعت مثال متقابلی را پیش رو می‌گذارد: حیات. با در نظر گرفتن هر معیاری، سیستم‌های زنده پیچیده هستند - این سیستم‌ها جایی در میانه نظم و بی‌نظمی واقع‌اند. طبق دریافت شهودی ما، در طول تاریخ طولانی حیات، سیستم‌های زنده به جای این‌که بی‌نظم‌تر شوند و آنتروپی بیشتری داشته باشند، به شدت پیچیده‌تر و ظریف‌تر شده‌اند.

می‌دانیم که برای کاهش آنتروپی، باید کار انجام شود. چه‌کسی و چه چیزی کار خلق و نگهداری سیستم‌های زنده را برعهده دارد و آنها را پیچیده‌تر می‌کند؟ برخی از باورهای آسمانی می‌گویند یک نیروی ماورایی این کار را به عهده دارد، اما در میانه قرن نوزدهم، چارلز داروین مطرح کرد که چنین نیست و تاریخ حیات از دست نامرئی تکامل منشأ گرفته است، که از طریق انتخاب طبیعی عمل می‌کند.

برای تصوری که انسان از خودش دارد هیچ اندیشه‌ای در علم به اندازه نظریه تکامل داروین تهدیدآمیز نبوده و به راستی پرمناقشه‌ترین اندیشه در تاریخ علم بوده است. البته یکی از بهترین ایده‌های علم نیز بوده است.

فیلسوف دانیل دنت[۲۲۷] تأکید زیادی بر این امر دارد:

اگر قرار بود به بهترین ایده یگانه‌ای که تاکنون به فکر انسان رسیده جایزه‌ای بدهم، مقدم بر نیوتون و اینشتین، آن را به داروین می‌دادم.

ایده تکامل از طریق انتخاب طبیعی، با یک چرخش قلم، بین عرصه حیات و معنا و مقصود با عرصه فضا و زمان، علت و معلول، ماشین‌گرایی[۲۲۸] و قانون فیزیک وحدت برقرار می‌کند. (۵)

این فصل خطوط کلی پیشینه و ایده‌های اصلی تکامل داروینی را ترسیم می‌کند و بدین می‌پردازد که چگونه تکامل داروینی سازمان و انطباق را به وجود می‌آورد. مفاهیم برخاسته از

نظریه تکامل در ادامه این کتاب بارها خود را نشان می‌دهد. در فصل هجدهم توضیح خواهم داد که چگونه برخی از این مفاهیم، در پرتو نتایج نامتنظر ناشی از انقلاب مولکولی در زیست‌شناسی و نتایج ناشی از کاربرد ایده سیستم‌های پیچیده در تکامل، از بیخ و بن دگرگون می‌شوند.

تصورات ماقبل داروینی از تکامل

واژه تکامل به معنی "تغییر تدریجی" است. تکامل زیستی فرایند تغییر تدریجی (و گهگاه سریع) در اشکال زیستی در تاریخ حیات است. تا قرن هجدهم، نظر غالب این بود که اشکال زیستی در طول زمان تغییر نمی‌کنند؛ و تمامی اندام‌واره‌ها، کمابیش، مخلوق‌الوهیت‌اند که از زمان آفرینش به طور عمده در شکل اصلی خود باقی‌مانده‌اند. گرچه برخی از فلاسفه باستان یونانی و هندی مطرح کرده بودند که انسان از طریق استحاله سایر گونه‌ها به وجود آمده است، در غرب فقط در قرن هجدهم بود که تصور آفرینش الوهی به صورت گسترده مورد پرسش قرار گرفت.

در میانه قرن هجدهم، ۱۰۰ سال پیش از این‌که داروین نظریه‌اش را مطرح کند، یک جانورشناس فرانسوی به نام جورج لویی لکلرک دو بوفون[۲۲۹] اثری چند جلدی با عنوان تاریخ طبیعی[۲۳۰] منتشر کرد که در آن شباهت‌های گونه‌های مختلف را تشریح کرده بود. بوفون نوشت که زمین خیلی قدیمی‌تر از ۶۰۰۰ سال انجیلی است و تمامی اندام‌واره‌های جدید از یک نیای واحد تکامل یافته‌اند. البته برای این تکامل ساز و کاری را پیشنهاد نکرده بود.

پژوهش بوفون در زیست‌شناسی و جانورشناسی گسست مهمی از نقطه‌نظر غالب آفرینش‌گرا بود. تعجبی ندارد که کلیسای کاتولیک در فرانسه نسخه‌های این کتاب را سوزاند.

پدربزرگ چارلز داروین، ا راسموس داروین[۲۳۱]"، دانشمند برجسته دیگری در قرن هجدهم بود که به تکامل تمامی گونه‌ها از یک نیای یگانه باستانی باور داشت. او ساز و کاری را برای تکامل مطرح کرد که صورتی ابتدایی از نظریه انتخاب طبیعی نوه‌اش بود. ا راسموس داروین ایده‌هایش را هم به صورت علمی و هم شاعرانه ابراز کرد:

حیات اندام‌وار در زیر امواج بیکران زاده شد، و پرورش یافت در غارهای مروارید‌گون اقیانوس؛ شکل‌های ریز، بی‌آنکه نظاره شوند، در گل جابه‌جا می‌شوند، یا توده آب را می‌شکافند؛ با شکوفایی پی‌درپی نسل‌ها توانمندی‌های تازه و اندام‌های حرکتی بزرگتر افزوده می‌شوند، و از آنها انواع بیشمار گیاهان پدید می‌آیند، و انواع جانوران با باله و پا و بال. (۶) کاش دانشمندان معاصر هم این‌قدر زبان‌آور بودند! اما، به مانند کلیسای کاتولیک در فرانسه، کلیسای آنگلیکان هم روی خوشی به این ایده نشان نداد.

مشهورترین تکامل‌گرای ماقبل داروین ژان-باتیست لامارک[۲۳۲] است.

لامارک، اشرافی و گیاه‌شناس فرانسوی، در سال ۱۸۰۹ کتاب فلسفه جانوری[۲۳۳] را منتشر کرد که در آن نظریه‌اش را درباره تکامل توضیح داده بود:

انواع جدیدی از اندام‌واره‌ها به طور خودانگیخته از ماده بی‌جان به وجود می‌آیند، و این گونه‌ها از طریق "توارث خصیصه‌های اکتسابی" تکامل می‌یابند.

ایده او این بود که اندام‌واره‌ها در طول حیات‌شان با محیط انطباق پیدا می‌کنند، سپس این انطباق‌های اکتسابی به طور مستقیم به بچه‌های این جانداران منتقل می‌شوند. یکی از مثال‌های کتاب لامارک کسب پاهای بلند توسط پرنده‌های آبچر[۲۳۴]، از جمله لک‌لک‌ها، بود. او معتقد بود که این گونه از پرنده‌ها، برای این‌که بدنشان را از آب بیرون نگهدارند، در ابتدا مجبور بودند پاهایشان را دراز کنند. این دراز کردن مداوم پاهایشان را بلندتر کرد، و این خصیصه پاهای بلندتر به بچه‌های این پرندگان منتقل شد، که پاهایشان را باز هم بیشتر دراز می‌کردند، و به نوبه خود این خصیصه را به بچه‌هایشان منتقل می‌کردند، و به همین منوال. نتیجه این امر پاهای خیلی درازی است که امروزه در پرنده‌های آبچر می‌بینیم.



ژان باتیست لامارک،(۱۷۴۴ - ۱۸۲۹

لامارک مثال‌های متعدد دیگری را هم در کتابش آورده بود. او درعین‌حال تأکید کرده بود که تکامل "گرایشی به پیشرفت" را با خود به همراه دارد، که در جریان آن اندام‌واره‌ها به صورت فزاینده‌ای "پیشرفته[۲۳۵]" می‌شوند، و انسان‌ها در بلندای این فرایند قرار دارند. بدین‌سان، تغییرات اندام‌واره‌ها بیشتر در جهت بهبود، یا حداقل پیچیدگی بیشتر است.

تقریبا تمامی معاصران لامارک نظرات او را رد کردند - نه تنها هواداران آفرینش الوهی بلکه کسانی هم که به تکامل باور داشتند. مثال‌های لامارک در مورد تکامل از طریق توارث خصیصه‌های اکتسابی به‌هیچ‌وجه تکامل‌گرایان را متقاعد نمی‌کرد. داده‌های تجربی او سست و به‌طورکلی محدود به گمانه‌زنی‌های او در این‌باره بودند که چگونه خصیصه‌های معینی در جانداران شکل گرفتند.

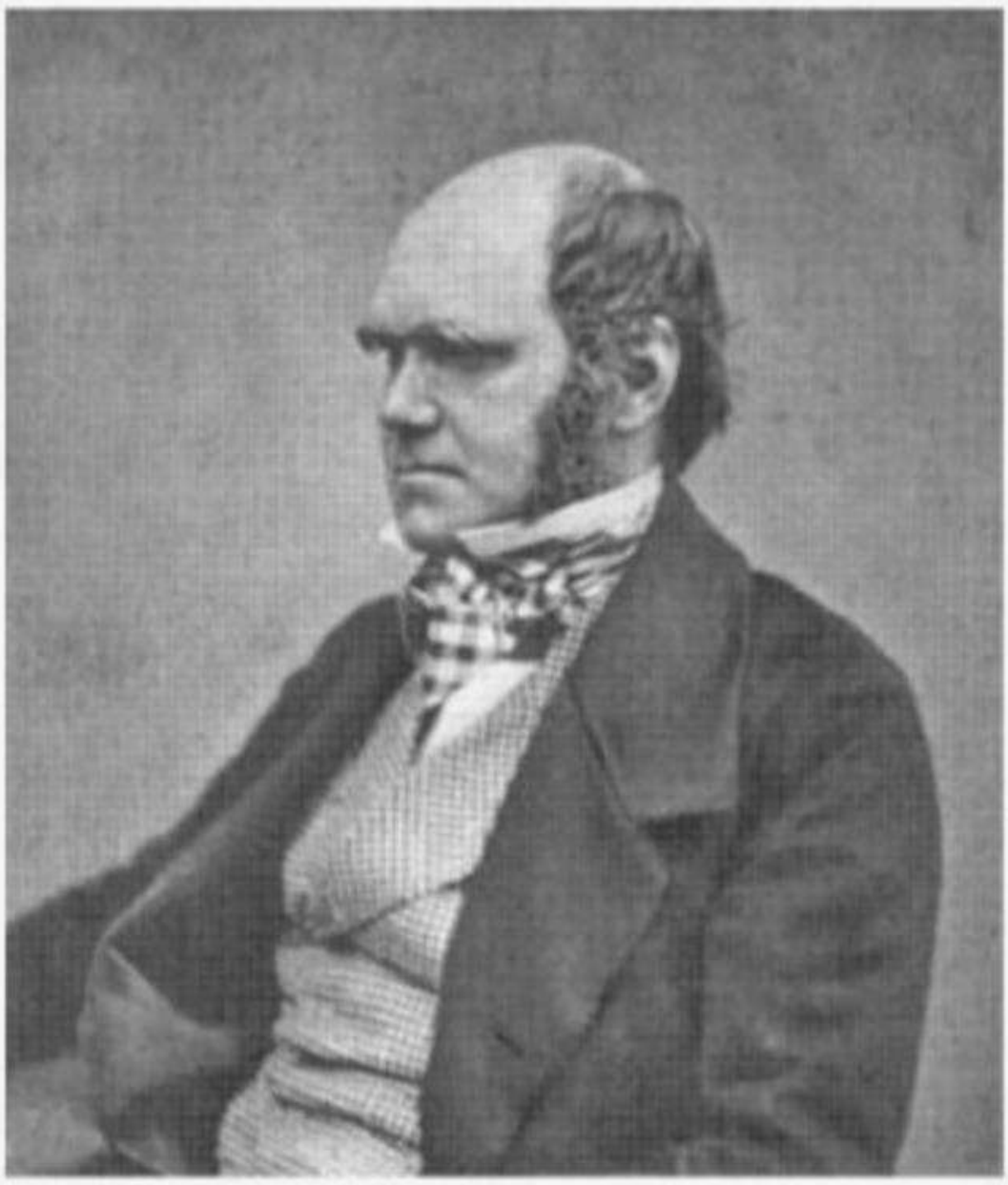
اما به نظر می‌رسد که چارلز داروین، حداقل در ابتدا، نظر مساعدی درباره لامارک داشت: "لامارک... حقایق روشن کمی در اختیار داشت، اما از جسارت بسیار و قدرت قضاوت عمیقی برخوردار بود و پیش‌بینی پیامدها به او موهبتی می‌بخشید که شاید بتوان آن را روح پیامبرگونه در علم نامید.

والاترین موهبت یک نابغه (۷)". برجسته داروین درعین‌حال اعتقاد داشت که افزون بر انتخاب طبیعی، توارث خصیصه‌های اکتسابی یکی از ساز و کارهای تکامل است (گرچه این باور نیز به عنوان بخشی از آنچه امروزه "داروینیزم[۲۳۶]" می‌نامیم دوام نیاورد).

نه لامارک و نه داروین نظریه مناسبی دراین‌باره نداشتند که وراثت چگونه می‌تواند رخ دهد. اما، در حالی که علم ژنتیک در سال‌های بعد از داروین بهتر فهمیده می‌شد، به نظر می‌رسید که توارث خصیصه‌های اکتسابی تقریبا به طور قطع غیرممکن باشد. در آغاز قرن بیستم، نظریه‌های لامارک در مورد زیست‌شناسی تکاملی دیگر جدی گرفته نمی‌شد، گرچه شماری از روان‌شناسان برجسته به این نظریه‌ها به عنوان توضیح برخی جنبه‌های ذهن، برای مثال غریزه، باور داشتند. برای مثال، زیگموند فروید این نظر را ابراز کرد که "اگر حیات غریزی حیوانات اساسا امکان هرگونه توضیحی را بدهد، آن توضیح تنها می‌تواند این باشد که حیوانات تجربه نوع خودشان را به هستی جدیدشان منتقل می‌کنند؛ یعنی، در ذهن‌شان خاطراتی را حفظ کرده‌اند که نیاکان‌شان تجربه (۸)". کرده‌اند تصور نمی‌کنم که پس از زمانه فروید چنین باورهایی در روانشناسی باقی مانده باشد.

سرچشمه‌های نظریه داروین

برای نوجوانان کم‌کوش در همه جای دنیا، چارلز داروین بی‌تردید الهام‌بخش است. داروین در دوران کودکی دانش‌آموزی میان‌مایه از خانواده‌ای بیش از اندازه موفق بود. (پدر اغلب مهربان او که از پزشکان موفق مقیم در روستا بود، در لحظه‌ای از سرخوردگی، به چارلز نوجوان پرخاش کرد که: "به جز تیراندازی و سگ و شکار خرگوش به فکر هیچ‌چیز نیستی، مایه خفت خودت و خانواده‌ات خواهی شد!"۹) شاید آن زمان چارلز داروین کم‌کوش بوده باشد، اما بعدها به معروف‌ترین و مهم‌ترین زیست‌شناس تمام دوران‌ها تبدیل شد.



چارلز داروین، ۱۸۸۲ - ۱۸۰۹.

این عکس در سال ۱۸۵۴، چند سال قبل از انتشار بنیاد انواع[۲۳۷] گرفته شده است.

در سال ۱۸۳۱ که می‌خواست درباره آینده‌اش تصمیم بگیرد - ظاهرا پزشک روستا یا کشیش روستا گزینه‌های او بودند _ شغلی دوگانه در کشتی مساحی اچ. ام. اس. بیگل[۲۳۸]، به عنوان "طبیعی‌دان" و همزمان به عنوان "مصاحب ناخدا در وقت غذا"، به او پیشنهاد شد. برای ناخدای کشتی که "نجیب‌زاده" و تا حدودی فرد تنهایی بود و ترجیح می‌داد به جای ملوان‌های بی‌سر و پا با یک نجیب‌زاده غذا بخورد، داروین فرد دلخواه بود.

داروین پنج سال از عمرش (۱۸۳۶-۱۸۳۱) را در کشتی بیگل، و بیشتر آن را در امریکای جنوبی گذراند و افزون بر وظایفش هنگام صرف غذا، به گردآوری گیاهان و حیوانات و فسیل‌ها

می‌پرداخت، و بسیار می‌خواند و می‌اندیشید و می‌نوشت.
خوشبختانه او نامه‌های بسیاری نوشت و دفترهای حجیمی مملو از مشاهدات و افکار و عقاید، و واکنش به کتاب‌هایی که می‌خواند، - و مطالبی از این قبیل ـ را داشت؛ ثبت مشروح افکارش را در تمام عمر ادامه داد. اگر داروین امروزه زنده بود، به طور قطع یک وبلاگ‌نویس وسواسی می‌شد.
در طی سفر دریایی بیگل و پس از آن، داروین از مطالعه کتاب‌ها و مقاله‌های مربوط به رشته‌های مختلف ایده‌های بسیاری گرفت. کتاب اصول زمین‌شناسی[۲۳۹] اثر چارلز لیل[۲۴۰]" او را متقاعد کرد که صورت‌های زمین‌شناختی (کوه‌ها، دره‌ها، شکل‌بندی صخره‌ها) ناشی از فرایندهای تدریجی فرسایش و باد و سیل‌های بیشمار و فوران‌های آتش‌نشانی و زمین‌لرزه‌ها است، و نه رویدادهای فاجعه‌باری مثل سیل انجیلی نوح. چنین نگرشی به تغییرات تدریجی - یعنی این که علت‌های کوچک، وقتی در درازمدت در نظر گرفته شوند، می‌توانند معلول‌های بسیار بزرگی داشته باشند ـ در میان بنیادگرایان آن دوره امر مطرودی بود، اما شواهد لیل برای داروین مجاب‌کننده بود، به‌خصوص که در جریان سفر دریایی‌اش نتایج انواع مختلف فرایندهای زمین‌شناختی را به چشم خود دیده بود.
جستار درباره اصل جمعیت[۲۴۱] اثر توماس مالتوس[۲۴۲] توجه داروین را به این واقعیت جلب کرد که رشد جمعیت منجر به رقابت بر سر غذا و سایر منابع می‌شود. مقاله مالتوس درباره رشد جمعیت انسانی بود، اما داروین برای توضیح تکامل تمامی اندام‌واره‌های زنده از طریق تداوم "تنازع بقا[۲۴۳]"" از ایده‌های آن بهره گرفت.
داروین مانیفست بازار آزاد آدام اسمیت، یعنی ثروت ملل[۲۴۴]" (۱۷۷۶)، را هم خواند. (۱۰) این کتاب او را در معرض مفهوم اسمیتی دست نامرئی در علم اقتصاد قرار داد، که بر اساس آن مجموعه‌ای از افراد، که برای نفع شخصی خود اقدام می‌کنند، حداکثر مزیت را برای کل جامعه به همراه می‌آورند.
داروین با توجه به مشاهدات‌اش در امریکای جنوبی و سایر نقاط، سخت تحت تأثیر انواع بسیار زیاد موجودات زنده و انطباق نمایان گونه‌های مختلف با محیط قرار گرفته بود. یکی از مشهورترین آنها سهره‌های[۲۴۵] جزایر گالاپاگوس[۲۴۶] در فاصله ۹۰۰ کیلومتری سواحل اکوادور است. داروین متوجه شد که گونه‌های مختلف این پرنده کوچک، گرچه از جهات دیگر به طور کامل شبیه به هم هستند، در اندازه و شکل نوک بسیار متفاوت‌اند. او سرانجام توانست نشان دهد که گونه‌های متفاوت سهره نیاکان مشترکی دارند که ظاهرا به تک‌تک جزایر گالاپاگوس مهاجرت کرده بودند. همچنین نشان داد که نوع نوک با منابع غذایی در دسترس هر یک از گونه‌ها انطباق یافته است که در تک‌تک جزایر متفاوت بودند.۱ داروین این فرضیه را مطرح کرد

که انزوای تحمیل شده در هر جزیره، همچنین شرایط محلی محیط، منجر به تکامل این گونه‌های بسیار متنوع از چند نیای معدود شده است.

می‌توانیم داروین را تصور کنیم که در طی سفر دریایی‌اش و همچنین پس از بازگشت به انگلستان، درحالی‌که این ایده‌ها در سرش چرخ می‌زد، می‌کوشید از داده‌هایی که گرد آورده بود سر دربیاورد. تغییر تدریجی در دوره‌های زمانی طولانی می‌تواند تأثیرات بزرگی به وجود بیاورد. رشد جمعیت همراه با منابع محدود، تنازع بقا را خلق می‌کند. مجموعه‌هایی از افراد که به شیوه‌های نفع‌پرستانه اقدام می‌کنند مزیتی عمومی خلق می‌کنند. به نظر می‌رسد که حیات تنوعی تقریبا بی‌نهایت را امکان‌پذیر می‌کند، و ویژگی‌های شاخص گونه‌ها ظاهرا برای همان محیطی طراحی شده‌اند که در آن زندگی می‌کنند. گونه‌ها از نیاکان مشترکی منشعب شده‌اند. در طول سالیان، همه این ایده‌ها به صورت نظریه‌ای منسجم در ذهن او کنار هم قرار گرفتند. با توجه به منابع غذایی محدود، هر اندام‌واره‌ای بیش از آن فرزند به دنیا می‌آورد که همه‌شان بتوانند ادامه حیات دهند. بچه‌ها نسخه اصل والدین نیستند، بلکه در خصیصه‌هایشان مقدار کمی تغییر تصادفی وجود دارد. آن خصیصه‌هایی که به برخی از بچه‌ها امکان می‌دهد ادامه حیات دهند و تولید مثل کنند به بچه‌های بعدی منتقل شده، و بدین‌ترتیب در میان جمعیت پراکنده می‌شوند. خیلی تدریجی، و از طریق تولید مثل همراه با تغییر تصادفی و تنازع بقای فردی، گونه‌های جدیدی شکل می‌گیرند که خصیصه‌هایشان به نحو مطلوبی با محیط انطباق یافته‌اند.

داروین این فرایند را تکامل از طریق انتخاب طبیعی نامید.

در سال‌هایی که نظریه‌های داروین دیگر شکل گرفته بود، او عقایدش را با گروه کوچکی در میان می‌گذاشت (چارلز لیل و برخی دیگر). توداری او تا حدی به دلیل تمایلش برای گردآوری داده‌های بیشتر برای تحکیم نتیجه‌گیری‌هایش بود، اما دلمشغولی او در این‌که نظریه‌هایش اشخاص دیندار را غمگین کند نیز در این توداری بی‌تأثیر نبود، بخصوص که همسرش زنی عمیقا دیندار بود. داروین که زمانی می‌خواست کشیش روستا شود، ناراحتی خود درباره نتیجه‌گیری اصلی‌اش را چنین ابراز کرد: "تا حدی متقاعد شده‌ام (کاملا برخلاف عقیده‌ای که در ابتدا داشتم) که گونه‌ها تغییرناپذیر نیستند (مثل این است که آدم به قتلی اعتراف کند(۱۱)."(۱۲) البته، دفترهای یادداشت آن زمان داروین درعین‌حال نشان می‌دهد که او به پیامدهای فلسفی نوشته‌هایش در مورد جایگاه انسان پی برده بوده است. او نوشته است، "افلاطون... در فابدون[۲۴۷] می‌گوید که "ایده‌های ضروری[۲۴۸] " از موجودیت پیشین[۲۴۹] روح سرچشمه می‌گیرند، و قابل استنتاج از تجربه نیستند -به جای موجودیت پیشین بخوانید میمون‌ها."(۱۳) رقابت نه فقط بخش عمده‌ای از تکامل است، بلکه درعین‌حال برانگیزنده مهمی در خود علم هم هست. وقتی داروین پی برد که رقبا به زودی از او پیشی می‌گیرند تردید

در مورد انتشار کتاب‌اش را به سرعت کنار گذارد. در سال ۱۸۵۹، دست‌نوشته طبیعیدان انگلیسی دیگری به نام آلفرد راسل والاس[۲۵۰]" به دست داروین رسید که عنوانش این بود: درباره گرایش گونه‌ها برای دور شدن نامحدود از گونه اصلی[۲۵۱] پی بردن به این‌که والاس به طور مستقل به ایده‌های بنیادین تکامل از طریق انتخاب طبیعی رسیده است، داروین را مشوش کرد. او ناراحتی‌اش را در نامه‌ای به لیل ابراز کرد: "تمامی اصالت کار من، هر ارزشی هم که داشته باشد نابود خواهد (۱۴)". شد البته، او سخاوتمندانه پیشنهاد کرد که حاضر است به انتشار اثر والاس کمک کند، اما به رغم دلمشغولی‌اش دراین‌باره که درخواست او "خفت‌آمیز و نابکارانه"(۱۵) است درخواست کرد که اثر خود او به طور همزمان منتشر شود.

لیل موافقت کرد که به منظور اجتناب از این معضل که کدام تقدم دارند، داروین و والاس باید نوشته‌هایشان را همزمان منتشر کنند. آثار هر دو آنها در تابستان سال ۱۸۵۸ در انجمن لینه‌ای‌ها[۲۵۲] خوانده شد. تا پایان سال ۱۸۵۹، داروین کتاب درباره بنیاد انواع را که بیش از چهارصد صفحه داشت منتشر کرده بود.

از قرار معلوم مسئله تقدم حل نشده باقی مانده بود. بدون این‌که داروین اطلاع داشته باشد، بیست و هشت سال قبل از انتشار بنیاد انواع، اسکاتلندی گمنامی به نام پاتریک ماتیو[۲۵۳] کتاب نامفهومی را منتشر کرده بود که عنوانش نیز به همان اندازه نامفهوم بود: درباره الوار دریایی و درختکاری[۲۵۴]. ماتیو در ضمیمه این کتاب مطلبی مطرح کرده بود که شباهت زیادی به ایده داروینی تکامل از طریق انتخاب طبیعی داشت. در سال ۱۸۶۰، ماتیو در نشریه ادواری وقایع‌نامه گاردینر[۲۵۵] مطلبی را درباره ایده‌های داروین خواند و نامه‌ای به ناشر نوشت و تقدم خود را تذکر داد. داروین که همیشه مشتاق بود اخلاقی عمل کند، با نامه‌ای از جانب خودش واکنش نشان داد: "با طیب‌خاطر اذعان می‌کنم که آقای ماتیو در مورد توضیحی که تحت عنوان انتخاب طبیعی درباره بنیاد انواع داده‌ام سال‌ها بر من تقدم داشته‌اند... هیچ کاری جز این نمی‌توانم بکنم که به دلیل بی‌اطلاعی کامل‌ام از اثر او عذرخواهی کنم."(۱۶)

پس عاقبت چه‌کسی بانی ایده تکامل از طریق انتخاب طبیعی بود؟ از قرار معلوم، این نمونه دیگری از ایده‌ای است که در زمان مناسب "در هوا موج می‌زند"، ایده‌ای که لاجرم به ذهن کسی خطور می‌کند. همکار داروین، تامس هاکسلی[۲۵۶] این واقعیت را دریافت و خود را ملامت کرد: "واقعا احمقانه است که به این فکر نیفتادم!"(۱۷)

چرا اعتبار این امر باید نصیب داروین شود؟ به چند دلیل: از جمله این واقعیت که در آن زمان او دانشمندی مشهورتر و مورد احترام‌تر از دیگران بود، اما مهمترین دلیل‌اش این است که کتاب داروین، برخلاف نوشته‌های والاس و ماتیو، دربرگیرنده مجموعه منسجم‌تری از ایده‌ها و حجم بالایی از شواهد در تأیید این ایده‌ها بود. داروین کسی بود که انتخاب طبیعی را از یک گمانه‌زنی

جالب توجه و باورپذیر به نظریه‌ای تبدیل کرد که شواهد چشمگیری آن را تأیید می‌کردند.

ایده‌های اصلی نظریه داروین را می‌توان به شرح زیر جمع‌بندی کرد:

تکامل رخ داده است؛ یعنی، تمامی انواع از یک نیای مشترک منشأ گرفته‌اند. تاریخ حیات درختی شاخه‌دار از انواع است.

انتخاب طبیعی وقتی رخ می‌دهد که میزان موالید بیشتر از منابعی باشد که برای تغذیه آنها موجود است و در نتیجه افراد درگیر رقابت بر سر منابع می‌شوند.

خصیصه‌های اندام‌واره‌ها همراه با تغییر به ارث می‌رسند. این تغییر به یک معنا تصادفی است - یعنی، هیچ نیرو یا سوگیری[۲۵۷] وجود ندارد که موجب گونه‌هایی شود که صلاحیت بیشتری دارند (گرچه همان‌طور که پیش از این مطرح کردم، خود داروین این نظر لامارک را پذیرفته بود که چنین نیروهایی وجود دارند) گونه‌هایی که در محیط موجود انطباق‌پذیر از کار درمی‌آیند، و احتمالا انتخاب می‌شوند، به این معنی که اندام‌واره‌هایی که این شکل از تغییر را پشت‌سر گذارده‌اند به احتمال بیشتری ادامه حیات می‌دهند. به این ترتیب این خصیصه‌های جدید را به بچه‌هایشان منتقل می‌کنند، که موجب می‌شود تعداد اندام‌واره‌هایی که این خصیصه‌ها را دارند در نسل‌های بعدی افزایش یابد.

تغییر تکاملی، از طریق انباشت تغییرات کوچک و مناسب، مداوم و تدریجی است.

طبق این نظر، نتیجه تکامل از طریق انتخاب طبیعی پیدایش "طراحی" است بدون آنکه یک طراح وجود داشته باشد. پیدایش طراحی ناشی از تصادف، انتخاب طبیعی، و دوره‌های طولانی زمان است. در نتیجه کاری که انتخاب طبیعی به انجام می‌رساند، آنتروپی کاهش می‌یابد (سیستم‌های زنده سازمان‌یافته‌تر می‌شوند، به ظاهر طراحی‌شده‌تر می‌شوند). انرژی لازم برای این کار ناشی از توانایی تک‌تک جانداران برای سوزاندن انرژی محیط است (برای مثال نور خورشید و غذا).

مندل و ساز و کار وراثت[۲۵۸]

موضوع مهمی که نظریه داروین آن را توضیح نداد این بود که خصیصه‌ها به طور دقیق چگونه از والدین به اولاد منتقل می‌شوند، و دگرگونی در این خصیصه‌ها -که انتخاب طبیعی بر روی آنها عمل می‌کند - چگونه رخ می‌دهد. کشف این‌که DNA حامل اطلاعات وراثتی است تا پیش از دهه ۱۹۴۰ صورت نگرفت. در قرن نوزدهم درباره وراثت نظریه‌های بسیاری مطرح شد، اما تا "کشف مجدد" نوشته گریگور مندل[۲۵۹]، هیچ کدام مورد پذیرش همگان قرار نگرفتند.



گریگور مندل، ۱۸۲۲-۱۸۸۴

مندل یک راهب و معلم فیزیک اتریشی بود که علاقه زیادی به امور طبیعی داشت. پس از مطالعه نظریه‌های لامارک درباره توارث خصیصه‌های اکتسابی، مندل هشت سال بر روی چند نسل از نخود سبز آزمایش‌هایی انجام داد تا صحت و سقم ادعاهای لامارک را بسنجد. نتایج کار او نه تنها گمانه‌زنی‌های لامارک را باطل کرد بلکه درعین‌حال پاره‌ای حقایق حیرت‌آور را درباره طبیعت وراثت آشکار کرد.

مندل چندین خصیصه مختلف گیاه نخود سبز را تحت بررسی قرار داد:

لطافت و رنگ دانه‌ها؛ شکل غلاف نخود سبز؛ رنگ غلاف و گل آن؛ جای گل‌ها در گیاه؛ و ارتفاع ساقه. هر یک از این خصیصه‌ها یا "ویژگی‌ها[۲۶۰]" می‌توانستند یکی از دو شکل متمایز را داشته باشند. برای مثال، رنگ غلاف می‌توانست سبز یا زرد باشد، ارتفاع ساقه می‌توانست بلند یا کوتاه باشد.

آزمایش‌های مندل که در مدت چند سال صورت گرفت، واقعیاتی را آشکار کرد که در این عصر علم مدرن ژنتیک هم کماکان تا حدودی معتبر است. اول، او پی برد که اولاد گیاه هیچ یک از خصیصه‌هایی را که والدین در مدت زندگی‌شان اکتساب کرده‌اند، به خود نمی‌گیرند. بدین ترتیب وراثت لامارکی امکان‌پذیر نبود.

دوم، او پی برد که وراثت از طریق "عامل‌های[۲۶۱]" ناپیوسته‌ای[۲۶۲] روی می‌دهد که والدین آنها را عرضه می‌کنند، برای هر خصیصه هر کدام از والدین یک عامل عرضه می‌کنند (برای مثال هر یک از والدین عاملی را برای ساقه بلند یا ساقه کوتاه عرضه می‌کنند.) این عامل‌ها تا حدودی با چیزهایی متناظرند که آنها را ژن می‌نامیم.

بدین ترتیب واسطه توارث، هر چه که بود، برخلاف تصور داروین و دیگران، ناپیوسته به نظر می‌رسید و نه پیوسته. (توجه داشته باشید که گیاه نخود سبز از طریق خودگرده‌افشانی[۲۶۳] یا دگر-گرده‌افشانی[۲۶۴] به سایر بوته‌های نخود سبز تکثیر می‌شود.)

مندل پی برد که در رابطه با هر خصیصه‌ای که تحت مطالعه قرار داده، هر گیاه یک جفت ژن دارد که بانی این خصیصه است. (برای ساده کردن مطلب، واژگان مدرن‌تری را به کار می‌گیرم، دانش‌واژه "ژن" در دوران مندل به کار نمی‌رفت.) هر یک از جفت ژن‌های موجود برای این خصیصه "ارزشی[۲۶۵]" را کدگذاری می‌کند - برای مثال بلند در مقابل کوتاه. این ارزش آلل[۲۶۶] نامیده می‌شود. در مورد ارتفاع ساقه، در مقابل یک جفت آلل که این دو ژن کدگذاری می‌کنند سه امکان وجود دارد: هر دو آلل یکسان هستند (بلند / بلند یا کوتاه / کوتاه) یا متفاوت‌اند (بلند / کوتاه، که معادل کوتاه / بلند است.)

افزون بر این، مندل پی برد که در مورد هر خصیصه، یک آلل غالب[۲۶۷]" (برای مثال در مورد ارتفاع ساقه، بلند غالب است) و دیگری مغلوب است (برای مثال، در مورد ارتفاع ساقه، کوتاهی مغلوب[۲۶۸] است) یک فرد بلند / بلند همیشه بلند است. یک فرد بلند / کوتاه نیز بلند خواهد بود چون بلند غالب است؛ تنها یک نسخه از آلل غالب کافی است. تنها یک فرد کوتاه / کوتاه _ با دو نسخه از آلل مغلوب - کوتاه خواهد بود.

برای مثال، تصور کنید دو فرد بلند / کوتاه را در اختیار دارید که دگر-گرده‌افشانی می‌کنند. هر دو والدین بلند هستند، اما احتمال این که هر دو ژن کوتاه را به بچه منتقل کنند، که آن را کوتاه / کوتاه می‌کند، ۲۵% است.

مندل از این روش استدلال و قوانین احتمالات استفاده کرد و توانست با موفقیت زیاد پیش‌بینی کند که چه تعداد از گیاهان هر نسل به ترتیب نسخه غالب یا مغلوب یک خصیصه مفروض را به نمایش می‌گذارند. آزمایش‌های مندل با مفهوم "وراثت آمیخته[۲۶۹]" که مورد پذیرش همگان بود در تضاد قرار داشت این‌که خصیصه‌های اولاد به طور معمول میانگین خصیصه‌های والدین است.

اثر مندل اولین موردی بود که نتایج وراثت را توضیح می‌داد و آن را به طور کمی پیش‌بینی می‌کرد، گرچه مندل نمی‌دانست که "عامل‌های" او از چه ساخته شده‌اند یا چگونه در اثر جفت‌گیری باز ترکیب می‌شوند. متأسفانه مقاله سال ۱۸۶۵ او "آزمایش‌هایی بر روی پیوند گیاهان[۲۷۰]" در مجله نسبتا ناشناخته‌ای به چاپ رسید و تا سال ۱۹۰۰ اهمیت فوق‌العاده آن ناشناخته ماند، در این فاصله چند دانشمند دیگر در جریان آزمایش‌هایشان به نتایج مشابهی رسیدند.

ترکیب[۲۷۱] مدرن

شاید تصور کنید که انتشار نتیجه‌گیری‌های مندل، به این دلیل که ساز و کاری آزمایش شده برای وراثت فراهم می‌کرد، موجب تقویت اندیشه‌های داروینی شده بود. اما به مدت چند دهه، تصور بر این بود که ایده‌های مندل در تضاد با ایده‌های داروین است. نظریه داروین بر این تأکید می‌کرد که تکامل، و در نتیجه دگرگونی، پیوسته است (یعنی اندام‌واره‌ها می‌توانند به اشکالی جزئی و دلخواه متفاوت باشند) و نظریه مندل مطرح می‌کرد که آن دگرگونی ناپیوسته است (یک گیاه نخود سبز یا بلند است یا کوتاه، و در میانه آنها جایی ندارد). بسیاری از پیروان اولیه نظریه‌های مندل به نظریه جهش[۲۷۲] باور داشتند - این نظریه که دگرگونی در جانداران پیامد جهش‌های زیستی، احتمالا جهش‌های بزرگ، در اولاد است که خود آنها تکامل را به جلو می‌رانند، و انتخاب طبیعی فقط ساز و کاری ثانوی برای حفظ (یا حذف) این‌گونه جهش‌ها در میان جمعیت است. داروین و پیروان اولیه او به طور کامل با این عقیده مخالف بودند؛ سنگ‌بنای نظریه داروین این بود که تغییرات فردی باید خیلی کوچک باشد، انتخاب طبیعی بر مبنای تغییرات خرد چیزی است که تکامل را به جلو می‌راند، و تکامل تدریجی است.

"Natura non Facit Saltum" (طبیعت جهش نمی‌کند) گفته مشهور داروین در رد نظریه جهش زیستی بود.

پس از مناقشه‌های داغی که بین داروینی‌ها و مندلی‌های اولیه صورت گرفت، وقتی تا پایان دهه ۱۹۲۰ روشن شد که برخلاف خصیصه‌های گیاه نخودسبز مندل، اکثر خصیصه‌های جانداران را ژن‌های متعددی معین می‌کنند، که هر کدام چندین آلل دارند، این تقابل بی‌پایه برطرف شد. تعداد بیشمار ترکیب‌های ممکن این آلل‌های متعدد و متنوع می‌تواند منجر به دگرگونی به

ظاهر پیوسته‌ای در یک جاندار شود. دگرگونی ناپیوسته در ژن‌های یک جاندار می‌تواند منجر به دگرگونی ظاهرا پیوسته‌ای در رخ‌مون[۲۷۳] جاندار شود - یعنی خصیصه‌های فیزیکی (برای مثال، قد، رنگ پوست، و غیره) که ناشی از این ژن‌ها هستند. سرانجام روشن شد که عقاید داروین و مندل مکمل هستند و نه متضاد.

یکی از دلایل این‌که داروینی‌ها و مندلی‌های اولیه این‌قدر شدید مخالف هم بودند این است که گرچه هر دو گروه از شواهدی تجربی برخوردار بودند که موضع‌شان را تأیید می‌کرد، هیچ یک از دو گروه چارچوب مفهومی (یعنی چندین ژن که خصیصه‌ها را کنترل می‌کند) یا ابزارهای ریاضی مناسبی برای درک این را نداشتند که نظریه‌هایشان با هم سازگار است. برای تحلیل نتایج وراثت مندلی در شرایطی که ژن‌های هم‌کنش بسیاری وجود دارند که در جریان انتخاب طبیعی فعال هستند، به مجموعه کاملا جدیدی از ابزارهای ریاضی نیاز بود. این ابزارها در دهه‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ فراهم شد و به طور عمده نتیجه پژوهش زیست-ریاضیدان رونالد فیشر[۲۷۴] بود.

فیشر، به همراه فرانسیس گالتون[۲۷۵]"، از جمله بنیان‌گذاران علم آمار مدرن بودند. او در اساس از مسائل دنیای واقعی در کشاورزی و پرورش حیوانات الهام گرفت. پژوهش فیشر، همراه با جی. بی. اس. هالدین[۲۷۶]" و سوال رایت[۲۷۷]، نشان داد که نظریه‌های داروین درواقع با نظریه‌های مندل سازگارند. افزون بر این، مجموع پژوهش‌های فیشر و هالدین و رایت چارچوبی ریاضی - علم نتیک جمعیتی - را برای فهم دینامیک آلل‌ها در میان یک جمعیت در حال تکامل فراهم کردند که در جریان وراثت مندلی و انتخاب طبیعی قرار دارد. این وحدت عقاید داروین و مندل، همراه با چارچوب علم ژنتیک جمعیتی، بعدها به "ترکیب مدرن" معروف شد. (۱۸) فیشر و رایت و هالدین بنیان‌گذاران "ترکیب مدرن" شناخته می‌شوند.

اختلافات جدی بسیاری در میان این سه نفر وجود داشت، به‌خصوص مناقشه‌ای شدید بین فیشر و رایت بر سر نقش نسبی انتخاب طبیعی و "انحراف تصادفی ژنتیک[۲۷۸]. در این فرایند آخر آلل‌های معینی، صرفا به صورت رویدادی تصادفی، در میان جمعیت غالب می‌شوند. برای مثال، فرض کنید که در میان جمعیتی از گیاه نخود سبز، نه آلل‌های کوتاه و نه بلند واقعا بر جمعیت به عنوان یک کل تأثیر نگذارند. همچنین تصور کنید که در نقطه‌ای از زمان آلل کوتاه، صرفا برحسب تصادف در میان تعداد بیشتری از گیاهان و بیش از آلل بلند پدیدار شود. در نتیجه، اگر هر گیاه کوتاه یا بلند تعداد یکسانی اولاد داشته باشند، در نسل بعد احتمالا گیاه کوتاه بیشتر خواهد بود، صرفا به این دلیل که گیاهان والد بیشتری آلل کوتاه داشته‌اند.

به‌طورکلی، اگر هیچ یک از خصیصه‌ها مزیت انتخابی نداشته باشند، یکی از آنها در ۱۰۰%افراد جمعیت دیده خواهد شد. در مقایسه با جمعیت‌های بزرگ، در جمعیت‌های کوچک انحراف

قوی‌تر است، به این دلیل که در جمعیت‌های بزرگ، نوسان‌های[۲۷۹] کوچکی که سرانجام به انحراف منجر می‌شوند گرایش به این دارند که همدیگر را خنثی کنند.

رایت معتقد بود که انحراف ژنتیک تصادفی نقش مهمی در تغییر تکاملی و پیدایش انواع جدید دارد، در صورتی که از نظر فیشر، انحراف در بهترین شرایط نقش ناچیزی دارد.

هر دو این گمانه‌زنی‌ها معقول و جالب هستند. می‌شود تصور کرد که فیشر و رایت مباحثات داغ اما دوستانه‌ای در هنگام صرف آبجو داشته‌اند (یعنی وقتی فیشر بریتانیایی، و رایت امریکایی در یک قاره حضور داشتند).

اما آنچه به صورت تبادل نظری سودمند و الهام‌بخش بین آنها شروع شد، سرانجام به مقاله‌هایی از جانب فیشر و رایت منجر گردید که دیگری را می‌رنجاند، تا جایی که ارتباط آنها تا سال ۱۹۳۴ قطع شده بود. این مباحثه بر سر نقش نسبی انتخاب طبیعی در تقابل با انحراف به همان شدت مباحثه بین مندلی‌ها و داروینی‌ها بود - طنز ماجرا در این است، که این آثار فیشر و رایت بود که نشان داد طرفین درواقع لازم نبود که با هم مخالف باشند.

در دهه‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ ترکیب مدرن انسجام بیشتری یافت و به صورت مجموعه‌ای از اصول تکامل تحکیم شد که به مدت پنجاه سال مورد پذیرش اکثریت قریب به اتفاق زیست‌شناسان بود:

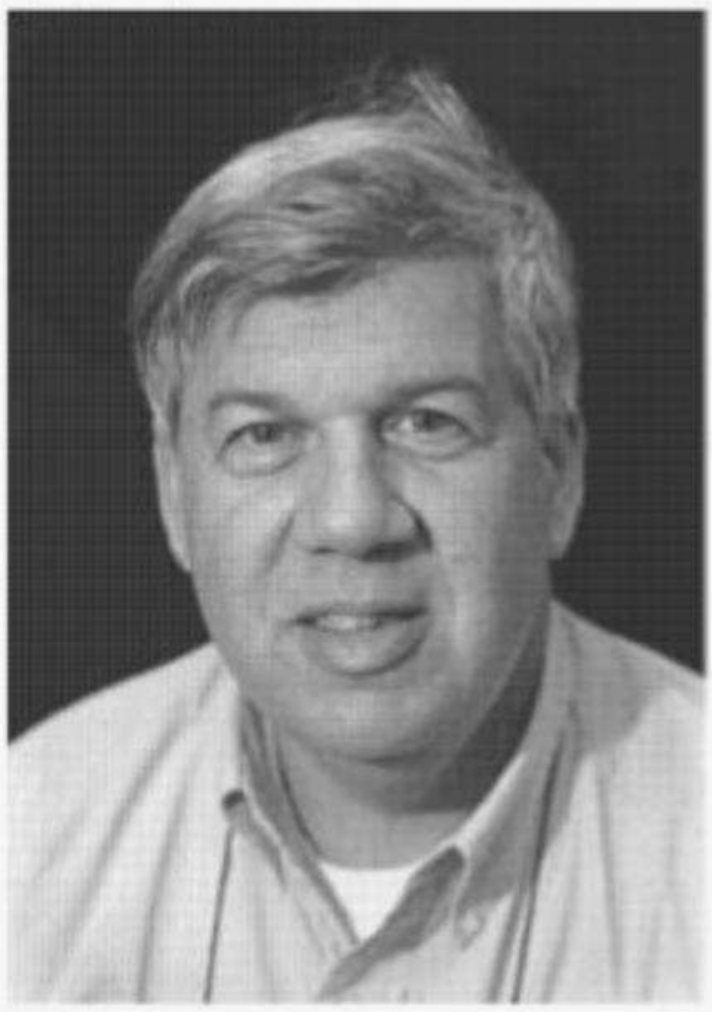
@degar_goonesh

انتخاب طبیعی ساز و کار اصلی تغییر تکاملی و انطباق است.

تکامل فرایندی تدریجی است که از طریق انتخاب طبیعی در تغییرات کوچک تصادفی در افراد رخ می‌دهد. تغییراتی این چنین در جمعیت بسیار فراوان است و به هیچ جهتی سوگیری ندارد. (یعنی ذاتا منجر به "بهبود" نمی‌شود - امری که لامارک به آن معتقد بود). عامل دگرگونی فردی جهش و ترکیب مجدد[۲۸۰] تصادفی ژنتیک است.

پدیده‌های کلان مقیاس[۲۸۱]، از جمله منشأ انواع جدید را می‌توان با فرایند ذره‌بینی تغییر ژن و انتخاب طبیعی توضیح داد.

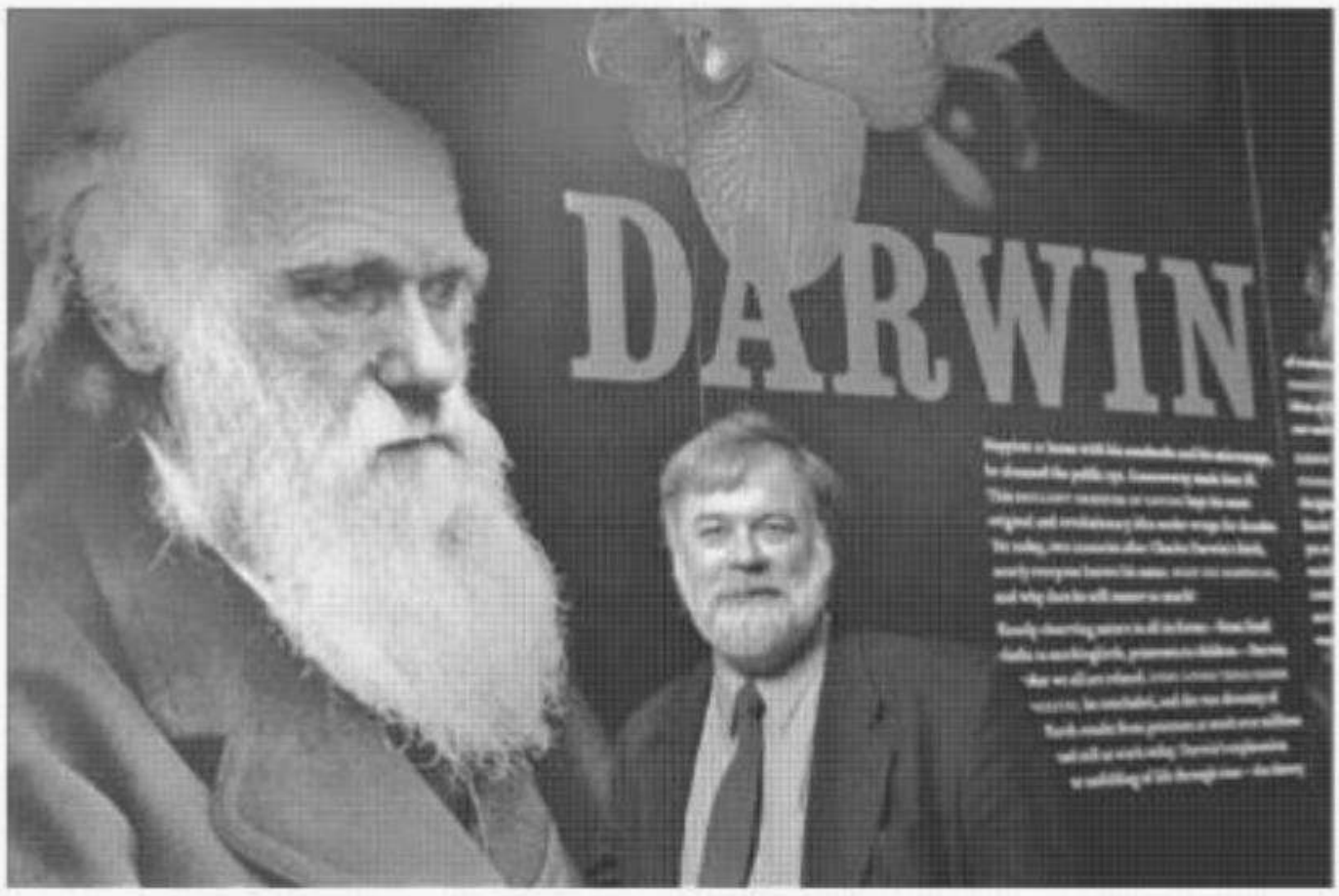
معماران اصلی ترکیب مدرن باور داشتند که مسائل عمده در توضیح تکامل را حل کرده‌اند، گرچه هنوز از بنیان مولکولی ژن‌ها یا ساز و کار شکل‌گیری تغییرات مطلع نبودند. همان‌طور که یان تاترسال[۲۸۲]" تکامل‌گرا شرح می‌دهد: "امکان ندارد که بعد از این کسی فرایند تکامل را نظاره کند بی‌آنکه کاملا آگاهانه بر سنگ بنای ترکیب تکیه نکند. و این بنا نه تنها از ظرافت و قدرت اقناع بی‌نظیری برخوردار بود، بلکه درعین‌حال فعالان تمامی شاخه‌های زیست‌شناسی اندام‌واره‌ای[۲۸۳] را کنار هم گرد آورد، و به چند دهه مناقشه و عدم درک متقابل و اتلاف انرژی پایان داد."(۱۹) چالش‌هایی در مقابل ترکیب مدرن در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، اعتبار ترکیب مدرن با چالش‌های جدی روبرو شد. شاید مهم‌ترین چالش‌گران دیرین‌شناسانی[۲۸۴] چون استفن جی.گولد[۲۸۵]" و نایلز الدرج[۲۸۶]" بودند، که به پاره‌ای تفاوت‌ها بین آنچه ترکیب مدرن پیش‌بینی می‌کرد و آنچه سوابق فسیل‌های واقعی نشان می‌دادند اشاره کردند. گولد به طور همزمان به مشهورترین مدافع و مبلغ تکامل داروینی (از طریق کتاب‌ها و مقاله‌هایی که برای غیر دانشمندان نوشت) و جنجالی‌ترین منتقد اندیشه‌های ترکیب مدرن تبدیل شد.



استفن جی. گولد(۱۹۴۱-۲۰۰۲)

یک تفاوت مهم، پیش‌بینی ترکیب مدرن در مورد تغییر تدریجی در ریخت‌شناسی اندام‌واره‌ها بود که گولد، الدرج، و سایرین مدعی بودند الگوی واقعی سوابق فسیل‌هاست: دوره‌های طولانی بدون تغییر در ریخت اندام‌واره‌ها (بدون ظهور گونه‌های جدید) که با دوره‌های نسبتا کوتاه تغییرات ریختی بزرگ قطع شده‌اند[۲۸۷] که به ظهور گونه‌های جدید انجامیده است. به این الگو عنوان تعادل منقطع[۲۸۸] داده شد. کسان دیگر از ترکیب مدرن دفاع می‌کردند و تأکید داشتند که سوابق فسیل‌ها آن‌چنان کامل نیست که دانشمندان چنین استنتاج‌هایی به عمل آورند. (برخی از خرده‌گیران به تعادل منقطع، به این نظریه عنوان طنزآمیز "تکامل از طریق پرش" دادند.

گولد در مقابل گفت که طرفداران تدریجی‌گرایی[۲۸۹] از "تکامل از طریق خزش" حمایت می‌کنند). تعادل منقطع در آن آزمایشگاه‌های تجربی که تکامل را به آزمون می‌گذارند و در شبیه‌سازی‌های کامپیوتری ساده تکامل به طور گسترده‌ای مشاهده شده است.



نایلز الدرج

بدین ترتیب گولد و همکاران وی بر این امر پافشاری می‌کردند که بنیان "تدریجی‌گرایی" ترکیب مدرن نادرست است. درعین‌حال معتقد بودند که دو بنیان دیگر - برتری انتخاب طبیعی و تغییرات کوچک مربوط به ژن برای توضیح تاریخ حیات - از شواهد لازم برخوردار نیستند.

گرچه گولد می‌پذیرفت که انتخاب طبیعی ساز و کار مهمی برای تغییر تکاملی است، بر این امر پافشاری می‌کرد که نقش تصادف تاریخی[۲۹۰] و محدودیت‌های زیست‌شناختی، حداقل، به اندازه انتخاب طبیعی اهمیت دارد.

تصادف تاریخی اشاره دارد به تمامی رویدادهای تصادفی کوچک و بزرگ، که در شکل‌گیری اندام‌واره‌ها مداخله داشته‌اند. یک مثال آن تأثیر شهاب‌سنگ‌های بزرگی است که زیستگاه‌هایی را نابود می‌کردند و موجب انقراض گروه‌هایی از موجودات زنده می‌شدند، و بدین ترتیب ظهور انواع دیگری از موجودات را امکان‌پذیر می‌کردند. مثال‌های دیگر پدیده‌های غیرمنتظره و ناشناخته روزگار است که به پستانداران گوشت‌خوار نسبت به پرندگان گوشت‌خواری که زمانی از نظر تعداد رقیب آنها اما در حال انقراض بودند، مزیتی می‌بخشیدند.

استعاره‌ای که گولد در مورد نقش تصادف تاریخی به کار برد "نوار حیات[۲۹۱]" خیالی است - شکلی از فیلم سپری شدن زمان که تمامی تکامل از آغاز حیات بر روی زمین را به نمایش می‌گذارد. گولد می‌پرسد که اگر نوار را با شرایط اولیه کمی متفاوتی دوباره به حرکت می‌انداختیم چه وضعیت پیش می‌آمد؟ آیا چیزی شبیه به آن اندام‌واره‌ها را می‌دیدیم که در اولین چرخش نوار تکامل یافتند؟ پاسخ ترکیب مدرن احتمالا "آری" بود - انتخاب طبیعی بار دیگر اندام‌واره‌ها را به نحوی شکل می‌داد که به طور مناسبی با محیط انطباق یابند، و در نتیجه

تا حدود زیادی همان شکل امروز را داشته باشند.
پاسخ گولد این است که نقشی که تصادف تاریخی بازی می‌کند، نوار تکرار شده را خیلی متفاوت می‌کرد.
محدودیت‌های زیست‌شناختی اشاره دارند به تنگناهایی که محصول انتخاب طبیعی است. روشن است که انتخاب طبیعی نمی‌تواند قوانین فیزیک را زیر پا بگذارد و مثلا به پیدایش موجود پرنده‌ای بینجامد که از قوانین جاذبه تبعیت نمی‌کند یا حیوانی پیوسته متحرک که به غذا نیاز ندارد.
گولد و بسیاری دیگر از دانشمندان استدلال کرده‌اند که نوع اندام‌واره‌هایی که می‌توانند تکامل پیدا کنند، هم مقید به محدودیت‌های زیستی و هم به محدودیت‌های فیزیکی موجود است.
این دیدگاه به طور طبیعی به این نتیجه می‌انجامد که تمامی خصیصه‌های اندام‌واره‌ها از طریق "انطباق" قابل توضیح نیستند.

خصیصه‌هایی به مانند رانش[۲۹۲] گرسنگی و جنسی ما را به بقا و تولیدمثل هدایت می‌کنند. اما پاره‌ای از خصیصه‌ها ممکن است از سر تصادف، یا همچون تأثیرات جانبی خصیصه‌های انطباق‌پذیر و محدودیت‌های مربوط به رشد به وجود آمده باشند. گولد منتقد جدی تکامل‌گرایانی است که آنها را "انطباق‌گرایان[۲۹۳] متعصب" می‌نامد - کسانی که اصرار دارند انتخاب طبیعی تنها توضیح ممکن در مورد سازمان پیچیده زیست است.
افزون بر این، گولد و همکاران او با مطرح کردن این‌که برخی از پدیده‌های کلان مقیاس تکامل را نمی‌توان برحسب فرایند ذره‌بینی تغییر ژن و انتخاب طبیعی توضیح داد، بلکه توضیح این‌گونه پدیده‌ها مستلزم در نظر گرفتن تأثیر انتخاب طبیعی در سطوحی بالاتر از ژن‌ها و افراد - شاید تمامی انواع - است، به سومین بنیان ترکیب مدرن حمله می‌کردند.
پاره‌ای از شواهد که به تردیدهای گولد در مورد ترکیب مدرن دامن می‌زد، از پژوهش در تکامل مولکولی نشأت می‌گرفت. در دهه ۱۹۶۰، موتو کیمورا[۲۹۴]" نظریه "تکامل خنثی"[۲۹۵]" را مطرح کرد که مبتنی بر مشاهدات مربوط به تکامل پروتئینی بود، و نقش محوری انتخاب طبیعی در تغییر تکاملی را به زیر سؤال می‌برد.۲۰ در دهه ۱۹۷۰، شیمیدان‌ها مانفرد آیگن[۲۹۶] و پیتر شوستر[۲۹۷]، در تکامل ویروس‌هایی که با RNA ساخته شده‌اند رفتاری مشابه تعادل منقطع مشاهده کردند و برای توضیح آن نظریه‌ای تدوین کردند که بر مبنای آن واحد تکامل نه یک ویروس واحد بلکه مجموعه‌ای از ویروس‌ها بود _ یک شبه گونه[۲۹۸]" - که شامل نسخه‌های جهش‌یافته یک ویروس اصلی بود. (۲۱) این‌گونه چالش‌ها در قبال ترکیب مدرن به هیچ وجه مورد پذیرش تمامی تکامل‌گرایان نبود، و مانند روزهای اول داروینیسم، مناقشه در میان دیدگاه‌های رقیب اغلب کینه‌توزانه بود. در سال ۱۹۸۰، گولد نوشت که "نظریه ترکیبی[۲۹۹] به

رغم سخت‌جانی‌اش در کتاب‌های درسی عملا مرده است." نایلز الدرج و یان تاترسال از این هم فراتر رفتند و ادعا کردند که دیدگاه تکاملی ناشی از ترکیب مدرن "یکی از بزرگترین افسانه‌پردازی‌های زیست‌شناسی قرن بیستم (۲۳)". است از طرف دیگر، زیست‌شناسان تکاملی مشهوری همچون ارنست میر[۳۰۰] و ریچارد داوکینز[۳۰۱] با قدرت تمام از بنیان‌های ترکیب مدرن دفاع می‌کردند. میر نوشت: "من این نظر را دارم که هیچ مشکلی در دستاوردهای ترکیب تکاملی وجود ندارد و نیازی به جایگزین کردن آن نیست." داوکینز نوشت: "نظریه تکامل از طریق انتخاب طبیعی انباشتی[۳۰۲] تنها نظریه‌ای است که در اختیار داریم و در اصل قادر است وجود پیچیدگی سامان یافته را توضیح (۲۵)". دهد بسیاری هنوز این دیدگاه را دارند، اما همان‌طور که در فصل هجدهم توضیح خواهم داد، این نظر که تغییر تدریجی از طریق انتخاب طبیعی، اگر تنها نیرو نباشد، نیروی اصلی شکل دادن به حیات است، هرچه بیشتر و بیشتر مورد تردید قرار می‌گیرد، به‌خصوص در شرایطی که فناوری‌های جدید برای علم ژنتیک این فرصت را فراهم کرده که به کمک کشف‌های نامنتظر رشدی فراگیر داشته باشد، و عمیقا نحوه تفکر مردم درباره تکامل را تغییر دهد.

باید اضافه کرد که گرچه گولد و الدرج و دیگران بنیان‌های ترکیب مدرن را به چالش گرفته‌اند، آنها هم به مانند تقریبا تمامی زیست‌شناسان کماکان نظریات اصلی داروینی را مورد تأیید قرار می‌دهند: این‌که تکامل در جریان چهار میلیارد سال تاریخ حیات رخ داده است و کماکان رخ می‌دهد؛ این‌که تمامی انواع موجودات مدرن از یک نیای واحد منشأ گرفته‌اند؛ این‌که انتخاب طبیعی نقش مهمی در تکامل بازی کرده است؛ و این‌که هیچ نیروی "هوشمندی" تکامل یا طراحی جانداران را هدایت نمی‌کند.

فصل ششم: علم ژنتیک به زبان ساده

یافته‌های زیست‌شناسی مولکولی در چند دهه اخیر به تردید در مورد ترکیب مدرن دامن زده، و دیدگاه اکثر زیست‌شناسان در مورد نحوه وقوع تکامل را تغییر داده است.

در فصل هجدهم، برخی از این یافته‌ها و تأثیر آنها بر علم ژنتیک و نظریه تکامل را توضیح خواهم داد. برای آنکه در مورد این‌گونه مباحث مطرح شده در سراسر کتاب زمینه‌ای فراهم کنم، در اینجا توضیح مختصری درباره مبانی علم ژنتیک را می‌آورم، اگر با این موضوع آشنا هستید، می‌توانید این فصل را نادیده بگیرید.

از اوایل قرن نوزدهم روشن شده بود که تمامی جانداران از سلول‌های ریزی تشکیل شده‌اند. در اواخر قرن نوزدهم کشف شد که هسته هر سلول شامل مولکول‌های بزرگ و کشیده‌ای است که کروموزوم یا "جسم رنگین" نامیده شدند چون در جریان آزمایش به آسانی رنگ می‌شدند، البته کارکرد آنها نامشخص باقی مانده بود. این هم کشف شد که یک سلول واحد با تقسیم به دو سلول همانند خود را بازتولید می‌کند، و در جریان این فرایند (به نام میتوز[۳۰۳])، کروموزوم‌ها نسخه‌ای از خودشان را ایجاد می‌کنند. بسیاری از سلول‌های بدن ما در هر چند ساعت یک میتوز را پشت‌سر می‌گذارند ـ این یک فرایند پیوسته رشد و بازسازی و نگهداری عمومی بدن است.

میوز[۳۰۴]، که در همان زمان کشف شد، فرایندی در جانداران دیپلوییید[۳۰۵] است که در جریان آن تخمک و اسپرم تولید می‌شوند. اندام‌واره‌های دیپلوییید، از جمله پستانداران و بسیاری دیگر از رده‌های اندام‌واره‌ها آنهایی هستند که کروموزوم‌های تمامی سلول‌هایشان (به استثنای اسپرم و تخمک، یا سلول‌های زایشی[۳۰۶]") به صورت جفت وجود دارند (بیست و سه جفت در انسان). در جریان میوز، یک سلول دیپلوییید تبدیل به چهار سلول تخم می‌شود، که تعداد کروموزوم‌های هر یک از آنها نصف سلول اصلی است. هر جفت کروموزوم در سلول اصلی به دو قسمت تقسیم می‌شود، که باز ترکیب می‌شوند تا کروموزوم‌هایی را برای سلول‌های جدید زایشی شکل دهند. در مدت لقاح[۳۰۷]، کروموزوم‌های موجود در سلول‌های دوتخمی با هم جوش می‌خورند تا تعداد مناسبی جفت کروموزومی به وجود آورند.

نتیجه این است که ژن‌های کروموزوم فرزند نسخه‌ای به هم آمیخته از کروموزوم‌های والدین است. این یک عامل عمده دگرگونی در اندام‌واره‌هایی است که تولیدمثل جنسی دارند. در جاندارانی که تولیدمثل جنسی ندارند فرزند خیلی شبیه والدین است.

همه اینها بسیار پیچیده هستند، به همین جهت تعجبی ندارد که زیست‌شناسان وقت زیادی صرف شناخت طرز کار آنها کردند. اما این تنها آغاز کار بود.

اولین اشاره به این که کروموزوم‌ها حاملان وراثت هستند، توسط والتر ساتون[۳۰۸] در سال ۱۹۰۲

صورت گرفت - یعنی دو سال بعد از این‌که اثر مندل مورد توجه همگان قرار گرفته بود. ساتون این نظریه را مطرح کرد که کروموزوم‌ها متشکل از واحدهایی (ژن) متناظر با عامل‌های مندل هستند، و نشان داد که میوز ساز و کاری را برای وارثت مندلی فراهم می‌کند. چند سال بعد تامس هانت مورگان[۳۰۹] از طریق آزمایش بر روی قهرمان علم ژنتیک، مگس میوه، فرضیه ساتون را تأیید کرد. اما شکل‌بندی مولکولی ژن‌ها، و این‌که چگونه خصیصه‌های فیزیکی اندام‌واره‌ها را می‌سازند، کماکان ناشناخته ماند.

تا اواخر دهه ۱۹۲۰، شیمیدان‌ها هم ریبونوکلئیک اسید[۳۱۰] (RNA) و هم دیوکسی‌ریبونوکلئیک اسید[۳۱۱] (DNA) را کشف کرده بودند، اما در سال‌های بعد از آن ارتباط بین ژن‌ها ناشناخته ماند. روشن شد که کروموزوم‌ها شامل DNA هستند، و برخی گمان می‌کردند که این DNA احتمالا شالوده ژن‌هاست. دیگران تصور می‌کردند که این شالوده همان پروتئین‌هایی است که در هسته سلول دیده می‌شود. البته روشن شد که پاسخ درست DNA است، و این امر سرانجام در میانه دهه ۱۹۴۰ از طریق آزمایش مشخص شد.

اما چند پرسش اساسی به جای ماند. DNA اندام‌واره با چه مقیاسی از دقت موجب می‌شود که اندام‌واره خصیصه‌های مشخصی از قبیل بلند یا کوتاه را داشته باشد؟ DNA چگونه یک نسخه تقریبا دقیق از خود را در مدت تقسیم سلولی (میتوز) به وجود می‌آورد؟ و این دگرگونی، که انتخاب طبیعی بر روی آن عمل می‌کند، چگونه در سطح DNA به وقوع می‌پیوندد؟

در طی ده سال بعد، به این پرسش‌ها، حداقل تا حدودی، پاسخ داده شد.

بزرگ‌ترین تحول وقتی صورت گرفت، که در سال ۱۹۵۳، جیمز واتسون[۳۱۲]" و فرانسیس کریک[۳۱۳]" پی بردند که ساختار DNA یک مارپیچ دوتایی[۳۱۴] است. در اوایل دهه ۱۹۶۰، پژوهش مشترک چند دانشمند به گشودن کد زنتیک[۳۱۵] انجامید - چگونه بخش‌هایی از DNA آمینواسیدهایی را که پروتئین می‌سازند کدگذاری می‌کنند. این امکان فراهم آمد که ژن - مفهومی که از زمان مندل وجود داشته بدون این‌که شالوده مولکولی آن شناخته شده باشد به عنوان زیررشته‌ای[۳۱۶] از DNA تعریف شود که پروتئین خاصی را کدگذاری می‌کند. در فاصله کوتاهی روشن شد که سلول چگونه کد را به پروتئین ترجمه می‌کند، چگونه DNA نسخه‌ای از خود را می‌سازد، و چگونه دگرگونی از طریق خطاهای نسخه‌برداری رخ می‌دهد، که در بیرون موجب جهش، و نوترکیبی[۳۱۷] جنسی می‌شود. این امر به وضوح یک "نقطه عطف" در تحقیقات ژنتیک بود. علم ژنتیک روی شانس بود، و این شانس هنوز ادامه دارد.

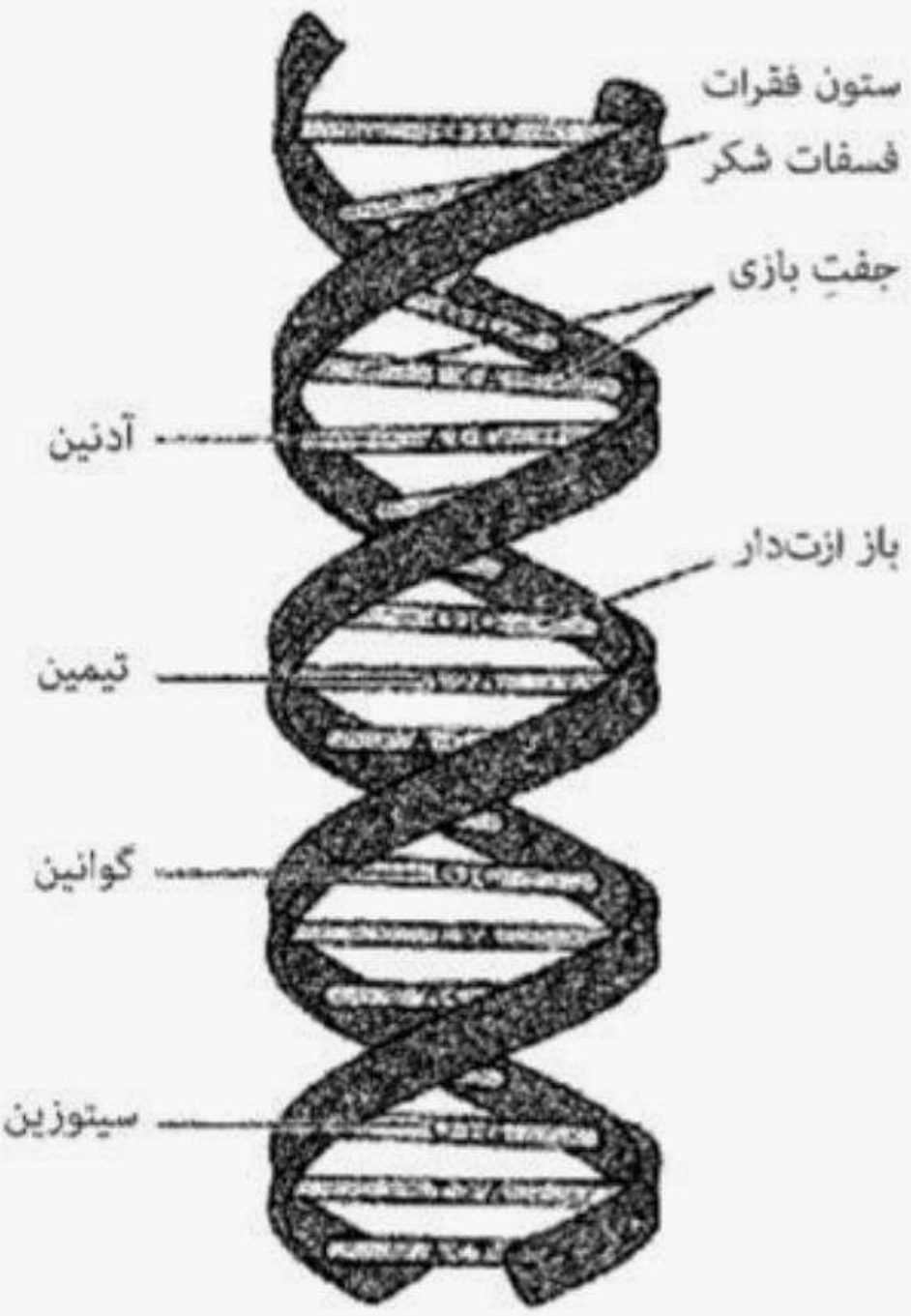
طرز کار DNA مجموعه تمامی خصیصه‌های فیزیکی یک اندام‌واره - یعنی رخ‌مون - به طور عمده ناشی از ویژگی پروتئین‌های سلول و برهم‌کنش بین آنها است.

پروتئین‌ها زنجیره‌های طولانی از مولکول هستند که مینو اسید نامیده می‌شوند.

هر سلول بدن شما، تقریبا به طور دقیق، شامل رشته[۳۱۸] کامل DNA یکسانی است، که از توالی مواد شیمیایی‌ای ساخته می‌شوند که نوکلئوتید[۳۱۹] نام دارند. نوکلئوتیدها شامل موادی شیمیایی به نام "باز[۳۲۰]" هستند که به چهار صورت وجود دارند و (به طور خلاصه)،A،C،G و T نامیده می‌شوند. در انسان، ردیف‌های DNA درواقع رشته‌هایی[۳۲۱] دوتایی از زوج مولکول‌های،A،G،C و T هستند. به دلیل قرابت شیمیایی، A همیشه با،T و C همیشه با G جفت می‌شود.

رشته‌ها معمولا به صورت یک خط از حروف در بالا، و زوج حروف (زوج بن) در پایین نوشته می‌شوند، برای مثال:

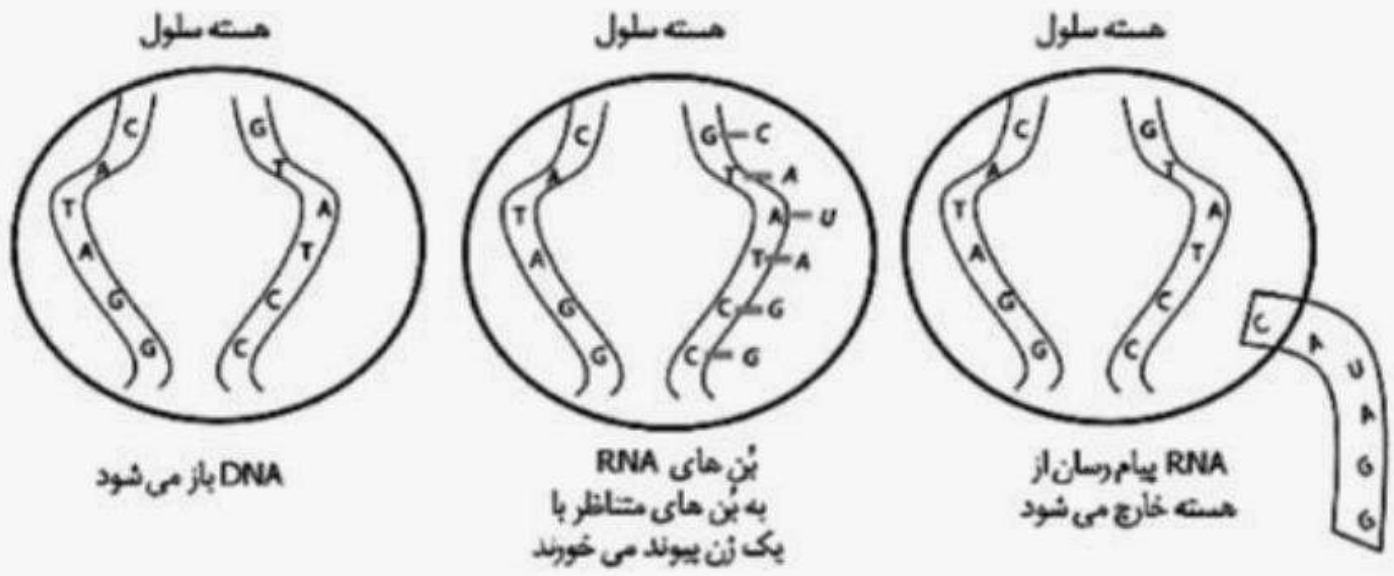
CCT TA T TCA در هر مولکول،DNA این رشته‌های دوتایی به شکل مارپیچ دوتایی بر روی هم پیچیده می‌شوند (شکل ۱-۶).



علم ژنتیک به زبان ساده

شکل ۶-۱. تصویر مارپیچ دوتایی ساختار DNA زیر رشته‌های[۳۲۲] DNA ژن‌ها را شکل می‌دهند. به طور تقریب، هر ژن یک پروتئین مشخص را کدگذاری می‌کند. این کار را از طریق کدگذاری هر یک از آمینواسیدهایی که پروتئین می‌سازند به انجام می‌رساند. شیوه‌ای که آمینواسیدها

کدگذاری می‌شوند. کد ژنتیک نامیده می‌شود. این کد برای تقریبا تمام جانداران روی زمین یکسان است. هر آمینواسید متناظر با سه‌گانه‌ای از بازهای نوکلئوتید است. برای مثال DNA سه‌گانه A A G متناظر با آمینواسید فنیلالانین[۳۲۳] است، و DNA سه‌گانه C A C متناظر با آمینواسید والین[۳۲۴]". این سه‌گانه‌ها کدون[۳۲۵] نامیده می‌شوند.



شکل ۶-۲. تصویر نسخه‌برداری DNA به RNA پیام‌رسان. توجه کنید که حرف U نسخه RNA مربوط به حرف T در DNA است.

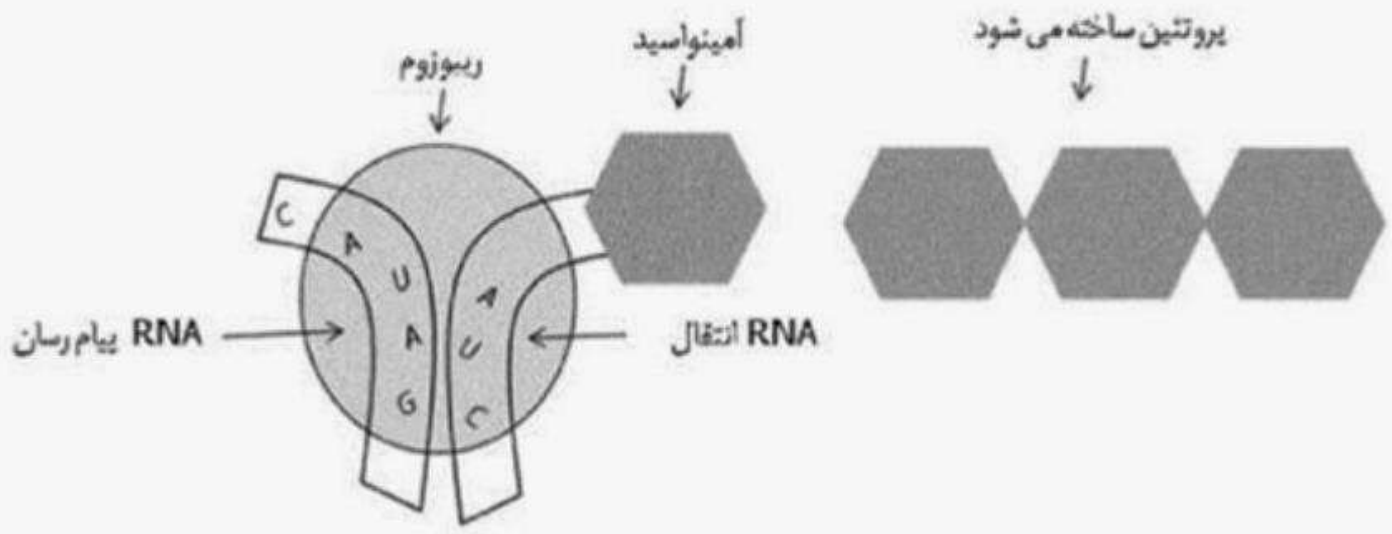
حال، ژن‌ها چگونه در عمل پروتئین‌ها را شکل می‌دهند؟ هر سلول مجموعه پیچیده‌ای از سازمان مولکولی دارد که این وظیفه را به انجام می‌رساند. اولین گام نسخه‌برداری[۳۲۶] است، که در هسته سلول رخ می‌دهد. از یک رشته واحد،DNA آنزیمی به نام پولیمراز[۳۲۷] RNA بخش کوچکی از DNA را از مارپیچ دوتایی‌اش باز می‌کند. این آنزیم سپس یکی از رشته‌های DNA را برای خلق یک مولکول RNA پیام‌رسان[۳۲۸] (یا mRNA) به کار می‌گیرد که نسخه عین این بخش از DNA است. این مولکول درواقع، یک ضد نسخه[۳۲۹]" است: در هر جا که ژن C دارد، mRNA یک G دارد، و در هر جا که ژن A دارد، mRNA یک U (نسخه‌ای از T) دارد. نسخه اصل را می‌توان از ضد نسخه بازسازی کرد.

فرایند نسخه‌برداری تا زمانی که ژن کاملا به مانند mRNA نسخه‌برداری شود ادامه می‌یابد.

دومین گام ترجمه[۳۳۰] است (شکل ۳-۶)، که در سیتوپلاسم سلول رخ می‌دهد. رشته mRNA که تازه ایجاد شده، از هسته به سیتوپلاسم حرکت می‌کند، که ساختاری سیتوپلاسمی[۳۳۱] به نام ریبوزوم[۳۳۲]" کدون را یک به یک می‌خواند. در ریبوزوم، هر کدون با یک پاد کدون[۳۳۳]" متناظر که بر روی مولکول RNA ناقل[۳۳۴] (tRNA) قرار دارد یک جا جمع می‌شود. پاد کدون شامل بازهای مکمل است. برای مثال، در شکل ۳-۶، آن mRNA که ترجمه می‌شود U A G است، و پاد کدون بازهای مکمل A U C است. یک مولکول tRNA که آن پاد کدون را دارد به صورتی که در شکل نشان داده شده است به mRNA ملحق می‌شود. صرفا این اتفاق می‌افتد که هر

مولکول tRNA هم یک پاد کدون و هم آمینواسید متناظرش را به آن ملحق کرده است. (اگر بخواهید بدانید، کدون A U C آمینواسید ابزولیوسین[۳۳۵] را کدگذاری می‌کند.) داگلاس هوفستادر tRNA را "کارت نمایش سلول"[۳۳۶] نامیده است. (۱)

روتنین ساخته می شود ابد ریبوزوم آمینواسیدها را از مولکول‌های tRNA جدا می کند و آنها را به یک پروتئین متصل می‌سازد.



شکل ۶-۳. تصویر ترجمه RNA پیام‌رسان به آمینواسیدها.

وقتی یک کدون پایان[۳۳۷] تشخیص داده می‌شود، ریبوزوم پیام خاتمه کار را دریافت می کند، و پروتئین را در سیتوپلاسم آزاد می کند، که در آنجا فعال می‌شود و کارکرد مقررش را به انجام می‌رساند.

نسخه‌برداری و ترجمه ژن، نمود[۳۳۸] ژن نامیده می‌شود و هر ژن اگر در حال نسخه‌برداری و ترجمه شدن باشد در یک زمان مشخص نمود پیدا می کند.

همه اینها به طور پیوسته و همزمان در هزاران جایگاه در هر سلول، و در تمامی تریلیون‌ها سلول بدن اتفاق می‌افتند. مقدار ناچیز انرژی مصرفی این رویدادها حیرت‌آور است - برای مثال، اگر بنشینید و تلویزیون تماشا کنید، تمامی این فعالیت زیرسلولی[۳۳۹]، در هر ساعت کمتر از ۱۰۰ کالری انرژی مصرف می کند. دلیلش آن است که این فرایندها تا حدودی از حرکت و برخورد تعداد عظیمی از مولکول‌ها نیرو می گیرند، که انرژی خود را از "حمام حرارت پیرامونی" کسب می کنند (یعنی اتاق‌نشیمن گرم شما).

طبیعت جفت بودن[۳۴۰] بازهای نوکلئوتید، A با T و C با،G نیز برای تکثیر DNA[۳۴۱] اساسی است. قبل از میتوز، آنزیم‌ها رشته‌های DNA را باز و جدا می کنند. در مورد هر رشته، آنزیم‌های دیگری نوکلئوتیدهای رشته DNA را می‌خوانند، و به هر کدام یک نوکلئوتید جدید ملحق می کنند (نوکلئوتیدهای جدید به طور پیوسته در فرایندهای شیمیایی درون سلول ساخته می‌شوند)، و طبق معمول A به،T و C به G ملحق می‌شود. به این ترتیب، هر رشته در قطعه،DNA که در اصل دورشته‌ای است، به قطعه دورشته‌ای DNA تبدیل می‌شود، و هر سلول که محصول میتوز است یکی از این مولکول‌های DNA دو رشته‌ای کامل را دریافت

می‌کند. فرایندهای پیچیده بسیاری در سلول وجود دارند که این فرایند تکثیر را در مسیر خود نگه می‌دارند. گاه‌به‌گاه (حدود یک بار در ۱۰۰ میلیارد نوکلئوتید)، خطاهایی رخ می‌دهد - یعنی یک باز نامناسب ملحق می‌شود - که جهش‌هایی را به دنبال می‌آورد.

توجه به این موضوع اهمیت دارد که در اینجا خود-ارجاعی[۳۴۲] فوق‌العاده‌ای دیده می‌شود: تمامی این سازمان سلولی پیچیده -، mRNA،RNA ریبوزوم‌ها، پولیمرازها و غیره -که بر نسخه‌برداری، ترجمه، و تکثیر DNA تأثیر دارند، خودشان در همان DNA کدگذاری شده‌اند. به همان صورتی که هوفستادر اشاره می‌کند: "DNA شامل نسخه‌های کدشده[۳۴۳] کدیاب‌های[۳۴۴]" خود است!" درعین‌حال شامل نسخه‌های کدشده تمامی پروتئین‌هایی است که در ترکیب نوکلئوتیدهایی وارد می‌شوند که DNA از آنها ساخته شده است. این یک دور[۳۴۵] خود-ارجاع[۳۴۶] است که بی‌تردید اگر تورینگ زنده مانده بود تا توضیح مربوط به آن را بشنود، او را خوشحال می‌کرد.

فرایندهایی که به اجمال مطرح شدند، در شکل ابتدایی‌شان تا اواسط دهه ۱۹۶۰ شناخته شده بودند. این شناخت ماحصل کوشش قهرمانانه ژن‌شناسانی[۳۴۷] بود که می‌خواستند از این سیستم بی‌نهایت پیچیده سردرآورند. این کوشش درعین‌حال درک تازه‌ای از تکامل در سطح مولکولی را به همراه آورد.

در سال ۱۹۶۲، کریک و داتسون، و زیست‌شناس موریس ویلکینز[۳۴۸] برای کشف‌هایشان در مورد ساختار،DNA به طور مشترک جایزه نوبل را دریافت کردند. در سال ۱۹۶۸، هار گوبیند کورانا[۳۴۹]، رابرت هولی[۳۵۰]، و مارشال نیرنبرگ[۳۵۱] همان جایزه را برای گشودن کد ژنتیک به دست آوردند. در آن زمان، به نظر می‌رسید که سرانجام بخش عمده اسرار بزرگ تکامل و وراثت کشف شده است. اما همان‌طور که در فصل هجدهم خواهیم دید، به‌تدریج روشن شد که موضوع پیچیده‌تر از آن است که تصور می‌شد.

فصل هفتم: تعریف و اندازه‌گیری پیچیدگی

این کتاب درباره پیچیدگی است، اما تا اینجا این دانش‌واژه را با باریک‌بینی تعریف نکرده‌ام، یا شیوه روشنی را برای پاسخگویی به این‌گونه پرسش‌ها مطرح نکرده‌ام: آیا مغز انسان پیچیده‌تر از مغز مورچه است؟ آیا ژنوم انسان پیچیده‌تر از ژنوم مخمر است؟ آیا پیچیدگی در جانداران در جریان چهار میلیارد سال تکامل افزایش یافته است؟ پاسخ اولیه به این پرسش‌ها به ظاهر "البته" بوده. اما، با کمال تعجب، رسیدن به تعریفی از پیچیدگی که مورد پذیرش همگان باشد و بتواند یافتن پاسخ این پرسش‌ها را آسان کند، دشوار بوده است.

در سال ۲۰۰۴، در جریان آموزش تابستانی سیستم‌های پیچیده، که سالانه در انستیتوی سانتافه برگذار می‌شود، میزگردی را درباره پیچیدگی ترتیب دادم. سال خاصی بود: سال ۲۰۰۴، بیستمین سالگرد بنیادگذاری انستیتوی سانتافه. برخی از برجسته‌ترین اعضای هیئت علمی انستیتو، از جمله دوین فارمر[۳۵۲]، جیم کراچفیلد[۳۵۳]، استفانی فارست[۳۵۴]، اریک اسمیت[۳۵۵]، جان میلر[۳۵۶]، آلفرد هوبلر[۳۵۷]، و باب آیزنشتاین[۳۵۸] در این گردهمایی حضور داشتند _ همه آنها دانشمندان مشهوری در رشته‌هایی مانند فیزیک، علوم کامپیوتر، زیست‌شناسی، اقتصاد، و نظریه تصمیم[۳۵۹] هستند. دانشجویان این دوره آموزشی که دانشمندان جوانی در سطح تحصیلات تکمیلی و فوق دکترا بودند این فرصت را داشتند که هر پرسشی را که مایلند با اعضای میزگرد مطرح کنند. اولین پرسش این بود: "پیچیدگی را چه‌طور تعریف می‌کنید؟"

همه اعضای میز گرد خندیدند. چون با این‌که پرسشی بسیار سر راست، و بسیار قابل انتظار بود، پاسخ دادن به آن بسیار مشکل به نظر می‌رسید. در ادامه، هر یک از اعضای میزگرد تعریف متفاوتی از این دانش‌واژه را ارائه کردند. حتی بر سر تعریفی که هر یک از اعضای کادر آموزشی مطرح کردند مناقشه‌هایی درگرفت.

دانشجویان یکه خورده بودند و بی‌تابی می‌کردند. اگر هیئت علمی انستیتوی سانتافه - مشهورترین انستیتوی جهان که به پژوهش سیستم‌های پیچیده اختصاص دارد - نمی‌توانستند بر سر معنای پیچیدگی توافق کنند، پس علم پیچیدگی چگونه می‌تواند حتی آغاز به کار کند.

پاسخ این است که علم پیچیدگی واحدی وجود ندارد، بلکه چند علم پیچیدگی متفاوت وجود دارد که هریک برداشت متفاوتی از معنای پیچیدگی دارند. برخی از این برداشت‌ها به قاعده[۳۶۰] و برخی هنوز خیلی بی‌قاعده[۳۶۱] هستند. اگر قرار است علوم پیچیدگی به یک علم واحد پیچیدگی تبدیل شوند، مردم باید بفهمند که این برداشت‌های متنوع _ به قاعده و بی‌قاعده _ چگونه به هم ربط داده می‌شوند. و چگونه به سودمندترین شکل، مفهوم بیش از حد غامض پیچیدگی را روشن می‌کنند. این کاری است که هنوز به پایان نرسیده است، و شاید آن دانشجویان یکه خورده و بی‌تاب وقتی جای نسل قدیمی دانشمندان را پر کنند، آن را به پایان

برند.

تصور نمی‌کنم که حیرت و بی‌تابی دانشجویان به جا بود. هر مطالعه دقیق تاریخ علم نشان می‌دهد که فقدان تعریفی پذیرفته شده برای یک دانش‌واژه محوری متداول بوده است. اسحاق نیوتون تعریف خوبی از واژه نیرو نداشت، و درواقع از این مفهوم چندان خشنود نبود چون به نظر می‌رسید مستلزم نوعی "کنش از دور"[۳۶۲]، جادویی است، که در توضیح ماشین‌وار طبیعت قابل پذیرش نبود. درحالی‌که علم ژنتیک یکی از بزرگترین رشته‌های زیست‌شناسی است و سریع‌ترین رشد را دارد، وراثت‌شناسان هنوز در میان خود تفاهم ندارند که دانش‌واژه ژن در سطح مولکولی به چه اشاره دارد.۱ اخترشناسان پی برده‌اند که ۹۵% جهان هستی از "ماده سیاه" و "انرژی سیاه" تشکیل شده است، اما به هیچ وجه درک روشنی ندارند که این دو از چه ساخته شده‌اند. روان‌شناسان تعریف دقیقی از تصور یا مفهوم ندارند، یا نمی‌دانند که این دو با چه چیزهایی در مغز متناظرند. اینها فقط چند مثال بود. علم اغلب با ابداع دانش‌واژه‌هایی پیشرفت می‌کند که برای توضیح پدیده‌هایی به کار می‌گیرد که کاملا فهمیده نشده‌اند؛ با پیشرفت علم پدیده‌ها کامل‌تر فهمیده می‌شوند و این دانش‌واژه‌ها به تدریج پالایش می‌شوند. برای مثال، اکنون فیزیکدان‌ها فهمیده‌اند که تمامی نیروهای موجود در طبیعت ترکیبی از چهار نیروی بنیادی متفاوت هستند:

الکترومغناطیسی، قوی، ضعیف، و جاذبه‌ای. فیزیکدان‌ها درعین‌حال این نظریه را مطرح کرده‌اند که ظاهرا "کنش از دور" از برهم‌کنش ذرات بنیادی منشأ می‌گیرد. شکل دادن به یک نظریه واحد که این چهار نیروی بنیادی را با ملاک‌های فیزیک کوانتوم توضیح دهدکماکان یکی از بزرگترین مسایل حل نشده در کل علم فیزیک است. شاید در آینده قادر باشیم جنبه‌های بنیادین متفاوت "پیچیدگی" را از هم تفکیک کنیم، و سرانجام تمامی این جنبه‌ها را در نوعی فهم عام از چیزی که امروزه پدیده‌های پیچیده می‌نامیم وحدت بخشیم.

فیزیکدان ست لوید[۳۶۳] در سال ۲۰۰۱ مقاله‌ای منتشر کرد که در آن سه بعد متفاوت را مطرح ساخت که پیچیدگی هر شیء یا فرایند در راستای آنها اندازه‌گیری می‌شود: (۲)

توضیح آن چقدر سخت است؟

ایجاد آن چقدر سخت است؟

میزان سازمان‌یافتگی[۳۶۴] آن چیست؟

سپس لوید چهل مقیاس پیچیدگی را فهرست کرد که افراد متفاوتی مطرح کرده بودند و هر یک به یک یا چند مورد از این پرسش‌ها می‌پرداختند، و مفاهیمی از سیستم‌های پویا و ترمودینامیک و نظریه اطلاعات و محاسبه را به کار می‌گرفتند. حال که بر پس‌زمینه این مفاهیم اشراف داریم، می‌توانم برخی از این مفاهیم پیشنهادی را به اجمال شرح دهم.

برای روشن کردن این مفاهیم اجازه بدهید، برای مثال، از مقایسه پیچیدگی ژنوم انسان با ژنوم مخمر استفاده کنم. ژنوم انسان به طور تقریبی دربرگیرنده سه میلیارد جفت بازی است (یعنی جفت‌های نوکلئوتید).

تخمین زده‌اند که انسان‌ها از ۲۵۰۰۰ ژن - یعنی مناطقی که پروتئین‌ها را کدگذاری می‌کنند - برخوردارند. تعجب در این است که تنها حدود ۲% از جفت‌های بازی عملا بخشی از ژن‌ها هستند؛ بخش‌های غیرژن[۳۶۵] ژنوم مناطق غیر کدگذار[۳۶۶] نامیده می‌شوند.

مناطق غیر کدگذار چندین کارکرد دارند: برخی از آنها از فروپاشی کروموزوم‌ها جلوگیری می‌کنند؛ برخی به کنترل نحوه عمل ژن‌های واقعی کمک می‌کنند؛ برخی ممکن است صرفا "خرت و پرت" باشند و واقعا در خدمت هیچ هدفی نباشند، یا کارکردهایی داشته باشند که هنوز روشن نشده است.

اطمینان دارم که درباره پروژه ژنوم انسان[۳۶۷] چیزهایی شنیده‌اید، اما احتمالا نمی‌دانید که پروژه ژنوم مخمر هم وجود داشته، که در جریان آن ردیف‌های کامل DNA چندگونه مخمر مشخص شده‌اند. مشخص شد که اولین گونه ردیف شده[۳۶۸] تقریبا دوازده میلیون جفت بازی و شش هزار ژن دارد.

پیچیدگی به عنوان اندازه

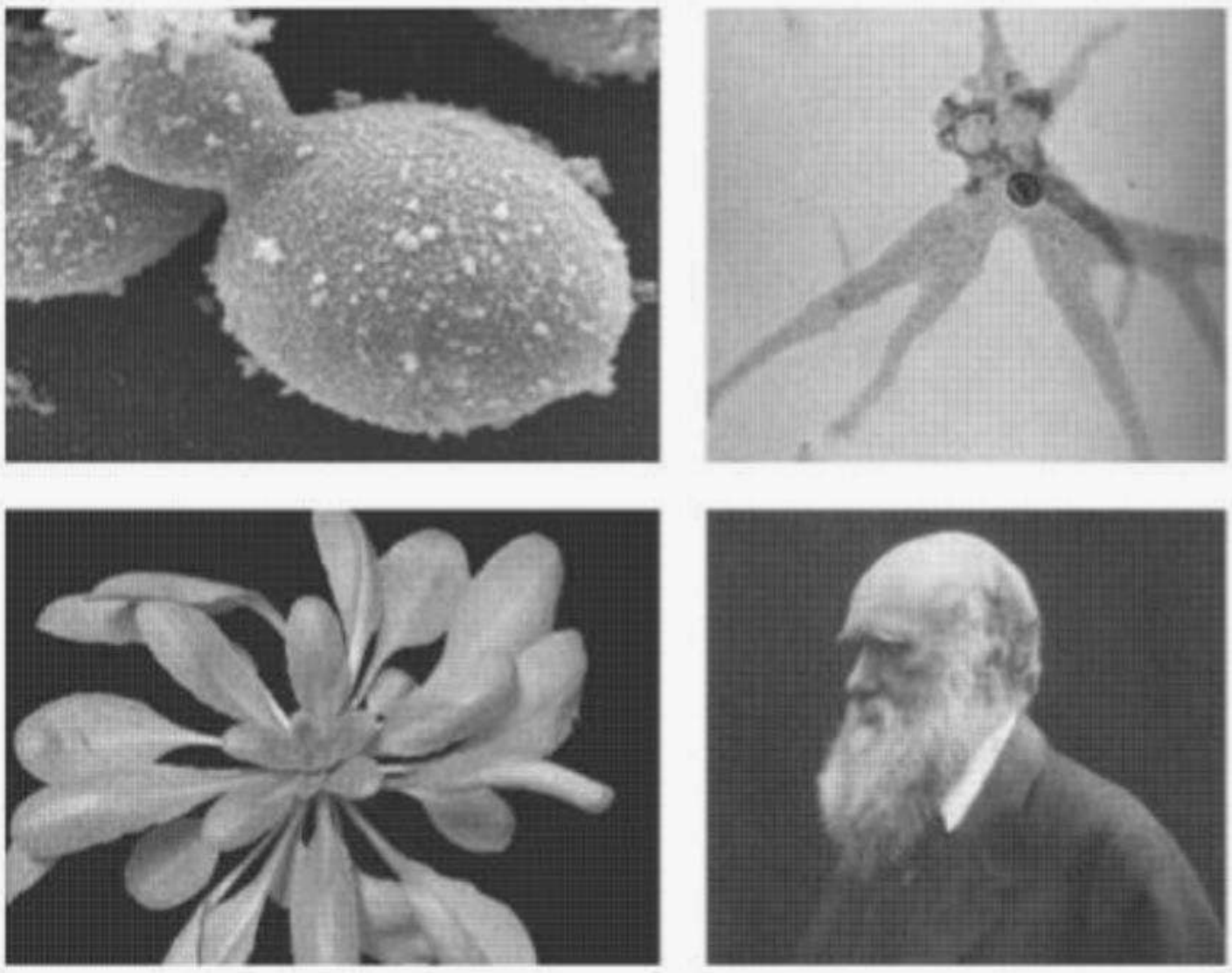
یک مقیاس ساده پیچیدگی اندازه است. برحسب این مقیاس، اگر تعداد جفت‌های بازی را مقایسه کنیم، انسان‌ها ۲۵۰ بار پیچیده‌تر از مخمرها هستند، اما اگر ژن‌ها را بشماریم، تنها حدود چهار برابر پیچیده‌ترند.

چون ۲۵۰ عدد بسیار بزرگی است، ممکن است تصور کنید که حداقل در مقایسه با مخمر، نسبتا پیچیده هستید، اما متأسفانه روشن شده است که آمیب، نوع دیگری از ریزاندام‌واره‌های تک‌سلولی، دارای جفت‌های بازی است که تعدادشان ۲۲۵ برابر جفت‌های بازی انسان است، و یکی از گونه‌های گیاه خردل[۳۶۹] به نام رابیدوپسیس[۳۷۰] همان تعداد ژن ما را دارد.

آشکار است که انسان‌ها پیچیده‌تر از آمیب یا گیاهان خردل هستند، یا حداقل دوست داریم این‌طور فکر کنیم. که این را می‌رساند که اندازه ژنوم مقیاس چندان خوبی نیست؛ پیچیدگی ما باید از چیزی اساسی‌تر از تعداد مطلق جفت‌های بازی یا ژن‌ها ناشی شده باشد. (به شکل ۱-۷ نگاه کنید.)

پیچیدگی به عنوان آنتروپی یک مقیاس پیشنهادی دیگر برای پیچیدگی یک شیء آنتروپی شانون است که در فصل ۳ به صورت میانگین درون‌مایه اطلاعاتی یا "میزان حیرت" یک منبع پیام برای گیرنده، تعریف شد. در این مثال، می‌توانیم پیام را به صورت یکی از نمادهای G یا C یا A یا T تعریف کنیم. یک رشته بسیار منظم و ساده مثل (A ....AAAAAAA) دارای آنتروپی معادل صفر است. یک رشته کاملا تصادفی حداکثر آنتروپی ممکن را دارد.

در به کار گرفتن آنتروپی شانون به عنوان مقیاس پیچیدگی چند مشکل وجود دارد. اول، شیء یا فرایند مورد پرسش را باید به شکل نوعی "پیام" درآورد، همان‌طور که در بالا این کار را کردیم. این کار همیشه آسان و سرراست نیست - برای مثال، چگونه می‌توانیم آنتروپی مغز انسان را اندازه‌گیری کنیم؟



شکل ۷-۱. از بالا در سمت چپ در جهت عقربه‌های ساعت: مخمر، یک آمیب، یک انسان، و آرابیدوپسیس. کدام یک پیچیده‌تر هستند؟ اگر طول ژنوم را به عنوان مقیاس پیچیدگی به کار برده باشید، آمیب دست بالا را دارد (اگر دستی داشته باشد.)

دوم، بیشترین آنتروپی با یک مجموعه تصادفی از پیام‌ها به دست می‌آید. می‌توانیم یک ژنوم مصنوعی را با انتخاب گروهی از A ها، C ها، G ها، و T های تصادفی بسازیم. با استفاده از آنتروپی به عنوان مقیاس پیچیدگی، این ژنوم تصادفی که درواقع بی‌تردید غیرکارکردی[۳۷۱] است، پیچیده‌تر از ژنوم انسان به حساب می‌آید. البته یکی از چیزهایی که انسان را، در معنای شهودی، پیچیده می‌کند، دقیقا این است که ژنوم‌های ما تصادفی نیستند بلکه در دوره‌های زمانی طولانی تکامل یافته‌اند تا ژن‌ها را متناسب با بقای ما کدگذاری کنند، مانند ژن‌هایی که رشد چشم‌ها و عضله‌ها را کنترل می‌کنند. پیچیده‌ترین موجودیت‌ها منظم‌ترین یا تصادفی‌ترین موارد نیستند بلکه جایی در میانه هستند. آنتروپی ساده شانون برداشت شهودی ما از پیچیدگی را نشان نمی‌دهد.

پیچیدگی به عنوان درون‌مایه آلگوریتمی[۳۷۲] اطلاعات

در مقابل آنتروپی به عنوان مقیاس پیچیدگی، بدیل‌های متعددی مطرح شده است.

چشمگیرترین مورد که کولموگوروف[۳۷۳]، و به طور مستقل از او هم گریگوری چایتین[۳۷۴]" و هم ری سولومونوف[۳۷۵]، مطرح کرده‌اند این است که پیچیدگی اندازه کوتاه‌ترین برنامه کامپیوتری است که می‌تواند توضیح کاملی از شیء را به دست دهد. این را درون‌مایه الگوریتمی شیء می‌نامند.(۳)

برای مثال، رشته (غیرواقعی) خیلی کوتاهی از DNA را در نظر بگیرید:

(رشتهٔ ۱) ACACACACACACACACACAC

یک برنامه کامپیوتری خیلی کوتاه AC" را ده بار چاپ کنید" این الگو را به وجود می‌آورد. بدین ترتیب، این رشته از درون‌مایه آلگوریتمی اطلاعاتی کمی برخوردار است. در مقابل، در زیر رشته‌ای آمده است که به کمک یک مولد اعداد شبه تصادفی[۳۷۶] ایجاد کرده‌ام:

(رشتهٔ ۲) ATCTGTCAAGACGGAACAT

اگر فرض کنیم مولد اعداد تصادفی من به درستی کار می‌کند، این رشته هیچ الگوی عمومی قابل تشخیصی ندارد، و مستلزم برنامه طولانی‌تری است، یعنی "عین رشته

ATCTGTCAAAACGGAACAT

را چاپ

کنید." منظور این است که رشته ۱ قابل فشردن است، اما رشته ۲ این‌طور نیست، در نتیجه شامل اطلاعات آلگوریتمی بیشتری است. مانند مورد آنتروپی، درون‌مایه آلگوریتمی اطلاعات در مقایسه با مواردی که به طور شهودی پیچیده می‌دانیم، درون‌مایه اطلاعاتی بالاتری را به اشیای تصادفی منتسب می‌کند.

فیزیکدان موری گل-مان در این رابطه مقیاسی را مطرح کرد، که آن را "پیچیدگی مؤثر" نامید، که مناسبت بیشتری با شهود ما در مورد پیچیدگی دارد.) گل-مان مطرح کرد که هر موجودیت مفروض متشکل از ترکیبی از نظم[۳۷۷] و تصادفی بودن است. برای مثال، رشته ۱ که در بالا آمد نظم خیلی ساده‌ای دارد: تکرار طرح،AC رشته ۲ هیچ نظمی ندارد چون به صورت تصادفی تولید شده است. در مقابل، DNA یک اندام‌واره زنده از نوعی نظم (یعنی رابطه‌های مهمی در میان قسمت‌های مختلف ژنوم(۴) همراه با نوعی تصادفی بودن برخوردار است. (یعنی خرت و پرت واقعی. (DNA برای محاسبه پیچیدگی مؤثر، باید ابتدا بهترین توضیح درباره نظم یک موجودیت را فهمید؛ پیچیدگی مؤثر به صورت مقیاس اطلاعات موجود در آن توضیح، یا معادل با آن، درون‌مایه آلگوریتمی اطلاعات در مجموعه نظم‌ها تعریف می‌شود.

رشته ۱ در بالا نظمی دارد که همان تکرار A C است. مقیاس اطلاعات لازم برای توضیح این نظم، درون‌مایه آلگوریتمی اطلاعات این نظم است:

طول برنامه A C" را چند بار چاپ کنید." بدین ترتیب موجودیت‌هایی که ساختاری خیلی قابل پیش‌بینی دارند، پیچیدگی مؤثر اندکی دارند.

در نقطه مقابل آن، رشته ۲، که تصادفی است، نظمی ندارد. از این جهت برای توضیح نظم آن به هیچ اطلاعاتی نیاز نیست، و درحالی‌که درون‌مایه آلگوریتمی اطلاعات خود رشته حداکثر است، درون‌مایه آلگوریتمی نظم‌های رشته - یعنی پیچیدگی مؤثر آن - صفر است. در یک کلام، همان‌طور که می‌خواستیم، هم موجودیت‌های خیلی منظم[۳۷۸] و هم خیلی تصادفی پیچیدگی مؤثر اندکی دارند.

DNA یک اندام‌واره کارآمد[۳۷۹]، که از بسیاری نظم‌های مستقل و به هم وابسته برخوردار است، پیچیدگی مؤثر زیادی دارد چون برای توضیح نظم‌های آن قاعدتا به اطلاعات قابل ملاحظه‌ای نیاز است.

البته، مشکلی که وجود دارد این است که چگونه بفهمیم که نظم‌ها کدام هستند؟ و چه اتفاقی می‌افتد اگر برای یک سیستم مفروض، ناظران متفاوت نتوانند بین خود توافق کنند که نظم‌ها کدامند؟

گل-مان موضوع را با شکل گرفتن نظریه علمی مقایسه می‌کند، که درواقع، فرایند پی بردن نظم موجود در پدیده‌های طبیعی است. برای هر پدیده مفروض، نظریه‌های ممکن بسیاری

وجود دارد که نظم آن را نشان می‌دهد، اما بی‌تردید برخی از نظریه‌ها - یعنی ساده‌ترین و خوش‌ساخت‌ترین آنها ـ بهتر از بقیه هستند. گل-مان درباره این گونه امور بسیار مطلع است - او در سال ۱۹۶۹ برای نظریه فوق‌العاده خوش‌ساختش که سرانجام از آشفتگی سرگیجه‌آور انواع ذرات بنیادی و برهم‌کنش آنها سردرآورد، سهمی از جایزه نوبل سال ۱۹۶۹ را دریافت کرد.

به همین ترتیب، با وجود مجموعه‌های متفاوت پیشنهادی که برای یک موجودیت مناسبند، می‌توانیم با استفاده از آزمونی به نام تیغ اکام[۳۸۰]" تشخیص دهیم که کدام یک بهتر است که براساس آن بهترین مجموعه نظم، کوچکترین مجموعه‌ای است که موجودیت مورد پرسش را توضیح می‌دهد و همزمان مؤلفه تصادفی باقی‌مانده موجودیت را به حداقل می‌رساند. برای مثال، امروزه زیست‌شناسان به نظم‌های بسیاری در ژنوم انسان پی برده‌اند، از قبیل ژن‌ها، برهم‌کنش‌های نظم‌دهنده[۳۸۱] در میان ژن‌ها، و غیره، اما این نظم‌ها جنبه‌های تصادفی بسیاری را به حال خود رها می‌کنند که پیرو هیچ نظمی نیستند - یعنی، تمامی آن به اصطلاح خرت و پرت‌های.DNA اگر شخصی در حد و اندازه گل-مان در میان زیست‌شناسان پدیدار می‌شد، شاید می‌توانست مجموعه بهتری از نظم‌ها بیابد که اکثر ژن‌ها از آن تبعیت می‌کنند و، بهتر از آنهایی هستند که زیست‌شناسان تا امروز مورد شناسایی قرار داده‌اند.

پیچیدگی مؤثر یک ایده قانع‌کننده است، گرچه مانند اکثر مقیاس‌های پیشنهادی، اندازه‌گیری آن واقعا سخت است. منتقدان درعین‌حال به این امر اشاره می‌کنند که ذهنی بودن تعریف آن کماکان مسئله‌ای حل نشده است. (۵)

پیچیدگی به عنوان عمق منطقی[۳۸۲]

به منظور این‌که به شهودمان در مورد پیچیدگی نزدیک‌تر شویم، در اوایل دهه ۱۹۸۰، ریاضیدان چارلز بنت[۳۸۳] مفهوم عمق منطقی را مطرح کرد. عمق منطقی یک شیء مقیاسی است برای میزان دشواری ساخت آن. ساخت یک توالی بسیار منظم از A, C, G, T (یعنی رشته ۱ که پیش از این مطرح شد) آشکارا ساده است. به همین ترتیب اگر از شما می‌خواستم زنجیره‌ای تصادفی از T, A, C, G بسازید، برای شما کار ساده‌ای می‌بود، به‌خصوص با کمک سکه‌ای که می‌اندازید یا تاسی که می‌ریزید. اما اگر از شما می‌خواستم یک ردیف DNA بسازید که بتواند یک اندام‌واره کارآمد را تولید کند، شما (یا هر زیست‌شناسی) اگر با دوز و کلک به ترتیب موجود ژن‌ها نگاه نمی‌کردید، دچار دردسر زیادی می‌شدید.

به بیان بنت: "اشیایی که به لحاظ منطقی عمیق هستند... از شواهدی درونی حکایت دارند مبنی بر این‌که این اشیاء نتیجه یک فرایند پویا با محاسبات طولانی یا شبیه‌سازی کند هستند و نمی‌توانند به صورت دیگری که باورپذیر باشد شکل گرفته باشند."(۶) یا همان‌طور که ست لوید می‌گوید:

"تشخیص پیچیدگی یک چیز به کمک مقیاس اطلاعات پردازش شده در باورپذیرترین شیوه خلق آن، ایده جذابی (۷)". است برای تعریف دقیق‌تر عمق منطقی، بنت ساختن یک شیء را معادل قرار داد با محاسبه رشته‌ای از صفر و یک که شیء را کدگذاری می‌کنند. در مورد مثال ما، می‌توانیم به هر حرف در ردیف نوکلئوتید یک کد دو رقمی
اختصاص دهیم: T = ۱۱ و G = ۱۰ و C = ۰۱ و A = ۰۰ با استفاده از این کد، می‌توانیم هر ردیفی از T, G, C, A را به رشته‌ای از صفر و یک تبدیل کنیم. در این حال عمق منطقی به صورت تعداد گام‌های مورد نیاز یک ماشین تورینگ که به طور مناسب برنامه‌نویسی شده تا از نوار خالی شروع کند و توالی دلخواه خروجی را بسازد، تعریف می‌شود.

به‌طورکلی چون ماشین‌های تورینگ متفاوتی وجود دارند که "به طور مناسبی برنامه‌نویسی شده‌اند" تا بتوانند توالی دلخواه را در مدت‌های زمانی متفاوت بسازند، ضروری بود بنت مشخص کند که کدام ماشین تورینگ را مدنظر دارد. او گفت که باید کوتاه‌ترین آنها (یعنی موردی که از کمترین تعداد وضعیت[۳۸۴] و قاعده برخوردار است)، مطابق با تیغ اکام ذکر شده در بالا، انتخاب شود.

عمق منطقی خواص نظری دلپذیری دارد که با شهود ما سازگار است، اما شیوه‌ای عملی برای اندازه‌گیری پیچیدگی هر شیء موردنظر را به دست نمی‌دهد، چون به طور معمول هیچ شیوه عملی برای یافتن کوچکترین ماشین تورینگی که بتواند یک شیء مفروض را ایجاد کند وجود ندارد، چه رسد به اینکه بخواهیم تعیین کنیم چقدر طول می‌کشد تا چنین ماشین تورینگی آن شیء را ایجاد کند. تازه، آنچه مطرح شد، به‌طورکلی مشکل توضیح یک شیء مفروض به صورت رشته‌ای از صفر و یک را به حساب نمی‌آورد.

پیچیدگی به عنوان عمق ترمودینامیک[۳۸۵]

در اواخر دهه ۱۹۸۰، ست لوید و هاینز پاگلز[۳۸۶] مقیاس جدیدی را برای پیچیدگی پیشنهاد کردند، عمق (۸). ترمودینامیک برداشت شهودی لوید و پاگلز مشابه بنت بود: ساختن اشیای پیچیده‌تر سخت‌تر است. اما، به جای اندازه‌گیری تعداد گام‌های مورد نیاز ماشین تورینگ برای شبیه‌سازی یک شیء، عمق ترمودینامیک "باورپذیرترین رشته رویدادهایی که از نظر علمی مشخص شده‌اند و منجر به خود شیء می‌شوند" را تعیین می‌کند و بر مبنای آن "مقدار کل منابع ترمودینامیک و اطلاعاتی مورد نیاز فرایند ساخت فیزیکی" را اندازه می‌گیرد.

برای مثال، برای تعیین عمق ترمودینامیک ژنوم انسان، می‌توانیم از ژنوم نخستین موجودی که پا به عرصه حیات گذاشت آغاز کنیم و تمامی رویدادهای ژنتیک تکاملی (جهش‌های تصادفی، بازترکیب‌ها، تکثیرهای ژن و غیره) را که به انسان امروزی انجامید فهرست کنیم. احتمالا به این دلیل که انسان‌ها میلیاردها سال پس از آمیب‌ها تکامل یافتند، عمق ترمودینامیک آنها خیلی

بیشتر است.

عمق ترمودینامیک، مانند عمق منطقی، نظریه جالبی است، اما در مقام روشی برای اندازه‌گیری پیچیدگی چند مشکل عملی دارد. اول، این فرض است که عملا می‌توانیم، تمامی رویدادهایی را که به خلق یک شیء خاص انجامیده‌اند فهرست کنیم. دوم، همان‌طور که برخی منتقدان به آن ایراد گرفته‌اند، (۱۰) از تعریف ست لوید و هاینز پاگلز به روشنی نتیجه نمی‌شود که "یک رویداد" را چگونه می‌توان تعریف کرد. آیا جهش ژنتیک را باید به صورت "یک رویداد تعریف کرد" یا مجموعه‌ای از میلیون‌ها رویداد که شامل تمامی برهم‌کنش‌ها بین اتم‌ها و ذرات زیر اتمی است، که موجب رویدادی در مقیاس مولکولی می‌شود؟ آیا باید بازترکیب ژنتیک دو اندام‌واره نیاکان را یک رویداد واحد شناخت، یا تمامی رویدادهای ریزمقیاسی را که موجب می‌شوند دو اندام‌واره به هم برسند، جفت‌گیری کنند، و فرزند به وجود آورند؟ به زبان فنی‌تر، روشن نیست که چگونه می‌توان وضعیت‌های "درشت‌بافت" سیستم را متمایز کرد - یعنی چگونه می‌توان تعیین کرد که در زمان فهرست کردن رویدادها وضعیت‌های کلان کدام هستند.

پیچیدگی به عنوان ظرفیت محاسباتی[۳۸۷]

اگر سیستم‌های پیچیده - خواه طبیعی و خواه ساخته دست انسان ـ می‌توانند محاسبه کنند، پس ممکن است ما بخواهیم پیچیدگی آنها را برحسب بغرنجی چیزی که می‌توانند محاسبه کنند اندازه‌گیری کنیم. برای مثال، فیزیکدان استفن وولفرام[۳۸۸] می‌گوید که سیستم‌ها در صورتی پیچیده هستند که قابلیت‌های محاسباتی آنها معادل ماشین عام تورینگ باشد. (۱۱) اما، همان‌طور که چارلز بنت و دیگران استدلال کرده‌اند، قابلیت انجام محاسبات عام به این معنا نیست که سیستم به خودی خود پیچیده است؛

بلکه، باید پیچیدگی رفتار سیستم به همراه ورودی‌هایش را اندازه‌گیری کنیم. برای مثال، یک ماشین عام تورینگ به تنهایی پیچیده نیست، بلکه به همراه کد ماشین و ورودی، که محاسبات پیشرفته را به وجود می‌آورند، رفتار پیچیده را خلق می‌کند.

پیچیدگی آماری

فیزیکدانان جیم کراچفیلد[۳۸۹]" و کارل یانگ[۳۹۰]" مقدار متفاوتی به نام پیچیدگی ماری را تعریف کردند،(۱۳) که مقدار حداقل اطلاعات درباره رفتار گذشته یک سیستم را اندازه‌گیری می‌کند که برای پیش‌بینی مطلوب رفتار آماری سیستم در آینده مورد نیاز است. (فیزیکدان پیتر گراس‌برگر[۳۹۱] مفهومی را که از نزدیک به این موضوع مربوط است تعریف کرد که پیچیدگی اندازه مؤثر[۳۹۲] نامیده می‌شد.) پیچیدگی آماری مربوط به آنتروپی شانون است که بر مبنای آن یک سیستم به عنوان "منبع پیام" تصور شده و رفتار آن به صورتی از "پیام‌های ناپیوسته"

اندازه‌گیری می‌شود. در اینجا، پیش‌بینی رفتار آماری شامل ساخت مدلی از سیستم است بر مبنای مشاهده پیام‌هایی که سیستم تولید می‌کند و به صورتی که به لحاظ آماری رفتار مدل از رفتار خود سیستم قابل تمیز نیست.

برای مثال، مدل منبع پیام مربوط به رشته ۱ می‌تواند خیلی ساده باشد:

A C" را تکرار کنید"؛ بدین ترتیب، پیچیدگی آماری آن پایین است. اما در مقایسه با کاری که می‌توان با آنتروپی یا درون‌مایه آلگوریتمی اطلاعات کرد، مدل ساده‌ای را نیز می‌توان برای منبع پیامی ساخت که رشته ۲ را تولید می‌کند: "به طور تصادفی از میان A یا C یا G یا T انتخاب کنید." این آخری به این دلیل ممکن است که مدل‌های آماری پیچیدگی می‌توانند انتخاب‌های تصادفی را دربرگیرند. ارزش کمی پیچیدگی آماری درون‌مایه اطلاعاتی ساده‌ترین مدلی است که رفتار سیستم را پیش‌بینی می‌کند. از این‌رو، مشابه پیچیدگی مؤثر، پیچیدگی آماری برای سیستم‌های بسیار منظم و همچنین بسیار تصادفی اندک است؛ یعنی برای همان‌هایی که به لحاظ شهودی پیچیده به حساب می‌آوریم.

همانند سایر مقیاس‌هایی که در بالا تشریح شد، اگر سیستم مورد بررسی را به آسانی نتوان به صورت منبع پیام فهمید، اندازه‌گیری پیچیدگی آماری به طور معمول آسان نیست. اما، کراچفیلد و یانگ و همکاران‌شان پیچیدگی آماری تعدادی از پدیده‌های دنیای واقعی را عملا اندازه‌گیری کرده‌اند، از جمله ساختار اتمی کریستال‌های پیچیده (۱۴) و الگوهای آتش کردن نورون‌ها. (۱۵)

پیچیدگی به عنوان بعد فراکتال

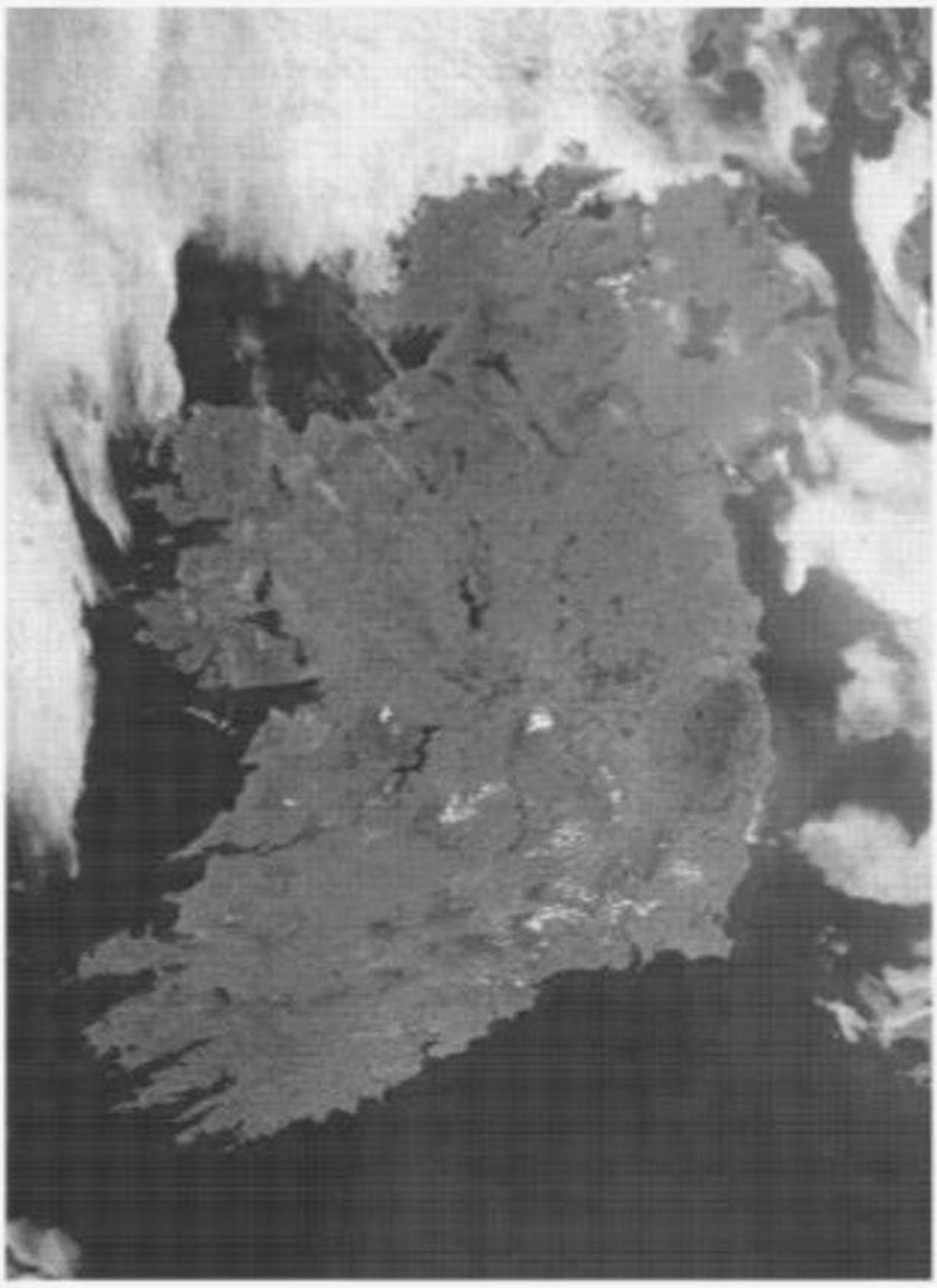
تمامی مقیاس‌های پیچیدگی که تا اینجا به بحث گذاردم مبتنی بر مفهوم‌های نظری اطلاعاتی یا محاسباتی بودند. اما اینها تنها منابع ممکن مقیاس‌های پیچیدگی نیستند. مفاهیم دیگری برای اندازه‌گیری پیچیدگی یک شیء یا فرایند پیشنهاد شده است که برگرفته از نظریه سیستم‌های دینامیک است. یکی از این‌گونه مقیاس‌ها بعد فراکتال یک شیء است. برای توضیح این مقیاس، ابتدا باید توضیح دهم که فراکتال چیست.

مثال کلاسیک فراکتال خط ساحلی است. اگر از هواپیما به خط ساحل نگاه کنید، با شاخابه‌ها و خلیج‌ها و پیش‌آمدگی‌ها[۳۹۳]، و شبه‌جزیره‌هایش ناصاف به نظر می‌رسد، و نه صاف (شکل ۲-۷، بالا). حالا اگر از درون اتومبیلی در یک بزرگراه ساحلی به همان خط ساحل نگاه کنید، باز هم به نظر می‌رسد که دقیقا همان نوع ناصافی را دارد، اما در مقیاسی کوچکتر (شکل ۲-۷، پایین).

همچنین است وقتی که در ساحل ایستاده‌اید و از نزدیک نگاه می‌کنید، و حتی از نگاه بسیار نزدیک یک حلزون وقتی روی صخره می‌خزد. شباهت شکل خط ساحلی در مقیاس‌های مختلف را "خودمانندگی"[۳۹۴] می‌نامند.

دانش‌واژه فراکتال را ریاضیدان فرانسوی بنوا ماندلبروت[۳۹۵]" ساخت که از اولین کسانی بود که به این امر اشاره کرد که دنیا پر از فراکتال‌هاست ـ یعنی، بسیاری از اشیای دنیای واقعی ساختاری خودماننده[۳۹۶]" و ناصاف دارند.

خط‌های ساحلی، سلسله کوه‌ها، دانه‌های برف، و درختان مثال‌هایی هستند که اغلب به میان می‌آیند. ماندلبروت حتی مطرح کرد که کائنات برحسب توزیع کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی و خوشه‌های خوشه‌های کهکشانی و غیره شبه فراکتال است. (۱۶)



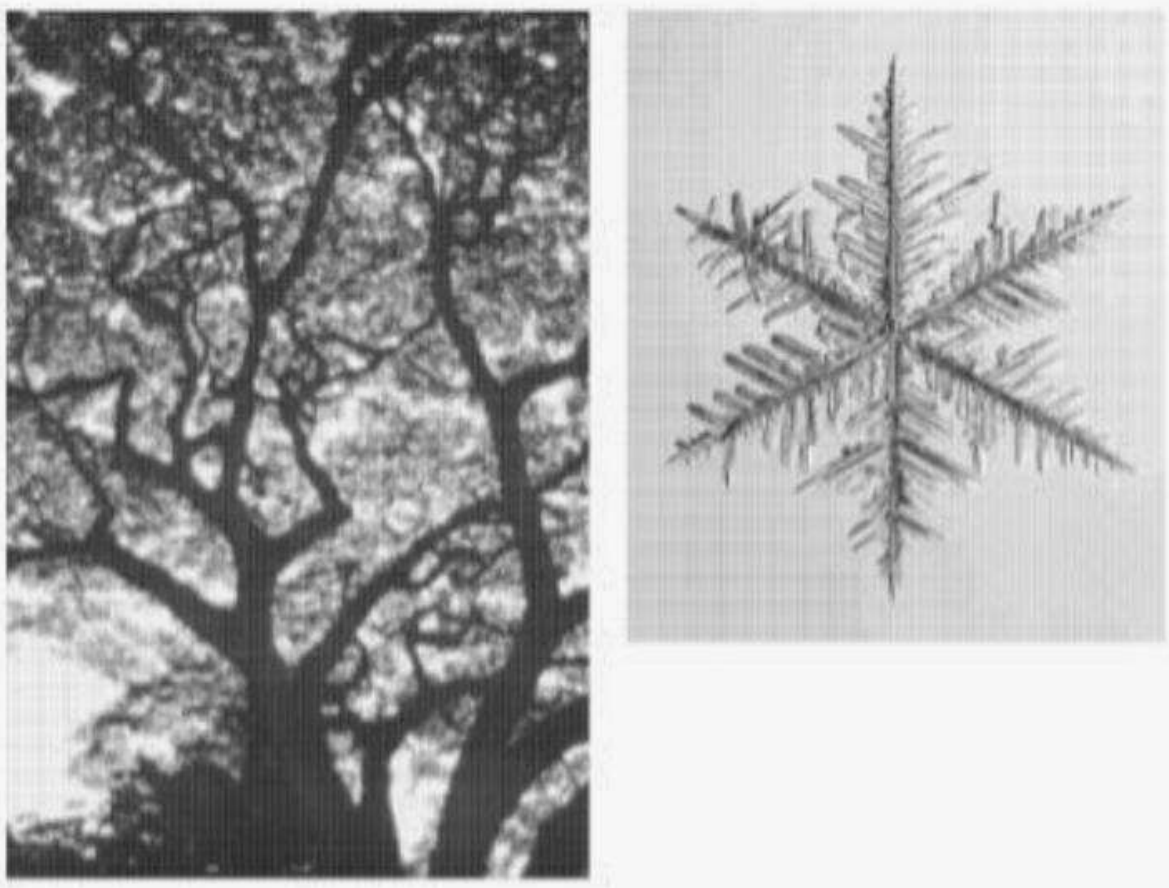


شکل ۷-۲. بالا: منظره هوایی کلان - مقیاس ایرلند، که خط ساحلی آن خواص خودمانننده (فراکتال) دارد.

شکل ۲-۷. پایین: منظره بخشی از خط ساحلی ایرلند در مقیاس کوچکتر.

ساختار ناصاف در این مقیاس مشابه ساختار ناصاف در مقیاس بزرگتر است.

گرچه افراد مختلف برداشت‌های مختلفی از دانش‌واژه فراکتال[۳۹۷] دارند، به‌طورکلی فراکتال شکلی هندسی است که "در هر مقیاسی ساختار ظریفی" (۱۷). دارد بسیاری از فراکتال‌های مورد نظر ما خاصیت خودمانندگی دارند، که در مثال خط ساحلی در بالا دیده می‌شود. تصویر دو شاخه نگاشت منطق‌گرا در فصل دوم (شکل ۶-۲) نیز تا حدودی خودمانننده است، درواقع منطقه آشوبناک این سیستم(R) بزرگ‌تر از ۳.۵۷) و بسیاری سیستم‌های دیگر، در پاره‌ای اوقات جلب‌کننده‌های فراکتال نامیده می‌شوند.



شکل ۷-۳. مثال‌های دیگری از ساختارهای شبه فراکتال در طبیعت: درخت، دانه برف (بزرگ‌نمایی شده)، خوشه کهکشانی

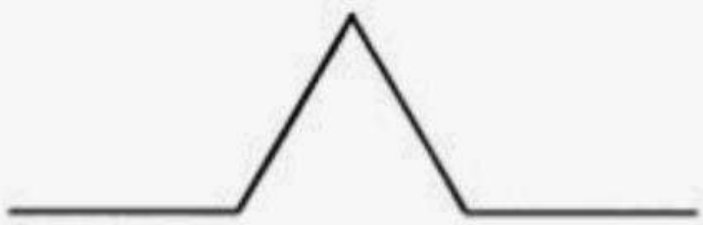
ماندلبروت و سایر ریاضیدان‌ها تعداد زیادی مدل ریاضی متفاوت برای فراکتال‌های موجود در طبیعت طراحی کرده‌اند. یک مدل مشهور، همان است که منحنی کک نامیده می‌شود (به نام ریاضیدان سوئدی که این فراکتال را مطرح کرد.) منحنی کک[۳۹۸] با استفاده مکرر از قاعده‌ای به شرح زیر به وجود می‌آید:

۱. از یک پاره‌خط واحد آغاز کنید.

۲. قاعده مربوط به منحنی کک را به کار گیرید: "در هر پاره‌خط، یک سوم میانی را با دو ضلع مثلث جایگزین کنید که هر کدام

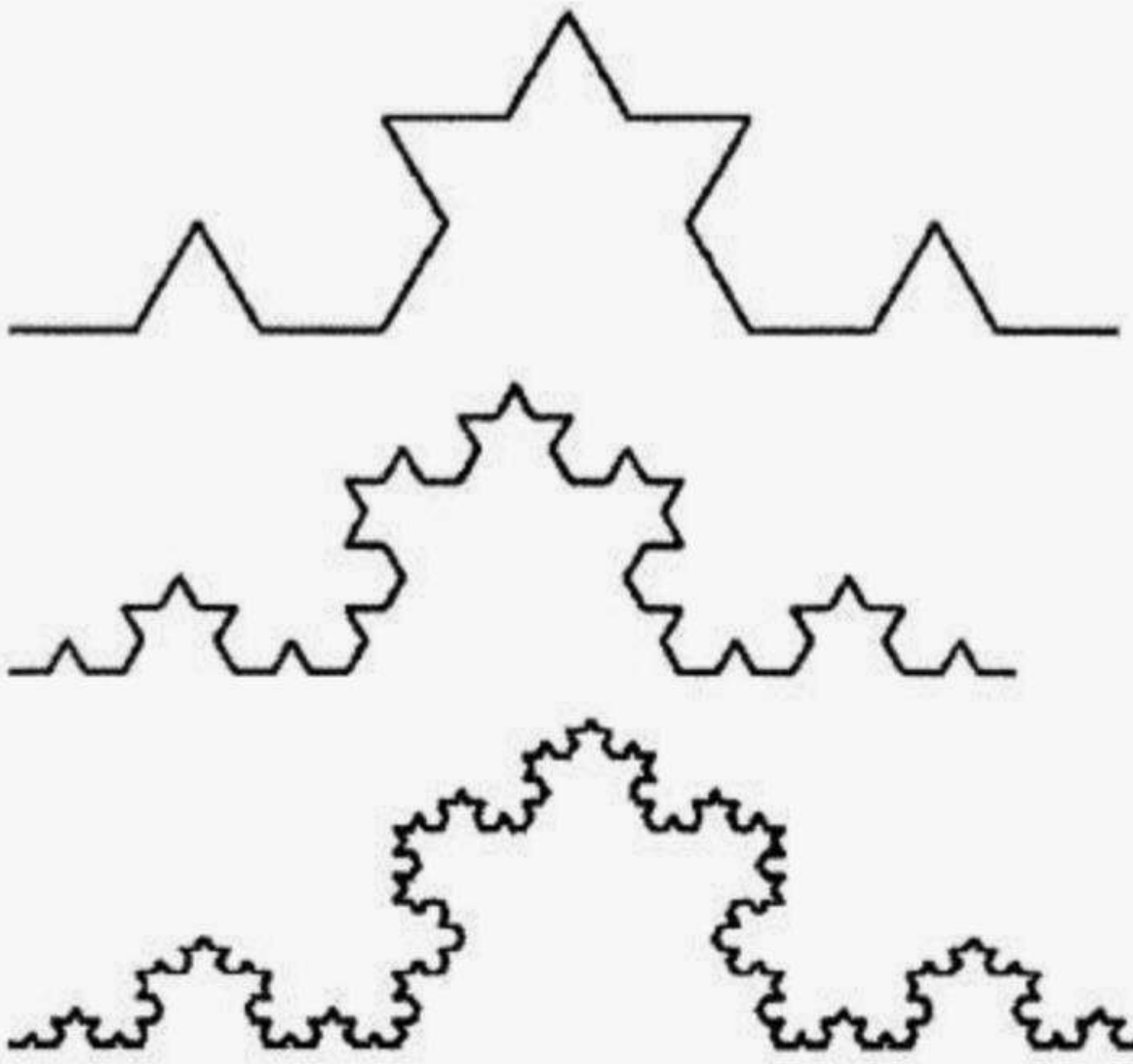
$\frac{1}{3}$

طول پاره‌خط اصلی را دارند."



۳. قاعده مربوط به منحنی کک را در مورد شکل حاصل به کار گیرید.

این کار را مداوم تکرار کنید. برای مثال، نتیجه دومین، سومین، و چهارمین کاربرد قاعده را در زیر می‌بینید:



این شکل آخر کمی شبیه یک خط ساحلی تمام و کمال به نظر می‌رسد.

(درواقع، اگر این صفحه را ۹۰ درجه به سمت چپ بگردانید و نگاه سریعی بیندازید، درست شبیه

@degar_goonesh

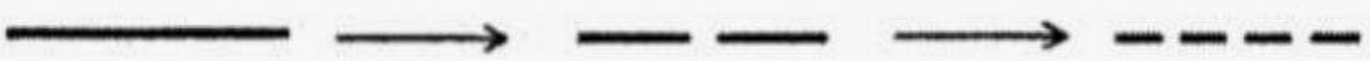
ساحل غربی آلاسکا به نظر می‌رسد.) توجه کنید که درواقع خودماننده است؛ تمامی زیرشکل‌ها[۳۹۹]، و زیرشکل‌های آن، و الی آخر، شکلی مشابه منحنی کلی را دارند. اگر قاعده منحنی کک را بی‌نهایت بار به کار می‌بردیم، شکل در تعداد بینهایتی از مقیاس‌ها خودماننده به نظر می‌رسید - یک فراکتال کامل. البته خط ساحلی واقعی خودماننده نیست.

اگر به یک بخش کوچک از خط ساحل نگاه کنید، دقیقا همان شکل کل ساحل را ندارد، اما به طرق مختلفی مشابه به نظر می‌رسد (یعنی، تاب‌دار و ناصاف). افزون بر این، در اشیای دنیای واقعی، خودمانندگی در مقیاس‌های بی‌نهایت کوچک برقرار نیست. ساختارهای دنیای واقعی از جمله خط‌های ساحلی اغلب به صورت مختصر "فراکتال" نامیده می‌شوند، اما درست‌تر آن است که آنها را "شبه فراکتال" بنامیم، بخصوص اگر ریاضیدانی صدای ما را می‌شنود.

فراکتال‌ها تصور آشنای ما از بعد فضایی را زیر و رو می‌کنند. (۱۸) خط تک‌بعدی است، سطح دوبعدی است، و جسم سه‌بعدی است. منحنی کک چگونه است؟

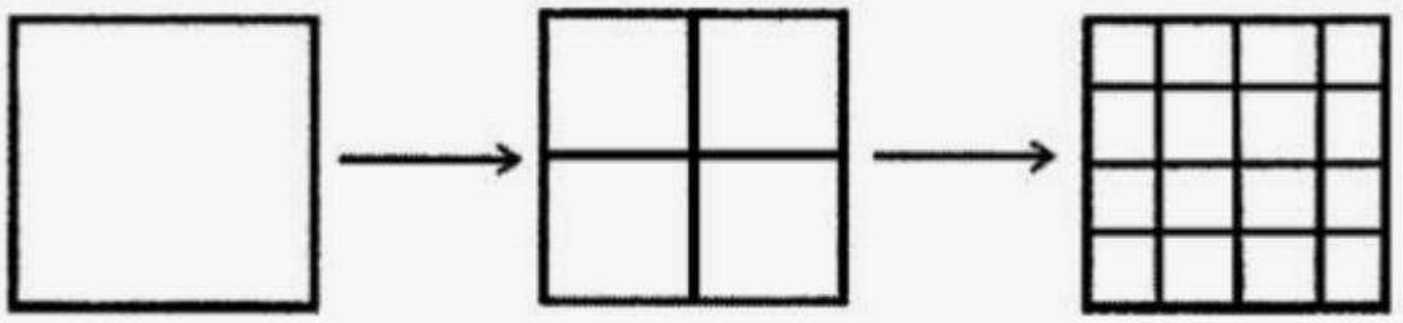
اول، اجازه بدهید بررسی کنیم که بعد برای اشیای منظم هندسی، از قبیل خط و مربع و مکعب به چه معناست.

از پاره‌خط آشنایمان آغاز کنید. دو نیمه‌اش کنید (یعنی به دو تکه مساوی تقسیمش کنید). سپس پاره‌خط‌های حاصل را دو نیمه کنید، و در هر سطح به دو نیمه کردن هر پاره‌خط ادامه دهید:



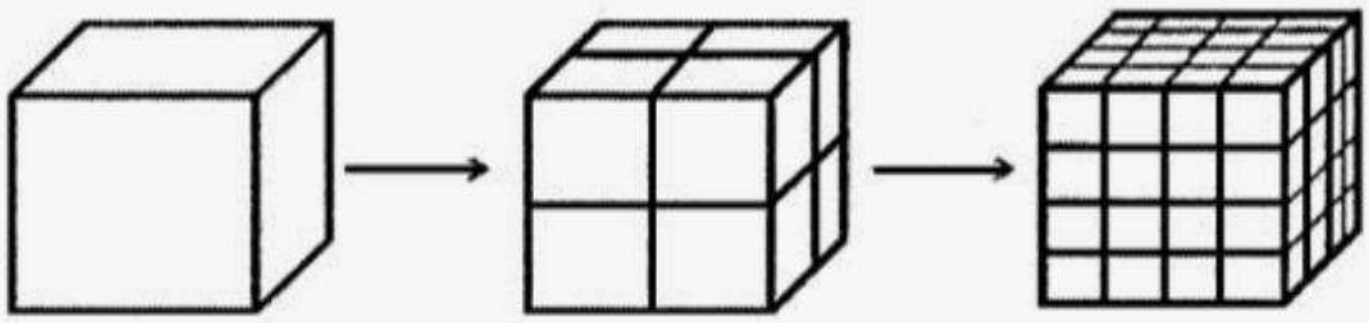
هر سطح از دو نیمه سطح قبل تشکیل شده است.

حال با مربع آغاز کنید. هر ضلع را دو نیمه کنید. سپس اضلاع مربع‌های حاصل را دو نیمه کنید، و در هر سطح به دو نیمه کردن هر ضلع ادامه دهید:



هر سطح از چهار نسخه یک چهارم سطح قبل ساخته شده است.

حالا می‌توانید نحوه ادامه کار را حدس بزنید، یک مکعب را بردارید و تمامی وجوه آن را دو نیمه کنید، به دو نیمه کردن وجوه مکعب‌های حاصل ادامه دهید:



هر سطح از هشت نسخه یک هشتم سطح قبل ساخته شده است.

این زنجیره معنایی از دانش‌واژه بعد را به دست می‌دهد. به‌طورکلی، هر سطح، از نسخه‌های کوچکتر سطح قبلی ساخته شده است، جایی که تعداد نسخه‌ها ۲ به توان بعد (۲) است. برای خط، در هر سطح

$$۲^{۱} = ۲$$

نسخه؛ برای مربع، در هر سطح

$$۲^{۲} = ۴$$

نسخه؛ و برای مکعب، در هر سطح

$$۲^{۳} = ۸$$

نسخه. به همان شکل، اگر در هر سطح به جای دو نیمه کردن پاره‌خط‌ها آنها را به سه قسمت کنید، هر سطح از ۳ نسخه سطح قبل ساخته می‌شود. آنچه را گفتم به صورت فرمول کلی زیر جمع‌بندی می‌کنم:

با تقسیم طول اضلاع شیء اصلی به عدد،x یک ساختار هندسی را به وجود آورید. در این حال هر سطح از x نسخه سطح قبلی ساخته شده است.

در واقع، طبق این تعریف از بعد، خط تک بعدی است و مربع دو بعدی و مکعب سه بعدی است. همه‌چیز خوب و خوش پیش می‌رود.

حال اجازه بدهید تعریفی نظیر آن را در مورد شیئی که با قاعده کک ساخته شده است به کار بریم. در هر سطح، پاره‌خط‌های شیء از قبل سه بار کوچک‌ترند، و هر سطح شامل چهار نسخه از سطح قبلی است. طبق تعریفی که در بالا آمد، این‌که ۳ مساوی ۴ است باید درست باشد. بعد چه مقداری است؟ برای روشن کردن آن، محاسبات را دور از چشم شما انجام می‌دهم (در یادداشت‌ها به تفصیل آمده است(۳)، (۱۹) و گواهی می‌دهم که طبق فرمول ما، بعد تقریبا مساوی با ۱.۲۶ است. یعنی، منحنی کک نه یک بعدی است نه دو بعدی، بلکه بین آنهاست. ابعاد فراکتال به طور شگفت‌آوری رقم صحیح نیستند. این چیزی است که فراکتال‌ها را این‌قدر عجیب می‌کند.

در یک کلام، بعد فراکتال تعداد نسخه‌های یک شیء خودماننده در هر سطح از بزرگ‌نمایی شیء را مشخص می‌کند. به همین صورت، بعد فراکتال مشخص می‌کند که چگونه اندازه (یا سطح یا حجم) کلی یک شیء درحالی‌که سطح بزرگ‌نمایی متغیر است، تغییر می‌کند. برای مثال، اگر طول کلی منحنی کک را هر بار که قاعده به کار می‌رود، اندازه بگیرید، پی می‌برید که هر بار طول به مقیاس

$$\frac{۴}{۳}$$

افزایش یافته است. تنها فراکتال‌های کامل -آنهایی که میزان بزرگنمایی‌شان به بینهایت می‌رسد - بعد فراکتال دقیق دارند. در مورد اشیای شبه فراکتال و محدود دنیای واقعی، از قبیل خط‌های ساحلی، فقط می‌توانیم بعد فراکتال تقریبی را اندازه بگیریم.

شاهد کوشش‌های بسیاری برای توضیح شهودی معنای بعد فراکتال بوده‌ام. برای مثال، گفته شده که بعد فراکتال بیانگر "ناصافی"، "ناهمواری"، "دندانه دندانه بودن[۴۰۰]" یا "بغرنجی" یک شی؛ درجه "تکه‌تکه بودن[۴۰۱]"؛ و چگونگی "تراکم ساختار"است. برای مثال، خط ساحل ایرلند (شکل ۲-۷) و افریقای جنوبی (شکل ۴-۷) را مقایسه کنید. اولی بعد فراکتال بیشتری از دومی دارد.



شکل ۴-۷. خط ساحل افریقای جنوبی

توضیحی که من خیلی به آن علاقه دارم تصور نسبتا شاعرانه‌ای است مبنی بر این‌که بعد فراکتال "مشخص می‌کند آبشاری از جزئیات"(۲۰) یک شیء را. یعنی، درحالی‌که در آبشار

بی‌نهایت خودمانندگی عمیق‌تر و عمیق‌تر پایین می‌روید، جزئیاتی را که در هر مقیاس می‌بینید اندازه‌گیری می‌کند.

برای ساختارهایی که فراکتال نیستند، مثل یک تیله گرد و صاف، اگر با بزرگ‌نمایی فزاینده به نگاه کردن به ساختار ادامه دهید، سرانجام به سطحی می‌رسید که هیچ‌گونه جزئیات جالبی ندارد. فراکتال‌ها، از طرف دیگر، در تمامی سطوح جزئیات جالبی دارند، و بعد فراکتال به یک معنا مقیاس جالب بودن جزئیات را همچون تابعی از بزرگنمایی لازم برای دیدن آن در هر سطح، اندازه‌گیری می‌کند.

به این دلیل است که بعد فراکتال به عنوان شیوه‌ای برای اندازه‌گیری پیچیدگی جلب نظر کرده است، و دانشمندان بسیاری این مقیاس را در مورد پدیده‌های دنیای واقعی به کار گرفته‌اند. اما ناهمواری یا آبشار جزئیات تنها شکل پیچیدگی نیستند که می‌خواهیم آن را اندازه‌گیری کنیم.

پیچیدگی به عنوان درجه سلسله مراتب

هربرت سیمون[۴۰۲] در سال ۱۹۶۲ در مقاله مشهورش به نام "معماری پیچیدگی" مطرح کرد که پیچیدگی یک سیستم را می‌توان برحسب سلسله‌مراتب تشخیص داد: "سیستم پیچیده متشکل از زیرسیستم‌هایی است، که هریک نیز زیرسیستم‌هایی دارند، و به همین منوال.، سیمون دانشمند علوم سیاسی و اقتصاددان و روان‌شناس (و سایر چیزها) بود، یک فرد جامع الاطراف درخشان که شاید لازم بود یک فصل کامل این کتاب را به او اختصاص دهیم.

سیمون مطرح کرد که مهمترین مشخصه مشترک سیستم‌های پیچیده سلسله‌مراتب و تجزیه‌پذیری نسبی[۴۰۳] است. سیمون تعدادی سیستم پیچیده را فهرست می‌کند که به صورت سلسله‌مراتبی سازمان یافته‌اند - برای مثال، بدن از اندام‌ها تشکیل شده، که به نوبه خود از سلول تشکیل شده‌اند، که به نوبه خود از زیرسیستم‌های سلولی تشکیل شده‌اند، و به همین منوال. این تصور به جهاتی مشابه فراکتال‌هاست، به این معنا که الگوهای خود-مانند در تمامی سطوح وجود دارند.

تجزیه‌پذیری نسبی به این واقعیت اشاره دارد که در سیستم‌های پیچیده، برهم‌کنش در درون زیرسیستم‌ها بیشتر از برهم‌کنش در میان زیرسیستم‌هاست. برای مثال، هر سلول اندام‌واره زنده یک شبکه سوخت و ساز[۴۰۴] دارد که شامل تعداد عظیمی برهم‌کنش در میان زیر لایه‌های بافتی[۴۰۵] است، بسیار بیشتر از آنچه بین دو سلول مختلف رخ می‌دهد.

سیمون اعتقاد دارد که تکامل تنها زمانی می‌تواند سیستم‌های پیچیده را در طبیعت طراحی کند که بتوان آنها را به عنوان بلوک‌های ساختمانی کنار هم قرار داد - یعنی تنها اگر سلسله‌مراتبی و به طور نسبی تجزیه‌پذیر باشند، سلول می‌تواند تکامل پیدا کند و بعد تبدیل به یک بلوک ساختمانی برای اندام سطح بالاتر، و آن نیز به نوبه خود تبدیل به یک بلوک

ساختمانی برای اندام سطح بالاتر شود، و به همین منوال. سیمون اشاره می‌کند که آنچه مطالعه سیستم‌های پیچیده به آن نیاز دارد "شکلی از نظریه سلسله‌مراتب" است.

افراد متعدد دیگری این تصور از سلسله‌مراتب را به عنوان شیوه ممکنی برای اندازه‌گیری پیچیدگی مورد بررسی قرار داده‌اند. یکی از آنان زیست‌شناس تکاملی دانیل مک‌شی[۴۰۶] است"، او مدت‌هاست می‌کوشد از این تصور که پیچیدگی اندام‌واره‌ها در جریان تکامل افزایش می‌یابد سردربیاورد، او یک مقیاس سلسله‌مراتبی را پیشنهاد می‌کند که می‌توان آن را برای اندازه‌گیری درجه سلسله‌مراتب اندام‌واره‌های زیستی به کار (۲۳). برد مقیاس مک‌شی برحسب سطوح شیانگی[۴۰۷] تعریف می‌شود: یک موجودیت در سطحی بالاتر، موجودیت‌هایی از سطح پایین‌تر را همچون بخش‌هایی در خود جای دهد. مک‌شی مورد زیستی زیر را به عنوان نمونه‌ای از آشیانگی مطرح می‌کند:

سطح ۱: سلول‌های پیش‌هسته‌ای[۴۰۸](ساده‌ترین سلول‌ها، از قبیل باکتری)

سطح ۲: مجموعه‌های[۴۰۹] اندام‌واره‌های سطح ۱، از قبیل سلول‌های هسته‌دار[۴۱۰] (سلول‌های پیچیده‌تری که نیاکان تکاملی آنها از آمیختگی سلول‌های پیش‌هسته‌ای منشأ گرفته‌اند.)

سطح ۳: مجموعه‌های اندام‌واره‌های سطح ۲، یعنی تمامی اندام‌واره‌های چند سلولی.

سطح ۴: مجموعه‌های اندام‌واره‌های سطح ۳، از قبیل گروه‌های[۴۱۱]"حشرات و "اندام‌واره‌های گروه‌زی[۴۱۲]" از قبیل عروس دریایی پرتغالی[۴۱۳] می‌توان گفت حداقل تا آنجا که آشیانگی مطرح است، هر سطح از سطح قبلی پیچیده‌تر است. البته همان‌طور که مک‌شی اشاره می‌کند، آشیانگی تنها ساختار یک اندام‌واره را توضیح می‌دهد، و نه کارکردهای آن را.

مک‌شی، هم از داده‌های فسیل‌ها و هم اندام‌واره‌های مدرن بهره گرفت تا نشان دهد که حداکثر سلسله‌مراتب مشاهده شده در اندام‌واره‌ها در مدت تکامل افزایش می‌یابد. از این‌رو، این یکی از شیوه‌هایی است که از طریق آن پیچیدگی به نحوی قابل اندازه‌گیری همراه با تکامل افزایش می‌یابد، گرچه اندازه‌گیری درجه سلسله‌مراتب در اندام‌واره‌های واقعی می‌تواند شامل نوعی ذهنیت در تعیین این باشد که چه چیز "بخش[۴۱۴]" یا حتی "سطح"[۴۱۵] به حساب می‌آید.

مقیاس‌های متعدد دیگری برای پیچیدگی وجود دارد که امکانی برای پرداختن به آن ندارم. هر کدام از این مقیاس‌ها مطلبی را درباره تصور پیچیدگی می‌رساند اما همه آنها، هم محدودیت نظری و هم محدودیت عملی دارند، و تاکنون در توصیف سیستم‌های دنیای واقعی به ندرت مفید بوده‌اند. تنوع مقیاس‌هایی که مطرح شده است نشان می‌دهد که تصوراتی از پیچیدگی که می‌کوشیم به آنها دست یابیم، ابعاد برهم‌کنش بسیار متفاوتی دارند و احتمالا یک مقیاس اندازه‌گیری واحد برای تبیین آنها کافی نیست.

بخش دوم: حیات و تکامل در کامپیوترها

طبیعت اندک اندک از چیزهای بی‌جان به حیات حیوانی می‌رسد، به شیوه‌ای که تعیین مرز دقیق تمایز امکان‌پذیر نیست. (۱)

ارسطو، تاریخ حیوانات[۴۱۶] (۱)

همه ما به طور شهودی می‌دانیم که حیات چیست: خوردنی یا دوست داشتنی، یا مهلک است.

جیمز لاولاک، قرن‌ها زندگی گای (۲)

فصل هشتم: برنامه‌های کامپیوتری تولیدمثل‌کننده حیات چیست؟

فصل پنجم بخشی از تاریخ اندیشه‌هایی را دربرمی‌گرفت که توضیح می‌دهند حیات چگونه تکامل یافته است. اما چند نکته نادیده ماند، از جمله این‌که حیات در درجه اول چگونه پدید آمد؟ و دقیقا چه چیزی بنیاد حیات است؟

همان‌طور که می‌توانید تصور بکنید، هر دو پرسش در دنیای علمی به شدت مورد اختلاف است و تاکنون هیچ‌کس به آنها پاسخی قطعی نداده است.

گرچه در اینجا به نخستین پرسش نمی‌پردازم، در جامعه سیستم‌های پیچیده پژوهش‌های خیره‌کننده‌ای درباره آن صورت گرفته است. (۳)

پرسش دوم - این‌که حیات دقیقا چیست؟ -احتمالا از زمانی که "انسان" پا به عرصه وجود گذاشته است به ذهن او خطور کرده است. هنوز توافق کاملی در میان دانشمندان یا عموم مردم در مورد تعریف حیات وجود ندارد.

پرسش‌هایی از قبیل این‌که "حیات چه موقع آغاز می‌شود؟" یا "در سایر سیاره‌ها حیات چه شکلی می‌تواند به خود بگیرد؟" کماکان موضوع مباحثه‌ای پرشور، و گهگاه تند است.

ایده خلق حیات مصنوعی نیز بسیار قدیمی است، و تا افسانه‌های گولم[۴۱۷] و پیگمالیون[۴۱۸] اثر اوید[۴۱۹]" به عقب برمی‌گردد، و در قرن نوزدهم در داستان هیولای فرانکشتین ادامه پیدا می‌کند و در عصر حاضر در فیلم‌هایی از قبیل بلیدرانر[۴۲۰] و ماتریکس[۴۲۱] و بازی‌های کامپیوتری از قبیل "شبیه‌سازی حیات[۴۲۲]" بازتاب دارد.

این آثار داستانی، روایت‌های جدیدی از پرسش "حیات چیست؟" را با استفاده از فناوری‌های نو حکایت و ستایش می‌کنند: آیا امکان دارد کامپیوترها و ربوت‌ها را "زنده" فرض کرد؟ این پرسش، موضوعات مربوط به محاسبه و حیات و تکامل را که پیش از این به طور جداگانه مطرح شد، به هم پیوند می‌دهد.

می‌توانید از ده زیست‌شناس بپرسید که ده لازمه اصلی حیات چیست و هر بار فهرست متفاوتی را به دست آورید. اکثر آنها احتمالا خودسامانی، سوخت و ساز، تولیدمثل[۴۲۳]، غریزه بقا، تکامل و انطباق را در فهرست خود می‌آورند. برای شروع این پرسش را مطرح می‌کنم، آیا می‌توانیم این فرایندها را به طور ماشین‌وار بفهمیم و در کامپیوتر ذخیره کنیم؟

به دلایل زیر بسیاری پاسخ "نه" تند و تیزی به این پرسش داده‌اند:

خودسامانی: کامپیوتر به تنهایی کاری از عهده‌اش برنمی‌آید؛ تنها کاری را می‌تواند بکند که انسان‌ها برای انجام آن او را برنامه‌ریزی کرده‌اند.

سوخت و ساز: برخلاف اندام‌واره‌های زنده، کامپیوتر نمی‌تواند انرژی مورد نیازش را خلق کند یا

از محیط جمع‌آوری کند؛ انسان باید به آن انرژی بدهد (برای مثال، برق).
تولیدمثل: کامپیوتر نمی‌تواند خودش را بازتولید کند؛ برای انجام این کار باید حاوی توضیحی از خود باشد، و آن توضیح باید حاوی توضیحی از خود باشد، و به همین منوال تا بی‌نهایت.
غربزه بقا: کامپیوتر به ادامه حیات خود و به میزان موفقیتی که کسب می‌کند بهایی نمی‌دهد. (برای مثال، در سخنرانی یک روان‌شناس برجسته درباره موفقیت برنامه‌های کامپیوتری شطرنج‌باز شنیدم که با تأکید می‌گفت "ممکن است دیپ‌بلو[۴۲۴] گاسپاروف را شکست داده باشد، اما از این کار لذتی نبرده."
تکامل و انطباق: کامپیوتر نمی‌تواند مستقلا تکامل پیدا کند یا خود را انطباق دهد؛ او محکوم است تنها به شیوه‌هایی که برنامه‌نویس از قبل تعیین کرده است تغییر کند.

گرچه بسیاری از مردم هنوز به این استدلال‌ها باور دارند، ادعا می‌شودکه تمامی آنها در رشته حیات مصنوعی به صورت‌های مختلفی رد شده‌اند، رشته‌ای که موضوع آن شبیه‌سازی و "آفرینش" حیات در کامپیوترها است.(۴) در این فصل و فصل بعدی بر موضوعاتی متمرکز می‌شوم که از نزدیک به داروین گرایی مربوط هستند - یعنی تولیدمثل و تکامل.

تولیدمثل در کامپیوترها

برهان مربوط به تولیدمثل از همه موارد ریاضی‌تر است: توضیح می‌دهد که تولیدمثل در کامپیوتر منجر به تسلسل[۴۲۵] بی‌نهایت می‌شود.
اجازه بدهید از طریق ساده‌ترین نسخه مسئله تولیدمثل کامپیوتر این موضوع را بررسی کنیم: یک برنامه کامپیوتری بنویسید که نسخه دقیقی از خود را چاپ کند و نه چیز دیگری را.
من برنامه زیر را به یک زبان ساده کامپیوتری نوشته‌ام، که حتی غیر برنامه‌نویسان بتوانند آن را بفهمند (در واقع یک شبه زبان است، با چند فرمان[۴۲۶] که اکثر زبان‌های واقعی فاقد آن هستند، اما در هر صورت دور از ذهن نیست و برای ساده کردن موضوع از آن استفاده شده است.)
طرح اولیه‌ای از برنامه به شکل زیر است. با نام برنامه آغاز می‌کنم:
program copy حال باید دستوری[۴۲۷] را اضافه کنم که نام برنامه را چاپ (print) کند:
("program copy") margorp ypoc tnirp فرمان چاپ صرفا حروف بین اولین و آخرین علامت نقل‌قول را بر روی نمایشگر کامپیوتر نشان می‌دهد، و به سر سطر می‌رود. حال نیاز دارم دستور را اضافه کنم که دومین خط را چاپ کند:

```
program copy
print ("program copy")
print (print ("program copy")")
```

توجه کنید که چون می‌خواهم برنامه نسخه دقیقی از خود را چاپ کند،

دومین فرمان چاپ باید شامل تورفتگی[۴۲۸]" باشد که قبل از اولین فرمان چاپ قرار دادم، به اضافه دو علامت نقل‌قول، که حال خود آنها نقل‌قول می‌شوند (فرمان چاپ هر چیزی از جمله علامت‌های نقل‌قول را که بین بیرونی‌ترین علامت‌های نقل‌قول هستند چاپ می‌کند). حال یک خط دیگر نیاز دارم که آن خط سوم را چاپ کند:

program copy

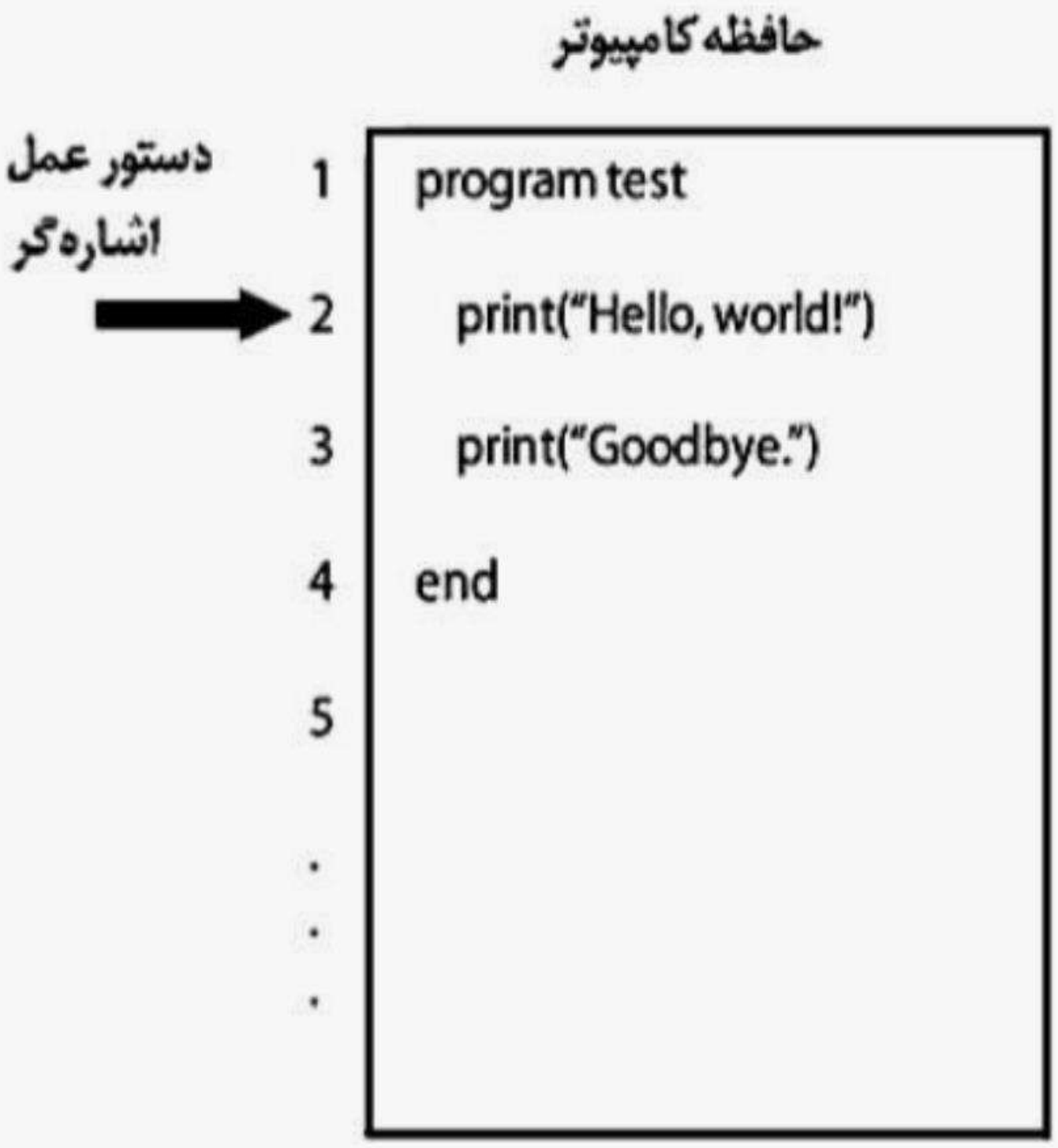
tnirp ("program copy") print (print ("program copy")") tnirp (print ("("program copy")") و به همین منوال. تا اینجا احتمالا متوجه شده‌اید که این استراتژی، که در آن هر فرمان نسخه دقیقی از فرمان پیش از خود را چاپ می‌کند، چگونه منجر به یک تسلسل بی‌نهایت می‌شود. چگونه می‌توان از این وضعیت اجتناب کرد؟ قبل از این‌که به خواندن ادامه دهید، شاید بهتر باشد چند لحظه‌ای را صرف حل معمای زیر کنید.

همان‌طور که کاشف به عمل آمد، این مسئله به ظاهر ساده در آثار کرت گودل و آلان تورینگ بازتاب دارد، که در فصل چهارم به آن اشاره کردم. حل آن نیز شامل وسایلی ضروری است که خود سیستم‌های زیستی به کمک آن تسلسل بی‌نهایت را دور می‌زنند. این راه‌حل را جان فون نویمن[۴۲۹]، ریاضیدان قرن بیستم مجار در زمینه مسئله بغرنج‌تری، به طرزی بدیع به دست آورد.

فون نویمن در طیفی از تخصص‌ها از مکانیک کوانتوم گرفته تا علم اقتصاد، پیشرو، و از جمله طراحان یکی از اولین کامپیوترهای الکترونیک بود. طراحی او شامل یک واحد پردازشگر مرکزی[۴۳۰] بود که با یک حافظه دستیابی تصادفی[۴۳۱] تبادل اطلاعات می‌کرد که هم برنامه‌ها و هم داده‌ها می‌توانند در آن ذخیره شوند. این کماکان طراحی بنیادی تمامی کامپیوترهای استاندارد امروزی است. فون نویمن درعین‌حال یکی از نخستین دانشمندانی بود که درباره رابطه بین محاسبه و زیست‌شناسی عمیقا اندیشید. او آخرین سال‌های زندگی‌اش را وقف حل این مسئله کرد که چگونه امکان دارد ماشین بتواند تولیدمثل کند؛ راه‌حل او اولین طراحی کامل برای یک ماشین تولیدمثل‌کننده بود. این کامپیوتر خودکپی‌کننده[۴۳۲]"که آن را به شما نشان خواهم داد از "خودکار[۴۳۳] تولیدمثل‌کننده" او الهام گرفته بود و به شیوه ساده‌ای اصول بنیادین آن را نمایش می‌دهد.

قبل از این‌که برنامه تولیدمثل‌کننده را به شما نشان دهم، لازم است چند نکته دیگر را در مورد زبان برنامه‌نویسی مورد استفاده‌ام توضیح دهم.

تصویری از حافظه کامپیوتر را که در شکل ۱-۸ آمده در نظر بگیرید. در نمونه بسیار ساده ما، حافظه کامپیوتر شامل مکان‌های حافظه شماره‌گذاری شده یا "نشانی" هایی[۴۳۴] است، که در این مورد ۱ تا ۵ و پس از آن شماره‌گذاری شده‌اند. هر مکان حافظه حاوی نوعی متن است..



شکل ۸-۱. تصویری ساده شده از حافظه کامپیوتر، با مکان‌های حافظه[۴۳۵] ۱ تا ۵ و پس از آن، ه چهارتای آنها حاوی خطهای برنامه هستند. دستورعمل اشاره‌گر[۴۳۶] دستور عملی را نشان می‌دهد که کامپیوتر در حال اجرایش می‌باشد. خطها بعضی اوقات شامل فاصله‌های راهنما هستند[۴۳۷] که در زمان اجرای دستور عمل نادیده گرفته می‌شوند.

این خطهای متن را کامپیوتر به عنوان فرمان‌هایی در برنامه یا به عنوان داده‌هایی تفسیر می‌کند که مورد استفاده برنامه قرار می‌گیرد. برنامه‌ای که در حال حاضر در حافظه ذخیره شده است، پس از اجرا، مطلب زیر را چاپ می‌کند.

```
Hello, world!
Goodbye.
```

برای این کار، کامپیوتر یک "دستور عمل اشاره‌گر" دارد - عددی که آن هم در حافظه ذخیره شده، و همیشه مساوی مکان حافظه‌ای است که دستورعمل در دست اجرای کامپیوتر در آن قرار دارد. این دستور عمل اشاره‌گر - که به طور خلاصه آن را ip می‌نامیم - در ابتدا با مکان حافظه اولین خط برنامه مساوی است. می‌گوییم که به آن دستورعمل "اشاره می‌کند". در هر گام محاسبه دستور عملی که ip به آن اشاره می‌کند اجرا می‌شود، و ip یک واحد افزایش پیدا

می‌کند.

برای مثال، در شکل ۱-۸، مقدار ip مساوی با ۲ است، و می‌گوییم که ip اشاره دارد به خط.print ("Hello, world!")

ip را یک متغیر می‌دانیم چون درحالی‌که محاسبه انجام می‌شود، مقدار آن تغییر می‌کند.

می‌توانیم متغیر دیگری را نیز تعریف کنیم،،line (n) که مساوی رشته حرف‌هایی است که در مکان حافظه n قرار دارند. برای مثال، دستور print (line (۲)) مطلب زیر را چاپ می‌کند

```
print ("Hello, world!")
```

سرانجام زبان ما شامل یک فرمان حلقه[۴۳۸] است. برای مثال خط‌های زیر در کد کامپیوتری

```
x = 0
loop until  x = 4
{
print ("Hello, world!")
x = x + 1
}
```

مطلب زیر را چاپ می‌کند:

```
Hello, world!
Hello, world!
Hello, world!
Hello, world!
```

فرمان‌های درون آکلاد ({}) تا زمانی که شرط حلقه تحقق پیدا کند (در اینجا x = ۴) تکرار می‌شود. متغیر x به عنوان یک شمارنده[۴۳۹] به کار می‌رود از صفر آغاز می‌شود و هر بار که حلقه اجرا می‌شود مقدار ۱ به آن اضافه می‌شود. وقتی که به ۴ می‌رسد، حلقه توقف می‌کند.

حال برای برنامه خودکپی‌کننده آماده شده‌ایم، که در شکل ۲-۸ به طور کامل آمده است. بهترین راه برای فهمیدن هر برنامه کامپیوتری این است که به طور دستی آن را شبیه‌سازی کنیم؛ یعنی، خط به خط آن را مرور کنیم و رد کاری را که به عهده دارد بگیریم.

حافظه کامپیوتر

```
1    program selfcopy
2        L = ip – 1
3        loop until line[L] = "end"
4        {
5            print(line[L])
6            L = L + 1
7        }
8        print("end")
9    end
```

فرض کنید که این برنامه، به همان صورتی که در شکل ۲-۸ آمده، در حافظه کامپیوتر بار شده است، باز هم فرض کنید که یک کاربر از راه می‌رسد و کلمه selfcopy را روی خط فرمان[۴۴۰] کامپیوتر تایپ می‌کند. این به کامپیوتر پیام می‌دهد که تفسیر برنامه selfcopy را آغاز کند. مفسر[۴۴۱] ـ که بخشی از سیستم‌عامل کامپیوتر است - دستور عمل اشاره‌گر را مساوی ۱ می‌کند، که اشاره به نام برنامه دارد. سپس ip خط به خط پایین می‌رود، و هر دستور عمل را اجرا می‌کند.

در مکان حافظه ۲، متغیر L مساوی ip-۱ قرار داده می‌شود. به خاطر بیاورید که ip مکان دستور عملی است که در دست اجراست. بنابراین وقتی خط ۲ اجرا می‌شود، ip مساوی با ۲ و l مساوی با ۱ = ۱ - ۲ است (توجه داشته باشید که تا وقتی که L دوباره تنظیم نشود، مساوی با ۱ باقی می‌ماند، گرچه وقتی هر دستورعمل اجرا می‌شود ip تغییر می‌کند.

سپس، برنامه وارد یک حلقه می‌شود، و تا زمانی که line (L) مساوی رشته حرف end شود، تکرار می‌شود. به خاطر داشته باشید که line (L) مساوی با رشته واقع در مکان حافظه L است.

اکنون، L مساوی ۱ قرار داده می‌شود، در نتیجه line (L) مساوی رشته program selfcopy است. این معادل end (پایان) نیست، در نتیجه برنامه ادامه پیدا می‌کند. در درون حلقه، line (L) چاپ می‌شود و L افزایش پیدا می‌کند. ابتدا، وقتی L = ۱ است program selfcopy چاپ می‌شود، سپس L مساوی با ۲ قرار داده می‌شود.

اکنون line (L) دومین خط برنامه است، یعنی l = ip.-۱ دوباره، این رشته معادل end (پایان) نیست، در نتیجه حلقه ادامه پیدا می‌کند. به این ترتیب، هر خط برنامه چاپ می‌شود. یکی از خطهایی که بسیار جالب است خط ۵ است: وقتی خط ۵ در دست اجراست و L = ۵ است، دستور عمل،((print (line (L خود را به چاپ می‌رساند. وقتی L = ۹ و line (L) مساوی end است، حلقه به انتها می‌رسد. در این نقطه، خطهای ۱ تا ۸ به چاپ رسیده است. دستورعمل اشاره‌گر به خط ۸ حرکت می‌کند (دستور عملی که بلافاصله بعد از حلقه قرار دارد)، که وقتی اجرا شود، رشته "end" را چاپ می‌کند، و خودکپی کردن به پایان می‌رسد.

ماهیت خودکپی کردن برنامه در این است که از اطلاعاتی که در حافظه ذخیره شده به دو شیوه استفاده می‌کند: اول به شکل دستور عملی که باید اجرا شود، دوم به صورت داده‌هایی که باید مورد استفاده آن دستورعمل‌ها قرار گیرند (یعنی چاپ شوند). این کاربرد دوگانه اطلاعات چیزی است که به ما امکان می‌دهد از تسلسل بی‌نهایت اجتناب کنیم، از آن نوعی که پیش از این با نخستین تلاش من برای نوشتن یک برنامه خودکپی‌کننده به نمایش درآمد.

معنای عمیق‌تر برنامه کامپیوتری تولیدمثل‌کننده کاربرد دوگانه اطلاعات در قلب معمای گودل نیز وجود دارد، که در جمله خودارجاع "این گزاره قابل اثبات نیست" نهفته است.

فهم این موضوع کمی بغرنج است. اول توجه داشته باشیم که این جمله را، مانند بسیاری دیگر از جمله‌های انگلیسی، می‌توان به دو شیوه بررسی کرد:

۱. به عنوان رشته‌ای الفبایی از حروف، فاصله‌ها، و نقطه‌گذاری‌ها، که در یک جمله آمده.

۲. به عنوان معنای[۴۴۲] آن رشته الفبایی، به صورتی که فرد انگلیسی زبان آن را می‌فهمد.

برای این‌که موضوع روشن‌تر شود، اجازه بدهید این رشته الفبایی را S بنامیم. یعنی، "این گزاره اثبات‌پذیر نیست." = S. حال می‌توانیم فکت‌هایی را درباره S مطرح کنیم: برای مثال، شامل ۲۶ حرف، چهار فاصله، و یک نقطه است.

اجازه بدهید معنای این جمله را M بنامیم. می‌توانیم M را به این صورت بازنویسی کنیم: "گزاره S اثبات‌پذیر نیست." می‌توانید M را به عنوان یک "فرمان" و S را به عنوان "داده" آن فرمان در نظر بگیرید. موضوع عجیب (و جالب) این است که داده S همان چیزی است که فرمان M هست. دلیل اصلی این‌که گودل توانست جمله انگلیسی‌اش را به معمایی در ریاضی تبدیل کند این بود که او توانست M را به یک گزاره ریاضی و S را به عددی که رشته علایم آن گزاره ریاضی را کدگذاری می‌کند تعبیر کند.

همه اینها مسائل بغرنجی هستند. این‌گونه تمایز بین رشته‌های تحت لفظی از علایم و معنای این رشته‌ها، و معماهایی که خود-ارجاعی می‌تواند به وجود بیاورد در کتاب داگلاس هوفستاتر، گودل، اشر، باخ: آمیزه‌ای گران‌بها و ابدی به‌تفصیل و به شیوه‌ای جذاب به بحث گذاشته شده است.

به همین شکل، این‌گونه کاربرد دوگانه اطلاعات در اثبات تورینگ در تصمیم‌ناپذیری مسئله توقف، نقشی اساسی دارد. H و H‘ را از فصل ۴ به خاطر می‌آورید؟ به یاد می‌آورید که H‘ چگونه روی کد خودش اجرا شد؟

یعنی H‘ درست مثل برنامه کامپیوتری تولیدمثل‌کننده در بالا، به دو صورت به کار گرفته شد: به عنوان یک برنامه تفسیر شده و به عنوان ورودی برای آن برنامه.

خودتکثیری[۴۴۳] در DNA

در اینجا ممکن است شکایت کنید که باز هم در حیطه ناملموس دردسرهای منطقی گرفتار شده‌ایم. اما فرصت کوتاهی به من بدهید تا دوباره به واقعیت برگردیم. موضوع خیلی حیرت‌آور این است که این کاربرد دوگانه اطلاعات، در شیوه‌ای که DNA خود را تکثیر می‌کند نقش کلیدی دارد. همان‌طور که در فصل ۶ توضیح دادم، DNA از رشته‌های نوکلئوتید ساخته شده است.

زیررشته‌های معینی (ژن‌ها) آمینو اسیدهای پروتئین‌ساز را کدگذاری می‌کنند، از جمله آنزیم‌ها را (نوع خاصی از پروتئین‌ها) که تأثیرگذارند بر دو نیمه شدن مارپیچ دوتایی و کپی کردن هر رشته از طریق RNA پیام‌رسان، ANR ناقل، ریبوزوم‌ها و غیره. در مقایسه‌ای بسیار خام، آن رشته‌های DNA که آنزیم‌های مجری کپی کردن را کدگذاری می‌کنند با خطهای کد در برنامه خودکپی‌کننده متناظرند. این "خطهای کد" وقتی در DNA اجرا می‌شوند که آنزیم‌ها به وجود می‌آیند و بر خود DNA اثر می‌گذارند، و آن را به صورت داده‌ای که باید دو نیمه شده و کپی شود تفسیر می‌کنند.

اما، شاید متوجه چیزی شده باشید که تا اینجا از نظر پنهان داشته بودم.

تفاوت بزرگی بین برنامه خودکپی‌کننده من و DNA تولیدمثل‌کننده وجود دارد. برنامه خودکپی‌کننده مستلزم مفسری برای اجرای آن است: یک دستورعمل اشاره‌گر که بر روی خطهای کد کامپیوتری حرکت می‌کند و یک سیستم‌عامل کامپیوتری برای اجرای آنها (برای مثال، این‌که عملا ذخیره کردن و بازیافت متغیرهای داخلی مثل ip و L را به انجام برساند، رشته‌های علایم را عملا چاپ کند، و غیره.) مفسر کاملا خارج از خود برنامه است.

در مقابل، در مورد DNA دستورعمل‌های لازم برای ایجاد "مفسر" RNA پیام‌رسان، RNA ناقل ریبوزوم‌ها، و تمامی وسایل دیگر ترکیب پروتئین - همراه با هر چیز دیگری در DNA کدگذاری می‌شوند. یعنی DNA نه تنها شامل کد "برنامه" خودتکثیرکننده است (یعنی،

آنزیم‌هایی که دو نیمه کردن و کپی کردن DNA را انجام می‌دهند) بلکه درعین‌حال مفسر خود را کدگذاری می‌کند (آن آلات و ادوات سلولی که DNA را به خود آن آنزیم‌ها ترجمه می‌کنند.)

خودکار تولیدمثل‌کننده فون نویمن

خودکار اصلی تولیدمثل‌کننده فون نویمن (که فون نویمن آن را به صورت ریاضی توضیح داد ولی عملا آن را نساخت) به شکل مشابهی نه تنها شامل یک برنامه خودکپی‌کننده بلکه درعین‌حال شامل وسایل لازم برای تفسیر خود بود. در نتیجه واقعا یک ماشین تولیدمثل‌کننده بود. این روشن می‌کند که چرا ساخته فون نویمن به طور قابل ملاحظه‌ای بغرنج‌تر از برنامه خودکپی‌کننده من است. این که خودکار تولیدمثل کننده فون نویمن در دهه ۱۹۵۰ صورت‌بندی شد، یعنی قبل از این‌که تولیدمثل زیست‌شناختی خوب فهمیده شود، شاهدی بر روشن‌بینی فون نویمن است. طراحی این ماشین خودکار و اثبات ریاضی درستی آن، در سال ۱۹۵۷ که فون نویمن درگذشت تقریبا کامل شده بود، او در ۵۳ سالگی و احتمالا به دلیل سرطان ناشی از فعالیتش روی بمب اتم و قرار گرفتن در معرض تشعشعات اتمی درگذشت.

همکار او آرتور برکس[۴۴۴] اثبات او را تکمیل کرد. اثر کامل سرانجام در ۱۹۶۶ منتشر شد، به صورت کتابی با عنوان نظریه خودکارهای تولیدمثل‌کننده، با ویرایش برکس.(۵)



جان فون نویمن، ۱۹۰۳-۱۹۵۷

طراحی فون نویمن برای یک خودکار تولیدمثل‌کننده از نخستین پیشرفت‌های واقعی در علم

حیات مصنوعی بود، و نشان داد که تولیدمثل ماشین‌ها در اصل امکان‌پذیر است، و "منطقی" برای تولیدمثل فراهم کرد که روشن شد شباهت‌های قابل ملاحظه‌ای با آن چیزی دارد که سیستم‌های زنده از آن استفاده می‌کنند.

فون نویمن تشخیص داد که این نتایج می‌توانند پیامدهای عمیقی داشته باشند. او در مورد برداشت عموم از امکانات ماشین‌های تولیدمثل‌کننده نگران بود، و می‌گفت تمایلی ندارد در رسانه‌های عمومی ذکری از "امکانات بالقوه[۴۴۵] تکثیری ماشین‌های آینده" به میان بیاید. مدتی طول کشید، اما رسانه‌های عمومی سرانجام به موضوع پی بردند. در سال ۱۹۹۹، دانشمندان کامپیوتر، ری کورزویل[۴۴۶] و هانس موراوک[۴۴۷]" در کتاب‌های غیرتخیلی (اما دور از ذهن) خودشان، عصر ماشین‌های معنوی و ربوت، به استقبال امکان تحقق ربوت‌های فوق‌هوشمند و تولیدمثل‌کننده رفتند، که باور داشتند در آینده‌ای نزدیک ساخته خواهند شد.۶) در سال ۲۰۰۰ پاره‌ای از مخاطرات نانوماشین‌های[۴۴۸] تولیدمثل‌کننده را بیل جوی[۴۴۹]، یکی از بنیان‌گذاران شرکت سان مایکروسیستمز[۴۵۰]، در مقاله‌ای در مجله وایرد[۴۵۱]، با عنوان "چرا در آینده به ما نیازی نیست"، به باد انتقاد گرفت؛ این مقاله امروزه بسیار مشهور (۶). است تا به حال هیچ یک از این پیش‌بینی‌ها تحقق نیافته است. اما ممکن است ماشین‌های پیچیده تولیدمثل‌کننده به‌زودی به واقعیت بپیوندند: ربوت‌شناسان[۴۵۲] هاد لیپسون[۴۵۳]؛ و همکاران او در دانشگاه کرنل هم اکنون نوعی ربوت تولیدمثل‌کننده را ساخته‌اند. (۸)

جان فون نویمن

جا دارد چند کلمه‌ای هم درباره خود فون نویمن حرف بزنیم که از مهم‌ترین و جذاب‌ترین شخصیت‌های علوم و ریاضیات در قرن بیستم است. اگر تا به حال چیزی درباره او نمی‌دانستید بهتر است حالا بدانید. با هر ملاکی، فون نویمن یک نابغه واقعی بود. در جریان زندگی نسبتا کوتاهش حداقل به شش رشته علمی خدماتی بنیادی کرد: ریاضیات، فیزیک، علم کامپیوتر، علم اقتصاد، زیست‌شناسی، و علم اعصاب. او از آن نوابغی است که مردم درباره‌شان داستان می‌سازند، سر تکان می‌دهند و از این‌که چنین موجودات هوشمندی واقعا می‌توانند عضوی از گونه انسان باشند حیرت می‌کنند. این داستان‌ها را خیلی دوست دارم، و دوست دارم برخی از آنها را بازگو کنم.

برخلاف اینشتین و داروین که بروز نبوغ‌شان مدتی طول کشید، "جانی" فون نویمن از کودکی نابغه بود. از قرار معلوم او در شش سالگی می‌توانست اعداد هشت رقمی را در ذهن خود تقسیم کند. (ظاهرا مدت زمانی طول کشید تا بفهمد دیگران نمی‌توانند این کار را بکنند؛ در یکی از زندگی‌نامه‌های او چنین آمده است: "روزی درحالی‌که مادرش بی‌هدف به روبروی خود خیره شده بود، جانی شش ساله از او پرسید: چه را محاسبه می‌کنی؟("۹) در همان سن می‌توانست با

پدرش به زبان یونانی باستان حرف بزند.

فون نویمن در هجده سالگی به دانشگاه رفت، ابتدا در بوداپست، سپس در آلمان و سویس. در ابتدا رشته مهندسی شیمی "کاربردی" را انتخاب کرد، اما نمی‌توانست ریاضیات را کنار بگذارد. دکترای ریاضی‌اش را در بیست و سه سالگی گرفت، و قبل از آن پژوهش‌های بنیادینی در منطق ریاضی و مکانیک کوانتوم به انجام رسانده بود. پژوهش‌های او به قدری چشمگیر بود که پنج سال بعد بهترین شغل دانشگاهی به او پیشنهاد شد - استادی (به همراه اینشتین و گودل) در انستیتوی مطالعات پیشرفته[۴۵۴] (IAS) در دانشگاه پرینستون.

این انستیتو در اطمینانی که به فون نویمن کرد به خطا نرفته بود. در طی ده سال بعد، فون نویمن نظریه بازی‌ها[۴۵۵] را ابداع کرد. (مقاله‌ای نوشت که چنین لقب گرفت: "مهم‌ترین مقاله‌ای که تا به حال درباره علم ریاضیات اقتصاد نوشته شده است.") او سپس چارچوب مفهومی یکی از اولین کامپیوترهای برنامه‌پذیر EDVAC را طراحی کرد (در مورد آن مقاله‌ای نوشت که از آن به عنوان "مهمترین مستندی که تا به حال درباره محاسبه و کامپیوترها نوشته شده" یاد می‌شود)، و نقش مهمی هم در طراحی اولین بمب‌های اتمی و هیدروژنی داشت. همه این کارها پیش از پژوهش‌های او روی ماشین‌های خودکار تولیدمثل‌کننده و اکتشاف او در مورد رابطه بین منطق و کامپیوتر و طرز کار مغز بود. فون نویمن در امور سیاسی نیز فعال بود (نظراتی بسیار محافظه‌کارانه داشت، که از دیدگاه‌های ضدکمونیستی او نشأت می‌گرفت) و سرانجام عضو کمیسیون انرژی[۴۵۶]" اتمی شد، که در مورد سیاست سلاح‌های اتمی به رئیس جمهور امریکا مشاوره می‌داد.

فون نویمن بخشی از آن چیزی بود که "پدیده مجار" نام گرفته است، گروهی از مجارهای هم‌سن و سال که دانشمندانی با شهرت جهانی شدند.

این گروه عبارت بود از لئو سیلارد، که در فصل سوم با او آشنا شدیم؛ فیزیکدان‌ها اوگین ویگنر[۴۵۷]، ادوارد تلر[۴۵۸]"، و دنیس گابور[۴۵۹]، و ریاضیدان‌ها پاول اردوس[۴۶۰]، یان کمنی[۴۶۱]، و پیتر لکس[۴۶۲]. درباره دلایل این تجمع عجیب استعدادهای باورنکردنی حدس‌های بسیاری زده‌اند. اما آن‌طور که نورمان مک‌رای[۴۶۳] نویسنده زندگینامه فون نویمن، می‌گوید: "پنج نفر از این شش برنده جایزه نوبل یهودی‌هایی متولد سال‌های ۱۸۷۵ تا ۱۹۰۵ بودند، از یکی از آنها پرسیده شد که چرا مجارستان این تعداد نابغه را در میان هم‌نسل‌های او به وجود آورده است. ویگنر برنده جایزه نوبل پاسخ داد که او منظور از این پرسش را نمی‌فهمد؛ مجارستان در آن دوره تنها یک نابغه را به وجود آورده که همانا جانی فون نویمن است."(۱۲) فون نویمن از جهات مختلف از زمان خود جلوتر بود. هدف او مانند تورینگ، ایجاد یک نظریه عمومی درباره پردازش اطلاعات بود که هم دربرگیرنده زیست‌شناسی باشد و هم فناوری. پژوهش او روی ماشین‌های

خودکار تولیدمثل‌کننده بخشی از این برنامه بود. فون نویمن درعین‌حال با آنچه جامعه سیبرنتیک نامیده می‌شود، پیوند نزدیکی داشت - گروهی از دانشمندان و مهندسان چندرشته‌ای که در جستجوی همانندی‌های سیستم‌های پیچیده و انطباق‌پذیر در حیطه‌های طبیعی و مصنوعی بودند.

چیزی که در حال حاضر "سیستم‌های پیچیده" می‌نامیم، می‌تواند تبار خود را در علم سیبرنتیک و رشته مربوط به آن، یعنی علم سیستم، بیابد. در فصل پایانی در مورد این رابطه بیشتر کاوش می‌کنم.

علائق فون نویمن در محاسبه همیشه هم مورد استقبال نخبگان انستیتوی مطالعات پیشرفته نبود. فون نویمن پس از تکمیل پژوهشش بر روی،EDVAC چند متخصص خبره را به انستیتو آورد تا در طراحی و ساخت جانشین پیشرفته‌تر EDVAC با او همکاری کنند. این سیستم "کامپیوتر "IAS نامیده شد؛ طراحی آن اساس اولین کامپیوترهایی بود که IBM ساخت. برخی از دانشمندان و ریاضیدانان "محض" انستیتو از وجود یک پروژه عملی اینچنینی در برج عاج‌شان رضایت نداشتند، و شاید از اولین استفاده مورد نظر فون نویمن از این کامپیوتر ناراضی‌تر هم بودند: یعنی پیش‌بینی وضع هوا، که او برای انجام آن گروهی از هواشناسان[۴۶۴] را به انستیتو آورد. برخی از "پاک‌انگار" ها فکر می‌کردند که این گونه فعالیت‌ها با مأموریت انستیتو تناسبی ندارد. فیزیکدان فریمن دایسون[۴۶۵] می‌نویسد: "دانشکده ریاضی (IAS) یک نهاد دائمی دارد که به سه گروه تقسیم شده است، یکی شامل ریاضیدانان محض است، یکی شامل فیزیکدانان نظری است، و یکی هم شامل فون (۳)". نویمن پس از مرگ فون نویمن، پروژه کامپیوتری انستیتو متوقف شد و استادان انستیتو لایحه‌ای را به تصویب رساندند مبنی بر این که "در انستیتو هیچ گونه علم آزمایشی و هیچ گونه آزمایشگاه نخواهیم داشت."(۱۲) فریمن دایسون موضوع را به این شکل توضیح داد: "متفرعنان انتقام خود را گرفتند."(۱۵)

فصل نهم: آلگوریتم‌های ژنتیک

فون نویمن پس از این‌که به پرسش "آیا ماشین می‌تواند تولیدمثل کند؟" به وجهی مثبت پاسخ داد، مایل بود قدم منطقی بعدی را بردارد و کامپیوترهایی (یا برنامه‌هایی کامپیوتری) بسازد که با جهش‌هایی خودشان را بازتولید کنند و برای بقا در یک محیط رقابت داشته باشند. این مقابله‌ای بود با برهان‌های "غریزه بقا" و "تکامل و انطباق" که قبلا به آن اشاره شد. اما فون نویمن قبل از آنکه بتواند روی مسئله تکامل کار کند درگذشت.

کاری را که او بر زمین گذاشته بود دیگران به سرعت به عهده گرفتند. در اوایل دهه ۱۹۶۰، چندین گروه از پژوهشگران مشغول آزمایش تکامل در کامپیوترها بودند. این‌گونه پژوهش‌ها بعدها مجموعا با عنوان "محاسبه تکاملی[۴۶۶]" شناخته شدند. در میان آنها موردی که امروزه از همه شناخته‌شده‌تر است پژوهش بر روی آلگوریتم‌های زنتیک است، که جان هالاند[۴۶۷] و دانشجویان و همکارانش در دانشگاه میشیگان به آن پرداختند.

جان هالاند، به یک معنا، نوه دانشگاهی جان فون نویمن است. راهنمای پایان‌نامه دکترای هالاند، آرتور برکس، فیلسوف و منطق‌دان و مهندس کامپیوتر بود که با پروژه کامپیوتر EDVAC همکاری داشت. و اثر ناتمام فون نویمن درباره خودکارهای تولیدمثل‌کننده را به پایان رساند. برکس، پس از کار روی EDVAC، مقام استادی فلسفه را در دانشگاه میشیگان به دست آورد و گروه "منطق کامپیوترها[۴۶۸]" را به راه انداخت، جمع نامنسجمی از اساتید و دانشجویان که به اساس کامپیوترها، و به‌طورکلی پردازش اطلاعات علاقه‌مند بودند. هالاند در مقام دانشجوی دوره دکترا به دانشگاه میشیگان پیوسته بود. ابتدا به رشته ریاضی و بعد به گروه آموزشی کاملا جدیدی با نام "علوم ارتباطات" - بعدها "گروه کامپیوتر و ارتباطات" - وارد شد، که شاید اولین گروه آموزشی علم کامپیوتر در جهان باشد. چند سال بعد، هالاند اولین دریافت‌کننده درجه دکترای این گروه آموزشی شد، که به او این امتیاز را داد که اولین دریافت‌کننده دکترای علم کامپیوتر در جهان محسوب شود. او بلافاصله در مقام استادی به استخدام همان گروه آموزشی درآمد.



جان هالاند

هالاند با خواندن کتاب مشهور رونالد فیشر[۴۶۹]، نظریه زنتیکی انتخاب طبیعی[۴۷۰]، دلبسته تکامل داروینی شد. مانند فیشر و داروین، هالاند مجذوب مشابهت تکامل و پرورش حیوانات بود، اما به این مشابهت از نقطه‌نظر علم کامپیوتر می‌نگریست: "آلگوریتم‌های ژنتیک از اینجا سرچشمه گرفته‌اند.

به‌تدریج به این فکر افتادم که آیا می‌توان برنامه‌ها را به همان شیوه‌ای پرورش داد که مردم می‌گویند اسب‌های خوب پرورش بده و ذرت خوب پرورش بده."(۲)

علاقه اصلی هالاند به پدیده انطباق بود - چگونه سیستم‌های زنده، در واکنش به سایر اندام‌واره‌ها یا محیط متغیر، تکامل می‌یابند یا به گونه‌ای دیگر تغییر می‌کنند، و چگونه سیستم‌های کامپیوتری هم ممکن است برای این که انطباق‌پذیر باشند از اصول مشابهی تبعیت کنند. کتابی که در سال ۱۹۷۵ نوشت، انطباق در سیستم‌های طبیعی و مصنوعی[۴۷۱]"، مجموعه‌ای از اصول عمومی انطباق، از جمله طرحی برای آلگوریتم‌های ژنتیک را عرضه می‌کرد.

نخستین آشنایی من با آلگوریتم‌های ژنتیک در دوره تحصیلات تکمیلی در دانشگاه میشیگان و در زمانی بود که درسی را گرفتم که هالاند آن را بر مبنای کتابش تدریس می‌کرد. خیلی سریع مفتون ایده برنامه کامپیوتری "در حال تکامل" شدم. مانند تاماس هاکسلی، واکنش من این بود، "خیلی احمقانه است که به این فکر نیفتاده بودم!"

طرز تهیه یک آلگوریتم ژنتیک

دانش‌واژه آلگوریتم امروزه به همان معنایی به کار می‌رود که تورینگ از روال معین می‌فهمید و آشپزها از "طرز تهیه" برداشت می‌کنند: رشته‌ای از گام‌ها که از طریق آن یک ورودی به یک خروجی تبدیل می‌شود.

در یک آلگوریتم ژنتیک، (AG) خروجی دلخواه راه‌حلی است برای نوعی مسئله. به عنوان مثال، فرض کنید از شما خواسته‌اند یک برنامه کامپیوتری برای کنترل یک ربوت نظافتچی بنویسید که آشغال‌های اداره شما را جمع می‌کند. به این نتیجه می‌رسید که این کار وقت زیادی از شما می‌گیرد، در نتیجه تصمیم می‌گیرید یک آلگوریتم ژنتیک را به کار گیرید تا این برنامه را برای شما تکامل بخشد. از این‌رو، خروجی دلخواه این AG یک برنامه کنترل ربوت نظافتچی است که به ربوت امکان می‌دهد جمع‌آوری آشغال‌ها را به خوبی انجام دهد.

ورودی AG دو بخش دارد: جمعیتی[۴۷۲] از برنامه‌های بدیل، و یک تابع صلاحیت[۴۷۳] که یکی از برنامه‌های بدیل را انتخاب می‌کند و به آن یک مقدار صلاحیت منتسب می‌کند که کیفیت انجام کار موردنظر توسط این برنامه را نشان می‌دهد.

برنامه‌های بدیل را می‌توان به صورت رشته‌ای از بیت و عدد و نماد نمایش داد. در اواخر این فصل مثالی از نمایش یک برنامه کنترل ربوت را به صورت رشته‌ای از اعداد به دست می‌دهم.

در مورد ربوت نظافتچی، صلاحیت برنامه بدیل را می‌توان به این صورت تعریف کرد: مساحت تحت پوشش ربوت در مدت زمان معینی که برنامه ربوت را کنترل می‌کند. هرچه مساحت بیشتر باشد بهتر.

طرز تهیه AG در زیر آمده است.

گام‌های زیر را برای چند نسل تکرار کنید.

۱. جمعیت اولیه راه‌حل‌های بدیل را تولید کنید. ساده‌ترین راه خلق جمعیت اولیه این است که صرفا گروهی از برنامه‌های (رشته‌های) تصادفی را تولید کنید، که "فرد[۴۷۴]"" نامیده می‌شوند.

۲. صلاحیت هر فرد را در جامعه کنونی اندازه‌گیری کنید.

۳. شماری از افراد دارای بالاترین صلاحیت را انتخاب کنید تا والدین نسل بعد باشند.

۴. والدین انتخاب شده را جفت کنید. هر جفت با بازترکیب قسمت‌هایی از والدین، و همراه با شانس جهش تصادفی، فرزندانی تولید می‌کند و این فرزندان به جمعیت جدید وارد می‌شوند. تا زمانی که جمعیت تکمیل شود (یعنی تعداد افراد آن مساوی با جمعیت اولیه باشند) والدین به ایجاد فرزندان ادامه می‌دهند. جامعه جدید اکنون تبدیل به جامعه حال حاضر می‌شود.

۵. به گام دوم بروید.

آلگوریتم‌های ژنتیک در دنیای واقعی

آلگوریتم ژنتیکی که در بالا توضیح داده شد واقعا ساده است، اما نگارش‌هایی از آن برای حل

مسائل مشکل در بسیاری از حوزه‌های علمی و مهندسی، همچنین هنر و معماری و موسیقی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

برای آشنایی با حال و هوای برخی از این مسائل توجه کنید به شرکت جنرال الکتریک[۴۷۵] که برای خودکار کردن بخش‌هایی از طراحی هواپیما از آلگوریتم ژنتیک بهره گرفته است، آزمایشگاه ملی لوس‌آلاموس[۴۷۶] در تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، شرکت جان دیر[۴۷۷]" برای خودکار کردن برنامه زمان‌بندی خط تولید،(۵) و تکزاس اینسترومنتس برای طراحی تراشه‌های کامپیوتر.۶) آلگوریتم‌های ژنتیک برای ایجاد اسب‌های کامپیوتری متحرک و (۷) واقعی‌نما در فیلم ارباب حلقه‌ها: بازگشت پادشاه[۴۷۸]"، و بدل کامپیوتری متحرک و واقعی‌نمایی برای هنرپیشه‌های فیلم تروا تعدادی از شرکت‌های دارویی برای کمک به کشف داروهای جدید از آلگوریتم‌های ژنتیک بهره می‌برند.۹ چندین سازمان مالی برای کارهای متنوع از آلگوریتم‌های ژنتیک استفاده کرده‌اند: تشخیص مبادلات جعلی (بورس لندن)، (۱۰) و تحلیل داده کارت اعتباری (مؤسسه کاپیتال وان)[۴۷۹]، و پیش‌بینی بازارهای مالی(۱۱) و بهینه‌سازی موجودی اوراق بهادار ۱۳ (مؤسسه فرست کوادرانت).[۴۸۰] در دهه ۱۹۹۰، مجموعه‌های هنری تولید شده توسط آلگوریتم‌های ژنتیک تعاملی در چند موزه به نمایش گذاشته شد، (۱۴) از جمله در "مرکز ژرژ پومپیدو"[۴۸۱]" در پاریس. این مثال‌ها نمونه کوچکی از شیوه‌های به کارگیری آلگوریتم‌های ژنتیک است.

رابی تکامل‌یابنده، ربوت جمع‌کننده قوطی نوشابه

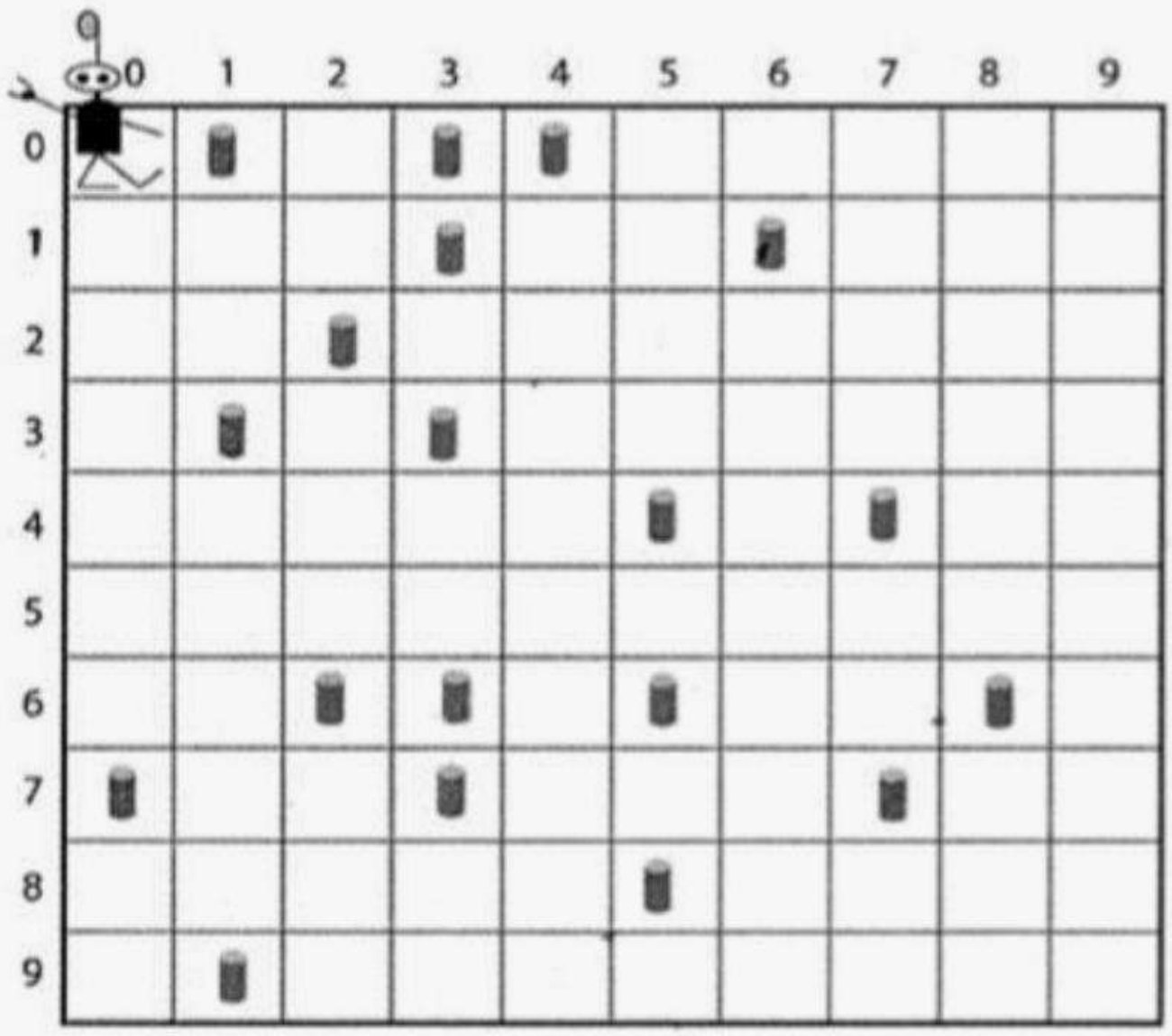
برای آشنایی تفصیلی‌تر شما با ایده‌های اصلی آلگوریتم‌های ژنتیک مثال ساده و مشروحی را برایتان توضیح می‌دهم.۱۵ ربوتی به نام "رابی" داریم که در دنیایی دو بعدی (شبیه‌سازی شده با کامپیوتر، اما درهم برهم) زندگی می‌کند که قوطی‌های خالی نوشابه آن را پوشانده‌اند. برای تکامل دادن یک "مغز" یعنی یک استراتژی کنترل برای رابی، از یک آلگوریتم ژنتیک استفاده خواهم کرد.

وظیفه رابی این است که با جمع‌آوری قوطی‌های خالی نوشابه دنیای خود را تمیز کند. دنیای رابی، که در شکل ۱-۹ نشان داده شده، شامل صد مربع (خانه)[۴۸۲]" است که در شبکه‌ای ۱۰x۱۰ گنجانده شده‌اند. می‌توانید رابی را در خانه ۰, ۰ ببینید. فرض می‌کنیم که در مرز شبکه دیواری وجود دارد.

قوطی‌های نوشابه در خانه‌های مختلفی انداخته شده‌اند (اما در هر خانه بیش از یک قوطی نیفتاده).

رابی آنقدرها هوشمند نیست و دید او ضعیف است. علاوه بر خانه‌ای که در آن قرار دارد، می‌تواند محتوای خانه مجاور در شمال و جنوب و شرق و غرب را نیز ببیند. هر خانه می‌تواند خالی باشد،

یا یک قوطی داشته باشد، یا یک دیوار باشد. برای مثال، در شکل ۹-۱ رابی که در خانه ۰,۰ است، می‌بیند که خانه‌اش خالی است (یعنی هیچ قوطی نوشابه‌ای ندارد)، خانه‌های سمت شمال و غرب دیوار هستند، خانه جنوبی خالی است، و خانه شرقی یک قوطی دارد.



شکل ۹-۱. دنیای رابی. یک آرایه ۱۰، ۱۰ x که قوطی‌های نوشابه را در آن انداخته‌اند.

در هر نوبت رابی می‌تواند دقیقا ۲۰۰ کنش انجام دهد. هر کنش یکی از هفت گزینه‌ای است که به دنبال می‌آید: برو به شمال، برو به جنوب، برو به شرق، برو به غرب، یک جهت تصادفی را انتخاب کن، در جای خود بمان، خم شو و یک قوطی را بردار. هر کنش می‌تواند پاداش یا تنبیهی به همراه داشته باشد. اگر رابی در همان خانه‌ای باشد که قوطی هست و آن را بردارد، پاداشی معادل ۱۰ امتیاز کسب می‌کند. اما اگر برای برداشتن قوطی خم شود درحالی‌که هیچ قوطیی در خانه وجود ندارد، یک نمره جریمه می‌شود. اگر به دیوار بخورد پنج نمره جریمه می‌شود و به خانه کنونی‌اش برگردانده می‌شود.

بی‌گمان، پاداش رابی وقتی به حداکثر می‌رسد که بیشترین تعداد قوطی ممکن را بردارد، به دیوار نخورد، و اگر قوطیی وجود ندارد خم نشود.

چون این یک مثال ساده است، برای انسان احتمالا خیلی ساده است که موفق به یافتن استراتژی خوبی برای رابی بشود. اما ویژگی آلگوریتم‌های ژنتیک در این است که انسان‌ها که ذاتا تنبل هستند لازم نیست از چیزی سردربیاورند؛ فقط اجازه می‌دهیم که تکامل کامپیوتری از ماجرا سردربیاورد.

بگذارید از یک آلگوریتم ژنتیک استفاده کنیم تا استراتژی خوبی را برای رابی تکامل دهد.

اولین گام این است که سردربیاوریم دقیقا چه چیزی را داریم تکامل می‌دهیم؛ یعنی دقیقا چه چیزی استراتژی را می‌سازد؟ به‌طورکلی، استراتژی مجموعه‌ای از قواعد است که در هر وضعیت، کنشی را که در آن وضعیت باید به عهده گرفته شود روشن می‌کند. برای رابی، هر وضعیت فقط چیزی است که می‌تواند ببیند: محتوای خانه کنونی‌اش به اضافه محتوای خانه‌های شمالی و جنوبی و غربی و شرقی. در مورد پرسش "در هر وضعیت چه کاری بکنم؟" برای رابی هفت کار ممکن وجود دارد که می‌تواند انجام دهد: حرکت به جنوب یا شمال یا شرق یا غرب؛ حرکت به جهتی تصادفی؛ برداشتن قوطی.

در نتیجه، استراتژی رابی را می‌توان به وضوح به صورت فهرستی از تمامی وضعیت‌های ممکنی تنظیم کرد که رابی می‌تواند با آنها روبه‌رو شود، به اضافه یکی از هفت کنش ممکنی که باید در آن وضعیت انجام دهد.

در اینجا چند وضعیت ممکن وجود دارد؟ رابی به پنج خانه متفاوت (فعلی، شمالی، جنوب، شرق، غرب) نگاه می‌کند، و هر یک از این خانه‌ها را می‌توان به صورت خالی، دارای قوطی، یا دیوار برچسب زد. که به این معنی است که ۲۴۳ وضعیت ممکن وجود دارد (به یادداشت نگاه کنید که توضیح می‌دهد این محاسبه را چگونه انجام (۱۶)(. دادم در عمل، این تعداد وضعیت واقعا وجود ندارد، چون رابی هیچ‌گاه با وضعیتی روبرو نمی‌شود که وضعیت فعلی او دیوار باشد، یا وضعیتی که در آن شمال و جنوب و شرق و غرب همه دیوار باشند.

وضعیت‌های "ناممکن" دیگری هم وجود دارند. بازهم، با توجه به این‌که تنبل هستیم، نمی‌خواهیم از این سردربیاوریم که همه وضعیت‌های ناممکن کدام هستند، به همین جهت همه ۲۴۳ وضعیت را فهرست می‌کنیم، گرچه می‌دانیم برخی از آنها هرگز پیش نمی‌آیند.

جدول ۱-۹ نمونه‌ای از یک استراتژی است - درواقع، بخشی از یک استراتژی است، چون استراتژی کامل طولانی‌تر از آن است که در اینجا فهرست شود.

وضعیت رابی در شکل ۱-۹ به شرح زیر است:

خانهٔ فعلی	غرب	شرق	جنوب	شمال
خالی	دیوار	قوطی	خالی	دیوار

رابی برای این‌که تصمیم بگیرد بعد چه کند، صرفا این وضعیت را در جدول استراتژی‌اش جستجو می‌کند، و می‌فهمد که کنش متناظر حرکت به غرب است. در نتیجه به غرب حرکت می‌کند و به دیوار برخورد می‌کند.

هرگز نگفتم که این استراتژی خوبی است؛ یافتن استراتژی خوب کار ما نیست، وظیفه آلگوریتم ژنتیک است.

@degar_goonesh

جدول ۱ ـ ۹

کنش	موقعیت				
	خانهٔ فعلی	غرب	شرق	جنوب	شمال
حرکت شمالی	خالی	خالی	خالی	خالی	خالی
حرکت شرقی	قوطی	خالی	خالی	خالی	خالی
حرکت تصادفی	دیوار	خالی	خالی	خالی	خالی
برداشتن قوطی	خالی	قوطی	خالی	خالی	خالی
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
حرکت غربی	خالی	دیوار	قوطی	خالی	دیوار
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
در جا ماندن	دیوار	دیوار	دیوار	دیوار	دیوار

به منظور تکامل بخشیدن به استراتژی‌هایی برای رابی، کد یک آلگوریتم ژنتیک را نوشتم. در آلگوریتم ژنتیک من، هر فردی در جمعیت یک استراتژی است - یعنی فهرستی از کنش‌ها که متناظر با هر وضعیت ممکن است. منظور این است که با فرض وجود یک استراتژی، مانند جدول ۱-۹، فردی که قرار است توسط یک آلگوریتم ژنتیک تکامل یابد صرفا فهرستی از ۲۴۳ کنش در آخرین ستون سمت راست است، به ترتیبی که در زیر آمده:

حرکت شمالی حرکت شرقی حرکت تصادفی برداشتن قوطی ... حرکت غربی ... در جای ماندن آلگوریتم ژنتیک به خاطر می‌آورد که اولین کنش در این رشته (در اینجا حرکت شمالی) همراه با اولین وضعیت است "خالی خالی خالی خالی خالی")، دومین کنش (در اینجا حرکت شرقی) با دومین وضعیت همراه می‌شود ("خالی خالی خالی خالی قوطی")، و به همین منوال. به عبارت دیگر، لازم نیست که به صراحت وضعیت‌های متناظر با این کنش‌ها را فهرست کنم؛ در عوض آلگوریتم ژنتیک ترتیبی را که فهرست شده است در خاطر نگه می‌دارد. برای مثال، فرض کنید رابی اتفاقا مشاهده کرده که وضعیت‌های زیر را پشت‌سر گذارده:

خانهٔ فعلی	غرب	شرق	جنوب	شمال
قوطی	خالی	خالی	خالی	خالی

در آلگوریتم ژنتیک این دانش را تعبیه می‌کنم که این وضعیت شماره ۲ است. رابی به جدول استراتژی نگاه می‌کند و می‌فهمد که کنش در موقعیت ۲ حرکت شرقی است. رابی به شرق

حرکت می‌کند سپس وضعیت بعدی را نظاره می‌کند؛ آلگوریتم ژنتیک بار دیگر کنش متناظر را در جدول جستجو می‌کند، و به همین منوال.

آلگوریتم ژنتیک من به زبان برنامه‌نویسی C نوشته شده است. برنامه واقعی را در اینجا نمی‌آورم، اما این شیوه‌ای است که برنامه کار می‌کند.

۱. جمعیت اولیه را تولید کنید. آلگوریتم ژنتیک با جمعیت اولیه‌ای متشکل از ۲۰۰ فرد تصادفی (استراتژی‌ها) آغاز به کار می‌کند.

یک جمعیت تصادفی در شکل ۲-۹ نشان داده شده. هر مورد استراتژی فهرستی از ۲۴۳ "ژن" است. هر ژن عددی بین ۰ تا ۶ است، که معرف یک کنش است. (۰ = حرکت شمالی، ۱ = حرکت جنوبی، ۲ = حرکت شرقی، ۳ = حرکت غربی، ۴ = در جای ماندن، ۵ = برداشتن، ۶ = حرکت تصادفی).

این اعداد به صورت تصادفی در جمعیت اولیه قرار داده می‌شوند.

برای انجام این کار و دیگر انتخاب‌های احتمالی یا تصادفی، آلگوریتم ژنتیک از یک مولد اعداد تصادفی بهره می‌گیرد.

گام زیر را برای ۱۰۰۰ نسل تکرار کنید:

۲. صلاحیت هر فرد در جامعه را محاسبه کنید. در برنامه من، صلاحیت یک استراتژی با مشاهده این‌که آن استراتژی چقدر به رابی امکان می‌دهد ۱۰۰ نوبت نظافت را انجام دهد، تعیین می‌شود. یک نوبت نظافت شامل قرار دادن رابی در خانه ۰,۰ و پرتاب تصادفی تعدادی قوطی است (هر خانه حداکثر می‌تواند یک قوطی داشته باشد؛ احتمال این‌که یک خانه قوطی داشته باشد ۵۰% است). سپس رابی برای ۲۰۰ کنش در هر جلسه استراتژی را دنبال می‌کند. امتیاز استراتژی در هر جلسه مقدار نمره‌های پاداشی است که رابی جمع می‌کند منهای مقدار کل جریمه‌هایی که می‌شود. صلاحیت میانگین استراتژی، امتیازهای صد جلسه نظافت است که در هر مورد پراکندگی قوطی‌ها متفاوت است.

فرد ۱:
233003234216303435305460061025625151141622604356543340665115141565022064064205100664321616152165202236443336334601332650300040622050243165006111305146664232401245633345524126143441361020150630642551654043264463156164510543665346310551646005164

فرد ۲:
164113431210253603403612414312011042354625253042020445164336656103532215310513144062212061463143215461025652364442202534034530502005620634026331002453416430151631210012214400664012665246351650154123113132453304433212634555005314213064423311000

فرد ۳:
204233444024112261321364526324642122061221222526606261444361253251266406133534015341111020616422665314552254023405115503130222020065445125062206631426135532010000400031640130154160162006134440626160505641421553133236021503355131253632642630551

.
.
.

فرد ۲۰۰:
346325251360010122256121060433011352051553201306560053222350433242506412425526553463534552305332661201063212455442344061365430246240160663016464641103026540006334126150352262106063624260550616616344255124354464110023463330440102533212142402251

شکل ۲-۹. جمعیت تصادفی اولیه. هر فرد متشکل از ۲۴۳ عدد است، که هر کدام بین ۰ و ۶ هستند و یک کنش را نشان می‌دهند. موقعیت یک عدد در یک رشته نشان می‌دهد که کنش با کدام وضعیت متناظر است.

. تکامل را در مورد جمعیت کنونی استراتژی‌ها به کار گیرید تا جمعیت تازه‌ای خلق شود. یعنی، تا زمانی که جمعیت تازه ۲۰۰ فرد داشته باشد گام‌های زیر را تکرار کنید:

الف) دو فرد والد را با لحاظ احتمالات مبتنی بر صلاحیت از میان جمعیت انتخاب کنید. یعنی، هرچه صلاحیت استراتژی بیشتر باشد، شانس بیشتری دارد که به عنوان والد انتخاب شود.

ب) به منظور خلق دو بچه این دو والد را جفت کنید. یعنی به طور تصادفی موقعیتی را انتخاب کنید که در آن دو رشته عدد را دو پاره کنید؛ با برداشتن اعداد قبل از آن موقعیت در والد A و اعداد بعد از آن موقعیت در والد B یک فرزند را بسازید، و برای ساختن دومین فرزند به طور عکس عمل کنید.

پ) با احتمال اندک اعداد موجود در هر فرزند را جهش دهید. یعنی با احتمال اندک، یک عدد یا بیشتر را انتخاب کنید و آنها را با اعدادی بین ۰ و ۶ جایگزین کنید که به صورت تصادفی تولید شده‌اند.

ج) دو بچه جدید را در جمعیت جدید قرار دهید.

۴. وقتی جمعیت جدید ۲۰۰ فرد دارد، با این نسل جدید به گام دوم برگردید.

جادوی ماجرا در این است که وقتی از ۲۰۰ استراتژی تصادفی آغاز می‌کنیم، آلگوریتم ژنتیک استراتژی‌هایی را خلق می‌کند که به رابی امکان می‌دهد در کار نظافتش خیلی خوب عمل کند. اعدادی که برای اندازه جامعه به کار بردم (۲۰۰)، تعداد نسل‌ها (۱۰۰۰)، تعداد کنش‌هایی که رابی می‌تواند در یک جلسه انجام دهد (۲۰۰)، و تعداد نوبت‌های نظافت برای محاسبه صلاحیت (۱۰۰)، تا حدودی به دلخواه من بود. اعداد دیگری را می‌توان انتخاب کرد که آنها هم می‌توانند استراتژی‌های خوبی تولید کنند.

مطمئنم که اکنون با هیجان انتظار دارید بدانید وقتی آلگوریتم ژنتیک را اجرا کردم چه اتفاقی افتاد. اما در ابتدا باید اعتراف کنم که قبل از اجرا، از تنبلی‌ام دست برداشتم و استراتژی "هوشمند" خودم را ساختم تا بفهمم آلگوریتم ژنتیک در قیاس با من به چه خوبی عمل می‌کند. استراتژی من برای رابی این است: "اگر در خانه فعلی قوطی وجود دارد، آن را بردار. در غیر این صورت، اگر یک قوطی در خانه‌های مجاور وجود دارد، به آن خانه حرکت کن. اگر چندین خانه مجاور قوطی دارند، خانه‌ای را مشخص می‌کنم که رابی به آن حرکت کند. در غیر این صورت، "برای حرکت یک جهت تصادفی را انتخاب کن."

این استراتژی به آن خوبی که قرار بود باشد نیست؛ درواقع، ممکن است رابی را وادار کند در میان خانه‌های دور خودش بچرخد و هرگز به خانه قوطی‌دار نرسد.

استراتژی‌ام را بر مبنای ۱۰.۰۰۰ نوبت نظافت، امتحان کردم، و پی بردم که امتیاز میانگین (برحسب جلسه) حدود ۳۴۶ است. با فرض این‌که در آغاز هر جلسه، حدود ۵۰%، یا ۵۰ تا از خانه‌ها قوطی دارند، امتیاز حداکثر ممکن برای هر استراتژی حدود ۵۰۰ است، در نتیجه

استراتژی من آنقدرها مطلوب نیست.

آیا آلگوریتم ژنتیک به همین خوبی عمل می‌کند یا بهتر است؟ آن را اجرا کردم تا ببینم چه می‌شود. در نسل پایانی، فردی با بالاترین صلاحیت را انتخاب کردم، و درعین‌حال آن را در ۱۰.۰۰۰ جلسه نظافت امتحان کردم.

میانگین آن (برحسب جلسه) حدود ۴۸۳ بود ـ یعنی نزدیک به مطلوب!

استراتژی تکامل‌یافته بر مبنای آلگوریتم ژنتیک چگونه مسئله را حل می‌کند؟

حال پرسش این است که این استراتژی چه‌کار می‌کند، و چرا بهتر از استراتژی من عمل می‌کند؟ درعین‌حال، آلگوریتم ژنتیک چگونه آن را تکامل می‌دهد؟

اجازه بدهید استراتژی من را M و استراتژی آلگوریتم ژنتیک را G بنامیم. در زیر ژنوم هر استراتژی دیده می‌شود.

```
M: 65635365625235325265635365615135315125235325215135315165635365
   62523532526563536560503530502523532520503530501513531512523532
   52151353151050353050252353252050353050656353562523532526563 53
   65615135315125235325215135315165635365625235325265635365

G: 25435515325623525105635546115133615415103415611055015005203025
   62561322523503251120523330540552312550513361541506652641502665
   06012264453605631520256431054354632404350334153250253251352352
   04515013015621343625235322313505126051335620152451434343 2
```

خیره شدن به ژنوم استراتژی کمک چندانی به فهم چگونگی کارکرد استراتژی نمی‌کند. چند ژن را می‌بینم که عاقلانه به نظر می‌رسند. از جمله وضعیت‌های مهمی که در آن خانه فعلی رابی یک قوطی دارد، از جمله وضعیت دوم ("خالی خالی خالی قوطی") که در هر دو استراتژی کنش ۵ (برداشتن) را دارد. چنین وضعیت‌هایی در M همیشه کنش ۵ را دارند، اما در G فقط در اکثر اوقات کنش ۵ را دارند. برای مثال، توانستم معین کنم که وضعیت زیر:

خانه کنونی	غرب	شرق	جنوب	شمال
قوطی	قوطی	خالی	قوطی	خالی

کنش ۳ (حرکت غربی) را دارد، که به این معناست که رابی قوطی خانه فعلی را برنمی‌دارد. این ایده بدی به نظر می‌آید، با وجود این G در مجموع بهتر از M عمل می‌کند! کاشف به عمل آمد که عامل تعیین‌کننده نه ژن‌های منفرد بلکه شیوه برهم‌کنش ژن‌هاست، همان‌طور که در ژنتیک واقعی دیده می‌شود. و درست مانند ژنتیک واقعی، سردرآوردن از این‌که این برهم‌کنش‌های مختلف چگونه منجر به رفتار یا صلاحیت عمومی می‌شوند کار دشواری است.

نگاه به رفتار واقعی هر استراتژی - رخ‌مون آن - عاقلانه‌تر از نگاه به ژنوم آن به نظر می‌رسد. برای نمایش حرکت‌های رابی هنگام استفاده از یک استراتژی مفروض یک برنامه گرافیک نوشتم و مدتی را صرف تماشای رفتار رابی در استفاده از استراتژی M و در استفاده از استراتژی G کردم. گرچه این دو استراتژی در وضعیت‌های متعددی یکسان عمل می‌کنند، متوجه شدم استراتژی G دو ترفند را به کار می‌گیرد که موجب می‌شود از M بهتر عمل کند.

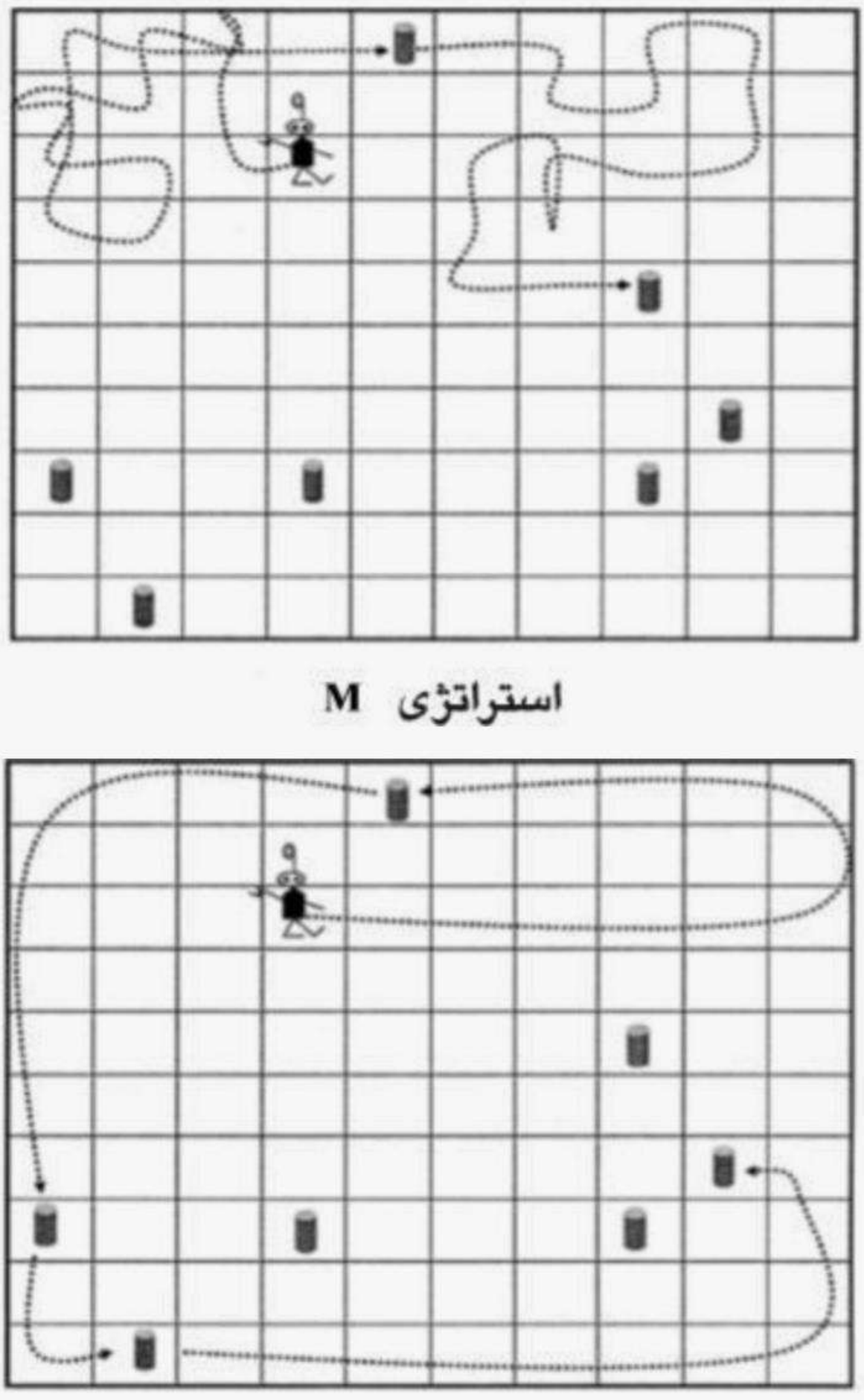
اول، وضعیتی را در نظر بگیرید که در آن رابی وجود قوطی در خانه کنونی یا هریک از خانه‌های همجوار را حس نمی‌کند. اگر رابی دارد استراتژی M را دنبال می‌کند، یک حرکت تصادفی را انتخاب می‌کند، اگر استراتژی G را دنبال می‌کند، به شرق می‌رود تا آنجایی که یا یک قوطی را پیدا کند یا به یک دیوار برسد. سپس به سمت شمال می‌رود و به دور زدن در لبه شبکه در جهت مخالف ساعت ادامه می‌دهد تا این‌که به یک قوطی بر بخورد یا آن را حس کند. در شکل ۳-۹، مسیری که رابی بر مبنای هر استراتژی طی می‌کند (خطهای نقطه‌چین) به نمایش درآمده است.

نه تنها این استراتژی چرخش در پیرامون مانع می‌شود که رابی به دیوارها بخورد (که تحت استراتژی M و در زمانی که یک حرکت تصادفی انجام می‌دهد امکان‌پذیر است)، بلکه درعین‌حال چرخش در پیرامون برای برخورد به قوطی روش مؤثرتری از حرکت تصادفی محض از کار درمی‌آید.

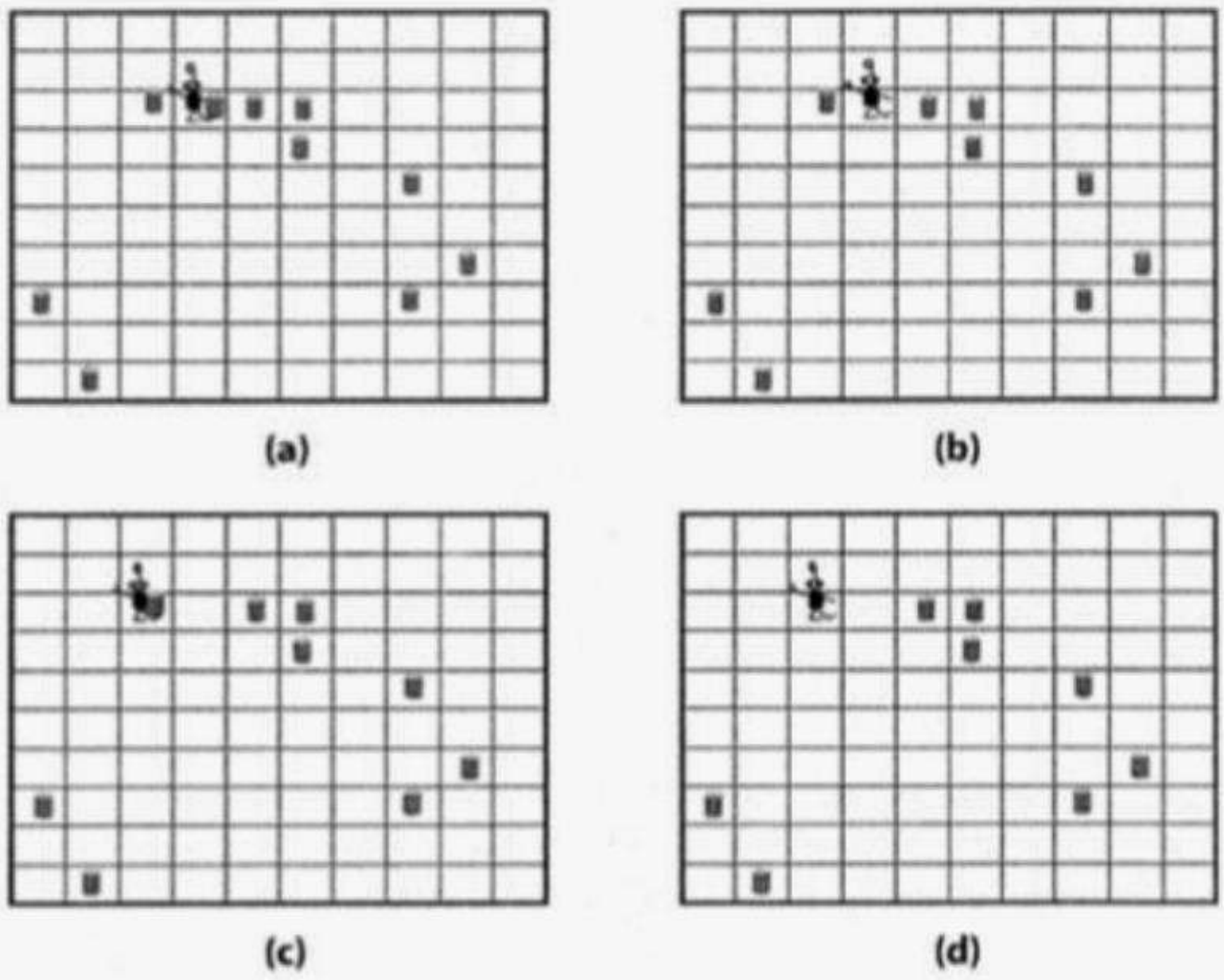
دوم، به کمک استراتژی G آلگوریتم ژنتیک به ترفند ظریفی دست یافت، مبنی بر این‌که رابی در وضعیت‌های خاصی قوطی را برندارد.

برای مثال، وضعیت نمایش داده شده در شکل ۹-۴A را در نظر بگیرید.

با توجه به این وضعیت، اگر رابی دارد M را دنبال می‌کند، قوطی موجود در خانه کنونی را برمی‌دارد، به غرب می‌رود، و بعد قوطی موجود در خانه جدید را برمی‌دارد (اشکال. (b-d چون رابی تنها می‌تواند خانه‌های بلافاصله همجوار را ببیند، دیگر نمی‌تواند باقی‌مانده قوطیها را ببیند. باید به طور تصادفی به اطراف حرکت کند تا به قوطی دیگری برخورد کند.

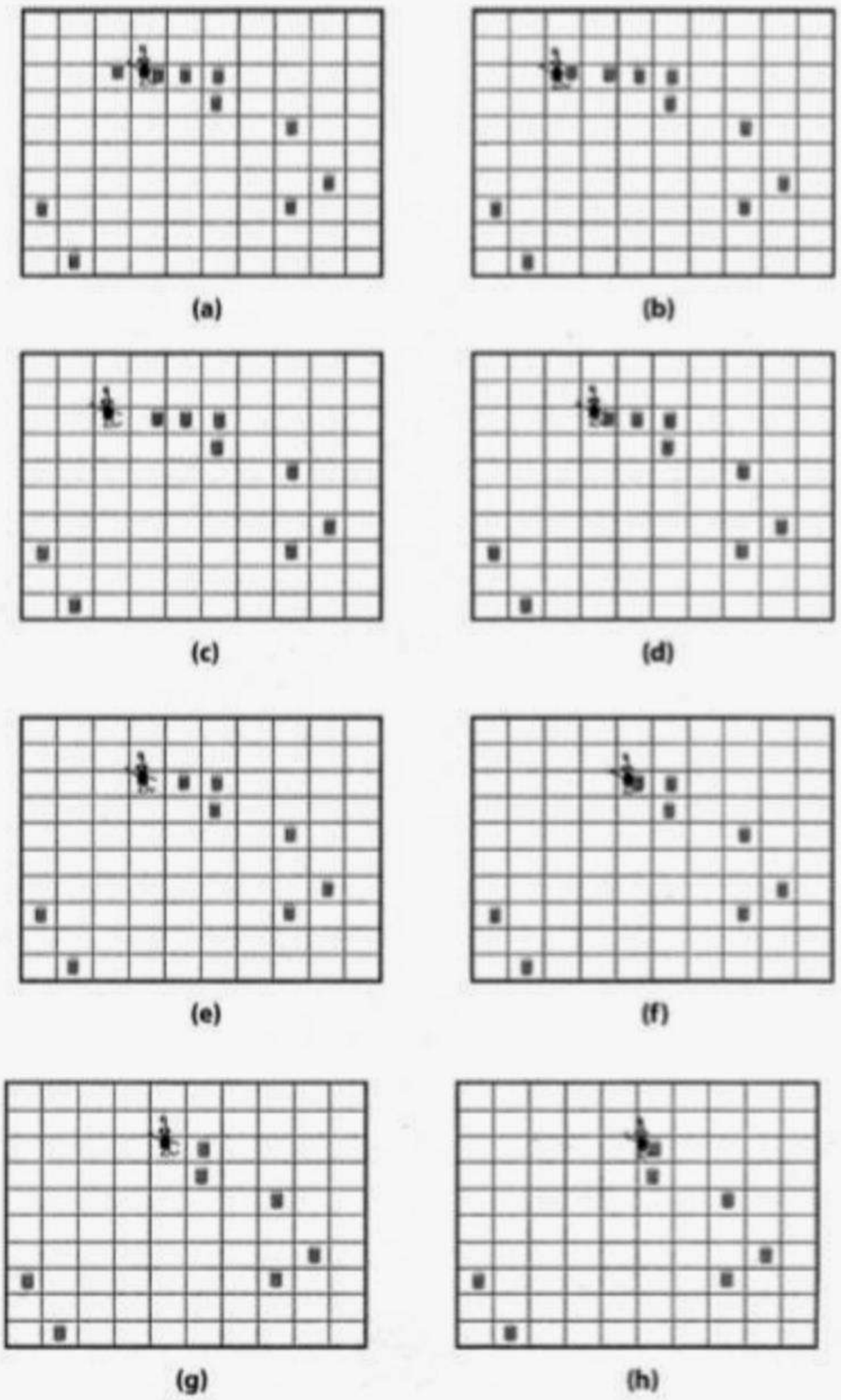


شکل ۳-۹. رابی در یک سرزمین بایر "بدون قوطی". خطوط نقطه‌چین نشان‌دهنده مسیرهایی است که وقتی از استراتژی‌های M (بالا) و G (پایین) تبعیت می‌کرد، پشت سر گذارد.



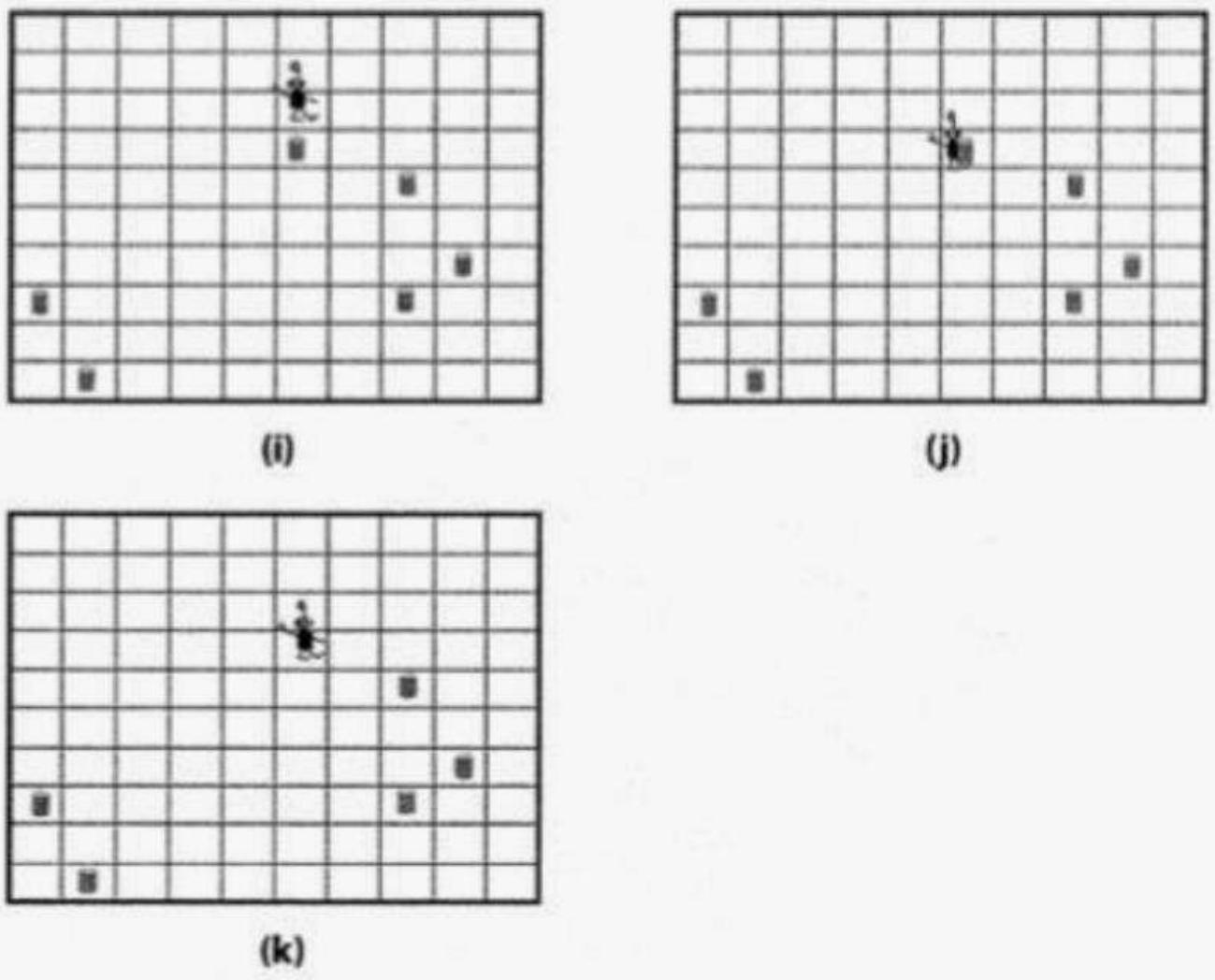
شکل ۴-۹. رابی در میان تعدادی قوطی، که در چهار گام زمانی از استراتژی M بهره می‌برد.

در مقابل، همان وضعیت آغاز را همراه با G در نظر بگیرید، که در شکل ۹-۵a به نمایش درآمده است. رابی قوطی موجود در خانه کنونی را برنمی‌دارد، در عوض به غرب می‌رود (شکل. (۹-۵ b سپس غربی‌ترین قوطی را برمی‌دارد (شکل. (۹-۵c آن قوطیی که در آخرین حرکت برنداشت به صورت نشانگری عمل می‌کند تا رابی بتواند "به خاطر بیاورد" که قوطی‌هایی در سمت دیگر آن وجود ندارد. او به برداشتن تمامی قوطی‌های باقی‌مانده ادامه می‌دهد (شکل. (۹-۵ d ۹-۵ -k



شکل ۹-۵. رابی در میان همان قوطی‌هاست، و دریازده گام زمانی از استراتژی G بهره می‌برد.

ادامه شکل ۵ - ۹ در صفحه بعد



استراتژی G

ادامه شکل ۵ - ۹ می‌دانستم که استراتژی‌ام بی‌عیب و نقص نیست، اما این ترفند کوچک هرگز به فکرم نرسیده بود. تکامل می‌تواند خیلی زیرک باشد. آلگوریتم‌های ژنتیک اغلب به نتایجی می‌رسند که به فکر ما هم خطور نمی‌کند.

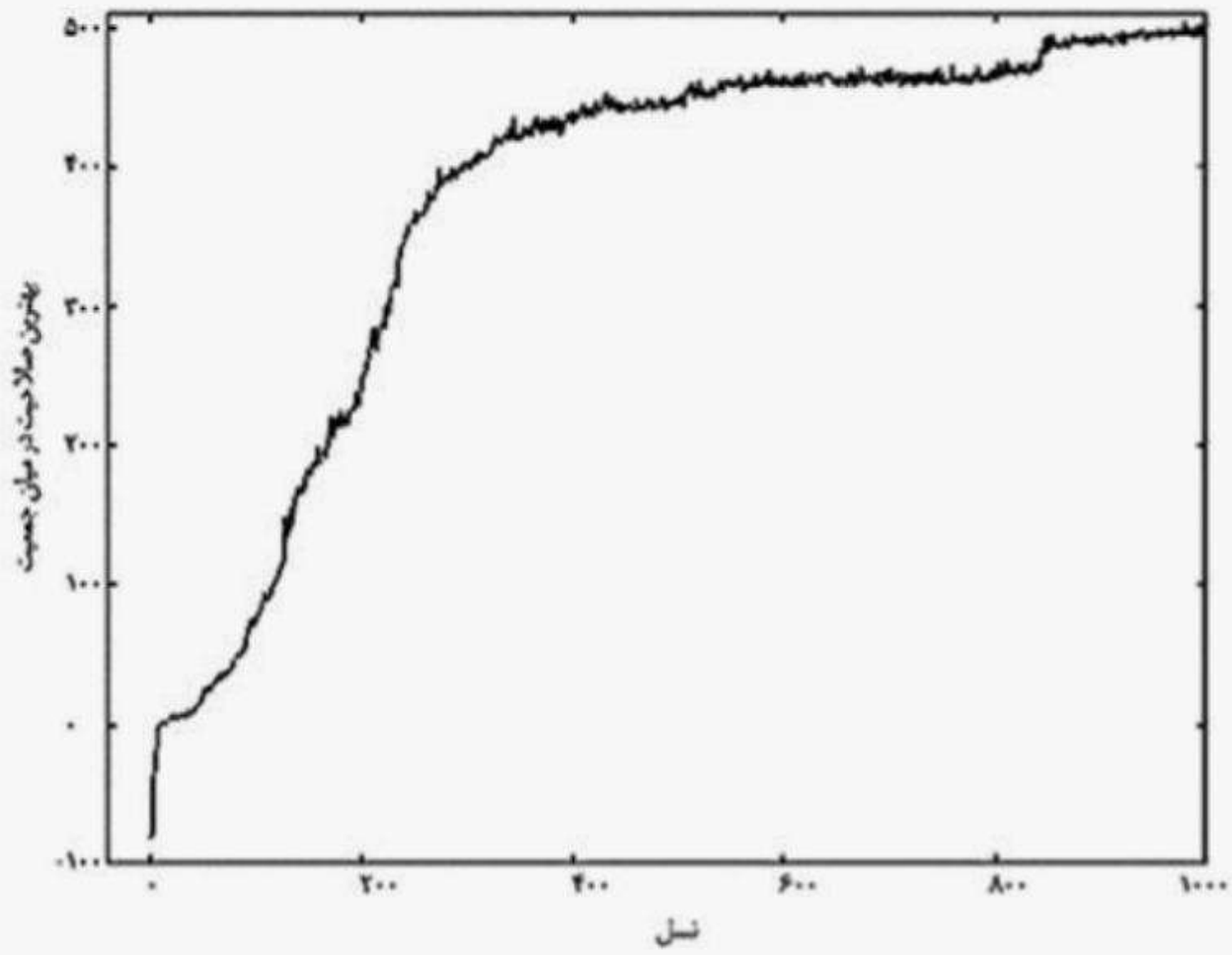
ژن‌شناسان اغلب نظریه‌های مربوط به کارکرد ژن‌ها را با "جهش‌های حذف‌کننده[۴۸۳]" به آزمایش می‌گذارند، در این فرایند از تکنیک‌های مهندسی ژنتیک استفاده می‌کنند تا مانع نسخه‌برداری[۴۸۴] از ژن موردنظر شده و تأثیر آن را در اندام‌واره مشاهده کنند. می‌توانم مشابه این آزمایش را در این مورد انجام دهم. درواقع آزمایشی را انجام دادم که در جریان آن ژن‌هایی را در G "حذف کردم" که این ترفند را امکان‌پذیر کردند: ژن‌ها را به صورتی تغییر دادم که هر ژن که متناظر با وضعیت "قوطی در خانه کنونی" است کنش برداشتن را داشته باشد. این کار امتیاز میانگین G را از عدد اصلی‌اش ۴۸۳ به ۴۴۳ پایین آورد، که از این فرضیه من حمایت می‌کند که این ترفند تا حدودی بر موفقیت G تأثیر دارد.

آلگوریتم ژنتیک چگونه یک استراتژی خوب را تکامل بخشید؟

پرسش بعدی این است که آلگوریتم ژنتیک، که با یک جمعیت تصادفی آغاز به کار کرد، چگونه توانست استراتژیی به خوبی G را تکامل بخشد؟

برای پاسخ به این پرسش، اجازه بدهید این موضوع را بررسی کنیم که استراتژی‌ها چگونه نسل به نسل بهبود یافتند. در شکل ۶-۹ صلاحیت بهترین استراتژی در رابطه با هر نسل در اجرای آلگوریتم ژنتیک را ترسیم کرده‌ام.می‌توانید ببینید که بالاترین صلاحیت از خیلی پایین‌تر از صفر

شروع می‌شود، تا حدود نسل ۳۰۰ به سرعت بالا می‌رود، سپس در بقیه اجرا آهسته‌تر بهبود می‌یابد.



شکل ۹-۶. منحنی بالاترین صلاحیت در میان جمعیت در رابطه با نسل، برای اجرای آلگوریتم ژنتیکی که در آن استراتژی G تکامل یافت.

اولین نسل شامل ۲۰۰ استراتژی است که به طور تصادفی تولید شده‌اند.

همان‌طور که احتمالا انتظار داشتید، تمامی آنها خیلی خیلی بد هستند.

بهترین آنها تنها صلاحیتی معادل ۸۱ - و بدترین آنها صلاحیتی معادل ۸۲۵- دارد.

رفتار رابی را در زمانی دنبال کردم که از بدترین استراتژی این نسل استفاده می‌کرد، یعنی در چند دور که هر کدام در محیط متفاوتی (پراکندگی قوطی‌ها) آغاز می‌شد. در برخی از محیط‌ها، رابی چند حرکت می‌کند، سپس گیر می‌افتد، کنش در جای ماندن را در تمامی مدت یک نوبت نظافت دوباره و دوباره اجرا می‌کند. در موارد دیگری او نوبت نظافت را صرف این می‌کند که بارها به دیوار برخورد کند. در موارد دیگری او تمام وقت خود را صرف این می‌کند که قوطی موهومی را در خانه کنونی‌اش بردارد. هیچ تعجبی ندارد که تکامل، این استراتژی را در همان اوایل کار هرس کرده است.

همچنین رفتار رابی را در زمانی دنبال کردم که رابی بهترین استراتژی این نسل را مورد استفاده قرار می‌دهد، که کماکان خیلی بد است و به شیوه‌ای مشابه با بدترین استراتژی گرفتار می‌شود. البته، نسبت به بدترین مورد چند برتری دارد: یکی اینکه کمتر محتمل است که مرتب به دیوار برخورد کند، گهگاه به یک خانه که قوطی دارد حرکت می‌کند و واقعا قوطی را برمی‌دارد! دیگر این‌که بهترین استراتژی نسل خود است، شانس این را بالا می‌برد که برای تولیدمثل انتخاب شود. وقتی درواقع انتخاب می‌شود، بچه‌های او این خصیصه‌های خوب را به ارث می‌برند

(همراه با تعداد زیادی خصیصه‌های بد).

وقتی به نسل دهم می‌رسیم، صلاحیت بهترین استراتژی در جمعیت تا صفر بالا آمده است. این استراتژی به طور معمول در حلقه در جای بمان گرفتار می‌شود، و هرازگاهی در چرخه‌ای از حرکت رفت و برگشتی بین دو خانه گیر می‌افتد. خیلی به‌ندرت به دیوار برخورد می‌کند. و مثل نیاکان خود در اولین نسل، خیلی به‌ندرت قوطی‌ها را برمی‌دارد.

آلگوریتم ژنتیک بهبود تدریجی‌اش در جهت بالاترین صلاحیت را ادامه می‌دهد. وقتی به نسل ۲۰۰ می‌رسیم، حداقل می‌توان گفت در بسیاری اوقات بالاترین استراتژی، یعنی ویژگی واقعا مهم حرکت به خانه‌هایی که قوطی دارند و برداشتن آن قوطی‌ها را کشف کرده است. اما، وقتی در بیابان بدون قوطی سردرگم می‌شود، با حرکت‌های تصادفی، مانند استراتژی،M وقت زیادی را تلف می‌کند. وقتی به نسل ۲۵۰ می‌رسیم یک استراتژی که کیفیتی مشابه M دارد به دست آمده است، و در نسل ۴۰۰، صلاحیت به بالاتر از سطح ۴۰۰ می‌رسد، با یک استراتژی که تنها اگر حرکت‌های تصادفی کمتری می‌کرد به خوبی G می‌بود. در نسل ۸۰۰، آلگوریتم ژنتیک این ترفند را کشف کرده است که قوطی‌هایی را به عنوان نشانگر قوطی همجوار به جای بگذارد، و در نسل ۹۰۰ ترفند یافتن و بعد حرکت در گرداگرد دنیا تقریبا کامل شده است، و تنها نیازمند چند تغییر مختصر است که تا نسل ۱۰۰۰ به کمال برسد.

گرچه ربوتی به نام رابی مثال نسبتا ساده‌ای برای آموزش آلگوریتم ژنتیک به مردم است، تفاوت چندانی با شیوه‌ای که آلگوریتم ژنتیک در دنیای واقعی به کار می‌رود ندارد. و در کاربردهای دنیای واقعی، مانند مورد رابی، آلگوریتم ژنتیک اغلب راه‌حلی را تکامل می‌بخشد که کارآمد است، اما درک علت کارآمدی آن اغلب دشوار است. در اغلب موارد دلیلش این است که آلگوریتم ژنتیک راه‌حل‌های خوبی را می‌یابد که کاملا متفاوت از آنهایی هستند که به فکر بشر می‌رسد. جیسن لون [۴۸۵] خبره آلگوریتم‌های ژنتیک در آژانس فضایی امریکا (ناسا)، بر این نکته تأکید می‌گذارد: "آلگوریتم‌های تکاملی ابزار مهمی برای اکتشاف گوشه‌های تاریک فضای طراحی هستند.

(طراحی‌تان) را به افرادی نشان می‌دهید که ۲۵ سال تجربه حرفه‌ای دارند و آنها می‌گویند "وای، واقعا کار می‌کند؟ " اغلب طراحی‌های تکامل‌یافته‌ای را می‌بینیم که کاملا غیرقابل فهمند."(۱۷) این طراحی‌ها شاید برای لون غیرقابل فهم باشند، اما کارآمدند. در سال ۲۰۰۵، لون و همکاران او جایزه "رقابت انسانی [۴۸۶]" را برای طراحی یک آنتن بدیع برای فضاپیمای ناسا دریافت کردند که بر مبنای آلگوریتم ژنتیک شکل گرفته بود، و این واقعیت را بازتاب می‌داد که طراحی مبتنی بر آلگوریتم ژنتیک در مقایسه با طراحی مهندسان انسانی بهتر کار می‌کند.

بخش سوم: محاسبه نمایان

حوزه مناسب علم کامپیوتر پردازش اطلاعات است که در همه‌جای طبیعت نمایان است.

کریس لانگتون (به نقل از کتاب پیچیدگی:

حیات بر لبه آشوب نوشته راجر لوین (۱)

فصل دهم: خودکار سلولی، حیات، جهان هستی

محاسبه در طبیعت

مقاله تازه‌ای در مجله سابنس، با عنوان "به کار گرفتن محاسبه در رفتار حشرات اجتماعی" پژوهش گروهی از حشره‌شناسان را توضیح می‌دهد که رفتار اجتماعات مورچه را به عنوان "آلگوریتم‌های کامپیوتری" توصیف می‌کنند که در آن هر مورچه تک برنامه ساده‌ای را اجرا می‌کند که به گروه در کلیت خود امکان می‌دهد یک محاسبه پیچیده را به انجام برساند، مانند کسب توافق در این مورد که که لانه گروه چه موقع و به کجا حرکت کند.

برنامه‌نویسی این محاسبه بر روی کامپیوتر کار ساده‌ای است: می‌توانم صرفا یک مورچه (مجازی) را به عنوان رهبر و تصمیم‌گیر انتخاب کنم.

تمامی مورچه‌های دیگر تنها شاهدان تصمیم رهبر هستند و از آن پیروی می‌کنند. اما همان‌طور که دیدیم، در اجتماعات مورچه‌ها رهبری وجود ندارد؛ "کامپیوتر، اجتماع مورچه‌ها شامل میلیون‌ها مورچه خودمختار است، که هر یک تصمیم‌ها و کنش‌هایش را تنها بر بخشی از مورچه‌ها مبتنی می‌کند که از سر اتفاق با آنها برهم‌کنش است. این امر به نوعی محاسبه می‌انجامد که بسیار متفاوت از شیوه‌ای است که کامپیوتر رومیزی ما با داشتن پردازشگر مرکزی و حافظه دستیابی تصادفی محاسبه می‌کند.

مقاله‌ای که سه پژوهشگر برجسته مغز در سال ۱۹۹۴ نوشتند، همان نظر را دنبال می‌کند و می‌پرسد، "آیا مغز کامپیوتر است؟" و پاسخ می‌دهد "اگر مفهوم گسترده‌تری از محاسبه را بپذیریم، پاسخ به طور قطع مثبت است."(۲) مانند مورد اجتماعات مورچه، روشن است که شیوه محاسبه مغز میلیاردها نورون که به صورت موازی و بدون کنترل مرکزی کار می‌کنند- بسیار متفاوت از شیوه کامپیوترهای دیجیتال کنونی است.

در دو فصل قبل مفهوم حیات و تکامل را که در کامپیوتر رخ می‌دهد بررسی کردیم. در این بخش از کتاب، به مفهوم متضاد آن می‌پردازیم؛ دامنه محاسبه‌ای که در طبیعت رخ می‌دهد. سیستم‌های طبیعی به چه معنا "محاسبه می‌کنند؟" در یک سطح کلی، می‌توان گفت محاسبه کاری است که سیستم پیچیده با اطلاعات می‌کند، به این منظور که در محیط موفق شود و انطباق پیدا کند. اما آیا می‌توانیم این گزاره را دقیق‌تر کنیم؟ اطلاعات در کجاست، و سیستم پیچیده دقیقا با آن چه می‌کند؟

به منظور این‌که چنین پرسش‌هایی بیشتر قابل مطالعه شود، دانشمندان معمولا مسئله را به صورت مطلوبی درمی‌آورند[۴۸۷] - یعنی، تا آنجایی که ممکن است آن را ساده می‌کنند، هرچند که جنبه‌های جالب توجه مسئله را نگه می‌دارند.

به منظور ساده کردن موضوع، محاسبه در طبیعت را از طریق یک مدل مطلوب از سیستم پیچیده‌ای به نام خودکار سلولی مورد پژوهش قرار داده‌اند.

خودکارهای سلولی

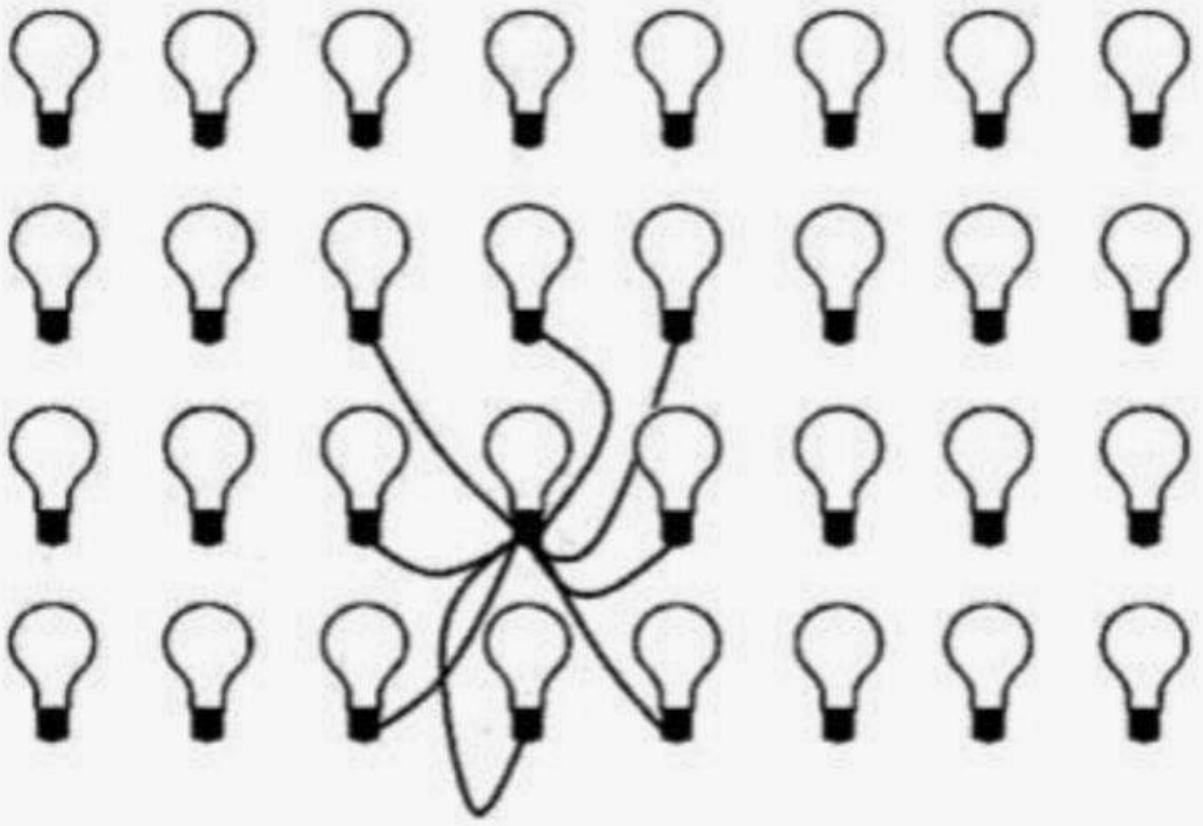
این مطلب را از فصل چهارم به یاد بیاورید که ماشین‌های تورینگ شیوه‌ای از صوری کردن[۴۸۸] مفهوم "روال معین" - یعنی محاسبه - را فراهم کردند.

محاسبه عبارت است از تبدیل ورودی، که ابتدا روی نوار ماشین تورینگ قرار دارد، از طریق مجموعه قواعد ماشین، به خروجی بر روی نوار و بعد از این‌که وضعیت توقف فرا رسیده است. این ماشین انتزاعی الهام‌بخش طراحی تمام کامپیوترهای بعدی بود. به دلیل خدمات جان فون نویمن، طراحی کامپیوترهای امروزی را "معماری به سبک فون نویمن" نامیده‌اند.

معماری به سبک فون نویمن شامل یک حافظه دستیابی تصادفی (RAM) است که هم دستورعمل‌های برنامه و هم داده‌ها را ذخیره می‌کند، و یک واحد پردازشگر مرکزی (CPU) که دستورعمل‌ها و داده‌ها را از حافظه می‌گیرد و دستورعمل را بر روی داده‌ها به اجرا می‌گذارد. همان‌طور که احتمالا می‌دانید، گرچه برنامه‌نویسان دستورعمل‌ها را با زبان‌های برنامه‌نویسی سطح بالا می‌نویسند، دستورعمل‌ها و داده‌ها عملا به صورت رشته‌هایی از ۰ و ۱ در کامپیوتر ذخیره می‌شوند. دستورعمل‌ها با ترجمه این‌گونه رشته‌های بیت به عملیات منطقی ساده، که بر روی داده اعمال می‌شوند، به اجرا درمی‌آیند و بعد از آن CPU محاسبه‌شان می‌کند. برای اجرای محاسبه تنها به معدودی عملگر[۴۸۹] ساده منطقی نیاز است، و واحدهای پردازشگر مرکزی کنونی می‌توانند در هر ثانیه میلیاردها از این‌گونه عملیات منطقی را اجرا کنند.

یک خودکار سلولی، که نسخه مطلوبی از یک سیستم پیچیده است، طراحی بسیار متفاوتی دارد. شبکه‌ای از لامپ‌های روشنایی را درنظر بگیرید که با باتری روشن می‌شوند، همان‌طور که در شکل ۱-۱۰ به نمایش درآمده.

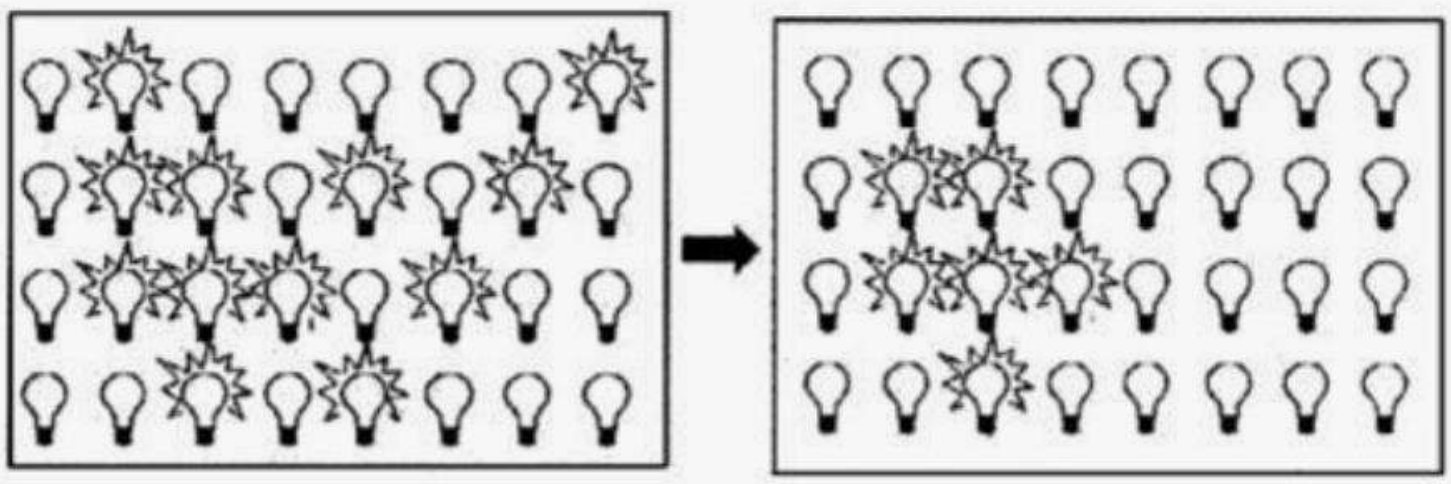
هر لامپ به تمامی لامپ‌های همجوارش که در شمال و جنوب و شرق و غرب، و نیز در جهت قطری قرار دارند متصل است، این اتصال‌ها تنها برای یکی از لامپ‌ها نشان داده شد، اما تصور کنید که همه لامپ‌های دیگر هم اتصال‌های همانندی دارند.



شکل ۱۰-۱. رشته‌ای از لامپ‌های روشنایی که هر کدام از آنها به همسایگانشان در جهت‌های شمال و جنوب و شرق، غرب، و جهت قطری متصل هستند، به همان صورتی که برای یک لامپ نشان داده شده. هر لامپ می‌تواند یا در وضعیت روشن باشد یا خاموش.

تصور کنید که هر چهار کناره به شکل حلقوی به هم وصل هستند برای مثال، لامپ بالا سمت چپ همسایه شرقی لامپ بالا سمت راست، و همسایه شمالی لامپ پایین چپ است.

در شکل ۱۰-۲ (کادر سمت چپ) برخی از لامپ‌ها روشن شده‌اند (برای این که شکل را ساده‌تر کنم، اتصال‌ها را نکشیده‌ام). پس از این که پیکربندی اولیه لامپ‌های روشن و خاموش مشخص شده‌اند، هر لامپ ساعتی را دنبال می‌کند که به آن می‌گوید چه موقع "وضعیتش را به روز کند - یعنی روشن کند یا خاموش؛ و تمامی ساعت‌ها همگاه [۴۹۰] شده‌اند تا لامپ‌ها وضعیت‌شان را بارها و در یک زمان به روز کنند. می‌توانید به این شبکه به صورت الگویی از کرم‌های شب‌تاب فکر کنید که در واکنش به درخشش کرم‌های شب‌تاب نزدیک‌شان برق می‌زنند یا تاریک می‌شوند، یا به صورت نورون‌هایی که به علت کنش نورون‌های نزدیک‌شان آتش می‌کنند یا بازداشته می‌شوند، و یا اگر ترجیح می‌دهید صرفا همانند عملکرد یک هنر انتزاعی به آن فکر کنید."



شکل ۱۰-۲. چپ: همان رشته لامپ‌های روشنایی شکل ۱۰۱، که از یک پیکربندی اولیه وضعیت‌های روشن یا خاموش آغاز شده. اتصال بین لامپ‌ها نشان داده نشده. راست: وضعیت

لامپ‌ها بر طبق قاعده "هر وضعیتی را که اکثر اعضای همسایگی دارند به خود بگیر."

لامپ چگونه تصمیم می‌گیرد که در هر گام زمانی روشن یا خاموش شود؟

هر لامپ از قاعده‌ای پیروی می‌کند که تابع وضعیت در همسایگی‌اش[۴۹۱] است یعنی وضعیت خودش (روشن است یا خاموش) و آن هشت همسایه که به آن متصل هستند.

برای مثال، فرض می‌کنیم قاعده‌ای که همه لامپ‌ها از آن پیروی می‌کنند این است که "اگر اکثریت لامپ‌ها در همسایگی من (از جمله خودم) روشن هستند، روشن شو (یا اگر روشن هستی به همین وضعیت بمان)، در غیر این صورت خاموش شو (یا اگر خاموش هستی، به همین وضعیت بمان)."

یعنی در هر همسایگی متشکل از نه لامپ، اگر پنج لامپ یا بیشتر روشن باشند، وسطی در گام زمانی بعدی روشن است. اجازه بدهید ببینیم که شبکه لامپ‌های روشنایی پس از یک گام زمانی چه می‌کنند.

همان‌طور که در شرح تصویر ۱-۱۰ توضیح داده شد، برای کسب اطمینان از این‌که هر لامپ روشنایی درواقع هشت همسایه داشته باشد، فرض می‌کنیم که شبکه پیرامونی شکل مدور دارد. تصور کنید که لبه بالا روی لبه پایین تا شود و آن را لمس کند، و لبه چپ تا شود و لبه راست را لمس کند، و شکلی مانند دونات به خود بگیرد. این کار برای هر یک از لامپ‌ها هشت همسایه فراهم می‌کند.

حال اجازه بدهید به قاعده‌ای که در بالا توضیح دادم برگردیم. شکل ۲-۱۰ شبکه اولیه و پیکربندی آن را پس از اجرای قاعده در گام زمانی بعدی نشان می‌دهد.

می‌توانستم قاعده بغرنج‌تری را تعریف کنم، مانند "اگر حداقل دو لامپ، اما نه بیشتر از هفت لامپ، در همسایگی من روشن هستند، روشن شو، در غیر این صورت خاموش شو" -که در این حال شبکه به روز شده متفاوت به نظر می‌رسید. یا: "اگر دقیقا یک لامپ خاموش است، یا دقیقا چهار لامپ در همسایگی روشن هستند، خاموش شو، در غیر این صورت روشن شو." تعداد قواعد ممکن بسیار زیاد است.

دقیقا چند قاعده ممکن را می‌توان تعریف کرد؟ اگر پاسخ دهیم "بسیار زیاد" واقعا ماجرا را دست‌کم گرفته‌ایم. پاسخ این است: "۲ به توان ۵۱۲" (۲۵)، عددی عظیم، بسیار بیشتر از تعداد اتم‌های کائنات (نگاه کنید به بخش یادداشت‌ها تا نحوه محاسبه این پاسخ را بفهمید. (۳)این شبکه لامپ‌های روشنایی یک خودکار سلولی است. به‌طورکلی‌تر، خودکار سلولی شبکه‌ای از سلول‌هاست که در آن، هر سلول واحد ساده‌ای است که در واکنش به وضعیت‌ها در همسایگی‌اش، روشن یا خاموش می‌شود. (به‌طورکلی، سلول را می‌توان با هر تعدادی از وضعیت تعریف کرد، اما در اینجا فقط از نوعی حرف می‌زنیم که روشن/ خاموش است.) یک قاعده برای خودکار سلولی - که قاعده به روز شدن سلول[۴۹۲] هم نامیده می‌شود _ صرفا قاعده

واحدی است که همه سلول‌ها از آن پیروی می‌کنند، و به سلول می‌گوید وضعیتش، به‌عنوان تابعی از وضعیت جاری در همسایگی‌اش، در گام زمانی بعدی چه باید باشد.

چرا می‌گویم که چنین سیستم ساده‌ای الگوی مطلوبی از یک سیستم پیچیده است؟ مانند سیستم‌های پیچیده موجود در طبیعت، خودکار سلولی متشکل از تعدادی زیادی اجزای ساده (یعنی سلول) هستند که هیچ‌گونه کنترل مرکزی ندارند، و هر کدام از آنها تنها با تعداد کمی از سایر اجزا ارتباط دارند. افزون بر این، خودکارهای سلولی می‌توانند رفتار بسیار پیچیده‌ای از خود بروز دهند که پیش‌بینی آن بر مبنای قاعده به روزرسانی سلول بسیار مشکل یا غیرممکن است.

این جان فون نویمن بود که در دهه ۱۹۴۰، بر مبنای اشاره‌ای از جانب همکار ریاضیدانش، استان الم[۴۹۳]، خودکار سلولی را مانند بسیاری دیگر از ایده‌های جالب توجه ابداع کرد. (در علم کامپیوتر این طنز بزرگی است، به خودکار سلولی اغلب به عنوان معماری به سبک غیر فون نویمنی اشاره می‌شد، در تقابل با معماری به سبک فون نویمنی، که این را هم فون نویمن ابداع کرد.) همان‌طور که در فصل هشتم توضیح دادم، فون نویمن می‌کوشید، منطق تولیدمثل در ماشین‌ها را صوری کند و خودکار سلولی را به عنوان شیوه‌ای برای نزدیک شدن به این مسئله انتخاب کرد. در یک کلام، او قادر بود برای خودکار سلولی قاعده‌ای طراحی کند که به ازای هر سلول، به جای دو وضعیت بیست و نه وضعیت داشته باشد، و نسخه کاملی از هر الگوی اولیه را به وجود آورد که در شبکه خودکار سلولی قرار داده شده است.

فون نویمن همچنین توانست نشان دهد که خودکار سلولی او معادل یک ماشین تورینگ عام است (با فصل چهارم مقایسه کنید). قاعده به روزرسانی سلول نقش قواعد هد نوار ماشین تورینگ را بازی می‌کند. و پیکربندی وضعیت‌ها نقش نوار ماشین تورینگ را ـ یعنی برای اجرای ماشین تورینگ برنامه و داده‌ها را کدگذاری می‌کند. به روزرسانی گام به گام سلول‌ها با تکرار گام به گام ماشین تورینگ عام متناظر است. سیستم‌هایی که از نظر قدرت معادل ماشین‌های تورینگ عام هستند، یعنی می‌توانند هر چیزی را که ماشین تورینگ محاسبه می‌کند محاسبه کنند، به‌طورکلی‌تر کامپیوتر عام[۴۹۴] نامیده می‌شوند، یا گفته می‌شود که قادر به محاسبه عام هستند یا امکان یک محاسبه عام را فراهم می‌آورند.

بازی حیات

قاعده خودکار فون نویمن نسبتا بغرنج بود؛ در سال ۱۹۷۰ ریاضیدان جان کان‌وی[۴۹۵]، یک خودکار ساده دو وضعیتی را ابداع کرد که قادر به محاسبه عام بود. او ابداع خود را "بازی حیات" نامید. مطمئن نیستم که بخش "بازی" این ترکیب از کجا آمده، اما بخش "حیات" آن ناشی از شیوه‌ای است که کان‌وی قاعده را عبارت‌بندی کرده بود. او با اطلاق صفت زنده به

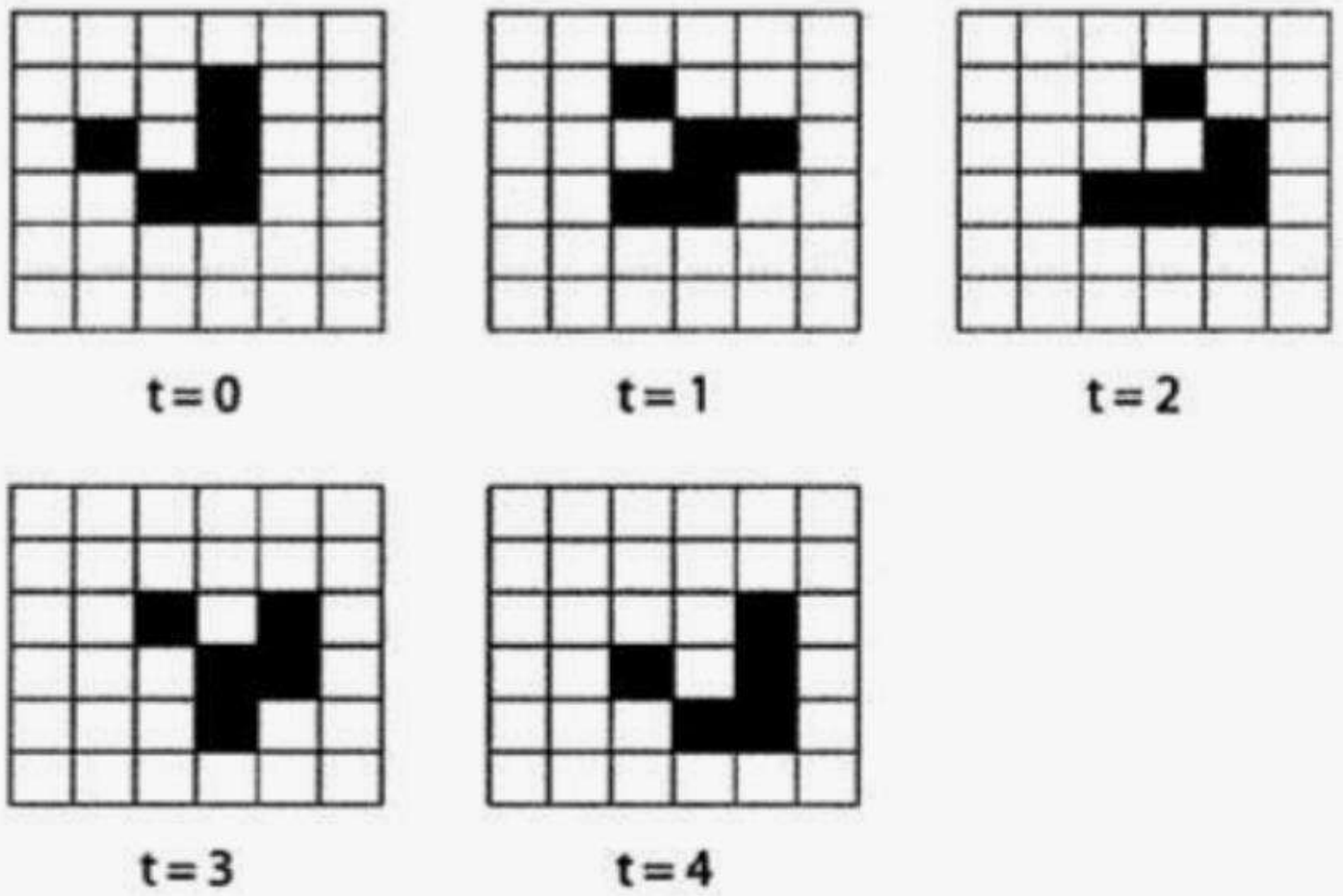
سلول‌های روشن، و مرده به سلول‌های خاموش، قاعده را برحسب چهار فرایند حیات تعریف کرد:

تولد، یک سلول با دقیقا سه همسایه زنده، در گام زمانی بعدی زنده می‌شود؛

بقا، یک سلول زنده با دقیقا دو یا سه همسایه زنده، زنده باقی می‌ماند؛ تنهایی، یک سلول زنده با کمتر از دو همسایه می‌میرد و یک سلول مرده با کمتر از سه همسایه مرده باقی می‌ماند؛ و ازدحام، یک سلول زنده یا مرده با بیش از سه همسایه جاندار می‌میرد یا مرده می‌ماند.

کان‌وی هنگامی به قاعده خودکار سلولی‌اش رسید که در جستجوی قاعده‌ای بود برای خلق رفتاری جالب (یا شاید شبیه حیات). درواقع بازی حیات از رفتارهای جالب بسیاری برخوردار است و جامعه کاملی از هواخواهان حیات وجود دارد که سرگرمی اصلی آنها اکتشاف الگوهای اولیه‌ای است که چنین رفتاری را خلق می‌کنند.

یک الگوی ساده که رفتار جالبی دارد گلایدری است که در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است. در اینجا، در عوض لامپ‌های روشنایی وضعیت‌های روشن (زنده) را با مربع‌های سیاه و وضعیت‌های خاموش (مرده) را با مربع‌های سفید نشان می‌دهم. شکل گلایدری را نشان می‌دهد که از موقعیت اولیه‌اش در جهت جنوب‌شرقی حرکت می‌کند. البته این سلول‌ها نیستند که حرکت می‌کنند؛ آنها در محلشان ثابتند. موجودیت‌های متحرک وضعیت‌های روشن هستند که یک شکل منسجم و پابرجا را می‌سازند. همان‌طور که پیش از این مطرح کردم، چون لبه‌های خودکار سلولی روی هم قرار می‌گیرند تا شکل دونات را بسازند، گلایدر به حرکت همیشگی‌اش به دور شبکه ادامه می‌دهد.



شکل ۳-۱۰. نمای نزدیک یک گلایدر در بازی حیات. پس از چهار گام زمانی، پیکربندی گلایدر

اصلی در جهت جنوب شرقی حرکت کرده است.

الگوهای ظریف دیگری که مشتاقان کشف کرده‌اند، عبارت است از فضاپیما، نوع جذاب‌تری از گلایدر، و تفنگ گلایدرزن[۴۹۶]، که به طور مداوم گلایدرهای جدید را ساقط می‌کند. کان‌وی نشان داد که چگونه با داشتن الگوهای وضعیت روشن/ خاموش متغیری که هد نوار را شبیه‌سازی کرده است و از یک نوار شبیه‌سازی شده می‌خواند و روی آن می‌نویسد، می‌توان ماشین‌های تورینگ را شبیه‌سازی کرد.

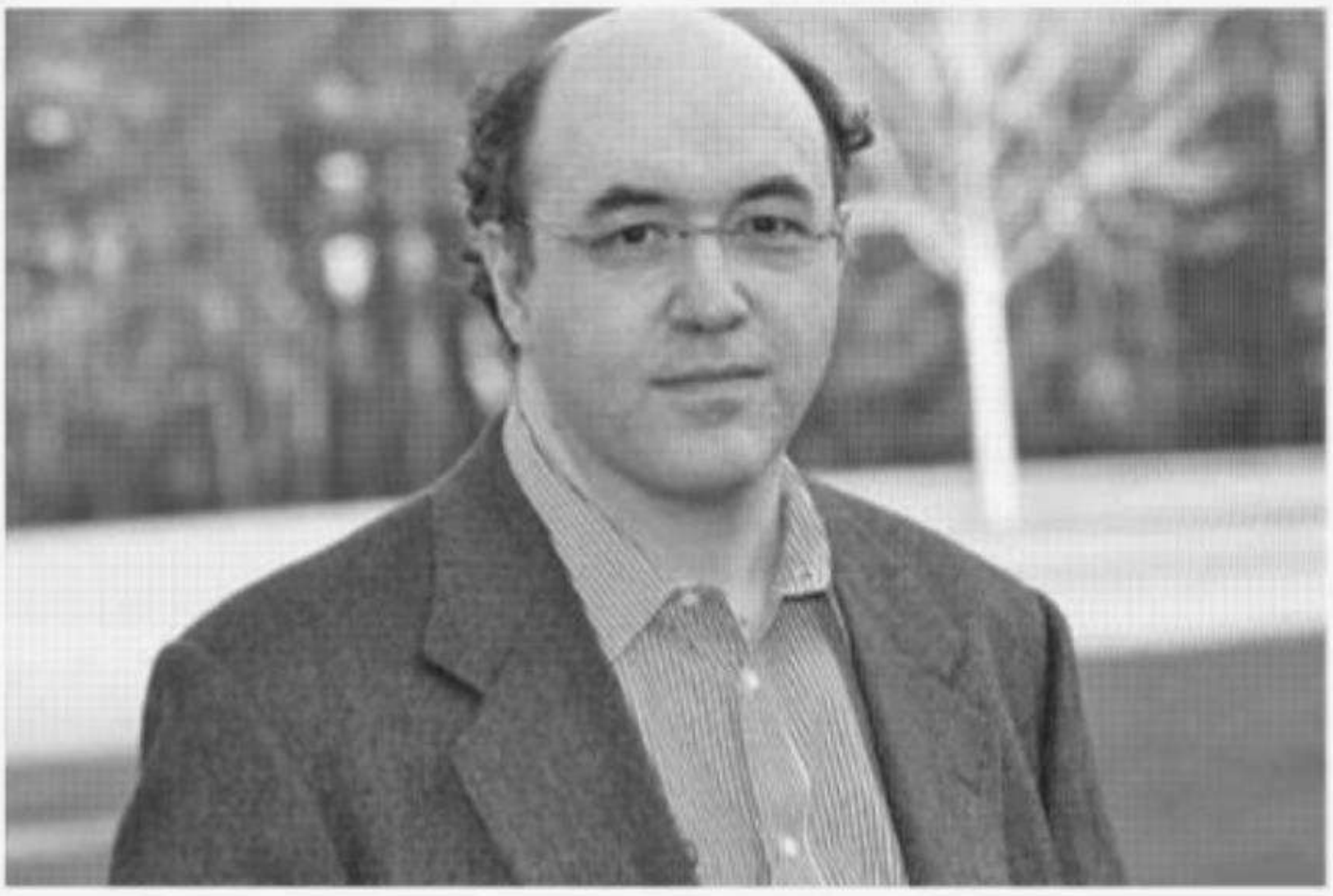
جان کان‌وی همچنین طرح کلی اثبات این امر را پایه‌ریزی کرداد و بعدها دیگران دقیق‌ترش کردند(۴) که بازی حیات می‌تواند یک کامپیوتر عام را شبیه‌سازی کند. و این بدان معناست که با فرض وجود یک پیکربندی اولیه از وضعیت‌های روشن و خاموش که برنامه و داده ورودی آن برنامه را کدگذاری می‌کند، بازی حیات این برنامه را بر روی داده اجرا می‌کند، و الگویی را تولید می‌کند که خروجی برنامه را به نمایش می‌گذارد.

اثبات کان‌وی شامل این بود که نشان دهد تفنگ‌های گلایدرزن، گلایدرها، و سایر ساختارها را می‌توان به نحوی ساخت که عملیات منطقی[۴۹۷]،OR،AND و NOT را انجام دهند. مدت‌هاست روشن شده است که هر ماشینی که ظرفیت کنار هم گذاردن تمامی ترکیب‌های ممکن این عملیات منطقی را داشته باشد قابلیت محاسبه عام را هم دارد. اثبات کان‌وی نشان داد که، در اصل، در بازی حیات تمامی چنین ترکیب‌هایی از عملیات منطقی امکان‌پذیر هستند.

فهمیدن این‌که چیزی به سادگی تعریف خودکار سلولی حیات، در اصل می‌تواند هر برنامه‌ای را که امکان اجرا شدن در یک کامپیوتر استاندارد را داشته باشد به اجرا درآورد، موضوعی بسیار خیره‌کننده است. اما در عمل، هر محاسبه نابدیهی[۴۹۸] مستلزم مجموعه بزرگی از عملیات منطقی است که به شیوه خاصی برهم کنش می‌کنند، و طراحی پیکربندی‌های اولیه‌ای که قابلیت محاسبه‌های نابدیهی را داشته باشند اگر غیرممکن نباشد، بسیار مشکل خواهد بود. و حتی اگر چنین امری ممکن بود، محاسبه متعاقب آن به صورت دردآوری کند و یا حداقل توأم با اسراف می‌بود؛ چون استفاده از منابع محاسباتی غیر فون‌نویمنی و بیش از حد موازی خودکار سلولی، برای شبیه‌سازی کامپیوتر سنتی به سبک فون نویمن بسیار کند است.

به این دلایل، برای انجام محاسبه‌های دنیای واقعی یا حتی ساختن مدل سیستم‌های طبیعی، از حیات (یا سایر خودکارهای سلولی "عام") استفاده نمی‌شود. آنچه از خودکار سلولی انتظار می‌رود بهره گرفتن از موازی‌گرایی[۴۹۹] آن و توان ساخت الگوهای پیچیده‌ای است که می‌توانند محاسبات را به شیوه‌ای غیرسنتی به انجام برسانند. اولین گام، توصیف انواع الگوهایی است که خودکارهای سلولی می‌توانند برعهده بگیرند.

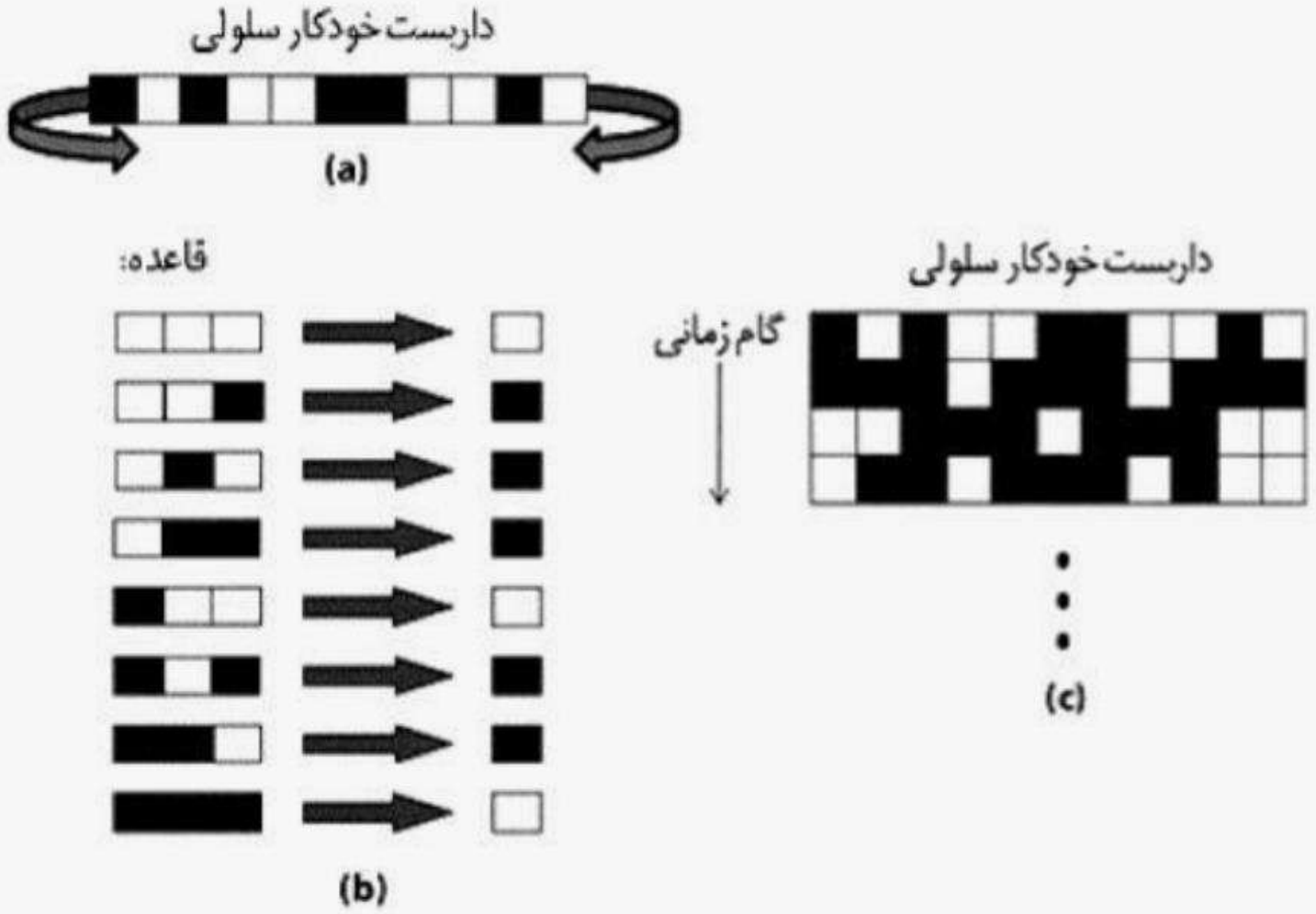
چهار طبقه در اوایل دهه ۱۹۸۰، استفن وولفرام[۵۰۰]، فیزیکدانی که در "انستیتوی مطالعات پیشرفته" دانشگاه پرینستون به کار مشغول بود، مجذوب خودکار سلولی و الگوهایی شد که این ماشین‌ها می‌سازند. وولفرام یکی از آن افراد افسانه‌ای است که از اوان کودکی نابغه هستند و مردم دوست دارند درباره‌شان داستان‌سرایی کنند. وولفرام که در سال ۱۹۵۹ در لندن متولد شده است، اولین مقاله‌اش درباره فیزیک را در ۱۵ سالگی نوشت. دو سال بعد، در تابستان پایانی سال اول تحصیلش در آکسفورد، وقتی که دانشجویان معمولا شغلی مانند نجات غریق می‌گیرند یا با کوله‌پشتی در اروپا می‌گردند، وولفرام مقاله‌ای در رشته "فام‌پویایی کوانتومی[۵۰۱]" نوشت که نظر فیزیکدان و برنده جایزه نوبل موری گل-مان را جلب نمود، و او از وولفرام دعوت کرد که به گروه او در کالتک (انستیتوی فنی کالیفرنیا) بپیوندد. دو سال بعد، در بیست سالگی، وولفرام دکترای خود را در فیزیک نظری دریافت کرد. (اکثر دانشجویان، پس از فارغ‌التحصیلی از کالج، مدرک دکترای خود را حداقل در پنج سال می‌گیرند.) سپس به هیأت علمی کالتک پیوست، و خیلی زود یکی از اولین بورس‌های "نوابغ" بنیاد مک‌آرتور[۵۰۲] را دریافت کرد. چند سال بعد، از او دعوت شد که به انستیتوی مطالعات پیشرفته در دانشگاه پرینستون بپیوندد.



استفن وولفرام

عجیب است. با همه آن شهرت و بودجه و آزادی عمل، وولفرام به مطالعه دینامیک خودکارهای سلولی پرداخت.

وولفرام، به سیاق معتبر و رایج در فیزیک نظری، مطالعه رفتار خودکارهای سلولی را از ساده‌ترین شکل آن آغاز کرد که عبارت بود از خودکارهای یک بعدی دو وضعیتی که در آنها هر سلول تنها به دو تا از نزدیک‌ترین همسایه‌هایش متصل است (شکل. ۱۰-۴a) وولفرام اینها را "خودکارهای سلولی بنیادی[۵۰۳]" نامید. او پی برد که اگر نتواند بفهمد در این سیستم‌های فوق ساده چه می‌گذرد، هیچ امکانی برای فهمیدن خودکارهای سلولی پیچیده‌تر (برای مثال، دو بعدی یا چند وضعیتی) نخواهد داشت.

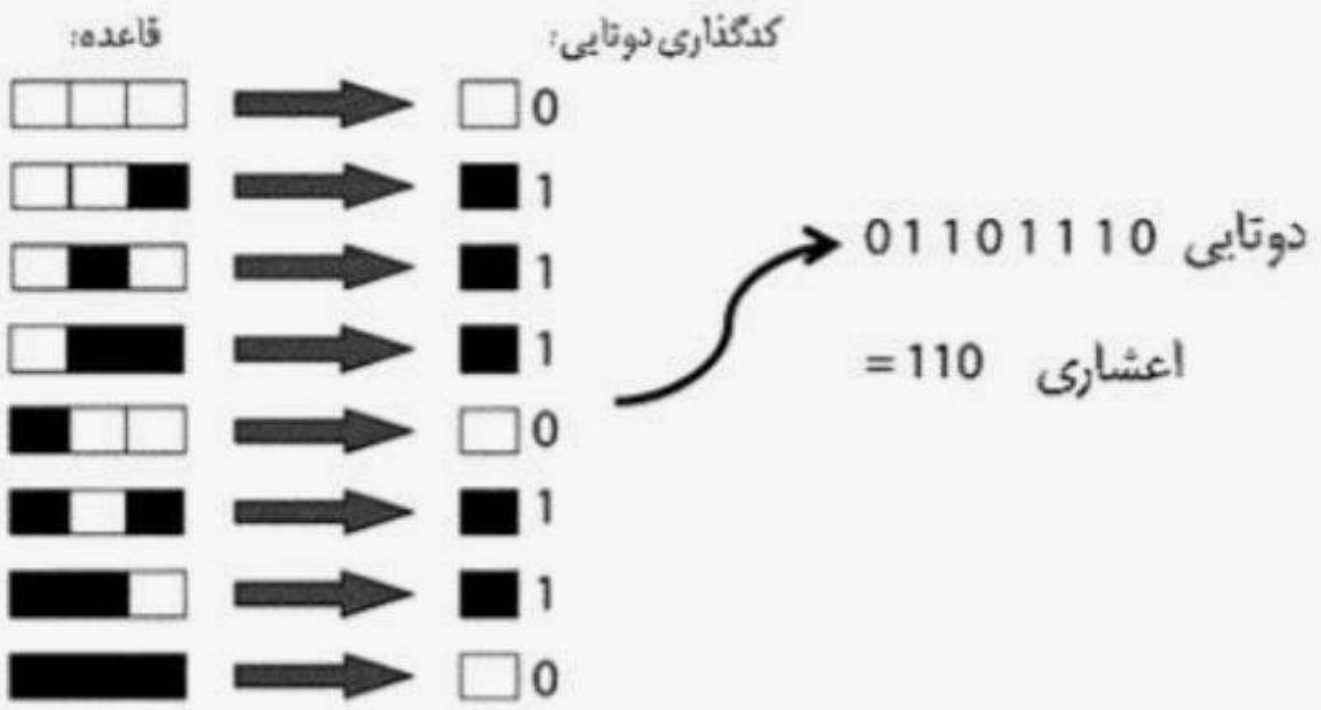


شکل ۴-۱۰. (a) نمایش یک شبکه تک‌بعدی که دو انتهای آن به شکل حلقوی به هم بسته شده‌اند؛ (b) یک قاعده ماشین خودکار سلولی بنیادی خاص (قاعده ۱۱۰) که به صورت فهرستی از پیکربندی‌های سه‌سلولی و وضعیت‌های تازه متناظر برای پیکربندی سلول میانی نشان داده شده؛ (c) یک نمودار فضایی-زمانی، که چهار پیکربندی پشت سر هم از خودکار سلولی را نشان می‌دهد.

شکل ۴-۱۰ یک قاعده خودکار سلولی بنیادی به‌خصوص را نشان می‌دهد. شکل ۴a-۱۰ شبکه آن را نشان می‌دهد - که در این مورد فقط یک ردیف سلول است که هر یک از آنها به همسایگانش در دو طرف متصل است. مانند قبل، هر سلول با یک مربع نشان داده شده - سیاه برای روشن و سفید برای خاموش. لبه‌های شبکه روی هم قرار می‌گیرند تا یک دایره بسازند. شکل ۱۰۴b قاعده‌ای را نشان می‌دهد که همه سلول‌ها از آن پیروی می‌کنند: برای هر یک از هشت پیکربندی ممکن در یک همسایگی با سه سلول، وضعیت تازه سلول میانی داده شده است. برای مثال، هر زمان که در یک همسایگی سه سلولی همه وضعیت خاموش دارند، سلول میانی باید در نوبت بعدی خاموش بماند. به همین منوال، هر وقت در یک همسایگی سه سلولی پیکربندی خاموش - خاموش - روشن را دارد، سلول میانی باید در نوبت بعدی وضعیتش را به روشن تغییر دهد. توجه کنید که دانش‌واژه قاعده به کل فهرست پیکربندی‌ها و وضعیت‌های تازه اشاره دارد، و نه به تک‌تک ردیف‌های فهرست. شکل ۴C-۱۰ یک نمودار فضایی-زمانی را برای این خودکار سلولی نشان می‌دهد. ردیف بالایی سلول‌ها شبکه‌ای تک‌بعدی است که با یک پیکربندی اولیه خاص از وضعیت‌های روشن و خاموش تنظیم شده است. هر ردیف بعدی رو به پایین، وضعیت تازه شبکه در نوبت بعدی است. چنین اشکالی را

نمودارهای فضایی-زمانی می‌نامند چون پیکربندی فضایی یک خودکار سلولی را در چند نوبت دنبال می‌کنند.

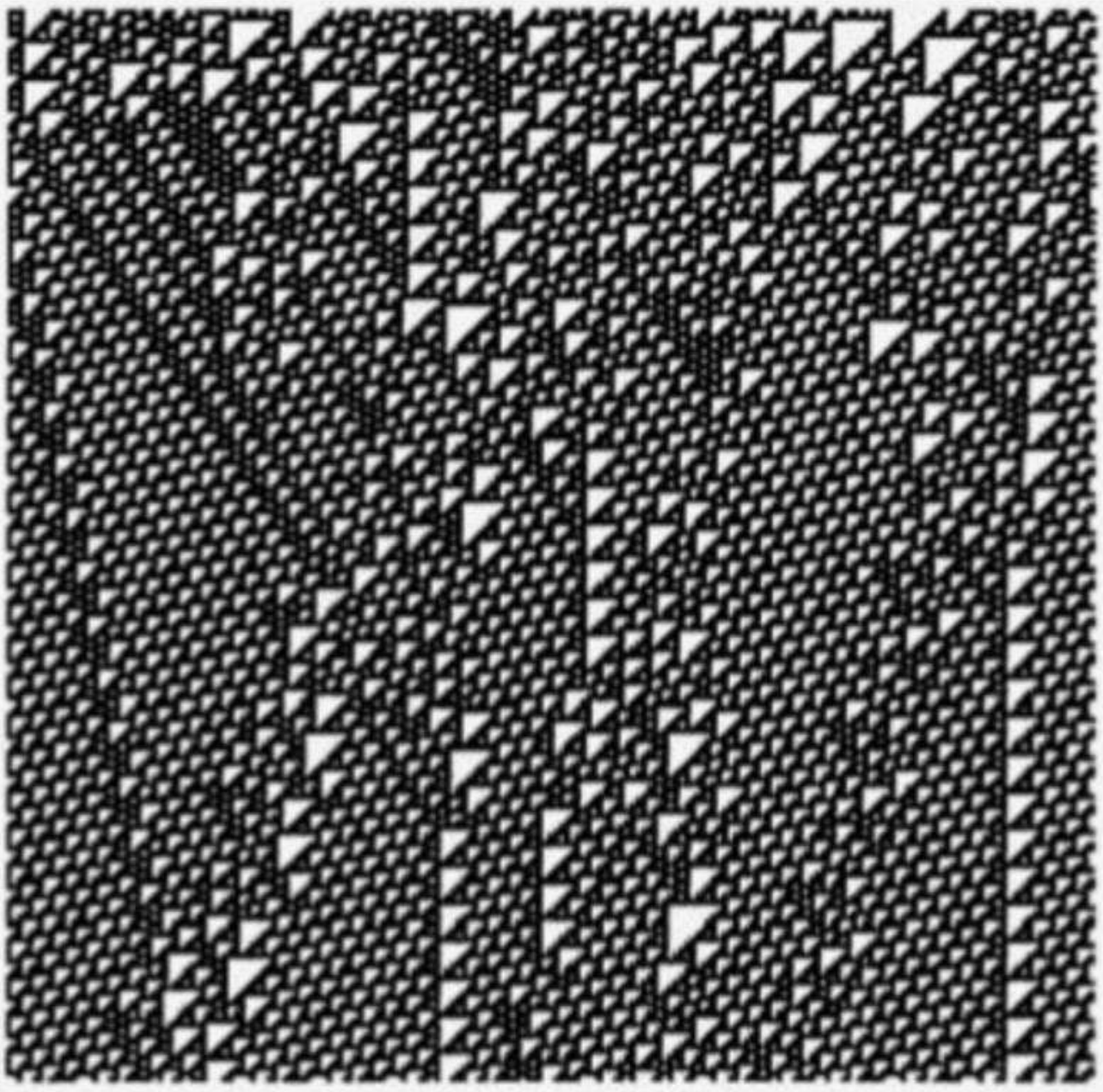
از آنجا که در همسایگی سه سلولی تنها هشت پیکربندی ممکن از وضعیت (مقایسه کنید با شکل ۱۰-۴ b و تنها دو شیوه ممکن برای پر کردن وضعیت تازه (روشن یا خاموش) در هر یک از هشت پیکربندی وجود دارد، تنها ۲۵۶ (۲۸) قاعده ممکن برای خودکارهای سلولی بنیادی وجود دارد. در دهه ۱۹۸۰، کامپیوترها آن‌قدر قدرت داشتند که وولفرام بتواند با بررسی رفتار آنها که از پیکربندی‌های مختلف شبکه اولیه آغاز می‌شدند، تک‌تک آنها را به طور کامل بررسی کند. وولفرام به هر قاعده خودکار سلولی بنیادی عدد شاخصی را منتسب کرد، همان‌طور که در شکل ۱۰-۵ نمایش داده شده. او وضعیت روشن را "۱" و وضعیت خاموش را "۰" نامید، و وضعیت‌های تازه مربوط به قاعده را به صورت رشته‌ای از ۱ و ۰ نوشت، که از وضعیت تازه در یک همسایگی که تماما روشن است آغاز می‌شد و در وضعیت تازه در همسایگی که تماما خاموش است پایان می‌یافت. همان‌طور که نشان داده شده، قاعده مفروض در شکل ۱۰-۴ به صورت ۰۱۱۰۱۱۱۰ نوشته شده است. وولفرام این رشته را به صورت عدد دوگان[۵۰۴]، یعنی در مبنای ۲، تفسیر کرد. رشته دوتایی ۰۱۱۰۱۱۱۰ مساوی عدد ۱۱۰ در سیستم دهگان[۵۰۵] است. از این‌رو این قاعده "قاعده ۱۱۰" نامیده می‌شود. یک مثال دیگر، قاعده‌ای با وضعیت‌های تازه ۱۱۱۱۰۰۰۰، "قاعده ۳۰" است. برای مطالعه نحوه تبدیل اعداد در مبنای ۲ به اعداد دهگان به یادداشت‌ها مراجعه (۷). کنید



شکل ۱۰-۵. نمایشی از سیستم عددی مورد استفاده استفن وولفرام در مورد خودکارهای سلولی بنیادی.

وولفرام و همکاران او زبان برنامه‌نویسی خاصی را به نام ماتماتیکا"[۵۰۶] طراحی کردند که تا حدی به این منظور طراحی شده بود که شبیه‌سازی خودکارهای سلولی را ساده کند. با استفاده از ماتماتیکا، وولفرام کامپیوترش را به نحوی برنامه‌ریزی کرد که بتواند خودکارهای سلولی

بنیادی را اجرا کند و نمودارهای فضایی-زمانی را برای نمایش آنها ترسیم کند. برای مثال، شکل‌های ۶-۱۰ و ۷-۱۰ طرح‌هایی مانند آن چیزی هستند که در شکل ۴-۱۰ آمده، منتها مقیاس آنها بزرگتر است. ردیف افقی بالا در شکل ۶-۱۰ یک پیکربندی اولیه تصادفی از ۲۰۰ سلول سیاه و سفید است، و هر ردیف بعدی نتیجه کاربرد قاعده ۱۱۰ بر روی هر سلول در ردیف قبلی است، برای ۲۰۰ نوبت. طرح شکل ۷-۱۰ الگویی را نشان می‌دهد که قاعده ۳۰ به وجود آورده، و از یک پیکربندی اولیه تصادفی آغاز شده است.



شکل ۶-۱۰. نمودار فضایی-زمانی قاعده ۱۱۰. شبکه خودکار سلولی تک‌بعدی ۲۰۰ سلول دارد، که نشان داده شده از یک پیکربندی اولیه تصادفی از وضعیت‌ها آغاز و در ۲۰۰ نوبت به وضعیت تازه می‌رسد.

@degar_goonesh



شکل ۷-۱۰. نمودار فضایی-زمانی قاعده ۳۰، با یک پیکربندی اولیه از وضعیت‌های تصادفی.

وقتی به شکل‌های ۶-۱۰ و ۷-۱۰ نگاه کنیم، احتمالا می‌فهمیم که چرا وولفرام در مورد خودکارهای سلولی بنیادی این‌قدر هیجان‌زده شد. این الگوهای پیچیده دقیقا به چه شکل از قاعده‌های خودکار سلولی ساده‌ای پدید آمدند؟

دیدن چنین پیچیدگیی که از قواعد ساده‌ای پدید می‌آیند برای وولفرام آشکارا یک کشف بود. او بعدها گفت: "خودکار قاعده ۳۰ حیرت‌آورترین چیزی است که در علم دیده‌ام ... چند سال طول کشید که اهمیت آن را درک کنم. اما در پایان فهمیدم که این تصویر فقط دربرگیرنده سر نخ چیزی است که شاید دیرپاترین معما در تمامی علم باشد: پیچیدگی دنیای طبیعی از کجا سرچشمه (۸)". می‌گیرد درواقع، قاعده ۳۰ آن‌چنان بر وولفرام تأثیر گذاشت که کاربرد آن را به عنوان بخشی از مولد اعداد شبه تصادفی به ثبت رساند. (۹) در جریان پیمایش تمامی ۲۵۶ خودکار سلولی بنیادی، او به مرور زمان رفتار هر یک را که از پیکربندی‌های اولیه متفاوتی آغاز شده بودند، نظاره کرد. برای هر خودکار سلولی بنیادی و هر پیکربندی اولیه، او قاعده خودکار سلولی را آن‌قدر در شبکه تکرار کرد - تا خودکار سلولی نوعی ثبات رفتار را به نمایش گذاشت. او مشاهده کرد که این رفتار در چهار طبقه می‌گنجد.

طبقه ۱: تقریبا تمامی پیکربندی‌های اولیه با الگوی نهایی یکسانی ثبات پیدا می‌کنند. قاعده ۸ نمونه‌ای از این طبقه است؛ برای تمامی پیکربندی‌های اولیه، تمامی سلول‌های شبکه به سرعت

به وضعیت خاموش منتقل می‌شوند و در این حالت باقی می‌مانند.
طبقه ۲: تقریبا تمامی پیکربندی‌های اولیه یا با یک الگوی نهایی یکسان ثبات پیدا می‌کنند یا بین چند الگوی نهایی در نوسان‌اند.
طبقه ۳: اکثر پیکربندی‌های اولیه رفتاری شبه تصادفی ایجاد می‌کنند، هرچند که مثلث‌ها یا سایر ساختارهای منظم حضور دارند.
قاعده ۳۰ (شکل ۷-۱۰) مثالی از این طبقه است.
طبقه ۴: جالب‌ترین طبقه. آن‌طور که وولفرام توضیح می‌دهد: "طبقه چهار آمیزه‌ای از نظم و بی‌نظمی است: ساختارهایی موضعی به وجود می‌آیند که تک‌تک‌شان نسبتا ساده هستند، اما این ساختارها به این طرف و آن طرف حرکت می‌کنند و به شیوه‌هایی بسیار پیچیده برهم‌کنش می‌کنند."(۱۰) قاعده ۱۱۰ (شکل ۶-۱۰) مثالی از این طبقه است.
وولفرام تصور می‌کرد که به دلیل این پیچیدگی الگوها و برهم‌کنش‌ها، تمام قواعد طبقه ۴ محاسبه عام را به انجام می‌رسانند. اما اثبات این‌که یک خودکار سلولی خاص، خواه ماشین تورینگ یا هر وسیله دیگری، عام است، به‌طورکلی بسیار مشکل است. اثبات این‌که یک ماشین تورینگ عام وجود دارد برای تورینگ یک موفقیت بود، همان‌طور که اثبات فون نویمن مبنی بر این‌که خودکار تولیدمثل‌کننده او نیز یک کامپیوتر عام است برای او موفقیت به شمار می‌آمد.
از آن زمان چندین پژوهشگر اثبات کرده‌اند که خودکارهای سلولی ساده (همانند بازی حیات) عام هستند. در دهه ۱۹۹۰، ماتیو کوک[۵۰۷]، یکی از دستیاران پژوهشی وولفرام، سرانجام اثبات کرد که قاعده ۱۱۰ واقعا عام است، که شاید ساده‌ترین نمونه شناخته شده یک کامپیوتر عام باشد. (۱۱)

"نوع جدیدی از علم" از دید وولفرام (۱۲)

در سال ۱۹۹۸ که کوک در یک کارگاه علمی در سانتافه، درباره نظراتش صحبت می‌کرد، برای اولین بار با نتایج پژوهش او آشنا شدم. واکنش من، مانند بسیاری دیگر از همکارانم این بود که "خیلی باحال است! خیلی بدیع است! اما اهمیت عملی یا علمی چندانی ندارد." قاعده ۱۱۰، همانند بازی حیات، نمونه‌ای از یک سیستم ساده قطعی است که می‌تواند یک رفتار پیچیده غیرقابل پیش‌بینی را به وجود بیاورد. اما در عمل بسیار مشکل بود که یک پیکربندی اولیه‌ای را طراحی کرد که منجر به محاسبه‌ای دلخواه و نامعمولی شود. افزون بر این، قاعده ۱۱۰ از بازی حیات هم کامپیوتر کندتری است.
نظر وولفرام درباره آن نتایج بسیار متفاوت است. در کتابی که در سال ۲۰۰۲ با عنوان نوع جدیدی از علم[۵۰۸] نوشت، عام بودن قاعده ۱۱۰ را به عنوان گواهی بر "یک قانون جدید طبیعت" یعنی اصل هم‌ارزی محاسباتی[۵۰۹]، تفسیر کرد. اصل پیشنهادی وولفرام شامل چهار بخش

است:

۱. شیوه مناسب فکر کردن به فرایندهای موجود در طبیعت این است که آنها محاسبه هستند.

۲. چون حتی قاعده‌ها (یا برنامه‌های) بسیار ساده‌ای مانند قاعده ۱۱۰ می‌توانند محاسبه عام را امکان‌پذیر کنند، قابلیت امکان‌پذیر کردن محاسبه عام در طبیعت بسیار متداول است.

۳. محاسبه عام حد بالایی پیچیدگی محاسبه در طبیعت است. یعنی هیچ‌یک از سیستم‌ها یا فرایندهای طبیعت نمی‌توانند رفتاری را به وجود آورند که "محاسبه‌ناپذیر" باشد.

۴. محاسبات انجام شده توسط فرایندهای طبیعت تقریبا همیشه در بغرنجی هم‌ارزند.

فهمیدید؟ می‌پذیرم که فهمیدن معنای این اصل کاری سخت است، و منظور اصلی کتاب ۱, ۲۰۰ صفحه‌ای وولفرام تشریح این اصل و نشان دادن این است که این اصل در تمامی حوزه‌های متنوع علم کاربرد دارد. تمام کتاب وولفرام را خوانده‌ام و بازهم کاملا نمی‌فهمم که وولفرام چه می‌خواهد بگوید.

اما بهترین تفسیری را که از آن دارم به دست می‌دهم.

منظور وولفرام از "فرایندهای موجود در طبیعت محاسبه هستند" شبیه آن چیزی است که در شکل‌های ۶-۱۰ و ۷-۱۰ می‌بینید. یک خودکار سلولی، در هر زمان، حاوی اطلاعات _ یا پیکربندی وضعیت‌ها_ است و اطلاعات را از طریق اعمال قواعدش بر پیکربندی جاری پردازش می‌کند.

وولفرام معتقد است که سیستم‌های طبیعی تا حدودی به همین شکل کار می‌کنند - یعنی این‌که دربرگیرنده اطلاعات هستند و این اطلاعات را بر طبق قواعد ساده‌ای پردازش می‌کنند. در کتاب نوعی جدید از علم (یا "NKS" به صورتی که اهل فن نام‌گذاری‌اش کرده‌اند)، وولفرام موضوعات علمی از قبیل فیزیک کوانتوم، زیست‌شناسی تکاملی و زیست‌شناسی رشد، اقتصاد، و بسیاری موضوعات دیگر را به بحث می‌گذارد، و می‌کوشد نشان دهد که چگونه هر کدام از آنها را می‌توان به بهترین وجه برحسب محاسبه از طریق قواعد ساده توضیح داد. در اساس، "نوع جدیدی از علم" او به این ایده اشاره دارد که جهان هستی و هر چه را در آن است می‌توان با چنین برنامه‌های ساده‌ای توضیح داد. این محاسبه‌ای است نمایان، بسیار نمایان.

حال، طبق نظر وولفرام، چون قواعد بسیار ساده‌ای مانند قاعده ۱۱۰، می‌توانند محاسبه عام را امکان‌پذیر کنند، پس اکثر سیستم‌های طبیعی - و بغرنج‌تر از قاعده ۱۱۰ - نیز احتمالا می‌توانند محاسبه عام را امکان‌پذیر کنند. وولفرام معتقد است هیچ محاسبه‌ای پیچیده‌تر از محاسبه‌ای نیست که یک کامپیوتر عام با فرض ورودی درست، می‌تواند به انجام برساند. بدین ترتیب پیچیدگی محاسبات ممکن در طبیعت سقفی دارد.

همان‌طور که در فصل چهارم توضیح دادم، آلان تورینگ نشان داد که کامپیوترهای عام در اصل می‌توانند هر چه را "محاسبه‌پذیر" است محاسبه کنند. اما برخی از محاسبات از بقیه ساده‌تر

هستند. گرچه هر دو مورد زیر را می‌توان روی یک کامپیوتر اجرا کرد، اما برنامه "۱+۱ را محاسبه کنید" از برنامه‌ای که آب و هوای کره زمین را شبیه‌سازی می‌کند، محاسبات ساده‌تری دارد، درست است؟ اما اصل وولفرام درواقع تأکید می‌کند که "بغرنجی" تمامی محاسباتی که عملا در طبیعت انجام می‌شود یکسان است.

آیا هیچ کدام از این حرف‌ها معنی می‌دهند؟ هنوز خیلی مانده است تا نظریه‌های وولفرام به طور عام پذیرفته شود. ارزیابی خودم را برایتان توضیح می‌دهم. در مورد نکات ۱ و ۲، تصور می‌کنم که وولفرام با مطرح کردن این‌که مدل‌ها و آزمایش‌های کامپیوتری ساده می‌توانند به پیشرفت زیادی در علم بینجامند، در مسیر درستی حرکت می‌کند - و این در مثال‌های سراسر کتاب او نشان داده شده است. همان‌طور که در فصل دوازدهم توضیح خواهم داد، تصور می‌کنم بتوان رفتار بسیاری از سیستم‌های طبیعی را برحسب پردازش اطلاعات تفسیر کرد. این را هم باورپذیر می‌دانم که بسیاری از این‌گونه سیستم‌ها می‌توانند محاسبه عام را امکان‌پذیر کنند، گرچه اهمیت این موضوع برای علم هنوز روشن نشده است.

در رابطه با نکته ۳، هنوز قضاوت روشنی دراین‌باره وجود ندارد که آیا در طبیعت فرایندهایی وجود دارند که از کامپیوترهای عام قدرتمندتر باشند (یعنی، بتوانند چیزهایی را محاسبه کنند که "محاسبه‌ناپذیر" هستند). اثبات شده است که اگر بتوان کامپیوترهای واقعا غیر دیجیتال را ساخت (یعنی، کامپیوترهایی که بتوانند اعدادی را محاسبه کنند که بی‌نهایت رقم پس از نقطه اعشار دارند)، پس می‌توان کامپیوتری را ساخت که مسئله توقف را حل کند ۳- مسئله محاسبه‌ناپذیر تورینگ که در فصل چهارم به آن اشاره شد.

برخی، از جمله وولفرام، باور ندارند که اعدادی با بی‌نهایت رقم اعشار واقعا در طبیعت وجود دارند - یعنی تصور می‌کنند که طبیعت اساسا دیجیتال است.

هیچ‌گونه شواهد متقاعدکننده‌ای به نفع هیچ یک از دو طرف وجود ندارد.

نکته ۴ را اصلا نمی‌فهمم. این را باورپذیر می‌دانم که مغز من می‌تواند محاسبه عام را امکان‌پذیر کند (حداقل تا آنجایی که ظرفیت حافظه محدود من اجازه می‌دهد)؛ این را هم می‌پذیرم که مغز کرم سی. الگانس[۵۱۰] نیز تقریبا عام است، اما این را درک نمی‌کنم که آن محاسبات واقعی که درگیرش می‌شویم، در بغرنجی یکسان باشند.

وولفرام در گمانه‌زنی‌هایش باز هم جلوتر می‌رود، و پیش‌بینی می‌کند که یک قاعده ساده شبه-خودکار سلولی وجود دارد که "مدل نهایی و قطعی جهان هستی" است، خودکار سلولی ازلی که محاسبات آن منبعی است برای آنچه وجود دارد. طول این قاعده چقدر است؟ وولفرام می‌گوید "گمان می‌کنم حقیقتا خیلی کوتاه باشد." اما چه‌قدر کوتاه؟ "در زبان ماتماتیکا نمی‌دانم چه‌قدر، شاید سه یا چهار سطر کد باشد."(۱۵) محاسبه‌ای نه چندان نمایان.

وقتی کتاب نوع جدیدی از علم در سال ۲۰۰۲ منتشر شد بازتاب وسیعی داشت - پرفروش‌ترین

کتاب آمازون شد و ماه‌ها پرفروش ماند. انتشار آن با کمپین تبلیغاتی بزرگی همراه بود، که شرکت وولفرام مدیا[۵۱۱] که وولفرام برای انتشار کتابش تأسیس کرده بود، آن را سازمان داده بود. واکنش‌ها به کتاب دوگانه بود: برخی آن را درخشان و انقلابی می‌دانستند و برخی دیگر خودبزرگ‌بینانه و متفرعن و فاقد محتوا (برای مثال، منتقدان اشاره می‌کردند که فیزیکدانان کنراد زوس[۵۱۲] و ادوارد فردکین[۵۱۳]" هردو در همان اوایل دهه ۱۹۶۰ این نظریه را مطرح کرده بودند که جهان هستی یک خودکار سلولی است (۱۶) اما، نیات وولفرام هرچه که باشد، ما معتادان به خودکار سلولی همه می‌توانیم بپذیریم که کتاب نوع جدیدی از علم تبلیغ مثبتی برای شور مبهم ما بود.

فصل یازدهم: محاسبه با ذرات

در سال ۱۹۸۹ بر حسب اتفاق مقاله‌ای به قلم فیزیکدان نورمن پاکارد[۵۱۴] را می‌خواندم که درباره استفاده از آلگوریتم ژنتیک برای طراحی ماشینی قواعد خودکار سلولی بود. بلافاصله جذب موضوع شدم و تمایل پیدا کردم خودم آن را به آزمایش بگذارم. مسائل دیگری سر راهم قرار گرفت (از جمله به پایان رساندن پایان‌نامه دکترایم)، اما کار کردن روی این موضوع همیشه در پس ذهنم بود. چند سال بعد که پایان‌نامه‌ام به پایان رسیده و شغل پژوهشی‌ام را در سانتافه آغاز کرده بودم، سرانجام فرصت کردم این موضوع را زیر و رو کنم. در آن زمان دانشجوی جوانی به نام پیتر هرابر[۵۱۵]" به انستیتو می‌آمد و به دنبال انجام کاری بود. به همین جهت او را استخدام کردم تا در این پروژه به من کمک کند. کمی بعد یک دانشجوی کارشناسی ارشد به نام راجارشی داس[۵۱۶]"، به ما ملحق شد که به طور مستقل پروژه مشابهی را آغاز کرده بود.

ما هم مثل پاکارد برای تکامل بخشیدن قواعد خودکار سلولی به منظور کار خاصی به نام "طبقه‌بندی اکثریت[۵۱۷]"" از یک آلگوریتم ژنتیک استفاده کردیم. کار ساده‌ای است: خودکار سلولی باید محاسبه کند که در پیکربندی اولیه وضعیت‌های روشن در اکثریت هستند یا وضعیت‌های خاموش. اگر وضعیت‌های روشن در اکثریت باشند، خودکار سلولی با روشن کردن تمامی سلول‌ها از این واقعیت خبر می‌دهد. به همین ترتیب، اگر در ابتدا اکثر سلول‌ها خاموش باشند، خودکار سلولی باید تمام سلول‌ها را خاموش کند (اگر تعداد وضعیت‌های اولیه روشن و خاموش مساوی باشند، پاسخی وجود ندارد، اما با استفاده از یک خودکار سلولی که تعداد سلول‌هایش فرد باشد می‌توان از این وضعیت اجتناب کرد. آزمایش طبقه‌بندی اکثریت درواقع مثل این است که بخواهید پیروزی یکی از دو نامزد انتخاباتی را در شهرتان پیش‌بینی کنید و تنها شواهدی که در اختیار دارید، علائم تبلیغات انتخاباتیی است که اهالی محله شما، در چمن جلوی خانه‌شان نصب کرده‌اند.

کار طبقه‌بندی اکثریت برای کامپیوتری به سبک فون نویمن کار پیش‌پا افتاده‌ای است. واحد پردازش مرکزی باید صرفا تعداد وضعیت‌های روشن و خاموش پیکربندی اولیه را بشمارد، و نتیجه شمارش در هر گام را در حافظه ذخیره کند و وقتی شمارش پایان می‌گیرد، دو جمع نهایی را از حافظه بازخوانی کند، مشخص سازد کدام بزرگتر است، و بر مبنای این مقایسه، پیکربندی را به حالتی که همه روشن یا همه خاموش‌اند برگرداند. کامپیوت به سبک فون نویمن به آسانی از عهده این کار برمی‌آید چون برای ذخیره پیکربندی اولیه و مقدار جمع در مراحل میانی دارای حافظه‌ای با دستیابی تصادفی است، و برای انجام شمارش، مقایسه نهایی، و تنظیم دوباره وضعیت‌ها از یک واحد پردازش مرکزی برخوردار است.

در مقابل، یک خودکار سلولی نه حافظه‌ای با دستیابی تصادفی دارد و نه واحد پردازش مرکزی

که شمارش را انجام دهد. تنها سلول‌های منفردی دارد که هر کدام تنها از وضعیت خود و وضعیت سلول‌های مجاورشان مطلع هستند. این وضعیت نسخه آرمانی بسیاری از سیستم‌های دنیای واقعی است. برای مثال، یک نورون، که فقط تعداد محدودی ارتباط با سایر نورون‌ها دارد، برای این‌که به طور کلی الگوی آتش کردن در تعداد زیادی نورون را نشان دهد که بازنمود ورودی حسی خاصی هستند، باید تصمیم بگیرد که آتش کند یا نکند و با چه آهنگی آتش کند. به همین ترتیب، همان‌طور که در فصل دوازدهم توضیح خواهم داد، مورچه، تنها بر مبنای برهم‌کنش‌اش با تعداد نسبتا کمی مورچه - و به این منظور که به کل اجتماع سود برساند - باید تصمیم بگیرد که در یک زمان مشخص چه کاری را بر عهده گیرد.

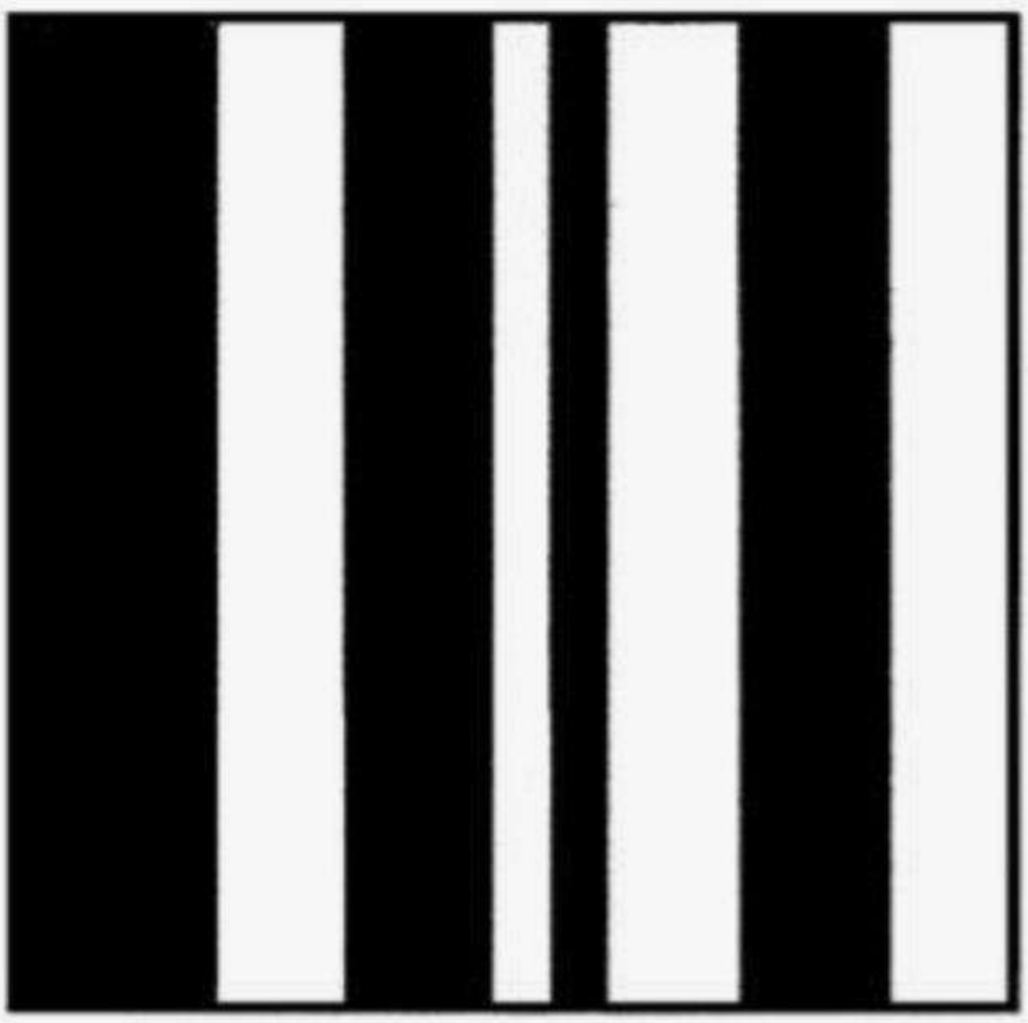
جان کلام این است که به‌طورکلی طراحی خودکار سلولی برای انجام کارهایی که مستلزم تصمیم مشترک در میان همه سلول‌هاست کار دشواری است. پیتر و من علاقه‌مند بودیم بدانیم که آلگوریتم ژنتیک چگونه می‌تواند این مسئله طراحی را حل کند.

با استفاده از نتایج کار نورمن پاکارد، به عنوان یک نقطه آغاز، شبیه‌سازی‌هایی از خودکارهای سلولی تک-بعدی را کدگذاری کردیم که در آن هر سلول به سه سلول در هر طرف مرتبط است - یعنی اندازه همسایگی هر سلول (از جمله خود سلول) هفت است.

چند لحظه‌ای فکر کنید که چگونه ممکن است قاعده‌ای برای یک خودکار سلولی مثل این را طراحی کنید که کار طبقه‌بندی اکثریت را به انجام برساند. اولین حدس منطقی برای چنین قاعده‌ای می‌تواند این باشد: "هر سلولی باید وضعیتی را به خود گیرد که در آن زمان وضعیت اکثریت سلول‌های مجاورش است." گفتن این حرف مثل این است که پیش‌بینی انتخاباتی‌تان را بر این مبنا استوار کنید که اکثریت علایم موجود در حیاط شما و در محله، پشتیبان کدام نامزد است. اما همان‌طور که نمودار فضایی-زمانی در شکل ۱-۱۱ نشان می‌دهد، این خودکار سلولی "رأی اکثریت محله" کارکردی ندارد.

پیکربندی اولیه دارای اکثریتی از سلول‌های سیاه است، و هر سلول طبق قاعده رأی اکثریت محله در مدت ۲۰۰ گام زمانی وضعیت خود را به روز خواهد کرد. خواهید دید که شبکه به سرعت در الگویی پایدار از مناطق سیاه و سفید ثبات پیدا می‌کند. مرزهای بین مناطق در موقعیت‌هایی قرار دارند که محدوده‌های اکثریت سیاه با محدوده‌های اکثریت سفید همپوشانی دارند.

پیکربندی نهایی، که هم شامل سلول‌های سیاه و هم شامل سلول‌های سفید است، پاسخ مطلوبی برای کار طبقه‌بندی اکثریت نیست. مسئله این است که به کمک این قاعده، هیچ راهی برای منطقه سیاه وجود ندارد که، برای مثال، طولش را به سایر مناطق سیاه اطلاع دهد، تا مشترکا بتوانند مشخص کنند که آیا در اکثریت هستند یا نیستند.

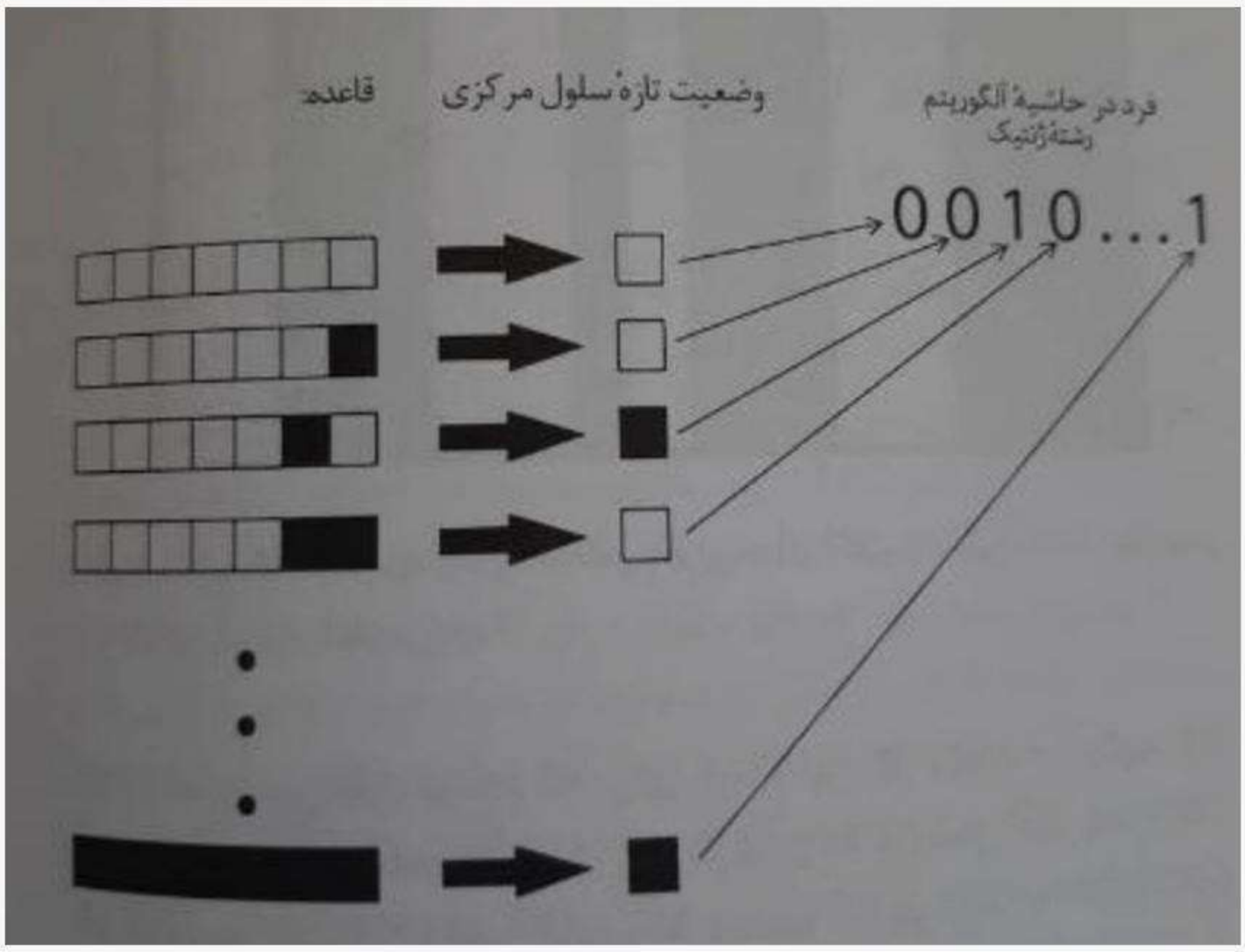


شکل ۱-۱۱. رفتار فضایی-زمانی خودکار سلولی "رأی اکثریت محلی"، که از پیکربندی اولیه با اکثریت سیاه آغاز می‌کند.

بلافاصله نمی‌توان فهمید که برای انجام این کار قاعده را چگونه باید طراحی کرد، در نتیجه، با الهام از رابی، ربوتی که در فصل نهم مطرح شد، یک آلگوریتم ژنتیک را اجرا کردیم تا ببینیم آیا می‌تواند به خودی خود قاعده موفقی را تولید کند یا نه.

در آلگوریتم ژنتیک ما، قواعد خودکار سلولی به صورت مجموعه‌ای از ۰ و ۱ کدگذاری می‌شوند. این بیت‌ها مقادیر وضعیت تازه در هر پیکربندی ممکن در همسایگی را مشخص می‌کنند (شکل ۲-۱۱).

این آلگوریتم ژنتیک با جمعیتی از قواعد خودکار سلولی که به صورت تصادفی تولید می‌شوند، آغاز به کار می‌کند. برای محاسبه صلاحیت یک قاعده، آلگوریتم ژنتیک آن را بر روی پیکربندی اولیه شبکه‌های بسیار متفاوتی آزمایش می‌کند. صلاحیت قاعده، نسبت دفعاتی است که پیکربندی درست نهایی حاصل می‌شود: تمامی سلول‌ها روشن وقتی که اکثریت اولیه روشن‌اند یا تمامی سلول‌ها خاموش وقتی که اکثریت اولیه خاموشند (شکل ۳-۱۱) آلگوریتم ژنتیک را برای تعداد زیادی نسل اجرا کردیم، و در پایان اجرا، آلگوریتم ژنتیک تعدادی قاعده طراحی کرده بود که می‌توانستند این کار را به آسانی انجام دهند.

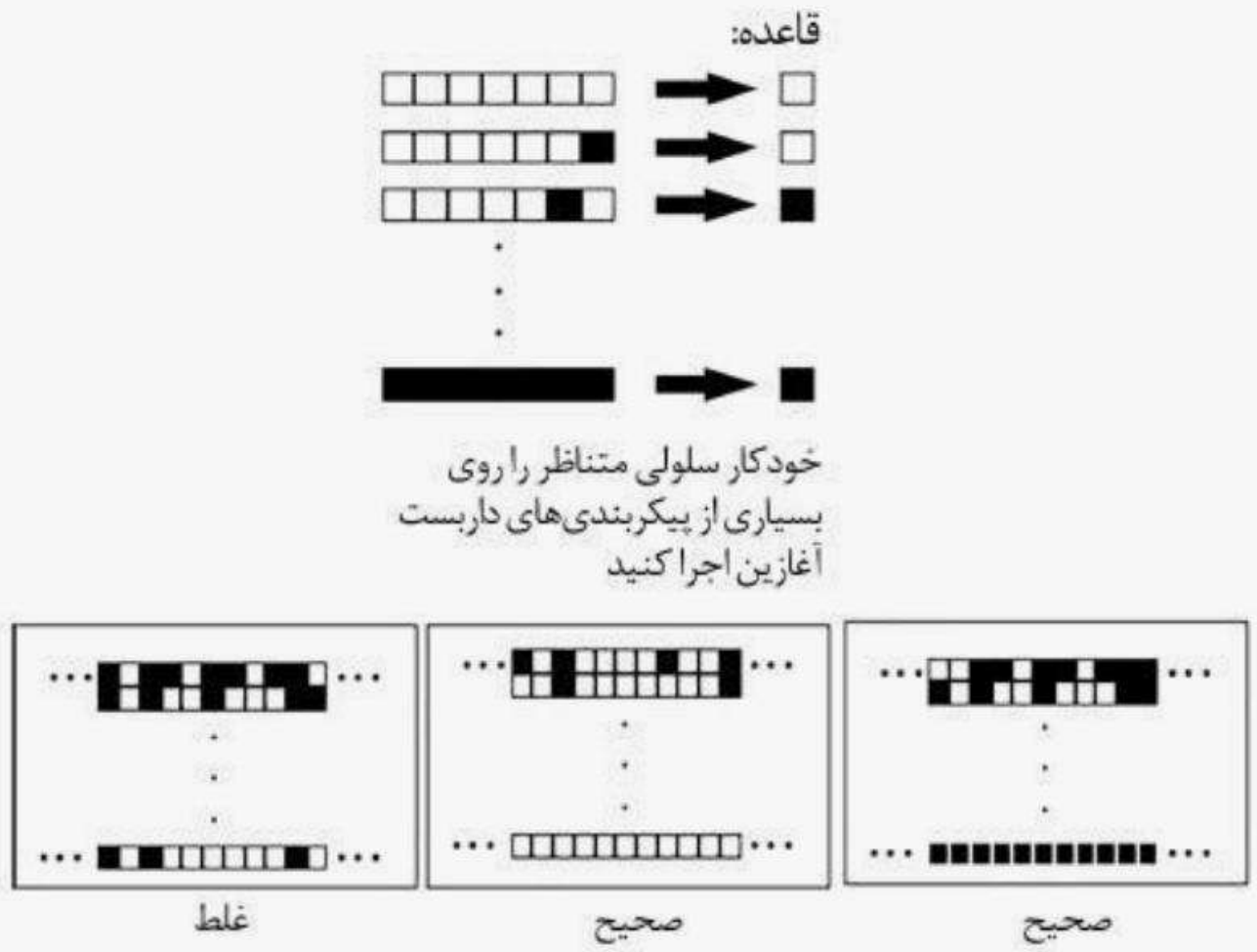


شکل ۲-۱۱. نمایش این که چگونه یک قاعده خودکار سلولی به صورت فردی در جامعه آلگوریتم ژنتیک کدگذاری می‌شود. ۱۲۸ پیکربندی ممکن در همسایگی به ترتیبی ثابت فهرست شده‌اند. وضعیت تازه سلول مرکزی در پیکربندی در همسایگی به صورت (خاموش) یا ۱ (روشن) کدگذاری می‌شود. هر فرد در جامعه آلگوریتم ژنتیک رشته‌ای از ۱۲۸ بیت است که وضعیت‌های تازه را با ترتیب ثابت‌شان کدگذاری می‌کند.

همانطور که در مورد رابی دیدیم، درک راه‌حلی که توسط الگوریتم ژنتیکی تکامل یافته باشد در سطح "ژنوم"هایش غالبا امکان‌پذیر نیست. خودکارهای سلولی نیز که برای طبقه‌بندی اکثریت تکامل بخشیدیم در این مورد تفاوتی نداشتند. ژنوم یکی از پرکارترین خودکارهای سلولی طراحی‌شده توسط الگوریتم ژنتیکی به قرار زیر در دو سطر آمده است:

```
00000101000001100001010110000111000001110000010000010101010101111
01100100011101110000010100000001011111011111111111011011101111111
```

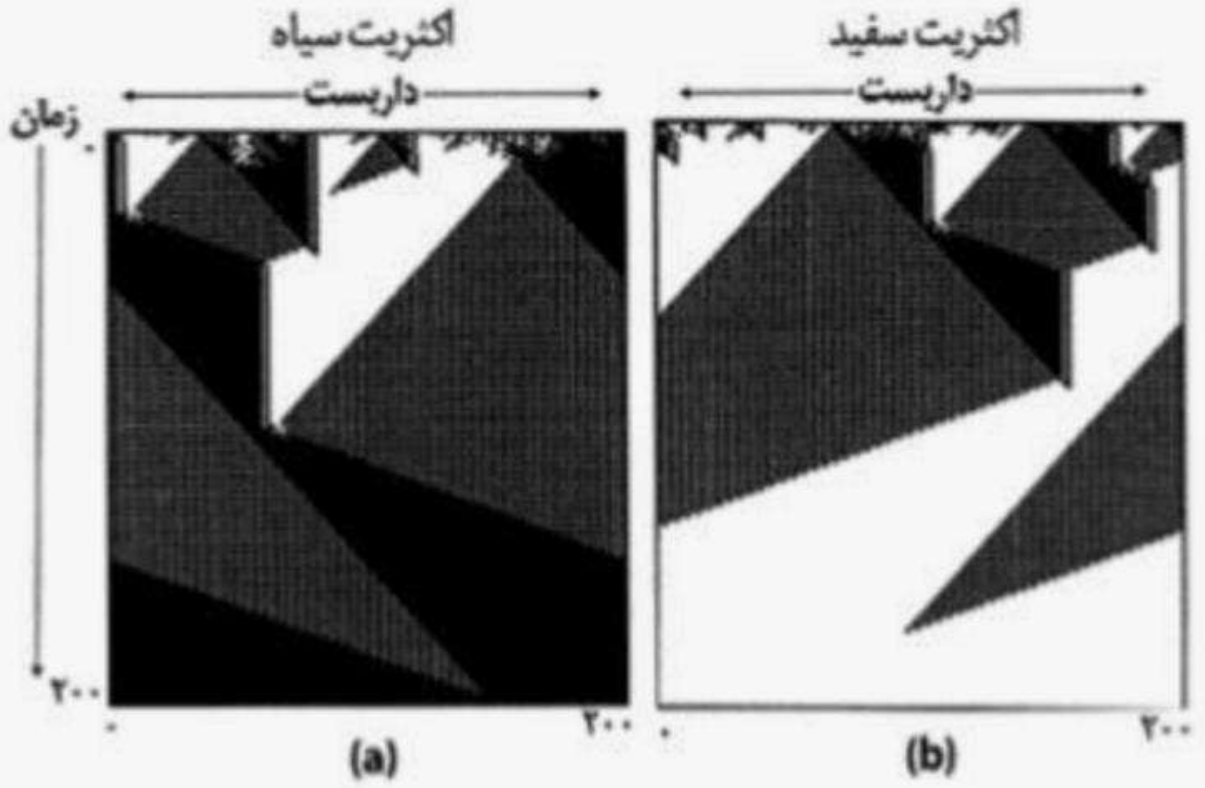
به خاطر بیاورید که اولین بیت، وضعیت تازه سلول مرکزی در همسایگیی است که همه ۰ هستند، دومین بیت وضعیت تازه سلول مرکزی در همسایگی ۱۰۰۰۰۰۰ است، و به همین منوال. چون ۱۲۸ همسایگی ممکن وجود دارد، این ژنوم شامل ۱۲۸ بیت است. وقتی به این رشته بیت‌ها نگاه می‌کنیم، هیچ امر بدیهیی وجود ندارد که به ما راهنمایی کند این قاعده چگونه رفتار می‌کند، یا به چه دلیل در کار طبقه‌بندی اکثریت صلاحیت بیشتری دارد.



شکل ۳-۱۱. برای محاسبه صلاحیت، هر قاعده بر روی تعداد زیادی پیکربندی اولیه تصادفی آزمایش می‌شود. صلاحیت یک قاعده جزئی از پیکربندی‌های اولیه است که باتوجه به آن، قاعده پاسخ درست را در تعدادی گام زمانی تولید می‌کند.

شکل ۴-۱۱ دو نمودار فضایی-زمانی را نشان می‌دهد که رفتار این قاعده را در مورد دو پیکربندی اولیه متفاوت به نمایش می‌گذارد: (a)

اکثریتی از سلول‌های سیاه و (b) اکثریتی از سلول‌های سفید. می‌توانید ببینید که در هر دو مورد رفتار نهایی درست است - در (a) همه سیاه هستند و در (b) همه سفید هستند. در فاصله زمانی بین پیکربندی‌های ابتدایی و پایانی، سلول‌ها به صورت جمعی اطلاعات را پردازش می‌کنند تا به یک پیکربندی نهایی درست دست یابند. طی گام‌های میانی الگوهای جالبی شکل می‌گیرند، اما معنی آنها چیست؟

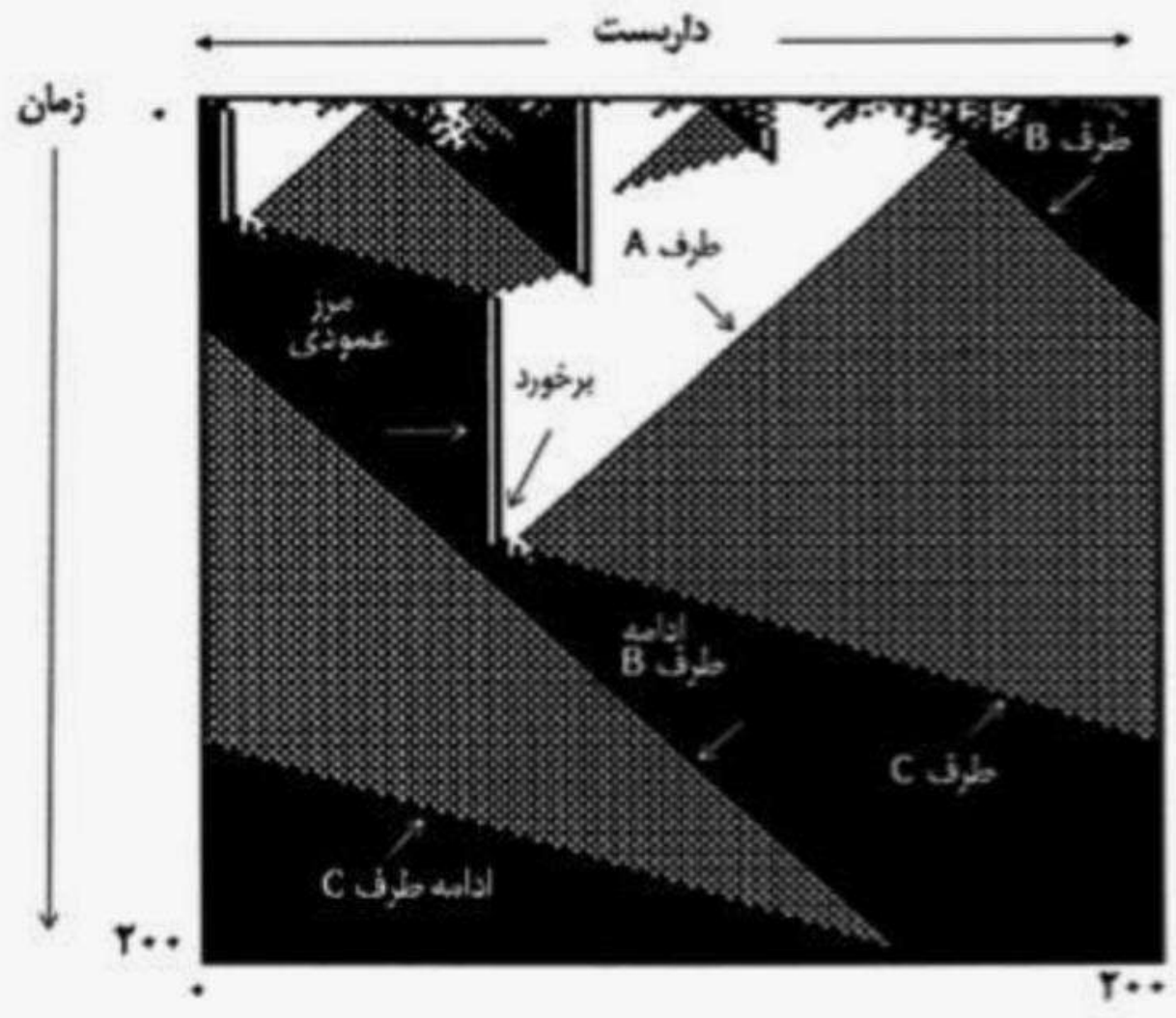


شکل ۱۱-۴. رفتار فضایی-زمانی یکی از قواعد خودکار سلولی تکامل یافته که بهترین کارکرد را در کار طبقه‌بندی اکثریت دارد. در، (a) پیکربندی اولیه شامل اکثریتی از سلول‌های سیاه است و خودکار سلولی تا یک پیکربندی ثابت از سلول‌های تماما سیاه تکرار می‌شود. در، (b) پیکربندی اولیه شامل اکثریتی از سلول‌های سفید است و خودکار سلولی تا یک پیکربندی ثابت از سلول‌های تماما سفید تکرار می‌شود.

برای این‌که بفهمیم چه اتفاقی دارد می‌افتد، کرارا به تصویرهایی مانند ۴-۱۱ خیره شدیم. خوشبختانه، فیزیکدانی از برکلی، به نام جیم کراچفیلد[۵۱۸]، برحسب تصادف دیداری از سانتافه داشت و به تلاش ما علاقه‌مند شد. روشن شد که جیم و همکارانش پیش از آن دقیقا همان ابزارهای مفهومی را ساخته بودند که می‌توانستند به ما کمک کنند بفهمیم که این الگوها چگونه محاسبه را به اجرا درمی‌آورند.

سه نوع الگو در شکل ۱۱۴ دیده می‌شود: تماما سیاه، تماما سفید، و یک منطقه شبیه صفحه شطرنج، متشکل از وضعیت‌های سیاه و سفید پی در پی (که در شکل ۴-۱۱، که قدرت تفکیک کمی دارد به صورت یک منطقه خاکستری پدیدار می‌شود.) همین الگوی صفحه شطرنجی است که اطلاعات مربوط به تراکم سلول‌های سیاه و سفید در مناطق محلی را نشان می‌دهد.

همانند آن استراتژی که آلگوریتم ژنتیک را برای رابی ربوت تکامل بخشید، استراتژی خودکار سلولی هم بسیار هوشمند است. نگاهی به شکل ۱۱۵ بیندازید که نسخه‌ای از شکل ۱۱-۴a است که من نشانه‌گذاری کرده‌ام. مناطقی که در آنها پیکربندی اولیه یا عمدتا سفید یا عمدتا سیاه است در چند گام زمانی به سمت مناطقی میل می‌کنند که تماما سفید یا تماما سیاه هستند. توجه کنید که هر وقت یک منطقه سیاه در سمت چپ با یک منطقه سفید در سمت راست برخورد می‌کند، همیشه یک مرز عمودی بین آنها وجود دارد. اما هر وقت که یک منطقه سفید در سمت چپ با یک منطقه سیاه در سمت راست برخورد کند، یک مثلث صفحه شطرنجی شکل می‌گیرد که متشکل از سلول‌های سفید و سیاه پی در پی است. در اینجا می‌توان اثر شبکه حلقوی را بر روی مثلث مشاهده کرد و دید که چگونه از یک لبه به لبه دیگر ادامه می‌یابد.



شکل ۵-۱۱. نمودار فضایی-زمانی شکل ۱۱-۴ (a) که ویژگی‌های مهمش علامت‌گذاری شده است.

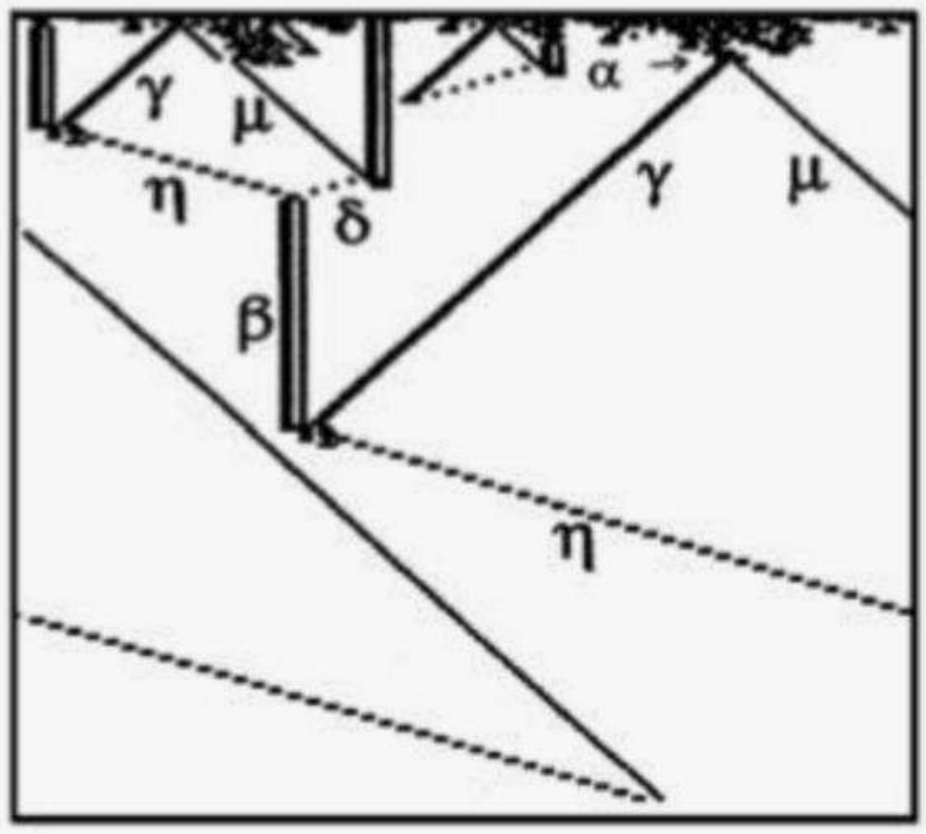
دو ضلع A و B منطقه صفحه شطرنجی رو به رشد با یک سرعت (یعنی مسافتی که در زمان پوشش داده می‌شود) حرکت می‌کنند. ضلع A تا زمانی که با مرز عمودی برخورد کند به سمت جنوب‌غربی حرکت می‌کند. ضلع B برخوردی با مرز عمودی طرف دیگر ندارد. که به این معنی است که ضلع A باید مسافت کوتاه‌تری را طی می‌کرد. یعنی منطقه سفید که با ضلع A محدود شده است کوچکتر از منطقه سفیدی است که به مرز B محدود شده است. در نقطه برخورد، ضلع A ناپدید می‌شود، و منطقه سیاه امکان گسترش پیدا می‌کند. در نقطه پایینی مثلث، دو ضلع B و C ناپدید می‌شوند، و کل شبکه سیاه می‌شود، که پیکربندی درست نهایی است.

اگر سعی کنیم به این الگوها به مثابه الگوهایی که در حال اجرای محاسبه هستند نگاه کنیم، مرز

عمودی و منطقه صفحه شطرنجی را می‌توان به صورت سیگنال‌هایی در نظر گرفت. برهم‌کنش محلی میان سلول‌ها، این سیگنال‌ها را به وجود می‌آورد و منتشر می‌کند. این سیگنال‌ها عاملی هستند که به خودکار سلولی در کل امکان می‌دهند اندازه نسبی مناطق سیاه و سفید مجاوری را که مقیاس بزرگتری دارند تعیین کند، مناطق کوچکتر را جدا کند، و به بزرگترها امکان رشد بدهد.

این سیگنال‌ها تفاوت عمده بین خودکار سلولی رأی اکثریت محلی در شکل ۱-۱۱ و خودکار سلولی شکل ۵-۱۱ هستند. همان‌طور که در بالا اشاره کردم، در اولی هیچ راهی وجود ندارد که مناطق سفید و سیاه جدا شده با یکدیگر مبادله اطلاعات کنند تا بفهمند کدام یک اکثریت سلول‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. در دومی، سیگنال‌های تولید شده توسط منطقه صفحه شطرنجی و مرز عمودی این ارتباط را برعهده دارند، و برهم‌کنش سیگنال‌ها امکان می‌دهد که به منظور مشخص کردن پاسخ، اطلاعات مبادله شده پردازش شوند.

جیم کراچفیلد قبلا برای تشخیص چیزی که "ساختارهای پردازش اطلاعات"[۵۱۹] در رفتارهای سیستم‌های دینامیک می‌نامید، روشی را ابداع کرده بود، و پیشنهاد کرد که این روش را در مورد خودکارهای سلولی خلق شده توسط آلگوریتم ژنتیک به کار گیریم. ایده کراچفیلد این بود که مرز بین مناطق ساده (برای مثال ضلع‌های C،B،A و مرز عمودی در شکل ۵-۱۱) حاملان اطلاعات هستند و اطلاعات وقتی پردازش می‌شود که این مرزها برخورد می‌کنند. شکل ۶-۱۱ نمودار فضایی-زمانی در شکل ۵-۱۱ را نشان می‌دهد درحالی‌که مناطق سیاه و سفید و شطرنجی فیلتر شده‌اند (یعنی سفید شده‌اند)، و تنها مرزها به جا گذاشته شده‌اند تا بتوانیم آنها را روشن‌تر ببینیم. تصویر شبیه مسیر ذرات بنیادی در یک وسیله قدیمی فیزیک، به نام اتاقک حباب[۵۲۰] است. با به کار گرفتن این استعاره، جیم این مرزها را "ذرات" نامید.



شکل ۱۱-۶. نمودار فضایی-زمانی شکل، ۱۱۴ (a) که در آن مناطق "الگوهای ساده" حذف شده

و مرز بین این مناطق ("ذرات") به جا مانده است.

سنت علم فیزیک این است که ذرات را با حروف یونانی نشان دهد، در این کتاب هم این کار را کرده‌ایم. این خودکار سلولی شش نوع مختلف "ذره" را تولید می‌کند:

γ (گاما)، μ (مو)، η (اتا)، δ (دلتا)، β (بتا)، و α (آلفا).

(آلفا

ذره‌ای با عمر کوتاه است که به و تجزیه می‌شود. هر کدام از این "ذرات" متناظر با یک مرز متفاوت هستند - برای مثال، n متناظر با مرز بین مناطق سیاه و شطرنجی است. پنج نوع برخورد ذره‌ای وجود دارد، که سه تا از آنها

$(\beta + \gamma$ و $\mu + \beta$ و $\eta + \delta)$

ذره‌ای جدید خلق می‌کنند، و دو تا از آنها

$\gamma + \delta)$

$(\eta + \mu$

"نابودی"[۵۲۱] هستند که در آن هر دو ذره ناپدید می‌شوند.

قرار دادن نقش رفتار خودکار سلولی بر عهده ذرات به ما کمک می‌کند بفهمیم که چگونه اطلاعات را کدگذاری و محاسبات را اجرا می‌کند. برای مثال، ذرات و ۸ انواع مختلفی از اطلاعات مربوط به پیکربندی اولیه را کدگذاری می‌کنند. ذره " به y و تجزیه می‌شود. ذره این اطلاعات را با خود دارد که با یک منطقه سفید هم‌مرز است؛ به همین شکل ذرهاین اطلاعات را با خود دارد که با یک منطقه سیاه هم‌مرز است. وقتی ۶ قبل از با برخورد می‌کند، اطلاعات موجود در ۸ و ترکیب می‌شوند تا استنتاج شود که منطقه بزرگ سفید اولیه کوچک‌تر از منطقه بزرگ سیاه اولیه همجوار است. این اطلاعات جدید در ذره که به‌تازگی خلق شده رمزگذاری می‌شود، که وظیفه آن رسیدن به و نابودی آن (و خودش) است.

ما توانستیم این شکل از تحلیل را در مورد چند خودکار سلولی مختلف به کار گیریم که به منظور انجام کار طبقه‌بندی اکثریت و نیز سایر کارها تکامل یافته بودند. این تحلیل به ما امکان داد که اموری از قبیل صلاحیت یک خودکار سلولی را پیش‌بینی کنیم (بدون این‌که مجبور باشیم خودکار سلولی را اجرا کنیم، و فقط با استفاده از توصیف "ذره"ای آن.) درعین‌حال به ما امکان داد بفهمیم که چرا یک خودکار سلولی صلاحیت بیشتری از دیگری دارد، و چگونه اشتباهاتی را که خودکارهای سلولی مختلف در اجرای محاسبات مرتکب شده‌اند، شرح دهیم.

ذرات چیزی را به ما می‌دهند که به صرف نگاه کردن به قاعده خودکار سلولی یا رفتار فضایی-زمانی خودکار سلولی به دست نمی‌آوردیم: ذرات به ما امکان می‌دهند که با ملاک

پردازش اطلاعات، توضیح دهیم که خودکار سلولی چگونه یک محاسبه را به انجام می‌رساند. توجه داشته باشید که ذرات توصیفی هستند که ما (دانشمندان) تحمیل می‌کنیم و نه چیزی مشخص که در یک خودکار سلولی رخ می‌دهد یا مورد استفاده آلگوریتم ژنتیک قرار می‌گیرد تا خودکارهای سلولی را تکامل بخشد. اما آلگوریتم ژنتیک توانست قاعده‌ای را تکامل بخشد که رفتار آن را می‌توان با ملاک‌های ذرات پردازش‌کننده اطلاعات توضیح داد. درواقع، زبان ذرات و برهم‌کنش آنها یک واژگان تبیینی را برای محاسبه غیر متمرکز در زمینه خودکارهای سلولی تک-بعدی، شکل می‌دهد. استفن وولفرام شاید به دنبال چیزی مانند این بود هنگامی که از میان "بیست مسئله در نظریه خودکار سلولی، (۵) آخرین آن را مطرح کرد: "کدام یک از توصیف‌های سطح بالا را می‌توان در مورد پردازش اطلاعات در خودکارهای سلولی مطرح کرد؟"

همه اینها پژوهش‌های تازه‌ای هستند و باید بیشتر روی آنها کار کرد. من معتقدم که این رویکرد به فهم محاسبه، گرچه نامتداول است، در سایر زمینه‌هایی که محاسبه در میان اجزای ساده‌ای توزیع می‌شود که هیچ‌گونه کنترل مرکزی ندارند، سودمند از کار درخواهد آمد. برای مثال، این‌که اطلاعات سطح بالا درباره داده حسی چگونه کدگذاری و پردازش می‌شود کماکان جزء اسرار است. شاید توضیح آن را باید در چیزی شبه-ذره، یا با توجه به سه بعدی بودن مغز، چیزی شبه-موج یافت، که بر مبنای آن، نورون‌ها شبکه‌ای برای امواج فعالیت حامل‌های اطلاعات و برهم‌کنش پردازش اطلاعات آنها هستند.

البته محاسبه مغزی در مقایسه با خودکارهای سلولی تک‌بعدی جهش بزرگی است. اما یک سیستم طبیعی وجود دارد که می‌توان آن را با چیزی توضیح داد که خیلی شبیه ذرات ماست: شبکه روزنه‌های هوایی گیاهان.

برگ گیاهان با روزنه‌هایی پوشیده شده است ـ منفذهای کوچکی که در واکنش به نور و رطوبت باز و بسته می‌شوند. روزنه‌ها وقتی که باز هستند، به دی‌اکسیدکربن اجازه ورود می‌دهند که مورد استفاده فتوسنتز قرار می‌گیرد.

اما باز بودن روزنه موجب می‌شود که آب موجود در مخازن مایع گیاه بخار شود. گیاه‌شناس کیث مات[۵۲۲]، فیزیکدان دیوید پیک[۵۲۳]، و همکارانشان در دانشگاه ایالتی یوتا مدت‌هاست که الگوهای باز و بسته شدن روزنه‌های برگ را مدنظر دارند، و معتقدند که این روزنه‌ها شبکه‌ای را می‌سازند که چیزی مشابه خودکار سلولی دوبعدی (۶). است آنها همچنین اظهار داشته‌اند که الگوهای زمانی باز و بسته شدن روزنه برگ‌ها بسیار مشابه نسخه‌های دوبعدی خودکار سلولی است. آنها این فرضیه را مطرح می‌کنند که گیاهان از طریق روزنه‌هایشان محاسبه‌ای توزیعی و نامتمرکز[۵۲۴] را به اجرا درمی‌آورند ـ یعنی آنها روزنه‌ها را به شکل مطلوبی باز و بسته می‌کنند تا دریافت دی‌اکسیدکربن و از دست رفتن آب متعادل شود - و می‌توان محاسبه را براساس چنین

ذراتی توضیح داد.

فصل دوازدهم: پدرازش اطلاعات در سیستم‌های زنده

از زمانی که سیلارد این فکر را مطرح کرد که اطلاعات می‌تواند ناجی دومین قانون ترمودینامیک در قبال حمله جن ماکسول باشد، اطلاعات و محاسبه (که همزاد آن محسوب می‌شود) به صورت فزاینده‌ای در علم رخنه کرده‌اند.

در ذهن بسیاری از افراد اطلاعات اعتباری هستی‌شناختی[۵۲۵] همانند جرم و انرژی یافته است - یعنی یک مؤلفه سوم بنیادی برای واقعیت. به‌خصوص در زیست‌شناسی، توضیح سیستم‌های زنده به عنوان شبکه‌های پردازش اطلاعات متداول شده است. درواقع، دانش‌واژه پردازش اطلاعات آن‌چنان کاربرد گسترده‌ای یافته است که این تصور پیش می‌آید که معنایی روشن و مورد توافق دارد، شاید بر مبنای تعریف صوری[۵۲۶] شانون از اطلاعات. اما همانند تعدادی دیگر از دانش‌واژه‌های محوری علم سیستم‌های پیچیده، مفهوم پردازش اطلاعات تعریف چندان روشنی ندارد؛ در زمانی که پردازش اطلاعات یا محاسبه فارغ از تعریف دقیق و صوری ماشین‌های تورینگ و کامپیوترهای سبک فون نویمن در نظر گرفته شود، فهم آنها اغلب مشکل‌ساز است. مطالبی که در فصل پیشین توضیح داده شد، کوششی بود برای پرداختن به این موضوع در زمینه خودکارهای سلولی.

هدف این فصل کاوش در مفهوم پردازش اطلاعات یا محاسبه در سیستم‌های زنده است.(۷) درباره سه سیستم طبیعی مختلف توضیح خواهم داد که در آنها پردازش اطلاعات ظاهرا نقش مهمی دارد - سیستم ایمنی، اجتماع مورچه‌ها، و سوخت و ساز سلولی - و در هر مورد می‌کوشم نقش اطلاعات و محاسبه را روشن کنم. در پایان سعی خواهم کرد برخی از اصول کیفی مشترک پردازش اطلاعات در این‌گونه، و سایر گونه‌های سیستم‌های نامتمرکز را به روشنی بیان کنم.

پردازش اطلاعات چیست؟

اجازه بدهید حرفی از خودم را نقل کنم که در فصل دهم آمده است:

"محاسبه سیستم‌های طبیعی به چه معناست؟" در سطحی بسیار کلی می‌توان گفت که محاسبه کاری است که سیستم پیچیده بر روی اطلاعات انجام می‌دهد تا راه خود را در محیطاش باز کند یا با آن انطباق یابد. اما آیا می‌توانیم این گزاره را دقیق‌تر کنیم؟ اطلاعات در کجا قرار دارد، و سیستم پیچیده بر روی آنچه کاری انجام می‌دهد؟ این پرسش‌ها ممکن است ساده به نظر برسند، اما کاوش در مورد آنها ما را وامی‌دارد که پایمان را در تاریک‌ترین آب‌های علم سیستم‌های پیچیده بگذاریم.

وقتی می‌گوییم یک سیستم دارد پردازش اطلاعات یا محاسبه می‌کند (دانش‌واژه‌هایی که فعلا به طور مترادف به کار می‌برم) باید به پرسش‌های زیر پاسخ دهیم.(۸)

در این سیستم نقش "اطلاعات" را چه چیزی بازی می‌کند؟

اطلاعات چگونه منتقل و پردازش می‌شود؟

این اطلاعات چگونه معنا کسب می‌کند؟ و برای چه‌کسی؟ (برخی با این نظر که محاسبه نیاز به نوعی معنا دارد چندان توافقی ندارند، اما من خودم را به خطر می‌اندازم و می‌گویم نیاز دارد.)

پردازش اطلاعات در کامپیوترهای سنتی

همان‌طور که در فصل چهارم دیدیم، مفهوم محاسبه را تورینگ در دهه ۱۹۳۰ به صورت گام‌هایی که یک ماشین تورینگ بر روی ورودی مشخصی اجرا می‌کند صوری کرد. از آن زمان، صورت‌بندی تورینگ مبنای طراحی کامپیوترهای برنامه‌پذیر سنتی به سبک فون نویمن بوده است. در مورد این کامپیوترها، پرسش‌های مربوط به اطلاعات پاسخ‌های ساده‌ای دارند.

می‌توانیم بگوییم که نقش اطلاعات را نمادهای روی نوار و وضعیت‌های ممکن هد نوار بازی می‌کنند. کنش‌های هد نوار، شامل خواندن از نوار و ثبت بر روی نوار، و تغییر دادن وضعیت آن، اطلاعات را منتقل و پردازش می‌کنند. همه این کارها با پیروی از قواعدی صورت می‌گیرد که یک برنامه را می‌سازند.

می‌توانیم برنامه‌های نوشته شده برای کامپیوترهای سنتی را (حداقل) در دو سطح از توضیح بررسی کنیم: سطح کد ماشین و سطح برنامه‌نویسی.

سطح کد ماشین مجموعه‌ای از دستورعمل‌های گام به گام سطح پایین و مشخص برای ماشین است (برای مثال: "محتویات محل حافظه n را به رجیستر پردازشگر مرکزی j منتقل کن"، "یک عمل منطقی OR را بر روی محتویات رجیسترهای پردازشگر مرکز j و i انجام بده و نتیجه را به محل حافظه m منتقل کن" و غیره.(۹) سطح برنامه‌نویسی مجموعه‌ای از دستورعمل‌ها در یک زبان سطح بالاست - از قبیل BASIC یا Java_ که برای انسان‌ها قابل فهم‌تر است. (برای مثال: "مقدار متغیر half-of-total را در ۲ ضرب کن و نتیجه را در متغیر tota) ذخیره کن" و غیره.(۱۰) به طور معمول یک دستورعمل سطح بالا متناظر است با چند دستورعمل سطح پایین، که امکان دارد در کامپیوترهای مختلف تفاوت داشته باشند. از این‌رو امکان دارد یک برنامه سطح بالای فرضی را بتوان به شیوه‌های مختلفی به کد ماشین تبدیل کرد؛ این توضیحی انتزاعی‌تر در مورد پردازش اطلاعات است.

معنای اطلاعات ورودی و خروجی در یک ماشین تورینگ وابسته به تفسیر انسان‌ها (برنامه‌نویسان و کاربران(۱۱) است. معنای اطلاعات خلق شده در گام‌های میانی در محاسبه نیز وابسته به تفسیر (یا طراحی) انسان‌هاست که این گام‌ها را با ملاک فرمان‌های یک زبان برنامه‌نویسی سطح بالا می‌فهمند.

این سطح بالای توضیح به ما امکان می‌دهد که محاسبات را به شیوه‌ای آشنا برای انسان بفهمیم که از جزئیات خاص کد ماشین و سخت‌افزار منتزع شده است.

پردازش اطلاعات در خودکارهای سلولی

در مورد کامپیوترهای به سبک غیر فون نویمن، پاسخ‌ها به این سرراستی نیستند. برای مثال، خودکار سلولی تشریح شده در فصل پیشین را در نظر بگیرید که برای انجام طبقه‌بندی اکثریت از طریق یک آلگوریتم ژنتیک تکامل یافت. در مقایسه با کامپیوترهای سنتی می‌توان گفت که اطلاعات موجود در این خودکار سلولی در پیکربندی‌های وضعیت شبکه در هر گام زمانی قرار دارد. ورودی پیکربندی اولیه است، خروجی پیکربندی نهایی است، و در هرگام زمانی میانی، از طریق کنش‌های قاعده خودکار سلولی، اطلاعات در درون محدوده سلولی منتقل و پردازش می‌شود. معنا از دانش انسان در مورد کار در دست اقدام و تفسیر نگاشت[۵۲۷] از ورودی به خروجی به دست می‌آید. (برای مثال، "شبکه نهایی کاملا سفید است؛ که این معنی را می‌رساند که پیکربندی اولیه دارای اکثریتی از سلول‌های سفید است").

توصیف پردازش اطلاعات در این سطح، که همانند "کد ماشین" است، به آسانی ما را متوجه این نمی‌کند که محاسبه چگونه انجام می‌شود. همانند مورد محاسبه به سبک فون نویمن، برای فهمیدن گام‌های میانی محاسبه و دوری گزیدن از جزئیات خاص خودکار سلولی زیرین آن، به یک زبان سطح بالا نیاز داریم.

در فصل پیشین مطرح کردم که ذرات و برهم‌کنش آنها رویکردی هستند به این گونه زبان‌های سطح بالا که توضیح می‌دهند پردازش اطلاعات در خودکار سلولی چگونه انجام می‌شود. اطلاعات از طریق حرکت ذرات منتقل می‌گردد و از طریق برخورد ذرات پردازش می‌شود. به این طریق، گام‌های میانی در پردازش اطلاعات از طریق تفسیر انسانی از کنش‌های ذرات "معنا" کسب می‌کنند.

چیزی که توضیح محاسبه به سبک فون نویمن را آسان‌تر می‌کند این است که شیوه روشن و غیرمبهمی برای ترجمه از سطح برنامه‌نویسی به سطح کد ماشین، و برعکس، وجود دارد، دقیقا به این دلیل که این کامپیوترها برای چنین ترجمه آسانی طراحی شده‌اند. علم کامپیوتر برای ما همگردان‌ها[۵۲۸] و واگردان‌هایی[۵۲۹] فراهم کرده است که کار ترجمه را انجام می‌دهند، و برای ما ممکن می‌سازند که بفهمیم یک برنامه خاص چگونه اطلاعات را پردازش می‌کند.

در خودکارهای سلولی، چنین همگردان‌ها یا واگردان‌هایی وجود ندارند حداقل هنوز وجود ندارند - و هنوز شیوه‌ای عملی و کلی برای طراحی برنامه‌های سطح بالا شکل نگرفته است. ایده‌های نسبتا جدید، از جمله ذرات، که همچون ساختارهای سطح بالای پردازش اطلاعات در خودکارهای سلولی هستند، هنوز با ساخت یک چارچوب محاسبه در این گونه سیستم‌ها فاصله زیادی دارند.

وقتی که بخواهیم پردازش اطلاعات در سیستم‌های زنده واقعی را بفهمیم، مشکلات فهم پردازش اطلاعات در خودکارهای سلولی بیش از حد زیاد می‌شود. پرسش اصلی من - "محاسبه در سیستم‌های طبیعی چه معنایی دارد؟" _کماکان و عمدتا بی‌پاسخ مانده و همچنان

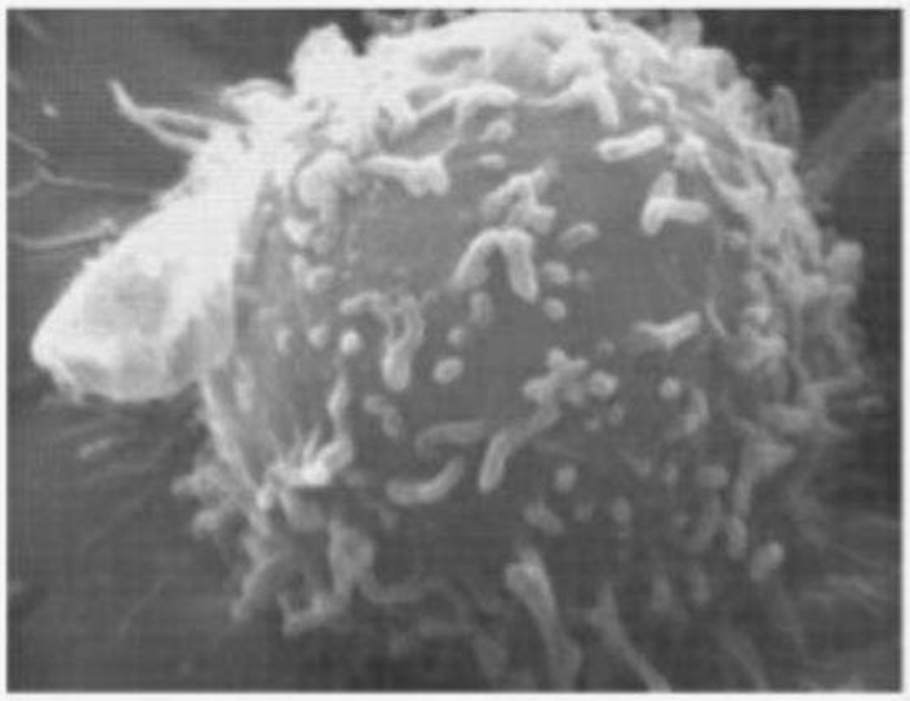
عامل سردرگمی و مناقشه‌های پردردسر در میان دانشمندان، مهندسان، و فلاسفه است. اما به هر حال پرسشی بی‌نهایت مهم در علم سیستم‌های پیچیده است، زیرا یک توضیح سطح بالا درباره پردازش اطلاعات در سیستم‌های زنده به ما امکان می‌دهد که نه تنها به شیوه‌های جدید و همه‌جانبه‌تر ساز و کارهایی را بفهمیم که سیستم‌های خاص از طریق آنها عمل می‌کنند، بلکه درعین‌حال بتوانیم اصولی کلی را استخراج کنیم که از جزئیات زیاده از حد تک‌تک سیستم‌ها فراتر می‌رود. چنین توضیحی در اساس "زبان سطح بالایی" را برای زیست‌شناسی فراهم می‌کند.

در بقیه این فصل کوشش بر این است که با بررسی نمونه‌های واقعی از این‌گونه ایده‌ها سردرآوریم.

سیستم ایمنی

پیش از این، در فصل یکم، توضیحی اجمالی از سیستم ایمنی را مطرح کردم. حال اجازه بدهید کمی به عمق موضوع بپردازیم، به این‌که سیستم ایمنی برای حفظ بدن در مقابل بیماری‌زاها ـ ویروس‌ها، باکتری‌ها، انگل‌ها، و سایر مهاجمان ناخوشایند - اطلاعات را چگونه پردازش می‌کند. برای این‌که توضیح اجمالی پیشین را یادآوری کنم، سیستم ایمنی شامل چندین تریلیون سلول و مولکول مختلف است که در بدن گردش می‌کنند و از طریق انواع سیگنال‌ها با یکدیگر ارتباط دارند.

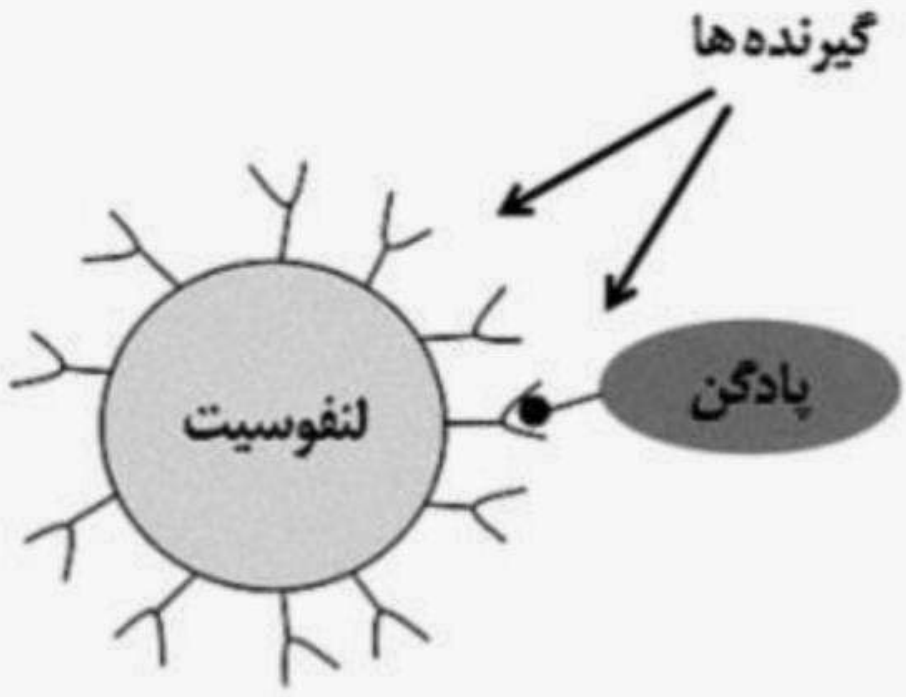
در میان انواع بسیار بسیار متفاوت سلول‌های سیستم ایمنی، موردی که بر روی آن تمرکز می‌کنم لنفوسیت است (نوعی از سلول‌های سفید خون؛ به شکل ۱۲۱ نگاه کنید) که در مغز استخوان به وجود می‌آیند. دو مورد از مهم‌ترین لنفوسیت‌ها سلول‌های B هستند، که پادتن‌ها را برای مبارزه با ویروس‌ها و باکتری‌ها رها می‌کنند، و سلول‌های، T که آنها نیز مهاجمان را نابود می‌کنند و واکنش سایر سلول‌ها را تنظیم می‌کنند.



شکل ۱۲-۱. لنفوسیت یک انسان، که سطح آن با گیرنده‌هایی پوشیده شده است که می‌توانند با اشکال معینی از مولکول‌ها که سلول با آنها روبرو می‌شود پیوند برقرار کنند.

هر سلول بدن در سطح خود مولکول‌هایی دارد که گیرنده نامیده می‌شوند. همان‌طور که این نام می‌رساند، این مولکول‌ها وسایلی هستند که سلول از طریق آنها اطلاعات را دریافت می‌کند. اطلاعات به شکل مولکول‌های دیگری هستند که از نظر شیمیایی با مولکول‌های گیرنده پیوند برقرار می‌کنند. برقراری پیوند بین گیرنده و مولکول منوط به این است که شکل فیزیکی آنها به اندازه کافی همخوان باشند.

سطح یک لنفوسیت با گیرنده‌های یکسانی پوشیده شده است که با طیف خاصی از اشکال سلولی پیوند برقرار می‌کنند. اگر یک لنفوسیت تصادفا با مولکول بیماری‌زای خاصی برخورد کند، این مولکول با یکی از گیرنده‌های لنفوسیت پیوند برقرار می‌کند، و گفته می‌شود که لنفوسیت آن پادگن را "تشخیص داده است" - که اولین گام در کشتن بیماری‌زاهاست. بسته به این‌که شکل مولکول و گیرنده چقدر همخوان باشند، پیوند می‌تواند قوی یا ضعیف باشد. این فرایند در شکل ۲-۱۲ به نمایش درآمده است.



شکل ۲-۱۲. نمایشی از یک گیرنده لنفوسیت (در اینجا یک سلول (B که با یک پادگن پیوند

برقرار کرده است.

مسئله اصلی سیستم ایمنی این است که از پیش نمی‌داند چه بیماری‌زایی به بدن حمله می‌کند، در نتیجه نمی‌تواند مجموعه‌ای از لنفوسیت‌ها را "از پیش طراحی کند، که پیوند گیرنده آنها تنها با این مهاجمین از استحکام برخوردار باشد. مشکل فراتر از این است، تعداد بیماری‌زاهای ممکن نجومی است، در نتیجه سیستم ایمنی هرگز قادر نخواهد بود در هر زمان به آن اندازه لنفوسیت تولید کند که از عهده هر پیشامدی برآیند. در مقایسه با میلیون‌ها لنفوسیت مختلفی که بدن روزانه تولید می‌کند، دنیای بیماری‌زاهایی که سیستم با آن روبروست بسیار بزرگتر است.

در اینجا نحوه‌ای را که سیستم ایمنی مسئله را حل می‌کند توضیح می‌دهم. به منظور "پوشش دادن" به تعداد بیش از حد اشکال بیماری‌زاها به شیوه‌ای منطقی، جامعه لنفوسیت‌ها در هر زمان تنوع بیش از حدی دارد.

سیستم ایمنی تصادفی بودن را به کار می‌گیرد تا این امکان فراهم شود که هر یک از لنفوسیت‌ها طیفی از اشکال را تشخیص دهد که متفاوت از طیفی است که سایر لنفوسیت‌های جامعه تشخیص می‌دهند.

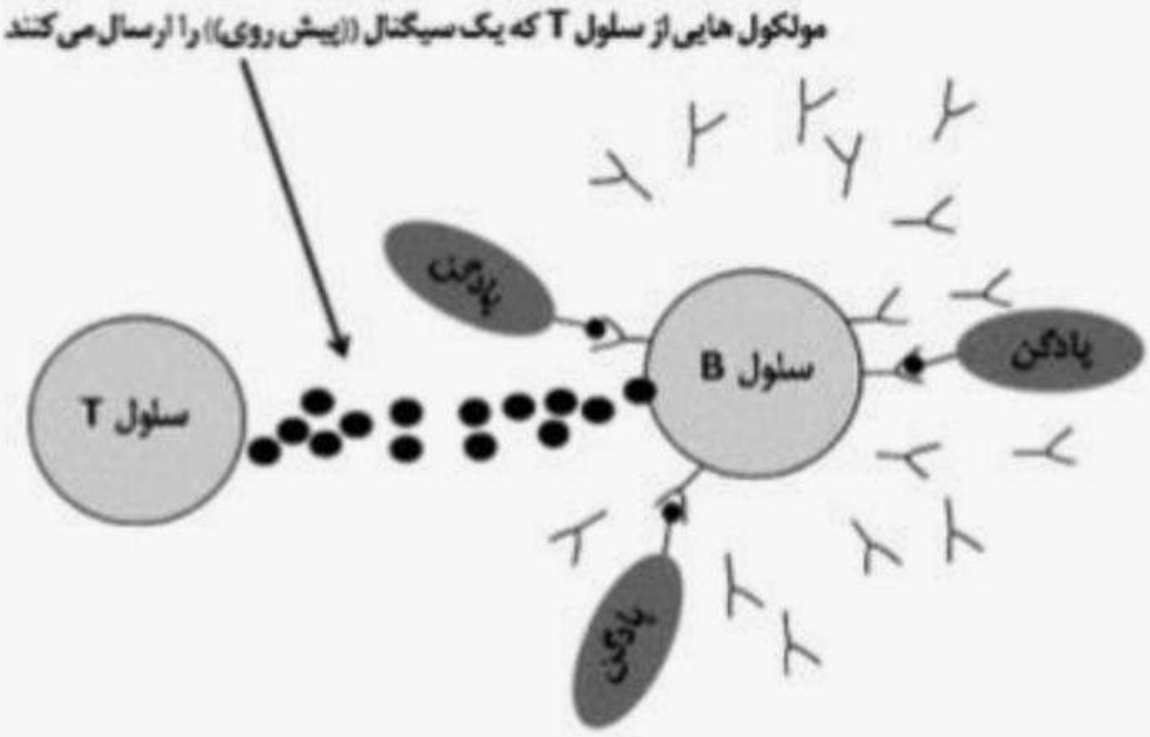
به‌خصوص، وقتی‌که لنفوسیتی متولد می‌شود، از طریق فرایند جابه‌جایی تصادفی بغرنجی در DNA آن لنفوسیت، مجموعه بدیعی از گیرنده‌های همانند خلق می‌شود. به دلیل تغییر مداوم جامعه لنفوسیت‌ها (هر روز حدود ده میلیون لنفوسیت جدید متولد می‌شوند)، بدن به طور مداوم لنفوسیت‌هایی را عرضه می‌کند که گیرنده‌هایشان شکل‌های بدیعی دارند. به ازای هر بیماری‌زایی که وارد بدن می‌شود، تنها مدت کوتاهی طول می‌کشد که بدن لنفوسیتی را بسازد که با مولکول‌های شاخص آن بیماری‌زا (یعنی پادگن‌ها) پیوند برقرار کنند، گرچه این پیوند می‌تواند ضعیف باشد.

زمانی که چنین پیوندی رخ می‌دهد، سیستم ایمنی باید تشخیص دهد که این نشانه‌ای از یک تهدید واقعی است یا وضعیت بی‌خطری است که می‌توان نادیده‌اش گرفت. البته بیماری‌زاها زیانبار هستند، چون وقتی که وارد بدن می‌شوند خود را به تعداد زیاد تکثیر می‌کنند. اما آغاز تهاجم سیستم ایمنی می‌تواند موجب التهاب و سایر ناراحتی‌های بدن شود، و حمله بیش از حد سنگین می‌تواند مرگبار از کار دربیاید. سیستم ایمنی در مجموع باید تشخیص دهد که آیا خطر، واقعی و به اندازه کافی جدی هست که پاسخی زیانبار برای بدن را از جانب سیستم ایمنی توجیه کند یا خیر.

سیستم ایمنی تنها در شرایطی یک حمله سنگین را آغاز می‌کند که با تعداد زیادی رویدادهای پیوندی روبرو شود که به اندازه کافی مستحکم باشند.

برای تشخیص این‌که حمله موجه است یا نه، دو نوع لنفوسیت، سلول‌های B و T، با هم اقدام

می‌کنند. اگر تعداد آن گیرنده‌های روی سلول B که پیوند مستحکم دارند از آستانه معینی فراتر رود، و همزمان سلول B از آن دسته از سلول‌های T که گیرنده‌هایشان پیوند مشابهی دارند سیگنال "پیشروی" دریافت کند، سلول B فعال می‌شود، که به این معناست که اکنون تهدید موجود بر علیه بدن را درک می‌کند (شکل ۳-۱۲). وقتی که سلول B فعال می‌شود مولکول‌های پادتن را در جریان خون رها می‌کند.



شکل ۳-۱۲. نمایشی از فعال شدن یک سلول B از طریق پیوند خوردن و دریافت سیگنال "پیشروی" از جانب سلول T. این سیگنال سلول B را وادار می‌کند پادتن تولید و آن را رها کند (مولکول‌های y شکل).

این پادتن‌ها به پادگن‌ها می‌چسبند، آنها را خنثی می‌کنند، و برای اینکه سایر سلول‌های سیستم ایمنی بتوانند نابودشان کنند آنها را نشانه‌گذاری می‌کنند.

سپس سلول فعال شده B به یک عقده لنفی مهاجرت می‌کند، و در آنجا به سرعت تقسیم می‌شود، و تعداد زیادی بچه سلول تولید می‌کند، که بسیاری از آنها جهشی را پشت سر می‌گذارند که شکل گیرنده‌شان را تغییر می‌دهد. آنها سپس بر روی پادگن‌هایی آزمایش می‌شوند که در عقده لنفی محبوس شده‌اند. سلول‌هایی که پیوند نخورند پس از مدت کوتاهی می‌میرند.

بچه‌سلول‌هایی که زنده مانده‌اند در جریان خون رها می‌شوند، جایی که برخی از آنها به پادگن‌ها برخورد می‌کنند و با آنها پیوند برقرار می‌کنند و در مواردی این پیوند قدرتمندتر از پیوند سلول B مادر است. این بچه‌سلول‌های B فعال شده نیز به عقده‌های لنفی مهاجرت می‌کنند و بچه‌های جهش‌یافته خود را تولید می‌کنند. این تولید عظیم لنفوسیت‌ها یکی از دلایل متورم شدن عقده‌های لنفی هنگام بیماری شماست.

به کمک آن دسته از سلول‌های B که بهترین انطباق را با خود پادگن‌ها دارند و بیشترین بچه‌سلول را تولید می‌کنند، این چرخه ادامه پیدا می‌کند.

در یک کلام، این یک فرایند انتخاب طبیعی است که در طی آن مجموعه‌هایی از سلول‌های B تکامل می‌یابند تا به اشکالی از گیرنده مجهز شوند که پیوند مستحکمی با یک پادگن هدف برقرار می‌کنند. این فرایند منجر به زرادخانه رو به رشدی از پادتن‌ها می‌شود، که از طریق انتخاب طبیعی "طراحی شده‌اند" تا به این پادگن خاص حمله کنند. این فرایند شناسایی و انهدام که این پادگن‌های خاص را از بدن حذف می‌کند به طور معمول از چند روز تا چند هفته طول می‌کشد.

حداقل دو مشکل بالقوه در این استراتژی وجود دارد. اول، سیستم ایمنی چگونه مانع لنفوسیت‌ها می‌شود تا اشتباها به مولکول‌های خود بدن حمله نکنند؟ دوم، اگر بدن دارد بیش از حد صدمه می‌بیند، سیستم ایمنی چگونه حمله‌اش را متوقف یا کم می‌کند؟

ایمنی‌شناسان هنوز پاسخ‌های کاملی به این پرسش‌ها نداده‌اند، و هر کدام از این پرسش‌ها در حال حاضر موضوع پژوهش فعالی هستند. تصور می‌شود که یک ساز و کار عمده برای اجتناب از حمله به خود بدن، فرایندی است که انتخاب منفی[۵۳۰] نامیده می‌شود. وقتی که لنفوسیت‌ها متولد می‌شوند، بلافاصله در جریان خون رها نمی‌شوند. در عوض در مغز استخوان و غده تیموس آزمایش می‌شوند، و از این طریق در معرض مولکول‌های خود بدن قرار می‌گیرند. لنفوسیت‌هایی که به طور مستحکمی به مولکول‌های "خودی" [۵۳۱]پیوند می‌خورند مستعد کشته شدن یا پشت سر گذاردن "اصلاح" در ژن‌هایی هستند که گیرنده‌ها را پدید می‌آورند. ایده این است که سیستم ایمنی باید تنها از لنفوسیت‌هایی استفاده کند که به بدن حمله نمی‌کنند. این ساز و کار در بسیاری از اوقات شکست می‌خورد، و در پاره‌ای از اوقات موجب اختلال‌های خودایمنی[۵۳۲]، مانند دیابت یا آرتریت روماتویید" [۵۳۳]می‌شود.

به نظر می‌رسد که دومین ساز و کار عمده برای اجتناب از حملات خودایمنی، کنش‌های زیر جامعه خاصی از سلول‌های T است که سلول‌های T تنظیم کننده نامیده می‌شوند. هنوز به طور دقیق روشن نشده است که این سلول‌های T تنظیم کننده چگونه کار می‌کنند، اما می‌دانیم که موادی شیمیایی ترشح می‌کنند که کنش سایر سلول‌های T را سرکوب می‌کنند. این فرضیه مطرح شده است که سومین ساز و کار، رقابت در میان سلول‌های B بر سر یک منبع محدود است - یک ماده شیمیایی خاص به نام BAFF که برای بقای سلول‌های B لازم است. آن دسته از سلول‌های B که فرایند انتخاب منفی را پشت سر می‌گذارند و کماکان پیوند مستحکمی با مولکول‌های خودی دارند، با این شرایط مواجه می‌شوند که به دلیل پیوند مداوم به مولکول‌های خودی، در مقایسه با سلول‌های B غیر-خود- پیوند،[۵۳۴] به مقدار بیشتری BAFF نیاز دارند. رقابت بر سر این منبع محدود منجر به افزایش احتمال مرگ سلول‌های B خود پیوند [۵۳۵]می‌شود.

حتی اگر سیستم ایمنی در حال حمله به بیماری‌زاهای خارجی باشد، با توجه به این الزام که تا حد ممکن مانع از آسیب به بدن شود، باید شدت حمله‌اش را متعادل کند. برای رسیدن به این تعادل، سیستم ایمنی از ساز و کارهایی (عمدتا ناشناخته) بهره می‌برد. بسیاری از این ساز و کارها وابسته به مجموعه‌ای از مولکول‌های سیگنال‌دهنده به نام سیتوکین[۵۳۶] هستند. آسیب وارده به بدن می‌تواند منجر به ترشح سیتوکین‌ها شود که لنفوسیت‌های فعال را سرکوب می‌کنند. از قرار معلوم، هر چه آسیب وارده بیشتر باشد، تمرکز سیتوکین‌های سرکوب‌کننده بیشتر است، و این امکان را بیشتر می‌کند که سلول‌های فعال با آنها برخورد کنند و خاموش شوند، و به این ترتیب سیستم ایمنی را تنظیم می‌کند بی‌آنکه در کل آن را سرکوب کند.

جوامع مورچگان

@degar_goonesh

همان‌طور که در فصل یک توضیح دادم، بین جوامع مورچگان و مغز مقایسه‌هایی صورت گرفته است. می‌توان هر دوی آنها را به صورت شبکه‌هایی از عناصر نسبتا ساده (نورون‌ها، مورچه‌ها) تصور کرد که رفتار پردازش اطلاعات را در مقیاس کلان از خود بروز می‌دهند. دو نمونه از چنین رفتارهایی در مجامع مورچگان، یکی این قابلیت است که به طور بهینه و انطباق‌پذیر دنبال غذا بگردند، و دیگری این قابلیت که به طور انطباق‌پذیری مورچه‌ها را طبق نیاز جامعه به کارهای مختلف بگمارند. هر دو این رفتارها بدون کنترل مرکزی، و از طریق ساز و کارهایی صورت می‌گیرد که به طور حیرت‌آوری مشابه سازوکارهایی است که در سیستم ایمنی دیدیم.

در بسیاری از انواع مورچگان، جستجوی غذا تا حدودی به این صورت است. (۵) مورچه‌های جستجوگر در جهات مختلف و به طور تصادفی حرکت می‌کنند. وقتی که مورچه منبعی از غذا را می‌بیند، به لانه برمی‌گردد، و ردپایی به جای می‌گذارد که از نوعی مواد شیمیایی سیگنال‌دهنده به نام فرومون[۵۳۷] تشکیل می‌شود. وقتی که سایر مورچه‌ها به مسیری از فرومون برخورد می‌کنند، احتمال دارد آن را دنبال کنند. هر چه تمرکز فرومون بیشتر باشد، احتمال بیشتری دارد که مورچه این مسیر را دنبال کند. اگر مورچه به منبع غذا برخورد کند، به لانه برمی‌گردد، و مسیر را تقویت می‌کند.

در صورتی که مسیر تقویت نشود، فرومون بخار می‌شود. به این ترتیب، مورچه‌ها به طور جمعی اطلاعاتی را درباره محل و کیفیت منابع غذایی مختلف فراهم کرده و آن اطلاعات را منتقل می‌کنند، و این اطلاعات خود را با تغییرات در شرایط محیطی انطباق می‌دهند. در هر زمان، مسیرهای موجود و قدرت آنها مدل خوبی از آن محیط غذایی می‌سازند که جستجوگران به طور جمعی کشف کرده‌اند. (شکل ۴-۱۲)



شکل ۴-۱۲. یک مسیر مورچه

تقسیم کار شیوه دیگری برای این است که جامعه مورچگان رفتار خود را به شیوه‌ای نامتمرکز تنظیم کند. بوم‌شناس [۵۳۸]دبورا گوردون [۵۳۹]به کار گماردن را در میان مورچگان نوع رد هاروستر[۵۴۰]" مورد مطالعه قرار داده (). است کارگران این جوامع چهار نوع کار را در میان خود تقسیم می‌کنند: جستجو، نگهداری لانه، نگهبانی، و سامان‌دهی پسماند. تعداد کارگرانی که به هر یک از انواع کار اختصاص می‌یابند با تغییرات محیطی انطباق پیدا می‌کند. برای مثال، گوردون پی برد که اگر لانه اندکی آشفته شود، تعداد کارگرانی که لانه را نگه می‌دارند افزایش پیدا می‌کند. به همین ترتیب، اگر ذخیره غذایی اطراف لانه زیاد و با کیفیت باشد، تعداد جستجوگران افزایش پیدا می‌کند. با وجود این‌که هیچ مورچه‌ای تصمیم مورچه دیگر را تعیین نمی‌کند و هر مورچه تنها با تعداد کمی از مورچه‌های دیگر برهم‌کنش می‌کند، چگونه امکان دارد که در واکنش به شرایط محیطی دور و بر لانه، یک مورچه تصمیم بگیرد که چه کاری را عهده‌دار شود؟

پاسخ به ظاهر این است که تصمیم مورچه‌ها در مورد عوض کردن کارشان هم تابع محیطی است که با آن سروکار دارند و هم تابع هنگ برخورد با مورچه‌هایی است که به کارهای دیگر مشغولند. برای مثال، یک مورچه غیرفعال - که فعلا کاری را به عهده ندارد - و با شیء خارجی در نزدیک لانه مواجه می‌شود احتمال بیشتری دارد که وظیفه نگهداری از لانه را به عهده بگیرد. افزون بر این، مورچه غیرفعال که با تعداد زیادی از کارگران نگهدارنده لانه برخورد می‌کند که به درون و بیرون لانه می‌روند احتمال بیشتری دارد که کار نگهداری لانه را به عهده بگیرد. فعالیت فزاینده به نحوی این پیام را می‌رساند که کارهای زیادی در زمینه نگهداری لانه وجود دارد. به همین ترتیب، کارگر نگهدارنده لانه که با تعداد زیادی از جستجوگران مواجه می‌شود که در حال حمل دانه به لانه هستند، احتمال بیشتری دارد که سراغ جستجوی غذا برود؛ تحویل فزاینده دانه به جهاتی این امر را می‌رساند که منبع غذای با کیفیتی وجود دارد که باید از آن بهره‌برداری کرد. مورچه‌ها ظاهرا از طریق تماس مستقیم شاخک‌هایشان، و از طریق ادراک پسماندهای شیمیایی خاص مربوط به هر کار می‌توانند حس کنند که سایر مورچه‌ها به چه کاری مشغولند.

به نظر می‌رسد انواع مشابهی از ساز و کارها - مبتنی بر سیگنال‌های فرومون و برهم‌کنش مستقیم در میان افراد - مسئول رفتارهای جمعی مورچگان و سایر حشرات اجتماعی باشند - مانند ساختن پل‌ها یا پناهگاه‌هایی که از بدن خود مورچه‌ها شکل می‌گیرد و درباره آن در فصل یک توضیح دادم - گرچه بسیاری از جنبه‌های این‌گونه رفتارها به طور کامل شناخته نشده است. (۱۲)

سوخت‌وساز زیستی

سوخت و ساز مجموعه‌ای از فرایندهای شیمیایی است که اندام‌واره‌های زنده از طریق آن انرژی گرفته شده از غذا یا هوا یا نور خورشید را برای حفظ کارکردهای مورد نیاز حیات مصرف می‌کنند. این فرایندهای شیمیایی عمدتا در درون سلول‌ها و از طریق زنجیره‌هایی از واکنش‌های شیمیایی به نام مسیر سوخت و ساز[۵۴۱]، رخ می‌دهند. در هر سلول از بدن یک اندام‌واره، مولکول‌های مواد غذایی به منظور ایجاد انرژی پردازش می‌شوند، و اجزای سلول از طریق مسیرهای موازی سوخت و ساز ساخته می‌شوند. این اجزا برای نگهداری و ترمیم درونی و برای کارکردهای بیرونی و ارتباط بین سلولی [۵۴۲]مورد نیازند. در هر زمان، میلیون‌ها مولکول موجود در سلول به صورت تصادفی در سیتوپلاسم به این‌سو و آن‌سو می‌روند و به طور مداوم با هم برخورد دارند. گهگاهی (در مقیاس میکروثانیه)، آنزیم‌ها با مولکول‌هایی مواجه می‌شوند که شکل مشابهی دارند و واکنش‌های شیمیایی تحت کنترل آنزیم‌ها را سرعت می‌بخشند. زنجیره‌ای از این واکنش‌ها موجب می‌شود که مولکول‌های بزرگ به تدریج ساخته شوند.

درست همان‌طور که لنفوسیت‌ها با رها کردن سیتوکین به صورت دینامیک بر سیستم ایمنی تأثیر می‌گذارند، و مورچه‌ها با رها کردن فرومون بر رفتار جستجوگرانه تأثیر می‌گذارند، آن دسته از واکنش‌های شیمیایی که در مسیر سوخت و ساز رخ می‌دهد به طور مداوم سرعت و منابع اختصاص یافته به یک مسیر خاص را تغییر می‌دهد.

به‌طورکلی، مسیرهای سوخت و ساز رشته‌های پیچیده‌ای از واکنش‌های شیمیایی هستند که با بازخورد خود تنظیم‌کننده کنترل می‌شوند. تجزیه قند[۵۴۳] یک نمونه از مسیر سوخت و ساز است که درتمامی اشکال حیات رخ می‌دهد - فرایندی چند مرحله‌ای است که در آن گلوکز تبدیل به ماده شیمیایی پریرووات [۵۴۴]می‌شود، که یک مسیر سوخت و ساز به نام چرخه اسید سیتریک[۵۴۵] از آن استفاده می‌کند تا از جمله مولکولی به نام ATP (آدنوزین تری‌فسفات)[۵۴۶]" را تولید کند که منبع اصلی انرژی قابل استفاده در سلول است.

در هر زمان مشخص، صدها مورد از این‌گونه مسیرها پدید می‌آیند، که برخی مستقل هستند، و برخی به هم وابسته. مسیرها به ساخت مولکول‌های جدید، راه‌اندازی مسیرهای دیگری از سوخت و ساز، و تنظیم خودشان یا سایر مسیرهای سوخت و ساز منجر می‌شوند.

همانند ساز و کارهای تنظیم‌کننده سیستم ایمنی و جوامع مورچگان که در بالا توضیح دادم، ساز و کارهای تنظیم‌کننده سوخت و ساز نیز مبتنی بر بازخورد هستند. تجزیه قند نمونه خوبی از این امر است. یکی از اهداف اصلی تجزیه قند فراهم کردن مواد شیمیایی لازم برای ایجاد ATP است.

وجود مقدار زیادی ATP در سلول، آهنگ تجزیه قند را کند می‌کند و به این ترتیب میزان تولید ATP جدید را کاهش می‌دهد. برعکس، وقتی سلول فاقد ATP باشد، سرعت تجزیه قند بالا

می‌رود. به‌طورکلی، سرعت یک مسیر سوخت و ساز اغلب توسط مواد شیمیایی‌ای تنظیم می‌شود که خود آن مسیر تولید کرده است.

پردازش اطلاعات در این سیستم‌ها

حال اجازه بدهید سعی کنم به برخی از پرسش‌های ابتدای این فصل پاسخ دهم:

در این سیستم‌ها نقش "اطلاعات" را چه چیزی بازی می‌کند؟

اطلاعات چگونه منتقل و پردازش می‌شود؟

این اطلاعات چگونه معنا کسب می‌کند؟ و برای چه کسی؟

در این سیستم‌ها نقش "اطلاعات" را چه چیزی بازی می‌کند؟

همانند خودکارهای سلولی، وقتی درباره پردازش اطلاعات در این سیستم‌ها حرف می‌زنم، به کنش‌های اجزای منفردی مثل سلول‌ها، مورچه‌ها، یا آنزیم‌ها اشاره نمی‌کنم، بلکه کنش‌های جمعی گروه بزرگی از این اجزا را مد نظر دارم. در چنین چارچوبی، اطلاعات برخلاف یک کامپیوتر سنتی، ساکن نیست و به طور دقیق در یک جای خاص قرار ندارد. در عوض، شکل آماری و دینامیک الگوهایی را به خود می‌گیرد که در اجزای سیستم حضور دارند.

در سیستم ایمنی، توزیع فضایی و دینامیک زمانی لنفوسیت‌ها را می‌توان همچون بازنمود اطلاعاتی تفسیر کرد که درباره جمعیت دائما متغیر بیماری‌زاهای بدن است. به همین ترتیب، توزیع فضایی و دینامیک تجمع‌های سیتوکین اطلاعات کلان‌مقیاسی را کدگذاری می‌کند که درباره موفقیت سیستم ایمنی در کشتن بیماری‌زاها و اجتناب از وارد شدن آسیب به بدن است.

در جوامع مورچگان، اطلاعات مربوط به محیط غذایی جامعه، به شکلی پویا، با توزیع آماری مورچه‌ها در مسیرهای مختلف بازنمایی می‌شود. و وضعیت عمومی جامعه با توزیع پویای مورچه‌هایی که به انجام وظایف مختلف مشغولند بازنمایی می‌شود.

در سوخت و ساز سلولی، اطلاعات مربوط به وضعیت جاری و نیازهای سلول به طور مداوم در تجمع‌های فضایی و دینامیک انواع مختلف مولکول‌ها بازتاب پیدا می‌کند.

اطلاعات چگونه منتقل و پردازش می‌شود؟

ارتباطات از طریق نمونه‌برداری

یکی از پیامدهای اینکه اطلاعات به صورت الگوهای آماری و متغیر با زمان اجزای خرد کدگذاری می‌شود، این است که هیچ جزئی از سیستم نمی‌تواند "تصویر کلی" وضعیت سیستم را منتقل کند. در عوض، اطلاعات باید از طریق نمونه‌برداری فضایی و زمانی منتقل شود.

برای مثال، در سیستم ایمنی، لنفوسیت‌ها از طریق گیرنده‌های خاص پادگن‌ها و همچنین سیگنال‌های سایر سلول‌های سیستم ایمنی به شکل سیتوکین‌ها، از محیط‌شان نمونه‌برداری می‌کنند. نمونه‌های فضایی و زمانی تجمع این سیگنال‌های مولکولی در لنفوسیت‌ها موجب می‌شود که لنفوسیت‌ها فعال شوند یا خاموش بمانند. سایر سلول‌ها به نوبه خود تحت تأثیر نمونه‌هایی قرار می‌گیرند که از تجمع و نوع لنفوسیت‌های فعال استنتاج شده است و می‌تواند سلول‌های کشنده بیماری‌زا را به نواحی خاصی از بدن راهنمایی کند.

در جوامع مورچگان، یک مورچه واحد از طریق گیرنده‌هایش از سیگنال‌های فرومون نمونه‌برداری می‌کند. تصمیمات خود را درباره این‌که به کدام جهت حرکت کند، بر مبنای نتایج این الگوهای نمونه‌برداری شده از فرومون‌های موجود در محیط می‌گیرد. همان‌طور که در بالا توضیح دادم، تک‌تک مورچه‌ها نیز به منظور این‌که تصمیم بگیرند در چه زمانی یک وظیفه خاص را عهده‌دار شوند - از طریق برخورد تصادفی با سایر مورچه‌ها - از اطلاعات تجمع پایه مورچه‌ها بهره می‌برند. در سوخت و ساز سلولی، درحالی‌که آنزیم‌ها از تجمع‌های فضایی و متغیر با زمان نمونه‌برداری می‌کنند، از پیوند بین آنزیم‌ها و مولکول‌های خاص در مسیرهای سوخت و ساز نوعی بازخورد پدیدار می‌شود.

مؤلفه‌های تصادفی رفتار

با توجه به ماهیت آماری اطلاعات تشخیص داده شده، کنش‌های سیستم باید مؤلفه‌های تصادفی یا حداقل "پیش‌بینی‌ناپذیر" داشته باشند. هر سه سیستمی که در بالا توضیح دادیم اساسا از تصادفی بودن یا احتمالات بهره می‌برند.(۱۳) شکل گیرنده هر تک لنفوسیت مؤلفه‌ای دارد که به صورت تصادفی به وجود آمده است تا امکان نمونه‌برداری از اشکال متعدد ممکن را فراهم بیاورد. به دلیل توزیع لنفوسیت‌ها توسط جریان خون، الگوی فضایی لنفوسیت‌های بدن مؤلفه‌ای تصادفی دارند، که نمونه‌برداری از الگوهای فضایی متعدد ممکن پادتن‌ها را میسر می‌کند. آستانه‌های فعال‌سازی تفصیلی لنفوسیت‌ها، آهنگ تقسیم واقعی آنها، و جهش‌های شکل گرفته در بچه لنفوسیت‌ها، همه جنبه تصادفی دارند.

به همین ترتیب، حرکات مورچه‌های جستجوگر مؤلفه‌های تصادفی دارند، و این جستجوگران به شیوه‌ای احتمالی با فرومون‌ها برخورد می‌کنند و جذب آنها می‌شوند. زیست-شیمی‌دان ادوارد زیف[۵۴۷] و تاریخدان علم[۵۴۸] ایزرائل روزنفیلد"[۵۴۹] این وابستگی به تصادفی بودن را چنین توضیح می‌دهند:

"سرانجام، مورچگان یک نقشه تفصیلی را از مسیرهای منتهی به منابع غذایی پایه‌ریزی می‌کنند. ناظر ممکن است تصور کند که مورچگان از نقشه‌ای استفاده می‌کنند که یک طراح هوشمند توزیع مواد غذایی فراهم کرده. اما آنچه یک نقشه‌برداری دقیق از مسیرهای منتهی به ذخیره‌های غذایی به نظر می‌رسد، چیزی جز پیامد رشته‌ای از جستجوهای تصادفی نیست.

(۹)

سوخت و ساز سلولی به پخش تصادفی مولکول‌ها و به برخوردهای احتمالی در میان مولکول‌ها وابسته است، و این برخوردهای احتمالی متناسب با تغییر در تجمع‌هایی که در واکنش به فعالیت در سیستم رخ می‌دهد، تغییر می‌کند.

به نظر می‌رسد که به منظور این‌که جامعه نسبتا کوچک اجزای ساده (مورچه‌ها، سلول‌ها، مولکول‌ها)، فضای بی‌نهایت بزرگتر احتمالات را اکتشاف کنند، این‌گونه عناصر درونی تصادفی و احتمالی مورد نیاز باشند، بخصوص وقتی که اطلاعاتی که قرار است از چنین اکتشافاتی کسب شود در ذات خود آماری باشد و دانش پیشینی اندکی درباره برخوردهای آتی وجود داشته باشد.

اما، تصادفی بودن باید با قطعیت متعادل شود: خود-تنظیمی در سیستم‌های پیچیده و انطباق‌پذیر به طور مداوم این احتمالات را تنظیم می‌کنند که اجزا به کجا حرکت کنند، چه کنش‌هایی را باید برعهده گیرند، و در نتیجه اکتشاف مسیرهای مشخص تا چه عمقی باید دنبال شود.

اکتشاف ریزبافت[۵۵۰]

بسیاری از سیستم‌های پیچیده زیستی، البته نه لزوما همه آنها، معماری ریزبافتی دارند، از این‌رو که شامل تعداد زیادی عناصر نسبتا ساده هستند که در اکثر مواقع موازی با هم کار می‌کنند.

این‌گونه معماری چندین مزیت ممکن را به بار می‌آورد، از جمله استحکام، کارایی، و قابلیت تکامل. مزیت بزرگ دیگر این است که یک سیستم موازی ریزبافت می‌تواند کاری را به انجام برساند که داگلاس هوفستادر "بررسی پلکانی موازی"[۵۵۱] نامید (۱۰) که اشاره دارد به اکتشاف همزمان بسیاری از احتمالات یا مسیرها، که در آنها منابع اختصاص یافته به هر اکتشاف در یک زمان معین وابسته به موفقیت قابل تصور در آن زمان معین است. بررسی از این جهت موازی است که بسیاری از امکانات مختلف به طور همزمان بررسی می‌شوند، اما از این جهت "پلکانی" است که همه امکانات با یک سرعت یا یک عمق اکتشاف می‌شوند. درحالی‌که اطلاعات گردآوری می‌شود همزمان مورد استفاده قرار می‌گیرد تا به طور مداوم مشخص شود که اکتشاف چه چیز از اهمیت برخوردار است.

برای مثال، در هر زمان معین، سیستم ایمنی باید تعیین کند لنفوسیت‌ها چه مناطقی از فضای عظیم اشکال ممکن بیماری‌زا را کاوش کنند. می‌توان هر یک از تریلیون‌ها لنفوسیت بدن را این‌گونه تصور کرد که در هر زمان معین، به دنبال اکتشاف کوچک خاصی در میان طیفی از اشکال هستند. طیفی از اشکال که بیشترین موفقیت را دارند (یعنی با قدرت به پادگن‌ها پیوند می‌خورند) از منابع بیشتری برای اکتشاف برخوردار می‌شوند و شکل بچه‌لنفوسیت‌های جهش‌یافته را به خود می‌گیرند، طیفی از اشکال که به نتیجه نمی‌رسند، یعنی لنفوسیت‌هایی که

با قدرت پیوند نمی‌خورند از منابع کمتری برخوردار می‌شوند. اما درحالی‌که سیستم ایمنی از اطلاعات بهره می‌برد، در تمام مدت به تولید لنفوسیت‌های جدیدی ادامه می‌دهد که به طور کامل طیف‌هایی از اشکال بدیع را اکتشاف می‌کنند. بدین ترتیب سیستم می‌تواند بر امیدوارکننده‌ترین چیزهای ممکنی که با آنها مواجه شده تمرکز کند.

به همین ترتیب، جستجوی مورچه از یک استراتژی بررسی پلکانی موازی استفاده می‌کند: بسیاری از مورچه‌ها در ابتدا جهت‌های تصادفی را به دنبال غذا اکتشاف می‌کنند. اگر در هریک از این جهت‌ها غذا کشف شود، بیشتر منابع سیستم (مورچه‌ها) از طریق ساز و کارهای بازخوردی که در بالا تشریح شد، و به این منظور که آن جهت‌ها بیشتر اکتشاف شوند، به این کار گمارده می‌شوند. در تمام مدت، متناسب با اینکه مسیرهای مختلف به‌طور نسبی چقدر امیدوارکننده هستند (مقدار و کیفیت غذایی که در آن مکان‌ها یافته شده) منابع اکتشافی به طور پویا به آنها اختصاص می‌یابند. اما به دلیل تعداد زیاد مورچه‌ها و اجزای تصادفی ذاتی آنها، مسیرهایی که امیدوارکننده نیستند کماکان مورد اکتشاف قرار می‌گیرند، گرچه از منابع بسیار محدودتری برای اکتشاف برخوردار می‌شوند. از همه‌چیز گذشته - چه‌کسی می‌داند _ امکان دارد منبع غذای بهتری کشف شود.

در سوخت و سازهای سلولی چنین اکتشاف‌های ریزبافتی را مسیرهای ساخت و ساز انجام می‌دهند، که هر کدام متمرکز بر اجرای وظیفه مشخصی هستند. هر مسیر را می‌توان از طریق بازخورد نتایج خودش یا سایر مسیرها، سرعت داد یا کند کرد. خود بازخورد به شکل تمرکز مولکول‌هاست که با زمان تغییر می‌کنند، در نتیجه سرعت نسبی مسیرهای مختلف می‌تواند به طور مداوم با نیازهای لحظه به لحظه سلول سازگار شود.

توجه داشته باشید که طبیعت ریزبافت سیستم نه تنها امکان می‌دهد که مسیرهای بسیار متفاوتی اکتشاف شوند، بلکه درعین‌حال امکان می‌دهد که سیستم به طور مداوم مسیرهای اکتشافی‌اش را تغییر دهد، چون در هر زمان تنها کنش‌های خرد و نسبتا ساده‌ای صورت می‌گیرد. به کار گرفتن کنش‌های درشت‌بافت‌تر مستلزم اختصاص زمان به اکتشاف خاصی است که ممکن است مناسب از کار درنیاید. به این ترتیب، طبیعت ریزبافت اکتشاف به سیستم امکان می‌دهد به صورت روان و مداوم اکتشاف خود را، متناسب با اطلاعاتی که دریافت می‌کند، تغییر دهد. افزون بر این، افزونگی[۵۵۲] موجود در سیستم‌های ریزبافت به سیستم امکان می‌دهد کارکرد خوبی داشته باشد، حتی در زمانی که اجزای منفرد کاملا قابل اعتماد نیستند و اطلاعات قابل دسترس در ذات خود جنبه آماری دارد. افزونگی سیستم امکان می‌دهد که نمونه‌برداری‌های مستقلی از اطلاعات انجام شود، و امکان می‌دهد کنش‌های ریزبافت تنها وقتی پیامدی داشته باشند که تعداد زیادی از اجزا به کنش‌ها مبادرت کرده باشند.

تأثیر متقابل فرایندهای متمرکز و نامتمرکز

در هر سه سیستمی که به عنوان مثال آوردیم، تأثیر متقابل مداومی بین اکتشاف‌های تصادفی نامتمرکز و کنش‌های متمرکزی وجود دارد که ناشی از نیازهای متصور سیستم هستند.
در سیستم ایمنی، اکتشاف‌های نامتمرکز را جامعه مدام متغیر لنفوسیت‌ها به انجام می‌رساند، که با گیرنده‌های مختلفی که دارند به طور جمعی آماده‌اند تا تقریبا با هر پادگنی همخوان شوند. اکتشاف‌های متمرکز شامل خلق بچه لنفوسیت‌هایی هستند که در کارشان موفق هستند، که به این اکتشاف‌ها امکان می‌دهند که بر شکل پادگن خاصی تمرکز کنند.
به همین منوال، جستجوی مورچه هم شامل اکتشاف‌های نامتمرکز مورچه‌هایی است که به صورت تصادفی حرکت می‌کنند، و در هر جهت به دنبال غذا هستند، و هم شامل اکتشاف‌های متمرکز که در جریان آن مورچه‌ها مسیرهای فرومون موجود را دنبال می‌کنند.
در سوخت و ساز سلولی، فرایندهای نامتمرکز اکتشاف تصادفی مولکول‌ها با فرایندهای فعال‌سازی یا بازداری متمرکز ناشی از تجمع مواد شیمیایی و تنظیم ژنتیک، ترکیب می‌شوند.
در تمامی سیستم‌های انطباق‌پذیر، حفظ یک تعادل درست بین این دو حالت اکتشاف ضروری است. (۱) درواقع، تعادل مطلوب در طول زمان تغییر می‌کند. اکتشاف‌های اولیه که مبتنی بر بی‌اطلاعی یا اطلاعات کمی هستند، عمدتا تصادفی و نامتمرکزند. در حالی که اطلاعات به دست می‌آید و روی آن کار می‌شود، و در واکنش به آنچه سیستم درک می‌کند، اکتشاف رفته رفته قطعیت بیشتری پیدا می‌کند و متمرکزتر می‌شود. در یک کلام، سیستم هم اکتشاف می‌کند تا اطلاعات کسب کند و هم از آن بهره می‌برد تا به طور موفقیت‌آمیزی انطباق پیدا کند.
فرض بر این است که این کنش متعادل‌کننده بین اکتشاف نامتمرکز و بهره بردن متمرکز، یکی از خاصیت‌های سیستم‌های انطباق‌پذیر و هوشمند است. برای مثال، جان هالاند به این کنش متعادل‌کننده به عنوان شیوه‌ای برای توضیح نحوه کار آلگوریتم ژنتیک استناد می‌کند.

اطلاعات چگونه معنا کسب می‌کند؟

این‌که اطلاعات چگونه به خود معنا می‌گیرند (بعضی ممکن است آن را مقصود بنامند) یکی از آن موضوعات نامشخصی است که سال‌هاست کتاب‌های قطور فلسفی را به خود اختصاص داده است. تصور نمی‌کنم به آنچه فلاسفه گفته‌اند بتوانم چیزی اضافه کنم، اما فکر می‌کنم که به منظور فهمیدن پردازش اطلاعات در سیستم‌های زنده باید به هر صورت به این پرسش پاسخ دهیم.
به نظر من، معنا رابطه نزدیکی با بقا و انتخاب طبیعی دارد. رویدادهایی که برای یک اندام‌واره اتفاق می‌افتند معنایی برای آن اندام‌واره دارند، البته اگر آن رویدادها بر بهزیستی[۵۵۳] یا توانایی تولیدمثل او تأثیر بگذارند. در یک کلام، معنای هر رویداد چیزی است که به فرد می‌گوید چگونه واکنش نشان دهد. به همین ترتیب، رویدادهایی که برای سیستم ایمنی یا درون آن اتفاق می‌افتند، با ملاک تأثیر آنها بر صلاحیت اندام‌واره معنا می‌یابند. (در اینجا از واژه صلاحیت به

صورت خودمانی استفاده می‌کنم.) این رویدادها معنایی برای سیستم ایمنی دارند چون به او می‌گویند چگونه واکنش نشان دهد تا صلاحیت اندام‌واره افزایش یابد - جوامع مورچه‌ها، سلول‌ها، و سایر سیستم‌های پردازش اطلاعات در موجودات زنده نیز همین گونه‌اند.

اما در یک سیستم پیچیده مثل آنچه در بالا توضیح دادم، که در آن اجزای ساده بدون کنترل‌کننده مرکزی یا رهبر اقدام می‌کنند، چه‌کسی یا چه چیزی در عمل معنای وضعیت را درک می‌کند تا دست به اقدام مناسب بزند؟ که در اساس پرسش در این باره است که چه‌چیزی هوشیاری یا خودآ گاهی را در سیستم‌های زنده می‌سازد. برای من این موضوع از جمله بغرنج‌ترین رازهای سیستم‌های پیچیده و به‌طورکلی علم است. گرچه این راز موضوع بسیاری از کتاب‌های علمی و فلسفی بوده، هنوز توضیح رضایت‌بخش و کاملی برای آن وجود ندارد.

تفکر درباره سیستم‌های زنده که به محاسبه مشغولند آثار جانبی نیز داشته است: دانشمندان کامپیوتر را برانگیخته است که برنامه‌هایی بنویسند که به منظور انجام کارهای دنیای واقعی از این سیستم‌ها تقلید کنند. برای مثال، ایده‌هایی درباره پردازش اطلاعات در سیستم ایمنی الهام‌بخش سیستم‌های ایمنی مصنوعی بوده است:(۱۳) برنامه‌هایی که به طور انطباق‌پذیر از کامپیوتر در قبال ویروس‌ها و سایر مهاجمان محافظت می‌کنند. به همین منوال جوامع مورچگان الهام‌بخش چیزی بوده‌اند که امروزه "آلگوریتم‌های بهینه‌سازی جامعه مورچگان" نامیده می‌شود، که در آن از مورچه‌های شبیه‌سازی شده‌ای استفاده می‌کنند، که فرومون‌های شبیه‌سازی شده ترشح می‌کنند و بین کارهای شبیه‌سازی شده یکی را برمی‌گزینند، و از این طریق مسائل سختی مانند مسیر ارتباطات بهینه در تلفن‌های همراه و زمان‌بندی بهینه کامیون‌های تحویل بار را حل می‌کنند.

من از هیچ برنامه هوش مصنوعی که هم از این دو سیستم و هم از سوخت و ساز سلولی الهام گرفته باشد اطلاعی ندارم، به استثنای موردی که خودم و راهنمای پایان‌نامه دکترایم نوشتیم، که در فصل بعد درباره آن توضیح می‌دهم.

فصل سیزدهم: چگونه قیاس کنید (اگر کامپیوتر هستید)

امور آسان سخت هستند

یک روز به پسر هشت ساله‌ام گفتم "جیک، لطفا جورابت را بپوش." با گذاشتن جوراب بر سرش واکنش نشان داد. "ببین، جوراب را پوشیدم!" فکر می‌کرد حرف خنده‌داری زده. از سوی دیگر متوجه شدم که لودگی او حقیقت ژرفی را درباره تمایز انسان و کامپیوتر نشان می‌دهد.

لطیفه "جوراب بر سر" خنده‌دار بود (حداقل برای یک پسر هشت ساله) چون برخلاف چیزی است که همه ما حقیقت می‌دانیم: گرچه اکثر گفته‌ها به زبان انسان، در اصل مبهم هستند ولی وقتی که حرفی را به فرد دیگری می‌زنید، او در اکثر مواقع می‌داند که منظورتان چیست. اگر به همسرم بگویم "می‌دانی کلیدهایم کجا هستند؟" و او صرفا جواب بدهد، "بله" ناراحت می‌شوم - البته، منظورم این بود که "بگو کلیدهایم کجاست." وقتی که بهترین دوستم می‌گوید حس می‌کند در کارش غرق شده، و من پاسخ می‌دهم "من هم همین‌طور." او می‌داند که منظور من این نیست که در کار او غرق شده‌ام، بلکه در کار خودم غرق شده‌ام. این فهم متقابل چیزی است که می‌توانیم "عقل سلیم" بنامیم، یا به صورتی رسمی‌تر، "حساسیت به زمینه."[۵۵۴]

در مقابل، کامپیوترهای مدرن امروز را داریم که همه‌چیز دارند جز حساسیت به زمینه. فرض بر این است که کامپیوتر من فیلتر اسپم[۵۵۵] پیشرفته‌ای دارد، اما پاره‌ای اوقات نمی‌تواند سردربیاورد که پیامی با یک "واژه مثل V!a&R @ احتمالا اسپم است. یک مثال مشابه دیگر: مقاله‌ای در شماره اخیر نیویورک تایمز توضیح می‌دهد که چگونه روزنامه‌نگاران نشریات چاپی دارند یاد می‌گیرند که با مناسب کردن تیترها برای موتورهای جستجوی خشک‌مغز[۵۵۶] و نه برای انسان‌های زرنگ، قابلیت فهم گزارش‌هایشان را بهبود دهند: "حدود یک سال پیش، ساکرامنتو بی[۵۵۷]" عناوین بخش آنلاین خود را تغییر داد." "ملک" تبدیل شد به "خانه"، "صحنه" به "سبک زندگی"، و اطلاعات مربوط به غذاخوری‌ها که در روزنامه‌ها تحت عنوان "مزه" می‌آمد، به صورت آنلاین تحت عنوان "مزه / غذا" قرار گرفت.

البته گفتن این حرف به این معنا نیست که کامپیوترها درباره همه‌چیز کودن هستند. در حوزه‌هایی مشخص و محدود آنها کاملا هوشمند شده‌اند.

اکنون خودروهای تحت کنترل کامپیوتر می‌توانند در زمین‌های ناهموار و بیابانی بدون راننده حرکت کنند. برنامه‌های کامپیوتری می‌توانند پزشکان را در تشخیص بیماری‌های معین، ریاضیدانان را در حل معادلات پیچیده، و استادان بزرگ را در شطرنج شکست دهند. اینها فقط مثال‌های معدودی از افزایش موفقیت‌های اخیر در هوش مصنوعی (AI) بوده‌اند که حس تازه‌ای از خوش‌بینی را به این رشته آورده‌اند. دانشمند علم کامپیوتر اریک هورویتز[۵۵۸] می‌گوید: در کنفرانس‌ها عبارت "هوش مصنوعی در سطح انسانی" را می‌شنوید، و گفتن آن کسی را

شرمنده نمی‌کند. (۳) خب، شاید برخی از آدم‌ها را شرمنده نمی‌کند. تعداد اندکی کارهای جزئی در "سطح انسان" وجود دارد که کامپیوترها هنوز قادر به انجام آن نیستند، مانند فهمیدن زبان انسان، توضیح دادن مضمون یک عکس، و به‌طورکلی‌تر به کار گرفتن عقل سلیم به همان شکل که در مثال‌های پیشین آمد. ماروین مینسکی[۵۵۹]، یکی از بنیان‌گذاران هوش مصنوعی، این پارادوکس هوش مصنوعی را با دقت توضیح می‌دهد: "امور آسان سخت هستند."(۲) کامپیوتر کارهای زیادی می‌تواند بکند که ما انسان‌ها آن را مستلزم هوش زیادی می‌دانیم، اما در عین حال قادر نیست کارهایی را بکند که هر کودک سه ساله‌ای به آسانی می‌تواند انجام دهد.

قیاس کردن

یک تکه مهم مفقوده در کامپیوترهای کنونی توانایی قیاس کردن است.

دانش‌واژه قیاس[۵۶۰] خاطرات بد مردم از پرسش‌های تستی استاندارد را زنده می‌کند، از قبیل "کفش برای پا همانی است که دستکش برای ...

است؟" اما منظور من از قیاس کردن بسیار گسترده‌تر است: قیاس کردن توانایی ادراک شباهت انتزاعی بین دو چیز به رغم تفاوت‌های سطحی است.

این توانایی تقریبا در هر جنبه از چیزی که هوش می‌نامیم راه پیدا می‌کند.

مثال‌های زیر را ملاحظه کنید:

کودک یاد می‌گیرد که سگ‌ها در تصاویر کتاب، در عکس‌ها، و در زندگی واقعی همه مصادیقی از یک مفهوم هستند.

فرد قادر است که به آسانی حرف A را در انواع بسیار متفاوتی از مطالب چاپی و دست‌نوشته تشخیص دهد.

جین به سیمونه می‌گوید، "هفته‌ای یک بار به والدینم زنگ می‌زنم." سیمونه پاسخ می‌دهد، "من هم همین‌طور." که البته منظورش این نیست که هفته‌ای یک بار به والدین جین زنگ می‌زند بلکه به والدین خودش زنگ می‌زند.

خانمی به همکار مردش می‌گوید، "این اواخر سخت کار کرده‌ام، نتوانسته‌ام به اندازه کافی با همسرم باشم." او پاسخ می‌دهد، "من هم همین‌طور" - که معنایش این نیست که به اندازه کافی با شوهر او نبوده، بلکه وقت کمی دارد که با نامزدش باشد.

یک آگهی بازرگانی پریر[۵۶۱] را به عنوان "کادیلاک آب‌های توی بطری" معرفی می‌کند. مقاله یک روزنامه از تدریس به عنوان "بیروت حرفه‌ها" یاد می‌کند. جنگ عراق "ویتنام ثانی" نامیده می‌شود.

بریتانیا و آرژانتین بر سر جزایر فاکلند [۵۶۲](یا لاس مالویناس[۵۶۳]) وارد جنگ می‌شوند، مجموعه‌ای از جزایر کوچک نزدیک به ساحل آرژانتین که مهاجران انگلیسی در آنجا ساکن

هستند. یونان به دلیل منازعه‌اش با ترکیه بر سر قبرس، که جزیره‌ای نزدیک به ترکیه است ولی اکثر ساکنینش یونانی هستند، از بریتانیا پشتیبانی می‌کند.

یک فرد علاقه‌مند به موسیقی کلاسیک قطعه‌ای ناآشنا را از رادیو می‌شنود و بلافاصله می‌فهمد اثر باخ است. یک علاقه‌مند به موسیقی قرون وسطی و رنسانس قطعه‌ای را می‌شنود که برای موسیقی باروک[۵۶۴] تنظیم شده است و به آسانی می‌تواند تشخیص دهد که آهنگساز از چه کشوری آمده است. یک خریدار در فروشگاه تشخیص می‌دهد که موسیقیی که پخش می‌شود نسخه‌ای بازاری[۵۶۵] از "هی جود""[۵۶۶] بیتل‌هاست.

فیزیکدان هیدکی یوکاوا"[۵۶۷] نیروی هسته‌ای را با استفاده از قیاس با نیروی الکترومغناطیس توضیح می‌دهد، و بر مبنای آن این فرضیه را مطرح می‌کند که ذره‌ای میانجی در نیروی هسته‌ای وجود دارد که خواص آن مشابه فوتون است. این ذره بعدا کشف می‌شود، و همان خواص پیش‌بینی شده را دارد. یوکاوا برنده جایزه نوبل می‌شود.

این فهرست نمونه کوچکی از قیاس‌هایی است که از نوع پیش‌پاافتاده و روزمره شروع می‌شود و تا کشفی ادامه پیدا می‌کند که یک بار در زندگی رخ می‌دهد. هر یک از این مثال‌ها، که سطوح متفاوتی از تأثیرگذاری را دارند، این را نشان می‌دهند که انسان‌ها با "جابه‌جا کردن"[۵۶۸] مفاهیم از یک وضعیت به وضعیت دیگر، در درک مشابهت انتزاعی بین دو موجودیت یا وضعیت از چه قدرتی برخوردارند. وقتی فهرست را در مجموع در نظر بگیریم فراگیر بودن این توانایی در تفکر انسان به خوبی روشن می‌شود. هنری دیوید تورو،[۵۶۹] از فلاسفه قرن نوزدهم، دراین‌باره می‌گوید: "کل درک حقیقت، تشخیص یک قیاس است. (۵) درک مشابهت‌های انتزاعی چیزی است که کامپیوترها در آن به بدی شهره‌اند. به همین دلیل نمی‌توانم به کامپیوتر صرفا عکسی را نشان دهم ـ برای مثال عکس یک سگ را که در استخر شنا می‌کند - و از او بخواهم "عکس دیگری مشابه آن" را در مجموعه عکس آنلاینم پیدا کند.

مسیر خود من به قیاس

در اوایل دهه ۱۹۸۰ که تازه از دانشگاه فارغ‌التحصیل شده بودم و درست نمی‌دانستم با زندگی‌ام چه می‌خواهم بکنم، یک کار تدریس ریاضی را در شهر نیویورک گرفتم. از این کار پول کمی عایدم می‌شد، و نیویورک شهر گرانی است، به همین جهت هر نوع خرید غیر ضروری را متوقف کردم. اما یکی از خریدهایی که کردم کتاب نسبتا جدیدی از یک استاد علوم کامپیوتر در دانشگاه ایندیانا بود که عنوان غریبی داشت: گودل، اشر، باخ: آمیزه‌ای گرانبها و ابدی.۶ من که فارغ‌التحصیل رشته ریاضی بودم و از موزه‌های متعددی بازدید کرده بودم، می‌دانستم گودل و اشر که هستند، و چون هوادار موسیقی کلاسیک بودم می‌دانستم که باخ کیست. اما از این موضوع که اسم هر سه آنها در عنوان یک کتاب بیاید سر درنمی‌آوردم و کنجکاوی‌ام برانگیخته

شده بود.

خواندن این کتاب که نوشته داگلاس هوفستادر بود، یکی از آن وقایع زندگی‌سازی از کار درآمد که آدم هیچ‌وقت انتظارش را ندارد. کتاب اساسا درباره این است که تفکر و آگاهی چگونه از طریق برهم‌کنش نامتمرکز تعداد زیادی نورون ساده در مغز پدیدار می‌شوند؛ مشابه رفتار پدیدارشونده سیستم‌هایی مثل سلول‌ها، جوامع مورچگان، و سیستم ایمنی؛ اما عنوان کتاب این را نمی‌رساند. در یک کلام، این کتاب برای من مقدمه‌ای بود بر برخی از ایده‌های اصلی سیستم‌های پیچیده.

روشن بود که هدف پرتب و تاب هوفستادر این بود که از اصول مشابهی برای ساخت برنامه‌های کامپیوتری هوشمند و "خودآگاه" استفاده کند. این ایده به سرعت به علاقه پرشور من هم تبدیل شد، و به این نتیجه رسیدم که می‌خواهم با هوفستادر درباره هوش مصنوعی مطالعه کنم.

مشکل این بود که من جوان گمنامی بودم که تازه از دانشگاه درآمده بود و هوفستادر نویسنده نامداری بود که هم جایزه پولیتزر[۵۷۰] و هم جایزه ملی کتاب[۵۷۱] را برده بود. نامه‌ای به او نوشتم و اظهار تمایل کردم که به عنوان دانشجوی تحصیلات تکمیلی با او کار کنم. طبیعتا او هرگز به نامه‌ام پاسخ نداد. در نتیجه منتظر فرصت مناسبی ماندم و در این فاصله وقتم را مصروف مطالعه بیشتر در هوش مصنوعی می‌کردم.



داگلاس هوفستادر

یک سال بعد در بوستون شغل جدیدی داشتم و دروس مختلفی را در علم کامپیوتر می‌گرفتم تا برای حرفه جدیدم آماده باشم. یک روز اتفاقا پوستری را دیدم که درباره سخنرانی هوفستادر در MIT تبلیغ می‌کرد. با شوق و هیجان در سخنرانی حاضر شدم، در پایان سخنرانی وارد خیلی از هواداران شدم که می‌خواستند قهرمان‌شان را ببینند. (من تنها کسی نبودم که کتاب

هوفستادر زندگی‌شان را تغییر داده بود.) سرانجام به ابتدای صف رسیدم، و به او گفتم که می‌خواهم در رشته هوش مصنوعی بر روی ایده‌هایی مشابه او کار کنم و علاقه‌مندم از دانشگاه ایندیانا درخواست پذیرش کنم.

پرسیدم که آیا امکان دارد در ایندیانا با او دیدار کنم و درباره موضوع بیشتر حرف بزنیم. او گفت که فعلا در بوستون زندگی می‌کند و یک سال در آزمایشگاه هوش مصنوعی در MIT خواهد بود. از من نخواست که برای دیدارش به آزمایشگاه بروم؛ بلکه من را به یکی از دانشجویان سابقش احاله کرد که در آن دوروبر بود، و خیلی سریع سراغ نفر بعدی در صف رفت.

ناامید شده بودم، اما منصرف نشدم. توانستم شماره تلفن هوفستادر در آن آزمایشگاه را پیدا کنم و چند بار تلفن زدم. هر بار یک منشی پاسخ می‌داد که می‌گفت هوفستادر آنجا نیست و او خوشحال می‌شود که پیغام مرا به هوفستادر برساند. چند بار پیغام گذاشتم، اما پاسخی دریافت نکردم.

یک شب در تختخواب دراز کشیده بودم و فکر می‌کردم بعد چه کنم که فکر دیوانه‌واری به سرم زد. همه تلفن‌هایی که به هوفستادر زده بودم در طول روز بود، و او هیچ‌وقت آنجا نبود. اگر روزها آنجا نبود، پس چه وقت آنجا بود؟ باید شب‌ها آنجا باشد! یازده شب بود، اما بلند شدم و آن نمره آشنا را گرفتم. با اولین زنگ خود هوفستادر پاسخ داد.

به نظر می‌رسید در مقایسه با روز سخنرانی حالت بهتری دارد. کمی حرف زدیم، او از من دعوت کرد که روز بعد به دفترش بروم تا درباره این‌که چگونه وارد گروه پژوهشی او شوم حرف بزنیم. طبق قرار به آنجا رفتم و درباره پروژه در دست اقدام او حرف زدیم - نوشتن یک برنامه کامپیوتری که بتواند قیاس کند.

بعضی اوقات داشتن شخصیت یک سگ بولداگ نتیجه‌بخش است.

ساده کردن قیاس

یکی از موهبت‌های فکری هوفستادر این است که یک مسئله پیچیده را در نظر می‌گیرد و آن را به شیوه‌ای ساده می‌کند که هرچند ماهیتش را حفظ می‌کند و بخشی که در اساس آن را جالب توجه کرده است به جا می‌ماند، پاسخ به آن ساده‌تر می‌شود. در این مورد، هوفستادر مسئله قیاس کردن را در نظر گرفته و یک دنیای خرد [۵۷۲] را خلق کرده بود که بسیاری از جالب‌ترین جلوه‌های مسئله را با خود داشت. این دنیای خرد متشکل از رشته‌هایی از حروف بود که باید بین آنها قیاس‌هایی صورت می‌گرفت.

برای مثال، این مسئله را در نظر بگیرید: اگر **abc** به **abd** تغییر کند، تغییر مشابه به **ijk** کدام است؟ اکثر مردم این تغییر را به این صورت توضیح می‌دهند: "حرفی را که در انتهای سمت راست قرار دارد با حرفی که از نظر ترتیب الفبایی بعد از آن قرار دارد جایگزین کنید." و پاسخ **ijl** است. اما روشن است که پاسخ‌های متعدد دیگری نیز وجود دارد:

ijd "حرفی را که در انتهای سمت راست قرار دارد با حرف d جایگزین کنید _ که مشابه جیک است که جوراب را بر سرش گذاشت."

ijk "تمامی حروف‌های c را با d جایگزین کنید؛ در ijk هیچ c وجود ندارد."

abd "هر رشته‌ای را با abd جایگزین کنید"l.

البته، بی‌نهایت پاسخ دیگر، حتی مواردی کمتر باورپذیر، وجود دارد؛ از جمله: ijxx ("هر c را با d و هر k را با دو x جایگزین کنید)، اما تقریبا هر کسی بلافاصله ijl را بهترین پاسخ می‌داند. این یک حیطه انتزاعی است و هیچ پیامد عملی ندارد و محال است بتوانم شما را متقاعد کنم که، برای مثال، ijl پاسخی بهتر از ijd است، البته اگر باور داشته باشید که دومی بهتر است. اما به نظر می‌رسد آدم‌ها به شیوه‌ای تکامل یافته‌اند که در دنیای واقعی قیاس‌هایی می‌کنند که بر بقا و تولیدمثل آنها تأثیرگذار است، و قابلیت قیاس کردن آنها به حیطه انتزاعی هم سرایت می‌کند. یعنی این‌که تقریبا همه ما قلبا موافقیم که سطح معینی از انتزاع وجود دارد که مناسب‌تر از همه است و در اینجا پاسخ ijl را به دست می‌دهد. کسانی که واقعا باور دارند ijd پاسخ بهتری است، اگر در دوران پلیستوسن[۵۷۳] زنده بودند، طعمه ببرها می‌شدند؛ و این توضیح می‌دهد چرا امروزه چنین آدم‌هایی را در اطراف خود نمی‌بینیم.

مسئله دومی هم وجود دارد: اگر abc به abd تغییر کند، تغییر مشابه به iijjkk چیست؟ تغییر abc = abd را می‌توان دوباره به این صورت توضیح داد: "حرف انتهای سمت راست را با حرفی که از نظر الفبایی بعد از آن است جایگزین کنید"، اما اگر این قاعده را حرف به حرف در مورد iijjkk اعمال کنیم پاسخ iijjkl به دست می‌آید، که ساختار دو حرفی iijjkk را به حساب نمی‌آورد. اکثر مردم پاسخ iijj را می‌دهند، که به طور ضمنی از این قاعده استفاده می‌کند: " گروهی از حرف‌ها را که در انتهای سمت راست قرار دارند با حرف‌هایی که از نظر الفبایی بعد از آنها هستند جایگزین کنید"، که امکان می‌دهد مفهوم حرف در abc به مفهوم گروهی از حرف‌ها در iijjkk جابه‌جا شود.

نوع دیگری از جابه‌جایی مفهومی را می‌توان در این مسئله دید:

abc = abd

ijk =?

کاربرد حرف به حرف قاعده "حرف انتهای سمت راست را با حرفی که از نظر الفبایی بعد از آن است جایگزین کنید." پاسخ kjj را می‌دهد، اما این ساختار معکوس kji را نادیده می‌گیرد که در آن رشته الفبایی صعودی از راست به چپ است و نه از چپ به راست. این امر مفهوم انتهای سمت راست را در cba وادار می‌کند که در kji به انتهای سمت چپ جابه‌جا شود و قاعده جدید را به این صورت درمی‌آورد: "حرف انتهای سمت چپ را با حرفی که از نظر الفبایی بعد از آن است جایگزین کنید"، که پاسخ lji را به دست می‌دهد. این پاسخی است که اکثر مردم می‌دهند.

برخی پاسخ kjh را ترجیح می‌دهند، که در آن رشته kji را به این صورت می‌فهمند که از چپ به راست می‌رود اما از نظر ترتیب الفبایی نزولی است. این یک جابه‌جایی از "از نظر الفبایی بعدی" به "از نظر الفبایی قبلی" را به دنبال می‌آورد، و قاعده جدید به این صورت درمی‌آید: "حرف انتهایی سمت راست را با حرفی که از نظر الفبایی قبل از آن است جایگزین کنید."

حال این مورد را در نظر بگیرید:

abc = abd mrrjjj?

می‌خواهید از این واقعیت روشن بهره بگیرید که abc از نظر ترتیب حروف رشته‌ای صعودی است، اما چگونه؟ این "بافت" [۵۷۴] درونی abc خیلی جالب توجه و ظاهرا جنبه محوری رشته است، اما در نگاه اول چنین بافتی jirrm را شکل نمی‌دهد. در نتیجه یا (مثل اکثر مردمl mrrkkk (یا به احتمالی (mrrijk را می‌پذیرید و یا بررسی عمیق‌تری می‌کنید. نکته جالب در این مسئله این است که گویا جنبه‌ای از mrrjii در زیر سطح پنهان است، که وقتی تشخیص داده شود، پاسخی فراهم می‌کند که از نظر بسیاری از مردم متقاعدکننده‌تر است. اگر حرف‌های موجود در mrrjii را نادیده بگیرید و در عوض به طول گروه[۵۷۵] توجه کنید، بافت جانشینی "[۵۷۶] مطلوب به دست می‌آید: طول گروه‌ها به صورت "۲-۳-۱"، افزایش پیدا می‌کند. وقتی این

ارتباط بین abc و mrriji روشن می‌شود، قاعده‌ای که abc = abd را توضیح می‌دهد این قابلیت را دارد که با mrriji سازگار شود، به صورت "گروه حرف‌ها در انتهای سمت راست را با جانشین طول جایگزین کنید" که در سطح انتزاعی "۲-۴-۱"، یا درست‌تر mrrjjjj را به دست می‌دهد.

سرانجام، این مورد را در نظر بگیرید:

۳.

abc = abd

xyz =?

در نگاه اول مسئله اساسا مشابه مسئله قبلی است که در آن رشته هدف ijk بود، اما یک پیچش وجود دارد: z جانشینی ندارد. پاسخ اکثر مردم xya است، اما در دنیای کوچک هوفستادر الفبا حلقوی نیست و در نتیجه این پاسخ در نظر گرفته نمی‌شود. این مسئله بن‌بستی را به وجود می‌آورد که مستلزم این است که قیاس‌کننده‌ها در دیدگاه اولیه‌شان تجدیدنظر کنند، احتمالا به نوعی جابه‌جایی مفهومی دست بزنند که در ابتدا در نظر گرفته نشده بود، و به این ترتیب شیوه دیگری را برای فهمیدن وضعیت کشف کنند.

آدم‌ها پاسخ‌های بسیار متفاوتی به این مسئله می‌دهند، از جمله xy "z را با هیچ‌چیز جایگزین نکنید" xyd "حرف انتهای سمت راست را با d جایگزین کنید." با توجه به این بن‌بست، برای اولین مسئله بالا این پاسخ مبهم‌تر اما منطقی‌تر از ijd به نظر می‌آید، xyy (اگر نمی‌توانید خلف[۵۷۷] z را انتخاب کنید، بهترین انتخاب بعدی سلف[۵۷۸] آن است)، و چند پاسخ دیگر. اما شیوه خاصی از نگاه به این مسئله وجود دارد که به نظر بسیاری از مردم نبوغ‌آمیز می‌آید، چه

خودشان به آن برسند چه نرسند. ایده اصلی این است که abc و xyz "تصویر آیینه‌ای" یکدیگر هستند - xyz در انتهای الفبا قرار دارد و abc در ابتدای آن. بدین‌ترتیب می‌توان تصور کرد که z در xyz و a در abc متناظرند، و بعد طبیعتا این احساس پیش می‌آید که x و c هم متناظرند. در پس این تناظر مجموعه‌ای از جابه‌جایی وجود دارد که از نظر مفهومی موازی هستند: از نظر الفبایی آخر

از نظر الفبایی اول، انتهای سمت چپ

انتهای سمت راست، سلف

خلف. وقتی همه را با هم در نظر بگیریم، این جابه‌جایی‌ها قاعده اصلی را به قاعده‌ای تبدیل می‌کند که با رشته هدف یعنی xyz تطبیق داده شده: "حرف انتهای سمت چپ را با سلفش جایگزین کنید." این قاعده پاسخی نامنتظر اما قدرتمند به دست می‌دهد: wyz

تا اینجا باید روشن شده باشد که کلید قیاس کردن در این دنیای کوچک (همچنین در دنیای واقعی) چیزی است که من آن را جابه‌جایی مفهومی می‌نامم. پیدا کردن آن جابه‌جایی مفهومی که متناسب با زمینه موجود باشد، ذات یافتن یک قیاس خوب است.

مقلد بودن

نقشه داگ هوفستادر برای من این بود که یک برنامه کامپیوتری بنویسم که بتواند با استفاده از ساز و کارهای مشابه با آنچه او معتقد بود به‌طورکلی مسئولیت قیاس کردن در انسان را برعهده دارند، در دنیایی از رشته‌های حروف قیاس کند. او همان موقع برای این برنامه (که هنوز وجود نداشت) نامی در ذهن داشت: "مقلد". ایده این است که قیاس کردن شکل ظریفی از تقلید کردن است - برای مثال، ijk نیاز دارد آنچه را در زمان تغییر abc به abd اتفاق افتاد تقلید کند، و برای این کار از مفاهیم مربوط به زمینه خودش بهره گیرد. از این‌رو وظیفه برنامه این بود که یک مقلد هوشمند و خلاق باشد.

کارم را بر روی این برنامه در تابستان سال ۱۹۸۴ در دانشگاه MIT آغاز کردم. پاییز آن[۵۷۹] سال، هوفستادر به عضویت هیئت علمی دانشگاه میشیگان[۵۸۰] در شهر ان آربور درآمد. من هم به آنجا نقل‌مکان کردم و وارد دوره دکترا شدم. نوشتن برنامه‌ای که او به تصور آورده بود شش سال طول کشید و در این مدت داگ از نزدیک کار من را دنبال می‌کرد - البته شر کار در جزئیات آن بود. از این ماجرا دو نتیجه به دست آمد: یک برنامه که می‌توانست در دنیای کوچک خودش قیاس کند، و سرانجام مدرک دکترای من.

چطور کار درست را انجام دهیم

برای این‌که یک مقلد هوشمند باشید، اول باید شیء، رویداد یا وضعیتی را که می‌خواهید "تقلید کنید" درست بفهمید. وقتی مواجهه با وضعیتی پیش می‌آید که اجزا و روابط بالقوه بسیاری دارد، خواه صحنه‌ای دیداری باشد و خواه داستان یک دوست و یا یک مسئله علمی، چگونه یک فرد (یا یک برنامه کامپیوتری) از نظر ذهنی تعداد فوق‌العاده زیاد و خارج از کنترل راه‌های ممکن برای فهمیدن این را اکتشاف می‌کند که چه اتفاقی در حال وقوع است و شباهت‌های ممکن با سایر وضعیت‌ها چیست؟

در زیر دو استراتژی متضاد و به یک اندازه نامعقول را مطرح می‌کنم، که هر دو کنار گذاشته می‌شوند:

۱. برخی از امکانات پیشینی[۵۸۱] هستند و مطلقا از اکتشاف کنار گذارده می‌شوند. برای مثال، پس از بررسی اولیه mrriji فهرستی از مفاهیم مورد نظر برای اکتشاف را تهیه کنید (برای مثال، حرف، گروه حرف‌ها، خلف، سلف، انتهای سمت راست) و سفت و سخت به آنها بچسبید. البته مشکل این استراتژی این است که انعطاف ندارد. یک یا چند مفهوم که به‌طور بلافصل مربوط به وضعیت شناخته نمی‌شوند (برای مثال، طول گروه) ممکن است در مراحل بعد اساسی از کار دربیایند.

۲. تمامی امکانات به یکسان در دسترس و اکتشاف آنها آسان است، در نتیجه می‌توان دست به جستجویی کامل در میان تمامی مفاهیم و روابط محتملی زد که در هر وضعیتی مربوط به موضوع باشند. مشکل این استراتژی این است که در زندگی واقعی امکانات بیش از حدی وجود دارد، و از پیش حتی روشن نیست که چه‌چیز ممکن است مفهومی محتمل در یک وضعیت معین را بسازد. اگر صدای تق‌تق عجیبی را از موتور اتومبیل بشنوید و بعد اتومبیل‌تان راه نیفتد، ممکن است وزن یکسانی به این احتمالات بدهید:

الف) تسمه دلکو تصادفا از بلبرینگش جدا شده.

ب) تسمه دلکو کهنه است و پاره شده.

اگر به هر دلیلی وزن یکسانی به این امکان سوم بدهید که همسایه دیوار به دیوارتان پنهانی تسمه را پاره کرده است، کمی می‌ترسید. اگر به هر دلیلی وزن یکسانی نیز به این امکان چهارم بدهید که اتم‌های سازنده تسمه دلکو به کائناتی موازی نقب کوانتومی زده‌اند[۵۸۲]، کمی خل هستید.

اگر ادامه بدهید و به هر امکان دیگری وزن مساوی بدهید... خب، واقعا نمی‌توانید، نه با این مغز محدود. اما این شانس وجود دارد که در مورد همسایه بدخواه درست گفته باشید، و احتمال نقب زدن کوانتومی نباید برای همیشه از ظرفیت شناختی شما کنار گذارده بشود چون با خطر از دست دادن جایزه نوبل روبرو می‌شوید.

ماحصل این که تمامی امکانات باید بالقوه اما نه لزوما به یکسان در دسترس باشند. امکانات دور از انتظار (برای مثال، همسایه بدخواه، یا نقب زدن کوانتومی) باید بالقوه در دسترس باشند اما مستلزم اجبار زیادی هستند تا به حساب بیایند (برای مثال، شکایاتی درباره همسایه‌تان شنیده‌اید، یک وسیله نقب زدن کوانتومی در اتومبیل‌تان نصب کرده‌اید؛ هر امکان دیگری را که اکتشاف کرده‌اید نادرست از کار درآمده است.)

مشکل یافتن یک استراتژی اکتشافی که به این هدف دست یابد بارها در طبیعت حل شده است. برای مثال، در فصل دوازدهم در شیوه‌ای که مورچگان غذا را جستجو می‌کنند دیدیم: کوتاه‌ترین مسیری که به بهترین منابع غذایی منتهی می‌شود قوی‌ترین رد بو را کسب می‌کند، و بیشترین تعداد مورچه‌ها این کوره‌راه را دنبال می‌کنند. و برخی مورچه‌ها غذا را کماکان به طور تصادفی دنبال می‌کنند، که احتمالا این فرصت را فراهم می‌کند تا منابع جدید یافته شوند.

این یک مثال از نیاز به حفظ تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری است، که در فصل دوازدهم به آن اشاره کردم. وقتی امکانات امیدوارکننده تشخیص داده می‌شوند باید با شتاب و شدتی مورد بهره‌برداری قرار گیرند که متناسب با نوید تقریبی‌شان باشد، امری که به طور مداوم به روز می‌شود. اما اکتشاف امکانات جدید باید در تمام مدت ادامه یابد. مسئله این است که منابع محدود را - چه مورچه‌ها باشند، چه لنفوسیت‌ها، یا آنزیم‌ها، یا افکار_ چگونه باید به شیوه‌ای پویا به امکانات مختلف اختصاص داد تا این اطلاعات تازه در حین کسب‌شان به حساب آورده شود. جوامع مورچگان این مسئله را به این صورت حل کرده‌اند که تعداد زیادی از مورچه‌ها ترکیبی از دو استراتژی را به کار می‌گیرند: جستجوی تصادفی مداوم همراه با ساز و کار بازخورد ساده‌ای از دنبال کردن ترجیحی کوره‌راه‌هایی که بوی فرومون دارند و در این حال ریختن فرومون‌های اضافی.

سیستم ایمنی نیز یک تعادل نزدیک به مطلوب بین اکتشاف و بهره‌برداری را با خود دارد. در فصل دوازدهم دیدیم که سیستم ایمنی چگونه از تصادفی بودن بهره می‌برد تا برای واکنش به تقریبا هر بیماری‌زایی که می‌بیند توان لازم را داشته باشد. این توان وقتی به دست می‌آید که پادگن یک سلول B خاص را فعال می‌کند و تکثیر آن سلول و تولید پادتن‌هایی را موجب می‌شود که دقت فزاینده‌ای در مورد پادگن موردنظر دارند.

بدین‌ترتیب سیستم ایمنی ضمن اختصاص بخش عمده‌ای از منابعش برای هدف‌گیری آن پادگن‌هایی که عملا حضور دارند، از اطلاعاتی که به شکل پادگن با آن روبرو می‌شود بهره‌برداری می‌کند. اما در تمام مدت با حفظ ذخیره عظیمی از سلول‌های متفاوت B به اکتشاف امکانات دیگر نیز ادامه می‌دهد.

هوفستادر برای اکتشاف محیط‌های غیرقطعی طرحی را پیشنهاد کرد:

"بررسی پلکانی موازی" که در فصل دوازدهم به آن اشاره کردم. در این طرح بسیاری از امکانات

به صورت موازی اکتشاف می‌شوند، و به هر کدام مطابق با بازخورد درباره این‌که چقدر امیدوارکننده هستند منابعی اختصاص می‌یابد که تخمین آن به طور مداوم و درحالی‌که اطلاعات جدید به دست می‌آید به روز می‌شود. همانند جامعه مورچگان یا سیستم ایمنی، تمامی امکانات شانس اکتشاف را دارند، اما در هر زمان معین تنها برخی از آنها فعالانه اکتشاف می‌شوند، و منابع اختصاص‌یافته نیز یکسان نیستند. وقتی یک فرد (یا جامعه مورچگان یا سیستم ایمنی درباره وضعیتی که با آن روبروست اطلاعات اندکی دارد، اکتشاف امکانات به صورتی بسیار تصادفی و شدیدا موازی (بسیاری از امکانات به یک باره در نظر گرفته می‌شود) و نامتمرکز آغاز می‌شود: هیچ اجباری وجود ندارد که یک امکان خاص بیشتر از دیگران جستجو شود. درهمان حال که اطلاعات بیشتر و بیشتری به دست می‌آید، اکتشاف به‌تدریج متمرکزتر می‌شود (منابع بیشتری بر روی تعداد کمتری از امکانات متمرکز می‌شود) و کمتر تصادفی است: امکاناتی که پیش از آن امیدوارکننده تشخیص داده شده‌اند مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. همچون جوامع مورچگان و سیستم ایمنی، در مقلد، این‌گونه استراتژی‌های اکتشافی از برهم‌کنش‌های بیشمار در میان اجزای ساده پدیدار می‌شود.

طرح کلی برنامه مقلد

کار مقلد این است که با استفاده از مفاهیمی که در اختیار دارد بر روی سه رشته از حروف "خام" و پردازش نشده که در هر مسئله مطرح هستند گروهی از ساختارهای ادراکی را بسازد - توضیحاتی درباره اشیا، پیوندهای بین اشیا در یک رشته، گروه‌بندی‌های اشیا در یک رشته، و تناظرهای بین اشیا در رشته‌های مختلف. ساختارهایی که این برنامه می‌سازد بیانگر فهم آن از مسئله است و به آن امکان می‌دهد راه‌حلی را صورت‌بندی کند. چون برنامه برای هر مسئله دقیقا از وضعیتی یکسان با مجموعه دقیقا یکسانی از مفاهیم آغاز به کار می‌کند، مفاهیمش باید با ملاک مربوط بودنشان و پیوندشان با یکدیگر و با وضعیت‌های مختلف سازگار باشند. در یک مسئله معین، درحالی‌که بازنمود یک وضعیت ساخته می‌شود، پیوندهایی پدیدار می‌شود که به سبکی تصادفی و طبق یک پویش پلکانی موازی در نظر گرفته می‌شوند، که در جریان آن به منظور فهم وضعیت بسیاری از مسیرها به صورت موازی آزمایش می‌شوند، هرکدام با سرعت و عمقی که نشان‌دهنده ارزیابی جاری از این است که چقدر امیدوارکننده هستند.

راه‌حل مقلد برای مسائل قیاس در رشته حروف، برهم‌کنش اجزای زیر را دربردارد:

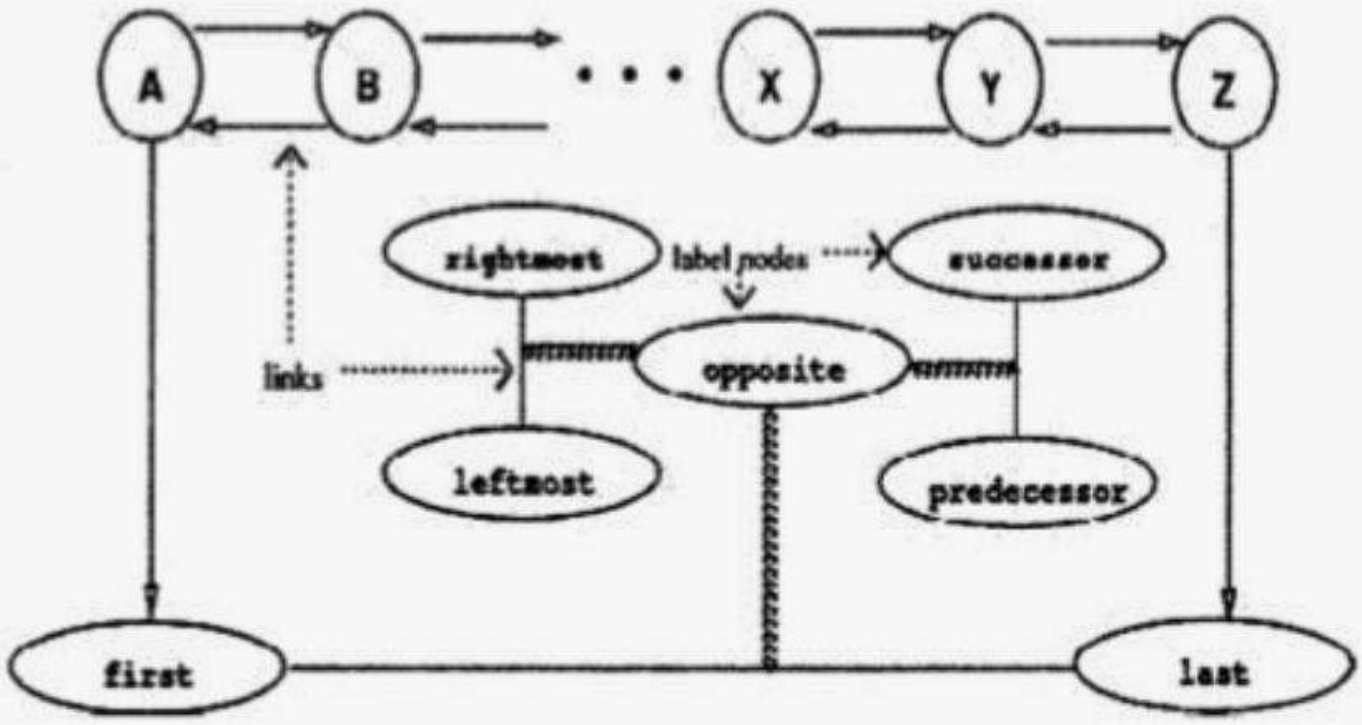
اسلیپنت[۵۸۳]: شبکه‌ای از مفاهیم، که هر یک از آنها شامل یک گره مرکزی است که پیوندها و جابه‌جایی‌های بالقوه‌ای پیرامون آن را گرفته‌اند.

تصویر برخی از مفاهیم و روابط در نسخه کنونی برنامه، در شکل ۱-۱۳ آمده است. هر گره در شبکه مفاهیم یک مقدار توان فعال‌سازی[۵۸۴] دینامیک دارد. این مقدار میزان ربط گره به مسئله قیاس پیش‌رو را چنان که در زمان حال قابل ادراک است به دست می‌دهد، و در نتیجه در زمان

اجرای برنامه تغییر می‌کند. فعال‌سازی نیز از گره به همسایه‌های مفهومی‌اش گسترش پیدا می‌کند، و اگر تقویت نشود زوال پیدا می‌کند.

هر پیوند یک مقدار مقاومت"[۵۸۵] دینامیک دارد که مقاومت کنونی‌اش را نسبت به جابه‌جایی نشان می‌دهد. این هم در زمان اجرای برنامه تغییر می‌کند. مقاومت یک پیوند، با فعال‌سازی گرهی که پیوند را معین می‌کند نسبت عکس دارد. برای مثال، وقتی متضاد"[۵۸۶] به شدت فعال است، مقاومت در مقابل جابه‌جایی بین گره‌هایی که به پیوندهای متضاد مربوط هستند (برای مثال، خلف و سلف) پایین می‌آید، و احتمال این گونه جابه‌جایی افزایش پیدا می‌کند.

فضای کار: فضایی که حروف تشکیل‌دهنده مسئله قیاس در آن قرار دارند و ساختارهای ادراکی بر روی این حروف بنا می‌شوند.



شکل ۱-۱۳. بخشی از اسلیپنت یا شبکه مفهومی مقلد. هر گره با مفهومی که معرف آن است برچسب می‌خورد (برای مثال،A-Z انتهای سمت راست، خلف). برخی از پیوندهای میان گره‌ها (برای مثال، انتهای سمت راست - انتهای سمت چپ) به گره برچسب خورده‌ای مرتبط هستند که رابطه پیوند را معین می‌کند (برای مثال، متضاد). هر گره مقدار فعال‌سازی دینامیکی دارد (نشان داده نشده است) و فعال‌سازی را به گره‌های همجوار گسترش می‌دهد.

فعال‌سازی اگر تقویت نشود زوال پیدا می‌کند. هر پیوند در مقابل جابه‌جایی مقاومتی درونی دارد، که وقتی گره برچسب خورده فعال می‌شود، کاهش پیدا می‌کند.

کدلت[۵۸۷]: عامل‌هایی هستند که به طور مداوم امکان بنای ساختارهای ادراکی را در فضای کار اکتشاف می‌کنند و بر مبنای یافته‌ها می‌کوشند برای چنین ساختارهایی مصداقی بیابند (واژه کدلت به معنی یک "قطعه کوچک کد" به کار رفته است، همان‌طور که واژه قدیمی‌تر اپلت[۵۸۸] در "جاوا" به معنی یک برنامه کاربردی کوچک به کار می‌رود.

تیم های کدلت برای ایجاد ساختارهای ادراکی که روابط بین اشیا را تعریف می‌کنندهمکاری و رقابت می‌کنند. برای مثال b" خلف a در abc است" یا "دو i در iijjkk یک گروه را شکل می‌دهند" یا b" در abc متناظر باگروه j ها در iijjkk است" یا c" در abc متناظر با k در ijk است". هر تیم کدلت امکان خاصی را برای ساختاردهی به بخشی از دنیا در نظر می‌گیرد، و منابع زمان کدلت اختصاص یافته به هر تیم وابسته به این است که ساختاری که تلاش می‌کند بسازد چقدر امیدوارکننده است. این امر در جریان اکتشاف و به طور پویا ارزیابی می‌شود. به این ترتیب، در همان حال که تیم‌های کدلت، از طریق رقابت و همکاری، به‌تدریج سلسله‌مراتبی از ساختارها را می‌سازند که "فهم" برنامه را از وضعیتی که با آن روبروست تعریف می‌کنند، یک بررسی پلکانی موازی از امکانات پدیدار می‌شود.

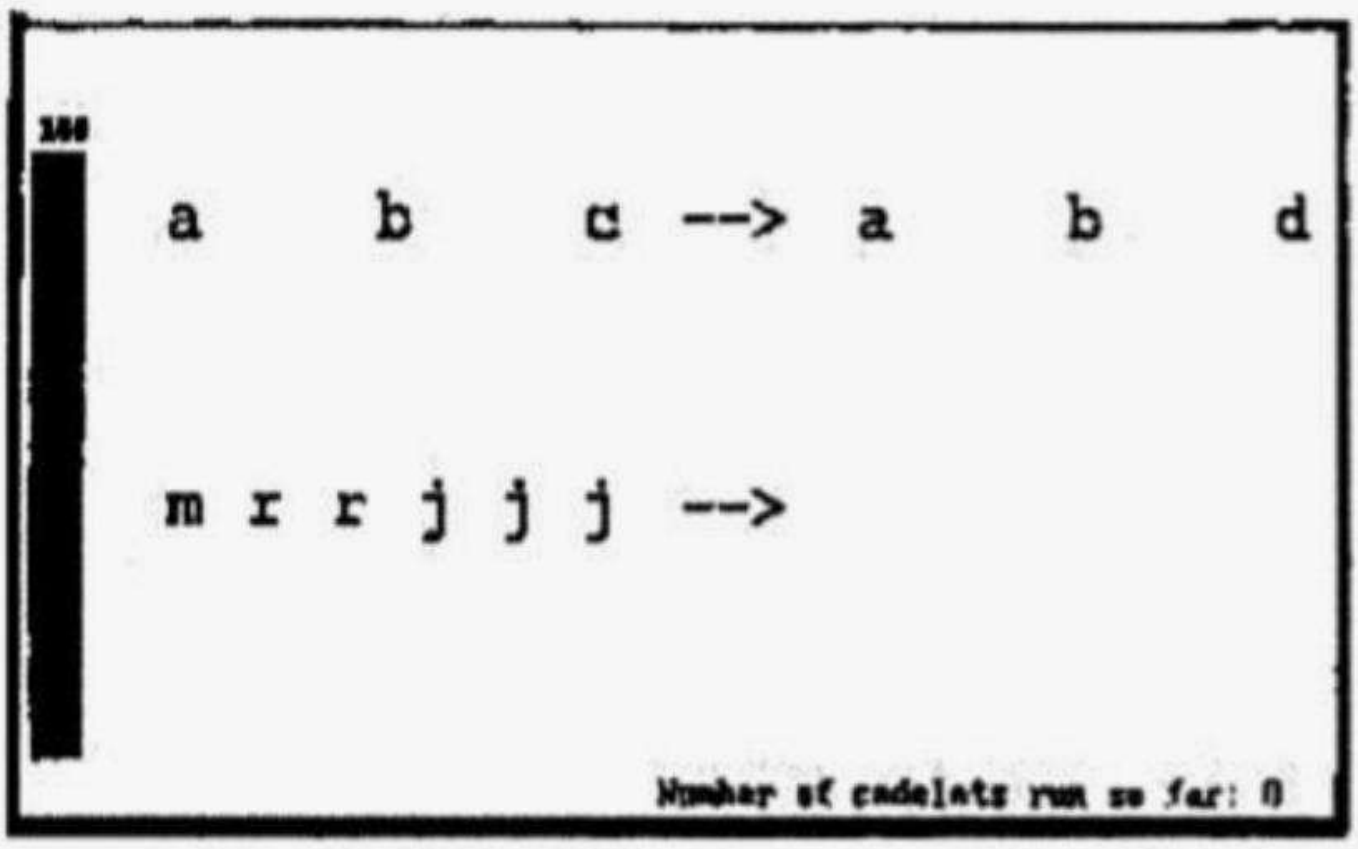
دما، که مقدار سازمان ادراکی سیستم را اندازه‌گیری می‌کند. مانند دنیای فیزیکی، دمای بالا متناظر با بی‌سازمانی است، و دمای پایین متناظر با میزان بالایی از سازمان است. در مقلد، دما

هم سازمان و هم بازخورد را برای کنترل میزان تصادفی بودن تصمیم‌گیری کدلت‌ها اندازه‌گیری می‌کند. وقتی دما بالاست، که بازتاب سازمان ادراکی کم و اطلاعات اندک برای تصمیم‌گیری است، کدلت‌ها تصمیم‌هایشان را تصادفی‌تر می‌گیرند. در همان حال که ساختارهای ادراکی ساخته می‌شوند و اطلاعات بیشتری دراین‌باره به دست می‌آید که چه مفهوم‌هایی مناسب هستند و چگونه ادراک اشیا و روابط در جهان باید سازمان یابند، دما کاهش می‌یابد، که نشانگر وجود اطلاعات بیشتری برای هدایت تصمیم‌هاست، و کدلت‌ها تصمیم‌هایشان را قطعی‌تر می‌گیرند.

اجرای برنامه مقلد

بهترین راه برای توضیح دادن این‌که اجزای برنامه مقلد چگونه برهم‌کنش می‌کنند نمایش تصویری خروجی اجرای واقعی این برنامه است. این تصاویر در زمان اجرای برنامه به صورت بلادرنگ تولید می‌شوند. در این قسمت تصاویر کلی ناشی از اجرای برنامه بر روی ?= mrrjjj، abc = abd به نمایش درمی‌آید.

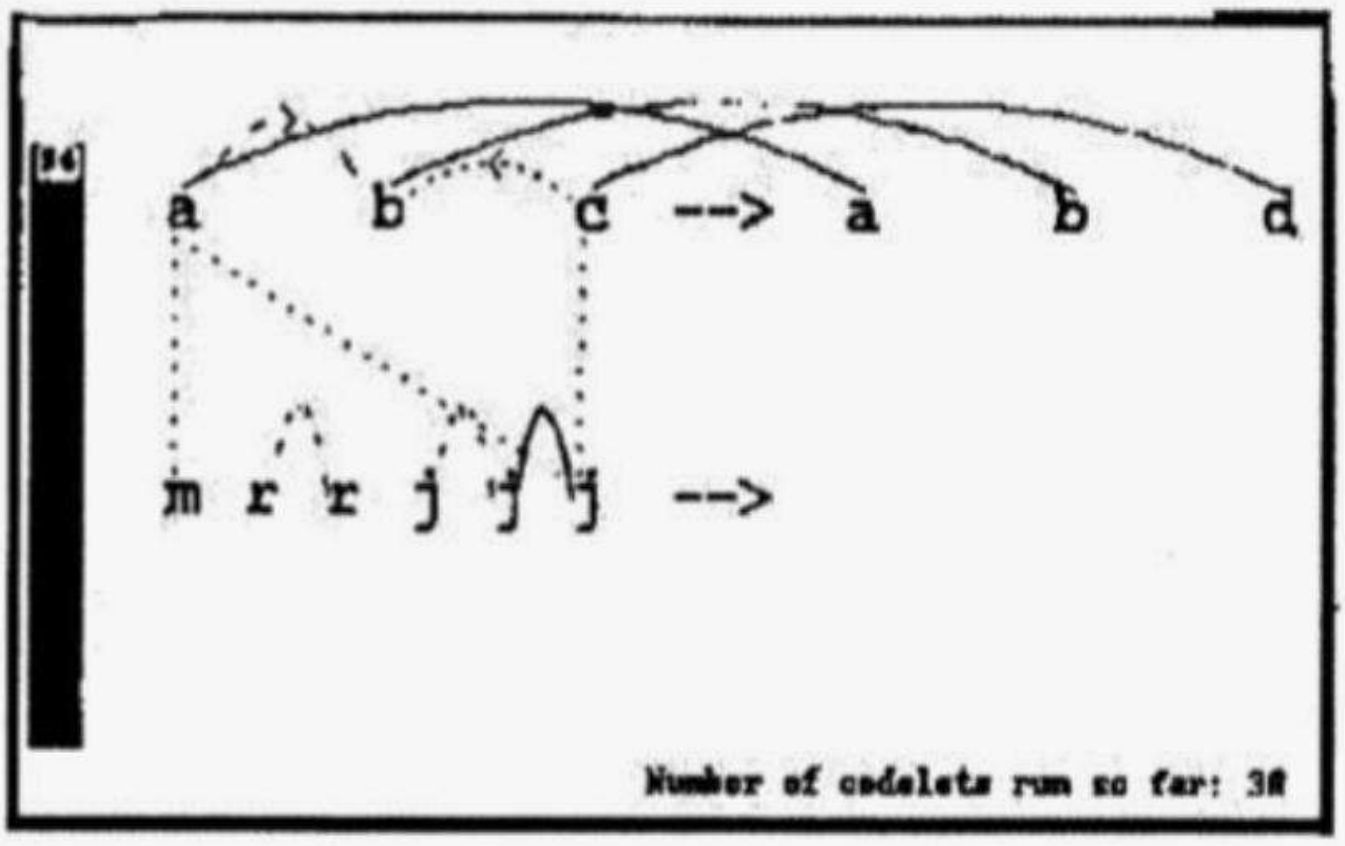
شکل ۲-۱۳. مسئله مطرح می‌شود. تصویر شامل این موارد است: فضای کار (در اینجا، حروف مربوط به مسئله قیاس که هنوز ساختار ندارند)؛ یک "دماسنج" در سمت چپ تصویر که دمای موجود را نشان می‌دهد (ابتدا در ۱۰۰ تنظیم شده، که مقدار حداکثر، و بازتاب فقدان هرگونه ساختار ادراکی است)؛ و تعداد کدلت‌هایی که تا پیش از آن اجرا شده‌اند (صفر).



شکل ۲-۱۳.

شکل ۳-۱۳: سی کدلت اجرا شده و انواع ساختارهای ممکن را بررسی کرده‌اند. از نظر مفهومی کدلت‌ها را می‌توان همچون عامل‌های شبه‌مورچه تصور کرد که هر کدام بر پایه احتمالات، یک مسیر اکتشافی را دنبال می‌کنند، اما مسیر ترسیم شده توسط سایر کدلت‌ها نیز هدایتشان می‌کند.

در این مورد "مسیر" ها متناظر با ساختارهای ادراکی مورد نظر هستند.
ساختارهای مورد نظر را کدلت‌هایی پیشنهاد می‌کنند که برای توضیحات باورپذیر، روابط، گروه‌بندی در درون رشته‌ها، و تناظر در میان رشته‌ها، به صورت تصادفی به دور و بر نگاه می‌کنند. درحالی‌که کدلت‌های بیشتر و بیشتری ساختار پیشنهادی را بررسی می‌کنند، آن ساختار قوی‌تر می‌شود.
پس از عبور از آستانه معینی از قدرت، ساختار "بنا شده" به حساب می‌آید، و می‌تواند بر ایجاد ساختار بعدی تأثیر بگذارد.

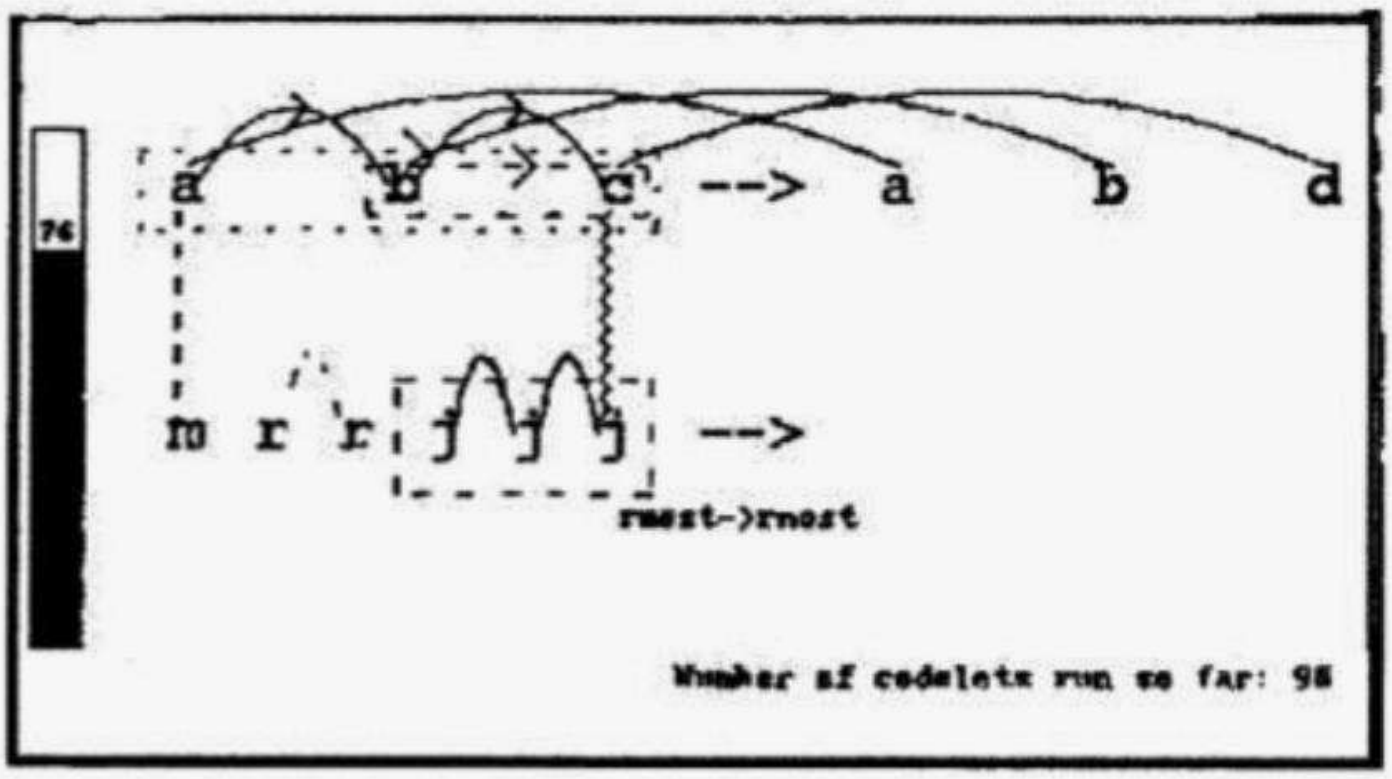


شکل ۳-۱۳.

در شکل ۳-۱۳، خطوط و قوس‌های نقطه‌چین نشان‌دهنده ساختارها در مراحل اولیه بررسی هستند؛ خطوط و قوس‌های خط‌چین نشان‌دهنده ساختارها در مراحل جدی‌تری از بررسی هستند؛ سرانجام خطوط و قوس‌های پر نشان‌دهنده ساختارهای ایجاد شده هستند. سرعت بررسی ساختارهای پیشنهادی بسته به ارزیابی کدلت‌ها از این است که ساختار چقدر امیدوارکننده است. برای مثال، آن کدلتی که تناظر a-m را پیشنهاد کرد آن را بسیار امیدوارکننده رتبه‌بندی کرد چون هر دو شیء در رشته خاص خود در انتهای سمت چپ هستند: روابط همانندی از قبیل انتهای سمت چپ = انتهای سمت چپ همواره نادرست‌اند. آن کدلتی که تناظر a-j را مطرح کرد آن را به صورت ضعیف‌تری رتبه‌بندی کرد، چون نگاشتی که بر آن مبتنی است، انتهای سمت راست = انتهای سمت چپ، خیلی ضعیف‌تر است، بخصوص با توجه به این‌که متضاد در وضع موجود فعال نیست. از این‌رو تناظر a-m احتمالا سریع‌تر از تناظر کمتر باورپذیر a_j بررسی می‌شود.
در واکنش به تنها ساختار ایجاد شده، یعنی پیوند "همانندی[۵۸۹]" بین دو j انتهای سمت راست در، mrrjij دما از ۱۰۰ به ۹۴ کاهش یافته است. این پیوند همانندی، گره همانند[۵۹۰] را در شبکه

@degar_goonesh

مفهومی فعال کرد (نمایش داده نشده) که اجبار متمرکزی را خلق می‌کند که به شکل کدلت‌هایی با اهداف خاص درمی‌آیند و در جستجوی موارد همانندی در نقاط دیگر برمی‌آیند.



شکل ۴ ـ ۱۳

شکل ۴-۱۳. نود و شش کدلت اجرا شده‌اند. بافت جانشینی abc ساخته شده است. توجه داشته باشید که پیوند سلف پیشنهادی در

c_به_b"۳

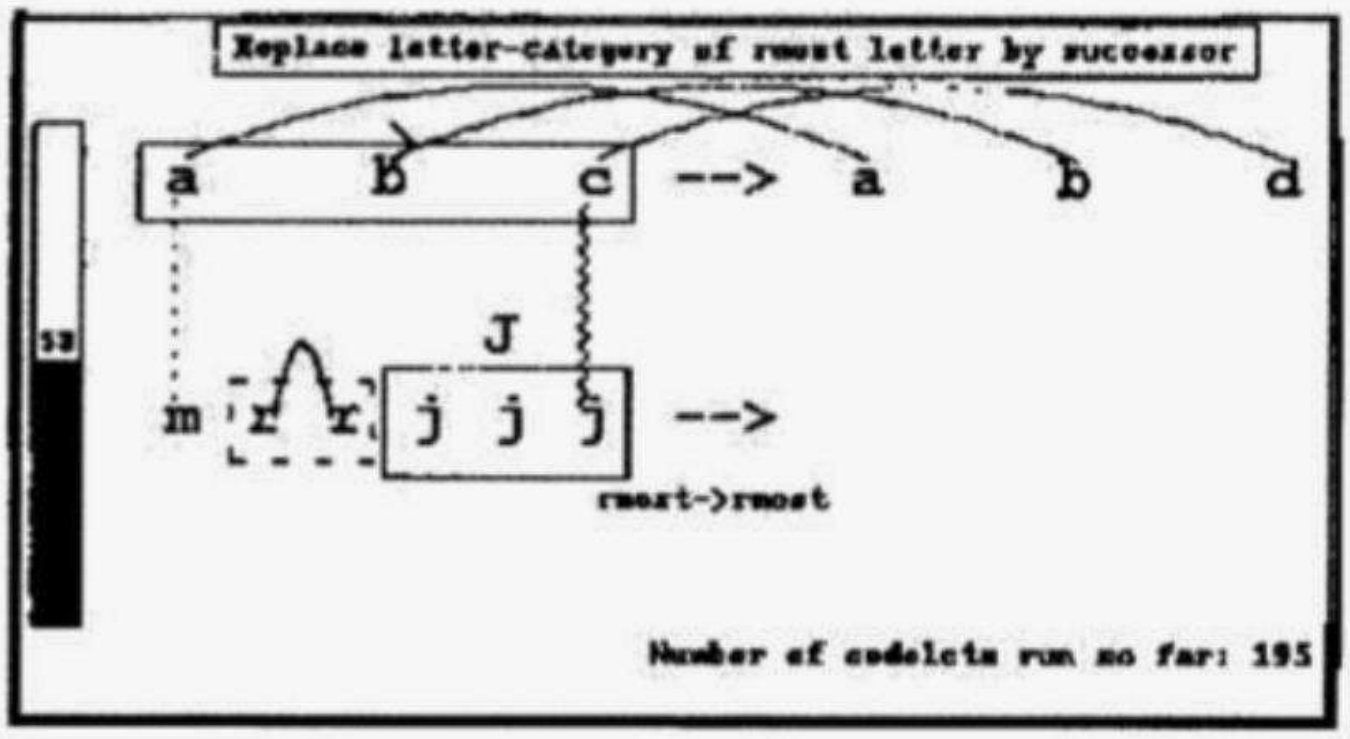
c-to-b "b . به در شکل ۱۳۳، در رقابت با یک پیوند خلف شکست خورده است.

دو پیوند خلف در abc از یکدیگر حمایت می‌کنند: هریک به دلیل حضور دیگری قوی‌تر به نظر می‌آیند، که موجب می‌شود احتمال این که پیوندهای سلف رقیب پیوندهای خلف را نابود کنند، خیلی کمتر شود.

دو گروه رقیب که مبتنی بر پیوندهای جانشینی بین حروف هستند به حساب می‌آیند: bc و abc (یک گروه با رشته کامل). اینها را مستطیل‌های نقطه‌چین یا خط چین دور حروف شکل ۴-۱۳ نمایش می‌دهند. گرچه bc در ابتدا پیش می‌افتد (خط‌چین است درحالی‌که دومی نقطه‌چین است)، گروه ba اشیای بیشتری در رشته را پوشش می‌دهد که آن را از bc قوی‌تر می‌کند - کدلت‌ها احتمالا سریع‌تر به آزمایش آن می‌رسند، و احتمال بیشتری دارد که به جای bc آن را بسازند. یک گروه قدرتمند،jij که مبتنی بر همانندی است در رشته پایینی در نظر گرفته می‌شود.

اکتشاف تناظر ضربدری[۵۹۱] a_j (خطوط نقطه‌چین در شکل ۳-۱۳) به تعلیق درآمده است، چون کدلت‌هایی که بررسی بیشتری کرده‌اند آن را برای ساختن بیش از حد ضعیف تشخیص دادند. یک تناظر c_j ساخته شده (خط عمودی دندانه‌دار)؛ نگاشتی که بر آن مبتنی است (به

عبارت دیگر، هر دو حرف در رشته‌هاشان در انتهای سمت راست هستند) در زیر آن آمده است.
چون پیوندهای جانشینی و همانندی، همراه با نگاشت هویت (انتهای سمت راست = انتهای سمت راست) ساخته شده‌اند، این گره‌ها در اسلیپنت شدیدا فعال هستند و اجبار متمرکزی را به شکل کدلت‌هایی به وجود می‌آورند که آشکارا در جستجوی سایر موارد این مفاهیم هستند.
برای مثال، یک نگاشت هویتی بین دو حرف انتهای سمت چپ در نظر گرفته می‌شود.
در واکنش به ساختارهایی که ایجاد شده، دما به ۷۶ کاهش یافته است.
هرچه دما پایین‌تر باشد، تصمیم‌های کدلت‌ها کمتر تصادفی هستند، در نتیجه ساختارهای نامحتمل از قبیل گروه bc با احتمال کمتری ساخته می‌شوند.



شکل ۵-۱۳.

شکل ۵-۱۳: گروه‌های abc و iii ساخته شده‌اند، که مستطیل‌های توپر پیرامون حروف آنها را به نمایش می‌گذارند. به منظور وضوح تصویر، پیوند بین حروف یک گروه نمایش داده نشده است. وجود این گروه‌ها برای یافتن گروه‌های جانشینی و همانندی اجبار بیشتری فراهم می‌کند، از جمله گروه همانندی rr که قویا در نظر گرفته می‌شود. گروه‌هایی مانند گروه همانندی، به اشیای جدیدی در رشته تبدیل می‌شوند و می‌توانند توضیحات مختص به خودشان، و همچنین پیوندها و تناظر با سایر اشیا را داشته باشند. حرف بزرگ J نشان‌دهنده شیئی است که شامل گروه jjj است؛ گروه abc نیز به همین سان شیئی جدید است اما به منظور وضوح تصویر، حرف واحد بیانگر آن نمایش داده نشده است. توجه داشته باشید که طول یک گروه به صورت خودکار مورد توجه برنامه قرار نمی‌گیرد؛ همانند سایر مشخصه‌های یک شیء، کدلت‌ها باید به آن توجه کنند. هر بار که گره یک گروه (برای مثال، گروه جانشینی، گروه همانندی) در شبکه مفهومی فعال می‌شود، نوعی فعال‌سازی را به گره طول تعمیم می‌دهد. بر این اساس طول اکنون به طور ضعیفی فعال شده و کدلت‌هایی ایجاد می‌کند که متوجه طول شوند. اما این کدلت‌ها در مقایسه با دیگران فوریت ندارند و تا اینجا هیچ‌کدام اجرا

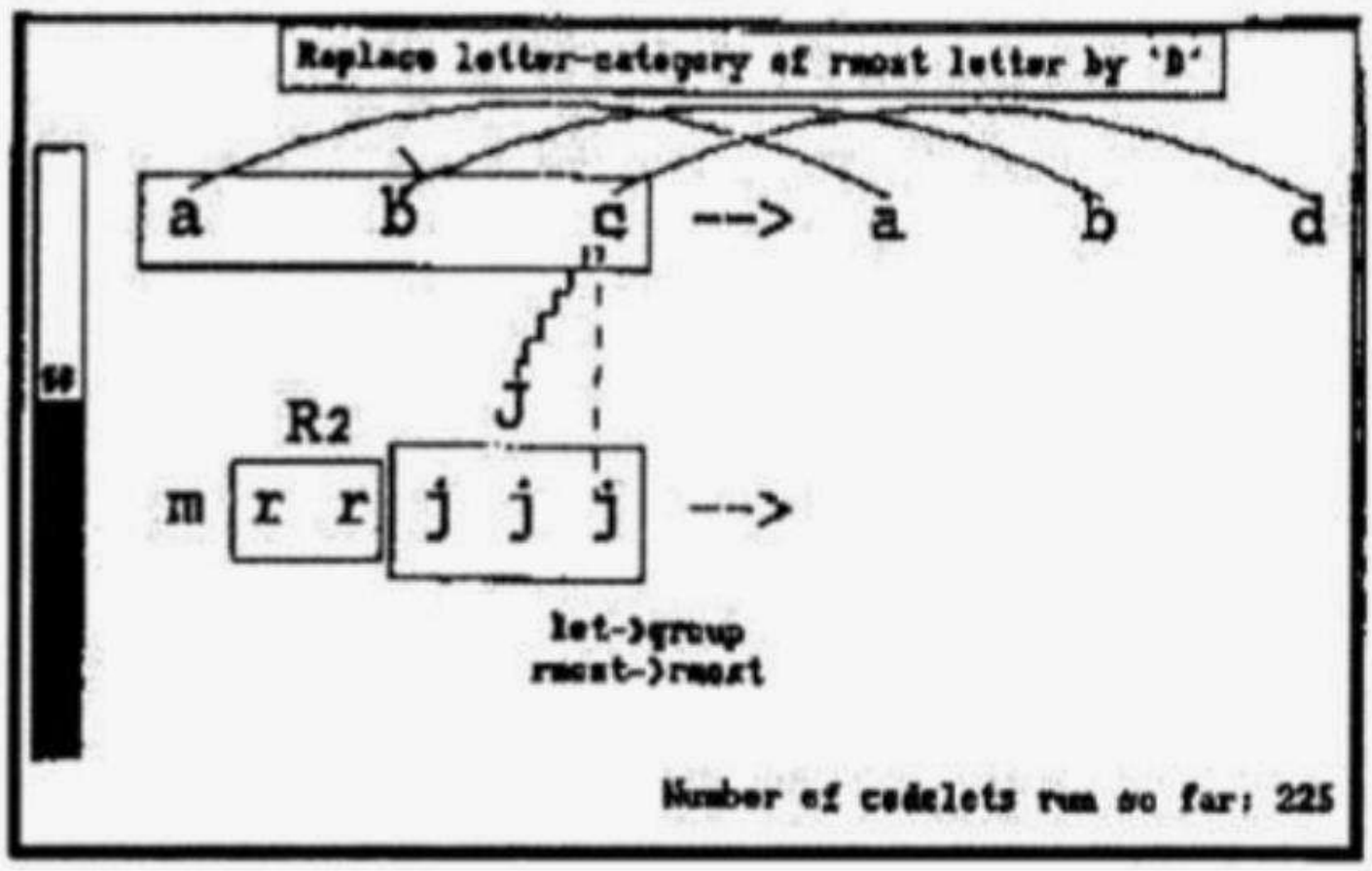
نشده و متوجه طول گروه‌ها نشده‌اند.

یک قاعده که تغییر abc = abd را توضیح می‌دهد ساخته شده است:

"مقوله حرف [۵۹۲]مربوط به حرف انتهای سمت راست را با خلف جایگزین کنید."

نسخه جاری مقلد فرض می‌کند که نمونه تغییر شامل جایگزینی دقیقا یک حرف است، که در نتیجه کدلت‌های سازنده قاعده[۵۹۳]، قالب "..... را با ..... جایگزین کنید" را پر می‌کنند، و بر پایه احتمالات، از میان توضیحاتی که برنامه به حرف تغییر یافته و جانشینش ضمیمه کرده است یکی را برمی‌گزینند، همراه با یک سوگیری مبتنی بر احتمالات در جهت گزینش توضیحات انتزاعی‌تر (برای مثال، به طور معمول حرف انتهای سمت راست را به C ترجیح می‌دهد.)

دما به ۵۳ سقوط کرده، که نتیجه سازمان بیشتر ادراکی است که در ساختارهای ایجاد شده بازتاب یافته است.



شکل ۶-۱۳

شکل ۶-۱۳: دویست و بیست و پنج کدلت اجرا شده‌اند. تناظر حرف-به-گروه c-j تناظر حرف-به حرف c_J را مغلوب کرده است. بازتاب این امر در نگاشت انتهای سمت راست = انتهای سمت راست دیده می‌شود که نگاشت گروه حرف به آن ملحق شده است که زیربنای تناظر را تشکیل می‌دهد. تناظر c-J قوی‌تر از تناظر c-j است، به این دلیل که اولی به اشیای بیشتری پوشش می‌دهد و به این دلیل که مفهوم گروه شدیدا فعال است و از این‌رو به موضوع خیلی مربوط به نظر می‌رسد. اما، به رغم ضعف نسبی تناظر، c-j تیم جدیدی از کدلت‌ها آن را به حساب می‌آورند.

در این فاصله، گروه rr ایجاد شده است. افزون بر این، طول آن را (که ۲ کنار R آن را نشان

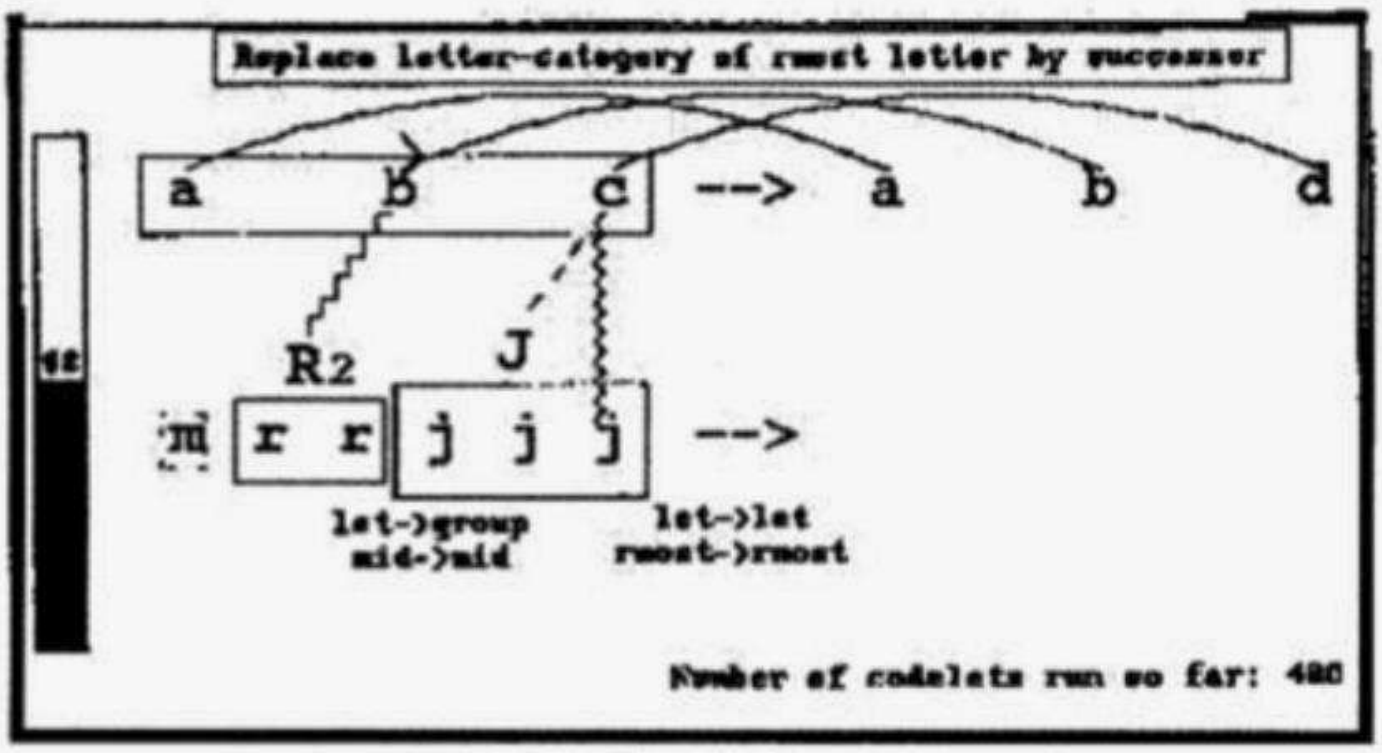
می‌دهد) یک کدلت تشخیص داده است (یک رویداد تصادفی). این رویداد گره طول را فعال کرده، و برای توجه به طول سایر گروه‌ها اجباری را ایجاد می‌کند.

یک قاعده جدید، "مقوله حرف مربوط به حرف انتهای سمت راست را با "D" جایگزین کنید" به جای مورد قدیمی در بالای نمایشگر آمده است.

گرچه این قاعده از قبلی ضعیف‌تر است، نتیجه رقابت بین ساختارهای رقیب (از جمله قواعد) بر پایه احتمالات مشخص می‌شود، و این یکی برحسب تصادف پیروز شد. اما ضعف آن موجب شده است که دما به ۵۸ افزایش یابد.

اگر قرار بود برنامه در همین‌جا متوقف شود (که بسیار غیرمحتمل است، چون عامل اصلی در تصمیم توقف برنامه که بر پایه احتمالات اتخاذ می‌شود دما است که به طور نسبی بالاست)، قاعده مورد استفاده در مورد رشته mrrjjj به این صورت درمی‌آمد: "مقوله حرف مربوط به گروه انتهای سمت راست را با "D" جایگزین کنید"، که از جابه‌جایی گروه = حرف تبعیت می‌کند که تحت تناظر c-J توضیح داده می‌شود که به پاسخ mrrddd منجر می‌گردد - پاسخی که برنامه مقلد در عمل به دست می‌دهد، البته خیلی به‌ندرت.

کدلت‌هایی که می‌کوشند پاسخی خلق کنند در سراسر برنامه بارها اجرا می‌شوند (کوشش آنها در اینجا نمایش داده نشده است) اما احتمال موفقیت ندارند مگر آنکه دما اندک باشد.



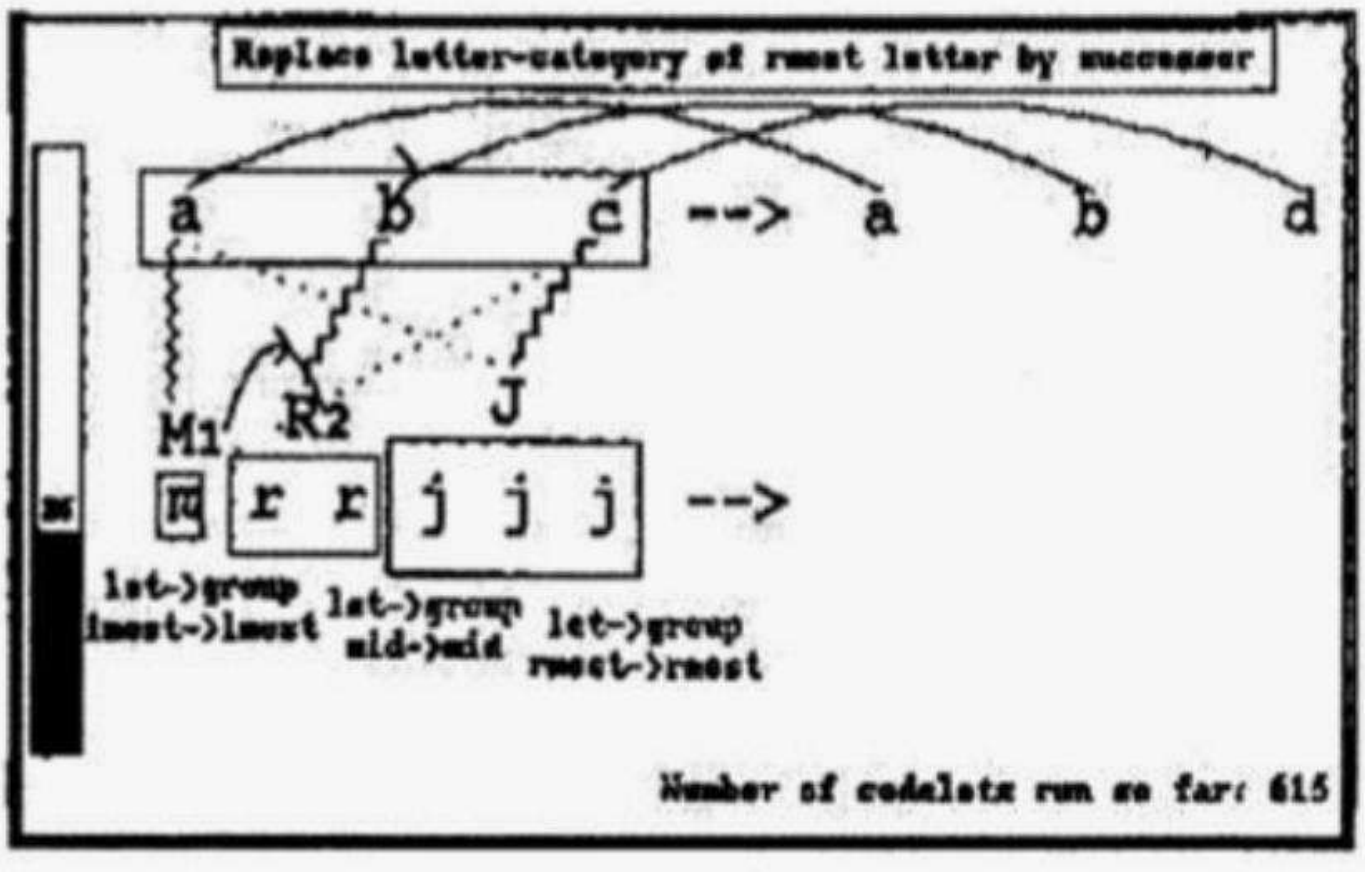
شکل ۷-۱۳

شکل ۷-۱۳: چهارصد و هشتاد کدلت تاکنون اجرا شده‌اند، و قاعده "مقوله حرف مربوط به حرف سمت راست انتهایی را با خلف جایگزین کنید" پس از این که قاعده ضعیف‌تر پیشین را در رقابت شکست داده به جای خود برگردانده شده است (رویدادی بر پایه احتمالات). اما تناظر قدرتمند c -J مغلوب شده و رقیب ضعیف‌ترش، تناظر c-j (که آن هم رویدادی بر پایه احتمالات است) جای آن را گرفته است. در نتیجه، اگر قرار بود برنامه در اینجا متوقف شود، پاسخش mrrijk می‌بود، چون c در abc به یک حرف ربط داده می‌شود و نه به یک گروه. بر این اساس، کدلت سازنده پاسخ، این واقعیت را نادیده می‌گیرد که b به یک گروه ربط داده شده است. اما تناظر داوطلب (کنونی) بین c و گروه J بار دیگر به شدت در نظر گرفته می‌شود. بار دیگر با تناظر c_j مبارزه می‌کند، اما به دلیل تناظر موازی بین b و گروه، R احتمالا قوی‌تر از قبل به نظر

می‌آید.

در اسلیپنت، فعال کردن طول تضعیف شده است زیرا توضیح طول که در گروه R آمده تا اینجای کار مفید تشخیص داده نشده (یعنی هنوز با هیچ یک از ساختارهای دیگر مرتبط نشده است.) در فضای کار، چشمگیری توضیح ۲ مربوط به طول گروه R به همان نسبت تضعیف شده است.

دما هنوز خیلی بالاست، چون برنامه در ایجاد یک ساختار واحد و منسجم بر مبنای mrrjjj به مشکل برخورده است درحالی که این کار را در مورد abc به آسانی انجام داده بود. این مشکل مداوم، به همراه فشار قدرتمند و متمرکز از جانب دو گروه همانندی که در درون mrrjjj ساخته شده است، موجب شد که سیستم از پیش ایده غیرمحتمل ایجاد یک گروه همانندی تک-حرف را در نظر بگیرد. این امر را مستطیل خط‌چین پیرامون حرف m نمایش می‌دهد.



شکل ۸-۱۳

شکل ۱۳.۸: در نتیجه این مجموعه فشارها، گروه همانندی M موازی با گروه‌های R و J در رشته واحدی ساخته شده است. طول آن که ۱ است همچون یک توضیح ضمیمه شده است که طول را فعال می‌کند و بار دیگر برنامه را وادار می‌سازد این امکان را در نظر بگیرد که طول گروه به این مسئله ربط دارد. این فعال‌سازی کدلت‌ها را شدیدا جذب اشیایی می‌کند که بیانگر طول‌های گروه هستند. در این حال، برخی از کدلت‌ها روابط بین این اشیا را اکتشاف می‌کنند، و احتمالا به دلیل فشار متمرکز از جانب abc برای یافتن روابط جانشینی، پیوندی جانشینی بین ۱ و ۲ را ایجاد کرده‌اند.

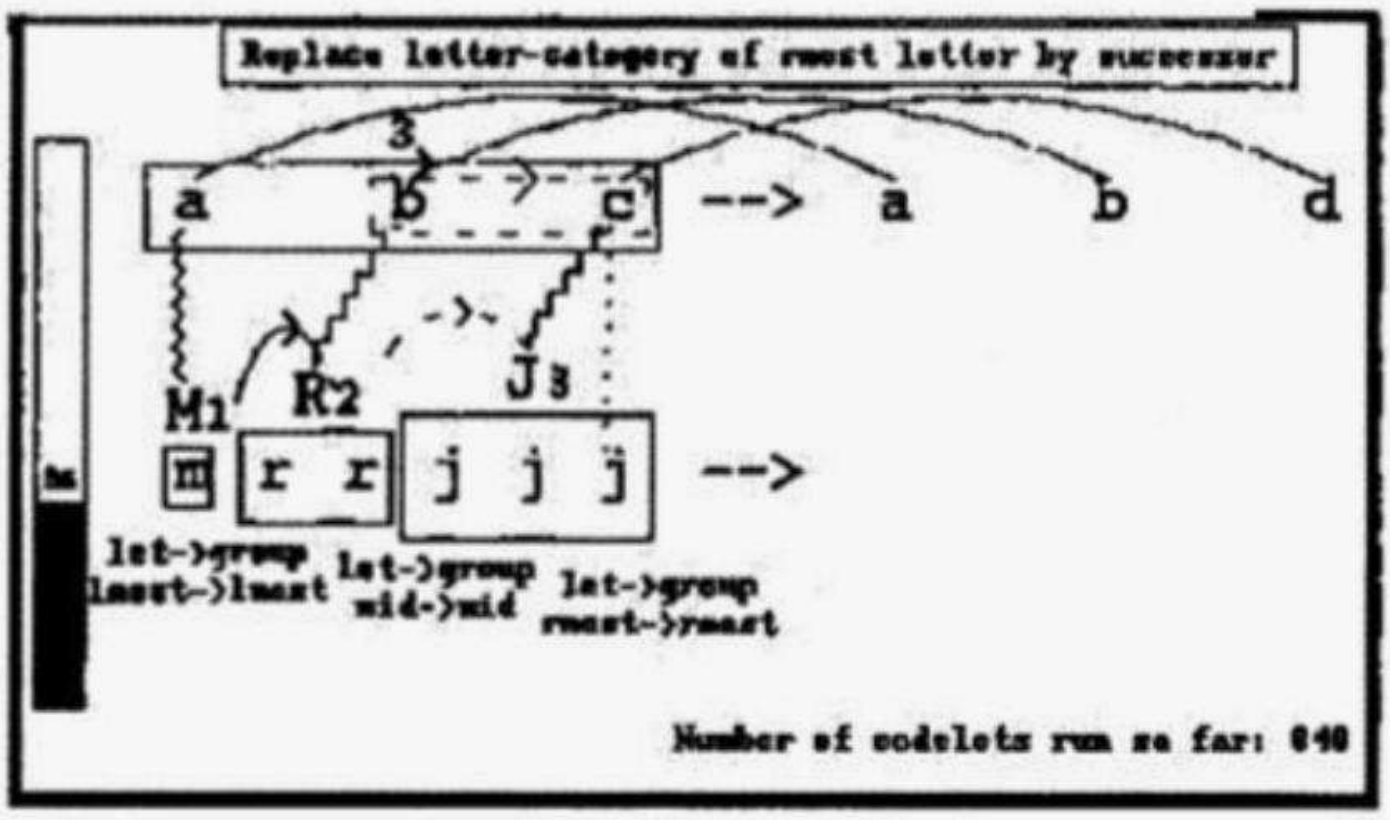
سه‌گانه منسجمی از تناظرهای گروه = حرف ایجاد شده، و در نتیجه این ساختارهای جدید امیدوارکننده، دما به مقدار نسبتا کم ۳۶ سقوط کرده است، که به نوبه خود به گرفتار شدن در این منظر نوظهور کمک می‌کند.

اگر قرار بود برنامه در اینجا متوقف شود، پاسخ mrrkkk را فراهم می‌کرد که مکررترین پاسخ است (به شکل ۱۲-۱۳ نگاه کنید.)

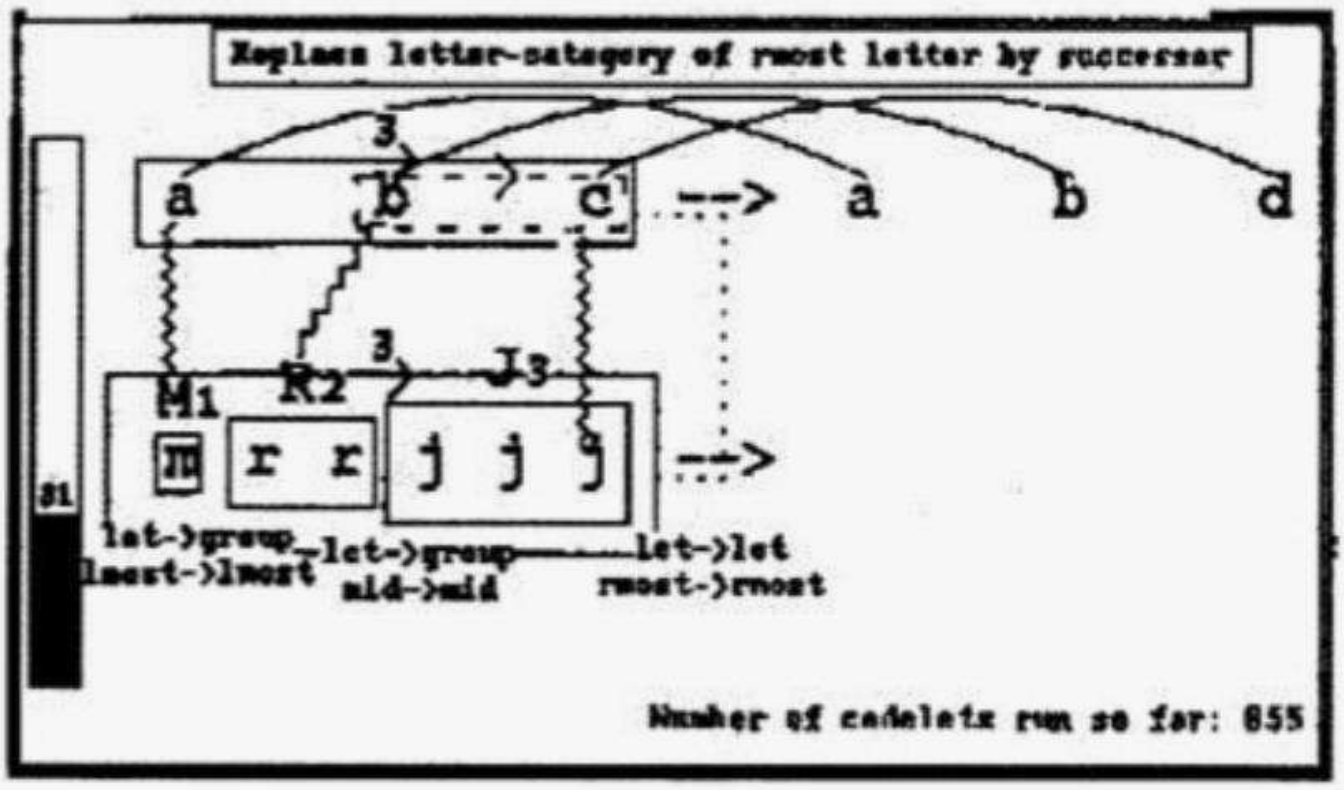
شکل ۹-۱۳: در نتیجه فعالیت مداوم طول، توضیحات طول به دو گروه باقیمانده در مسئله jjj و،abc ضمیمه می‌شوند، و یک پیوند جانشینی بین ۲ و ۳ (که فشار متمرکز زیادی از جانب abc و منظر نوظهور mrrjjj بر آن وجود دارد) در نظر گرفته می‌شود. سایر ساختارهای داوطلب که کمتر محتمل هستند (یک گروه bc و یک تناظر (c-j کماکان در نظر گرفته می‌شوند، گرچه اکنون که درک منسجمی از مسئله پدیدار شده و دما نسبتا کم است، فوریت آن کمتر است.

شکل ۱۰-۱۳: پیوند بین ۲ و ۳ ساخته شده است که همراه با فشار متمرکز از جانب گروه جانشینی abc به کدلت‌ها امکان داده است یک گروه به شکل رشته‌کامل[۵۹۴] مبتنی بر پیوندهای جانشینی را درنظر گرفته و بسازند، که در اینجا بیشتر بین اعداد است و نه حروف. این گروه را مستطیل توپر بزرگ پیرامون گروه‌های همانندی به نمایش می‌گذارد. همچنین یک تناظر (خط عمودی نقطه‌چین در سمت راست دو رشته) بین دو گروه به شکل رشته-کامل abc و mrrjij در نظر گرفته می‌شود.

از بازی روزگار، درست درحالی‌که این ایده‌های بغرنج ظاهرا همگرا می‌شوند، یک کدلت شورشی، که به طور کامل ازحرکت سراسری بی‌اطلاع است، شانس می‌آورد: تقلای آن برای شکست دادن تناظر c-J و جانشین کردن آن با تناظر c_j موفقیت‌آمیز از کار درمی‌آید.



شکل ۹-۱۳

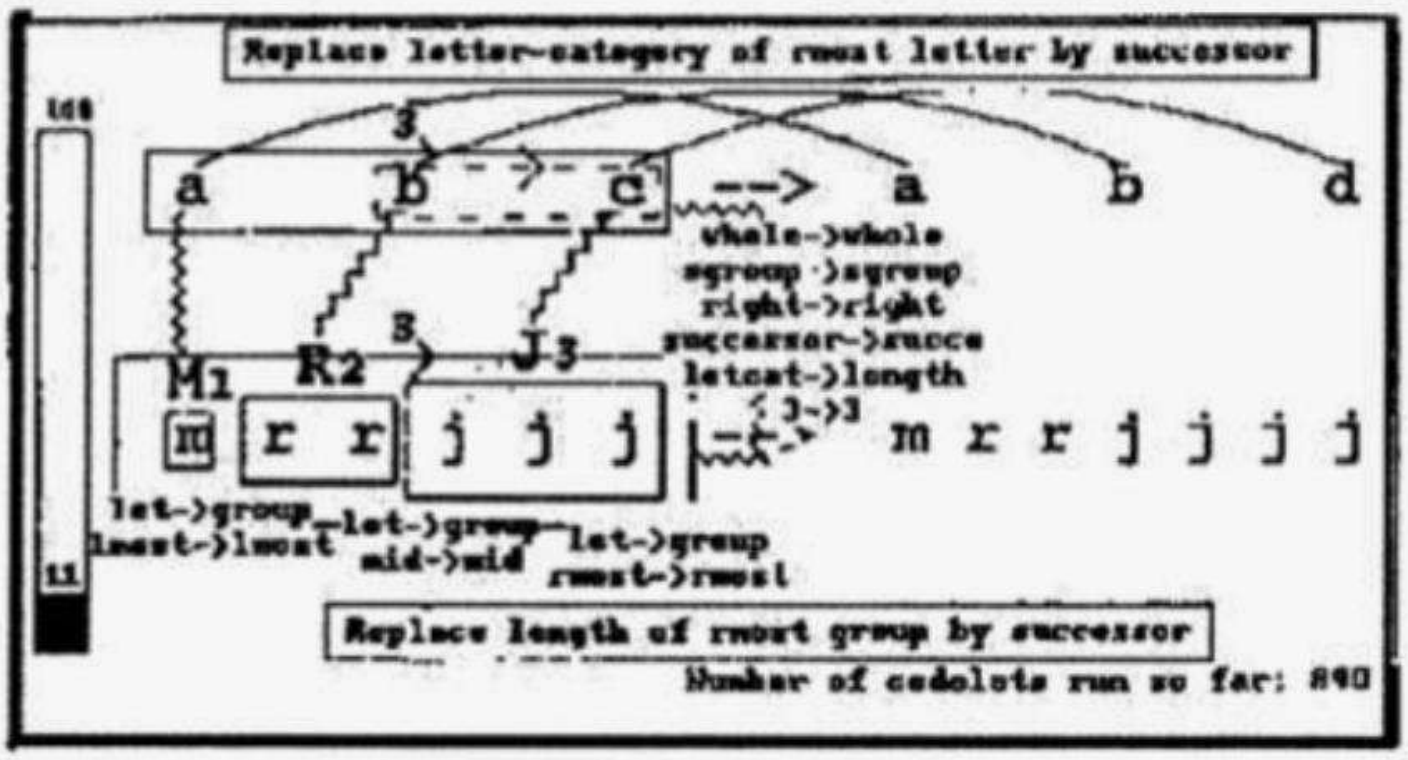


شکل ۱۰-۱۳

البته، در کل، این یک بدبیاری است؛ درحالی‌که به علت گروه قدرتمند mrrjjj که ساخته شده است دما به میزان چشمگیری پایین می‌رفت، کاهش آن با مجموعه‌ای از تناظرهای غیر موازی که دو رشته را پیوند می‌دهند جبران شده است. اگر برنامه وادار می‌شد در اینجا توقف کند، پاسخ mrrjjk را فراهم می‌کرد، چون در این نقطه، شیئی که c را تغییر داد، متناظر با حرف j دیده می‌شود و نه گروه.J اما دو تناظر دیگر به اعمال فشار بر برنامه ادامه می‌دهند (به شکل کدلت‌ها) تا دوباره به تناظر c-J برگردد.

شکل ۱۱-۱۳: درواقع مدت چندانی از اجرا نمی‌گذرد که این اتفاق می‌افتد: تناظر c_j شکسته شده و تناظر c-J جای خود را بازیافته است.

افزون بر این، تناظر پیشنهادی که رشته‌ای کامل است بین abc و mrrjjj ساخته شده است؛ شالوده آنها عبارت است از: کل = کل [۵۹۵]، گروه خلف گروه خلف، راست راست (جهت پیوندهایی که زیربنای هر دو گروه است)، خلف = خلف (نوعی از پیوند که زیربنای هر دو گروه است)، طول = مقوله حرف، و ۳ = ۳ (اندازه هر دو گروه).



شکل ۱۱-۱۳

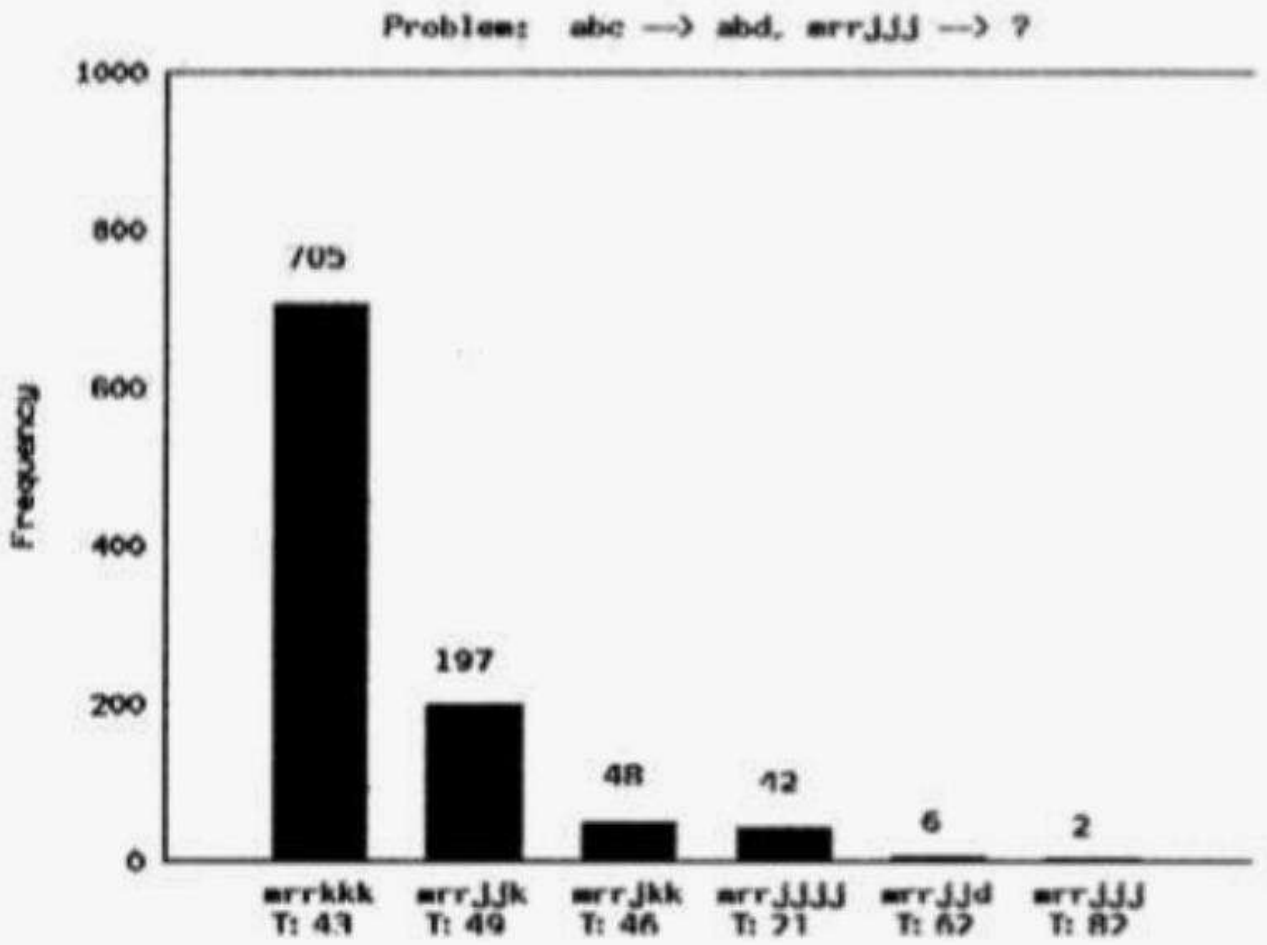
مجموعه کنونی ساختارهای ادراکی بسیار منسجمی که برنامه به وجود آورده منجر به دمای خیلی کمی شده است (۱۱) و (بر پایه احتمالات) به دلیل این دمای پایین و بر طبق جابه‌جایی‌های موجود در فضای کاری:

گروه = حرف و طول = مقوله حرف (تمامی نگاشت‌های دیگر نگاشت‌های هویتی هستند)، یک کدلت در ترجمه قاعده موفق شده است.

این قاعده ترجمه شده عبارت است از "طول گروه انتهای سمت راست را با خلف‌اش جایگزین کنید" و به این ترتیب پاسخ mrrjjjj است.

از توضیح بالا باید روشن شده باشد که چون هر اجرای برنامه مقلد تحت تأثیر تصمیم‌هایی بر پایه احتمالات قرار دارد، در اجراهای مختلف پاسخ‌های مختلفی پدیدار می‌شوند.

شکل ۱۲-۱۳ یک نمودار میله‌ای را به نمایش می‌گذارد که نشان‌دهنده پاسخ‌های مختلفی است که برنامه مقلد در ۱۰۰۰ اجرا فراهم کرده است، که هر مورد از عدد تصادفی اولیه متفاوتی کارش را آغاز می‌کند.



شکل ۱۲-۱۳. نمودار میله‌ای که تفاوت پاسخ‌های برنامه مقلد در ۱۰۰۰ اجرا را نمایش می‌دهد، که هر کدام از عدد تصادفی اولیه متفاوتی آغاز به کار می‌کنند.

ارتفاع هر میله بسامد نسبی پاسخ متناظرش را نشان می‌دهد، و آنچه در بالای هر میله چاپ شده است تعداد واقعی اجراهایی است که آن پاسخ را به وجود آورده است. دمای میانگین و نهایی مربوط به هر پاسخ نیز در زیر برچسب هر میله آمده است.

با توجه به سوگیری‌های برنامه، بسامد یک پاسخ ارتباط ضعیفی با وضوح یا فوریت‌اش دارد. برای مثال mrrkkk که ۷۵۰ بار ایجاد شده است برای برنامه فوریت بیشتری از mrrjjj دارد که تنها ۴۲ بار تولید شده بود. اما میانگین نهایی دما در اجراهایی که mrrjjjj را تولید می‌کنند خیلی کمتر از اجراهایی است که mrrkkk را تولید می‌کنند (۲۱ در مقابل ۴۳)، که نشان می‌دهد گرچه دومی پاسخ فوری‌تری است، برنامه به این نتیجه می‌رسد که بر مبنای قدرت و انسجام ساختاری که برای هر پاسخ ساخته، اولی پاسخ بهتری است.

چکیده

از طریق ساز و کارهایی که در این اجرای برنامه نشان داده شد، برنامه مقلد از گره کور ادراک اجتناب می‌کند: همه‌چیز را نمی‌توانید اکتشاف کنید، نمی‌دانید چه امکاناتی ارزش اکتشاف را دارند مگر آنکه ابتدا آنها را اکتشاف کنید. باید ذهن بازی داشته باشید، اما این قلمرو از آن وسیع‌تر است که همه‌چیز را اکتشاف کنید؛ برای آنکه اکتشاف واقع‌بینانه باشد لازم است از احتمالات استفاده کنید. در استراتژی مقلد که از زیست‌شناسی الهام گرفته است، در ابتدا اطلاعات کمی وجود دارد که منجر به دمای بالا و میزان بالایی از تصادفی بودن، همراه با تعداد زیادی از اکتشافات موازی می‌شود.

درحالی‌که اطلاعات بیشتر و بیشتری به دست می‌آید و مفاهیم مناسبی یافته می‌شود، دما پایین می‌آید، و اکتشاف قطعی‌تر و متوالیتر می‌شوند و ۱. serial در همان حال مفاهیم معینی چیره‌تر می‌شوند. نتیجه کلی این است که سیستم به‌تدریج از حالت پردازش عمدتا تصادفی و موازی و پایین به بالا، به یک حالت قطعی و متوالی و متمرکز تغییر می‌کند، که در آن یک ادراک منسجم از وضعیت موجود اندک اندک کشف می‌شود و اندک اندک "تثبیت می‌شود." همان‌طور که در فصل دوازدهم نشان دادم، گذار تدریجی بین حالت‌های پردازش به ظاهر ویژگی مشترک در برخی سیستم‌های پیچیده انطباق‌پذیر است.

چنین شباهت‌هایی بین مقلد و سیستم‌های زیستی ما را وادار می‌کند درباره سیستم‌هایی که می‌سازیم یا تلاش می‌کنیم بفهمیم، به صورت گسترده‌تری بیندیشیم. برای مثال، نقش سیتوکین‌ها در سیگنال‌دهی سیستم ایمنی مشابه کدلت‌هاست که توجه را به جاهای مشخصی در مسئله قیاس جلب می‌کنند؛ در این حال داریم در سطحی کلی از پردازش -اطلاعات به کارکرد یک موجودیت زیستی می‌اندیشیم. به همین ترتیب، اگر می‌بینیم که پدیده‌های شبه دما در سیستم ایمنی - تب، التهاب از اقدامات مشترک عوامل بسیاری پدیدار می‌شوند، ممکن است به این فکر بیفتیم که چگونه در یک سیستم مشابه مقلد دما را بهتر مدل‌سازی کنیم.

سرانجام به موضوع همواره پردردسر معنا می‌رسیم. در فصل دوازدهم گفتم که در کامپیوترهای سنتی، اطلاعات نه برای خود کامپیوتر بلکه برای خالقان انسان آن و "کاربران نهایی" معنا دارد. اما، دوست دارم تصور کنم که مقلد که معرف حالتی غیرسنتی از محاسبه است، شکلی بسیار بدوی از معنا را در مفاهیمی که در اختیار دارد و در قیاس‌هایی که به عمل می‌آورد ادراک می‌کند. برای مثال، مفهوم گروه خلف در شبکه‌ای متجسم است که در آن با مفاهیم ادراکی مشابهی پیوند دارد، و مقلد می‌تواند به شیوه‌ای مناسب و در انواع زیادی از وضعیت‌های متفاوت آن را تشخیص دهد و به کار بگیرد. از نظر من، این آغاز معناست. اما همان‌طور که در فصل دوازدهم گفتم معنا رابطه نزدیکی با بقا و انتخاب طبیعی دارد، که اگر از غریزه "بقای" بسیار ضعیف پایین آوردن دما بگذریم هیچ‌کدام ربطی با مقلد ندارند. مقلد (و مجموعه باز هم چشمگیرتری از برنامه‌های جانشین آن در گروه پژوهشی)(هوفستادر از این نظر کماکان فاصله زیادی با سیستم‌های زیستی دارند.

هدف نهایی هوش مصنوعی این است که انسان را از حلقه معنا خارج کند و خود کامپیوترها را وادارد معنا را درک کنند. این امر سخت‌ترین مسئله هوش مصنوعی است. ریاضیدان جیان-کارلو روتا [۵۹۶] این مسئله را "مانع معنا" نامید، و این پرسش را مطرح کرد که آیا هوش مصنوعی هیچ‌گاه می‌تواند آن را "درهم بشکند" یا اگر می‌تواند در چه زمانی. شخصا فکر می‌کنم این اتفاق خیلی زود نیفتد، اما اگر این مانع برداشته شود، و زمانی که برداشته شود، گمان من بر

این است که قیاس راه حل آن خواهد بود.

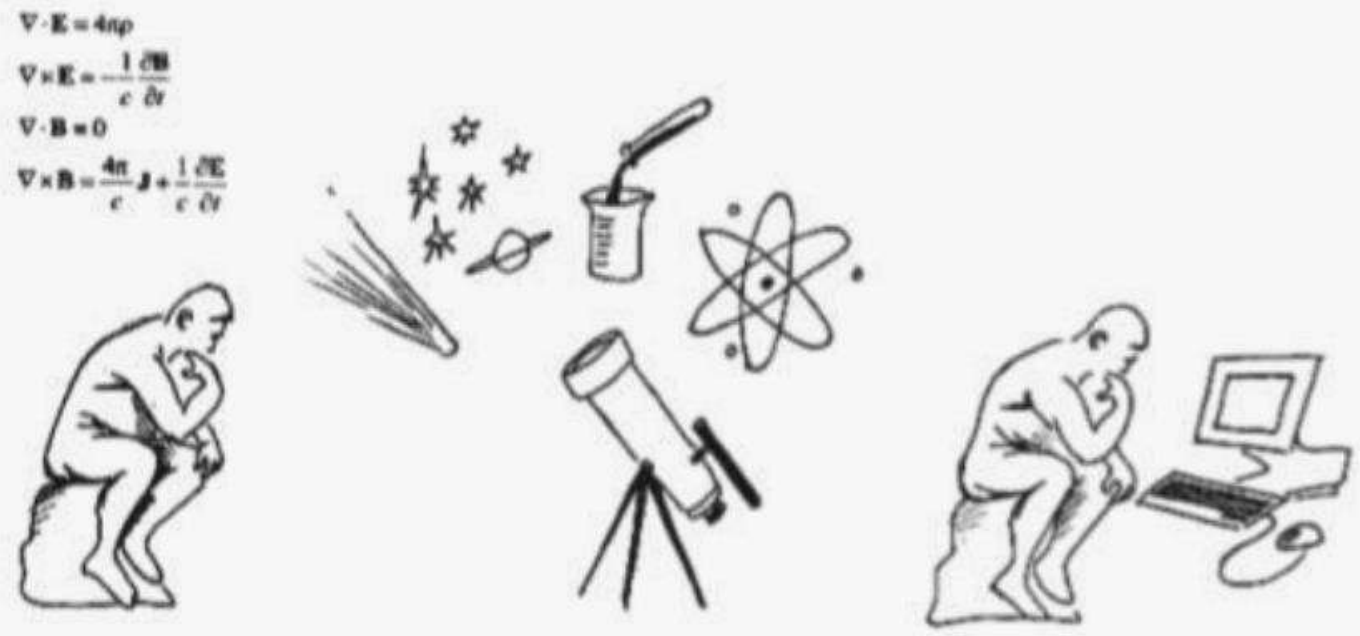
فصل چهاردهم: آینده مدل‌سازی کامپیوتری

به این دلیل که فهم سیستم‌های پیچیده، همان‌طور که نامشان می‌رساند، سخت است، علومی که بیشتر معطوف به ریاضی هستند، از قبیل فیزیک و شیمی و زیست‌شناسی ریاضیاتی[۵۹۷]، به طور سنتی بر مطالعه سیستم‌های ساده و مطلوب متمرکز بوده‌اند که از طریق ریاضیات بیشتر قابل پیگیری هستند. اما در همین اواخر، وجود کامپیوترهای سریع و ارزان این امکان را فراهم آورده است که مدل سیستم‌هایی ساخته شود و مورد آزمایش قرار گیرد که پیچیده‌تر از آن هستند که فقط با ریاضیات فهمیده شوند.

پیشگامان علم کامپیوتر - آلن تورینگ، جان فون نویمن، نوربرت وینر و دیگران - از این تمایل انگیزه می‌گرفتند که از کامپیوتر برای شبیه‌سازی سیستم‌هایی استفاده کنند که رشد می‌کنند و می‌اندیشند و یاد می‌گیرند و تکامل پیدا می‌کنند. به این سبک و سیاق شیوه جدیدی برای کار علمی پدید آمد. تقسیم سنتی علم به نظری و تجربی با یک مقوله جدید تکمیل شده است: شبیه‌سازی کامپیوتری (شکل ۱-۱۴). در این فصل توضیح می‌دهم که از مدل‌های کامپیوتری سیستم‌های پیچیده چه می‌توانیم یاد بگیریم و استفاده از این مدل‌ها در کار علمی چه دشواری‌هایی به همراه می‌آورد.

مدل چیست؟

در زمینه علم، مدل نمایش ساده نوعی پدیده "واقعی" است. فرض بر این است که دانشمندان درباره طبیعت مطالعه می‌کنند، اما درواقع بخش عمده‌ای از کاری که می‌کنند ایجاد مدل‌هایی از طبیعت و مطالعه بر روی آن است.



شکل ۱۴-۱. تقسیم سنتی علم به نظری و تجربی با یک مقوله جدید تکمیل شده است: شبیه‌سازی کامپیوتری.

به قانون جاذبه نیوتون بیندیشید: نیروی جاذبه بین دو شیء متناسب است با حاصل‌ضرب جرم آنها تقسیم بر مربع فاصله بین آنها. این گزاره‌ای ریاضی درباره تأثیرات یک پدیده مشخص است - یک مدل ریاضی. نوع دیگری از مدل توضیح می‌دهد که پدیده برحسب مفاهیم ساده‌تر

در عمل چگونه کار می‌کند - چیزی که آن را ساز و کار[۵۹۸] می‌نامیم. در زمان خود نیوتون، قانون جاذبه مورد حمله قرار گرفت چون او ساز و کاری را برای آن به دست نداده بود. به طور عملی او نشان نداد که چگونه می‌توان نیروی جاذبه را برحسب "اندازه و شکل و حرکت" اجزای شیئی فیزیکی توضیح داد عناصری ابتدایی، که طبق نظر دکارت، مؤلفه‌های لازم و کافی تمامی مدل‌های فیزیک هستند.(۱) خود نیوتون در مورد ساز و کارهای ممکن جاذبه حدس‌هایی می‌زد؛ برای مثال، او "زمین را به عنوان یک اسفنج تصویر می‌کرد که جریان ثابتی از ماده اثیری[۵۹۹] خالص را که از آسمان‌ها سقوط می‌کند در خود جذب می‌کند و این جریان به دلیل تأثیرش بر اجسام بالای زمین موجب می‌شود آنها پایین بیایند."(۲) این‌گونه مفهوم‌سازی را می‌توان مدل ماشینی[۶۰۰] نامید. دویست سال پس از آن، اینشتین مدل ماشینی دیگری را برای جاذبه مطرح کرد، نسبیت عام، که در آن جاذبه به این صورت مفهوم‌سازی شده است که در نتیجه تأثیرات اجسام مادی بر شکل چهار بعدی فضایی-زمانی به وجود می‌آید. در حال حاضر، برخی از فیزیکدانان طرفدار نظریه ریسمان[۶۰۱]" هستند، که بر مبنای آن رشته‌های بسیار کوچک و در حال نوسان موجب جاذبه می‌شوند.

مدل راهی برای ذهن ماست که از طریق آن پدیده‌های مورد مشاهده را برحسب مفاهیمی که برای ما آشنا هستند بفهمیم، مفاهیمی که با آن از امور سردرمی‌آوریم (و در مورد نظریه ریسمان، تنها معدودی آدم هوشمند می‌توانند از آن سردربیاورند). مدل درعین‌حال وسیله‌ای برای پیش‌بینی آینده است: برای مثال، قانون جاذبه نیوتون همچنان در پیش‌بینی مدار سیارات کاربرد دارد، و نسبیت عام اینشتین برای پیش‌بینی موفقیت‌آمیز انحراف از آن مدارهای پیش‌بینی شده به کار می‌رود.

مدل‌های ایده

در زمینه کاربردهایی مانند پیش‌بینی هوا، یا طراحی خودرو و هواپیما، یا عملیات نظامی، از کامپیوتر استفاده می‌شود، که مدل‌های تفصیلی و بغرنجی را به اجرا درمی‌آورد که در مورد پدیده‌های مشخصی که مدل‌سازی شده‌اند پیش‌بینی‌های مشروحی می‌کند.

در مقابل، محور اصلی پژوهش سیستم‌های پیچیده اکتشاف مدل‌های ایده‌ای بوده است: مدل‌های نسبتا ساده‌ای که منظور آنها کسب شناخت درباره یک مفهوم کلی است بدون این‌که لزوما پیش‌بینی‌های مشروحی در مورد سیستم مشخصی به عمل آید. در زیر چند نمونه از مدل‌های ایده‌ای را که تا اینجای کتاب مطرح شده است می‌آورم:

جن ماکسول: یک مدل ایده‌ای برای اکتشاف مفهوم آنتروپی.

ماشین تورینگ: یک مدل ایده‌ای برای تعریف صوری "روال معین" و برای اکتشاف در مفهوم محاسبه.

مدل منطق‌گرا و نگاشت منطق‌گرا: مدل‌های حداقلی برای پیش‌بینی رشد جمعیت؛ که بعدها برای اکتشاف کلی در مفاهیم پویایی به مدل‌های ایده‌ای تبدیل شدند.
خودکار تولیدمثل‌کننده فون نویمن: یک مدل ایده‌ای برای اکتشاف در "منطق" تولیدمثل.
آلگوریتم ژنتیک: یک مدل ایده‌ای برای اکتشاف مفهوم انطباق.
پاره‌ای اوقات به عنوان مدل حداقلی تکامل داروینی به کار می‌رود.
خودکار سلولی: یک مدل ایده‌ای برای سیستم‌های پیچیده به‌طورکلی.
منحنی کک: یک مدل ایده‌ای برای اکتشاف در ساختارهای شبه فراکتال از قبیل خط ساحل و دانه برف.
مقلد: یک مدل ایده‌ای برای قیاس کردن انسان.
مدل‌های ایده‌ای برای منظورهای متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند:
اکتشاف ساز و کارهای عمومی در برخی پدیده‌های بغرنج. برای مثال: منطق تولیدمثل فون نویمن برای نشان دادن این‌که یک ساز و کار پیشنهادی برای یک پدیده باورپذیر است یا باورپذیر نیست (مثلا، پویایی رشد جمعیت)؛
اکتشاف تأثیرات دگرگونی‌ها بر یک مدل ساده (مثلا بررسی این‌که وقتی آهنگ جهش در آلگوریتم‌های ژنتیک یا مقدار عامل کنترل R در نگاشت منطق‌گرا را تغییر می‌دهید چه پیش می‌آید)؛ و به‌طورکلی‌تر، اقدام کردن به صورت چیزی که فیلسوف دانیل دنت "پمپ‌های شهود"[۶۰۲] می‌نامد (۳) ـ تجربه‌های فکری یا شبیه‌سازی‌های کامپیوتری قدرت شهود فرد درباره پدیده‌های پیچیده را به کار می‌اندازد.
در عین حال، مدل‌های ایده‌ای مربوط به سیستم‌های پیچیده، الهام‌بخش انواع جدیدی از فناوری‌ها و روش‌های محاسباتی بوده‌اند. برای مثال: ماشین‌های تورینگ الهام‌بخش کامپیوترهای برنامه‌پذیر بودند؛ خودکار تولیدمثل‌کننده فون نویمن الهام‌بخش خودکارهای سلولی بود؛ مدل‌های حداقلی تکامل داروینی، سیستم ایمنی، و جوامع حشرات، به ترتیب الهام‌بخش آلگوریتم‌های ژنتیک، سیستم‌های امنیتی کامپیوتر، و روش‌های "هوش گله‌ای"[۶۰۳] بوده‌اند.

برای نشان دادن دستاوردها و چشم‌اندازهای مدل‌های ایده‌ای در علم، در اینجا به زیر و رو کردن چند نمونه از مدل‌های ایده‌ای در علوم اجتماعی می‌پردازم، از موردی شروع می‌کنم که مشهورتر از همه است: دوراهی زندانی.[۶۰۴]

مدل‌سازی تکامل همکاری

بسیاری از زیست‌شناسان و دانشمندان علوم اجتماعی از مدل‌های ایده‌ای استفاده کرده‌اند، به این منظور که اکتشاف کنند چه شرایطی می‌تواند به تکامل همکاری در میان جمعیتی از افراد منفعت‌جو"[۶۰۵] منجر شود.

در واقع، اندام‌واره‌های زنده خودخواه[۶۰۶] هستند - موفقیت آنها با توجه به ملاک‌های تکاملی مستلزم عمر کافی، سلامت کافی، و جذابیت کافی برای جفت بالقوه است به این منظور که تولیدمثل کنند. اکثر موجودات زنده کاملا آماده‌اند که در جستجوی این اهداف بجنگند، حقه بزنند، بکشند، یا به صورت دیگری به سایر موجودات لطمه بزنند. عقل سلیم پیش‌بینی می‌کند که تکامل، خودخواهی و حفظ خود را انتخاب می‌کند - به عنوان خصیصه‌های مطلوبی که نسل به نسل منتقل می‌شوند و در میان هر جمعیتی پراکنده می‌شوند.

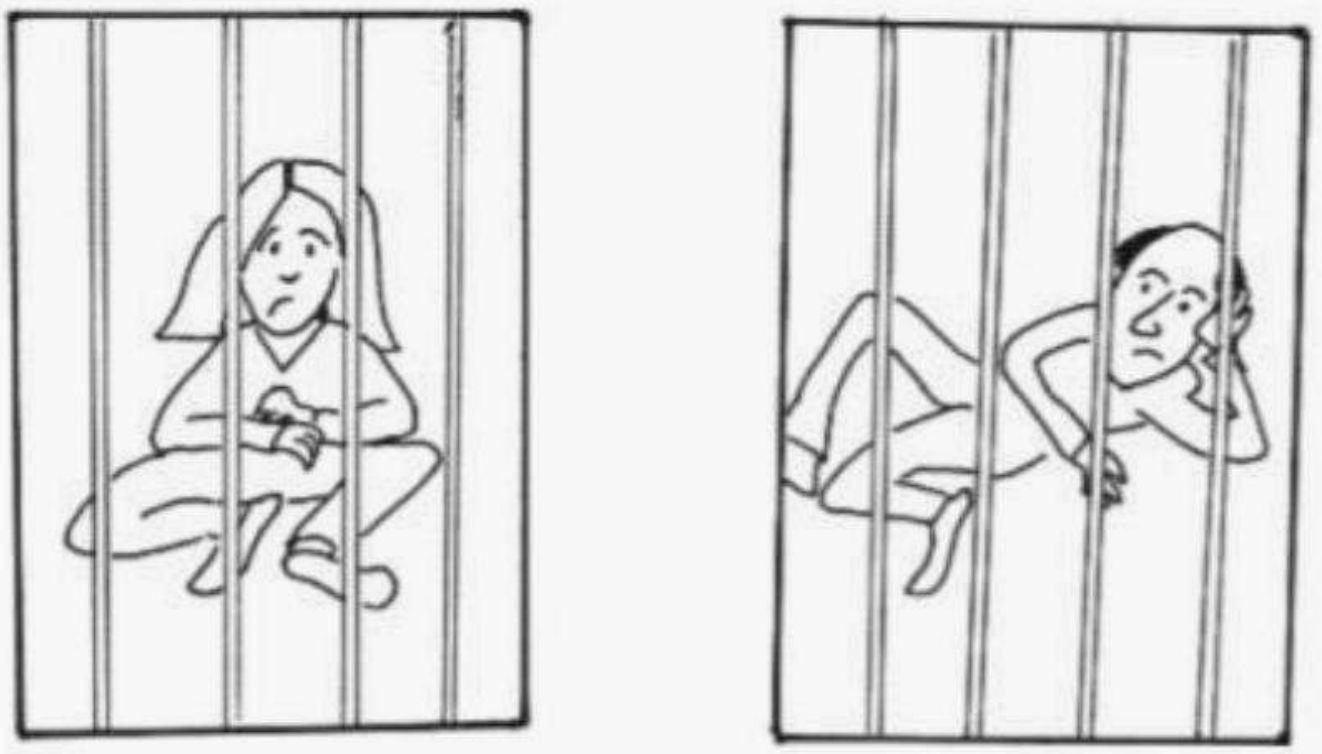
به رغم این پیش‌بینی، در تمامی سطوح حیطه‌های زیستی، نمونه‌های قابل ملاحظه‌ای برخلاف خودخواهی وجود دارد. از پایین شروع می‌کنیم: در تاریخ تکامل، پاره‌ای اوقات گروه‌هایی از اندام‌واره‌های تک‌سلولی به این منظور همکاری کرده‌اند که اندام‌واره‌های چند سلولی پیچیده‌تری را شکل دهند. بعدها، جوامعی مانند جوامع مورچه‌ها تکامل یافتند که در آنها اکثریت عظیمی از مورچه‌ها نه تنها برای منفعت کل جامعه کار می‌کنند بلکه درعین‌حال توانایی تولیدمثل را به خود حرام می‌کنند و اجازه می‌دهند که ملکه تنها سرچشمه اولاد باشد. خیلی بعد از آن، در جمعیت نخستی‌ها[۶۰۷] جوامع پیچیده‌تری پدیدار شدند که همبستگی جمعی علیه بیگانه‌ها، تجارت پیچیده، و سرانجام ملت‌ها، حکومت‌ها، قوانین، و معاهدات بین‌المللی را با خود به همراه آوردند.

زیست‌شناسان و جامعه‌شناسان، اقتصاددانان و سیاست‌پژوهان، به‌یکسان با این پرسش روبرو شده‌اند که چطور امکان دارد این گونه همکاری از میان افرادی اساسا خودخواه پدیدار شود. این پرسش نه تنها مربوط به علم، بلکه درعین‌حال مربوط به سیاست است. یعنی: آیا می‌توان شرایطی را پدید آورد که امکان پیدایش و تداوم همکاری در میان ملت‌های متفاوت را فراهم کند، تا از پس دلمشغولی‌های بین‌المللی از قبیل گسترش سلاح‌های هسته‌ای و همه‌گیری ایدز و گرمایش جهانی برآیند؟

دوراهی زندانی

در دهه ۱۹۵۰، در اوج جنگ سرد، خیلی‌ها به این می‌اندیشیدند که چگونه در میان ملت‌های متخاصم همکاری ایجاد کنند تا مانع از جنگ هسته‌ای شوند. در حدود سال ۱۹۵۰، دو نظریه‌پرداز بازی ریاضی[۶۰۸]، مریل فلاد[۶۰۹] و ملوین درشر[۶۱۰]، دوراهی زندانی را به عنوان ابزاری برای بررسی این گونه دوراهی‌های همکاری ابداع کردند. (۲)

دوراهی زندانی اغلب این گونه طرح‌ریزی می‌شود: دو فرد (آنها را آلیس و باب می‌نامیم) به دلیل ارتکاب جنایت با هم دستگیر و در سلول‌های جداگانه‌ای نگهداری می‌شوند تا مأموران پلیس از آنها بازجویی کنند. (شکل ۲-۱۴). در ازای شهادت دادن علیه دیگری، هم به باب و هم به آلیس معامله یکسانی پیشنهاد می‌شود.



شکل ۲-۱۴. آلیس و باب با دو راهی زندانی روبرویند.

اگر آلیس موافقت کند که علیه باب شهادت بدهد، او آزاد می‌شود و باب به حبس ابد محکوم می‌گردد. اما اگر آلیس از شهادت دادن خودداری کند اما باب موافقت کند شهادت بدهد، باب آزاد می‌شود و آلیس به حبس ابد محکوم می‌گردد. اگر هر دو آنها شهادت بدهند، هر یک به زندان می‌افتند، اما محکومیت‌شان به ده سال حبس کاهش پیدا می‌کند. هم آلیس و هم باب می‌دانند که اگر هیچ کدام شهادت ندهند امکان دارد با اتهام ضعیف‌تری روبرو شوند و به مدت پنج سال به زندان بروند. پلیس از هر یک از آنها می‌خواهد که همان‌جا تصمیم بگیرند، و البته اجازه هیچ تماسی را به آنها نمی‌دهند.

اگر جای آلیس بودید، چه می‌کردید؟

می‌توانستید به این سبک استدلال کنید: یا باب علیه شما شهادت می‌دهد یا ساکت می‌ماند، البته نمی‌دانید کدام کار را می‌کند. فرض کنید که علیه شما شهادت بدهد. در این حال با شهادت دادن علیه او بهترین وضع را دارید (ده سال در مقابل حبس ابد). حال فرض کنید باب تصمیم بگیرد ساکت بماند. بار دیگر بهترین گزینه این است که شهادت بدهید (آزاد شدن در مقابل پنج سال زندان). به این ترتیب، صرف‌نظر از کاری که باب بکند، بهترین گزینه برای خلاصی این است که شهادت بدهید.

مسئله این است که باب هم همین شیوه استدلال را دنبال می‌کند. پس نتیجه این است که هر دو موافقت می‌کنند علیه دیگری شهادت دهند، که پیامدش برای هر دو بدتر از حالتی است که هر دو ساکت می‌ماندند.

اجازه بدهید این داستان را در زمینه دیگری تعریف کنم. تصور کنید رئیس‌جمهور امریکا هستید. دارید پیشنهادی را بررسی می‌کنید مبنی بر این‌که سلاح اتمی قدرتمندی بسازید، بسیار قوی‌تر از تمامی سلاح‌هایی که در زرادخانه دارید. گمان می‌برید اما اطمینان ندارید، که

حکومت روسیه همین کار را مد نظر دارد.

به آینده نگاه کنید و فرض کنید که روس‌ها واقعا چنین سلاحی را ساخته باشند. اگر شما هم این سلاح را ساخته باشید ایالات متحده و روسیه قدرت نظامی یکسانی دارند، گرچه هر دو ملت بهای سنگینی پرداخته‌اند و دنیا هم جای خطرناک‌تری شده است. اگر تصمیم گرفته بودید سلاح را نسازید، روسیه نسبت به ایالات متحده برتری نظامی پیدا می کرد.

حال فرض کنید که روسیه سلاح مورد نظر را نسازد. اگر تصمیم گرفته بودید آن را بسازید، ایالات متحده نسبت به روسیه برتری نظامی داشت، گرچه ملت باید بهایی برای آن می‌پرداخت، و اگر تصمیم گرفته بودید سلاح را نسازید، زرادخانه نظامی ایالات متحده و روسیه یکسان باقی می‌ماندند.

درست همانند مورد باب و آلیس، صرف‌نظر از این که روس‌ها چه بکنند، کار معقول این است که پیشنهاد را تأیید کنید، چون در هر صورت ساخت اسلحه گزینه بهتری برای ایالات متحده از کار درمی‌آید. البته روس‌ها هم به همین شکل فکر می کنند، در نتیجه هر دو کشور سلاح جدید را می‌سازند، که وضعیتی بدتر از حالتی است که هیچ کدام نساخته بودند.

این دوراهی زندانی است - به زبان دانشمند علوم سیاسی رابرت آکسلرود، "جستجوی نفع شخصی توسط هر فرد منجر به پیامد نامساعدی برای همه می‌شود."(۵) این پارادوکس در مورد بسیار آشنای یک گروه از افراد نیز مصداق دارد که با دنبال کردن خودخواهانه نفع شخصی، مشترکا به تمامی اعضای گروه آسیب می‌رسانند (گرمایش زمین مثال نابی است).

اقتصاددان گارت هاردین عنوان مشهوری بر روی چنین سناریویی گذاشته است: "تراژدی عوام."(۶)

دوراهی زندانی و گونه‌های آن مدت‌هاست که به عنوان مدل‌های ایده‌ای مورد مطالعه بوده‌اند که ذات مسئله همکاری را مجسم می کنند، و نتایج این مطالعات بر شیوه تفکر استادان، اهل کسب و کار، و حکومت‌ها درباره سیاست‌های واقعی، از کنترل سلاح گرفته تا واکنش به تروریسم و مدیریت و مقررات شرکت‌ها تأثیر داشته است.

این دورراهی معمولا برحسب "بازی" دونفره صورت‌بندی می‌شود که با چیزی تعریف می‌شود که نظریه‌پردازان بازی ریاضی آن را ماتریس بازده می‌نامند ـ آرایه‌ای از تمامی پیامدهای ممکن برای دو بازیکن. یک ماتریس بازده [۶۱۱]امکان‌پذیر برای دوراهی زندانی در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است.

در اینجا، هدف کسب حداکثر ممکن امتیازات است (معکوس تعداد سال‌های زندانی شدن). نوبت[۶۱۲] در این بازی به‌این معناست که دو بازیگر به طور مستقل تصمیم به "همکاری یا عدم همکاری"[۶۱۳] گرفته‌اند. یعنی در هر نوبت، بازیگران A و B به طور مستقل، و بدون تماس با هم،

تصمیم می‌گیرند که آیا با بازیگر دیگر همکاری کنند یا همکاری نکنند (برای مثال از شهادت دادن امتناع کنند؛ تصمیم بگیرند سلاح را نسازند). یا با بازیگر دیگر همکاری نکنند (برای مثال شهادت دهند، سلاح را بسازند). اگر هر دو بازیگر همکاری کنند، هر کدام ۳ امتیاز دریافت می‌کنند. اگر بازیگر A همکاری کند و B همکاری نکند، بازیگر A صفر امتیاز می‌گیرد و بازیگر B پنج امتیاز، و اگر وضعیت معکوس شود عکس آن اتفاق می‌افتد. اگر هر دو بازیگر همکاری نکنند، هرکدام ۱ امتیاز می‌گیرند. همان‌طور که در بالا توضیح دادم، اگر بازی فقط یک نوبت دوام بیاورد، انتخاب عقلایی برای هر دو عدم همکاری است.

اما اگر بازی تکرار شود، یعنی اگر دو بازیگر چند نوبت پشت سرهم بازی کنند، و هر دو بازیگر به طور مداوم همکاری نکنند، امتیاز کلی نسبت به زمانی که هر دو همکاری کنند بسیار کمتر خواهد بود. چگونه می‌توان همکاری متقابل را ترغیب کرد؟

	A همکاری می‌کند B همکاری می‌کند	A همکاری می‌کند B همکاری نمی‌کند	A همکاری نمی‌کند B همکاری می‌کند	A همکاری نمی‌کند B همکاری نمی‌کند
بازده بازیگر A	۳	۰	۵	۱
بازده بازیگر B	۳	۵	۰	۱

شکل ۳-۱۴. یک ماتریس بازده برای بازی دوراهی زندانی.

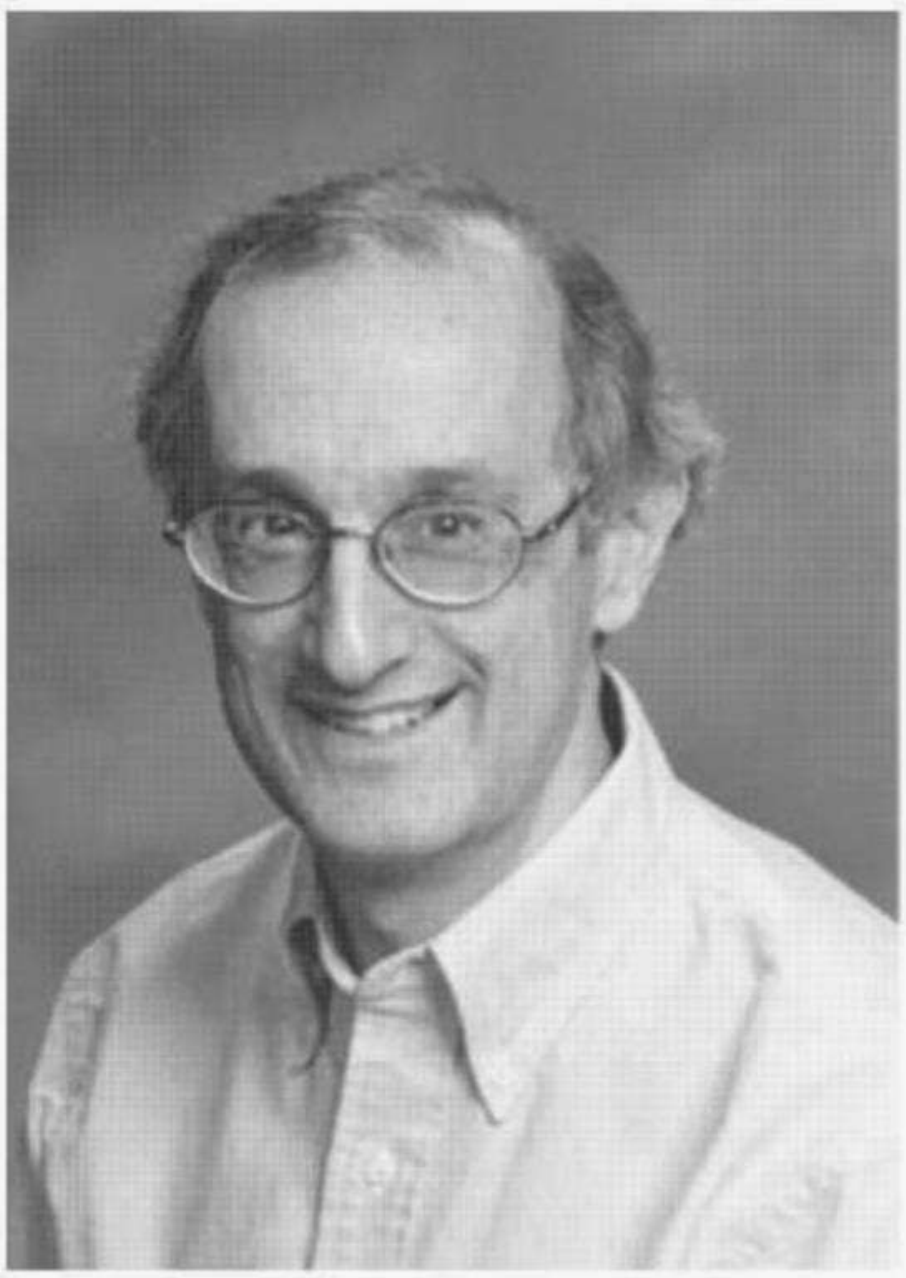
رابرت آکسلرود، استاد دانشگاه میشیگان، یک پژوهشگر سیاست است که به‌طور گسترده‌ای درباره دوراهی زندانی مطالعه کرده و نوشته است.

پژوهش او در مورد دوراهی زندانی بر رشته‌های متعددی بسیار تأثیرگذار بوده و جوایز پژوهشی معتبری را نصیب او کرده است، از جمله جایزه "نوابغ" بنیاد مک‌آرتور.

آکسلرود، به دلیل نگرانی‌اش درباره مسابقه تسلیحاتی رو به اوج، مطالعه دوراهی را در جریان جنگ سرد آغاز کرد. پرسش او چنین بود: "در دنیایی از آدم‌های خودخواه که یک اقتدار مرکزی وجود ندارد، همکاری تحت چه شرایطی شکل ، می گیرد؟ آکسلرود اشاره کرد که مشهورترین پاسخ تاریخی به این پرسش را فیلسوف قرن هفدهم توماس هابز[۶۱۴] داده است، که نتیجه گرفته بود همکاری را تنها می‌توان در سایه یک اقتدار مرکزی رشد داد. سیصد سال بعد (دوره‌ای که با جنگ‌های بیشمار همراه بود) آلبرت اینشتین پیشنهاد مشابهی را مطرح کرد و آن این‌که در عصر هسته‌ای، تنها راه تضمین صلح جهانی ایجاد یک حکومت کارآمد جهانی است. (۹) جامعه ملل، و بعدها سازمان ملل متحد، صراحتا با این هدف تأسیس شدند، اما هیچ کدام در برقراری حکومت جهانی یا برقراری صلح در میان و در درون ملت‌ها چندان موفق نبوده‌اند.

به این دلیل که حکومت مرکزی کارآمد خارج از دسترس به نظر می‌رسید، آکسلرود به این فکر افتاد که بدون آن همکاری چگونه ممکن می‌شود. او به این باور رسید که اکتشاف استراتژی‌هایی برای انجام مکرر بازی ساده "دوراهی زندانی" شناختی را درباره این پرسش فراهم خواهد کرد.

برای آکسلرود "وقوع همکاری" به این معنا بود که استراتژی همکاری باید در طول زمان، در مقایسه با استراتژی‌های عدم همکاری[۶۱۵]، امتیاز کلی بیشتری فراهم کند، حتی در مواجهه با هر نوع تغییراتی که حریفان، در زمانی که بازی چندبار انجام می‌شود، در استراتژی خود می‌دهند. افزون بر این، اگر استراتژی بازیگران تحت انتخاب داروینی تکامل پیدا می‌کند، سهم استراتژی‌های همکاری در میان جمعیت باید در طول زمان افزایش پیدا کند.



رابرت آکسلرود

شبیه‌سازی کامپیوتری دوراهی زندانی

علاقه آکسلرود به مشخص کردن این که چه چیز یک استراتژی خوب را می‌سازد او را به سازمان دادن مسابقه‌ای در مورد دوراهی زندانی هدایت کرد.

او از پژوهشگرانی در رشته‌های مختلف خواست که برنامه‌های کامپیوتریی را تحویل دهند که استراتژی‌های خاصی را برای دوراهی زندانی به اجرا درمی‌آورند. سپس این برنامه‌ها را برای انجام بازی‌های مکرر علیه یکدیگر به کار گرفت.

از مبحث مربوط به ربوتی به نام رابی در فصل نهم به یاد بیاورید که یک استراتژی مجموعه قواعدی است که در هر وضعیت، کنش لازم برای آن وضعیت را مشخص می‌کند. در مورد دوراهی زندانی، استراتژی شامل یک قاعده برای تصمیم‌گیری دراین‌باره است که بر مبنای رفتار رقیب در دور پیشین، در دور بعد همکاری بکند یا همکاری نکند.

در اولین مسابقه چهارده برنامه تسلیم شد؛ در دومین مسابقه تعداد برنامه‌ها به شصت و سه افزایش یافت. هر برنامه دویست بار با هر برنامه دیگری بازی کرد، و بر طبق ماتریس بازده در شکل ۳-۱۴ امتیازاتی کسب کرد. برنامه‌ها نوعی حافظه داشتند - هر برنامه می‌توانست نتایج حداقل برخی از نوبت‌های پیشین تقابل با رقبا را ذخیره کند. برخی از استراتژی‌های تحویل شده نسبتا بغرنج بودند و برای تشخیص "وضعیت روانی" سایر بازیگران از روش‌های آماری

بهره می‌گرفتند. اما در هر دو مسابقه، برنده (آن استراتژی که بالاترین میانگین امتیاز را در بازی با سایر بازیگران کسب کرد) ساده‌ترین استراتژی بود: مقابله به مثل. این استراتژی، که ریاضیدان آناتول راپوپورت[۶۱۶] تحویل داده بود، در اولین دور همکاری می‌کند و بعد در دورهای بعدی، آن کاری را می‌کند که حریف در دور پیشین کرده بود. یعنی مقابله به مثل را در پیش می‌گیرد و پاسخ متقابل می‌دهد. اما اگر بازیگر دیگر همکاری نکند، مقابله به مثل عدم همکاری را با عدم همکاری خودش تلافی می‌کند، و این تنبیه را تا زمانی ادامه می‌دهد که بازیگر مقابل بار دیگر سراغ همکاری برود.

حیرت‌آور است که چنین استراتژی ساده‌ای توانست همه استراتژی‌های دیگر را شکست دهد، به‌خصوص با توجه به این واقعیت که شرکت‌کنندگان در دور دوم مسابقه از مقابله به مثل مطلع بودند و می‌توانستند برای مقابله با آن برنامه‌ریزی کنند. اما در میان چند ده خبره‌ای که شرکت کردند، هیچ‌کس نتوانست استراتژی بهتری طراحی کند.

آکسلرود نتایج این دوره‌های مسابقه را به‌طورکلی جمع‌بندی کرد. او پی برد که تمامی استراتژی‌هایی که امتیازهای بالایی گرفته‌اند پایبند اصول هستند - یعنی آنها هیچ‌گاه اولین کسی نیستند که همکاری نمی‌کند. در میان تمامی برنامه‌های پایبند اصول، آنهایی که کمترین امتیاز را گرفته بودند "کمتر از همه با گذشت" بودند: ابتدا همکاری می‌کنند، اما اگر حریف حتی یک بار همکاری نکند، از آن به بعد در هر دور با حریف همکاری نمی‌کنند.

این متفاوت از مقابله به مثل است، که عدم همکاری حریف را با عدم همکاری خودش تنبیه می‌کند، اما اگر حریف بار دیگر همکاری کند با همکاری خودش او را می‌بخشد.

آکسلرود این را هم فهمید که گرچه موفق‌ترین استراتژی‌ها پایبند اصول و باگذشت هستند، درعین‌حال هم تلافی‌جو هستند ـ بلافاصله پس از عدم همکاری آن را تلافی می‌کردند. مقابله به مثل نه تنها پایبند اصول، با گذشت، و تلافی‌جو بود، بلکه ویژگی دیگری را هم داشت: وضوح و قابلیت پیش‌بینی.

حریف به آسانی می‌فهمد که استراتژی مقابله به مثل چیست و به این ترتیب پیش‌بینی می‌کند که به هر یک از کنش‌های حریفش چگونه واکنش نشان دهد. این گونه پیش‌بینی‌پذیری برای پروراندن همکاری با اهمیت است.

جالب این که آکسلرود دوره‌های مسابقه را با مجموعه‌ای از آزمایش‌ها دنبال کرد که در آنها برای تکامل دادن استراتژی‌هایی برای دوراهی زندانی از آلگوریتم ژنتیک استفاده کرد. صلاحیت یک استراتژی تکامل‌یابنده، امتیاز آن در پایان تعداد زیادی بازی تکراری با سایر استراتژی‌های تکامل یابنده در میان جمعیت است. آلگوریتم ژنتیک استراتژی‌هایی را تکامل داد که رفتاری یکسان یا مشابه با مقابله به مثل داشتند.

تعمیم دوراهی زندانی

مطالعات آکسلرود درباره دوراهی زندانی، در اوایل دهه ۱۹۸۰ سر و صدای زیادی به پا کرد، به‌خصوص در علوم اجتماعی. بر روی همه نوع گونه‌های این بازی مطالعه شده است - ماتریس‌های متفاوت بازده، تعداد متفاوت بازیگران، بازی‌های چند بازیگره که در آنها بازیگران می‌توانند تصمیم بگیرند با چه‌کسی بازی کنند، و غیره. دو تا از جالب‌ترین گونه‌های این بازی، به ترتیب با افزودن هنجارهای اجتماعی و ساختار فضایی، تجربه شده‌اند.

افزودن هنجارهای اجتماعی

آکسلرود با افزودن هنجارها به دوراهی زندانی دست به تجربه‌هایی زد که در آن هنجار متناظر است با نکوهش اجتماعی (به شکل امتیاز منفی) کسانی است که همکاری نمی‌کنند و دیگران در زمان این کنش مچ‌شان را می‌گیرند. در بازی چند بازیگره آکسلرود، هر بار که بازیگری همکاری نمی‌کند، این احتمال وجود دارد که بازیگران دیگری شاهد این عدم همکاری باشند. افزون بر یک استراتژی برای بازی کردن نسخه‌ای از دوراهی زندانی، هر بازیگر نیز یک استراتژی برای تصمیم‌گیری دراین‌باره دارد که اگر شاهد عدم همکاری باشد، آیا خاطی را تنبیه کند (امتیازاتی از او کسر کند یا نه.

به‌خصوص، استراتژی‌های هر بازیگر شامل دو عدد است: احتمال عدم همکاری (گستاخی) و احتمال تنبیه به خاطر عدم همکاری اگر بازیگر شاهد آن باشد (کینه‌توزی). در جمعیت اولیه بازیگران، این مقادیر احتمالات به صورت تصادفی به هر فرد منتسب می‌شود.

در هر نسل، جمعیت یک دور بازی انجام می‌دهد: هر بازیگر در جمعیت علیه تمامی بازیگران دیگر یک بازی انجام می‌دهد، و هر بار که یک بازیگر همکاری نمی‌کند، احتمال این وجود دارد که سایر اعضای جمعیت شاهد آن باشند. هر شاهد بر مبنای احتمالاتی که مقدار کینه‌توزی شاهد مشخص می‌کند فردی را که همکاری نمی‌کند تنبیه می‌کند.

در پایان هر دور بازی، یک فرایند تکاملی رخ می‌دهد: جامعه تازه‌ای از بازیگران به وجود می‌آیند که ناشی از آن استراتژی‌های والدین هستند که بر مبنای صلاحیت‌شان (امتیازات به دست آمده) انتخاب شده‌اند. والدین فرزندانی به وجود می‌آورند که نسخه‌های جهش یافته خودشان هستند: هر کودک می‌تواند مقدار گستاخی و کینه‌توزی نسبتا متفاوتی از والدین داشته باشد. اگر جمعیت با وضعیتی آغاز کند که کینه‌توزی دیگر بازیگران مساوی صفر است (یعنی هیچ هنجار اجتماعی وجود ندارد)، اهل عدم همکاری بر جمعیت مسلط می‌شوند. آکسلرود در ابتدا انتظار داشت که هنجارها تکامل همکاری در میان جمعیت را تسهیل کنند - یعنی کینه‌توزی تکامل پیدا کند تا با گستاخی مقابله کند.

اما مشخص شد که هنجارها به‌تنهایی برای این‌که همکاری به شکل قابل اطمینانی پدیدار شود کافی نیست. آکسلرود کلان‌هنجارهایی[۶۱۷] را افزود، که بر مبنای آن افرادی اهل تنبیه وجود دارند که کسانی را که اهل عدم تنبیه هستند، تنبیه می‌کنند. امیدوارم منظورم را فهمیده باشید.

مشابه مردمی که در فروشگاه نگاه عتاب‌آمیزی بر من می‌اندازند چون فرزندانم را برای دنبال کردن هم و برخورد به خریداران بی‌گناه تنبیه نمی‌کنم. در مورد من که کلان‌هنجارها مؤثر هستند. آکسلرود هم پی برد که ترفند کلان‌هنجارها مؤثر است - اگر اهل تنبیه کردن اهل عدم تنبیه وجود داشته باشند، اهل عدم تنبیه در این جهت تکامل پیدا می‌کنند که با احتمال بالاتری تنبیه کنند، و تنبیه‌شدگانی که اهل عدم همکاری‌اند در این جهت تکامل پیدا می‌کنند که با احتمال بیشتری همکاری کنند. به بیان آکسلرود: " کلان‌هنجارها می‌توانند همکاری در میان جمعیت را تقویت و حفظ کنند."(۱۱)

افزودن ساختارهای فضایی

تعمیم دومی را که به‌خصوص جالب می‌دانم، پژوهش زیست- ریاضیدان[۶۱۸] مارتین نواک[۶۱۹] و همکارانش درباره افزودن ساختار فضایی به دوراهی زندانی است. در شبیه‌سازی اصلی آکسلرود، هیچ تصوری از فضا وجود نداشت - این‌که هر بازیگری با هر بازیگر دیگری روبرو شود به یک اندازه محتمل بود، هیچ حس فاصله‌ای بین بازیگران وجود نداشت.

نواک گمان می‌برد که قرار دادن بازیگران بر روی شبکه‌ای فضایی، که در آن مفهوم همسایه به‌خوبی تعریف شده باشد، تأثیر قدرتمندی بر تکامل همکاری می‌گذارد. نواک به همراه استاد دوره فوق دکترایش رابرت می[۶۲۰] (که در فصل دوم در زمینه نگاشت منطق‌گرا به او اشاره داشتم)، چندین شبیه‌سازی را اجرا کرد که در آنها بازیگران در آرایه‌ای دو بعدی قرار داده می‌شدند، و هر بازیگر تنها می‌توانست با همسایه‌اش بازی کند.(۱۲) این در شکل ۴-۱۴ دیده می‌شود، که شبکه‌ای پنج در پنج را نشان می‌دهد که در هر خانه یک بازیگر وجود دارد. (آرایه نواک و می به طور چشمگیری بزرگ‌تر بودند). هر بازیگر ساده‌ترین استراتژی را دارد - هیچ خاطره‌ای از دوره‌های پیشین ندارد، یا همیشه همکاری می‌کند یا همیشه عدم همکاری را درپیش می‌گیرد.

مدل در گام‌های زمانی ناپیوسته اجرا می‌شود. در هر گام زمانی، هر بازیگر یک بازی دوراهی زندانی را علیه هر یک از هشت همسایه نزدیکش بازی می‌کند (مانند خودکار سلولی، لبه‌های شبکه روی هم قرار می‌گیرد) و هشت امتیاز به دست آمده جمع می‌شوند. به دنبال این، گام انتخاب می‌آید که در آن هر بازیگر با بازیگری که بالاترین امتیاز را دارد جایگزین می‌شود (شاید با خودش)؛ هیچ جهشی صورت نمی‌گیرد.

انگیزه این پژوهش زیست‌شناختی بود. همان‌طور که نواک و می اشاره می‌کنند: "معتقدیم که ساختاری فضایی درون جامعه که با لحاظ کردن قطعیت تولید شده باشد، شاید در اغلب موارد برای تکامل همکاری حیاتی باشد، چه در میان مولکول‌ها، چه سلول‌ها، یا جانداران. (۱۳)

P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}
P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}
P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{25}

شکل ۱۴-۴. نمایش یک بازی فضایی دوراهی زندانی. هر بازیگر و نزدیک‌ترین همسایگانش برهم‌کنش می‌کند - برای مثال، بازیگر P تنها علیه بازیگران همسایه‌اش (سایه‌دار) بازی می‌کند و برای انتخاب شدن با آنها به رقابت می‌پردازد.

نواک و می با اجرای این مدل با پیکربندی‌های اولیه و متفاوت همکاری و عدم همکاری و با تغییر مقادیر ماتریس بازده، دست به تجربه زدند. آنها پی بردند که بسته به این تنظیم‌ها، الگوی همکاری و عدم‌همکاری بازیگران می‌تواند یا نوسان کند یا "به طور آشوبناکی تغییر کند، که در هر دو مورد اهل همکاری و اهل عدم همکاری به طور نامحدودی همزیستی می‌کنند.

این نتایج با نتایج حاصل از دوراهی زندانی غیرفضایی[۶۲۱] و چند بازیگره نمی‌خواند که در آن در فقدان کلان‌هنجارها، به صورتی که در بالا مورد بحث قرار گرفت، اهل عدم همکاری جامعه را در کنترل خود می‌گیرند. در تجربه فضایی نواک و می، اهل همکاری می‌توانند بدون آنکه چیز

@degar_goonesh

خاصی، مثل هنجار یا کلان‌هنجار، به بازی افزوده شود، برای همیشه به بازی خود ادامه دهند.
نواک و می معتقدند بود که نتایج پژوهش آنها یکی از ویژگی‌های دنیای واقعی را نشان می‌دهد - این‌که وجود محله‌های فضایی به همکاری میدان می‌دهد. در اظهارنظری درباره این پژوهش، زیست‌شناس کارل سیگموند[۶۲۲] موضوع را به این صورت توضیح می‌دهد: "این که قلمروداری[۶۲۳] همکاری را ترغیب می‌کند... ظاهرا در جوامع دنیای واقعی نیز معتبر باقی می‌ماند."(۱۵)

آینده مدل‌سازی وقتی شبیه‌سازی مدل‌های ایده‌ای، از قبیل دوراهی زندانی، به درستی انجام شود، می‌تواند پشتوانه قدرتمندی برای علوم تجربی و نظریه‌های ریاضی باشد. وقتی آزمایش‌های عملی امکان‌پذیر نیستند و وقتی ریاضیات بیش از حد مشکل می‌شود -که تقریبا در تمامی سیستم‌های مورد علاقه ما مصداق دارد - چنین مدل‌هایی بعضی اوقات تنها وسیله در دسترس برای بررسی سیستم‌های پیچیده هستند. مهم‌ترین خدمت مدل‌های ایده‌ای از قبیل دوراهی زندانی، فراهم کردن برداشتی دست اول از یک پدیده است - مانند تکامل همکاری - که هنوز برای آن واژگان علمی دقیق و مفاهیم روشنی نداریم.

مدل‌های دوراهی زندانی تمام نقش‌هایی را بازی می‌کنند که برای مدل‌های ایده علمی در بالا فهرست کردم (و خدمات مشابهی را نیز می‌توان فهرست کرد که ناشی از تلاش‌های مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده هستند):

نشان دهید که یک ساز و کار پیشنهادی برای یک پدیده باورپذیر است یا باورناپذیر. برای مثال، انواع دوراهی زندانی و مدل‌های مربوط به آنها چیزی را نشان داده‌اند که شاید توماس هابز آن را باور نمی‌کرد:

این‌که واقعا ممکن است همکاری - گرچه به شکلی آرمانی ـ در جامعه‌های بدون رهبر و متشکل از افراد سودجو (اما انطباق‌پذیر) پا بگیرد.

تأثیرات دگرگونی‌ها بر روی یک مدل ساده را بیابید و شم فرد در مورد یک پدیده را به کار اندازید. فهرست بی‌پایان گونه‌های دوراهی زندانی که مورد مطالعه قرار گرفته حقایق زیادی را در مورد شرایطی آشکار کرده است که همکاری در آنها ممکن است یا ممکن نیست پدیدار شود. برای مثال، ممکن است این پرسش را مطرح کنید که چه اتفاقی می‌افتد اگر گهگاه آدم‌هایی که می‌خواهند همکاری کنند، اشتباه کنند و پیام عدم همکاری را نشان دهند - برای مثال، ترجمه غلط و نامطلوب اظهارنظر رئیس‌جمهور امریکا به روسی؟ دوراهی زندانی صحنه‌ای را فراهم می‌کند که می‌توان در آن تأثیرات ارتباط‌های نادرست را بررسی کرد. جان هالاند چنین مدل‌هایی را به "شبیه‌سازهای[۶۲۴] پرواز" تشبیه می‌کند که به آزمایش ایده‌ها و بهبود شم فرد کمک می‌کند. (۱۶) الهام‌بخشی فناوری‌های جدید. نتایج برگرفته از مقالات مربوط به

مدل‌سازی دوراهی زندانی - یعنی شرایط لازم برای پیدایش و ادامه همکاری - در پیشنهادهایی به کار گرفته شده است که شبکه‌های همتابه-همتا[۶۲۵] را بهبود داده و مانع از تقلب در تجارت الکترونیک شده‌اند، و اینها تنها دو کاربرد از میان موارد متعدد هستند. (۱۸) انجامیدن به نظریه‌های ریاضی. نتایج حاصل از شبیه‌سازی کامپیوتری دوراهی زندانی در صورت‌بندی نظریه‌های ریاضی عام درباره شرایط لازم برای همکاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یک نمونه تازه، نتیجه کار مارتین نواک در مقاله‌ای است به نام "پنج قاعده برای تکامل همکاری."(۱۹) نتایج حاصل از مدل‌های ایده‌ای، از جمله دوراهی زندانی را چگونه باید در تصمیم‌های سیاسی، از قبیل استراتژی‌های روابط خارجی حکومت‌ها، یا در واکنش به گرمایش زمین، به کار گرفت. توان بالقوه مدل‌های ایده‌ای در پیش‌بینی نتایج سیاست‌های مختلف، چنین مدل‌هایی را جذاب می‌کند، و درواقع تأثیر دوراهی زندانی و مدل‌های مربوط به آن در میان تحلیلگران سیاست قابل ملاحظه بوده است.

یک مثال آن شرکت نیوانرژی فاینانس[۶۲۶] است، که به مشاوره در زمینه راه‌حل‌های گرمایش جهانی می‌پردازد و به‌تازگی گزارشی را تهیه کرده است به نام "چگونه سیاره را نجات دهیم: پایبند اصول، تلافی‌جو، با گذشت، و شفاف باشید."(۲۰) این گزارش استدلال می‌کند که مسئله واکنش به تغییر آب و هوایی را می‌توان به بهترین شیوه به صورت دوراهی زندانی چندکاربره و تکراری فهمید که درآن کشورها می‌توانند یا همکاری کنند (خروجی کربن را به بهای اقتصادشان کاهش دهند) یا همکاری نکنند (هیچ کاری نکنند؛ در کوتاه‌مدت پول‌هایشان را جمع کنند.) بازی سال به سال و درحالی‌که معاهده‌ها و موافقت‌نامه‌های تنظیم انتشار کربن امضا می‌شوند، تکرار می‌شود. گزارش مذکور سیاست‌های مشخصی را توصیه می‌کند که کشورها و سازمان‌های جهانی باید درپیش بگیرند، به این منظور که مشخصه‌های "پایبند اصول، تلافی‌جو، با گذشت، و شفافی" را اجرا کنند که آکسلرود برای موفقیت در دوراهی زندانی تکراری لازم می‌شمرد.

به همین ترتیب، نتایج حاصل از مدل هنجارها و کلان‌هنجارها -یعنی این‌که نه تنها هنجارها بلکه کلان‌هنجارها نیز می‌توانند برای حفظ همکاری مهم باشند - از جمله، بر پژوهش سیاست‌گذاری در زمینه واکنش به تروریسم، کنترل تسلیحات، و سیاست‌های مدیریت بر محیط‌زیست تأثیر داشته است. (۱) نتایج حاصل از مدل‌های دوراهی زندانی فضایی نواک و می تأثیر روشنگرانه‌ای داشته است، به‌خصوص درباره نقش فضا و موقعیت محلی در پیش راندن همکاری، از حفظ تنوع زیستی گرفته تا مؤثر بودن باکتری‌ها در تولید آنتی‌بیوتیک‌های جدید. (برای آشنایی با تفصیل این تأثیرات گوناگون نگاه کنید به یادداشت‌ها)(۲۲)

هشدارهایی درباره مدل‌سازی کامپیوتری

تمامی مدل‌ها نادرست‌اند، اما برخی مفیدند.

جورج باکس و نورمان دراپر (۲۳)

درواقع مدل‌هایی که در بالا توضیح دادم به شدت ساده شده‌اند، اما برای پیشبرد علم و سیاست در بسیاری از زمینه‌ها مفید بوده‌اند. این مدل‌ها منجر شده‌اند به شناختی جدید، شیوه‌های جدید تفکر درباره سیستم‌های پیچیده، مدل‌های بهتر، و فهم بهتر درباره نحوه ایجاد مدل‌های سودمند. اما درباره نتایج حاصل از مدل‌ها و چگونگی کاربرد آنها در دنیای واقعی ادعاهای مبالغه‌آمیزی هم شده است. در نتیجه، کار درست برای دانشمندان این است که مدل‌ها را با دقت مورد مداقه قرار دهند و از خود بپرسند که نتایج آنها چقدر واقعی است. بهترین راه انجام این کار، کوشش برای عیناً بازی‌سازی کردن[۶۲۷] آن نتایج است.

در یک علم تجربی، از قبیل اخترشناسی یا شیمی، هر آزمایش مهم عینا بازسازی می‌شود، به این معنی که گروه متفاوتی از دانشمندان همان آزمایش را از صفر آغاز می‌کنند تا ببینند که آیا آنها همان نتایج گروه اصلی را به دست می‌دهند یا نه. به هیچ نتیجه تجربی اعتماد نمی‌شود (یا نباید بشود) مگر آن‌که گروه دیگری بتواند به همان شیوه عینا آن را بازسازی کند.

مدل‌های کامپیوتری هم باید عینا بازسازی شوند - یعنی گروه‌های مستقل باید مدل کامپیوتری پیشنهادی را از صفر بسازند و بفهمند که آیا همان نتایجی به دست می‌آید که در اصل گزارش شده بود یا نه. آکسلرود که پشتیبان بی‌چون و چرای این نظر است، می‌نویسد: "عینا بازسازی کردن صفت بارز دانش رو به افزایش است. برای تأیید این‌که نتایج ادعایی یک شبیه‌سازی مفروض قابل اعتماد است نیاز به این است که فردی که از صفر شروع کرده است بتواند آنها را باز تولید کند. بدون این تأیید ممکن است برداشت نادرستی از نتایج منتشر شده صورت گیرد، خواه به دلیل خطای برنامه‌نویسی، خواه به خاطر نمایش غلط چیزی که عملا شبیه‌سازی شده، یا خطاهایی در تحلیل یا گزارش نتایج. عینا بازسازی کردن درعین‌حال می‌تواند برای سنجش استحکام استنتاج‌های ناشی از مدل سودمند باشد. (۲۴) خوشبختانه، بسیاری از پژوهشگران این اندرز را جدی گرفته‌اند و کوشیده‌اند برخی از مشهورترین شبیه‌سازی‌های دوراهی زندانی را عینا بازسازی کنند. نتیجه‌های جالب و گهگاه نامنتظری از این کوشش‌ها گرفته شده است.

در سال ۱۹۹۵، برناردو هابرمن[۶۲۸] و ناتالی گلانس[۶۲۹] مدل فضایی دوراهی زندانی نواک و می را بازسازی کردند. (۲۵) هابرمن و گلانس شبیه‌سازی را تنها با یک تغییر اجرا کردند. در مدل اصلی، در هر گام زمانی تمامی بازی‌ها مابین بازیگران حاضر در شبکه همزمان انجام می‌شد، و به دنبال آن انتخاب همزمان بازیگر اصلح محله در میان تمامی محله‌ها صورت می‌گرفت. (این کار مستلزم این بود که موازی‌گرایی را در کامپیوتر غیر موازی خود شبیه‌سازی کنند.) هابرمن و گلانس در عوض اجازه دادند برخی از بازی‌ها به صورت ناهمزمان انجام شوند - یعنی یک گروه از بازیگران همسایه بازی می‌کنند و انتخاب را انجام می‌دهند، سپس گروه دیگری از بازیگران

همسایه همان کار را می‌کنند، و به همین منوال. آن دو پی بردند که این تغییر کوچک به طور قطع مدل را واقعی‌تر می‌کند، و به طور معمول به جایگزینی کامل اهل همکاری با اهل عدم همکاری در سراسر داربست می‌انجامد. آریجیت موخرجی[۶۳۰]، ویجی راجان[۶۳۱]، و جیمز اسلاگل[۶۳۲] هم به طور مستقل نتایج مشابهی گرفتند،(۶) و افزون بر این نشان دادند که در صورت وجود خطاهای کوچک یا تقلب (برای مثال، فردی اهل همکاری از سر تصادف یا از روی قصد همکاری نکند) همکاری از میان می‌رود. نواک، می و همکار آنها سباستین بون هویفور[۶۳۳] پاسخ دادند که این تغییرات، به ازای برخی مقادیر ماتریس بازده، منجر به حذف تمامی افرادی می‌شود که اهل همکاری هستند، اما به ازای مقادیر دیگر، این‌گونه افراد قادر می‌شوند که در میان جامعه بمانند، حداقل در دوره‌های طولانی. (۷)

در سال ۲۰۰۵، خوزه مانوئل گالان[۶۳۴] و لویی ایزکویردو[۶۳۵] نتایج پیاده‌سازی مجدد مدل‌های هنجار و کلان‌هنجار آکسلرود را منتشر کردند. (۸) باتوجه به افزایش قدرت کامپیوترها در مدت بیست سالی که از پژوهش آکسلرود گذشته بود، آن دو توانستند شبیه‌سازی را در دوره‌های بسیار طولانی‌تری اجرا کنند و بررسی جامع‌تری در مورد تأثیرات ناشی از تغییر دادن جزئیات مشخص مدل انجام دهند، از جمله مقادیر ماتریس بازده، احتمالات اولاد جهش‌یابنده، و غیره. نتایج آن دو با پاره‌ای جنبه‌های شبیه‌سازی آکسلرود همخوانی داشت، اما در موارد دیگر، پیاده‌سازی مجدد نتایج کاملا متفاوتی به دست داد. برای مثال، آن دو پی بردند که گرچه کلان‌هنجارها می‌توانند در کوتاه‌مدت تکامل و ادامه همکاری را تسهیل کنند، اگر اجرا به مدت طولانی ادامه یابد، اهل عدم همکاری ممکن است بر جامعه فائق شوند. آن دو درعین‌حال پی بردند که نتایج نسبت به جزئیات مدل کاملا حساس هستند، مانند مقادیر مشخص بازده مورد استفاده.

از همه این حرف‌ها چه باید بفهمیم؟ تصور می‌کنم پیام دقیقا همانی است که باکس[۶۳۶] و درایپر[۶۳۷] در نقل‌قول بالا در نظر داشتند: تمامی مدل‌ها به شکلی غلط هستند، اما برخی از آنها برای بررسی سیستم‌های بی‌اندازه پیچیده بسیار سودمند هستند. همتاسازی مستقل می‌تواند فرضیات غیرواقعی پنهان و حساسیت نسبت به پارامترها را که بخشی از هر مدل مطلوبی هستند، آشکار کند. و البته خود همتاسازی‌ها نیز باید همتاسازی شوند، و به همین منوال - به همان صورتی که در علوم تجربی انجام می‌شود. سرانجام مدل‌سازان بیش از هر چیز نیاز دارند که بر محدودیت مدلشان تأکید کنند، تا نتایج این‌گونه مدل‌ها نه سوءتعبیر شود و نه بیش از حد جدی گرفته شود و بیش از حد هم بزرگ‌نمایی نشود. نمونه‌هایی از مدل‌های مربوط به دوراهی زندانی را به کار برده‌ام تا تمامی این نکات را نشان دهم، اما توضیحات قبلی‌ام می‌تواند به طور یکسان، در تقریبا تمامی سایر مدل‌های ساده شده سیستم‌های پیچیده، مصداق داشته

باشد.

کلمات پایانی را اختصاص می‌دهم به فیلیپ اندرسون[۶۳۸]، فیزیکدان (و طرفدار مدل‌سازی که از زمانه خودش جلوتر بود) که از خطابه‌اش در مراسم دریافت جایزه نوبل در سال ۱۹۷۷ برگرفته شده است:

هنر مدل‌سازی در کنار گذاشتن قسمت‌های واقعی اما نامربوط مسئله است، و خطراتی برای سازنده و خواننده به دنبال دارد.

سازنده ممکن است چیزی حقیقتا مربوط به مسئله را نادیده بگیرد؛ خواننده که مجهز به کاوشگری تجربی و بیش از حد پیشرفته و یا محاسبه‌ای بیش از حد دقیق است، ممکن است یک مدل طراحی شده اجمالی که هدف اصلی آن قرار است نمایشی از امری محتمل باشد، جدی بگیرد. (۲۹)

بخش چهارم: تفکر شبکه‌ای

در ارسیلیا[۶۳۹] برای ایجاد روابطی که زندگی شهر را حفظ می‌کند، اهالی از گوشه خانه‌ها رشته‌هایی می‌کشند، سپید یا سیاه یا خاکستری به فراخور این‌که بین آنها رابطه خونی، تجاری، اقتدار، کارگزاری وجود داشته یا نه. وقتی رشته‌ها آن‌قدر زیاد می‌شوند که نشود از میان آنها گذشت، اهالی شهر را ترک می‌کنند:

خانه‌ها برچیده می‌شوند؛ تنها رشته‌ها و پایه‌ها باقی می‌مانند.

پناهندگان ارسیلیا، از دامنه کوه، که در آنجا با اموالشان اتراق کرده‌اند، به هزار توی رشته‌های کشیده و میله‌هایی که از دشت سر برکشیده‌اند می‌نگرند.

این هنوز شهر ارسیلیاست، اما آنها هیچ چیز نیستند.

ارسیلیا را جای دیگری بازسازی می‌کنند. الگوی مشابهی از رشته‌ها را می‌بافند که دوست دارند پیچیده‌تر اما منظم‌تر باشد. سپس آن را رها می‌کنند و خود و خانه‌هایشان را به جایی باز هم دورتر می‌برند.

بدین‌سان، وقتی که در سرزمین ارسیلیا سفر می‌کنید، به ویرانه‌های شهرهای رها شده برمی‌خورید، بدون دیوارهایی که دوامی ندارند، بدون استخوان‌های مردگان که باد به دوردست می‌برد: تار عنکبوت‌هایی از روابط ظریفی که در جستجوی یک شکل‌اند.

ایتالو کالوینو، شهرهای ناپیدا (ترجمه دبلیو. ویور)

فصل پانزدهم: علم شبکه

دنیاهای کوچک

من در شهر پورتلند [۶۴۰] در ایالت ارگن [۶۴۱] زندگی می‌کنم که مرکز آن دو میلیون نفر را در خود جای داده است. در دانشگاه دولتی پورتلند درس می‌دهم که نزدیک به ۲۵۰۰۰ دانشجو و ۲۰۰٫۱ هیئت علمی دارد. چند سال پیش، با خانواده‌ام تازه به خانه جدیدی نقل‌مکان کرده بودیم که از دانشگاه چندان دور نبود، و داشتم با همسایه جدید دیوار به دیوارم، دوروتی که حقوقدان است، گپ می‌زدم. او گفت: "نمی‌دانم پدرم را می‌شناسی یا نه. اسم او جورج لنداریس [۶۴۲] است." حیرت کردم. جورج لنداریس یکی از سه یا چهار عضو هیئت علمی دانشگاه پورتلند است که مانند خود من در زمینه هوش مصنوعی کار می‌کنند. درست روز پیش از آن با هم جلسه داشتیم و در مورد پیشنهاد مشترکمان برای دریافت کمک هزینه پژوهشی بحث می‌کردیم. چه دنیای کوچکی!

تقریبا همه ما این شکل از "دنیای کوچک" را تجربه کرده‌ایم، خیلی خیلی چشمگیرتر از تجربه من. بهترین دوست دوران دبیرستان همسرم پسرعموی کسی از کار درآمد که کتاب درسی هوش مصنوعی مورد استفاده من در کلاس را نوشته بود. در سانتافه، خانمی که سه خانه آن طرف‌تر از خانه من زندگی می‌کرد، دوست نزدیک معلم انگلیسی من در لوس‌آنجلس از کار درآمد. مطمئن هستم که می‌توانید چند تجربه مثل این را به یاد آورید.

چگونه است که چنین ارتباط‌های نامنتظری این‌قدر تکراری به نظر می‌رسند؟ در دهه ۱۹۵۰ روانشناسی از دانشگاه هاروارد به نام استانلی میلگرام [۶۴۳] می‌خواست با تعیین این‌که به طور میانگین، چند پیوند لازم است تا از هر فردی در ایالات متحده به فرد دیگری برسیم به این پرسش پاسخ دهد. او آزمونی را طراحی کرد که در آن افراد عادی سعی می‌کنند تا نامه‌ای را با تحویل آن به یک آشنا به غریبه‌ای در دوردست برسانند؛ آشنا نامه را به آشنای خودمی دهد و به همین منوال، تا گیرنده موردنظر در پایان زنجیره، نامه را دریافت کند.

میلگرام گروهی از "آغازگرها" را از طریق آگهی روزنامه، در کانزاس و نبراسکا استخدام کرد، و نام و حرفه و شهر محل اقامت "هدف" را به هریک از آنها داد، فردی که برای آغازگر ناشناس بود و نامه خطاب به او بود. دو نمونه از هدف‌های مورد نظر میلگرام یک کارگزار بورس در بوستون و همسر یک دانشجوی الهیات در شهر کیمبریج بود. به آغازگر گفته می‌شد که نامه را به دست کسی برساند که شخصا او را می‌شناسد، و از او بخواهد که زنجیره را ادامه دهد. هر پیوند در زنجیره بر روی نامه ثبت می‌شد؛ و اگر نامه‌ای به هدف می‌رسید میلگرام تعداد پیوندهایی را که نامه پشت‌سر گذاشته بود می‌شمرد. وی درباره یک مورد نوشت:

چهار روز پس از این‌که پوشه‌ها برای گروهی از اشخاص آغازگر در نبراسکا ارسال شد، معلمی در

مدرسه الهیات اسقفی[۶۴۴] به فرد هدف در خیابان نزدیک شد. گفت: "آلیس، این مال توست" و یک پوشه قهوه‌ای را به دست او داد. آلیس ابتدا فکر کرد او دارد پوشه‌ای را برمی‌گرداند که به مسیر اشتباهی رفته و هرگز از کیمبریج خارج نشده است، اما وقتی به فهرست نگاه کردیم با خوشحالی غیرمنتظره‌ای دریافتیم که آغازگر صاحب یک مزرعه گندم بود. آن را برای یک روحانی در شهر خودش فرستاده بود که به نوبه خود آن را برای روحانی دیگری که در کیمبریج درس می‌داد ارسال کرد. در مجموع تعداد پیوندهای میانی بین آغازگر و هدف بالغ بر دو بود.)



استانلی میلگرام،۱۹۳۳-۱۹۸۴

میلگرام در مشهورترین پژوهش خود پی برد که برای این‌که نامه‌ها به هدف برسند، تعداد متوسط آشناهای میانی از آغازگر تا هدف پنج است. این نتیجه به صورت گسترده‌ای نقل شد و سر منشأ این نظر عامیانه است که آدم‌ها تنها با "شش درجه فاصله" به هم مربوطند.

پژوهش بعدی روانشناس جودیت کلاینفلد[۶۴۵] نشان داد که تفسیر عامیانه از پژوهش میلگرام تا حدی مخدوش ـ () است درواقع اکثر نامه‌ها هرگز به هدف نرسیده بودند، و در مطالعات دیگری که میلگرام انجام داد، تعداد متوسط پیوندهای میانی برای این‌که نامه‌ها به هدف برسند از پنج بیشتر بود. اما تصور یک دنیای کوچک که با شش درجه فاصله به هم پیوند خورده است، به عنوان چیزی شبیه به یک اسطوره شهری از فرهنگ‌مان بر جای مانده است.(۴) به

همان صورت که کلاینفلد به آن اشاره می‌کند:

وقتی که مردم یک رابطه اجتماعی نامنتظر را تجربه می‌کنند، رویدادها احتمالا در حافظه فرد زنده و چشمگیر باقی می‌مانند... ما درک ریاضی ضعیف و همچنین درک شهودی ضعیفی از ماهیت تلاقی رویدادها داریم. (۵)

بالاخره دنیا کوچک است یا نه؟ این پرسش به‌تازگی خیلی مورد توجه قرار گرفته است - نه تنها در مورد انسان‌ها در حیطه اجتماعی، بلکه درعین‌حال در مورد سایر شبکه‌ها، از شبکه‌های تنظیم سوخت و ساز و ژنتیک درون سلول‌های زنده گرفته تا وب جهانی که رشدی انفجاری پیدا کرده است. در دهه اخیر پرسش‌های مربوط به چنین شبکه‌هایی هجومی از جانب پژوهشگران سیستم‌های پیچیده را به راه انداخته است که می‌خواهند چیزی را خلق کنند که "علم جدید شبکه‌ها" نام گرفته است.

علم جدید شبکه (۶)

بی‌تردید نمودار شبکه‌ای مثل شکل ۱۵۱ را دیده‌اید. این یکی تصادفا نقشه مسیر پروازهای داخلی شرکت هواپیمایی کنتینانتال است. نقطه‌ها یا گره‌ها نشان‌دهنده شهرها و خطوط یا پیوندها نشان‌دهنده مسیر پرواز بین شهرها هستند.

نقشه‌های مسیر خطوط هوایی نمونه آشکار بسیاری از پدیده‌های طبیعی و فنی و فرهنگی هستند که می‌توان آنها را به صورت شبکه توضیح داد. مغز شبکه عظیمی از نورون‌هاست که با سیناپس[۶۴۶]ها پیوند خورده‌اند.

کنترل فعالیت ژنتیک در یک سلول ناشی از شبکه پیچیده‌ای از ژن‌هاست که با پروتئین‌های تنظیم‌کننده پیوند خورده‌اند. گروه‌های اجتماعی شبکه‌هایی هستند که در آنها گره‌ها آدم‌ها یا سازمانی از آدم‌ها هستند که بین آنها انواع بسیاری از روابط وجود دارد. اینترنت و وب جهانی هم البته دو شبکه بسیار مهم در دنیای امروز هستند. در حیطه امنیت ملی، کوشش زیادی صرف تشخیص و تحلیل "شبکه‌های تروریستی" می‌شود.



شکل ۱-۱۵. نقشه مسیر نسبتا ساده شده هواپیمایی کنتینانتال.

تا همین اواخر، علم شبکه را به عنوان رشته‌ای خاص نمی‌شناختند.

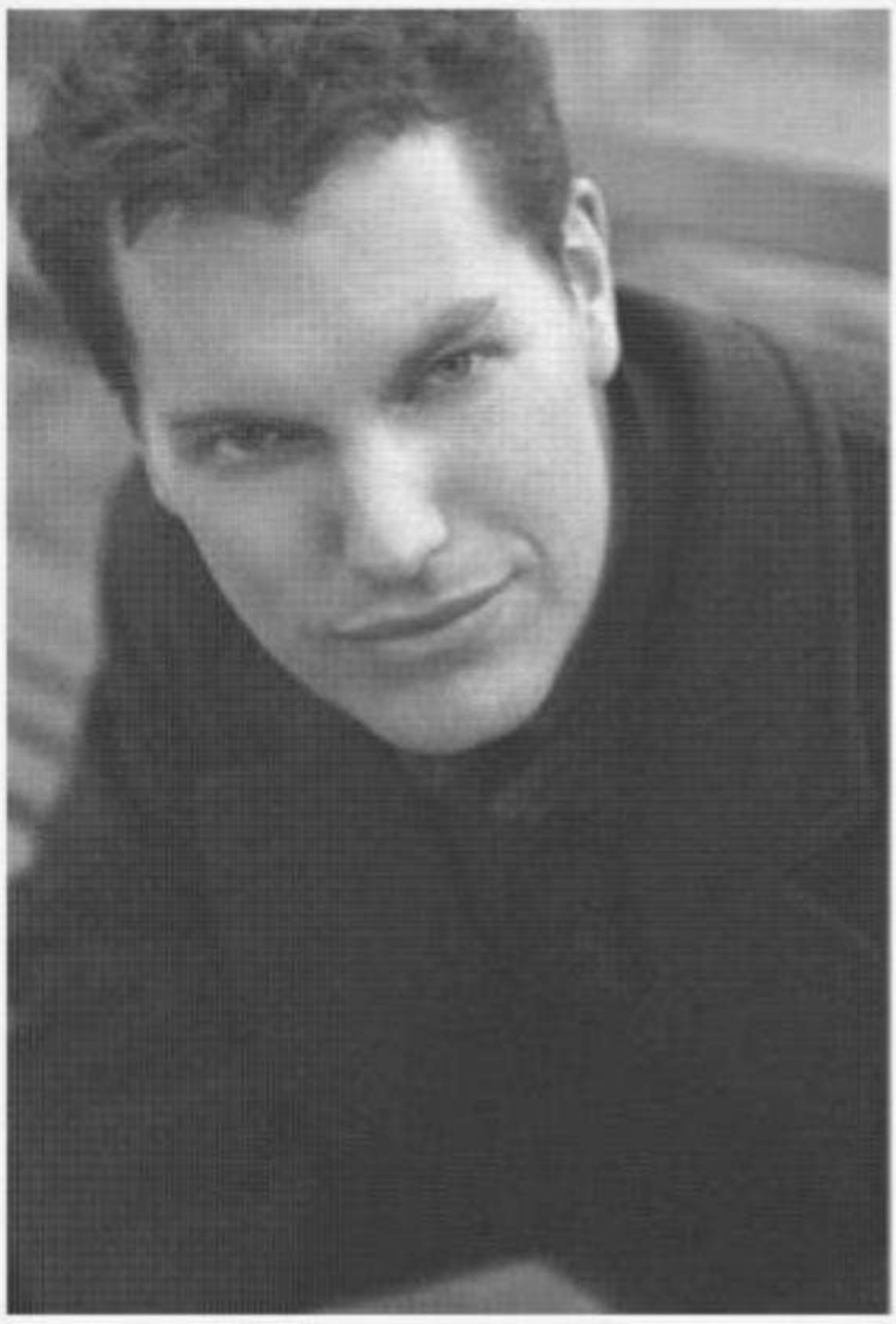
ریاضیدانان ساختارهای انتزاعی شبکه را در رشته‌ای به نام "نظریه گراف"[۶۴۷] مطالعه می‌کردند. عصب‌پژوهان درباره شبکه‌های عصبی مطالعه می‌کردند.

متخصصان بیماری‌های واگیردار درباره انتقال بیماری از طریق شبکه افرادی که با هم رابطه دارند مطالعه می‌کردند. جامعه‌شناسان و روانشناسان اجتماعی مثل میلگرام به ساختار شبکه‌های اجتماعی انسان علاقه‌مند بودند. اقتصاددانان درباره رفتار شبکه‌های اقتصادی مطالعه می‌کردند، از قبیل گسترش نوآوری فنی در شبکه‌های کسب و کار. مدیران شرکت‌های هواپیمایی درباره شبکه‌هایی مثل آنچه در شکل ۱۵۱ آمده است مطالعه می‌کردند به این منظور که یک ساختار گره پیوند را بیابند که با توجه به محدودیت‌هایی معین سود را به حد مطلوب برساند. این گروه‌های مختلف تا حدود زیادی مستقل از هم کار می‌کردند، و به‌طورکلی از پژوهش یکدیگر اطلاعی نداشتند.

اما در دهه اخیر، گروه رو به رشدی از ریاضیدانان کاربردی و فیزیکدان‌ها به ایجاد مجموعه‌ای از اصول وحدت‌بخش علاقه‌مند شده‌اند که بر هر نوع شبکه در طبیعت و جامعه و فناوری حاکم باشد. بذر این افزایش علاقه به شبکه‌های عمومی را انتشار دو مقاله مهم در اواخر دهه ۱۹۹۰ پاشید:

"پویایی جمعی "شبکه‌های دنیای کوچک"" نوشته دونکان واتس[۶۴۸] و استیون اشتروگاتز[۶۴۹] و "ظهور میزان شدن[۶۵۰] در شبکه‌های تصادفی" نوشته آلبرت-لازلو باراباسی[۶۵۱] و ریکا[۶۵۲] (۷) آلبرت این دو مقاله به ترتیب در مجله‌های علمی معتبر نیچر و ساینس منتشر شدند، و تقریبا بلافاصله افراد زیادی را در مورد این رشته "جدید" به هیجان آوردند. اکتشافات مربوط به شبکه‌ها سریع و بی‌امان فرا رسیدند.

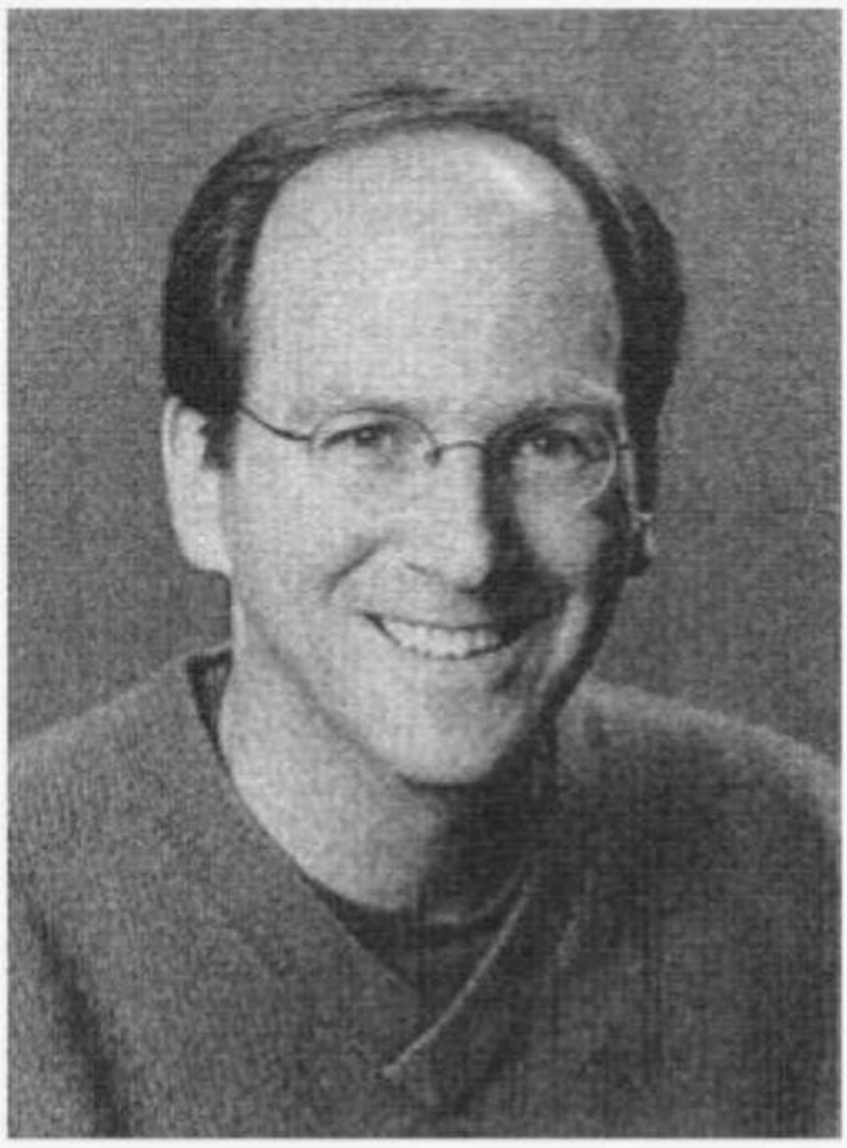
زمان و مکان آن فرا رسیده بود که مردم سوار لوکوموتیو شتابان علم شبکه شوند. مطالعه خواص مشترک شبکه در میان رشته‌های متفاوت تنها با کامپیوترهایی امکان‌پذیر است که برای مطالعه تجربی شبکه‌ها به اندازه کافی سریع باشند - هم در شبیه‌سازی و هم در مدیریت حجم عظیمی از داده‌های دنیای واقعی. در دهه ۱۹۹۰، این امر امکان‌پذیر شده بود. افزون بر این، محبوبیت فزاینده کاربرد اینترنت در زمینه شبکه‌های اجتماعی و کسب و کار و علم به این معنی بود که حجم عظیمی از داده به سرعت در دسترس قرار می‌گرفت.



دونکان واتس

افزون بر این، محفل بزرگی از فیزیکدانان بسیار با استعداد وجود داشت که علاقه‌شان را به ماهیت بیش از پیش انتزاعی فیزیک مدرن از دست داده بودند و در جستجوی موضوع دیگری بودند. شبکه‌ها با ترکیبی از خواص بکر ریاضی، دینامیک پیچیده، و ربطشان به دنیای واقعی، موضوع بی‌عیب و نقصی بودند. آن‌طور که دونکان واتس (که ریاضیدان کاربردی و جامعه‌شناس است) تعبیر می‌کند، "هیچ‌کس به اندازه گروهی از فیزیکدانان تشنه که رایحه یک مسئله جدید آدرنالین‌شان را بالا برده بود این چنین بی‌محابا و به این تعداد هجوم (۸)". نمی‌آورد همه این آدم‌های با استعداد، در روش‌های ریاضی مناسب این مسئله کارآموزی دیده بودند و این توانایی را داشتند که مسائل پیچیده را ساده کنند بی‌آنکه ویژگی‌های اصلی آنها را

کنار بگذارند. برخی از این فیزیکدان‌ها که به دانشمندان شبکه تبدیل شدند، نقش با اهمیتی را در این رشته بازی کردند.



استیون اشتروگاتز

شاید از همه‌چیز مهم‌تر این بود که در میان بسیاری از دانشمندان درک رو به رشدی وجود داشت که ایده‌های جدید و رویکردهای جدید - درواقع، شیوه نوینی از تفکر - مورد نیاز است تا به طور مستقیم به فهم سیستم‌های بی‌اندازه پیچیده‌ای کمک کند که به طرز بسیار ظریفی به هم مرتبط‌اند و به صورت فزاینده‌ای بر زندگی و بهزیستی انسان تأثیر می‌گذارند. آلبرت لازلو باراباسی از جمله کسانی بود که به رویکردهای جدید عنوان "تفکر شبکه‌ای" را داده است. او اعلام کرد که "تفکر شبکه‌ای در کمین است که به تمامی حوزه‌های فعالیت و اکثر عرصه‌های جستجوی انسان یورش برد."(۹)



آلبرت لازلو باراباسی تفکر شبکه‌ای چیست؟

تفکر شبکه‌ای یعنی تمرکز بر روی روابط موجودیت‌ها و نه خود موجودیت‌ها.

برای مثال، همان‌طور که در فصل هفتم توضیح دادم، این واقعیت که انسان و گیاه خردل هر کدام تنها ۲۵۰۰۰ ژن دارند ظاهرا با پیچیدگی زیستی انسان در مقایسه با این‌گونه گیاهان همخوانی ندارد. در حقیقت، در چند دهه اخیر، برخی از زیست‌شناسان مطرح کرده‌اند که پیچیدگی یک اندام‌واره عمدتا از پیچیدگی برهم‌کنش ژن‌ها سرچشمه می‌گیرد. در فصل هجدهم مطالب بیشتری را درباره این برهم‌کنش‌ها خواهم آورد، اما در اینجا کافی است بگویم که نتایج حاصل از تفکر شبکه‌ای تأثیرات مهمی بر زیست‌شناسی گذاشته است.

در این اواخر تفکر شبکه‌ای به روشن کردن اسرار علمی و فنی بیشتر، و ظاهرا نامربوط، کمک کرده است: چرا طول عمر معمول اندام‌واره‌ها تابع ساده‌ای از اندازه آنهاست؟ چرا شایعات و شوخی‌ها و مجعولات شهری با این سرعت پخش می‌شوند؟ چرا شبکه‌های پیچیده‌ای مثل شبکه‌های توزیع برق و اینترنت در بعضی شرایط این‌قدر مقاوم هستند و در موارد دیگر این‌قدر در معرض خطر قطع گسترده قرار می‌گیرند؟ چه رویدادهایی می‌توانند موجب شوند یک جامعه بوم‌شناختی که زمانی باثبات بوده تکه‌تکه شود؟

گرچه این پرسش‌ها متفاوت هستند، پژوهشگران شبکه معتقدند که پاسخ‌ها بازتاب‌دهنده شباهت‌هایی در میان شبکه‌های حوزه‌های مختلف هستند. اهداف علم شبکه یافتن این شباهت‌ها و استفاده از آنها برای توصیف شبکه‌های متفاوت با یک زبان مشترک است. دانشمندان شبکه درعین‌حال می‌خواهند بفهمند که شبکه‌های موجود در طبیعت چگونه به وجود آمدند و چگونه در طول زمان تغییر می‌کنند.

شناخت علمی شبکه‌ها نه تنها می‌تواند تأثیر زیادی بر شناخت ما از بسیاری سیستم‌های طبیعی و اجتماعی داشته باشد، بلکه درعین‌حال توانایی ما را برای مهندسی شبکه‌های پیچیده و کاربرد مؤثر آنها افزایش می‌دهد، از وب و مسیریابی[۶۵۳] اینترنت گرفته تا کنترل سرایت بیماری‌ها، تأثیر جنایات سازمان‌یافته، و آسیب بوم‌شناختی ناشی از کنش‌های انسان.

"شبکه" اصلا چیست؟

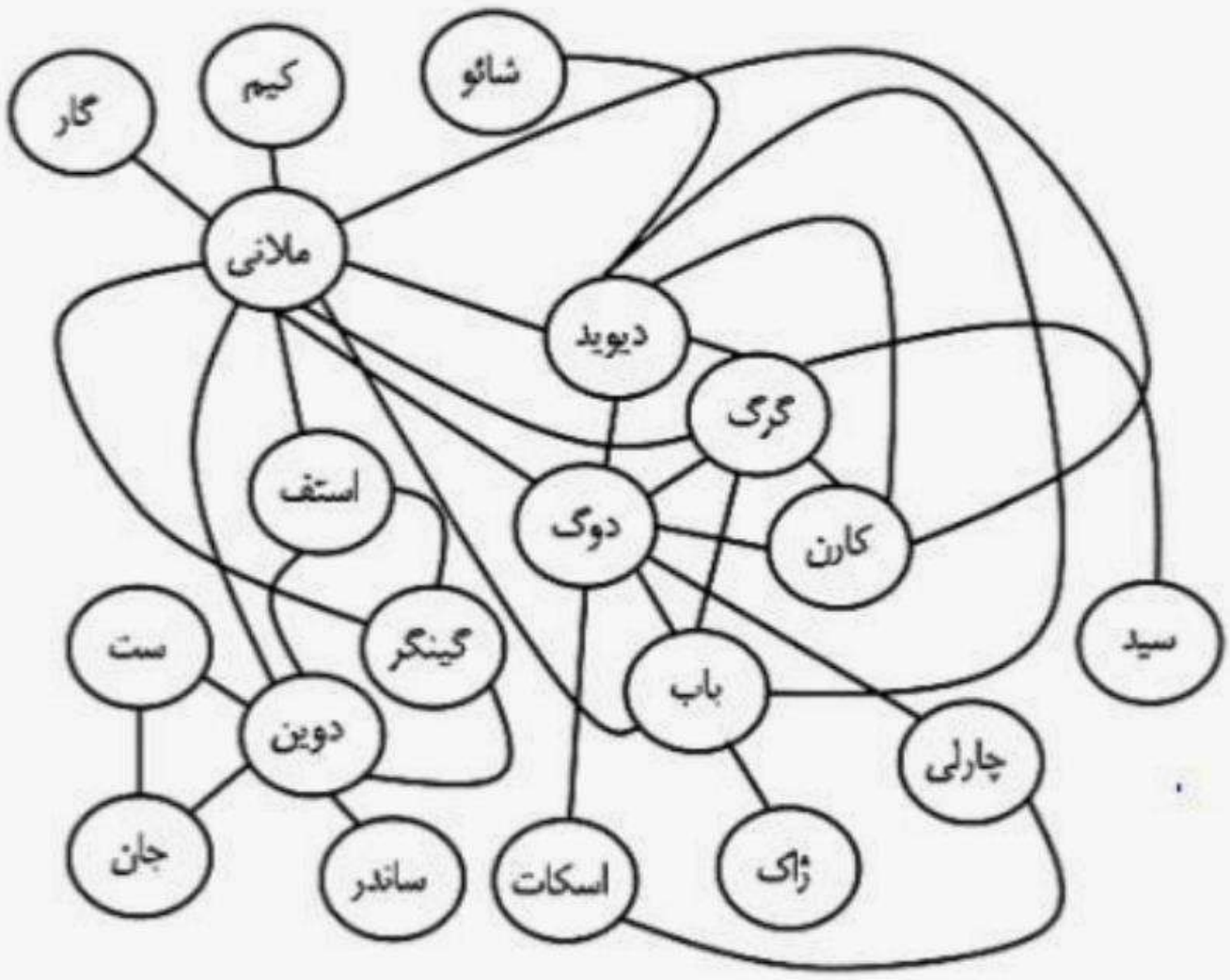
به منظور بررسی علمی شبکه‌ها، باید منظورمان از شبکه را مشخص کنیم؟

به بیان ساده، شبکه مجموعه‌ای از گره‌هاست که با پیوندهایی به هم مرتبط می‌شوند. گره‌ها با افراد موجود در یک شبکه (برای مثال نورون‌ها، وب‌گاه‌ها، انسان‌ها) و پیوندها با ارتباط بین آنها (برای مثال، سیناپس‌ها، ابرپیوندهای[۶۵۴] وب، و روابط اجتماعی) متناظر هستند.

برای مثال، شکل ۲-۱۵ بخشی از شبکه اجتماعی من را نشان می‌دهد برخی از دوستان نزدیک من، برخی از دوستان نزدیک آنها و غیره، در مجموع ۱۹ گره. (البته اکثر شبکه‌های واقعی خیلی بزرگ‌تر هستند.)

در نگاه اول، این شبکه شبیه وضع درهم برهمی به نظر می‌آید. اما اگر دقیق‌تر نگاه کنید، در این درهم برهمی متوجه ساختاری می‌شوید.

خوشه‌هایی وجود دارند که به طور متقابل مرتبط هستند ـ تعجبی ندارد، بعضی از دوستان من درعین‌حال با هم دوست هستند. برای مثال، دیوید و گرگ و دوگ و باب همه به یکدیگر مرتبط هستند، همین‌طور استف، جینجر و دوین، که خود من نقش پلی را بین دو گروه بازی می‌کنم. حتی اگر درباره گذشته من چیزی ندانید، ممکن است حدس بزنید که این "جامعه" از دوستان، با علائق متفاوت من یا دوره‌های متفاوت زندگی‌ام ربط دارد. (هر دو درست است.)

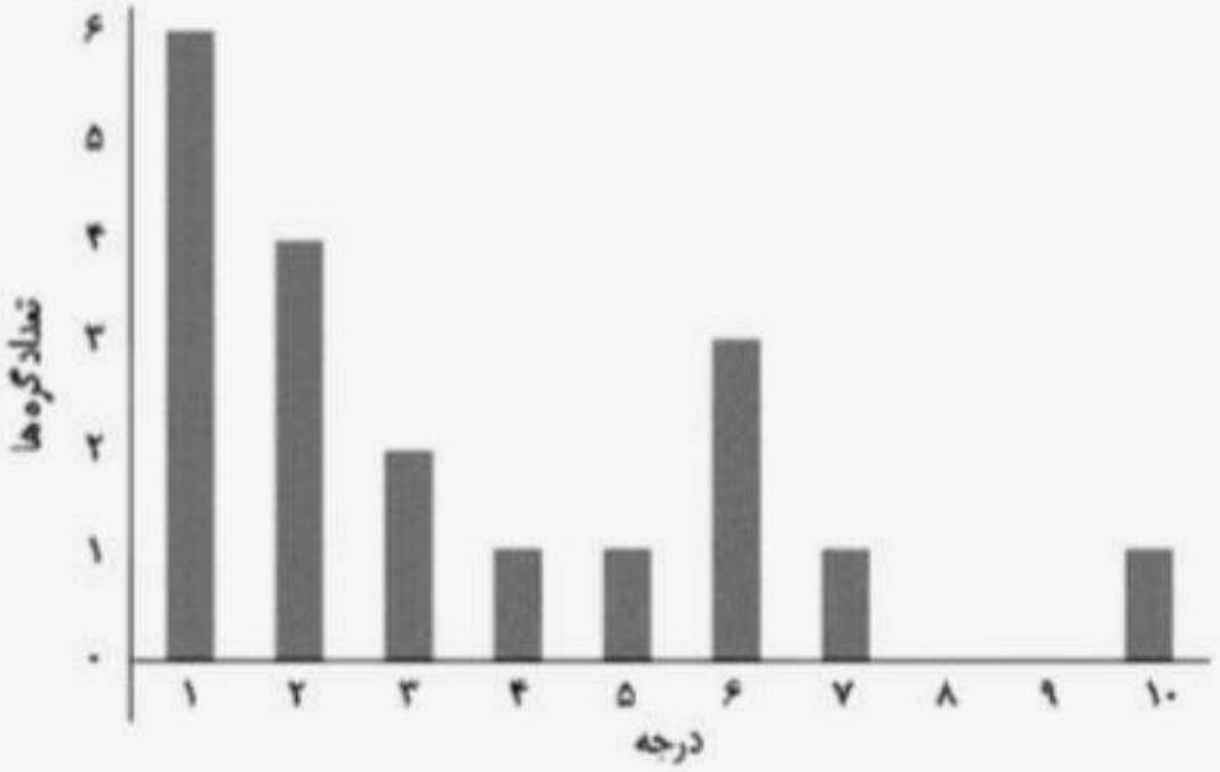


شکل ۲-۱۵. بخشی از شبکه اجتماعی من

احتمالا متوجه این هم شده‌اید که برخی از این آدم‌ها دوستان زیادی دارند. برای مثال: خودم، دوین، دیوید، دوگ، گرگ؛ و برخی تنها یک دوست دارند. برای مثال: کیم، ژاک، ژائو. در اینجا، تنها دلیلش ناکامل بودن این شبکه است، اما در اکثر شبکه‌های اجتماعی بزرگ همیشه برخی از مردم دوستان زیادی دارند و برخی کم.

دانشمندان شبکه، در تلاش برای ایجاد یک زبان مشترک، برای انواع متفاوت ساختارهای شبکه واژگانی را وضع کرده‌اند. وجود جوامع عمدتا مجزا و سخت درهم‌تنیده در شبکه‌ها خوشه‌بندی[۶۵۵] نامیده می‌شود. تعداد پیوندهایی که از یک گره خارج یا به آن وارد می‌شوند، درجه[۶۵۶] آن گره نامیده می‌شود. برای مثال، درجه من ۱۰ است، و از همه گره‌ها بیشتر است؛ درجه کیم ۱ است و به همراه پنج گره دیگر کمترین درجه را دارد، با استفاده از این واژگان، می‌توانیم بگوییم که این شبکه تعداد کمی گره درجه بالا و تعداد بیشتری گره درجه پایین دارد. این امر را می‌توان در شکل ۳-۱۵ به وضوح دید که در آن توزیع درجه این شبکه را نشان داده‌ام. برای درجه‌های ۱ تا ۱۰، نمودار تعداد گره‌هایی را نشان می‌دهد که آن درجه را دارند. برای مثال،

شش گره وجود دارد که درجه ۱ دارند (اولین میله) و یک گره که درجه ۱۰ دارد (میله آخر).
این نمودار روشن می‌کند که تعداد زیادی گره درجه پایین وجود دارد و تعداد کمی درجه بالا. در شبکه‌های اجتماعی، این امر متناظر با این واقعیت است که بسیاری از آدم‌ها هستند که به نسبت دوستان کمی دارند و گروه بسیار کوچک‌تری که آدم‌های محبوبی هستند. به همین ترتیب، تعداد کمی از وبگاه‌ها خیلی محبوب هستند (یعنی آنهایی که تعداد زیادی از وبگاه‌های دیگر با آنها پیوند دارند)، از قبیل گوگل، که ۷۵ میلیون پیوند ورودی دارد، و تعداد بیشتری از وبگاه‌ها که تقریبا هیچ‌کس خبری از آنها ندارد - مانند وبگاه خود من، با ۱۲۳ پیوند ورودی (که احتمالا بیشتر آنها از جانب موتورهای جستجو هستند.)(۱۰)



شکل ۳-۱۵. توزیع درجه شبکه شکل ۱۵۲. برای هر درجه یک میله ترسیم شده است که نشان‌دهنده تعداد گره‌هایی است که آن درجه را دارند.

گره‌هایی که درجه بالایی دارند هاب[۶۵۷] نامیده می‌شوند و مجراهای اصلی جریان فعالیت یا اطلاعات در شبکه هستند. شکل ۱-۱۵، سیستم هابی را نشان می‌دهد که پس از مقررات‌زدایی دهه ۱۹۸۰، مورد استفاده اکثر شرکت‌های هواپیمایی قرار گرفت: هر شرکت هواپیمایی شهر معینی را به عنوان هاب در نظر گرفته بود، یعنی اکثر پروازهایش از آن شهر عبور می‌کرد.
اگر از غرب امریکا به ساحل شرقی با کنتینانتال پرواز می‌کردید، احتمالا باید هواپیمایتان را در هوستون عوض می‌کردید.
یکی از کشف‌های بزرگ علم شبکه تا به امروز این بوده است که خوشه‌بندی زیاد و توزیع درجه نامنظم و ساختار هاب ظاهرا مشخصه اکثریت عظیمی از آن شبکه‌های طبیعی-اجتماعی است که مورد مطالعه دانشمندان شبکه قرار گرفته‌اند. اگر با قرار دادن تصادفی پیوند بین گره‌ها شبکه‌ای را بسازم، تمامی گره‌ها از درجه یکسانی برخوردار می‌شدند، و در نتیجه توزیع درجه مانند شکل ۳-۱۵ مخدوش نمی‌شد. به همان ترتیب، هابی شکل نمی‌گرفت و شاهد

خوشه‌های اندکی بودیم.

چرا شبکه‌های دنیای واقعی این مشخصه‌ها را دارند؟ این یکی از پرسش‌های اصلی علم شبکه است، و به طور عمده از طریق ایجاد مدل‌هایی برای شبکه به آن پرداخته شده است. دو گروه از مدل‌هایی که عمیقا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند عبارتند از دنیای کوچک[۶۵۸] و شبکه‌های بی‌مقیاس.[۶۵۹]

شبکه‌های دنیای کوچک

گرچه آزمایش‌های میلگرام اثبات نکرد که ما عملا در یک دنیای کوچک زندگی می‌کنیم، دنیای شبکه اجتماعی من (شکل ۲-۱۵) واقعا کوچک است. به این معنی که برای رسیدن از یک گره به گره دیگر گام‌های زیادی لازم نیست. درحالی‌که گار و چارلی هرگز با هم ملاقات نکرده‌اند (تا آنجایی که من می‌دانم) اما می‌توانند در سه گام به هم برسند، و جان می‌تواند تنها در چهار گام به ژائو برسد. درواقع، در شبکه من آدم‌ها با حداکثر چهار درجه فاصله با هم پیوند دارند.

ریاضیدان کاربردی و جامعه‌شناس دونکان واتس و ریاضیدان کاربردی استیون اشتروگاتز از نخستین کسانی بودند که مفهوم شبکه دنیای کوچک را به صورت ریاضی تعریف کردند (۱) و در این‌باره که چه اشکالی از ساختارهای شبکه از این خاصیت برخوردارند دست به تحقیق زدند (نتایج پژوهش‌شان در مورد شبکه‌های انتزاعی خاستگاه دور از انتظاری داشت: تحقیق در این مورد که جیرجیرک‌ها چگونه جیرجیرشان را همزمان می‌کنند.) واتس و اشتروگاتز بررسی‌شان را از ساده‌ترین شبکه "منظم" ممکن آغاز کردند:

حلقه‌ای از گره‌ها، مشابه شبکه شکل ۴-۱۵، که ۶۰ گره دارد. هر گره با دو تا از نزدیک‌ترین همسایه‌هایش در حلقه پیوند دارد، که یادآور یک خوکار سلولی بنیادی است. برای تعیین درجه "دنیای کوچک بودن" در یک شبکه، واتس و اشتروگاتز میانگین طول مسیر در شبکه را اندازه‌گیری کردند. طول مسیر بین دو گره به وضوح تعداد پیوندها در کوتاه‌ترین مسیر بین آن گره‌هاست. میانگین طول مسیر به وضوح میانگین طول مسیرها بین تمامی جفت‌های گره در شبکه است. میانگین طول مسیر شبکه منظم در شکل ۱۵۴، ۱۵ از کار درمی‌آید. در نتیجه، مانند بازی کودکانه "تلفن"، به طور میانگین زمان زیادی طول می‌کشد که یک گره با گره دیگری در آن سوی حلقه ارتباط بگیرد.

پس، واتس و اشتروگاتز این پرسش را مطرح کردند که اگر در شبکه منظمی مثل این کمی تغییر دهیم - یعنی تعدادی از پیوندها با نزدیک‌ترین همسایه را به پیوندهای راه دور تغییر دهیم - این امر چگونه بر میانگین طول مسیر تأثیر می‌گذارد؟ آنها پی بردند که این تأثیر کاملا چشمگیر است.

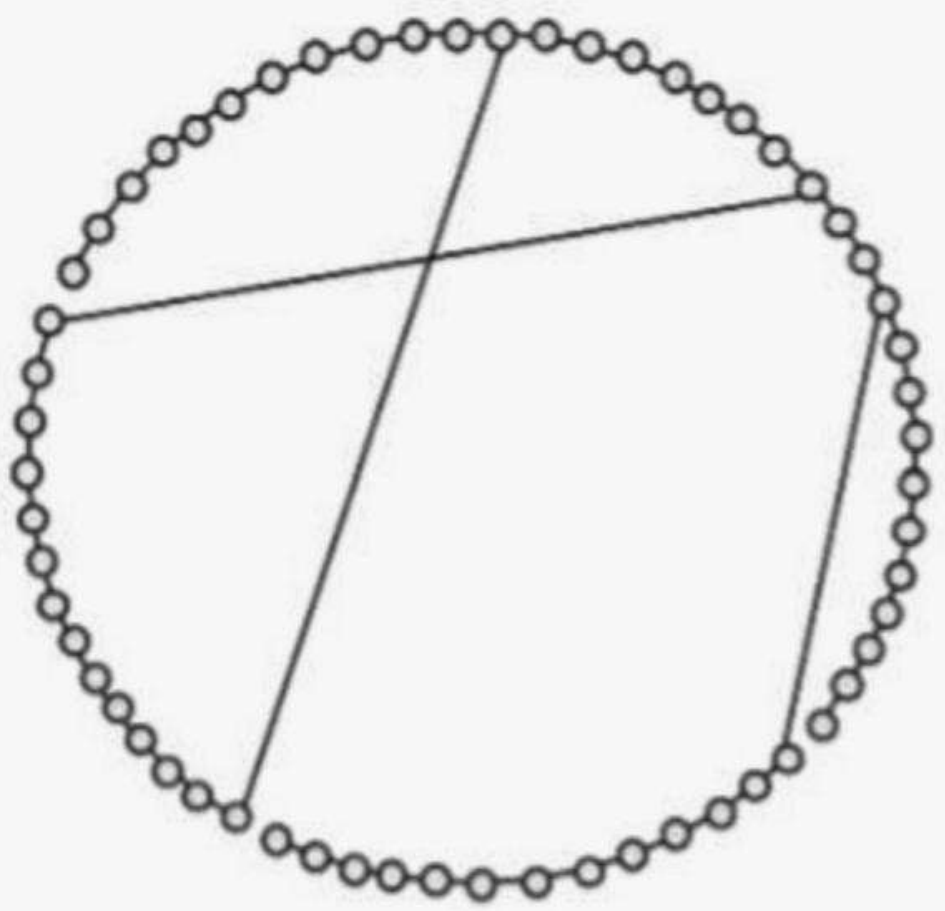
برای مثال، شکل ۵-۱۵، همان شبکه منظم شکل ۴-۱۵ است وقتی ۵% پیوندها (در اینجا سه

پیوند) سیم‌کشی مجدد شده است - یعنی یک انتهای هر یک از سه پیوند به طور تصادفی به گرهی دیگر حرکت داده شده است.

این شبکه که سیم‌کشی مجدد شده است همان تعداد پیوند شبکه منظم اصلی را دارد، اما میانگین طول مسیر به ۹ کاهش یافته (۱۳). است واتس و اشتروگاتز پی بردند که وقتی تعداد گره‌ها افزایش پیدا می‌کند، تأثیر آن به شکل فزاینده‌ای مشهود می‌شود. برای مثال، در یک شبکه منظم که ۱۰۰۰ گره دارد، میانگین طول مسیر ۲۵۰ است؛ در همان شبکه وقتی ۵% پیوندها سیم‌کشی مجدد می‌شود، به طور معمول میانگین طول مسیر به حدود ۲۰ سقوط می‌کند. واتس این مسئله را چنین توضیح می‌دهد: "تنها معدودی پیوند تصادفی می‌تواند تأثیر بزرگی بر جای بگذارد..." نخستین پنج سیم‌کشی مجدد تصادفی، به طور متوسط، میانگین طول مسیر را به نصف کاهش می‌دهد، صرف‌نظر از این که اندازه شبکه چه باشد. (۱۴)



شکل ۱۵-۴. مثالی از یک شبکه منظم. این شبکه حلقه‌ای از گره‌هاست که در آن هر گره پیوندی با دو تا از نزدیک‌ترین همسایگانش دارد.



شکل ۵-۱۵. سیم‌کشی تصادفی سه پیوند، شبکه منظم شکل ۱۵۴ را به یک شبکه دنیای کوچک تبدیل می‌کند.

این مثال‌ها خاصیت دنیای کوچک ۱۵ را نشان می‌دهد: یک شبکه این خاصیت را دارد که ارتباطات راه دور نسبتا اندکی داشته باشد اما در مقایسه با کل تعداد گره‌ها میانگین طول مسیرش کوچک باشد. شبکه‌های دنیای کوچک درعین‌حال معمولا درجه بالایی از خوشه‌ای شدن را نمایش می‌دهند: در هریک از گره‌های a،b و c اگر گره a به گره‌های b و c مرتبط باشد، b و c هم احتمالا به یکدیگر مرتبط هستند. این امر در شکل ۱۵۵ آشکار نیست، چون در این شبکه اکثر گره‌ها تنها با نزدیک‌ترین همسایگانشان پیوند دارند. اما اگر شبکه واقعی‌تر بود، یعنی اگر هر گره در ابتدا با چند همسایه مرتبط بود، خوشه‌ای بودن بیشتر می‌شد. یک نمونه آن، شبکه اجتماعی خود من است - محتمل‌تر است که با دوستان دوستانم دوست باشم تا با هر آدم تصادفی دیگری.

به عنوان بخشی از پژوهش‌شان، واتس و اشتروگاتز سه نمونه از شبکه‌های دنیای واقعی مربوط به حیطه‌های کاملا متفاوت را بررسی کردند و نشان دادند که تمامی آنها خاصیت دنیای کوچک را دارند. اولین مورد شبکه بزرگی از ستارگان سینما بود. در این شبکه، گره‌ها معرف افراد بازیگر هستند؛ دو گره زمانی پیوند دارند که بازیگران متناظرشان در حداقل یک فیلم با هم ظاهر شده باشند، مانند تام کروز[۶۶۰] و ماکس فون سیدو[۶۶۱] (گزارش اقلیت)[۶۶۲]، یا کامرون دیاز[۶۶۳] و جولیا رابرتز[۶۶۴] (عروسی بهترین دوست من.)[۶۶۵] این شبکه اجتماعی خاص از طریق بازی معروف به کوین بیکن[۶۶۶] مورد توجه قرار گرفته است، که در آن بازیگر می‌کوشد کوتاه‌ترین مسیر شبکه از هر بازیگر معین تا هنرپیشه بسیار پرکار کوین بیکن را بیابد.۱۶ بی‌تردید اگر هنرپیشه سینما باشید و مسیر کوتاهی تا کوین بیکن نداشته باشید، در حرفه‌تان چندان موفق

نبوده‌اید.

دومین مثال شبکه برق غرب ایالات متحده است. در اینجا، گره‌ها معرف موجودیت‌های اصلی در شبکه برق هستند: مولدهای برق، مبدل‌ها، و ایستگاه‌های فرعی برق. پیوندها معرف خطوط انتقال ولتاژ بالا مابین موجودیت‌ها هستند. مثال سوم مغز کرم سی. الگانس[۶۶۷] است، که در آن نورون‌ها گره هستند و ارتباط بین نورون‌ها پیوند هستند. (شانس واتس و اشتروگاتز این بود که عصب‌پژوهان تا پیش از آن هر نورون و ارتباط‌های عصبی مغز کوچک این کرم دون‌پایه را نقشه‌برداری کرده بودند.)(۱۷)

هیچ‌کس گمان نمی‌کرد که دنیای "پرقدرت" ستارگان سینما و شبکه برق (دنیای کم‌قدرت مغز کرم که جای خود را دارد) هیچ‌گونه همانندی جالبی داشته باشند، اما واتس و اشتروگاتز نشان دادند که همه آنها درواقع شبکه‌های دنیای کوچک[۶۶۸] هستند، با میانگین طول مسیر کوتاه و خوشه‌بندی بالا.

مقاله سال ۱۹۹۰ واتس و اشتروگاتز با نام "دینامیک جمعی "شبکه‌های دنیای کوچک ""، که امروزه مشهور است، جرقه‌ای بود که فعالیت در علم جدید شبکه را شعله‌ور کرد. دانشمندان نمونه‌های بیشتر و بیشتری از شبکه‌های دنیای کوچک را در دنیای واقعی می‌یابند، که درباره برخی از آنها در فصل بعد توضیح خواهم داد. تکامل طبیعی و اجتماعی و فنی به ظاهر اندام‌واره‌ها و جوامع و مصنوعاتی را تولید کرده است که از چنین ساختاری برخوردار هستند. چرا؟ این فرضیه مطرح شده است که حداقل دو اجبار تکاملی و انتخابی[۶۶۹] متضاد مسئولیت دارند: نیاز به این‌که اطلاعات در درون سیستم به سرعت حرکت کند، و هزینه بالای ایجاد و حفظ ارتباط‌های راه دور قابل اطمینان. شبکه‌های دنیای کوچک با داشتن میانگین طول مسیر کوتاه در میان گره‌ها و به رغم داشتن تعداد نسبتا کمی از ارتباط‌های راه دور، هر دو مشکل را حل می‌کنند.

پژوهش‌های بیشتر نشان دادند که شبکه‌هایی که با روش مطرح شده واتس و اشتروگاتز شکل گرفته‌اند - در آغاز با یک شبکه منظم و سپس با سیم‌کشی مجدد و تصادفی بخش کوچکی از ارتباط‌ها - در عمل از نحوه توزیع درجه در بسیاری از شبکه‌های دنیای واقعی برخوردار نیستند. (۱۸) چندی نگذشت که توجه زیادی به مدل متفاوتی از شبکه شد، مدلی که شبکه‌های بی‌مقیاس را به وجود می‌آورد - نوع خاصی از شبکه دنیای کوچک که شباهت بیشتری با شبکه‌های دنیای واقعی دارد.

شبکه‌های بی‌مقیاس

بی‌تردید در وب جهانی جستجو کرده‌اید، و به احتمال زیاد موتور جستجوی شما گوگل بوده است. (اگر مدت‌ها پس از سال نوشتن این کتاب - یعنی سال ۲۰۰۸ - این کتاب را می‌خوانید، شاید موتور جستجوی برتر دیگری را یافته باشید.) در روزهای وب سپری شده ماقبل گوگل، موتورهای جستجو صرفا این‌گونه کار می‌کردند: در نمایه‌ای که هر واژه موجود انگلیسی را به فهرستی از صفحات وب مرتبط می‌کرد که شامل آن واژه بودند، صرفا به دنبال واژه‌های موجود در پرسش جستجوی شما می‌گشتند. برای مثال، اگر پرسش جستجوی شما دو کلمه "سوابق سیب" بود، موتور جستجو فهرستی از تمامی صفحات وب را به دست می‌داد که شامل آن دو واژه بودند، که بر مبنای تعداد دفعاتی که آن دو واژه در یک صفحه معین نزدیک به هم ظاهر شده بودند مرتب شده بود. احتمال این که به یک صفحه وب درباره تاریخچه قیمت سیب در ایالت واشینگتن برسید به همان اندازه بود که به سوابق سریع‌ترین زمان مسابقه بزرگ سیب در

تاسمانی برسید یا به صفحه‌ای درباره نام آهنگ مشهور بیتل‌ها در سال ۱۹۶۸. در آن روزها کار شاقی بود که در میان انبوه صفحاتی که به موضوع مربوط نبودند صفحه‌ای را پیدا کنید که واقعا به دنبال آن بودید.

در دهه ۱۹۹۰، گوگل به کمک یک ایده انقلابی برای عرضه نتایج جستجوی وب، به نام "رتبه صفحه"[۶۷۰]، به تمامی این ماجرا پایان داد. ایده این بود که اهمیت (و احتمالا ربط) یک صفحه وب تابع این است که چه تعداد صفحه دیگر با آن پیوند دارند (تعداد "پیوند ورودی[۶۷۱]")، برای مثال، اکنون که این مطلب را می‌نویسم، صفحه وب حاوی گزارش باغداران امریکایی و غربی درباره قیمت‌های سیب در ایالت واشینگتن در سال ۲۰۰۸، ۳۸ پیوند ورودی دارد. (۱۹) صفحه وب حاوی اطلاعاتی درباره مسابقه بزرگ سیب درتاسمانی ۴۷ پیوند ورودی دارد. (صفحه وب www.beatles.com)حدود ۲۷۰۰۰ پیوند ورودی دارد. این صفحه از جمله صفحاتی است که در بالای فهرست مربوط به "سوابق سیب" می‌آید. دو مورد دیگر در قعر فهرستی از یک میلیون صفحه "یافته شده[۶۷۲]" مربوط به این پرسش قرار می‌گیرند. آلگوریتم اصلی رتبه صفحه ایده بسیار ساده‌ای بود، اما موتور جستجوی بی‌نهایت پیشرفته‌تری را به وجود آورد که از طریق آن مربوط‌ترین یافته یک پرسش معین معمولا در بالای فهرست قرار می‌گرفت.

اگر به وب به عنوان یک شبکه نگاه کنیم، و صفحات وب را گره بدانیم، و ابرپیوندها پیوند یک صفحه به دیگری باشند، متوجه می‌شویم که رتبه صفحه تنها به این دلیل کارکرد دارد که این شبکه ساختار خاصی دارد:

همچون شبکه‌های اجتماعی معمول، تعداد زیادی از صفحات درجه پایینی دارند (تعداد نسبتا کمی پیوند ورودی)، و تعداد بسیار کمتری صفحات درجه بالا (یعنی تعداد نسبتا زیادی پیوند ورودی). افزون بر این، تعداد پیوند ورودی در صفحات بسیار متفاوت است و این امر رتبه‌بندی آنها را معنی‌دار می‌کند - برای این‌که بتوان در میان صفحات تفاوت گذاشت. به عبارت دیگر، وب از یک توزیع درجه نامنظم برخوردار است و ساختار یک هاب را دارد، که قبلا درباره آن توضیح دادم. وب درعین‌حال خوشه‌بندی بالایی را از خود نشان می‌دهد -"جوامع" متفاوت صفحات وب پیوندهای متقابل بسیار زیادی با هم دارند.

در واژگان علم شبکه، وب یک شبکه بی‌مقیاس است. این امر به یکی از مورد توجه‌ترین مفاهیم در تحقیقات سیستم‌های پیچیده تبدیل شده است.

پس اجازه بدهید با نگاهی ژرف‌تر به توزیع درجه وب و معنای این‌که بی‌مقیاس بودن چیست، کمی این موضوع را بکاویم.

توزیع درجه در وب

چگونه می‌توانیم به توزیع درجه وب پی ببریم؟ دو نوع پیوند وب وجود دارد:

پیوندهای ورودی و پیوندهای خروجی. یعنی، فرض کنید صفحه من یک پیوند با صفحه شما دارد اما معکوسش وجود ندارد: من یک پیوند خروجی دارم و شما یک پیوند ورودی. باید به این موضوع که کدام یک از پیوندها شمرده می‌شوند به طور مشخص برخورد کرد. آلگوریتم اصلی رتبه صفحه فقط پیوندهای ورودی را در نظر داشت و پیوندهای خروجی را نادیده می‌گرفت - در این مبحث من هم همین کار را می‌کنم. تعداد پیوندهای ورودی یک صفحه را درجه ورودی آن صفحه می‌نامیم.

حال، توزیع درجه ورودی وب چیست؟ شمارش تمام صفحات وب و پیوندهای وب کار سختی است. هیچ فهرست کاملی در جایی ذخیره نشده است و به طور مداوم پیوندهای جدیدی افزوده و برخی از قدیمی‌ها حذف می‌شوند. اما، چند تن از دانشمندان وب کوشیده‌اند با استفاده از روش‌های نمونه‌برداری و خزش[۶۷۳] هوشمند در وب مقادیر تقریبی آن را محاسبه کنند.

مقدار تخمینی تعداد کل صفحات وب به مقیاس قابل ملاحظه‌ای متفاوت است؛ تا سال ۲۰۰۸، تخمین‌هایی که من شاهد آن بودم از ۱۰۰ میلیون تا ۱۰ میلیارد بود، و روشن است که وب کماکان در حال رشد است.

چندین گروه تحقیقاتی مختلف متوجه شده‌اند که توزیع درجه ورودی وب را می‌توان با قاعده ساده‌ای توضیح داد: تعداد صفحاتی که درجه ورودی معینی دارند به طور تقریبی متناسب است با ۱ بخش بر مربع درجه ورودی آن. فرض کنید که درجه ورودی را با k نشان دهیم. نتیجه می‌شود:

تعداد صفحات وب با درجه ورودی k متناسب است با

$$\frac{۱}{k^۲}$$

در مورد توان واقعی k در نوشتارهای علمی اختلاف وجود دارد اما در هر صورت نزدیک به ۲ است (برای توضیح بیشتر به یادداشت‌ها نگاه کنید.)(۲۱) کاشف به عمل آمده که این قاعده تنها در مورد درجه ورودی (k) چند هزار یا بیشتر با داده سازگار است.

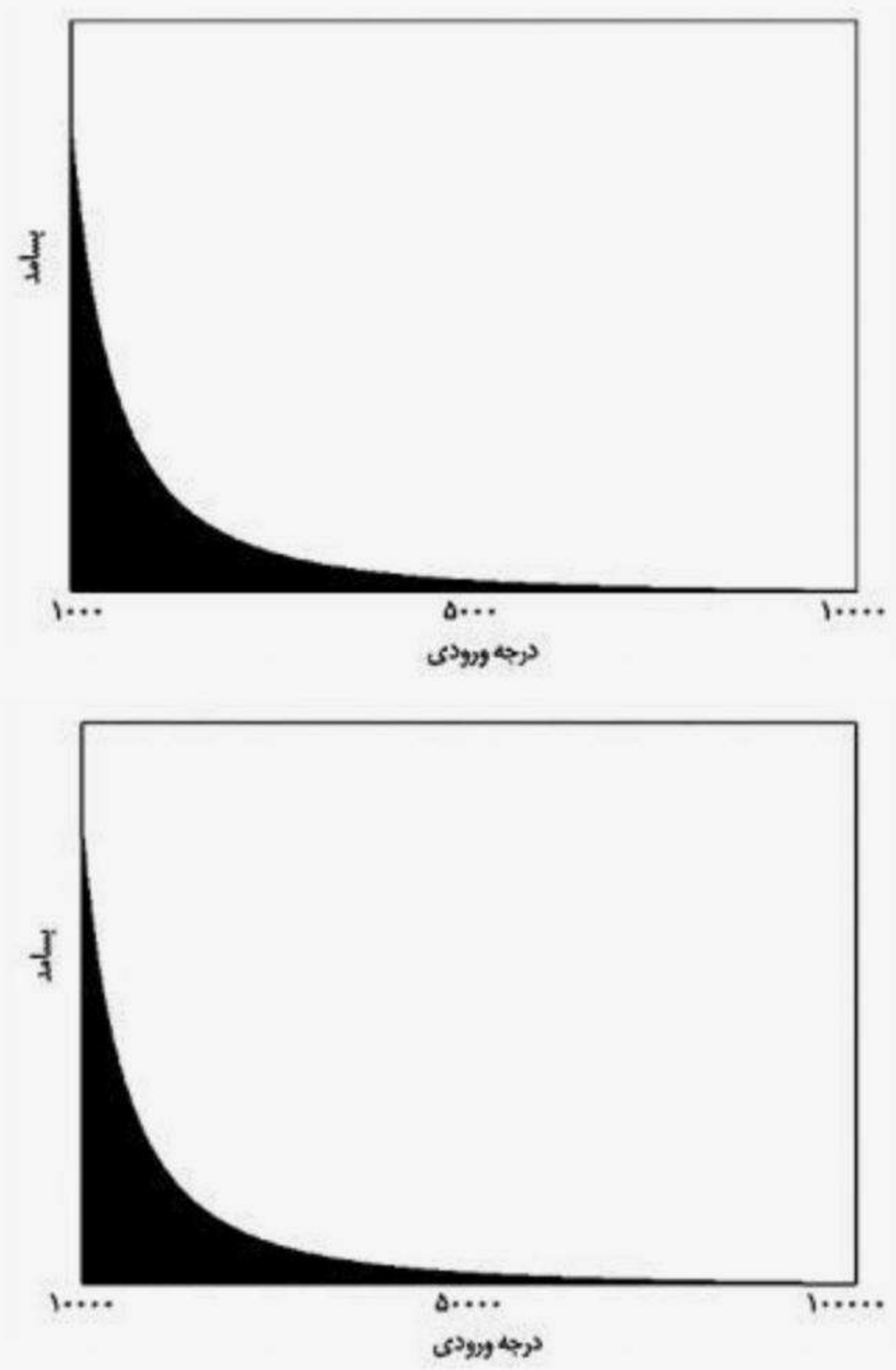
برای نشان دادن این‌که چرا وب "بی‌مقیاس" نامیده می‌شود، توزیع درجه ورودی را به صورتی که قاعده ساده بالا معینش می‌کند و با سه مقیاس مختلف ترسیم کرده‌ام. این منحنی‌ها در شکل ۱۵۶ نشان داده شده است.

اولین منحنی (بالا) توزیع را برای درجه ورودی ۹۰۰۰ نشان می‌دهد، که از ۱۰۰۰ آغاز می‌شود، و نزدیک به مقداری است که قاعده در حد واقع‌بینانه‌ای درست است. همانند شکل ۳-۱۵ مقادیر درجه ورودی در بین ۱۰۰۰ تا ۱۰.۰۰۰ در محور افقی نشان داده شده‌اند. و بسامد آنها (تعداد

صفحاتی که درجه ورودی معینی دارند) با ارتفاع خانه‌هایی در امتداد محور عمودی. در اینجا آن‌قدر خانه وجود دارد که ناحیه سیاه یکپارچه‌ای را شکل می‌دهند.

منحنی‌ها مقادیر واقعی بسامد را نشان نمی‌دهند چون می‌خواهم بر شکل منحنی تمرکز کنم (صرف‌نظر از این‌که تا جایی که می‌دانم، هیچ‌کس تخمین خوبی از مقادیر واقعی بسامدها در دست ندارد). اما، می‌توانید ببینید که تعداد نسبتا بزرگی از صفحات $k = ۱۰۰۰$ پیوند ورودی دارند، وقتی درجه ورودی افزایش پیدا می‌کند این بسامد به سرعت سقوط می‌کند. در جایی بین $k = ۵۰۰۰$ و $k = ۱۰.۰۰۰$ تعداد صفحاتی که k پیوند ورودی دارند در مقایسه با تعداد صفحاتی که ۱,۰۰۰ پیوند ورودی دارند آن‌قدر کوچک است که ارتفاع خانه‌های متناظر اساسا صفر است.

چه اتفاقی می‌افتد اگر مقیاس این منطقه "ارتفاع نزدیک به صفر" را عوض کنیم - یعنی روی آن به جلو زوم کنیم؟ دومین منحنی (میانی) توزیع درجه ورودی از $k = ۱۰.۰۰۰$ تا $k = ۱۰۰.۰۰۰$ را نشان می‌دهد. در اینجا مقیاس منحنی را عوض کرده‌ام تا خانه $k = ۱۰.۰۰۰$ در این منحنی همان ارتفاع خانه $k = ۱۰۰۰$ منحنی قبل را داشته باشد. در این مقیاس، تعداد نسبتا زیادی از صفحات با $k = ۱۰.۰۰۰$ پیوند ورودی وجود دارد، و در این حال، در جایی بین $k = ۵۰.۰۰۰$ و $k = ۱۰۰.۰۰۰$ خانه‌هایی با "ارتفاع نزدیک به صفر" به دست می‌آوریم.



شکل ۶-۱۵. شکل تقریبی توزیع درجه ورودی وب با سه مقیاس مختلف

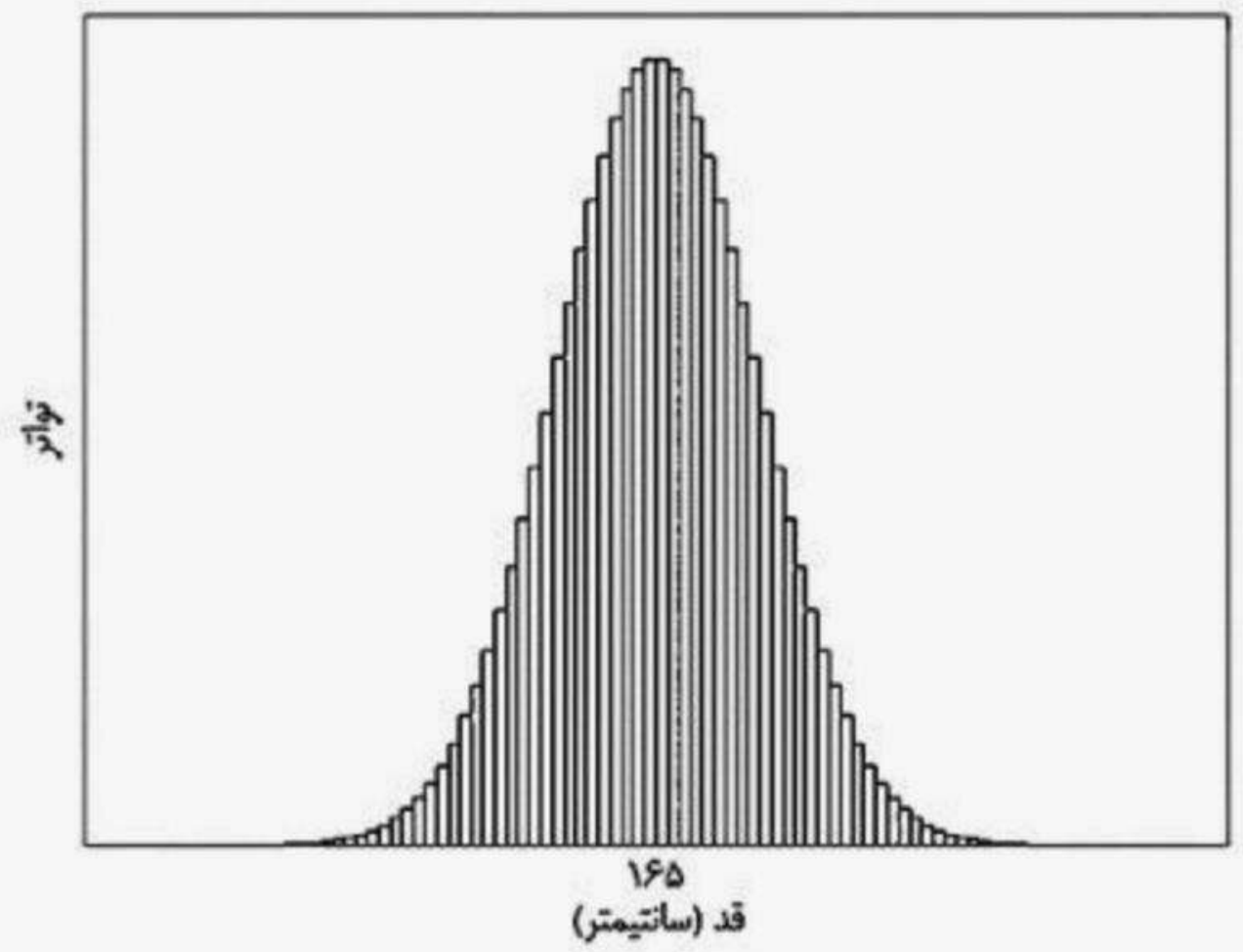
اما موضوع دیگری تکان‌دهنده است - به استثنای اعداد محور افقی، منحنی دوم با اولی همانند است. گرچه منحنی را با توزیع بیشتر از ۹۰.۰۰۰ و نه ۹۰۰۰ رسم کرده‌ایم، این امر کماکان صدق

@degar_goonesh

می‌کند -که دانشمندان آن را مرتبه بزرگی[۶۷۴] بیشتر می‌نامند.
سومین منحنی (پایینی) همان پدیده را در میزانی بازهم بزرگتر نشان می‌دهد. وقتی توزیع را برحسب k در فاصله ۱۰۰.۰۰۰ تا ۱ میلیون ترسیم می‌کنیم، شکل یکسان می‌ماند.
توزیعی مانند این مورد خودماننده نامیده می‌شود و در هر میزانی که منحنی را ترسیم کنید شکل یکسانی خواهد داشت. به بیان فنی‌تر "با تغییر مقیاس ثابت می‌ماند." این همان منظوری است که دانش‌واژه بی‌مقیاس می‌رساند. دانش‌واژه خودمانندگی به نظر آشنا می‌آید. در فصل هفتم، در مبحث فراکتال‌ها با آن برخورد داشتیم. در اینجا واقعا ربطی با فراکتال‌ها وجود دارد؛ دراین‌باره مطالب بیشتری در فصل هفدهم می‌آید.

توزیع‌های بی‌مقیاس در تقابل با خم‌های زنگدیس[۶۷۵]

گفته می‌شود که شبکه‌های بی‌مقیاس هیچ‌گونه "شاخصه‌ای[۶۷۶]" ندارند. مقایسه یک توزیع بی‌مقیاس با توزیع دیگری که خیلی مورد مطالعه قرار گرفته، یعنی به اصطلاح خم زنگدیس، این موضوع را به بهترین نحو توضیح می‌دهد.
فرض کنید منحنی توزیع قد انسان‌های بالغ دنیا را ترسیم کرده‌ایم.
کوتاه‌ترین شخص (بالغ) در دنیا کمی بیش از ۲ فوت (حدود ۷۰ سانتیمتر) قد دارد. بلندترین شخص نزدیک به ۹ فوت (حدود ۲۷۰ سانتیمتر) قد دارد.
میانگین قد افراد بالغ حدود ۵ فوت و پنج اینچ (۱۶۵ سانتیمتر) است، و اکثریت عظیمی از افراد بالغ قدی بین ۵ تا ۷ فوت دارند.
توزیع قد انسان‌ها شباهتی با شکل ۱۵۷ دارد. شکل زنگ مانند منحنی دلیل این است که چرا اغلب خم زنگدیس نامیده می‌شود. چیزهای بسیاری شکل توزیع تقریبی زنگ مانند دارند - قد، وزن، نتایج برخی از آزمون‌ها، امتیاز تیم‌های برنده در بازی بسکتبال، فراوانی گونه‌های مختلف، و غیره. درواقع، به دلیل این‌که بسیاری از مقادیر در دنیای طبیعت این توزیع را دارند، خم زنگدیس توزیع طبیعی[۶۷۷] هم نامیده می‌شود.
توزیع‌های طبیعی با داشتن یک مقیاس مشخص تعریف می‌شوند ـ برای مثال ۲۷۰-۷۰ سانتیمتر برای قد، و ۱۰۰-۰ برای نتایج امتحان. در یک توزیع زنگدیس، مقداری که بالاترین بسامد را دارد میانگین است ـ توزیع کمابیش همگون است. اگر درجه‌های ورودی در وب توزیع طبیعی داشتند، رتبه صفحه به هیچ‌وجه سودمند از کار درنمی‌آمد، چون تقریبا تمامی صفحات وب دارای تعداد پیوندهای ورودی نزدیک به میانگین بودند.
صفحه وب www.beatles.com در مقایسه با هر صفحه دیگری که شامل عبارت "سوابق سیب" بود، از تعداد یکسانی پیوند ورودی برخوردار بود؛ به این ترتیب امکان نداشت که پیوندهای ورودی را به مثابه روشی برای رتبه‌بندی این‌گونه صفحات به ترتیب ربط احتمالی به کار گرفت.



شکل ۷-۱۵. توزیع خم زنگدیس (طبیعی)[۶۷۸] قد انسان‌ها.

خوشبختانه برای ما (و حتی بیشتر برای سهامداران گوگل) توزیع درجه وب ساختاری بی‌مقیاس دارد و نه زنگ‌مانند. شبکه‌های بی‌مقیاس چهار خاصیت قابل توجه دارند:

۱. تعداد نسبتا کمی از گره‌ها که درجه بالایی دارند. (هاب) ۲. گره‌هایی که درجه آنها در طیف وسیعی از مقادیر قرار دارد. (یعنی، ناهمگنی[۶۷۹] مقادیر درجه) ۳. خودمانندگی ۴. ساختار دنیای کوچک.

تمام شبکه‌های بی‌مقیاس خاصیت دنیای کوچک را دارند، گرچه تمامی شبکه‌هایی که خاصیت دنیای کوچک را دارند لزوما بی‌مقیاس نیستند.

به عبارت علمی‌تر، یک شبکه بی‌مقیاس همیشه دارای توزیع درجه با قانون توان[۶۸۰] است. به یاد بیاورید که توزیع تقریبی درجه ورودی در وب به شرح زیر است:

تعداد صفحات وب با درجه ورودی k متناسب است با;

$$\frac{۱}{k^۲}$$

شاید از ریاضیات دوره دبیرستان به خاطر داشته باشید که

$$\frac{۱}{k^۲}$$

را می‌توان به این صورت نیز نوشت:.

$$k^{-۲}$$

این یک "قانون توان با نمای ۲-است." به

همین شکل

$$\frac{1}{k}$$

یا معادل آن

$$k^{-1}$$

یک "قانون توان با نمای ۱- است."

به‌طور کلی، توزیع قانون توان شکل

$$x^d$$

را دارد که x مقداری مانند درجه ورودی است. عدد اصلیی که توزیع را توصیف می‌کند توان d است؛ توان‌های متفاوت توزیع‌هایی با اشکال متفاوت را موجب می‌شوند.

در فصل هفدهم، مطالب بیشتری درباره قوانین توان مطرح خواهم کرد.

موضوع مهمی که در حال حاضر باید به خاطر نگه دارید این است که توزیع درجه با قانون توان = شبکه بی‌مقیاس.

انعطاف‌پذیری شبکه

یکی از خواص مهم شبکه‌های بی‌مقیاس انعطاف‌پذیری آنها در قبال حذف گره‌هاست. به این معنی که اگر مجموعه‌هایی تصادفی از گره‌ها (همراه با پیوندهایشان) از یک شبکه بزرگ بی‌مقیاس حذف شوند، خواص بنیادی شبکه تغییر نمی‌کند؛ کماکان توزیع ناهمگون درجه، میانگین طول مسیر کوتاه، و خوشه‌بندی قدرتمند خواهد داشت. حتی اگر تعداد گره‌های حذف شده نسبتا زیاد باشد، این امر باز هم صدق می‌کند. دلیلش ساده است: اگر گره‌هایی به طور تصادفی حذف شوند، به احتمال بسیار زیاد گره‌هایی با درجه پایین هستند، چون اینها تقریبا شامل تمامی گره‌های شبکه هستند.

حذف چنین گره‌هایی تأثیر کمی بر توزیع کلی درجه و طول مسیر دارد.

مثال‌های متعددی از این امر را در اینترنت و وب می‌بینیم. بسیاری از کامپیوترهای موجود در اینترنت در تمام مدت خراب می‌شوند یا برداشته می‌شوند، اما این امر هیچ تأثیر چشمگیری بر عملکرد اینترنت یا طول میانگین مسیر آن ندارد. به همین ترتیب با وجود این‌که صفحات منفرد و پیوندهای آنها در تمام مدت حذف می‌شوند، به طور عمده تأثیری بر وب‌گردی[۶۸۱] ندارند.

اما برای این انعطاف‌پذیری بهایی پرداخته می‌شود: اگر یک یا چند هاب حذف شوند، شبکه احتمالا تمامی خواص بی‌مقیاس بودن خود را از دست می‌دهد و دیگر کارکرد مناسبی ندارد. برای مثال، برف و بارانی در شیکاگو (یک هاب بزرگ خطوط هوایی) احتمالا موجب تأخیر یا لغو

پروازها در سراسر کشور می‌شود. یک نقص فنی در گوگل در سراسر وب آشوب به پا می‌کند. در یک کلام، شبکه‌های بی‌مقیاس در مقابل حذف تصادفی گره‌ها انعطاف‌پذیر هستند، اما اگر یک هاب خراب شود یا در معرض حمله قرار بگیرد بسیار ضربه‌پذیر هستند.

در فصل بعد به چند مثال از شبکه‌های دنیای واقعی می‌پردازم که از قرار معلوم از خواص دنیای کوچک یا بی‌مقیاس برخوردارند، و شما را با چند نظریه آشنا می‌کنم که توضیح می‌دهند آنها چگونه در این مسیر افتادند.

فصل شانزدهم: کاربدر علم شبکه در شبکه‌های دنیای واقعی

تفکر شبکه‌ای ظاهرا به ذهن بسیاری از انسان‌ها می‌رسد. طبق جستجویی که در وب‌سایت Google Scholar انجام دادم، در زمان نوشتن این سطور بیش از ۱۴۰۰۰ مقاله دانشگاهی درباره دنیای کوچک یا شبکه‌های بی‌مقیاس در پنج سال اخیر (از سال ۲۰۰۳) نوشته شده است که نزدیک به ۳۰۰۰ مورد آنها تنها در سال گذشته بوده. نظری به حدود ۱۰۰ عنوان ابتدای فهرست انداختم و متوجه شدم یازده رشته متفاوت بازتاب یافته‌اند، از فیزیک و علوم کامپیوتر گرفته تا زمین‌شناسی و علم اعصاب. اگر بررسی جامع‌تری کرده بودم بی‌تردید طیف رشته‌هایی که می‌یافتم به میزان چشمگیری افزایش می‌یافت.

در این فصل مثال‌های متنوعی از شبکه‌های دنیای واقعی را مرور می‌کنم و توضیح می‌دهم که چگونه پیشرفت‌های علم شبکه بر شیوه اندیشیدن دانشمندان بسیاری از رشته‌ها درباره شبکه‌ها تأثیر می‌گذارند.

چند مثال از شبکه‌های دنیای واقعی

مغز

چند گروه از پژوهشگران شواهدی یافته‌اند که مغز خواص دنیای کوچک را دارد. می‌توان مغز را به صورت شبکه‌ای در چند سطح متفاوت از توضیح درنظر گرفت؛ برای مثال نورون‌ها را به عنوان گره و سیناپس‌ها را به عنوان پیوند، یا تمامی نواحی کارکردی را به عنوان گره و ارتباط‌های وسیع‌تر بین آنها (یعنی گروهی از ارتباط‌های عصبی) را به عنوان پیوند در نظر گرفت. همان‌طور که در فصل قبل ذکر کردم، عصب‌پژوهان نورون‌ها و ارتباط‌های عصبی مغز کرم سی. الگانس را به طور کامل نقشه‌برداری کرده، و نشان داده‌اند که یک شبکه دنیای کوچک را شکل می‌دهد. به‌تازگی عصب‌پژوهان ساختار ارتباطی نواحی کارکردی سطح بالای مغز حیواناتی مثل گربه، میمون ماکاک[۶۸۲] و حتی انسان را نقشه‌برداری کرده و در آن ساختارها نیز خاصیت دنیای کوچک را مشاهده کرده‌اند. (۱)

چرا تکامل آن شبکه‌های مغزیی را ترجیح داده که خاصیت دنیای کوچک را دارند؟ قابلیت انعطاف شاید یکی از دلایل اصلی باشد: می‌دانیم که تک نورون‌ها در تمام مدت می‌میرند، اما خوشبختانه، مغز به کارکرد طبیعی خود ادامه می‌دهد. هاب‌های مغز ماجرای متفاوتی‌اند: اگر سکته یا حادثه ناگوار دیگر، یا نوعی بیماری، بر آنها تأثیر بگذارد، برای مثال بر هیپوکامپ[۶۸۳] (که هاب شبکه‌هایی است که حافظه کوتاه‌مدت را کدگذاری می‌کنند)، آسیب می‌تواند کاملا ویرانگر باشد.

افزون بر این، پژوهشگران این نظریه را مطرح کرده‌اند که یک توزیع درجه بی‌مقیاس امکان سازش مطلوبی را بین دو حالت رفتار مغز فراهم می‌کند: پردازش در نواحی محلی و مجزا - مثل

قشر بینایی[۶۸۴] یا نواحی زبان ـ در مقایسه با پردازش سراسری اطلاعات، برای مثال وقتی اطلاعات از قشر بینایی به نواحی مجری پردازش زبان و برعکس منتقل می‌شود.

اگر هر نورون به هر نورون دیگری مرتبط می‌بود، یا تمامی نواحی متفاوت کارکردی به طور کامل به یکدیگر مرتبط می‌بودند، مغز می‌بایست برای ارسال سیگنال‌ها از طریق تعداد بسیار زیادی پیوند ارتباطی، حجم عظیمی از انرژی را به مصرف می‌رساند. از قرار معلوم تکامل، ساختارهایی را انتخاب کرده است که از نظر مصرف انرژی کارآتر بوده‌اند. افزون بر این، برای این‌که اندازه مغز با آن ارتباط‌ها متناسب باشد باید خیلی بزرگ‌تر می‌بود. از سوی دیگر، اگر در مغز پیوندهای راه دور وجود نداشت، برای این‌که نواحی مختلف با یکدیگر تبادل اطلاعات کنند باید زمان بسیار زیادی صرف می‌شد.

ظاهرا اندازه مغز انسان - و اندازه جمجمه متناظر با آن - به شکل استادانه‌ای متعادل شده‌اند، از یک‌سو، برای این‌که از عهده شناخت کارآمد و پیچیده‌ای برآید به اندازه کافی بزرگ است و از سوی دیگر برای این‌که مادر بتواند نوزاد را به دنیا بیاورد، به اندازه کافی کوچک است. این نظر مطرح است که خاصیت دنیای کوچک دقیقا همان چیزی است که این تعادل را امکان‌پذیر می‌کند.

همچنین گمان بسیاری بر این است که همگاهی، که در آن گروه‌های نورون به طور مکرر و همزمان آتش می‌کنند، ساز و کار اصلی انتقال کارآمد اطلاعات در مغز است، و روشن شده است که ساختار ارتباطی دنیای کوچک این‌گونه همگاهی را به شدت تسهیل می‌کند.

شبکه‌های تنظیم ژنتیک(۲) همان‌طور که در فصل هفتم یادآور شدم، انسان حدود ۲۵۰۰۰ ژن دارد.

تقریبا مساوی با گیاه خردل آرابیدوپسیس. آنچه ظاهرا پیچیدگی انسان را مثلا در مقایسه با گیاهان، پدید می‌آورد تعداد ژن‌ها نیست بلکه نحوه سازمان یافتن ژن‌ها در شبکه است.

ژن‌های زیادی هستند که کارکرد آنها تنظیم سایر ژن‌هاست - یعنی کنترل کردن این‌که آیا ژن‌های تنظیم شده نمود پیدا می‌کنند یا نمی‌کنند.

یک نمونه ساده و شناخته شده تنظیم ژن، کنترل سوخت و ساز لاکتوز در باکتری ای. کولی[۶۸۵] است. این باکتری به طور معمول از گلوکز تغذیه می‌کند، اما می‌تواند لاکتوز را هم بسوزاند. توانایی سوزاندن لاکتوز مستلزم این است که سلول از سه آنزیم خاص پروتئین برخوردار باشد که هر کدام را ژن متفاوتی کدگذاری می‌کند. اجازه بدهید این ژن‌ها را A و B و C بنامیم. ژن چهارمی وجود دارد که پروتئینی به نام مهارکننده[۶۸۶] لاکتوز را کدگذاری می‌کند، که با ژن‌های A و B و C پیوند برقرار می‌سازد، در اساس آنها را خاموش می‌کند. اگر در محیط محلی باکتری لاکتوزی وجود نداشته باشد، مهارکننده‌های لاکتوز به طور مداوم شکل می‌گیرند و هیچ‌گونه

سوخت و ساز لاکتوز رخ نمی‌دهد. اما اگر باکتری به ناگهان خود را در محیطی بدون گلوکز اما غنی از لاکتوز ببیند، مولکول‌های لاکتوز با مهارکننده پیوند برقرار می‌سازند و آن را از ژن‌های A و B و C جدا می‌کنند، و پس از آن به تولید آنزیم‌هایی می‌پردازند که امکان سوخت و ساز لاکتوز را فراهم می‌کنند.

برهم‌کنش‌های تنظیم‌کننده‌ای مثل این‌که برخی بسیار بغرنج‌تر هستند، قلب و روح پیچیدگی در علم ژنتیک هستند. از همان اوایل دهه ۱۹۶۰، تفکر شبکه‌ای در شناخت این‌گونه برهم‌کنش‌ها نقش داشت، که مثال بارز آن نوشته‌های استوارت کافمن[۶۸۷] است (دراین‌باره در فصل هجدهم بیشتر خواهم نوشت.) به‌تازگی گروهی از دانشمندان شبکه که به ژن‌شناسان پیوسته‌اند، نشان داده‌اند که حداقل برخی از شبکه‌های مؤثر در این‌گونه برهم‌کنش‌ها تا حدودی بی‌مقیاس هستند. در اینجا، گره‌ها ژن‌های تک هستند، و هر گره با تمامی ژن‌های دیگری که تنظیم آنها را به عهده دارد (اگر موردی وجود داشته باشد) پیوند برقرار می‌کند.

قابلیت انعطاف برای شبکه‌های تنظیم‌کننده ژنتیک اجباری است.

فرایندهای نسخه‌برداری و تنظیمی ژن با کمال فاصله زیادی دارند؛ از نظر درونی پر اشتباه هستند و اغلب از بیماری‌زاهایی مثل ویروس تأثیر می‌گیرند. داشتن یک ساختار بی‌مقیاس به این سیستم کمک می‌کند که در مقابل چنین خطاهایی مقاوم باشد.

شبکه‌های سوخت‌وساز

همان‌طور که در فصل دوازدهم توضیح دادم، سلول‌های موجود در اکثر اندام‌واره‌ها برای سوخت و ساز از صدها مسیر متفاوت استفاده می‌کنند که بسیاری از آنها با هم ارتباط متقابل دارند و واکنش‌های مربوط به سوخت و ساز را شکل می‌دهند. آلبرت-لازلو باراباسی و همکاران او ساختار شبکه‌های سوخت و ساز را در چهل و سه اندام‌واره متفاوت بررسی کردند و پی بردند که تمامی آنها با توزیع قانون توان "به خوبی سازگارند، (۳) ـ یعنی بی‌مقیاس هستند. در اینجا گره‌های شبکه زیر لابه‌های بافتی شیمیایی هستند - خوراک و محصول واکنش‌های شیمیایی. فرض می‌شود که یک زیرلایه بافتی با دیگری پیوند دارد اگر اولی در واکنشی مشارکت داشته باشد که دومی را تولید می‌کند. برای مثال، در دومین گام مسیری به نام جذب قند، زیرلایه بافتی گلوکز- ۶-فسفات[۶۸۸] زیرلایه بافتی فروکتوز- ۶-فسفات[۶۸۹] را تولید می‌کند، در نتیجه پیوندی از اولین زیرلایه بافتی با دومی در شبکه وجود دارد.

چون شبکه‌های سوخت و ساز بی‌مقیاس هستند، تعداد کمی هاب دارند و محصول تعداد زیادی از واکنش‌ها هستند که پای تعداد زیادی زیرلایه بافتی متفاوت را به میان می‌کشند. از قرار معلوم، در اندام‌واره‌های بسیار متفاوتی که تحت مطالعه قرار گرفته‌اند، این هاب‌ها عمدتا از موادشیمیایی یکسانی تشکیل شده‌اند - مواد شیمیایی‌ای که معروف به این هستند که برای ادامه حیات اساسی‌اند. این فرضیه مطرح شده است که شبکه‌های سوخت و ساز به صورت

بی‌مقیاس تکامل یافته‌اند، تا استحکام سوخت و ساز تضمین شود و "ارتباط" در میان زیرلایه‌های بافتی بهینه باشد.

واگیرشناسی[۶۹۰]

در ابتدای دهه ۱۹۸۰، در مراحل اولیه شیوع جهانی بیماری ایدز، واگیرشناسان در مرکز کنترل بیماری در آتلانتا یک مهماندار کانادایی هواپیما به نام گائتان دوگا[۶۹۱] را شناسایی کردند، که جزء گروهی از مردان مبتلا به ایدز بود که در آلوده کردن مردان دیگری در شهرهای مختلف در سراسر جهان دخالت داشتند. بعدها در رسانه‌ها به او لقب "بیمار صفر" دادند، اولین فردی در امریکای شمالی که مبتلا به این بیماری شده بود و در رواج و انتشار گسترده ویروس ایدز در ایالات متحده و نقاط دیگر مؤثر بود. گرچه مطالعات بعدی این نظریه را که دوگاس منشأ همه‌گیری بیماری در ایالات متحده است رد کردند، هیچ تردیدی وجود ندارد که دوگا که ادعا می‌کرد هر سال صدها طرف جنسی داشته، بسیاری را آلوده کرده بوده است. (۲) با ملاک‌های شبکه، دوگا یک هاب در شبکه تماس‌های جنسی بود.

واگیرشناسانی که روی بیماری‌های منتقل شده از طریق جنسی مطالعه می‌کنند اغلب شبکه‌ای از تماس‌های جنسی را تحت نظر می‌گیرند که در آن گره‌ها انسان و پیوندها بازتاب ارتباط جنسی بین دو انسان هستند. در این اواخر، گروهی متشکل از جامعه‌شناسان و فیزیکدانان داده حاصل از پیمایش رفتار جنسی در سوئد را تحلیل کردند و متوجه شدند که شبکه دارای ساختار بی‌مقیاسی است؛ از مطالعات شبکه‌های دیگر جنسی نیز نتایج مشابهی گرفته شده است. (۶) در این مورد، ضربه‌پذیری چنین شبکه‌هایی در مقابل برداشتن هاب می‌تواند سودمند باشد. پیشنهاد شده است که کمپین‌های رابطه جنسی سالم، واکسینه کردن، و سایر انواع اقدامات باید اساسا بر روی چنین هاب‌هایی متمرکز شود.

چگونه می‌توان این هاب‌ها را تشخیص داد بی‌آنکه شبکه‌های عظیم انسان‌هایی را تحت نظر گرفت، که داده مربوط به تماس‌های جنسی آنها احتمالا در دسترس نیست؟

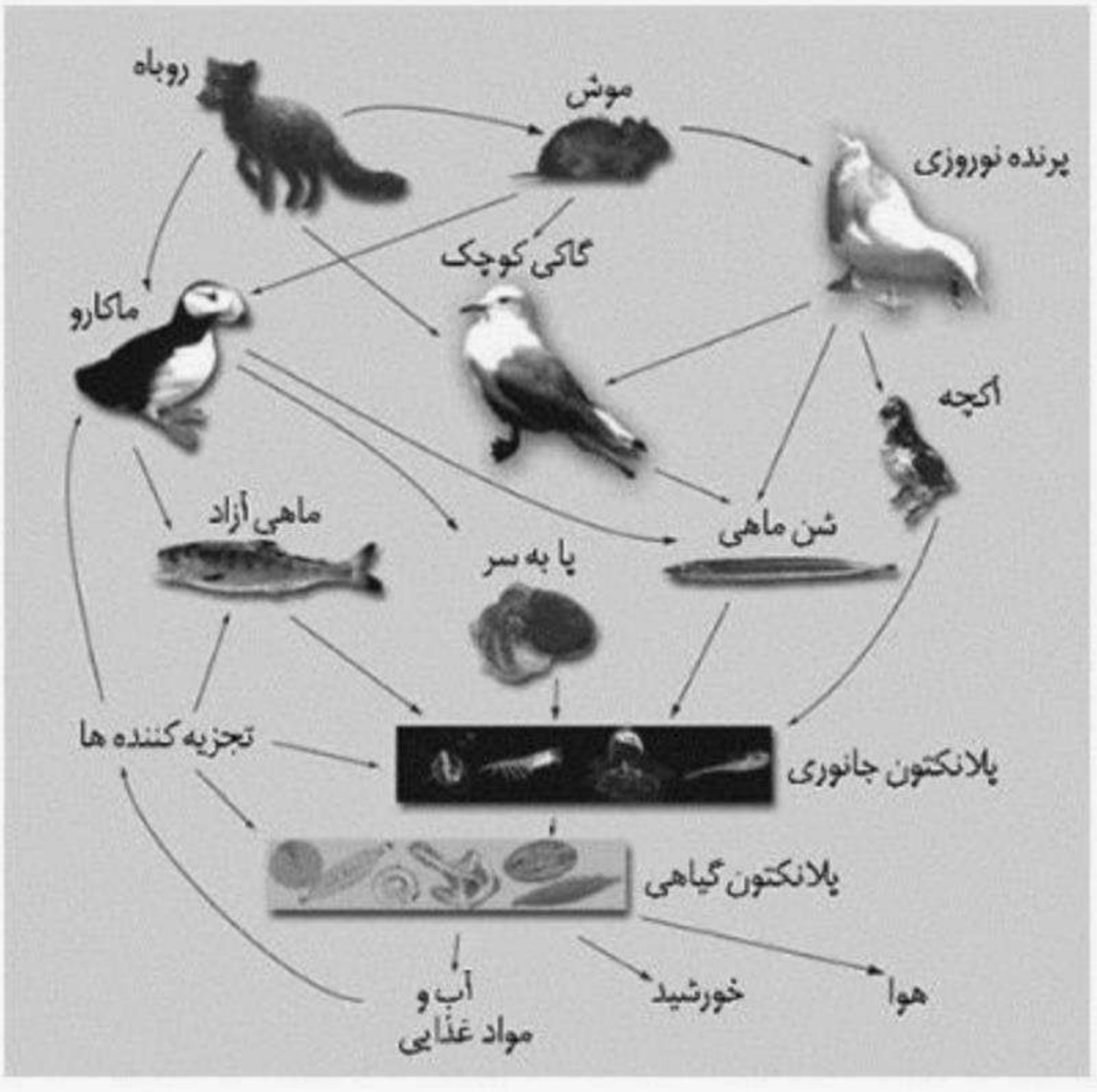
گروه دیگری از دانشمندان شبکه روش ساده اما هوشمندانه‌ای را مطرح (۷): کردند گروهی تصادفی از انسان‌ها را در میان جمعیت تحت خطر انتخاب کنید و از آنها بخواهید طرف جنسی خود را نام ببرند. بعد آن شخص را واکسینه کنید. افرادی که تعداد زیادی طرف جنسی دارند، با احتمال بیشتری نام برده شده، و طبق این طرح واکسینه می‌شوند.

البته، این استراتژی را می‌توان در مورد سایر وضعیت‌هایی به کاربرد که در آن "هدف‌گیری هاب" مورد نظر است، از جمله مبارزه با ویروس‌های کامپیوتری که از طریق ایمیل منتشر می‌شوند. در این مورد، به جای این‌که برای تشخیص ویروس به تمامی کاربران کامپیوتر متکی شویم، باید روش‌های ضد ویروس را بر کامپیوتر کسانی متمرکز کرد که فهرست آدرس ایمیل آنها بسیار بلندبالا است. (۸)

بوم‌شناسی و شبکه‌های غذایی

در علم بوم‌شناسی، مفهوم متداول زنجیره غذایی به شبکه غذایی تعمیم داده شده است، شبکه‌ای که در آن یک گره بازتاب یک گونه یا گروهی از گونه‌هاست؛ اگر گونه B بخشی از غذای گونه A باشد، از گره A به گره B یک پیوند وجود خواهد داشت. شکل ۱-۱۶ مثال ساده‌ای از یک شبکه غذایی است.

ترسیم شبکه‌های غذایی نظام‌های زیستی[۶۹۲] مختلف مدتی است که بخش مهمی از علم بوم‌شناختی بوده است. در این اواخر، پژوهشگران علم شبکه را در تحلیل این‌گونه شبکه‌ها به کار گرفته‌اند تا از تنوع زیستی و پیامدهای انواع مختلف اختلال در تنوع زیستی در نظام‌های زیستی شناخت پیدا کنند.



شکل ۱-۱۶. نمونه‌ای از یک شبکه غذایی

چندین بوم‌شناس مدعی شده‌اند که (حداقل برخی از) شبکه‌های غذایی دارای خاصیت دنیای کوچک هستند، و این‌که برخی از این شبکه‌ها از توزیع درجه بی‌مقیاس برخوردارند، که از قرار معلوم تکامل یافته است تا در رابطه با حذف تصادفی گونه‌ها، شبکه‌های غذایی را از انعطاف لازم برخوردار کند.

سایر بوم‌شناسان توافق ندارند که ساختار شبکه‌های غذایی بی‌مقیاس است، و عمدتا به دلیل مشکلات مربوط به تفسیر داده‌های دنیای واقعی، در این اواخر، جامعه پژوهشگران شاهد

مباحثات فراوانی درباره این موضوع بوده است. (۹)

اهمیت تفکر شبکه‌ای

مثال‌های بالا تنها نمونه کوچکی از شیوه‌هایی است که تفکر شبکه‌ای بر حیطه‌های گوناگون علم و فناوری تأثیر می‌گذارد. توزیع بی‌مقیاس درجه، خوشه شدن، و وجود هاب‌ها موضوعات متداولی هستند. این ویژگی‌ها موجب پیدایش شبکه‌هایی برخوردار از ارتباط دنیای کوچک و قابلیت انعطاف در مقابل حذف تصادفی گره‌ها می‌شوند. هر یک از این خواص برای شناخت سیستم‌های پیچیده اهمیت دارند، هم در علم و هم در فناوری.

در علم، تفکر شبکه‌ای برای توصیف جنبه‌های مشترک سیستم‌های پیچیده طبیعت واژگان بدیعی را فراهم می‌کند و بدین ترتیب امکان می‌دهد که شناخت حاصل از یک حیطه بر حیطه‌های متفاوت دیگری تأثیر بگذارد.

به شیوه‌ای خودارجاع[۶۹۳]، علم شبکه خود نقش هاب را بازی می‌کند - ارتباط مشترک در میان رشته‌های علمی که از جهات دیگر دور از هم هستند.

در فناوری، تفکر شبکه‌ای شیوه‌های بدیعی برای تفکر درباره مسائل سخت فراهم می‌کند، از قبیل این‌که چگونه جستجوی کارآمدی را در وب انجام دهیم؛ چگونه بیماری‌های همه‌گیر را کنترل کنیم؛ چگونه سازمان‌های بزرگ را مدیریت کنیم؛ چگونه نظام‌های زیست را حفظ کنیم؛ چگونه بیماری‌هایی را هدف قرار دهیم که بر شبکه‌های پیچیده بدن تأثیر می‌گذارند؛ چگونه سازمان‌های جنایتکار و تروریستی را هدف قرار دهیم؛ و به طور کلی‌تر، چه اشکالی از انعطاف‌پذیری و ضربه‌پذیری، ذاتی شبکه‌های طبیعی و اجتماعی و فنی هستند، و چگونه از اینگونه سیستم‌ها بهره بگیریم و از آنها محافظت کنیم.

شبکه‌های بی‌مقیاس از کجا سرچشمه می‌گیرند؟(۱۰)

هیچ‌کس از روی قصد وب را به نحوی طراحی نکرد که بی‌مقیاس باشد.

توزیع درجه وب، مانند سایر شبکه‌هایی که در بالا آوردم، پیامد غیرمترقبه شیوه شکل گرفتن آن و نحوه رشد آن است.

در سال ۱۹۹۹ فیزیکدانان آلبرت-لازلو باراباسی و ریکا آلبرت مطرح کردند که یک فرایند خاص رشد در شبکه‌ها، که آن را انضمام ترجیحی[۶۹۴] نامیدند، دلیل وجودی اکثر (اما نه تمام) شبکه‌های بی‌مقیاس دنیای واقعی را توضیح می‌دهد.۱ نظر آنها این است که شبکه‌ها به شیوه‌ای رشد می‌کنند که گره‌هایی که درجه بالایی دارند بیشتر از گره‌هایی که درجه پایینی دارند پیوند دریافت می‌کنند. افرادی که دوستان زیادی دارند تمایل دارند آدم‌های جدید بیشتری را ملاقات کنند و به این ترتیب نسبت به آدم‌هایی که دوستان کمی دارند دوستان جدید بیشتری به دست می‌آورند.

آن صفحات وب که پیوندهای ورودی زیادی دارند ساده‌تر از آنهایی که پیوندهای ورودی کمی دارند پیوند دریافت می‌کنند، که در نتیجه صفحات وب با آنهایی که درجه بالایی دارند پیوند

برقرار می‌کنند. به عبارت دیگر، پولدارها پولدارتر می‌شوند، یا شاید پیونددارها پیوند بیشتری به دست می‌آورند. باراباسی و آلبرت نشان دادند که رشد از طریق انضمام ترجیحی به توزیع درجه بی‌مقیاس می‌انجامد. (بدون اطلاع از این‌که این فرایند و پیامدش، قانون توان، پیش از آن حداقل سه بار به طور مستقل کشف شده بود.)(۱۲)

آنچه رشد شبکه‌های نقل‌قول[۶۹۵] علمی نامیده می‌شود یک مثال از تأثیرات انضمام ترجیحی (۱۳). است در اینجا گره‌ها مقالات علمی هستند، هر مقاله از تمامی مقاله‌های دیگری که از آن نقل‌قول کرده‌اند پیوند دریافت می‌کند. از این‌رو هر چه تعداد نقل‌قول از مقاله شما بیشتر باشد، درجه آن در شبکه بالاتر است. می‌توان تصور کرد که تعداد زیاد نقل‌قول نشانه‌ای از یک اثر خوب است؛ برای مثال، در محیط‌های دانشگاهی، این شاخص به طور مرتب در تصمیم‌گیری در مورد استخدام دائم، افزایش حقوق، و سایر پاداش‌ها به کار برده می‌شود. به نظر می‌رسد انضمام ترجیحی اغلب نقش بزرگی به عهده دارد. فرض کنید شما و دانشمند الف به طور مستقل دو مقاله عالی درباره موضوعی واحد نوشته‌اید. اگر من در آخرین اثرم اتفاقا از مقاله شما و نه الف نقل‌قول کنم، دیگرانی که تنها کار مرا می‌خوانند احتمال بیشتری دارد که از شما نقل‌قول کنند (معمولا بدون این‌که مقاله شما را بخوانند). افراد دیگر مقالات آنها را می‌خوانند، و احتمال بیشتری دارد که از شما نقل‌قول کنند و نه از الف. این وضعیت برای الف رو به وخامت می‌گذارد، درحالی‌که وضعیت شما رو به بهبود است، گرچه کیفیت مقالات شما و الف یکسان است. انضمام ترجیحی یکی از ساز و کارهایی است که نویسنده مالکم گلادول[۶۹۶] آن را نقطه عطف[۶۹۷] نامیده است. نقاطی که در آنها برخی فرایندها از قبیل نقل‌قول، گسترش مد، و غیره در یک چرخه بازخورد مثبت به طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کنند. در سایر حالات نقطه عطف ممکن است اشاره به خرابی‌هایی در یک سیستم داشته باشد که خرابی‌های سریع و فزاینده‌ای را در سراسر سیستم به همراه می‌آورند، موضوعی که در ادامه به آن می‌پردازم.

قانون‌های توان و شکاک‌ها

تا اینجا به طور سربسته گفتم که شبکه‌های بی‌مقیاس، به دلیل خواص انطباق‌پذیری، استحکام[۶۹۸] و ارتباط سریع مربوط به توزیع درجه قانون توان و این‌که ساز و کار شکل گرفتن آنها رشد از طریق انضمام ترجیحی است، در همه‌جای طبیعت حضور دارند. این مفاهیم شیوه‌های جدیدی از تفکر را درباره مسائل مختلف علمی در اختیار دانشمندان گذاشته‌اند.

هر چقدر هم که این ایده‌ها مجاب‌کننده به نظر برسند، فرض بر این است که دانشمندان ذاتا شکاک هستند، به‌خصوص در مورد ایده‌های جدید و نسبتا آزمایش نشده، و بیشتر از آن در مورد ایده‌هایی که مدعی جامعیت[۶۹۹]

در رشته‌های متعدد هستند. این‌گونه شکاکیت نه تنها سالم است، درعین‌حال برای پیشرفت

علم ضروری است. از این‌رو، خوشبختانه همه سوار قطار علم شبکه نشده‌اند، و حتی بسیاری که این کار را کرده‌اند در رابطه با برخی از خوشبینانه‌ترین اظهارات درباره اهمیت علم شبکه برای پژوهش در سیستم‌های پیچیده، شکاک باقی مانده‌اند. این شکاکیت بر برهان‌های زیر مبتنی است.

۱. پدیده‌های بیش از حدی را با قانون توان یا به صورت بی‌مقیاس توضیح می‌دهند. جمع‌آوری داده‌های خوب درباره توزیع درجه در شبکه‌های دنیای واقعی به طور معمول کار چندان ساده‌ای نیست. برای مثال، داده‌های مورد استفاده باراباسی و همکاران او از تعدادی پایگاه داده مبتنی بر وب منشأ می‌گرفت که زیست‌شناسانی از سراسر جهان برای آنها اطلاعات فراهم کرده بودند. این‌گونه از پایگاه‌های داده زیست‌شناختی، درعین‌حال که پرارزش‌اند، بدون استثنا ناکامل و پر از خطا هستند. برای تعیین توزیع درجه در شبکه‌های متفاوت سوخت و ساز، باراباسی و همکارانش باید به روش‌های آماری و انطباق منحنی[۷۰۰] متکی می‌شدند - روشی ناکامل که با وجود این در تحلیل داده دنیای واقعی اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد. تعدادی شبکه که با استفاده از چنین روش‌هایی "بی‌مقیاس" تشخیص داده شده بودند، بعدها درواقع توزیع غیر بی‌مقیاس[۷۰۱] از کار درآمدند. (۱۵)

همان‌طور که فیلسوف و تاریخدان زیست‌شناسی اولین فوکس کلر[۷۰۲] اشاره می‌کند، "ارزیابی کنونی از همانندی قانون‌های توان احتمالا اغراق‌گویی (۱۶)". است فیزیکدان و دانشمند شبکه کوزما شالیزی[۷۰۳] همین احساس را با عبارتی بیان می‌کند که از ادبی کمتر برخوردار است:

"گرایش ما به خیالبافی در مورد قانون‌های توان مایه بی‌آبرویی است."(۱۷) درحالی‌که این سطور را می‌نویسم، بر سر این‌که کدام یک از شبکه‌های دنیای واقعی واقعا بی‌مقیاس هستند، کماکان مناقشه‌های چشمگیری در جریان است.

۲. حتی در شبکه‌هایی که عملا بی‌مقیاس هستند، علت‌های ممکن بسیاری برای توزیع درجه قانون توان وجود دارد؛ انضمام ترجیحی لزوما موردی نیست که واقعا در طبیعت رخ می‌دهد. همان‌طور که کوزما شالیزی مختصر و مفید گفته است: "روشن شده که شصت و نه شیوه برای ساختن قانون توان وجود دارد، و تک‌تک آنها درست است."(۱۸) وقتی در انستیتوی سانتافه بودم، به نظر می‌رسید که یک روز در میان، یک سخنرانی درباره ساز و کار جدید مفروضی که به توزیع قانون توان می‌انجامد برگذار می‌شود.۹ برخی از آنها مشابه انضمام ترجیحی هستند، و برخی کارکرد کاملا متفاوتی دارند. روشن نیست که چگونه باید تصمیم بگیریم که کدام یک عملا موجب آن قانون‌های توان می‌شوند که در دنیای واقعی شاهد آن هستیم.

۳. اهمیت ادعایی علم شبکه وابسته به مدل‌هایی است که بیش از حد ساده و بر فرضیاتی غیرواقعی مبتنی هستند. مدل‌های شبکه دنیای کوچک و بی‌مقیاس صرفا همین‌اند: مدل -

یعنی فرضیاتی ساده را به حساب می‌آورند که ممکن است در شبکه‌های دنیای واقعی حقیقت نداشته باشند. در خلق این گونه مدل‌های ساده امیدواری به این است که حد اقل برخی از جنبه‌های پدیده‌ای را که برای بازنمود آن طراحی شده‌اند مجسم کنند. همان‌طور که دیدیم، به نظر می‌رسد این دو مدل شبکه، به‌خصوص مدل بی‌مقیاس، به واقع چیزی را مجسم می‌کند که مربوط به توزیع درجه، خوشه شدن، و قابلیت انعطاف در تعدادی زیادی از سیستم‌های دنیای واقعی است (گرچه نکته ۱ در بالا نشان می‌دهد که این تعداد به آن زیادی که برخی تصور می‌کنند نیست.)

اما، مدل‌های ساده شده شبکه‌ها فی‌نفسه نمی‌توانند همه‌چیز همتایان خود را در دنیای واقعی توضیح دهند. در هر دو مدل دنیای کوچک و بی‌مقیاس، فرض بر این است که تمام گره‌ها به استثنای درجه‌شان یکسان هستند؛ و تمام پیوندها از یک نوع هستند و قدرت یکسانی دارند. در شبکه‌های دنیای واقعی این امر واقعیت ندارد. برای مثال، در نسخه واقعی شبکه اجتماعی من (که مدل ساده شده آن در شکل ۲-۱۴ نشان داده شد)، برخی پیوندهای دوستی از بقیه قوی‌تر هستند. کیم و گار هر دو دوستان من هستند، اما کیم را بهتر می‌شناسم، در نتیجه احتمال بیشتری وجود دارد که درباره رویدادهای مهم زندگی‌ام با او حرف بزنم. افزون بر این، کیم زن است و گار مرد، که احتمال این را که به کیم اعتماد کنم - و نه به گار - افزایش می‌دهد.

به همین صورت، دوست من گرگ نسبت به کیم علاقه بیشتری به ریاضیات دارد، به همین جهت اگر می‌خواستم برخی واقعیات جالب ریاضی را که فراگرفته‌ام با کسی درمیان بگذارم به احتمال بیشتر این فرد گرگ بود و نه کیم. چنین تفاوت‌هایی در نوع گره‌ها و پیوندها، همچنین در قدرت پیوندها، می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر چگونگی انتشار اطلاعات در یک شبکه داشته باشد، تأثیراتی که مدل‌های ساده شده شبکه آن را مجسم نمی‌کنند.

انتشار اطلاعات و خرابی‌های زنجیروار

درواقع، شناخت شیوه‌های انتشار اطلاعات در شبکه‌ها یکی از مهم‌ترین مسایل حل نشده در علم شبکه است. نتایجی که در این فصل و فصل قبل توضیح دادم همه درباره ساختار شبکه هستند - برای مثال توزیع ایستای درجه آنها - و نه پویایی انتشار اطلاعات در یک شبکه.

منظور من از "انتشار اطلاعات در یک شبکه" چیست؟ در اینجا از دانش‌واژه اطلاعات برای مجسم کردن هر نوع ارتباط در میان گره‌ها استفاده می‌کنم. مثال‌هایی از انتشار اطلاعات عبارتند از انتشار شایعات، بدگویی، مد، عقاید، همه‌گیری بیماری (که در آن ارتباط بین مردم از طریق میکروب‌هاست)، جریان الکتریکی، پکت[۷۰۴]های اینترنت، ناقل‌های عصبی، کالری (در مورد شبکه غذایی) شمارش آرا، و پدیده عمومی‌تری از انتشار در شبکه به نام "خرابی زنجیره‌ای".

پدیده خرابی زنجیره‌ای بر نیاز شناخت انتشار اطلاعات و نحوه تأثیر گرفتن آن از ساختار شبکه

تأکید دارد. خرابی زنجیره‌ای در یک شبکه به این شرح رخ می‌دهد: فرض کنید هر گره در شبکه مسئول انجام کاری است
(برای مثال، انتقال قدرت الکتریکی). اگر یک گره خراب شود، کار آن به سایر گره‌ها انتقال پیدا می‌کند. که ممکن است به این منجر شود که سایر گره‌ها دچار بار اضافی شده و آسیب ببینند، و کار خود را باز هم به گره دیگری منتقل کنند، و به همین منوال. نتیجه یک تسلسل شتابان از خرابی‌هاست که می‌تواند کل شبکه را مختل کند.

نمونه‌های خرابی زنجیره‌ای در دنیای شبکه‌بندی ما بسیار فراوان است.

در زیر دو مثال نسبتا تازه را می‌آورم که به اخبار ملی راه یافتند.

ماه اوت ۲۰۰۳: قطع برق گسترده‌ای در غرب میانه و شمال شرق ایالات متحده روی می‌دهد، علت آن خرابی زنجیره‌ای ناشی از توقف کار نیروگاهی در ایالت اوهایوست. دلیل اعلام شده این توقف، خطوط انتقال برق بودند که تقاضای بالا در یک روز گرم تابستان بار اضافی بر آنها وارد کرده بود و در نتیجه به علت افزایش دمای کابل‌ها قوس بیشتری برداشته و با درخت‌هایی که بیش از حد رشد کرده بودند در تماس قرار گرفته بودند، که توقف خودکار خطوط را به همراه داشت که بار اضافی آنها باید به سایر قسمت‌های شبکه برق منتقل می‌شد و چون خود آنها دچار اضافه‌بار بودند قطع شدند.۲۰ این الگوی بار اضافی و قطع متعاقب آن به سرعت انتشار یافت، و سرانجام موجب شد که ۵۰۰ میلیون نفر مشتریان ساکن در شرق امریکا و کانادا بدون برق بمانند _ در مواردی بیش از سه روز.

ماه اوت ۲۰۰۷: سیستم کامپیوتری اداره گمرک و مرزبانی ایالات متحده[۷۰۵] حدود ده ساعت قطع شد؛ در نتیجه ۱۷۰۰۰ مسافر در هواپیماهایی گرفتار شدند که روی باند فرودگاه بین‌المللی لوس‌آنجلس متوقف مانده بودند. علت آن خرابی کارت شبکه یک کامپیوتر رومیزی بود. این خرابی به سرعت موجب یک خرابی زنجیره‌ای در سایر کارت‌های شبکه شد، و در عرض یک ساعت پس از خرابی اصلی، کل سیستم قطع شد.

اداره گمرک نمی‌توانست اطلاعات مسافران ورودی بین‌المللی را پردازش کند، که باعث شد برخی از آنها بیش از پنج ساعت در هواپیما بمانند.

مثال سوم نشان می‌دهد که خرابی‌های زنجیره‌ای وقتی گره‌های شبکه نه وسایل الکتریکی بلکه شرکت‌ها باشند نیز رخ می‌دهند.

ماه‌های اوت -سپتامبر ۱۹۹۸: لانگ ترم کاپیتال منیجمنت (ال تی سی ام: مدیریت بلندمدت سرمایه[۷۰۶]) که یک صندوق سرمایه‌گذاری تأمینی خصوصی است و اعتباراتی از چندین شرکت بزرگ مالی دریافت کرده است، به دلیل سرمایه‌گذاری پرخطر، تمامی نقدینگی خود را از دست می‌دهد. بانک مرکزی نگران بود که این مشکل موجب خرابی زنجیره‌ای در بازارهای مالی جهانی شود، چون برای این‌که ال‌تی‌سی‌ام قرض‌هایش را بپردازد مجبور بود بخش عمده‌ای از

سرمایه‌گذاری‌هایش را بفروشد، که باعث می‌شد ارزش سهام و سایر اوراق بهادارش سقوط کند، که به نوبه خود سایر شرکت‌ها را وادار می‌کرد سرمایه‌گذاری خودشان را بفروشند که موجب سقوط بیشتر قیمت‌ها می‌شد، و به همین منوال. در پایان سپتامبر ۱۹۹۸، بانک مرکزی با دخالت در اعطای کمک مالی به ال‌تی‌سی‌ام از جانب یکی از وام‌دهندگان اصلی‌اش ازیک خرابی زنجیره‌ای جلوگیری کرد.

قابلیت انعطاف شبکه که پیش از این درباره‌اش صحبت کردم - توانایی شبکه‌ها برای حفظ میانگین طول مسیر کوتاه به رغم خرابی تصادفی گره‌ها سناریوی خرابی زنجیره‌ای را به حساب نمی‌آورد، که در جریان آن خرابی یک گره موجب خرابی سایر گره‌ها می‌شود. خرابی‌های زنجیره‌ای مثال دیگری از "نقاط عطف" هستند که در آن رویدادهای کوچکی می‌توانند موجب بازخورد شتاب‌دهنده شوند، که باعث می‌گردد یک مشکل خرد به یک اختلال عمده تبدیل شود. گرچه خیلی‌ها نگران تهدیدهای بدخواهانه علیه زیرساخت‌های شبکه‌ای دنیا از جانب هکرها یا "تروریست‌های سایبری" هستند، ولی واقعیت این است که خرابی‌های زنجیره‌ای خطری به مراتب بزرگتر محسوب می‌شوند. چنین خرابی‌هایی برای جوامع ما که به شبکه‌های کامپیوتری، ماشین‌های رأی‌گیری کامپیوتری، سیستم‌های دفاع موشکی، بانکداری الکترونیک و مانند آنها وابسته‌تر شده‌اند، به صورت فزاینده‌ای متداول و خطرآفرین می‌شوند. همان‌طور که آندریاس انتونوپولوس[۷۰۷] دانشمندی که درباره این‌گونه سیستم‌ها مطالعه می‌کند، می‌گوید، "خطر خود پیچیدگی است."(۲۳) در واقع، شناخت کلی خرابی‌های زنجیره‌ای و استراتژی‌های جلوگیری از آنها از جمله فعال‌ترین زمینه‌های پژوهشی در علم شبکه هستند. دو رویکرد جاری نظریه‌هایی هستند به نام بحرانی بودن خودسامان ۲ (SOC) و مدارای شدیدا بهینه ۲۵ .SOC (HOT) و HOT مثال‌هایی هستند از نظریه‌های متعددی که ساز و کارهای متفاوتی از انضمام ترجیحی را در مورد پیدایش شبکه‌های بی‌مقیاس مطرح می‌کنند. SOC و HOT مجموعه‌ای کلی از ساز و کارها را برای خرابی‌های زنجیره‌ای، هم در سیستم‌های تکاملی و هم سیستم‌های مهندسی شده، فراهم می‌کنند.

مدل‌های ساده شده شبکه‌های دنیای کوچک و شبکه‌های بی‌مقیاسی که در فصل قبل درباره‌شان توضیح دادیم بی‌نهایت سودمند بوده‌اند، چون راه تفکر شبکه‌ای را به بسیاری از رشته‌های مختلف باز کرده و علم شبکه را به عنوان رشته‌ای مستقل تثبیت کرده‌اند. گام بعدی، شناخت دینامیک اطلاعات و سایر کمیت‌های شبکه است. برای فهم دینامیک اطلاعات در شبکه‌هایی مثل سیستم ایمنی، جوامع مورچگان، و سوخت و ساز سلولی (مقایسه کنید با فصل دوازدهم)، علم شبکه باید شبکه‌هایی را تعریف کند که در آنها گره‌ها و پیوندها به طور مداوم هم در فضا و هم در زمان تغییر می‌کنند. حداقل حرفی که می‌توان دراین‌باره گفت این است که چالش بزرگی است. همان‌طور که دونکان واتس به شیوایی می‌نویسد: "در کنار اسرار دینامیک

شبکه _ چه همه‌گیری بیماری باشد، چه خرابی‌های زنجیره‌ای در سیستم‌های نیرو، یا آغاز انقلاب - مشکلات شبکه‌هایی که تا امروز با آنها مواجه شده‌ایم فقط سنگ‌ریزه‌هایی در ساحل دریا هستند."(۲۶)

فصل هفدهم: راز میزان شدن

در دو فصل پیشین توضیح دادم که چگونه تفکر شبکه‌ای تأثیرات ژرفی بر بسیاری از زمینه‌های علمی گذاشته است - به‌خصوص بر زیست‌شناسی.

به‌تازگی، تفکر شبکه‌ای به ارائه راه‌حلی برای یکی از حیرت‌انگیزترین اسرار زیستی انجامیده است: شیوه میزان شدن[۷۰۸] خواص اندام‌واره زنده با اندازه‌اش.

میزان شدن در زیست‌شناسی

میزان شدن توضیح می‌دهد که چگونه یک خاصیت سیستم تغییر می‌کند اگر یک خاصیت مربوط به آن تغییر کند. راز میزان شدن در زیست‌شناسی به این پرسش بستگی دارد که چگونه میانگین انرژی مصرفی یک اندام‌واره در حال استراحت - آهنگ سوخت و ساز پایه - با جرم بدن اندام‌واره میزان می‌شود. به این دلیل که سوخت و ساز - یعنی تبدیل سلولی غذا و آب و هوا و نور به انرژی قابل مصرف _ فرایند کلیدی و زیربنایی تمامی موجودات زنده است، این رابطه برای شناخت نحوه کار حیات بی‌نهایت اهمیت دارد.

مدت‌هاست که می‌دانیم سوخت و ساز حیوانات کوچک‌تر به نسبت اندازه بدنشان سریع‌تر از حیوانات بزرگ‌تر است. در سال ۱۸۸۳، تنکردشناس آلمانی ماکس رابنر[۷۰۹] کوشید تا نحوه میزان شدن دقیق این رابطه را با استفاده از برهان‌های ترمودینامیک و هندسه مشخص کند. با توجه به فصل سوم به یاد بیاورید که فرایندهایی مثل سوخت و ساز که انرژی را از یک شکل به شکل دیگر تبدیل می‌کنند، همیشه با آزاد کردن حرارت همراهند.

آهنگ سوخت و ساز هر اندام‌واره را می‌توان به مثابه سرعتی تعریف کرد که سلول‌ها با آن موادغذایی را به انرژی تبدیل می‌کنند، که مصروف تمامی کارکردهای سلول و ایجاد سلول‌های جدید می‌شود. اندام‌واره حرارت را نیز به مثابه یک محصول جانبی، با این آهنگ آزاد می‌کند. از این‌رو، آهنگ سوخت و ساز اندام‌واره را می‌توان با اندازه‌گیری حرارت تولید شده به دست آورد.

اگر تا حالا نمی‌دانستید که حیوانات کوچک‌تر به تناسب اندازه بدنشان سوخت و ساز سریع‌تری از حیوانات بزرگ‌تر دارند، امکان داشت این حدس ساده‌دلانه را بزنید که آهنگ سوخت و ساز به طور خطی با جرم بدن میزان می‌شود - برای مثال، کیسه دهان (یا هامستر[۷۱۰]) که جرم بدنش هشت برابر یک موش عادی است باید آهنگ سوخت و سازش هشت برابر موش عادی باشد، یا اگر مورد غیرعادی‌تری را در نظر بگیریم، اسب آبی که جرم بدنش ۱۲۵۰۰۰ برابر جرم یک موش است باید آهنگ سوخت و سازش ۱۲۵۰۰۰ بار بیشتر باشد.

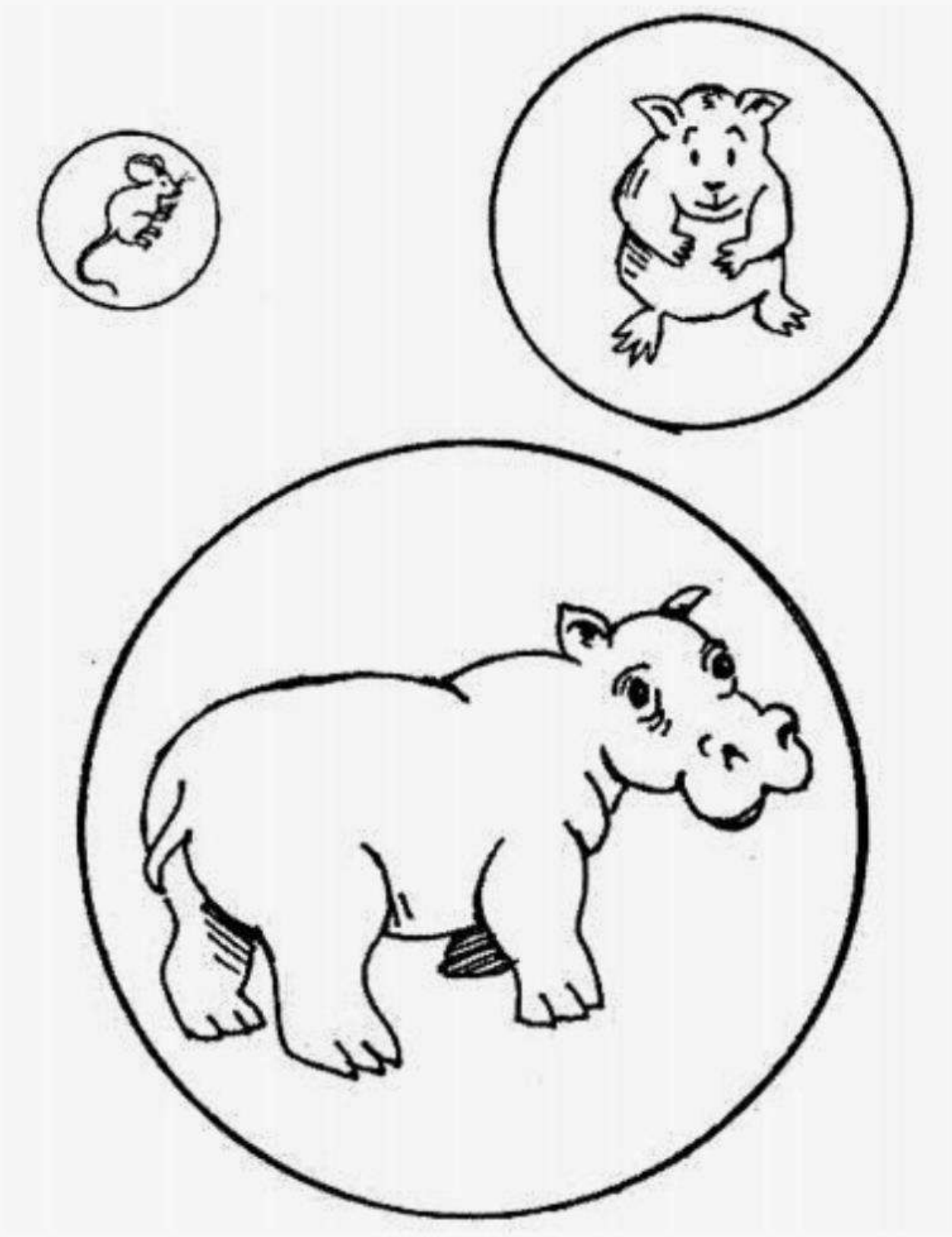
مشکل در اینجاست که برای مثال، کیسه دهان هشت برابر موش حرارت آزاد می‌کند. اما کل سطح بدن او که حرارت باید از آن ساطع شود - تنها حدود چهار برابر سطح بدن موش است. به

این دلیل که هرچه حیوان بزرگ‌تر باشد، سطح آن آهسته‌تر از وزن آن (یا حجم آن، که کمیتی معادل وزن است) رشد می‌کند.

این امر در شکل ۱-۱۷ به نمایش درآمده، که در آن یک موش عادی، یک کیسه دهان، و یک اسب آبی با کره نشان داده شده‌اند. احتمالا از هندسه مقدماتی به خاطر می‌آورید که فرمول حجم کره چهار سوم پی (ip) ضربدر مکعب شعاع و ip = ۳.۱۴۱۵۹ است. به همین صورت، فرمول سطح کره چهار برابر ip ضربدر مربع شعاع است. می‌توانیم بگوییم "حجم با مکعب شعاع میزان می‌شود" درحالی‌که "سطح با مربع شعاع میزان می‌شود." در اینجا "میزان شدن" صرفا معنی "متناسب است با" را می‌دهد – یعنی ثابت‌های

$$\frac{۴}{۳} \times \text{pi} \quad \text{و} \quad ۴ \times \text{pi}$$

را نادیده بگیرید. همان‌طور که در شکل ۱-۱۷ نشان داده شده شعاع کره کیسه دهان دو برابر شعاع کره موش عادی است، و سطح آن چهار برابر، و حجمش هشت برابر کره موش است.



شکل ۱-۱۷. خواص میزان شدن حیوانات (به صورت کره نشان داده شده‌اند.)

شعاع کره اسب آبی (که در مقیاس واقعی کشیده نشده) پنجاه برابر شعاع کره موش است؛ در نتیجه سطح کره اسب آبی ۲.۵۰۰ برابر و حجمش ۱۲۵۰۰۰ برابر کره موش است. می‌بینید که وقتی شعاع افزایش پیدا می‌کند، رشد سطح (یا میزان شدن آن) کندتر از رشد حجم است. به این دلیل که سطح با مربع شعاع میزان می‌شود، و حجم با مکعب شعاع، می‌توانیم بگوییم که "سطح با حجم به توان دو سوم میزان می‌شود." (برای آشنایی به نحوه این نتیجه‌گیری به یادداشت‌های پایان کتاب نگاه کنید.)(۱)

رساندن حجم به توان دو سوم کوته‌نوشت این است که "حجم را به توان دو برسانید، بعد ریشه سوم آن را بگیرید."

اگر بنا بود هشت برابر حرارت تولید شود و از سطحی چهار برابر منتشر گردد، کیسه دهان می‌بایست خیلی داغ باشد. به همین ترتیب، اسب آبی می‌بایست ۱۲۵۰۰۰ برابر موش حرارت تولید کند که از سطحی فقط ۲۵۰۰ برابر موش ساطع می‌شد. خب! در این صورت اسب آبی از حرارت می‌سوخت.

طبیعت با استفاده نکردن از آن قانون پیش‌پاافتاده نسبت به حیوانات خیلی مهربان بوده است. خوشبختانه سوخت و ساز ما با جرم بدنمان به طور خطی میزان نمی‌شود. ماکس رابنر استدلال کرد که طبیعت پی برده است که به منظور این‌که حرارتی را که تولید می‌کنیم به طور ایمن ساطع کنیم، آهنگ سوخت و ساز ما باید با جرم بدن، به همان شیوه سطح بدن، میزان شود. یعنی او مطرح کرد که آهنگ سوخت و ساز با جرم بدن به توان دوسوم میزان می‌شود. این را "فرضیه سطح[۷۱۱]" نامیدند، که به مدت پنجاه سال پذیرفته شده بود. مشکل در اینجا بود که داده‌های واقعی از این قاعده تبعیت نمی‌کرد.

در دهه ۱۹۳۰، جانورشناس سویسی، ماکس کلایبر[۷۱۲]، مجموعه اندازه‌گیری‌های دقیقی از آهنگ سوخت و ساز حیوانات مختلف را به انجام رساند. داده‌های او نشان داد که آهنگ سوخت و ساز با جرم بدن به توان سه‌چهارم میزان می‌شود: یعنی، آهنگ سوخت وساز متناسب است با

$$\frac{۳}{۴}$$

(جرم بدن). بی‌تردید این را به صورت قانون توان با قوه

$$\frac{۳}{۴}$$

تشخیص می‌دهید.

این نتیجه‌ای حیرت‌آور و دور از انتظار بود. داشتن نمای

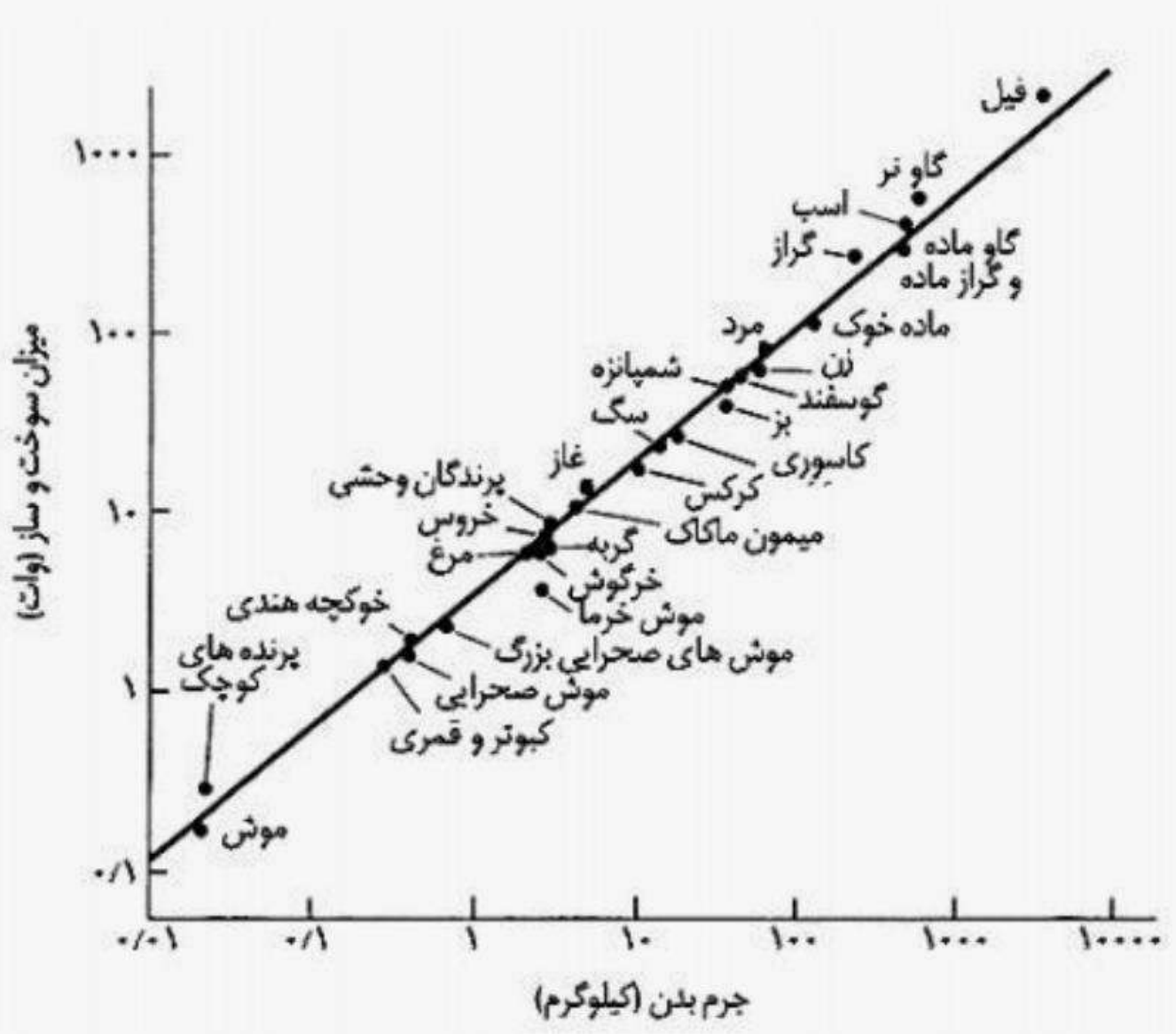
$$\frac{۳}{۴}$$ و نه $$\frac{۲}{۳}$$

به این معنی است که حیوانات، به‌خصوص حیوانات بزرگ، با توجه به سطح بدن‌شان، می‌توانند آهنگ سوخت و ساز تندتر از حد انتظاری را حفظ کنند که هیچ معنایی جز این ندارد که حیوانات کارآمدتر از آنی هستند که هندسه پیش‌بینی می‌کند.

شکل ۲-۱۷ این گونه میزان شدن را برای تعدادی از حیوانات مختلف نشان می‌دهد. محور افقی جرم بدن به کیلوگرم را به دست می‌دهد و محور عمودی میانگین آهنگ سوخت و ساز مبنا را به وات. نقطه‌های نام‌گذاری شده اندازه‌گیری‌های واقعی مربوط به حیوانات هستند، و خط مستقیم منحنی آهنگ سوخت وساز است که با وزن بدن به توان دقیقا سه چهارم میزان شده است. آن داده‌ها به طور دقیق با این خط منطبق نمی‌شوند، گرچه بسیار نزدیک به آن هستند.

شکل ۲-۱۷ شکل خاصی از منحنی است که از نظر فنی لگاریتمی دو برابر[۷۱۳] (یا لوگ لوگ[۷۱۴]) نامیده می‌شود -که در آن با هر پرش بر روی محور، اعداد هر دو محور با توان ده تغییر می‌کنند. اگر یک قانون توان را با یک منحنی لگاریتمی دو برابر ترسیم کنید، شبیه یک خط مستقیم به نظر می‌آید، و شیب این خط مساوی با نمای قانون توان است. (برای توضیحی دراین‌باره به یادداشت‌ها نگاه کنید.))

این رابطه قانون توان امروزه قانون کلایبر نامیده می‌شود. به‌تازگی این ادعا مطرح شده است که این‌گونه میزان شدن با توانند تنها در مورد پستانداران و پرندگان، بلکه در مورد آهنگ سوخت وساز بسیاری دیگر از موجودات زنده، از جمله ماهی‌ها، گیاهان، و حتی جاندارانی تک‌سلولی صدق می‌کند.



شکل ۲-۱۷. آهنگ سوخت و ساز حیوانات مختلف، به صورت تابعی از جرم بدن آنها

قانون کلایبر تنها بر مشاهدات آهنگ سوخت و ساز و جرم بدن مبتنی است؛ کلایبر هیچ توضیحی درباره چرایی این‌که این قانون حقیقت دارد ارائه نکرد. درواقع، قانون کلایبر به مدت بیش از پنجاه سال برای زیست‌شناسان سردرگم‌کننده بود. جرم سیستم‌های زنده طیف وسیعی دارد: از باکتری گرفته که وزنش کمتر از یک تریلیونیم گرم است، تا نهنگ که امکان دارد بیش از ۱۰۰ میلیون گرم وزن داشته باشد. این قانون نه تنها از استدلال ساده هندسی تخطی می‌کند، بلکه درعین‌حال در مورد جانداران در طیف چنین گسترده‌ای از اندازه‌ها، انواع گونه‌ها، و انواع سکونت‌گاه‌ها صدق می‌کند.

حیرت‌آور است که چه وجه مشترکی در تقریبا تمامی جانداران وجود دارد که می‌تواند خاستگاه این قانون ساده و خوش‌ساخت باشد؟

چندین رابطه میزان شدن دیگر وجود دارد که آنها نیز مدت‌هاست زیست‌شناسان را حیرت‌زده کرده‌اند. برای مثال، هرچه پستانداری بزرگ‌تر باشد، طول عمرش بیشتر است. طول عمر موش معمولا حدود دو سال است؛ در مورد خوک چیزی حدود ده سال است، و در مورد فیل بیش از پنجاه سال. در این قاعده عمومی موارد استثنایی هم وجود دارد، که یکی از چشمگیرترین آنها انسان است، اما در اکثر گونه‌های پستاندار صدق می‌کند.

از قرار معلوم اگر میانگین طول عمر را در مقایسه با جرم بدن گونه‌های مختلف ترسیم کنید، رابطه یک قانون توان با نمای

$$\frac{۱}{۴}$$

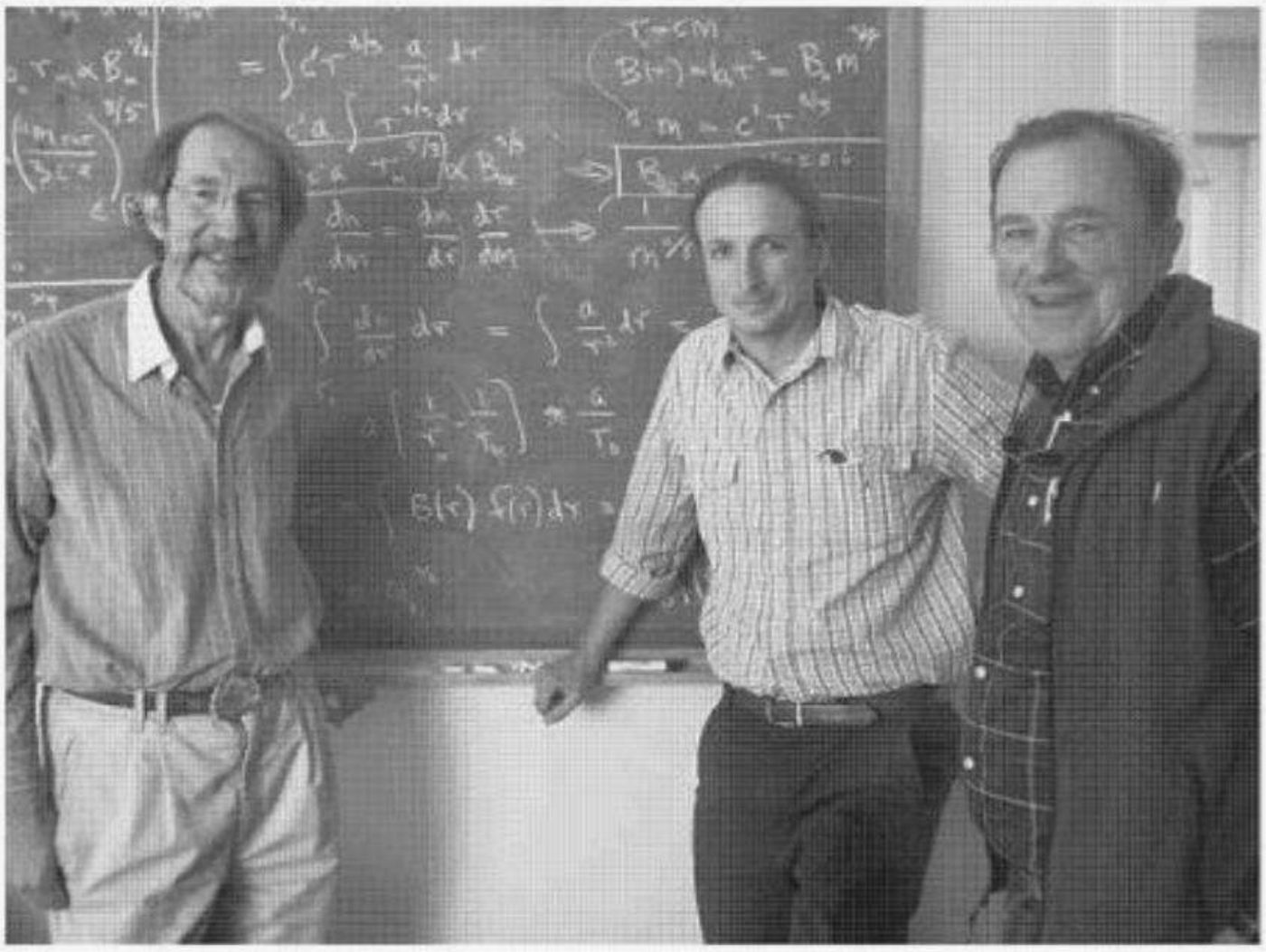
است. اگر میانگین تپش قلب را در تقابل با جرم بدن ترسیم کنید، قانون توانی را به دست می‌آورید که نمای

$$\frac{۱}{۴}$$

دارد. (هرچه حیوان بزرگ‌تر باشد، تپش قلب کندتر است). درواقع، زیست‌شناسان مجموعه بزرگی از این‌گونه روابط قانون توان را مشخص کرده‌اند، که همه آنها نمایی کسری دارند که مخرج آن ۴ است. به این دلیل، تمامی این‌گونه قوانین، میزان شدن با توان یک چهارم[۷۱۵] نامیده شده‌اند. بسیاری از دانشمندان گمان می‌بردند که این قوانین میزان شدن یک چهارم نشان[۷۱۶] از خاصیتی بسیار مهم و مشترک در تمامی این اندام‌واره‌ها دارد. اما هیچ‌کس نمی‌دانست که آن خاصیت با اهمیت و مشترک چیست.

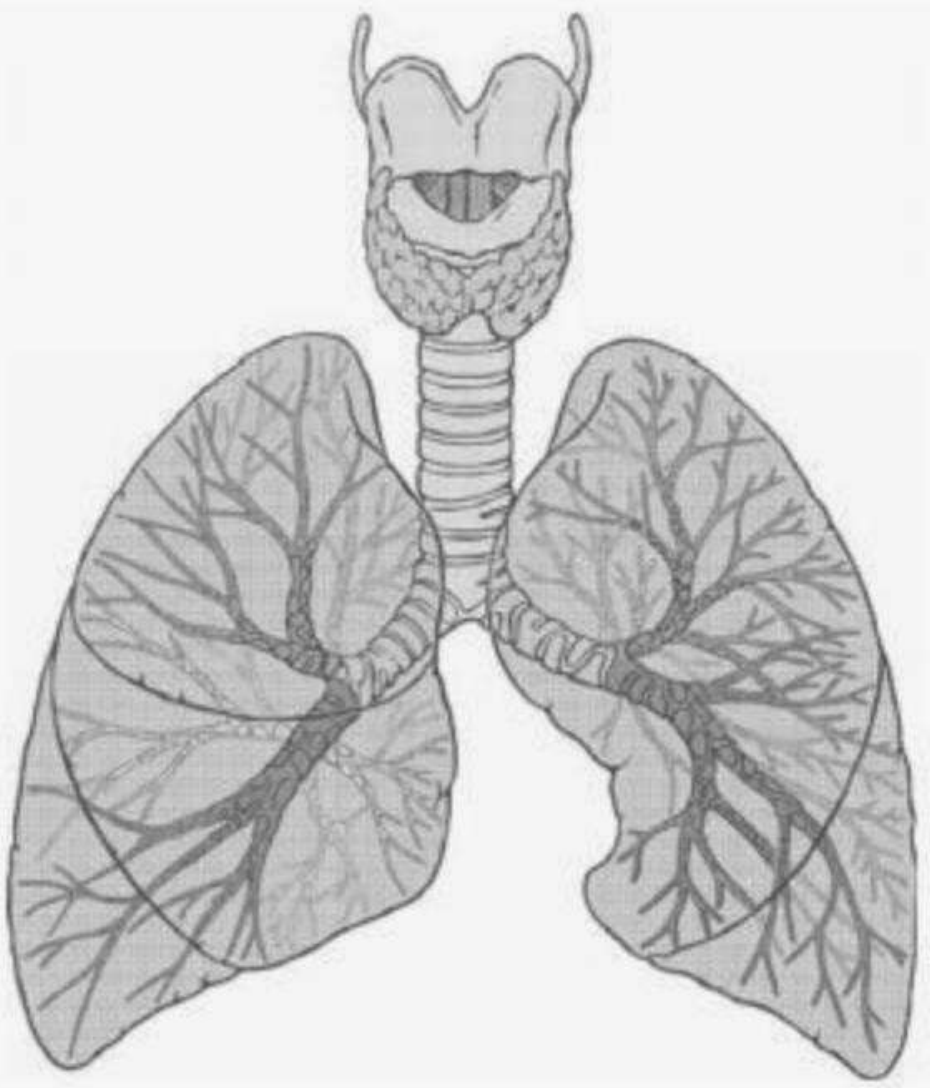
یک همکاری میان‌رشته‌ای تا میانه دهه ۱۹۹۰، سال‌ها بود که جیمز براون[۷۱۷] بوم‌شناس و استاد دانشگاه نیومکزیکو، به مسئله میزان شدن با توان یک چهارم می‌اندیشید. او پی برده بود که

حل این مسئله - فهمیدن دلیل این قوانین فراگیر میزان شدن_ گامی اساسی در تدوین هر نظریه عمومی زیست‌شناسی است. یک دانشجوی دوره تحصیلات تکمیلی زیست‌شناسی به نام برایان انکویست[۷۱۸]، که او هم عمیقا به موضوع میزان شدن علاقه‌مند بود، به براون پیوست، و آن دو تلاش کردند که به اتفاق این مسئله را حل کنند.



چپ به راست: جفری وست، برایان انکویست، و جیمز براون.

براون و انکویست گمان می‌کردند که پاسخ در ساختار سیستم‌هایی نهفته است که موادغذایی را به سلول منتقل می‌کنند. خون به طور مداوم در رگ‌ها گردش می‌کند که شبکه‌ای شاخه شاخه را تشکیل می‌دهند که مواد شیمیایی غذایی را به تمامی سلول‌های بدن می‌رساند. به همین ترتیب، ساختارهای شاخه شاخه در ریه‌ها، که نایژه نامیده می‌شوند، اکسیژن را از ریه‌ها به رگ‌های خونی می‌برند و وارد خون می‌کنند (شکل ۳-۱۷) براون و انکویست معتقد بودند که فراگیری چنین ساختارهای شاخه شاخه در حیوانات موجب پیدایش قوانین توان یک چهارم می‌شود. به منظور شناخت این‌که چگونه چنین ساختارهایی ممکن است موجب پیدایش قوانین توان یک چهارم شوند، آنها باید پی می‌بردند که چگونه این ساختارها را به زبان ریاضی توضیح داده و نشان دهند که ریاضیات به‌طور مستقیم به قوانین میزان شدن مشاهده شده می‌انجامد.



شکل ۳-۱۷. تصویر نایژه، ساختارهای شاخه شاخه در ریه‌ها

اکثر زیست‌شناسان، از جمله براون و انکویست، دارای زمینه ریاضی لازم برای انجام چنین تحلیل پیچیده هندسی و جای‌شناختی [۷۱۹] نیستند. در نتیجه براون و انکویست به جستجوی یک "دوست ریاضیدان" برآمدند ـ یک ریاضیدان یا فیزیکدان نظری که بتواند در حل این مسئله به آنها کمک کند، اما درعین‌حال آن‌قدر مسئله را ساده نکند که زیست‌شناسی در راه گم شود.

جفری وست وارد صحنه می‌شود، او کاملا واجد شرایط است. وست که یک فیزیکدان نظری بود و آن زمان در آزمایشگاه ملی لوس‌آلاموس کار می‌کرد، برای پاسخگویی به مسئله میزان شدن مهارت‌های ریاضی موردنظر را داشت. نه تنها بر روی موضوع میزان شدن - البته در حوزه فیزیک کوانتوم - کار کرده بود. بلکه به مسئله میزان شدن زیست‌شناختی نیز به اندازه کافی اندیشیده بود بدون این‌که چیز زیادی درباره زیست‌شناسی بداند.

در میانه دهه ۱۹۹۰ براون و انکویست در انستیتوی سانتافه با وست ملاقات کردند و این سه به طور هفتگی در انستیتو جمع می‌شدند و درباره نحوه همکاری‌شان بحث می‌کردند. به خاطر می‌آورم که آنها را هر هفته در یک اتاق کنفرانس با دیوارهای شیشه‌ای می‌دیدم که یکی‌شان (به طور معمول جفری) یک خروار معادله پیچیده را کج و معوج روی تخته سفید می‌نوشت و با حرارت بحث می‌کردند. (بعدها انکویست نتایج ریاضی گروه را "شیرینکاری" نامید.) من فقط به طور مبهم می‌دانستم که آنها چه می‌کنند. اما بعدها که سخنرانی جفری وست را درباره

نظریه‌شان شنیدم، به شدت تحت‌تأثیر خوش‌ساختی و دامنه آن قرار گرفتم. به نظر من نتایج پژوهشی آنها بر تارک دستاوردهای رشته سیستم‌های پیچیده می‌درخشد.

براون و انکویست و وست نظریه‌ای را تدوین کرده بودند که نه تنها قانون کلایبر و سایر روابط میزان شدن زیست‌شناختی به دست آمده را توضیح می‌داد، بلکه تعدادی از روابط میزان شدن جدید را در سیستم‌های زنده پیش‌بینی می‌کرد. بسیاری از این پیش‌بینی‌ها را داده‌ها تأیید کرده‌اند. این نظریه، که نظریه میزان شدن سوخت‌وساز[۷۲۰](یا خیلی ساده نظریه سوخت و ساز) نامیده می‌شود، به نسبت مساوی زیست‌شناسی و فیزیک را ترکیب می‌کند، و در هر دو رشته هیجان و مناقشه را به نسبت مساوی دامن زده است.

قوانین توان و فراکتال‌ها

نظریه میزان شدن سوخت و ساز به دو پرسش پاسخ می‌دهد: ۱. چرا میزان شدن سوخت و ساز در اساس از قانون توان تبعیت می‌کند؛ و ۲. چرا نمای قانون توان به‌خصوص

$$\frac{3}{4}$$

است. پیش از این‌که توضیح دهم چگونه به این پرسش‌ها پاسخ می‌دهد، برای توضیح رابطه بین قوانین توان و فراکتال‌ها باید کمی تغییر مسیر دهم.

منحنی کک و مباحثه مربوط به فراکتال‌ها در فصل هفتم را به یاد می‌آورید؟ اگر پاسخ‌تان مثبت است، شاید مفهوم "بعد فراکتال" را هم به یاد داشته باشید. در منحنی کک دیدیم که طول پاره‌خط در هر سطح یک سوم سطح قبل و ساختار در هر سطح متشکل از چهار نسخه از ساختار سطح قبل است. در قیاس با تعریف سنتی بعد، بعد فراکتال منحنی کک را به این صورت تعریف کردیم:

$$\text{۴ - بُعد۳}$$

که نتیجه می‌شود ۱.۲۶ = بعد. به‌طور کلی‌تر، اگر هر سطح با عامل x از سطح قبل میزان شود و از n نسخه سطح قبل ساخته شده باشد به دست می‌آوریم.

$$x^{\text{بُعد}} = n$$

حال پس از خواندن فصل پانزدهم، می‌توانید تشخیص دهید که این یک قانون توان است که در آن بعد همان نماست. این امر رابطه نزدیک بین قوانین توان و فراکتال‌ها را نشان می‌دهد. توزیع‌های مربوط به قوانین توان، همان‌طور که در فصل پانزدهم، شکل ۱۵۶ دیدیم، همان فراکتال‌ها هستند - در تمامی مقیاس‌های بزرگ‌نمایی خودماننده هستند، و نمای قانون توان بعد فراکتال متناظر (مقایسه کنید با فصل هفتم) را به دست می‌دهد، جایی که بعد دقیقا معین می‌کند که چگونه خودمانندگی با سطح بزرگ‌نمایی میزان می‌شود.

@degar_goonesh

برای مثال می‌توان گفت که توزیع‌های درجه وب ساختاری فراکتال دارد، چون خودماننده است. به همین ترتیب می‌توان گفت که فراکتالی مشابه منحنی کک موجب پیدایش قانون توان می‌شود - موردی که دقیقا توضیح می‌دهد چگونه خودمانندگی منحنی با سطح بزرگ‌نمایی میزان می‌شود.

پیام دریافتی این است که آن ساختار فراکتال یک راه تولید توزیع قانون توان است، و اگر اتفاقا ببینید که کمیتی (از جمله آهنگ سوخت و ساز) از توزیع قانون توان تبعیت می‌کند، می‌توانید فرض کنید چیزی نهفته در سیستم وجود دارد که خودماننده یا "شبه فراکتال" است.

نظریه شدن سوخت‌وساز

چون آهنگ سوخت و ساز سرعتی است که سلول‌ها با آن سوخت را به انرژی تبدیل می‌کنند، براون و انکویست و وست این‌گونه استدلال می‌کردند که آهنگ سوخت باید عمدتا متناسب با کارآمدی تحویل سوخت به سلول‌ها معین شود. این وظیفه سیستم گردش خون اندام‌واره است که سوخت را تحویل دهد.

براون و انکویست و وست پی بردند که سیستم گردش خون نه تنها برحسب جرم یا طولش، بلکه بیشتر برحسب ساختار شبکه‌اش تعریف می‌شود. همان‌طور که وست اظهار کرد، "در واقع باید برحسب دو مقیاس متفاوت بیندیشید - طول ظاهری شما و طول واقعی شما، که از شبکه ساخته شده است. (۴)

براون و انکویست و وست در تدوین نظریه‌شان، فرض کردند که تکامل، شبکه‌های گردش خون و سایر شبکه‌های حمل سوخت را به نحوی خلق کرده است که در بدن به طور حداکثری "فضا پرکن" هستند - یعنی می‌توانند سوخت را در هر کجای بدن به سلول‌ها منتقل کنند. آنها درعین‌حال فرض کردند که تکامل این شبکه‌ها را به نحوی طراحی کرده است که انرژی و زمان لازم برای توزیع این سوخت به سلول‌ها به حداقل برسد. سرانجام، فرض کردند که "واحدهای پایانه‌ای"[۷۲۱] در شبکه، یعنی پایگاه‌هایی که از طریق آنها سوخت در اختیار بافت‌ها قرار می‌گیرد، با جرم بدن میزان نمی‌شود، بلکه در اندام‌واره‌های کوچک و بزرگ تقریبا هم‌اندازه است. برای مثال، این خاصیت مشاهده شده که مویرگ‌های سیستم گردش خون در اکثر حیوانات هم‌اندازه هستند. حیوانات بزرگ فقط مقدار بیشتری از مویرگ دارند. یک دلیل این امر این است که خود سلول‌ها با اندازه بدن میزان نمی‌شوند، تک‌تک سلول‌های موش و اسب آبی تقریبا هم‌اندازه هستند. منتها اسب آبی سلول‌های بیشتری دارد و در نتیجه به مویرگ‌های بیشتری برای سوخت رساندن به آنها نیاز دارد.

اشیاء هندسی فضاپرکن حداکثری، درواقع ساختارهای فراکتال شاخه شاخه هستند. خودمانندگی در تمامی مقیاس‌ها به این معنی است که فضا در تمامی مقیاس‌ها پر شده است. کاری که براون و انکویست و وست هفته‌ها و ماه‌ها در اتاق شیشه‌ای می‌کردند شکل دادن به یک مدل ریاضی بغرنج برای سیستم گردش خون به صورت یک فراکتال فضاپرکن بود. آنها فرضیات حداقل کردن فضا-زمان و اندازه ثابت واحد پایانه را که در بالا مطرح شد اختیار کردند، و پرسیدند وقتی جرم بدن افزایش پیدا می‌کند در مدل چه اتفاقی می‌افتد؟ بیا و تماشا کن! محاسبات آنها نشان داد که در مدل، سرعت تحویل سوخت به سلول‌ها که آهنگ سوخت و ساز را معین می‌کند، با توان

۳
۴

با جرم بدن میزان می‌شود.
جزئیات ریاضی مدل که به نمای

۳
۴

انجامید نسبتا غامض است اما ارزش دارد که درباره تفسیر گروه از

۳
۴

حرفی بزنم. بحث من درباره فرضیه سطح رابنر را به یاد بیاورید - این‌که آهنگ سوخت و ساز باید با جرم بدن میزان شود به همان ترتیب که حجم با سطح میزان می‌شود، یعنی با توان

۲
۳

یک شیوه نگاه کردن به نمای

۳
۴

این است که این نما حاصل اعمال فرضیه سطح بر روی موجودات چهاربعدی است! می‌توانیم این را از طریق قیاس ساده مربوط به بعد بفهمیم. یک شیء دوبعدی مانند دایره یک پیرامون و یک سطح دارد. اینها، در سه بعد، به ترتیب متناظر با سطح و حجم هستند.
در چهار بعد، سطح بیرونی و حجم به ترتیب متناظرند با حجم "سطح" و چیزی که می‌توانیم آن را بیش‌حجم[۷۲۲] بنامیم - مقداری که تصور آن مشکل است چون مغز ما به نحوی سیم‌کشی شده که به سه بعد بیندیشد، و نه چهار.
با استفاده از برهان‌هایی که مشابه این استدلال هستند که چگونه سطح بیرونی با حجم به توان

۲
۳

میزان می‌شود، می‌توان نشان داد که در چهار بعد حجم سطح یا بیش‌حجم با توان

$\frac{3}{4}$

میزان می‌شود.

در یک کلام، چیزی که براون، انکویست، و وست می‌گویند این است که تکامل سیستم گردش خون ما را به عنوان شبکه‌های فراکتال سازمان داد تا تقریبا نزدیک به یک بعد چهارم باشد، به این منظور که سوخت وساز را کارآمدتر کند. همان‌طور که براون و انکویست و وست می‌گویند، "گرچه موجودات زنده فضایی سه بعدی را اشغال می‌کنند، اعمال حیاتی و کالبد درونی آنها به نحوی عمل می‌کنند که انگار چهار بعدی هستند... هندسه فراکتال در عمل به زندگی بعدی اضافی بخشید."(۶)

دامنه این نظریه

نظریه میزان شدن سوخت و ساز، در شکل اصلی‌اش، برای توضیح میزان شدن سوخت و ساز در بسیاری از گونه‌های حیوانی به کار برده شد، از جمله آنهایی که در شکل ۲-۱۷ تصویر شدند. اما براون و انکویست و وست و گروه فزاینده‌ای از همکاران جدیدشان در آنجا متوقف نشدند. به نظر می‌رسد هرچند هفته یک بار، رده جدیدی از اندام‌واره‌ها یا پدیده‌ها به فهرست تحت پوشش این نظریه افزوده می‌شود. این گروه ادعا کرده است که نظریه آنها می‌تواند برای توضیح سایر قوانین میزان شدن با توان یک چهارم نیز به کار رود، از جمله قوانینی که بر ضربان قلب، طول عمر، مدت بارداری، و مدت زمان خواب حاکم هستند.

این گروه همچنین معتقد است که این نظریه میزان شدن، سوخت و ساز در گیاهان را توضیح می‌دهد، که بسیاری از آنها از شبکه‌های وندی شبه‌فراکتال برای حمل آب و موادغذایی استفاده می‌کنند. افزون بر این، آنها ادعا می‌کنند که این نظریه قوانین میزان شدن با توان یک چهارم در محیط تنه درخت، آهنگ رشد گیاه و چندین جنبه دیگر از اندام‌واره‌های حیوانی و گیاهی را به صورت مشابه توضیح می‌دهد. به منظور توضیح آهنگ سوخت و ساز در خزنده‌ها و ماهی‌ها، شکل کلی‌تری از نظریه میزان شدن سوخت و ساز که دما را هم به حساب می‌آورد مطرح شده است.

در حیطه ذره‌بینی، گروه این فرض را مطرح کرده که نظریه آنها در سطح سلولی نیز کاربرد دارد، و پافشاری می‌کنند که میزان شدن سوخت و ساز با توان

$\frac{3}{4}$،

، آهنگ سوخت و ساز اندام‌واره‌های تک‌سلولی، همچنین فرایندهای توزیع شبه‌مولکولی درون‌سلولی، و حتی فرایندهای شبه‌سوخت و ساز درون اجزای سلول از قبیل میتوکوندری‌ها[۷۲۳] را پیش‌بینی می‌کند. این گروه این را نیز مطرح کرده که نظریه‌شان آهنگ

تغییرات DNA در اندام‌واره‌ها را تبیین می‌کند و به این ترتیب هم به علم ژنتیک و هم زیست‌شناسی تکاملی به شدت ربط دارد. برخی دیگر گزارش کرده‌اند که این نظریه همچنین میزان شدن جرم در قبال آهنگ رشد غده‌های سرطانی را توضیح می‌دهد.

در حیطه امور خیلی بزرگ، نظریه میزان شدن سوخت و ساز و تعمیم آن در مورد کلیت نظام‌های زیستی به کار رفته است. براون و انکویست و وست معتقدند که نظریه آنها میزان شدن



تراکم جامعه گونه‌ها با اندازه بدن را در نظام‌های زیستی معینی توضیح می‌دهد.

در واقع، به این دلیل که سوخت و ساز برای تمامی جنبه‌های حیات بسیار پراهمیت است، به سختی می‌توان حوزه‌ای را در زیست‌شناسی یافت که این نظریه به آن مربوط نباشد. قابل تصور است که این موضوع بسیاری از دانشمندان را هیجان‌زده کرده و آنها را واداشته است به دنبال زمینه‌های جدیدی برای کاربرد این نظریه برآیند. گفته‌اند که نظریه میزان شدن سوخت و ساز "امکان بالقوه وحدت بخشیدن به تمام (۷)، زیست‌شناسی را دارد و "بالقوه همان‌قدر برای زیست‌شناسی مهم است که خدمات نیوتون برای فیزیک مهم (۸)". بودند خود این گروه در یکی از مقالاتشان اشاره کردند که "ما تماشاگر دورنماهایی برای ظهور یک نظریه عمومی سوخت و ساز هستیم که نقشی مشابه نظریه ژنتیک را در زیست‌شناسی بازی خواهد کرد."(۹)

مناقشه

همان‌طور که در مورد نظریه‌ای نسبتا جدید و خبرساز که مدعی است چنین گستره بزرگی را توضیح می‌دهد، می‌توان انتظار داشت، درحالی‌که برخی از دانشمندان در مورد نظریه میزان شدن سوخت و ساز شور و شوق زیادی دارند، برخی دیگر با خشم و سرسختی منتقد آن هستند. در اینجا دو انتقاد عمده را که در حال حاضر در بعضی مجلات علمی منعکس شده می‌آورم.

قوانین میزان شدن با توان یک چهارم در حدی که این نظریه ادعا می‌کند فراگیر نیست. طبق قاعده، با فرض وجود هر خاصیت عمومی مطرح شده در سیستم‌های زنده، زیست‌شناسی استثناهایی بر این قاعده (و حتی شاید در خود این قاعده) را به نمایش می‌گذارد. به عبارتی، نظریه میزان شدن سوخت و ساز هم استثنا نیست. گرچه اکثر زیست‌شناسان توافق دارند که تعداد زیادی از گونه‌ها ظاهرا از قوانین مختلف میزان شدن با توان یک چهارم پیروی می‌کنند، استثناهای زیادی هم هست، و پاره‌ای اوقات حتی در گونه‌ای واحد تفاوت‌هایی در آهنگ سوخت و ساز دیده می‌شود. یک مثال آشنا سگ است، که تیره‌های کوچک‌تر آن حداقل به اندازه تیره‌های بزرگتر زندگی می‌کنند. چنین استدلال شده است که گرچه قانون کلایبر مبین

یک میانگین آماری است، انحراف از این میانگین می‌تواند کاملا بزرگ باشد، و نظریه میزان شدن سوخت و ساز این را توضیح نمی‌دهد چون تنها جرم و دمای بدن را به حساب می‌آورد.
دیگران استدلال کرده‌اند که این نظریه قوانینی را پیش‌بینی می‌کند که با داده‌های دنیای واقعی بسیار متناقض‌اند. برخی دیگر استدلال کرده‌اند که کلایبر در تمام مدت اشتباه می‌کرده، و بهترین انطباق با داده عملا قانون توان با نمای

$\frac{۲}{۳}$

است، همان‌طور که بیش از صد سال پیش، رابنر در فرضیه سطح خود مطرح کرده است. (۱۰) در اکثر موارد، این برهانی است درباره این‌که چگونه باید داده مربوط به میزان شدن سوخت و ساز را به درستی تفسیر کرد و درباره این‌که چه‌چیز "جور شدن" با نظریه را فراهم می‌کند. اعضای گروه میزان شدن سوخت و ساز بر نظریه خود پافشاری می‌کنند، و پیگیرانه به بسیاری از این استدلال‌ها پاسخ داده‌اند. و هرچه نویسندگان، دشواری‌های علم آمار پیشرفته و کارکردهای زیست‌شناسی را بیشتر به بحث می‌گذارند، این مباحثات نیز فنی‌تر و نامفهوم‌تر می‌شود.
قانون میزان شدن کلایبر درست است اما نظریه میزان شدن سوخت و ساز نادرست است. برخی استدلال کرده‌اند که نظریه میزان شدن سوخت و ساز بیش از حد ساده است و حیات پیچیده‌تر و متنوع‌تر از آن است که یک نظریه بلندپرواز پاسخگوی آن باشد، و این‌که ساختار فراکتال را مبنای استدلال قرار دهیم به هیچ‌وجه تنها راه توضیح دادن توزیع قوانین توان مشاهده شده نیست. یکی از بوم‌شناسان چنین اظهارنظر می‌کند: "هرقدر که جزئیات آگاهی درباره عمل حیاتی خاصی بیشتر می‌شود، این‌گونه توضیحات کمتر باورپذیر به نظر می‌آیند."(۱۱) دیگری هشدار داده است که "وقتی امور ساده هستند جالب هستند، اما دنیای واقعی همیشه این‌طور نیست."(۱۲) سرانجام، استدلال‌هایی نیز مطرح شده است مبنی بر این‌که ریاضیات به کار رفته در نظریه میزان شدن سوخت و ساز نادرست (۱۳). است نویسندگان نظریه میزان شدن سوخت و ساز به این انتقادها با شور و حرارت پاسخ داده‌اند و در مواردی به چیزی اشاره کرده‌اند که به اعتقاد آنها خطاهای اساسی در ریاضیات منتقدان بوده است.
نویسندگان نظریه میزان شدن سوخت و ساز بر نتیجه‌گیری‌هایشان به شدت پافشاری می‌کنند و رنجش خود را از انتقادهایی که معطوف به جزئیات است ابراز کرده‌اند.۱۲ چنان که وست گفت: "بخشی از وجودم مایل نیست که از ترس این سگ‌های کوچکی که پاشنه پایمان را گاز می‌گیرند بلرزد."(۱۵) اما، گروه این را نیز تشخیص می‌دهد که رگبار این انتقادها نشانه خوبی است - صرف‌نظر از این‌که انتقادها چه باشد، تعداد زیادی از مردم بیدار شده و با نظریه میزان

شدن سوخت وساز آشنا شده‌اند. و البته، همان‌طور که مطرح کردم، شکاکیت یکی از مهمترین وظایف دانشمندان است و هرچه نظریه‌ای مشهورتر و ادعاهای آن بلندپروازانه‌تر باشد، شکاکیت بیشتری را اقتضا می کند.

استدلال‌ها به این زودی پایان نمی گیرند؛ فراموش نکنیم که نظریه جاذبه نیوتون تا شصت سال پس از طرح، مورد قبول عام قرار نگرفت. بسیاری دیگر از مهمترین پیشرفت‌های علمی هم سرنوشت مشابهی داشته‌اند. نتیجه‌گیری اصلیی که می‌توانیم به آن برسیم این است که نظریه میزان شدن سوخت و ساز ایده بیش از حد جالبی است که دامنه‌ای وسیع دارد و نتایج تجربی نیز آن را تأیید می کند. آن‌طور که هلن مولر-لاندو پیش‌بینی می کند:

"گمان می‌برم که در سال‌های پیش‌رو وست و انکویست و طرفداران‌شان به تکرار استدلال‌های اصلی‌شان ادامه دهند و مخالفان آنها نیز به تکرار همان انتقادهای اصلی‌شان ادامه دهند، تا زمانی که وزن شواهد سرانجام به پیروزی یکی یا دیگری منجر شود."(۱۶)

راز ناگشوده قوانین توان

قوانین توان متعددی را در این فصل و فصل پیشین دیدیم. افزون بر اینها توزیع قوانین توان در مورد اندازه شهرها، درآمدهای مردم، زلزله‌ها، قابلیت تغییر در ضربان قلب، آتش‌سوزی جنگل‌ها، بی‌ثباتی بازار سهام، و بسیاری موارد دیگر شناسایی شده است.

همان‌طور که در فصل پانزدهم توضیح دادم، دانشمندان معمولا فرض می کنند که طبیعی‌ترین پدیده‌ها طبق خم زنگدیس یا توزیع طبیعی توزیع می‌شوند. اما قوانین توان در پدیده‌هایی آن‌چنان متعدد و متنوع کشف شده‌اند که برخی از دانشمندان آنها را "طبیعی‌تر از (۱۷)"طبیعی می‌دانند.

به‌گفته ریاضیدان والتر ویلینگر[۷۲۴] و همکاران او: "حضور توزیع (قانون توان) در داده به دست آمده از سیستم‌های پیچیده طبیعی و مهندسی شده را باید هنجار در نظر گرفت و نه استثنا."

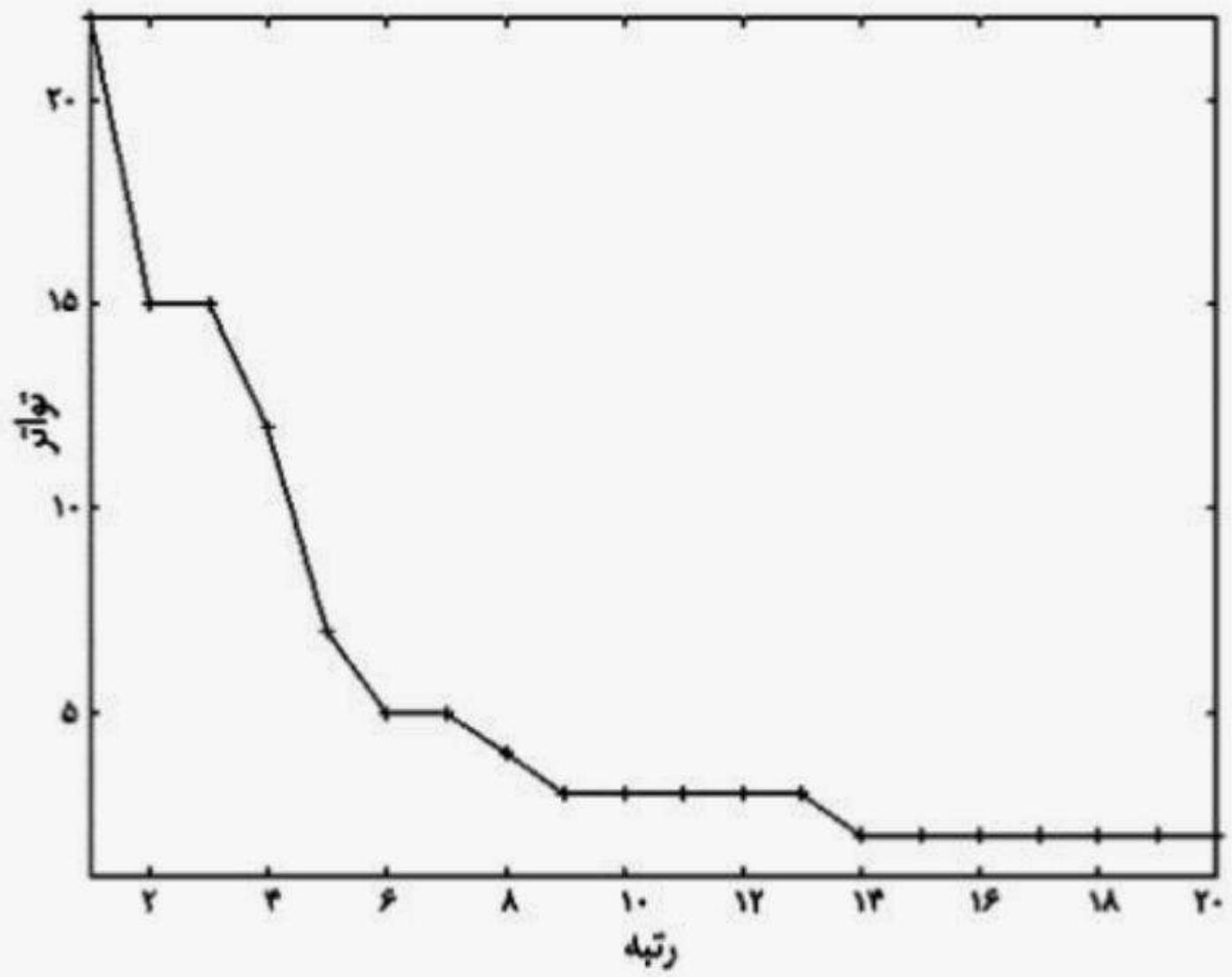
دانشمندان از آنچه موجب پیدایش توزیع خم زنگدیس در طبیعت می‌شود برداشت خوبی دارند، اما قوانین توان نوعی راز هستند. همان‌طور که دیدیم، توضیحات متفاوت بسیاری در مورد قوانین توان مشاهده شده در طبیعت وجود دارد (برای مثال، انضمام ترجیحی، ساختار فراکتال، بحرانی بودن خودسامان، مدارای شدیدا بهینه، از آن جمله هستند، و بر سر این که کدام ساز و کار موجب کدام یک از قوانین توان می‌شود، چندان توافقی وجود ندارد.

در اوایل دهه ۱۹۳۰، یکی از اساتید زبان‌شناسی دانشگاه هاروارد، جورج کینگزلی زیف[۷۲۵]، کتابی منتشر کرد که در آن به خاصیت جالبی از زبان‌ها اشاره کرده بود. ابتدا هر متن طولانی مثل یک رمان یا روزنامه را در نظر بگیرید، و هر واژه را به ترتیب دفعات حضورش در متن فهرست کنید. برای مثال، در زیر فهرست مشخصی از واژه‌ها و بسامد آنها در تک‌گویی "بودن یا نبودن" شکسپیر در نمایش هاملت آمده است:

واژه	بسامد	رتبه
the	۲۲	۱
to	۱۵	۲
of	۱۵	۳
and	۱۲	۴
that	۷	۵
a	۵	۶
sleep	۵	۷
we	۴	۸
be	۳	۹
us	۳	۱۰
bear	۳	۱۱
with	۳	۱۲
is	۳	۱۳
'tis	۲	۱۴
death	۲	۱۵
die	۲	۱۶
in	۲	۱۷
have	۲	۱۸
make	۲	۱۹
end	۲	۲۰

وقتی که این فهرست را برحسب بسامدهای رو به کاهش مرتب کنیم می‌توانیم به واژه‌ای که بالاترین بسامد را دارد- در این مورد، "the" رتبه ۱، و به دومین فرکانس بالا رتبه ۲ را بدهیم، و به همین منوال. برخی از واژه‌ها بسامد مساوی دارند (برای مثال، "a" و "seep" پنج بار تکرارمی‌شوند.) در این موارد، رتبه‌بندی بین بسامدهای مساوی را به صورت تصادفی انجام داده‌ام.

در شکل ۴-۱۷ بسامد واژه در "بودن یا نبودن" شکسپیر را به صورت تابعی از رتبه ترسیم کرده‌ام. شکل منحنی واقعا شبیه قانون توان است. اگر متنی که انتخاب کرده بودم بزرگتر می‌بود، منحنی از این هم بیشتر شکل قانون توان را به خود می گرفت.



شکل ۱۷-۴. نمایش قانون زیف با استفاده از تک‌گویی "بودن یا نبودن"

زیف متن‌های بسیار زیادی را به این صورت تحلیل کرد و پی برد که با فرض وجود یک متن طولانی، بسامد هر واژه تقریبا متناسب با معکوس رتبه یعنی

$$\left(\frac{۱}{k}\right)$$

(است. این یک قانون توان با نمای ۱- است. واژه‌ای که دومین رتبه فهرست را دارد حدود یک دوم اولی ظاهر می‌شود، سومی حدود یک‌سوم، و به همین منوال. این رابطه را امروزه قانون زیف می‌نامند و شاید یکی از مشهورترین قوانین توان شناخته شده باشد.(۱۸)

در مورد قانون زیف توضیحات متفاوت بسیاری وجود دارد. خود زیف مطرح کرد که، از یک طرف، انسان‌ها به‌طورکلی بر مبنای "اصل کمترین تلاش" اقدام می‌کنند: وقتی واژه را به کار گرفته‌اند، استفاده از آن برای معنای مشابه تلاش کمتری از این می‌خواهد که واژه متفاوتی را به کار گیرند.

از طرف دیگر، انسان‌ها مایلند ابهام نداشته باشند، که با استفاده از واژه‌های متفاوت برای معانی مشابه اما غیر یکسان به آن می‌رسند. زیف به کمک ریاضیات نشان داد که این دو فشار که همزمان اعمال می‌شوند می‌تواند توزیع قانون توان مشاهده شده را به وجود آورد.

در دهه ۱۹۵۰، بنوآ ماندلبروت[۷۲۶]، از مشاهیر فراکتال، توضیح نسبتا متفاوتی را بر مبنای درون‌مایه اطلاعاتی صورت‌بندی کرد. (۱۹) پیرو صورت‌بندی کلود شانون از نظریه اطلاعات (مقایسه کنید با فصل سوم) ماندلبروت واژه را به مانند "پیام" در نظر گرفت که از یک "منبع"

ارسال می‌شود که می‌خواهد میزان اطلاعات را به حداکثر، و به طور همزمان هزینه ارسال آن اطلاعات را به حداقل برساند. برای مثال، واژه‌های feine و cat هر دو به معنی گربه یک معنا دارند، اما ارسال دومی که کوتاه‌تر است هزینه کمتری دارد (یا انرژی کمتری می‌خواهد.) ماندلبروت نشان داد که اگر درون‌مایه اطلاعاتی و هزینه‌های ارسال به طور همزمان بهینه شوند، قانون زیف نتیجه می‌شود.

در حدود همان زمان، هربرت سیمون[۷۲۷] توضیح دیگری را پیشنهاد کرد، و مفهوم انضمام ترجیحی را پیش آگهی داد. (۲۰ سیمون فردی را به تصور آورد که هر بار یک واژه را به متنی اضافه می‌کند. او مطرح کرد که در هر زمان، احتمال این‌که آن فرد از یک واژه مجددا استفاده کند متناسب با بسامد آن زمان واژه در متن است. تمامی واژه‌هایی که هنوز ظاهر نشده‌اند، برای این‌که مورد استفاده قرار گیرند از احتمال یکسان و غیر از صفر برخوردارند. سیمون نشان داد که این فرایند منجر به متنی می‌شود که از قانون زیف تبعیت می‌کند.

از قرار معلوم ماندلبروت و سیمون درباره این‌که توضیح کدامشان درست است (از طریق نامه‌های مبارزه‌جویانه به نشریه اطلاعات و کنترل[۷۲۸]) مباحثه نسبتا تندی با یکدیگر داشتند. (۲۱)

سرانجام، در حدود همان زمان، روان‌شناس جورج میلر، با استفاده از نظریه ساده احتمالات نشان داد که متن تولید شده میمون‌ها نیز که به صورت تصادفی روی صفحه کلید تایپ ضربه می‌زنند، و هر بار که تصادفی روی کلید فاصله می‌زنند واژه‌ای خاتمه می‌یابد، از قانون زیف تبعیت می‌کند. (۲۲)

توضیحات بسیاری که از دهه ۱۹۳۰ تا دهه ۱۹۵۰ درباره قانون زیف مطرح شده است نمونه‌ای از مباحثی است که امروزه در رابطه با ساز و کارهای اطلاعاتی یا فیزیکیی که موجب پیدایش قوانین توان در طبیعت می‌شوند جریان دارد. شناخت توزیع قوانین توان، خاستگاه این قوانین، اهمیت آنها، و همانندی‌شان در رشته‌های مختلف، در حال حاضر مسئله کماکان پراهمیتی در بسیاری از حوزه‌های پژوهش سیستم‌های پیچیده است و به دلیل روشن‌تر شدن علمی که در پس این قوانین است، بی‌تردید در آینده درباره آن زیاد خواهید شنید.

فصل هجدهم: تکامل به زبان پیچیده

در فصل یکم پرسیدم، "چگونه تکامل موجوداتی را به وجود آورده است که چنین تمایز عظیمی بین سادگی فردی و بغرنجی جمعی آنها دیده می‌شود؟"

درواقع، همان‌طور که مثال‌های این کتاب نشان می‌دهند، هرچه دقیق‌تر به سیستم‌های زنده نگاه می‌کنیم، حیرت‌آورتر به نظر می‌رسد که چنین پیچیدگی ظریفی از طریق انباشت تدریجی جهش‌های مناسب یا هوس‌بازی‌های حوادث تاریخی شکل گرفته باشد. از زمان داروین تاکنون معتقدان به آفرینش قدسی یا سایر وسایل فوق طبیعی "طراحی هوشمند"، از این‌گونه استدلال بهره برده‌اند.

این پرسش که چگونه و چرا تکامل پیچیدگی را خلق می‌کند، یا این‌که اساسا این کار را می‌کند یا نه، و این‌که پیچیدگی در زیست‌شناسی چگونه باید تعریف و اندازه‌گیری شود، کماکان پیش‌روی ماست. یکی از مهمترین خدمات پژوهش در سیستم‌های پیچیده در چند دهه اخیر نشان دادن راه‌های نوینی برای نزدیک شدن به این پرسش‌های کهن بوده است. در این فصل درباره برخی از کشف‌های تازه علم ژنتیک و دینامیک تنظیم ژنتیک توضیح می‌دهم که شناخت جدید و حیرت‌آوری از کنه تکامل سیستم‌های پیچیده فراهم می‌کنند.

علم ژنتیک به زبان پیچیده

فناوری‌های نوین اغلب می‌توانند راه جریان خروشان کشف‌هایی را باز کنند که دیدگاه‌های تثبیت شده دانشمندان را در رشته مورد مطالعه‌شان تغییر می‌دهند. مثالی از این را در فصل دوم دیدیم: ابداع کامپیوتر الکترونیک و ظرفیت آن برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده از قبیل آب و هوا که نمایش وجود آشوب را امکان‌پذیر کرد. به‌تازگی، تلسکوپ‌های بسیار قدرتمند زمینی و فضا پایه در زمینه آنچه ماده سیاه و انرژی سیاه نامیده‌اند منجر به سیلی از کشف‌ها در اخترشناسی شده‌اند، که بخش عمده‌ای از آنچه را که در گذشته در کیهان‌شناسی مورد پذیرش بود به پرسش گرفته‌اند.

در مدت چهار دهه گذشته، هیچ مجموعه جدیدی از فناوری‌ها تأثیری قدرتمندتر از آنچه انقلاب مولکولی در علم ژنتیک نامیده می‌شود بر یک رشته تثبیت شده نداشته‌اند: فناوری‌هایی برای کپی کردن[۷۲۹]، مرتب کردن،[۷۳۰] ترکیب کردن، و ساخت سریع DNA، و برای تصویربرداری از ساختارهایی در سطح مولکولی که پیش از این هرگز دیده نشده بودند، و نیز برای نظاره همزمان الگوهای نمود هزاران ژن متفاوت؛ اینها تنها مثال‌های معدودی از شاهکارهای فناوری زیستی در اواخر قرن بیستم و اوایل قرن بیست و یکم هستند. و به نظر می‌رسد با هر فناوری جدید که به زیست‌شناسان امکان می‌دهد از نزدیک‌تر به درون سلول خیره شوند، پیچیدگی‌های نامنتظرتری پدیدار شود.

در زمانی که واتسون و کریک ساختار DNA را کشف کردند، تصور بر این بود که رشته‌ای از

ژن‌هاست که هر یک برای پروتئین خاصی کدگذاری شده‌اند که یک کارکرد سلول را به اجرا درمی‌آورد. این رشته از ژن‌ها را در اساس همچون یک "برنامه کامپیوتری، تصور می‌کردند که فرامین آن را RNA و ریبوزوم‌ها[۷۳۱] و مانند آنها ترجمه می‌کنند و به اجرا درمی‌آورند به این منظور که پروتئین‌هایی را ترکیب کنند که ژن‌ها مظهر آنها بودند. تغییرات کوچک تصادفی در ژنوم زمانی رخ می‌داد که در مدت فرایند تکثیر DNA[۷۳۲] خطایی صورت می‌گرفت؛ انباشت درازمدت این تغییرات تصادفی کوچک که برحسب اتفاق مناسب موقعیت بودند علت نهایی تغییر انطباق‌پذیر در زیست‌شناسی و منشأ گونه‌های جدید شمرده می‌شد.

در ۴۰ سال گذشته این دیدگاه رایج تغییرات عظیمی را پشت‌سر گذاشته است. دانش‌واژه انقلاب مولکولی نه تنها به روش‌های جدید انقلابی در علم ژنتیک، بلکه همچنین به دیدگاه جدیدی در قبال DNA و ژن‌ها و ماهیت تکامل اشاره دارد که با آن روش‌ها امکان‌پذیر شده‌اند.

ژن چیست؟

یکی از قربانیان انقلاب مولکولی مفهوم ساده زن است. طرحی از طرز کار DNA که در فصل ششم کشیدم کماکان درست است - کروموزوم‌ها دربرگیرنده باریکه‌هایی از DNA هستند که برای ایجاد پروتئین‌ها نسخه‌برداری و ترجمه می‌شوند - اما از قرار معلوم این تنها بخشی از داستان است. در زیر چند مثال می‌آید که حال و هوای بسیاری از پدیده‌هایی را که کشف شده‌اند یا دارند کشف می‌شوند روشن می‌کند؛ این پدیده‌ها، دیدگاه ساده متداول درباره ژن‌ها و وراثت را برهم می‌زنند.

ژن‌ها با "دانه‌های روی یک رشته" شباهتی ندارند. در سر کلاس زیست‌شناسی دبیرستان، ژن‌ها و کروموزوم‌ها را به کمک استعاره دانه‌های روی یک رشته توضیح می‌دادند (تصور می‌کنم حتی از ما می‌خواستند که با سرهم کردن دانه‌های پلاستیکی مدلی از آنها را بسازیم.) اما از قرار معلوم ژن‌ها آنچنان هم مجزا از هم نیستند.

ژن‌هایی هستند که با سایر ژن‌ها همپوشانی دارند - یعنی کد پروتئین‌های متفاوتی هستند، اما در نوکلئوتیدهای DNA شریک هستند. و ژن‌هایی هم هستند که به طور کامل درون ژن دیگری قرار دارند.

ژن‌ها روی کروموزوم‌ها و مابین کروموزوم‌ها حرکت می‌کنند. ممکن است عبارت "ژن‌های جهنده" را شنیده باشید. درواقع ژن‌ها می‌توانند به اطراف حرکت کنند، و شکل‌بندی کروموزوم‌ها را از نو مرتب کنند. این اتفاق می‌تواند در هر سلولی بیفتد، از جمله در سلول‌های اسپرم و تخمک، که این معنا را می‌رساند که تأثیرات را می‌توان به ارث برد. نتیجه می‌تواند میزان بسیار بالاتری از جهش در مقایسه با موارد ناشی از خطاهای تکثیر DNA باشد. برخی از دانشمندان مطرح کرده‌اند که این "عناصر متحرک ژنتیک" ممکن است مسئول تفاوت‌های

مشاهده شده در میان وابستگان نزدیک، و حتی در میان دوقلوهای همسان[۷۳۳] باشد. پدیده ژن‌های جهنده را به عنوان یکی از ساز و کارهای مسئول تنوع حیات معرفی کرده‌اند.

یک ژن واحد می‌تواند کد بیش از یک پروتئین باشد. تا مدت‌ها فرض بر این بود که یک تناظر یک-به-یک بین ژن‌ها و پروتئین‌ها وجود دارد. مشکل این فرض از زمانی مطرح شد که ترتیب ژنوم انسان مشخص گردید، و روشن شد که گرچه تعداد انواع مختلف پروتئین‌ها بیش از ۱۰۰.۰۰۰ است، ژنوم انسان تنها دربرگیرنده ۲۵۰۰۰ ژن است. پدیده‌های به هم چسباندن بدیل[۷۳۴] و ویرایش RNA[۷۳۵] این اختلاف را توضیح می‌دهند. این فرایندها می‌توانند از راه‌های مختلف RNA پیام‌رسان را دگرگون کنند، البته پس از این‌که از DNA نسخه‌برداری کرده و پیش از این‌که به آمینواسیدها تبدیل شوند.

با توجه به تمامی این بغرنجی‌ها، حتی زیست‌شناسان حرفه‌ای هم در مورد تعریف "ژن" توافقی ندارند. در این اواخر گروهی از فیلسوفان علم و زیست‌شناسان از ۵۰۰ زیست‌شناس یک نظرسنجی انجام دادند: به هر زیست‌شناس به طور مستقل یک رشته DNA واقعی اما غیرمعمول داده شد و از آنها سؤال شد که آیا این رشته واجد شرایطی هست که "ژن" نامیده شود و این‌که چقدر به پاسخ خود اعتماد دارند.(۲۲) از قرار معلوم نظر آنها در مورد این رشته متفاوت از کار درآمد، حدود ۶۰% از یک پاسخ مطمئن بودند و ۴۰% از پاسخ دیگر اطمینان داشتند. طبق گزارش مقاله‌ای در مجله نیچر که نتایج این پژوهش را منعکس کرد، "هر چقدر که دانشمندان در علم ژنتیک مولکولی بیشتر خبره می‌شوند، اطمینان به این‌که ژن واقعا چیست، یا اصلا چیزی هست یا نه، مشکل‌تر می‌شود."(۲۳)

پیچیدگی سیستم‌های زنده عمدتا ناشی از شبکه ژن‌هاست و نه مجموع تأثیرات مستقل تک‌تک ژن‌ها. همان‌طور که در فصل شانزدهم توضیح دادم، شبکه‌های تنظیم‌کننده ژنی در حال حاضر در مرکز توجه علم ژنتیک قرار دارد. در دیدگاه قدیمی، ژن‌ها همچون دانه‌های روی یک رشته، که قوانین مندل نمونه‌ای از آن است، خطی به حساب می‌آیند - هر ژن به طور مستقل به کل رخ‌مون کمک می‌کند. دیدگاه جدید و عموما پذیرفته شده این است که ژن‌های موجود در یک سلول در شبکه‌های غیرخطی پردازش اطلاعات عمل می‌کنند، که در آن برخی ژن‌ها، در واکنش به وضعیت سلول، ژن‌های دیگر را کنترل می‌کنند - یعنی ژن‌ها به طور مستقل عمل نمی‌کنند.

در کارکرد ژن‌هایی که می‌توانند بدون هرگونه تغییر در توالی DNA ژن رخ دهند، تغییراتی موروثی وجود دارد. این‌گونه تغییرات در شاخه رو به رشد علم پس‌زایی[۷۳۶] مورد مطالعه قرار می‌گیرند، یک نمونه آن چیزی است که متیلات‌سازی[۷۳۷] DNA نامیده می‌شود و در آن یک آنزیم مولکول‌های خاصی از سلول را به قسمت‌هایی از رشته DNA متصل کرده و به طور مؤثر آن قسمت‌ها را "خاموش می‌کند".

وقتی این اتفاق در یک سلول می‌افتد، تمامی اخلاف آن سلول متیلات‌سازی DNA یکسانی خواهند داشت. به این ترتیب اگر متیلات‌سازی DNA در یک سلول اسپرم یا تخمک روی دهد، به ارث خواهد رسید.

از یک طرف، این نوع اثر پس‌زایی در تمام مدت در سلول‌های ما رخ می‌دهد و از بسیاری جهات برای حیات ضروری است و ژن‌هایی را که دیگر مورد نیاز نیستند خاموش می‌کند (برای مثال: وقتی به بزرگسالی می‌رسیم، دیگر نیاز نداریم مانند کودک رشد کنیم؛ بدین‌ترتیب ژن‌های کنترل‌کننده رشد جوانی متیلاتی[۷۳۸] می‌شوند.) از طرف دیگر، متیلات‌سازی نادرست یا فقدان آن، علت برخی از اختلال‌های ژنتیک و بیماری‌هاست. درواقع، برخی تصور می‌کنند که فقدان متیلات‌سازی لازم در مدت رشد جنین دلیل این است که جنین‌های کلون شده[۷۳۹] در بسیاری از موارد زنده متولد نمی‌شوند، یا این‌که بسیاری از حیوانات کلون شده که ادامه حیات می‌دهند، اغلب اختلال‌های مهلکی دارند. (۲)

در این اواخر کشف شده است که در بسیاری از اندام‌واره‌ها بخش بزرگی از DNA که RNA آن را نسخه‌برداری می‌کند متعاقبا به پروتئین تبدیل نمی‌شود. (۵) این به اصطلاح RNA غیر کدگذار می‌تواند تأثیرات تنظیم‌کننده بسیاری بر روی ژن‌ها، و همچنین بر نقش کارکردی سلول‌ها داشته باشد، در حالی که پیش از این تصور بر این بود که هر دو این کارها در قلمرو پروتئین‌ها انجام می‌شوند.

اهمیت RNA غیر کدگذار در حال حاضر موضوع پژوهش پویایی در علم ژنتیک است. (۶) علم ژنتیک واقعا بغرنج شده است و پیامدهای تمامی این پیچیدگی‌ها برای زیست‌شناسی عظیم است. در سال ۲۰۰۳ پروژه ژنوم انسان کل ژنوم انسان را منتشر کرد - یعنی، رشته کامل DNA انسان. گرچه از این پروژه مطالب زیادی آموخته‌ایم، نتایج آن از آنچه بسیاری تصور می‌کردند کمتر امیدوارانه بوده است. برخی معتقد بودند که نقشه‌برداری کامل ژن‌های انسان شناخت نسبتا کاملی را از نحوه کار ژن‌ها فراهم می‌کند، نشان می‌دهد که چه ژن‌هایی مسئول چه خصیصه‌هایی هستند، و این خود راه کشف‌های انقلابی در پزشکی را نشان می‌دهد و درمان ژنی را هدف‌گیری می‌کند. گرچه مشخص شده است که پای ژن‌های معینی در بیماری‌های مشخصی در میان است، از قرار معلوم صرف دانستن ترتیب DNA برای شناخت مجموعه منحصر به فرد خصیصه‌ها و نقص‌های یک فرد (یا هر اندام‌واره پیچیده) چندان کافی نیست.

بخشی که به یافتن ترتیب ژن‌ها امید زیادی بسته است صنعت زیست‌فناوری[۷۴۰] بین‌المللی است. مقاله‌ای که به‌تازگی در نیویورک تایمز منتشر شد، درباره تأثیراتی که تمامی این پیچیدگی ژنتیک کشف شده بر زیست‌فناوری دارد چنین گزارش می‌دهد: "این فرض که ژن‌ها به طور مستقل عمل می‌کنند از ۱۹۷۶، سال تأسیس اولین شرکت زیست فناوری، نهادینه شده است.

در حقیقت، این بنیاد اقتصادی و تنظیم‌کننده‌ای است که کل صنعت زیست‌فناوری بر روی آن بنا شده است مشکل تنها این نیست که مبانی علم ژنتیک به سرعت تغییر می‌کند.
موضوعی که در کمین زیست فناوری نشسته وضعیت حق بهره‌برداری ژنتیکی است. به مدت چند دهه شرکت‌های زیست‌فناوری حق بهره‌برداری ترتیب‌های خاصی از DNA انسان را به ثبت رسانده‌اند که تصور می‌شد "یک محصول کارکردی مشخص" را کدگذاری می‌کنند.) اما همان‌طور که در بالا دیدیم، بسیاری و شاید اکثر خصیصه‌های پیچیده را ترتیب دقیق DNA یک ژن خاص معین نمی‌کند. در نتیجه، آیا این شکل از حق بهره‌برداری قابل دفاع است؟ اگر "محصول کارکردی" نتیجه فرایندهای پس‌زایی باشد که بر ژن یا تنظیم‌کننده‌های آن تأثیر می‌گذارد چه؟ یا اگر این محصول مستلزم نه تنها ژن به ثبت رسیده بلکه ژن‌هایی باشد که آن را تنظیم می‌کنند، و همچنین ژن‌هایی که این ژن‌ها را تنظیم می‌کنند، و به همین منوال، چه؟ و اگر آن ژن‌های تنظیم‌کننده را کس دیگری به ثبت رسانده باشد، چه؟ وقتی دنیای ژن‌های خطی را ترک کنیم و با غیرخطی بودن ماهوی روبرو شویم، معنای این‌گونه حق بهره‌برداری ناروشن می‌شود و ممکن است در سال‌های پیش رو امکان استخدام وکلا و قضات حق بهره‌برداری را بیشتر کند. و حق بهره‌برداری تنها مشکل پیش رو نیست. همان‌طور که روزنامه نیویورک تایمز اشاره می‌کند، "شواهد مربوط به ژن‌های شبکه شده، بنیان علمی تقریبا هر ارزیابی رسمی ریسک تجاری محصولات زیست‌فناوری را درهم می‌ریزد، از محصولات به لحاظ ژنتیکی مهندسی شده گرفته تا داروسازی را."(۹) این کشف‌های جدید ژنتیک، در کل، نه تنها علم ژنتیک، بلکه نظریه تکامل را عمیقا به چالش کشیده است.

اوو-دوو[۷۴۱] اوودوو نام مستعاری برای "زیست‌شناسی تکاملی رشد"[۷۴۲] است. خیلی‌ها در مورد این رشته و کشف‌های اخیر آن که ادعا می‌شود حداقل سه راز بزرگ علم ژنتیک و تکامل را توضیح می‌دهد، هیجان‌زده هستند:

(۱۱) انسان‌ها تنها حدود ۲۵۰۰۰ ژن دارند. چه چیز مسئول پیچیدگی ماست؟

(۲) به لحاظ ژنتیک، انسان شباهت زیادی با بسیاری از گونه‌های دیگر دارد.
برای مثال بیش از ۹۰% DNA ما با موش یکسان است و بیش از ۹۵% آن با شمپانزه. چرا بدن ما این‌قدر با سایر حیوانات تفاوت دارد؟
(۳) با فرض این‌که نظر استفن جی. گولد و دیگران درباره تعادل منقطع در تکامل درست باشد، چگونه امکان دارد که تغییرات بزرگ ریختی[۷۴۳] بدن در دوره‌های کوتاهی از تکامل رخ دهد؟
به‌تازگی چنین مطرح شده که پاسخ به این پرسش‌ها، حداقل تا حدودی، در کشف کلیدهای ژنتیک نهفته است.
رشته‌های زیست‌شناسی مربوط به رشد و رویان‌شناسی[۷۴۴] به مطالعه فرایندهایی می‌پردازند که از طریق آنها سلول تک تخمک بارور به اندام‌واره زنده‌ای کارآمد با میلیاردها سلول تبدیل می‌شود. اما نظریه ترکیب مدرن معطوف به ژن‌ها بود؛ به گفته زیست‌شناس رشد، شون کارول[۷۴۵]، به زیست‌شناسی رشد و رویان‌شناسی به صورت چیز مرموزی نگاه می‌شد که به طریقی اطلاعات ژنتیک را به حیوانات سه بعدی کارآمد تبدیل می‌کرد. (۱۱)
این امر تا حدودی ناشی از این دیدگاه بود که تنوع عظیم ریختی حیوان در اساس با تفاوت‌های زیاد در تعداد ژن‌ها و شکل‌بندی DNA ژن‌ها توضیح داده می‌شود.
این دیدگاه در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ به چالش کشیده شد. همان‌طور که در بالا اشاره کردم، ترتیب DNA نشان داده بود که در بسیاری از حیوانات متفاوت شباهت‌های گسترده‌ای در DNA وجود دارد. پیشرفت‌های علم ژنتیک نیز شناخت مشروحی از ساز و کارهای نمود ژن در سلول در مدت رشد نطفه و جنین فراهم کرد. این ساز و کارها بسیار متفاوت از آنچه عموما انتظار می‌رفت از کار درآمدند. رویان‌شناس‌ها پی بردند که در تمامی حیوانات پیچیده تحت مطالعه، مجموعه کوچکی از "ژن‌های حاکم"[۷۴۶] وجود دارند که شکل‌گیری و ریخت بسیاری از قسمت‌های بدن را تنظیم می‌کنند.
حیرت‌آورتر از همه این‌که روشن شد این ژن‌های حاکم، در طیف گسترده‌ای از گونه‌ها که تفاوت‌های ریختی بزرگی دارند، از پشه میوه گرفته تا انسان، در تعداد زیادی رشته‌های یکسان DNA سهیم هستند.
با توجه به این‌که ژن‌های یکسانی حاکم بر فرایندهای مربوط به رشد حیوانات هستند، چگونه است که این حیوانات متفاوت چنین قسمت‌های متفاوتی را پیدا می‌کند؟ طرفداران اوو-دوو مطرح می‌کنند که تنوع ریختی در میان گونه‌ها، در اکثر موارد ناشی از تفاوت ژن‌ها نیست، بلکه مربوط به کلیدهای ژنی است، که برای خاموش و روشن کردن ژن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این کلیدها رشته‌ای از DNA هستند _که طولشان اغلب چند صد جفت بازی است -

و هیچ پروتئینی را کدگذاری نمی‌کنند. آنها برعکس بخشی از چیزی هستند که در گذشته DNA" به دردنخور"[۷۴۷] نامیده می‌شد، اما در حال حاضر مشخص شده است که در تنظیم ژن نقش دارند.

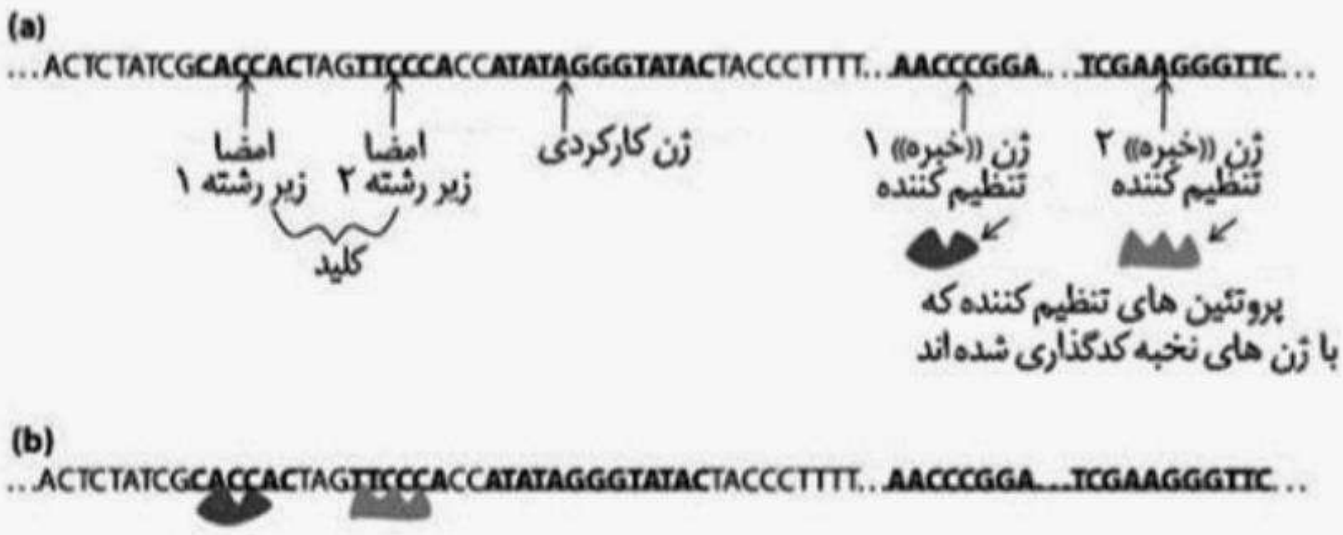
شکل ۱-۱۸ نشان می‌دهد که کلیدها چگونه کار می‌کنند. یک کلید رشته‌ای از AND غیر کدگذار است که نزدیک به یک ژن خاص قرار می‌گیرد.

این رشته از مولکول‌ها به طور معمول ده دوازده "زیر رشته نشان"[۷۴۸] را در خود جای می‌دهند که هر کدام از آنها با یک پروتئین خاص پیوند شیمیایی دارد، یعنی پروتئین به رشته DNA منضم می‌شود. این که ژن نزدیک به آن نسخه‌برداری شود یا نشود، و با چه سرعتی، وابسته به ترکیب پروتئین‌هایی است که به این زیررشته‌ها منضم شده‌اند. پروتئین‌هایی که به نسخه‌برداری امکان می‌دهند پیوندگاه[۷۴۹] قدرتمندی را برای آن مولکول‌های RNA بسازند که عمل نسخه‌برداری را انجام می‌دهند؛ پروتئین‌هایی که مانع نسخه‌برداری می‌شوند از پیوند همان مولکول‌های RNA به DNA جلوگیری می‌کنند.

برخی از این پروتئین‌ها می‌توانند تأثیرات بقیه را منتفی کنند.

این پروتئین‌های خاص تنظیم‌کننده از کجا سرچشمه می‌گیرند؟ مانند تمامی پروتئین‌ها، از ژن‌ها سرچشمه می‌گیرند و در این مورد خاص از ژن‌های تنظیم‌کننده که چنین پروتئین‌هایی را کدگذاری می‌کنند تا ژن‌های دیگر را، بسته به وضعیت جاری سلول، روشن یا خاموش کنند.

این ژن‌های تنظیم‌کننده چگونه وضعیت جاری سلول را معین می‌کنند؟ با وجود یا عدم وجود پروتئین‌هایی که از طریق پیوند به کلیدهای ژن‌های تنظیم‌کننده از وضعیت سلول خبر می‌دهند. چنین پروتئین‌هایی را اغلب سایر ژن‌های تنظیم‌کننده کدگذاری می‌کنند.



شکل ۱-۱۸. نمایش "کلیدهای" ژنتیک. (a) یک رشته، DNA که شامل یک کلید با دو زیر رشته نشان، یک ژن کارکردی که آن کلید روشنش کرده، و دو ژن حاکم تنظیم‌کننده است.

ژن‌های حاکم تنظیم‌کننده موجب پیدایش پروتئین‌های تنظیم‌کننده (b). می‌شوند پروتئین‌های تنظیم‌کننده با زیر رشته‌های نشان پیوند می‌خورند، و ژن کارکردی را روشن می‌کنند - یعنی به آن اجازه می‌دهند نسخه‌برداری شود.

در کل، شبکه‌های تنظیم‌کننده ژنتیک از چندین نوع مختلف موجودیت تشکیل شده‌اند، از جمله ژن‌های کارکردی که پروتئین‌ها (و پاره‌ای اوقات RNA های غیرکدگذار) را کدگذاری می‌کنند و ژن‌ها را از طریق پیوند به کلیدهای DNA نزدیک به ژن مورد نظر روشن یا خاموش می‌کنند.

حال می‌توانم پاسخ‌های اوو-دوو را به سه پرسش ابتدای این قسمت مطرح کنم. این‌که انسان‌ها (و سایر حیوانات) می‌توانند پیچیده‌تر از تعداد ژن‌هایشان باشند به دلایل زیادی است که برخی از آنها در قسمت "ژن چیست" فهرست شد. اما دلیل اصلی این که شبکه‌های تنظیم‌کننده ژنتیک تعداد زیادی الگوی نمود ژن را امکان‌پذیر می‌کنند، این است که شیوه‌های ممکن بسیار زیادی برای انضمام پروتئین‌ها به کلیدها وجود دارد.

دلیل این‌که ما انسان‌ها می‌توانیم با سایر موجوداتی که خیلی متفاوت از ما هستند در ژن‌های بسیار زیادی سهیم باشیم این است که گرچه ژن‌ها ممکن است یکسان باشند، رشته‌هایی که کلیدها را شکل می‌دهند اغلب به طور متفاوتی تکامل یافته‌اند. تغییرات کوچکی در کلیدها می‌تواند الگوهای بسیار متفاوتی از ژن‌ها را ایجاد کند که در مدت رشد روشن و خاموش می‌شوند. بدین ترتیب بر طبق اوو-دوو، تنوع جانداران عمدتا ناشی از ویرایش کلیدهاست و نه ژن‌ها. این امر درعین‌حال علت تغییرات بزرگ ریختی است - شاید شامل گونه‌زایی[۷۵۰] هم باشد - که ممکن است در مدت تکامل خیلی سریع اتفاق بیفتد: ژن‌های حاکم یکسان می‌مانند، اما کلیدها در معرض ویرایش هستند. بر طبق اوو-دوو نیروی اصلی تکامل نه ظهور ژن‌های جدید بلکه همین ویرایش‌ها - در قسمت‌هایی از DNA هایی است که مدت‌ها تصور بر این بود که "به درد نخور" هستند. زیست‌شناس جان ماتیک[۷۵۱] تا آنجا پیش می‌رود که می‌گوید: "بازی روزگار... این است که از قرار معلوم چیزی که DNA به دردنخور تصور می‌شد و کنار گذاشته شده بود راز پیچیدگی انسان را دربردارد."(۱۲) یک مورد تکان‌دهنده از نتایج اوو-دوو مثال مشهور تکامل نوک سهره‌هاست. همان‌طور که در فصل ۵ توضیح دادم، داروین مشاهده کرد که در میان سهره‌های بومی جزایر گالاپاگوس تنوع زیادی در اندازه و شکل نوک وجود دارد. تا همین اواخر، اکثر زیست‌شناسان تکاملی فرضشان بر این بود که چنین تنوعی ناشی از فرایندی تدریجی است که در جریان آن جهش‌های تصادفی چندین ژن مختلف انباشته شده‌اند. اما به‌تازگی، ژنی به نام BMP۴ کشف شده که با تنظیم ژن‌هایی که استخوان تولید می‌کنند اندازه و شکل نوک را کنترل می‌کند. هر چقدر که BMP۴ در مدت رشد پرنده قدرتمندتر نمود پیدا کند، نوک بزرگ‌تر و قوی‌تر می‌شود. ژن دیگری به نام کالمودولین[۷۵۲] کشف شده است که به نوک‌های دراز و نازک ارتباط دارد. همان‌طور که کارول کیسوک یون[۷۵۳] در نیویورک تایمز می‌نویسد: "برای روشن کردن این‌که خود ژن BMP۴ واقعا می‌تواند موجب رشد نوک‌های

باشکوه‌تر، بزرگ‌تر، و فندق‌شکن شود، پژوهشگران به طور مصنوعی تولید BMP۴ را در جریان رشد نوک در نطفه جوجه‌ها تقویت کردند. جوجه‌ها رفته رفته نوک‌های پهن‌تر و بلندتر و محکم‌تری پیدا کردند که مشابه نوک سهره فندق‌شکن[۷۵۴] بود... مثل مورد BMP۴ هر قدر که کالمودولین بیشتر نمود پیدا می‌کرد، نوک بلندتر می‌شد.

وقتی که دانشمندان به طور مصنوعی کالمودولین را در نطفه جوجه‌ها افزایش دادند، جوجه‌ها رفته رفته نوک‌های طولانی‌تری پیدا کردند، درست مثل تیغ‌برگ‌های کاکتوس[۷۵۵]... در نتیجه، تنها با این دو ژن، و نه ده‌ها یا صدها ژن، دانشمندان امکان خلق مجدد نوک را در اختیار داشتند، حجیم یا کلفت یا ۱۳)". دراز نتیجه این‌که تغییرات بزرگ در ریخت نوک‌ها (و سایر خصیصه‌ها) می‌تواند به سرعت رخ دهد بی‌آنکه نیاز داشته باشیم مدتی طولانی در انتظار جهش‌های تصادفی باشیم.

مثال دیگری از این‌که اوو-دوو دیدگاه‌های قدیمی درباره تکامل را به الش می‌کشد مربوط به مفهوم تکامل همگراست.[۷۵۶] در درس زیست‌شناسی دوره دبیرستانم، یاد می‌گرفتیم که چشم اختاپوس و چشم انسان -که از نظر ریخت بسیار متفاوت‌اند - نمونه‌هایی از تکامل همگرا هستند: به علت انتخاب طبیعی که در دو محیط متفاوت عمل می‌کرد چشم‌ها انطباق مناسبی یافتند. چشم در این دوگونه به طور کاملا مستقل از یکدیگر تکامل یافت.

اما شواهد تازه نشان داده‌اند که تکامل این دوگونه از چشم آن‌قدر هم که قبلا تصور می‌شد مستقل از یکدیگر نیست. انسان، اختاپوس، پشه، و بسیاری از گونه‌های دیگر ژن مشترکی دارند که PAX۶ نامیده می‌شود، و به هدایت رشد چشم‌ها کمک می‌کند. در آزمایشی عجیب اما گویا، زیست‌شناس سویسی والتر گهرینگ ژن‌های PAX۶ را از موش برداشت و به ژنوم پشه میوه داخل کرد.(۱۴) در آزمایش‌های مختلف PAX۶ در سه قسمت خاص و متفاوت ژنوم قرار گرفت: به ترتیب، قسمت‌هایی که رشد پاها، بال‌ها، و شاخک‌ها را هدایت می‌کنند. پژوهشگران به نتایج خوفناکی رسیدند:

ساختارهایی مشابه چشم که بر روی پاها، بال‌ها، و شاخک‌ها شکل گرفتند.

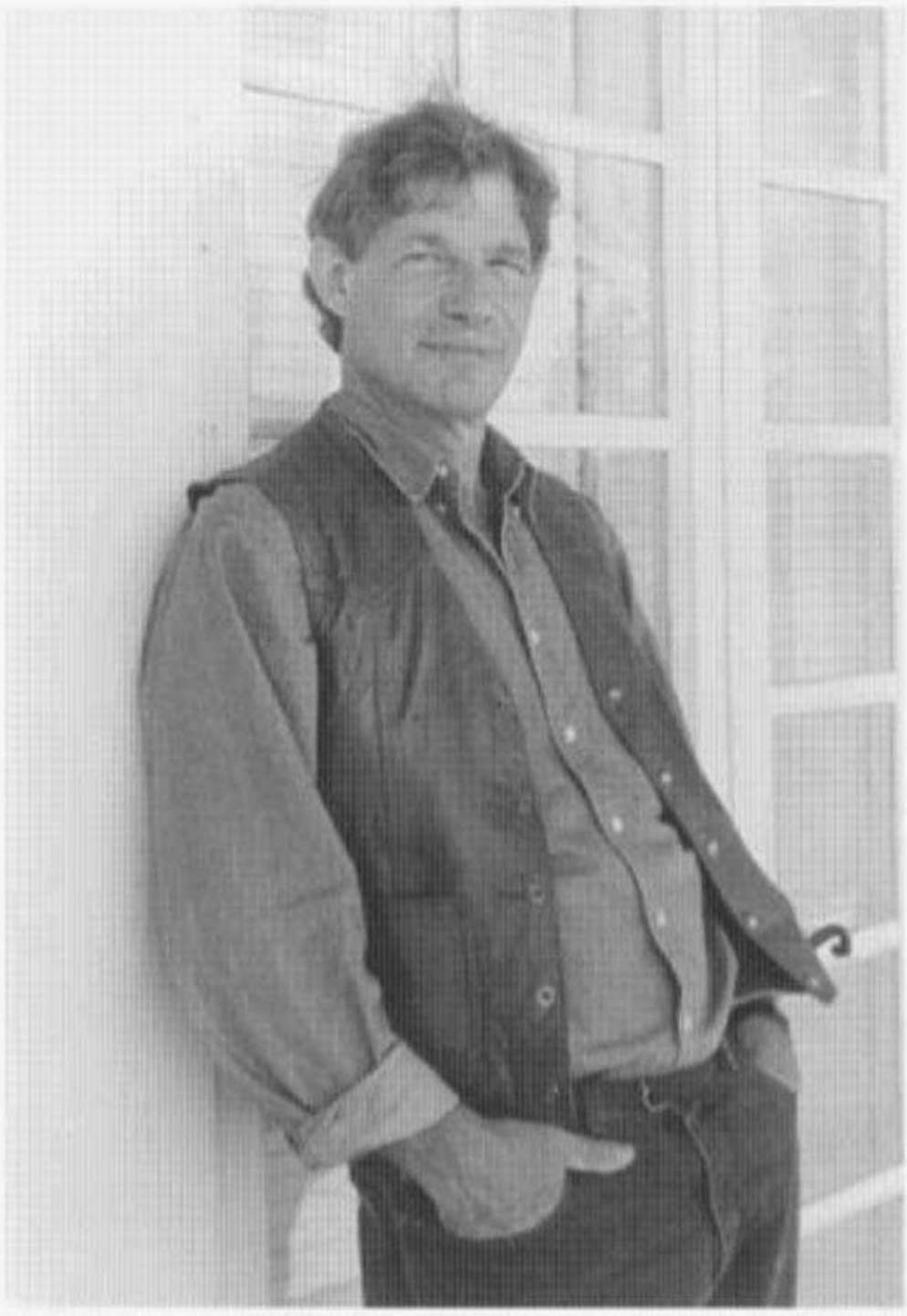
افزون بر این، این ساختارها شبیه چشم پشه بودند، و نه چشم موش.

نتیجه‌گیری گهرینگ[۷۵۷]: چشم نه در دفعات متعدد و به طور مستقل، بلکه تنها یک بار، در نیای مشترکی با ژن PAX۶ تکامل یافت. این نتیجه‌گیری در میان زیست‌شناسان تکاملی کماکان بسیار مورد مناقشه است. (۱۵)

گرچه شبکه‌های تنظیم‌کننده ژنتیک که ژن‌های حاکم هدایتشان می‌کنند می‌توانند تنوع زیادی را به وجود آورند، درعین‌حال محدودیت‌های معینی را بر تکامل تحمیل می‌کنند. دانشمندان اوو-دوو مدعی هستند که انواع ریختی بدن (نقشه‌های بدن[۷۵۸] که هر اندام‌واره می‌تواند داشته باشد توسط ژن‌های حاکم به شدت محدود شده‌اند، و به همین دلیل است که تعداد نقشه‌های بنیادی بدن در طبیعت زیاد نیست. این امکان وجود دارد که ژنوم‌هایی بسیار متفاوت از ژنوم انسان بتوانند به نوع جدیدی از نقشه‌های بدن بینجامد، اما در عمل، تکامل نمی‌تواند ما را به آنجا برساند، چون ما وابسته به ژن‌های تنظیم‌کننده موجود هستیم. امکان‌هایی که در تکامل داریم محدود شده است. به زعم اوو-دوو، این تصور که "هر خصیصه‌ای می‌تواند به طور نامحدود تغییر کند" نادرست است.

تنظیم ژنتیک و "خاستگاه‌های نظم" کافمن

استوارت کافمن[۷۵۹] یک زیست‌شناس نظری است که بیش از چهل سال، یعنی مدت‌ها پیش از برتری یافتن اوو-دوو، به شبکه‌های تنظیم‌کننده و نقش آنها در محدود کردن تکامل اندیشیده است. او به این نیز اندیشیده است که "نظمی" که از چنین شبکه‌های پیچیده‌ای پدیدار می‌شود چه پیامدهایی دارد.



استوارت کافمن

کافمن از شخصیت‌های برجسته در زمینه سیستم‌های پیچیده است.

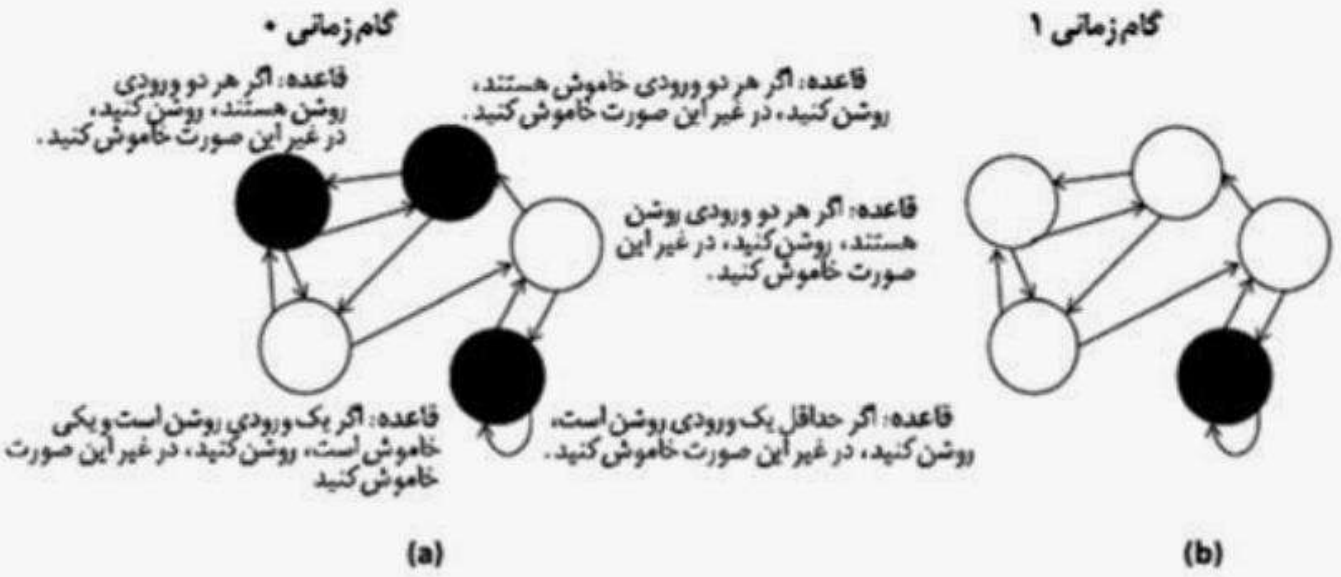
نخستین برخورد من با او در کنفرانسی بود که در آخرین سال دوره تحصیلات تکمیلی‌ام در آن حضور یافته بودم. او در این کنفرانس اولین سخنران بود، و باید بگویم که برای من الهام‌بخش‌ترین سخنرانیی بود که تا آن زمان شنیده بودم. موضوع آن را دقیقا به خاطر نمی‌آورم؛ تنها به خاطر می‌آورم که احساس می‌کردم آنچه او به زبان می‌آورد بسیار عمیق است، پرسش‌هایی که به آنها می‌پردازد بسیار بااهمیتند، و این‌که من هم می‌خواهم روی این موضوعات کار کنم.

کافمن در ابتدای کار حرفه‌ای خود برای دوره کوتاهی به فیزیک پرداخت اما خیلی زود متوجه پژوهش در علم ژنتیک شد. پژوهش او اصیل و مؤثر بود؛ و بارها در محیط‌های دانشگاهی مورد تحسین قرار گرفت و از جمله جایزه "نوابغ" مک‌آرتور، و عضویت هیئت علمی انستیتوی سانتافه را نصیب او کرد. در سمینارهای انستیتوی سانتافه، کافمن پاره‌ای اوقات با گفتن این‌که "می‌دانم که دکتر روستایی ساده‌ای هستم، اما..." به میان حرف دیگران می‌پرید و پنج دقیقه‌ای نظر فی‌البداهه خود را درباره موضوعی خیلی فنی که پیش از آن هرگز فکرش را نکرده بود، سلیس و روشن ابراز می‌کرد. یکی از روزنامه‌نگاران او را "بداهه‌سرا"[۷۶۰] در سطح بهترین‌های

جهان، (۱۶) نامید، که توصیف شایسته‌ای است و آن را کاملا ستایش‌آمیز به حساب می‌آورم.
تأثیر فروتنانه "دکتر روستایی ساده" استوارت کافمن، شخصیت او را به خوبی نشان نمی‌دهد. کافمن از متفکران بزرگ و دوراندیش سیستم‌های پیچیده است، و نه کسی که او را "متواضع" یا "فروتن" بنامید. در انستیتوی سانتافه به شوخی می‌گفتند که استوارت "تکامل داروینی" را به ثبت رسانده است، درواقع، او تکنیکی را به نام خود به ثبت رسانده که در ایجاد رشته‌های پروتئین به منظور کشف داروهای نو و مفید کاربرد دارد.

شبکه‌های تصادفی بولی

[۷۶۱] کافمن شاید اولین نفری باشد که مدل‌های کامپیوتری ساده‌ای را برای شبکه‌های تنظیم‌کننده ژنتیک ابداع کرد و به مطالعه آنها پرداخت. مدل او ساختاری به نام شبکه تصادفی بولی[۷۶۲] (RBN) بود که در واقع تعمیم خودکار سلولی است.
مثل هر شبکه دیگری، یک RBN شامل مجموعه‌ای از گره‌ها و پیوندهای میان گره‌هاست. مثل یک خودکار سلولی، RBN وضعیت گره‌هایش را در گام‌های زمانی ناپیوسته به روز می‌کند. در هر گام زمانی، هر گره می‌تواند یا در وضعیت روشن باشد یا در وضعیت خاموش.
خاصیت روشن و خاموش تنها وضعیت‌های مجازی هستند که دانش‌واژه بولی به آن ارجاع می‌کند: یک قاعده (یا تابع) بولی قاعده‌ای است که تعدادی ورودی را، که هر کدام ۰ یا ۱ هستند، می‌گیرد و از آن ورودی‌ها یک خروجی ۰ یا ۱ می‌سازد. این‌گونه قواعد به نام ریاضیدان جورج بول[۷۶۳] خوانده می‌شود، که تحقیقات مفصلی در مورد آنها انجام داد.
در یک RBN، پیوندها جهت‌دار هستند: اگر گره A به گره B پیوند داشته باشد، گره B لزوما به گره A پیوند ندارد (البته می‌تواند داشته باشد).
درجه ورودی هر گروه (یعنی تعداد پیوندها از سایر گره‌ها به آن گره) در مورد هر گره یکسان است _ بگذارید این عدد را K بنامیم.
در اینجا نشان می‌دهم که چگونه یک RBN را می‌سازیم: برای هر گره، پیوندهای ورودی به آن گره را از K گره دیگر که به طور دلخواه انتخاب شده‌اند بسازید (از جمله، شاید پیوند با خود گره[۷۶۴])، و به آن گره یک قاعده بولی دلخواه اختصاص دهید که K وضعیت خاموش یا روشن را می‌گیرد، و یک وضعیت روشن یا خاموش را بیرون می‌دهد (شکل ۱۸-۲ A برای اجرای این RBN، به هر گره به دلخواه یک وضعیت اولیه روشن یا خاموش بدهید. سپس در هر گام زمانی، هر گره وضعیت خود را به گرهی که با آن پیوند دارد منتقل می‌کند، و وضعیت گره‌هایی را که با آن پیوند دارند به صورت ورودی دریافت می‌کند. سپس هر گره قاعده خود را در مورد ورودی‌هایش به کار می‌گیرد تا وضعیتش را در دور بعدی تعیین کند. همه این موارد در شکل ۱۸-۲ نشان داده شده‌اند که اقدام یک RBN را نشان می‌دهد که پنج گره دارد که هریک در هر گام زمانی دو ورودی دارند.



شکل ۱۸-۲. (a) یک شبکه تصادفی بولی با پنج گره. درجه ورودی (K) هر گره مساوی ۲ است. در گام زمانی صفر، هر گره در وضعیت دلخواه اولیه: روشن (سیاه) یا خاموش (سفید) است. (b) گام زمانی ۱ شبکه را پس از این که هر گره وضعیتش را به روز کرده نشان می‌دهد.

RBN ها مشابه خودکارهای سلولی هستند، اما دو تفاوت اساسی دارند:

گره‌ها به گره‌های همسایه متصل نیستند مگر به صورت تصادفی، و به جای این که تمامی گره‌ها قاعده یکسانی داشته باشند، هر گره قاعده خود را دارد.

در تفکر کافمن، RBN در مجموع مدل ایده‌آل یک شبکه تنظیم‌کننده ژنتیک است که در آن گره‌ها بازنمود "ژن‌ها" هستند، و "ژن A که ژن B را تنظیم می‌کند" با گره A که به گره B پیوند دارد نمایش داده می‌شود. البته این مدل بسیار ساده‌تر از شبکه‌های ژنی واقعی است. در حال حاضر استفاده از چنین مدل‌های ایده‌آلی متداول‌تر از پیش است، اما زمانی که کافمن کار خود را در دهه ۱۹۶۰ آغاز کرد، کمتر مورد پذیرش بود.

حیات بر لبه آشوب

کافمن و دانشجویان و همکاران او یک خروار شبیه‌سازی RBN را با مقادیر مختلف درجه ورودی K برای هر گره به انجام رسانده‌اند که از یک وضعیت اولیه تصادفی آغاز می‌گردد و در یک رشته از گام‌های زمانی تکرار می‌شود، و گره‌های RBN به مدتی وضعیت‌شان را به طور تصادفی تغییر می‌دهند و سرانجام یا در نقطه ثابتی تثبیت می‌شوند (یعنی وضعیت تمام گره‌ها ثابت می‌ماند)، یا در یک حالت نوسانی هستند (یعنی وضعیت کل شبکه در یک دوره زمانی کوتاه نوسان می‌کند)؛ یا اساسا تثبیت نمی‌شوند، و در جریان تعداد زیادی تکرار، رفتاری به ظاهر تصادفی را درپیش می‌گیرند. چنین رفتاری آشوبناک است، به این معنی که مسیر دقیق وضعیت شبکه وابستگی حساسی به وضعیت اولیه شبکه دارد.

کافمن پی برد که رفتار معمول نهایی را تعداد گره‌های شبکه و درجه ورودی هر گره تعیین می‌کند. وقتی K از عدد ۱ (یعنی هر گره دقیقا یک ورودی دارد) تا تعداد کل گره‌ها (یعنی هر گره از تمامی گره‌های دیگر از جمله خودش، ورودی دریافت می‌کند) افزایش پیدا می‌کند، رفتار RBN از میان سه "رژیم" رفتاری متفاوت (نقطه ثابت، نوسانی، آشوبناک) می‌گذرد.

شاید متوجه شده باشید که این حالت با رفتار نگاشت منطق‌گرا وقتی R افزایش داده می‌شود همسان است (نگاه کنید به فصل ۲). در K = ۲ کافمن رژیم "جالبی" را یافت نه نقطه ثابت، نه نوسانی، و نه کاملا آشوبناک. وی در قیاس با دانش‌واژه "هجوم آشوب" که در مورد نگاشت منطق‌گرا به کار رفت، این رژیم را "لبه آشوب"[۷۶۵] نامید.

کافمن با فرض این‌که رفتار RBN او بازتاب رفتار شبکه‌های ژنی واقعی است، و با مقایسه با حالت‌های آب بر اثر تغییر دما، نتیجه گرفت که "شبکه‌های ژنومی[۷۶۶] که رشد تخم بارور[۷۶۷] را تا رسیدن به بزرگسالی کنترل می‌کنند می‌توانند در سه رژیم اصلی وجود داشته باشند. یک رژیم منجمد منظم، یک رژیم گازی آشوبناک، و نوعی رژیم مایع که در ناحیه‌ای بین نظم و آشوب قرار دارد."(۱۷)

کافمن استدلال کرد که برای این‌که اندام‌واره‌ای هم زنده باشد و هم باثبات، شبکه‌های ژنتیکی که RBN مدل آنهاست باید در رژیم "مایع" جالب توجهی باشند - نه خیلی خشک یا "یخزده" و نه خیلی آشوبناک یا "گازی".

به بیان خود او "حیات بر لبه آشوب هستی می‌یابد."(۱۸) کافمن برای توضیح یافته‌هایش، از واژگان نظریه سیستم‌های دینامیک بهره برد - جلب‌کننده، دوشاخگی و آشوب. فرض کنید که یک پیکربندی از وضعیت گره‌های این شبکه را وضعیت فراگیر شبکه بنامیم. به این دلیل که RBN ها تعداد محدودی گره دارند، تنها تعداد محدودی وضعیت فراگیر ممکن وجود دارد، در نتیجه اگر شبکه به مدتی کافی تکرار شود دوباره به یکی از وضعیت‌های فراگیرش خواهد رسید، و از این‌رو به چرخه‌ای از وضعیت‌ها برمی‌گردد تا دوباره به همان وضعیت فراگیر برسد. کافمن این چرخه را "جلب‌کننده" شبکه می‌نامد. با انجام شبیه‌سازی‌های متعددی از RBN ها، او

تخمین زد که میانگین تعداد جلب‌کننده‌ها در شبکه‌های متفاوتی که در آنها K = ۲ است تقریبا مساوی ریشه دوم تعداد گره‌هاست.

سپس در تفسیر کافمن از این مدل جهش بزرگی پیش آمد. هر سلول در بدن کم و بیش DNA یکسانی دارد. اما بدن انواع متفاوتی از سلول دارد:

سلول‌های پوست، سلول‌های کبد و غیره. کافمن بر این امر پافشاری کرد که آن چیزی که نوع یک سلول خاص را تعیین می‌کند الگوی نمود ژن در سلول در طول زمان است ـ در بالا توضیح دادم که چگونه الگوهای نمود ژن می‌توانند در سلول‌های مختلف کاملا متفاوت باشند. در مدل RBN، یک جلب‌کننده به صورتی که در بالا توضیح داده شد، الگوی "نمود ژن" در طول زمان است. به این ترتیب کافمن مطرح کرد که یک جلب‌کننده در شبکه او بازتاب یک نوع سلول در بدن اندام‌واره است. به این ترتیب مدل کافمن پیش‌بینی کرد که در اندام‌واره‌ای با ۱۰۰.۰۰۰ ژن، تعداد انواع متفاوت سلول حدودا جذر ۱۰۰.۰۰۰ یا ۳۱۶ است. این عدد فاصله چندانی از تعداد واقعی انواع سلول‌های تشخیص داده شده در انسان ندارد -که حدود ۲۵۶ است.

در زمانی که کافمن مشغول محاسبات خود بود، تصور عمومی بر این بود که ژنوم انسان شامل ۱۰۰.۰۰۰ ژن است (چون بدن انسان از ۱۰۰.۰۰۰ پروتئین استفاده می‌کند.) کافمن از این که مدلش به پیش‌بینی درست تعداد انواع سلول در انسان نزدیک بود هیجان‌زده شد. در حال حاضر می‌دانیم که ژنوم انسان فقط شامل حدود ۲۵۰۰۰ ژن است، در نتیجه مدل کافمن ۱۵۸ نوع سلول را پیش‌بینی می‌کند.

منشأ نظم

این مدل کامل نبود، اما کافمن اعتقاد داشت که مهمترین نکته مورد نظر او درباره موجودات زنده را می‌رساند: انتخاب طبیعی در اصل لازمه ایجاد یک موجود زنده نیست. بسیاری از RBN ها با K = ۲ چیزی را به نمایش می‌گذارند که او رفتار "پیچیده" می‌دانست که هیچ انتخاب طبیعی یا آلگوریتم تکاملی در آن مداخله ندارد. نظر او این بود که وقتی ساختار یک شبکه به اندازه کافی پیچیده شود - یعنی تعداد زیادی گره داشته باشد که گره‌های دیگر را کنترل می‌کنند - رفتار پیچیده و "خودسامان" پدیدار می‌شود. او می‌گوید:

اکثر زیست‌شناسان که میراث بران سنت داروینی هستند، تصور می‌کنند نظم هستی‌زایی ناشی از به کار واداشتن یک ماشین مولکولی به سبک روبی گلدبرگ[۷۶۸] است، که تکامل آن را تکه‌تکه روی هم سوار کرده. من نظریه‌ای برخلاف آن را مطرح می‌کنم: بیشتر نظم‌های زیبایی که در هستی‌زایی دیده می‌شود خودبه‌خود است، نمود طبیعی خودسامانی بودن حیرت‌آوری که در شبکه‌های تنظیم‌کننده بسیار پیچیده فراوان است. به نظر می‌رسد عمیقا اشتباه کرده‌ایم. نظم، که عظیم و زاینده است، به طور طبیعی پدیدار می‌شود. (۱۹)

کافمن عمیقا تحت‌تأثیر شالوده مکانیک آماری بود، که در فصل سوم توضیح دادم. به خاطر

بیاورید که مکانیک آماری توضیح می‌دهد که چگونه خواصی مثل دما از نتایج آمارگیری از تعداد عظیمی مولکول ناشی می‌شود.

یعنی، می‌توان رفتار دمای یک سیستم را پیش‌بینی کرد بی‌آنکه لازم باشد مسیر نیوتونی هر مولکول را دنبال کنیم. به همین ترتیب کافمن مطرح کرد که او یک قانون مکانیک آماری را یافته که حاکم بر پیدایش پیچیدگی از تعداد عظیمی اجزای به هم مرتبط و متقابلا تنظیم‌کننده است. او این قانون را "نامزد چهارمین قانون ترمودینامیک، (۲۰)خواند. همان‌طور که قانون دوم می‌گوید کائنات گرایشی ذاتی به افزایش آنتروپی دارد، "قانون چهارم" کافمن می‌گوید که حیات گرایشی ذاتی به پیچیده‌تر شدن دارد که مستقل از هر گرایش مربوط به انتخاب طبیعی است. کتاب کافمن، خاستگاه‌های نظم[۷۶۹] درباره این ایده به طور مشروح توضیح می‌دهد. از نظر کافمن، تکامل جاندارانی پیچیده تا حدی ناشی از این خودسامانی و تا حدی ناشی از انتخاب طبیعی است، و شاید خودسامانی امری است که واقعا تسلط دارد، و امکان انتخاب اقدام را بی‌اندازه محدود می‌کند.

واکنش به کتاب کافمن

با توجه به این‌که کتاب کافمن بیانگر "تفسیر مجدد و بنیادین جایگاه انتخاب در نظریه تکامل" است (۲۲) می‌توانید تصور کنید که چه واکنش نسبتا شدیدی به آن نشان داده شد. طرفداران پر و پا قرص اثر او فراوانند: "رویکرد او چشم‌اندازهای جدیدی را می‌گشاید"(۲۳)"اولین کوشش جدی برای مدل‌سازی یک نظام زیستی کامل".(۲۴) از طرف دیگر، بسیاری در مورد نتیجه‌گیری‌های او و همچنین تفسیر کلی‌اش از آن فوق‌العاده شکاکند. یکی از منتقدان سبک نوشتن کافمن را "بی‌اندازه اغواکننده"(۲۵) نامید، و درباره کتاب خاستگاه‌های نظم نوشت: "مواقعی هست که به‌نظر می‌رسد گشت‌وگذار مفرح نویسنده در ابرفضا به هیچ‌وجه از انتظارات آزاردهنده برای دریافت واقعیت، منغص نمی‌شود."(۲۶) در واقع، شواهد تجربی مربوط به ادعاهای کافمن همگی به نفع او نبود.

خود کافمن می‌پذیرد که در نظر گرفتن RBN ها به عنوان مدلی برای شبکه‌های تنظیم‌کننده ژنتیک مستلزم فرضیات غیر واقعگرایانه‌ای است: هر گره می‌تواند تنها یکی از دو وضعیت را داشته باشد (درحالی‌که نمود ژن درجات متفاوتی از قدرت دارد)؛ هر گره تعداد یکسانی گره دارد که آن را تنظیم می‌کنند؛ و همه گره‌ها در گام‌های زمانی ناپیوسته به شکل همزمان به روز می‌شوند. این ساده کردن‌ها ممکن است جزئیات مهمی از فعالیت ژنتیک را نادیده بگیرند.

در نظریه او، از همه مشکل‌آفرین‌تر تأثیرات "پارازیتی" است - یعنی خطاها و سایر منابع رفتارهای غیرقطعی -که در سیستم‌های پیچیده دنیای واقعی، از جمله تنظیم ژنتیک، غیرقابل اجتنابند. شبکه‌های ژنتیک زیستی در تمام مدت دچار خطا می‌شوند ولی ترمیم‌پذیرند _ در اکثر اوقات سلامت ما تحت‌تأثیر این خطاها قرار نمی‌گیرد. اما شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که پارازیت تأثیر

@degar_goonesh

قابل ملاحظه‌ای بر رفتار RBN ها دارد و برخی اوقات مانع از این می‌شود که RBN ها به یک جلب‌کننده باثبات (۲۷). برسند حتی برخی از ادعاهای کافمن که به طور مشخص مربوط به نتایج RBN او هستند در مقابل بررسی دقیق‌تر دوام نمی‌آورند. برای مثال، به خاطر بیاورید این ادعای کافمن را که تعداد جلب‌کننده‌هایی که در یک شبکه معمولی رخ می‌دهد نزدیک به جذر تعداد گره‌هاست، و همچنین تفسیر او را از این واقعیت بر حسب نوع سلول. شبیه‌سازی‌های بیشتر نشان داده‌اند که تعداد جلب‌کننده‌ها واقعا نزدیک به جذر تعداد گره‌ها نیست. البته این لزوما به این معنی نیست که ادعای کلی‌تر کافمن نادرست است؛ تنها نشان می‌دهد که باید پژوهش‌های بیشتری بر روی موضوع طراحی مدل‌های دقیق‌تر صورت گیرد. طراحی مدل‌های دقیقی از شبکه‌های تنظیم‌کننده ژنی، در حال حاضر عرصه پرجنب و جوشی در زیست‌شناسی است.

چکیده

زیست‌شناسی تکاملی کماکان دارد روی پاسخ دادن به مهمترین پرسش‌اش کار می‌کند: پیچیدگی در سیستم‌های زنده چگونه از طریق تکامل رخ می‌دهد؟ همان‌طور که در این فصل دیدیم، اهمیت مقیاس پیچیدگی در زیست‌شناسی تازه دارد درک می‌شود. همچنین شاهد این بوده‌ایم که گام‌های اساسی بسیاری به سوی فهم تکامل پیچیدگی برداشته شده است.

یکی از این گام‌ها بسط چیزی است که "ترکیب گسترده"[۷۷۰] نام گرفته است و در آن انتخاب طبیعی هنوز نقش مهمی بازی می‌کند؛ اما نیروهای دیگر - حادثه‌های تاریخی، محدودیت‌های مربوط به رشد، و خودسامانی - به صورت عوامل توضیح‌دهنده به انتخاب طبیعی می‌پیوندند. تکامل‌گرایان، به‌خصوص در ایالات متحده، از جانب بنیادگرایان مورد حمله بوده‌اند و اغلب در حالت دفاعی هستند و تمایل چندانی برای پذیرش این ندارند که شاید انتخاب طبیعی تمامی ماجرا نیست. همان‌طور که زیست‌شناسان گای هویلرز[۷۷۱] و جان پیر[۷۷۲] و اریک اسمیت[۷۷۳] درباره این مخمصه نوشته‌اند: "برای زیست‌شناسان تکاملی، پیوستن به نبرد در دفاع از داروین‌گرایی به مسئولیت اجتماعی تبدیل شده است، اما هر هنجار فرهنگی یک هزینه علمی دربردارد. شیوه‌های جایگزین توضیح فرایندهای تکاملی که مکمل انتخاب طبیعی است، می‌تواند همان موضع دفاعی را بدون تحلیل نقادانه برانگیزد."(۲۸)

زیست‌شناس تکاملی دن مک شی[۷۷۴] برای اندیشیدن به این موضوعات مختلف شیوه سودمندی را به من توصیه کرده است. (۲۹) او تکامل‌گرایان را به سه گروه تقسیم می‌کند: انطباق‌گرایان که معتقدند انتخاب طبیعی بنیادی است؛ تاریخ‌گرایان[۷۷۵] که برای توضیح بسیاری از تغییرات تکاملی به حادثه تاریخی بها می‌دهند و ساختارگرایان[۷۷۶] از جمله کافمن، که بر این تمرکز دارند که ساختار سازمان‌یافته، حتی در فقدان انتخاب طبیعی، چگونه به وجود

می‌آید. نظریه تکاملی تنها وقتی وحدت پیدا می‌کند که این سه گروه بتوانند نشان دهند که چگونه نیروهای مطلوب آنها همچون یک کل یکپارچه عمل می‌کنند.

دن برای این جستجو چشم‌انداز خوش‌بینانه‌ای ترسیم کرده است:

"زیست‌شناسی تکاملی در یک وضعیت آشوب فکری است. اما این آشوب فکری از نوع بسیار پرثمری است."(۳۰)

بخش پنجم: نتیجه‌گیری

آشوب را در چهارده خط به شعر درمی‌آورم و در بندش می‌کنم؛ در پی آن می‌گذارم که شانسش را بیازماید؛ بگذار بچرخد، بگذار دیوانگی کند سیل و آتش و دیو ـ طرح‌های زیرکانه‌اش آسیب نمی‌زند به چیزی در حصار سخت این نظم شاعرانه، که در آن نگه می‌دارم به اجبار، جوهر و شکل آشفته‌اش را، تا با نظم درآمیزد و ترکیب شود.

گذشته است ساعت‌ها، گذشته است سال‌های شکنجه ما، گذشته است تکبر او و بندگی هولناک ما:

در اختیارش دارم، نه بیشتر و نه کمتر وادار به اعترافش نمی‌کنم؛ یا پاسخ‌گویی.

تنها به شکل دلخواه درمی‌آورمش.

ادنا سنت. وینسنت میلی،

خرمن من: مجموعه اشعار تازه (۱)

فصل نوزدهم: گذشته و آینده علوم پیچیدگی

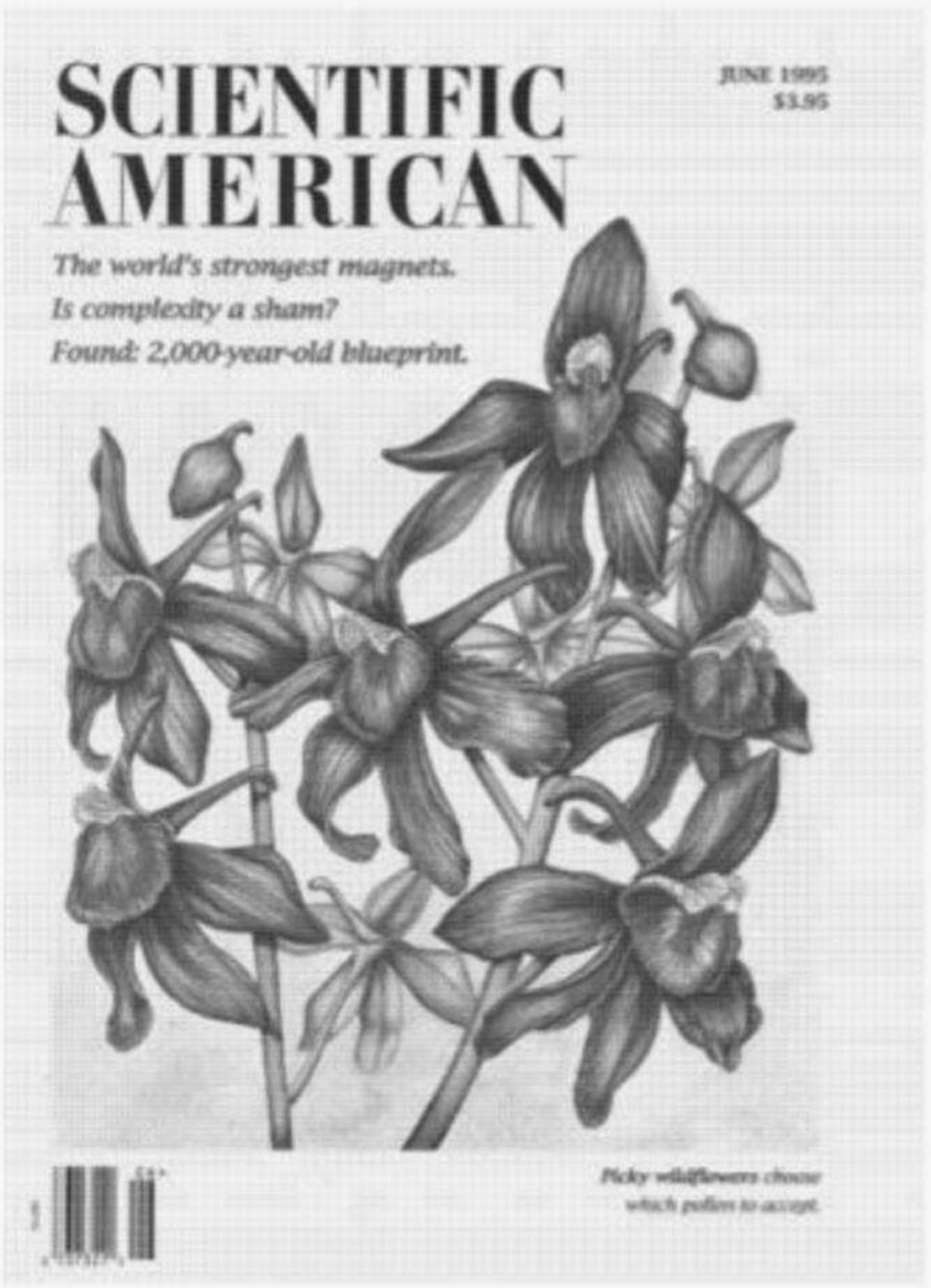
در سال ۱۹۹۵، خبرنگار علمی، جان هورگان[۷۷۷]، مقاله‌ای در مجله سابنتیفیک امریکن که به تحقیق پرخواننده‌ترین مجله علمی جهان است، منتشر کرد و رشته سیستم‌های پیچیده را به طور عام و انستیتوی سانتافه را به طور خاص مورد حمله قرار داد.(۲) مقاله او در روی جلد مجله با چنین عنوانی تبلیغ شده بود: "آیا پیچیدگی یک حقه است؟" (شکل ۱-۱۹)

این مقاله حاوی دو انتقاد اصلی بود. اول اینکه از نظر هورگان امکان نداشت که رشته سیستم‌های پیچیده هیچ‌گونه اصل عام را آشکار کند، و دوم اینکه او معتقد بود که سلطه مدل‌سازی کامپیوتری پیچیدگی را به یک "علم عاری از واقعیت"[۷۷۸] تبدیل کرده است. دیگر آنکه این مقاله چند نیش هم زده بود، پیچیدگی را "علم پاپ"[۷۷۹] و پژوهشگران آن را "پیچیده‌پژوه"[۷۸۰] نامیده بود.

هورگان متوسل به این حدس و گمان شده بود که دانش‌واژه "پیچیدگی" معنای چندانی ندارد، گرچه آن را به خاطر "اهمیتش در روابط عمومی" حفظ می‌کنیم.

هورگان برای این‌که توهینی را هم به بی‌حرمتی اضافه کند، این جمله را از من نقل کرده بود: "در یک سطح می‌توانید بگویید که تمامی سیستم‌های پیچیده جنبه‌هایی از اصول بنیادین یکسانی هستند، اما تصور نمی‌کنم این امر خیلی سودمند باشد." با خودم فکر کردم آیا واقعا چنین حرفی را زده‌ام؟

دلیلش چه بوده؟ آیا به آن باور دارم؟ هورگان حدود یک ساعت تلفنی با من مصاحبه کرده بود و من مطالب زیادی را مطرح کرده بودم؛ او در مقاله‌اش منفی‌ترین اظهارنظر مرا انتخاب کرده بود. در آن زمان تجربه چندانی در مصاحبه با خبرنگاران علمی نداشتم، واقعا آتش گرفته بودم.



شکل ۱-۱۹. علم پیچیدگی در روی جلد مجله ساینتیفیک امریکن مورد "اهانت" قرار می گیرد.

یک نامه تند و از ته دل برای سردبیر سابنتیفیک امریکن نوشتم و همه چیزهایی را که در مقاله هورگان غیرمنصفانه و نادرست بود فهرست کردم.

البته عده‌ای از همکاران من نیز همین کار را کردند و مجله فقط یکی از آن نامه‌ها را منتشر کرد که مال من نبود.

کل این ماجرا چند درس به من داد. از همه مهم‌تر این که مراقب حرف‌هایی که به روزنامه‌نگاران می‌زنید باشید. اما واقعا مرا وادار کرد که درباره مفهوم "اصول عام" و معنای آن سخت‌تر و بیشتر فکر کنم.

مقاله هورگان به کتابی به همان اندازه انحرافی، به نام پایان علم(۳) تبدیل شد، که در آن آمده بود که تمام کشف‌های علمی واقعا مهم قبلا صورت گرفته است و بشر کشف مهم دیگری در پیش ندارد. مقاله او در ساینتیفیک امریکن که درباره پیچیدگی بود به صورت فصلی از آن کتاب بسط داده شده و حاوی این پیش‌بینی بدبینانه بود: "رشته‌های آشوب، پیچیدگی، و حیات مصنوعی ادامه خواهند یافت... اما هیچ شناخت بزرگی از طبیعت به ارمغان نخواهند آورد - به

طور قطع قابل مقایسه با نظریه داروین در مورد تکامل یا مکانیک کوانتوم نخواهند بود."
آیا به هر تقدیر، هورگان درست می‌گوید؟ آیا بیهوده است که کشف اصول عام یا یک "نظریه واحد" را که تمامی سیستم‌های پیچیده را دربربگیرد هدف بگیریم؟

پیرامون نظریه واحد و اصول عام

دانش‌واژه نظریه واحد (یا نظریه واحد بزرگ، که به طرز جالبی در GUT (= Grand Unified Theoryl خلاصه شده است) به طور معمول به هدف فیزیک اشاره دارد: برخورداری از یک نظریه که نیروهای بنیادین کائنات را یکی کند. نظریه ریسمان کوششی در جهت GUT است، اما در میان فیزیکدانان هیچ توافقی وجود ندارد که نظریه ریسمان عملی است یا نه یا حتی این‌که یک GUT وجود دارد یا نه.

فرض کنید که نظریه ریسمان درست دربیاید - GUT که فیزیک مدت‌ها به دنبال آن بوده است. این دستاوردی بی‌نهایت با اهمیت خواهد بود، اما پایان علم نیست، و به‌خصوص با پایان علم سیستم‌های پیچیده خیلی فاصله خواهد داشت. آن رفتارهای سیستم‌های پیچیده که مورد توجه ماست در سطح ذرات بنیادی یا رشته‌های ده بعدی قابل فهم نیستند. حتی اگر این عناصر تمامی واقعیت را بسازند، باز هم واژگان نادرستی برای توضیح پیچیدگی هستند. مثل این است که در پاسخ به پرسش "چرا نگاشت منطق گرا آشوبناک است؟" بگوییم، "به این دلیل که

$$x_{t+1} = Rx_t(1 - x_t)$$

توضیح آشوب، به یک معنا، در معادله نهفته است، همانطور که رفتار سیستم ایمنی به یک معنی در نظریه واحد بزرگ نهفته است. اما نه به این معنی که فهم بشر را شکل بدهد - که هدف نهایی علم است. فیزیکدان جیم کراچفیلد[۷۸۱]، دوین فارمر[۷۸۲] نورمن پاکارد[۷۸۳] و رابرت شا[۷۸۴]، این نقطه‌نظر را خیلی خوب بیان کردند: "این امید که علم فیزیک بتواند با درک مشروح و فزاینده نیروها و اجزای سازنده بنیادین فیزیکی کامل شود، بی‌پایه است. برهم‌کنش اجزا در یک مقیاس می‌تواند به رفتار پیچیده کلی در مقیاس بزرگتری بینجامد که به‌طور کلی امکان ندارد از دانش اجزای تک استنتاج شود."(۳) یا آن‌طور که به آلبرت اینشتین نسبت می‌دهند که به شوخی گفته، "جاذبه در مورد عاشق شدن آدم‌ها مسئولیتی ندارد."(۴)

اگر فیزیک بنیادی قرار نیست نظریه واحد سیستم‌های پیچیده باشد، پس چیست؟ اکثر پژوهشگران سیستم‌های پیچیده احتمالا می‌گویند که یک نظریه واحد برای پیچیدگی، در حال حاضر هدف چندان معناداری نیست.

علم فیزیک که دو هزار سال پیشینه دارد از نظر مفهومی خیلی جلوتر است، از این نظر که دو نوع اصلی "چیز" را تشخیص داده - جرم و انرژی - که اینشتین در معادله $e = mc^2$ به آنها

وحدت بخشیده است. همچنین چهار نیروی اصلی را که در طبیعت تشخیص داده و حداقل به سه تا از آنها وحدت بخشیده است. جرم، انرژی، نیرو، و عناصر بنیادینی که موجب پیدایش آنها می‌شوند، بلوک‌های سازنده نظریه‌های فیزیک هستند.

در مورد سیستم‌های پیچیده حتی نمی‌دانیم چه چیز متناظر "چیز" بنیادی یا "نیروی" اصلی است؛ تا زمانی که نفهمید اجزای مفهومی یا بلوک‌های سازنده آن یک نظریه واحد چه باید باشد، حرف زدن از آن معنای چندانی ندارد.

دبورا گوردون، بوم‌شناس و حشره‌شناس، این نظر را ابراز کرد:

به‌تازگی، ایده‌هایی درباره پیچیدگی، خودسامانی، و پیدایش - وقتی کل بزرگ‌تر از جمع اجزاست - به صورت جایگزین‌هایی برای استعاره کنترل مد روز شده است. اما چنین توضیحاتی کاملا گمراه‌کننده‌اند و صرفا به این درد می‌خورند که چیزهایی را نام‌گذاری کنند که نمی‌توانیم توضیح‌شان دهیم؛ این ایده‌ها همان احساس نارضایتی‌ای را در من برمی‌انگیزد که وقتی فیزیکدانی بگوید رفتار یک ذره ناشی از هم‌ارزی دو عبارت در یک معادله است. شاید روزی یک نظریه عمومی برای سیستم‌های پیچیده داشته باشیم، اما روشن است که هنوز به آنجا نرسیده‌ایم. مسیر بهتری برای رسیدن به فهم دینامیک سیستم‌های به ظاهر خودسامان، تمرکز بر روی جزئیات سیستم‌های معین است. این امر نشان خواهد داد که آیا قوانین عمومی وجود دارد یا نه... این امید که اصول عمومی، نظام تمامی سیستم‌های متنوع پیچیده و دینامیک موجود در طبیعت را توضیح خواهد داد، می‌تواند منجر به نادیده گرفتن همه آن چیزهایی شود که با مدل‌های از پیش موجود سازگار نیستند.

وقتی درباره ویژگی‌های چنین سیستم‌هایی بیشتر یاد بگیریم، خواهیم دید که قیاس بین آنها در کجا سودمند است و کجا بی‌نتیجه است. (۵)

البته اصول عمومی بسیاری هستند که چندان سودمند نیستند، برای مثال "تمامی سیستم‌های پیچیده خواص نوظهوری را به نمایش نمی‌گذارند"، چون همان‌طور که گوردون می‌گوید، این سیستم‌ها "چیزهایی را که نمی‌توانیم توضیح دهیم نام‌گذاری می‌کنند." تصور می‌کنم، در اظهارنظری که هورگان از من نقل‌قول کرده بود، می‌خواستم این حرف را برسانم. تصور می‌کنم که اشاره ضمنی گوردون به این‌که قرار نیست هیچ مجموعه واحدی از اصول سودمند در تمامی سیستم‌های پیچیده حاکم باشد، درست است.

شاید بهتر باشد دست‌کم را بگیریم و به جای اصول عمومی از اصول مشترک حرف بزنیم: اصولی که درک جدید - یا مفهوم‌پردازی‌های جدید -را درباره طرز کار یک مجموعه از سیستم‌ها یا پدیده‌ها فراهم می‌کنند که یافتن این اصول از طریق مطالعه جداگانه این سیستم‌ها یا پدیده‌ها، و قیاس آنها، پس از این‌که مسلم فرض‌شان کرده‌ایم کاری بسیار مشکل است.

کشف اصول مشترک ممکن است بخشی از چرخه بازخورد در پژوهش پیچیدگی باشد: دانش ما درباره سیستم‌های پیچیده خاص در اصول مشترکی ترکیب شوند، که پس از آن ایده‌های جدیدی را برای فهم سیستم‌های خاص فراهم می‌کنند.

همه این حرف‌ها ظاهرا ارضاکننده است، اما نمونه‌های این‌گونه اصول را در کجا پیدا می‌کنیم؟ البته پیشنهادهایی در مورد اصل‌های مشترک و فراگیر در نوشته‌ها فراوانند، و مواردی از این‌گونه پیشنهادها را در این کتاب دیده‌ایم: خواص فراگیر سیستم‌های آشوبناک؛ اصل‌های تولیدمثل جان فون نویمن؛ اصل متعادل کردن بهره‌برداری و اکتشاف؛ شرایط عمومی رابرت اکسلرود برای تکامل همکاری؛ اصل هم‌ارزی محاسباتی استفن ولفرام، پیشنهاد آلبرت - لاسلو باراباسی و ریکا آلبرت مبنی بر این‌که انضمام ترجیحی ساز و کار عمومی برای توسعه شبکه‌های دنیای واقعی است؛ پیشنهاد وست و براون و انکویست مبنی بر این‌که شبکه‌های گردشی فراکتال [۷۸۵] نحوه میزان شدن را توضیح می‌دهند، و غیره. بسیاری پیشنهادهای دیگر هم هست که به دلیل کمبود وقت و فضا آنها را کنار می‌گذارم.

با پیشنهاد تعدادی اصل مشترک در مورد پردازش انطباق‌پذیر اطلاعات در سیستم‌های نامتمرکز در فصل دوازدهم خودم را در محظور قرار دادم.

مطمئن نیستم که گوردون با این کار موافق باشد، اما معتقدم که آنچه پیشنهاد کردم می‌تواند برای کسانی سودمند باشد که سیستم‌های پیچیده خاصی را که به آنها پرداختم مورد مطالعه قرار می‌دهند - این اصول ممکن است ایده‌های جدیدی را درباره نحوه فهمیدن سیستم‌های مورد مطالعه‌شان در اختیار بگذارد. برای مثال، من مطرح کردم که "تصادفی بودن و احتمالات ضروری است." در سخنرانی اخیرم وقتی که طرحی اجمالی از آن اصل‌ها را مطرح کردم، عصب‌پژوهی که در میان مخاطبان بود، با گمانه‌زنی دراین‌باره که تصادفی بودن می‌تواند از کجای مغز ناشی شود و کاربرد آن چه می‌تواند باشد، واکنش نشان داد. برخی از مخاطبان هرگز از این نظر به مغز نگاه نکرده بودند، و این ایده نظر آنها را تا حدی تغییر داد، و شاید مفاهیم جدیدی را برایشان مطرح کرد که در پژوهش خودشان قابل استفاده باشد.

از طرف دیگر، بازخورد باید از خاص به عام برسد. در همان سخنرانی، چند نفر به مثال‌هایی از سیستم‌های پیچیده انطباق‌پذیر اشاره کردند که معتقد بودند از هیچ یک از این اصول تبعیت نمی‌کنند. این امر مرا وادار کرد به حرفی که می‌زدم دوباره بیندیشم و عمومیت نکاتی را که بر آنها پافشاری می‌کردم مورد پرسش قرار دهم. همان‌طور که گوردون به‌درستی اشاره می‌کند، باید مراقب باشیم که "هر چیزی را که با یک مدل از پیش موجود نمی‌خواند" کنار نگذاریم. البته آنچه تصور می‌شود داده‌ای در مورد طبیعت باشد، بعضی اوقات نادرست از کار درمی‌آید، و شاید نوعی اصل مشترک به هدایت شکاکیت ما کمک کند. آلبرت اینشتین که نظریه‌پرداز فوق‌العاده‌ای بود، گفت: "اگر داده‌ها با نظریه سازگاری ندارد، داده‌ها را تغییر دهید." البته این

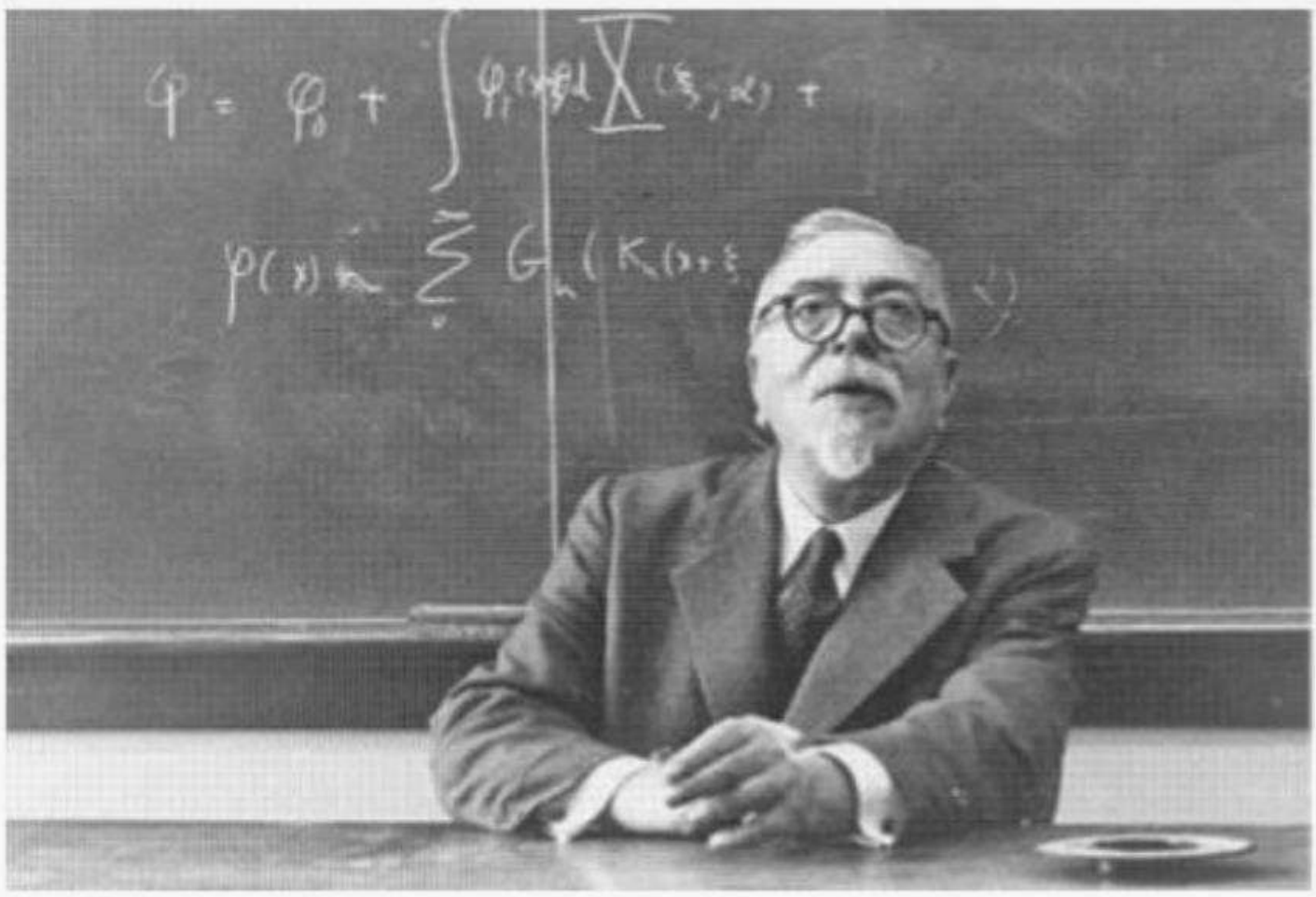
وابسته به نظریه و داده‌هاست. هر چقدر که نظریه یا اصولی تثبیت شده‌تر باشد، باید در مورد هر داده متناقضی شکاک‌تر باشید، و برعکس هر چقدر که داده‌های متناقض مجاب‌کننده‌تر هستند، لازم است در مورد اصل‌های تثبیت‌شده شکاک‌تر باشید. این طبیعت علم است - چرخه بی‌پایانی از طرح‌های غرورآمیز و تردیدهای حقارت‌آمیز.

سرچشمه‌های پژوهش سیستم‌های پیچیده

جستجوی اصول مشترک حاکم بر سیستم‌های پیچیده، به‌خصوص در فیزیک، تاریخی طولانی دارد، اما کاوش چنین اصولی در سال‌های پس از ابداع کامپیوتر بارزتر شد. در همان اوایل دهه ۱۹۴۰، برخی از دانشمندان مطرح کردند که شباهت زیادی بین کامپیوترها و اندام‌واره‌های زنده وجود دارد.

در دهه ۱۹۴۰، بنیاد جوسایا میسی جونیور[۷۸۶] سلسله‌ای از جلسات علمی چندرشته‌ای را مورد حمایت قرار داد که عناوین جالبی داشتند، از جمله "ساز و کارهای بازخورد و سیستم‌های علت و معلولی دوری[۷۸۷] در سیستم‌های زیستی و اجتماعی"، "ساز و کارهای غایت‌مند[۷۸۸] در جامعه" و "ساز و کارهای غایت‌مند و سیستم‌های علت و معلولی گردشی". این جلسات را گروهی از دانشمندان و ریاضیدانان سازمان دادند که در جستجوی اصول مشترک در سیستم‌های پیچیده بسیار متفاوت بودند. محرک اصلی این گروه، ریاضیدان نوربرت وینر[۷۸۹] بود، که پژوهش بر روی سلاح‌های ضدهوایی در جریان جنگ جهانی دوم او را متقاعد کرده بود که علم زیربنایی سیستم‌های پیچیده، هم در زیست‌شناسی و هم در مهندسی، باید نه بر روی مفاهیم فیزیکی جرم، انرژی، نیرو، بلکه ترجیحا بر روی مفاهیم بازخورد، کنترل، اطلاعات، ارتباطات، و مقصود یا "غایت" متمرکز شود.

مجموعه کنفرانس‌های بنیاد میسی، علاوه بر نوربرت وینر، عده‌ای از چهره‌های برجسته علمی را دربرمی‌گرفت، از جمله وارن مک کولاک،[۷۹۰] مارگارت مید[۷۹۱] گرگوری بیتسون[۷۹۲]، کلود شانون، و. راس اشبی[۷۹۳]: جلسات منجر به این شد که وینر رشته جدیدی به نام علم سیبرنتیک را تعریف کرد، (۶) که ریشه آن واژه یونانی به معنی سکاندار است. وینر علم سیبرنتیک را این چنین جمع‌بندی کرد: "کل رشته کنترل و ارتباطات، چه در ماشین و چه در ()e. حیوان مباحثه‌ها و نوشته‌های این گروه ناهمگون از پژوهشگران علم سیبرنتیک بر بسیاری از موضوعاتی متمرکز بود که در این کتاب مطرح شده‌اند: اطلاعات و محاسبه چه هستند؟ در موجودات زنده چگونه به نمایش درمی‌آیند؟ چه شباهت‌هایی بین سیستم‌های زنده و ماشین‌ها وجود دارد؟ نقش بازخورد در رفتار پیچیده چیست؟ چگونه معنا و مقصود از پردازش اطلاعات ناشی می‌شود؟



نوربرت وینر، ۱۹۶۴ ـ ۱۸۹۴

بی‌تردید این گروه سیبرنتیکی نتایج بسیار بااهمیتی را از مقایسه سیستم‌های زنده و ماشین‌ها به دست آورد. این نتایج عبارتند از خودکار تولیدمثل‌کننده فون نویمن، که مفاهیم اطلاعات و بازتولید را به هم مربوط کردند؛ "طراحی برای یک مغز" و. راس اشبی که طرحی بسیار مؤثر در این زمینه بود که ایده‌های دینامیک، اطلاعات، و بازخورد چگونه باید بر علم اعصاب و روان‌شناسی تأثیرگذار باشند؛ مدل وارن مک‌کولاک و والتر پیتس[۷۹۴] از نورون‌ها به عنوان وسایل منطقی، که باعث ایجاد رشته‌ای شد که بعدها شبکه‌های عصبی نام گرفت؛ (۹) کاربرد مارگارت مید و گریگوری بیتسون از ایده‌های سیبرنتیک در روان‌شناسی و انسان‌شناسی؛ ۱۰) و کتاب‌های علم سیبرنتیک [۷۹۵]و استفاده انسانی از انسان‌ها[۷۹۶] نوشته نوربرت وینر ۱۱ که کوششی بود برای فراهم کردن نمای کلی و یکپارچه‌ای از این رشته و ربط آن به بسیاری رشته‌های دیگر. اینها فقط چند مثال محدود از کارهایی بود که هنوز تأثیرگذارند.

در آن زمان، برنامه پژوهشی سیبرنتیک هم شوق و هم مذمت برانگیخت. طرفداران، آن را آغاز عصر جدیدی برای علم می‌دانستند. و منتقدان استدلال می‌کردند که خیلی کلی و خیلی مبهم است، و برای این که سودمند باشد از بنیان نظری چندان مستحکمی برخوردار نیست.
انسان‌شناس گریگوری بیتسون نظر اول را اتخاذ کرد و نوشت: "دو رویداد تاریخی بسیار مهم زندگی من معاهده ورسای[۷۹۷] و کشف علم سیبرنتیک بوده است."(۱۲) در طرف دیگر، مکس دلبروک زیست‌فیزیکدان و برنده جایزه نوبل جلسات سیبرنتیک را که در آن حضور یافته بود به این صورت تعریف کرد:
"پوچ به منتها درجه و کاملا واهی."(۱۳)) نظریه‌پرداز[۷۹۸] تصمیم لئونارد ساواژ یکی از جلسات آخر بنیاد میسی را با بیرحمی کمتری چنین توضیح داد: "جلسات سرشاخ شدن با گروهی خیلی نخبه."(۱۲) به مرور، از شوق متخصصان علم سیبرنتیک برای حضور در جلسه‌ها کاسته شد، و همراه با آن آینده خود این رشته رنگ باخت. ویلیام اسپری، که تاریخدان علم است و جنبش علم سیبرنتیک را مورد مطالعه قرار داده، می‌نویسد: "در پایان، امید وینر برای یک علم واحد کنترل و ارتباطات تحقق نیافت. همان‌طور که یکی از شرکت‌کنندگان آن نشست‌ها توضیح می‌دهد، علم سیبرنتیک بیش از آنکه درون‌مایه داشته باشد وسعت داشت." برای دست یافتن به وحدتی که مورد نظر وینر بود، علم سیبرنتیک طیف بیش از حد متمایزی از مجموعه موضوعات را دربرمی‌گرفت، و دستگاه نظری آن بیش از حد ضعیف و دست و پاگیر بود."(۱۵)
در دهه ۱۹۵۰، کوشش مشابهی برای یافتن اصول مشترک، تحت عنوان نظریه عمومی سیستم‌ها، ۱۶ توسط زیست‌شناس لودویگ فون برتالانفی[۷۹۹] صورت گرفت، که آن را به عنوان "صورت‌بندی و استنتاج آن اصولی که برای سیستم‌ها به‌طورکلی معتبر هستند" تعریف (۱۶). کرد سیستم در معنایی بسیار کلی این‌چنین تعریف می‌شود: مجموعه‌ای از عناصر برهم‌کنش که به اتفاق، و به واسطه برهم‌کنش‌شان، شکلی از رفتار در سطح سیستم را به وجود می‌آورند. البته این تعریف می‌تواند تقریبا هر چیزی را در بر بگیرد.
نظریه عمومی سیستم‌ها به‌خصوص معطوف به خواص عمومی سیستم‌های زنده بود. نظریه‌پرداز سیستم آناتول راپوپورت[۸۰۰] موضوعات اصلی نظریه عمومی سیستم را (به صورتی که در مورد سیستم‌های زنده، سیستم‌های اجتماعی و سایر سیستم‌های پیچیده به کار می‌رود) به صورت حفظ همانندی در خلال تغییرات، پیچیدگی سازمان بافته، و معطوف به هدف، تعریف کرد. زیست‌شناسان اومبرتو ماتورانا[۸۰۱] و فرانسیسکو وارلا[۸۰۲] کوشیدند دو موضوع اول را برحسب مفهوم موردنظرشان اتوپویسیس[۸۰۳]، یا خودسازی،[۸۰۴] توضیح دهند ۸) _ یک فرایند خودحفاظتی که از طریق آن، سیستم (برای مثال، یک سلول زیستی) برای این که اجزایش

(برای مثال، بخش‌های سلول) را به طور مداوم تولید کند، که خود آنها سیستمی را که تولیدشان کرده است شکل می‌دهند، همچون یک کل عمل می‌کند. برای ماتورانا و وارلا و پیروان بیشمار آنها، خودسازی یکی از جلوه‌های کلیدی، و نه لزوما تنها جلوه کلیدی، حیات بود.

مانند برنامه پژوهشی متخصصان سیبرنتیک، این ایده‌ها خیلی جذاب هستند، اما کوشش‌هایی که برای ساخت یک شالوده ریاضی منسجم صورت گرفت -که خاصیت‌های مشترک و با اهمیت چنین سیستم‌هایی را توضیح دهد و پیش‌بینی کند - به‌طورکلی چندان موفقیت‌آمیز نبود. اما پرسش علمی محوریی که این کوشش‌ها پیش‌رو گذاشتند سرچشمه چندین عرصه مدرن علم و مهندسی را شکل دادند. هوش مصنوعی، حیات مصنوعی، بوم‌شناسی سیستم‌ها، زیست‌شناسی سیستم‌ها، شبکه‌های عصبی، تحلیل سیستم‌ها، نظریه کنترل، و علوم پیچیدگی، همگی از دانه‌هایی سرزده‌اند که متخصصان سیبرنتیک و نظریه‌پردازان سیستم‌های عام کاشته بودند. علم سیبرنتیک و نظریه عمومی سیستم‌ها کماکان عرصه‌های پژوهشی پر جنب و جوشی در گوشه‌هایی از جامعه علمی هستند، اما به طور عمده تحت‌الشعاع این رشته‌های نورس قرار گرفته‌اند.

در این اواخر، فیزیکدانان چندین رویکرد به نظریه عمومی سیستم‌های پیچیده را مطرح کرده‌اند. برای مثال، علم هم‌افزایی[۸۰۵] هرمان هیکن و نظریه ساختارهای محوشونده[۸۰۶] و سیستم‌های نامتعادل[۸۰۷] ایلیا پریگوژین،[۸۰۸] که هر دو کوشیده‌اند ایده‌هایی[۸۰۹] از ترمودینامیک، نظریه سیستم‌های دینامیک، و نظریه "پدیده‌های بحرانی" را یکپارچه کنند و از این طریق خودسامانی در سیستم‌های فیزیکی، از قبیل مایعات متلاطم و واکنش‌های پیچیده شیمیایی، و همچنین سیستم‌های زیستی را توضیح دهند. (۱۹) هدف پریگوژین، به‌خصوص مشخص کردن یک "واژگان پیچیدگی" بود: به بیان پریگوژین و همکار او گرگوار نیکولیس[۸۱۰]، "تعدادی از مفاهیمی که مربوط به ساز و کارهایی هستند که به طور مکرر در پدیدارهای مختلف دیده می‌شوند و عبارتند از: عدم تعادل، ثبات، دوشاخگی و شکست تقارن[۸۱۱] و نظم درازمدت... این مفاهیم به عناصر بنیادی چیزی تبدیل می‌شوند که معتقدیم واژگان علمی جدیدی است."(۲۰) کوشش در راستای این ایده‌ها ادامه دارد، اما تا به امروز این کوشش‌ها هنوز واژگان عمومی و منسجم موردنظر پریگوژین را به وجود نیاورده‌اند، چه رسد به یک نظریه عمومی که این مفاهیم متمایز را به نحوی یکپارچه کند که پیچیدگی موجود در طبیعت را توضیح دهد.

پنج پرسش

همان‌طور که از موضوعات بسیار متنوعی که در این کتاب آورده‌ام برداشت می‌کنید، آن چیزی که می‌توانیم علم مدرن سیستم‌های پیچیده بنامیم، همانند پیشینیانش، هنوز یک کل واحد

نیست، بلکه بیشتر مجموعه‌ای از بخش‌های متمایز با تعدادی مفاهیم هم‌پوشان است. آنچه امروزه این کوشش‌های مختلف را در زیر این عنوان یکپارچه می‌کند، پرسش‌ها و روش‌های مشترک، و اشتیاق برای انجام خدمات منسجم ریاضی و تجربی است که فراتر از شباهت‌های نه چندان منسجمی برود که مشخصه رشته‌های پیش از آن بوده است. مباحثه زیادی دراین‌باره وجود دارد که علم مدرن سیستم‌های پیچیده چه خدماتی کرده است -اگر اساسا خدماتی کرده باشد - که کوشش‌های پیشین فاقد آنها بوده‌اند و تا چه حدی می‌تواند موفقیت کسب کند؟

در مورد این پرسش طیف وسیعی از عقاید وجود دارد. به‌تازگی، پژوهشگری به نام کارلوس گرشنسون[۸۱۲] پرسشنامه‌ای درباره سیستم‌های پیچیده را برای همکارانش (از جمله خود من) فرستاد و قصد دارد پاسخ‌ها را در کتابی به نام پیچیدگی: ۵ پرسش[۸۱۳] منتشر کند. پرسش‌ها عبارتند از:

۱. چرا پژوهش در مورد سیستم‌های پیچیده را آغاز کردید؟

۲. پیچیدگی را چگونه تعریف می‌کنید؟

۳. جنبه / مفهومی از پیچیدگی که دلخواه شماست کدام است؟

۴. به عقیده شما، مشکل‌سازترین جنبه / مفهوم پیچیدگی کدام است؟

۵. آینده پیچیدگی را چه‌طور می‌بینید؟

تاکنون چهارده تا از پاسخ‌ها را دیده‌ام. گرچه نظرهای ابراز شده کاملا متفاوتند، پاره‌ای عقاید مشترک دیده می‌شود. اکثر پاسخ‌دهنده‌ها امکان "قوانین فراگیر" پیچیدگی را تحت این عنوان که جاه‌طلبانه و مبهم هستند رد می‌کنند. به علاوه، اکثر پاسخ‌دهنده‌ها معتقدند که تعریف پیچیدگی یکی از مشکل‌سازترین جنبه‌های این رشته است و احتمالا در مجموع هدف نادرستی است. بسیاری تصور می‌کنند که واژه پیچیدگی معنایی ندارد؛ برخی حتی از کاربرد آن اجتناب می‌کنند. بسیاری معتقد نیستند که هنوز چیزی به نام "علم پیچیدگی" وجود داشته باشد، حداقل نه به معنای متداول واژه علم - سیستم‌های پیچیده اغلب موضوعی تکه‌تکه به نظر می‌رسند و نه یک کل واحد.

سرانجام معدودی از پاسخ‌دهنده‌ها نگرانند که رشته سیستم‌های پیچیده همان سرنوشت علم سیبرنتیک و کوشش‌های قبلی مربوط به آن را پیدا کند - یعنی شباهت‌های جالبی در میان سیستم‌های متفاوت را به دقت مشخص کند بی‌آنکه یک نظریه همگون و منسجم ریاضی را به وجود بیاورد که بتواند رفتارشان را توضیح دهد و پیش‌بینی کند.

اما به رغم این نظرگاه‌های بدبینانه درباره محدودیت پژوهش‌های جاری سیستم‌های پیچیده، اکثر پاسخ‌دهنده‌ها در مورد این رشته و خدماتی که تاکنون به علم کرده و احتمالا در آینده خواهد کرد، درواقع بسیار شوق زده‌اند. در علوم مربوط به حیات، علم مغز، و علوم اجتماعی،

هرچه دانشمندان با دقت بیشتری بررسی می‌کنند، پدیده‌ها پیچیده‌تر به نظر می‌آیند. فناوری‌های جدید این کشف‌ها را امکان‌پذیر کرده‌اند، و چیزهایی که کشف می‌شوند نیاز مبرمی به مفاهیم و نظریه‌های جدیدی دراین‌باره دارند که چنین پیچیدگی چگونه پیش می‌آید و عمل می‌کند. چنین کشف‌هایی مستلزم آن است که علم تغییر کند تا بتواند با پرسش‌هایی که در پژوهش سیستم‌های پیچیده مطرح می‌شود دست و پنجه نرم کند. درواقع، همان‌طور که در مثال‌های فصل قبل دیدیم، در سال‌های اخیر موضوعات و نتایج علم پیچیدگی بر تقریبا هر رشته علمی تأثیر گذاشته است و برخی از عرصه‌های پژوهش، از قبیل زیست‌شناسی و علوم اجتماعی به دلیل این ایده‌ها عمیقا دگرگون شده‌اند. افزون بر این، چند نفر از شرکت‌کنندگان در نظرخواهی عقایدی مشابه یکی از پاسخ‌دهندگان را بر زبان آوردند: "شاهد شکلی از پیچیدگی هستم که کل تفکر علمی را زیر سلطه خود درمی‌آورد."

جدا از کشف‌های مهم فردی، نظیر دستاوردهای براون و انکویست و وست در مورد میزان شدن سوخت و ساز یا دستاورد آکسلرود در مورد تکامل همکاری (در میان مثال‌های بیشمار دیگر)، شاید مهم‌ترین خدمات پژوهش سیستم‌های پیچیده تا به امروز به پرسش گرفتن بسیاری از فرض‌های علمی پیشین و کشف شیوه‌های بدیع مفهوم‌سازی مسائل پیچیده باشد. آشوب به ما نشان داده است که تصادفی بودن مستلزم این نیست که رفتار سیستم تصادفی به نظر برسد؛ کشف‌های جدید در علم ژنتیک نقش تغییر ژن در تکامل را به چالش کشیده است؛ درک فزاینده نقش تصادف و خودسامانی محوریت انتخاب طبیعی را به عنوان نیروی محرک تکامل به چالش کشیده است. اهمیت تفکر بر مبنای غیرخطی بودن، کنترل نامتمرکز، شبکه‌ها، سلسله‌مراتب‌ها، بازخورد نامتمرکز، نمایش آماری اطلاعات، و تصادفی بودن ذاتی، هم در جامعه علمی و هم توسط عامه مردم اندک اندک پذیرفته می‌شود.

شالوده‌های مفهومی جدید اغلب مستلزم تعمیم مفاهیم موجود است. در سراسر این کتاب شاهد آن بودیم که چگونه مفاهیم اطلاعات و محاسبه تعمیم داده می‌شود تا سیستم‌های زنده و حتی سیستم‌های اجتماعی پیچیده را دربربگیرد؛ چگونه تصورات مربوط به انطباق و تکامل به فراسوی حیطه زیست‌شناسی تعمیم داده می‌شوند؛ چگونه تصورات مربوط به حیات و هوش تعمیم داده می‌شوند، حتی شاید تا آنجا که ماشین‌های خودتکثیر و برنامه‌های کامپیوتری قیاس‌کننده را در بر گیرند.

این شیوه از تفکر، گام به گام وارد جریان اصلی علم می‌شود. هروقت که با دانشجویان جوان دوره تحصیلات تکمیلی و فوق دکترا در کلاس‌های تابستانی انستیتوی سانتافه سروکار دارم به روشنی متوجه این امر می‌شوم.

در اوایل دهه ۱۹۹۰، دانشجویان در مورد این ایده‌های جدید و دیدگاه‌های علمی که در کلاس تدریس می‌شد بسیار هیجان‌زده بودند. اما از اواسط دهه ۲۰۰۰، عمدتا در نتیجه کوشش‌های

آموزشی انستیتوی سانتافه و مؤسسات مشابه، این ایده‌ها و دیدگاه‌ها در فرهنگ بسیاری از رشته‌ها سرایت کرده بودند، و دانشجویان به موضوع بی‌اعتناتر شده و در مواردی از این ناامید شده بودند که علم سیستم‌های پیچیده این‌قدر موضوعی عادی است تصور می‌کنم این را باید موفقیت به حساب آوریم.

سرانجام پژوهش سیستم‌های پیچیده بیش از هر چیز بر همکاری میان‌رشته‌ای تأکید دارد، که برای پیشرفت در زمینه مهم‌ترین مسائل علمی زمانه ما ضروری تصور می‌شود.

آینده پیچیدگی، یا در انتظار کارنو

از نظر من علم سیستم‌های پیچیده دارد به دو شاخه مختلف تقسیم می‌شود. در یک شاخه، ایده‌ها و ابزارهای پژوهش پیچیدگی بهبود داده می‌شود و در انواع فزاینده‌ای از عرصه‌های مشخص به کار گرفته می‌شود. در این کتاب شاهد شیوه‌هایی بودیم که از طریق آن ایده‌ها و ابزارهای مشابهی در رشته‌های بسیار متمایزی همچون فیزیک، واگیرشناسی، جامعه‌شناسی، علم سیاست، علم کامپیوتر، و بسیاری دیگر از رشته‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از عرصه‌ها که به آنها نپرداختم، و این ایده‌ها در آنها اهمیت فزاینده‌ای می‌یابد، عبارتند از علم اعصاب، اقتصاد، بوم‌شناسی، هواشناسی، و پزشکی - بذرهای علم پیچیدگی و چندرشته‌ای به صورت گسترده‌ای افشانده می‌شود.

شاخه دوم، که بیشتر مورد مناقشه است، نگاه به تمامی این رشته از سطحی بالاتر است، به این منظور که نظریه‌های ریاضی تبیینی و پیشگویانه‌ای[۸۱۴] جستجو شود که همانندی‌های سیستم‌های پیچیده را منسجم‌تر بیان می‌کنند، و می‌توانند پدیده‌های نوظهور را توضیح دهند و پیش‌بینی کنند.

در یکی از نشست‌های مربوط به پیچیدگی که در آن حضور داشتم، بحث داغی دراین‌باره درگرفت که این رشته چه جهتی را باید دنبال کند. یکی از شرکت‌کنندگان، در لحظه‌ای از درماندگی، گفت که "پیچیدگی زمانی موضوع هیجان‌انگیزی بود و حالا به یک کلیشه تبدیل شده است، باید از نو شروع کنیم."

آن را باید چه بنامیم؟ احتمالا تا حال روشن شده که هسته اصلی مسئله این است: واژگان درستی برای توضیح موضوعی که در موردش مطالعه می‌کنیم نداریم. از کلماتی مانند پیچیدگی، خودسامانی، و پیدایش بهره می‌بریم تا پدیدارهای مشترک سیستم‌های مورد نظرمان را نشان دهیم اما هنوز نمی‌توانیم همانندی‌ها را به شیوه‌ای منسجم تعریف کنیم. به واژگان جدیدی نیاز داریم که نه تنها بلوک‌های مفهومی سازنده خودسامانی و پیدایش را بیان کند بلکه درعین‌حال بتواند توضیح دهد که اینها چگونه قرار است چیزی را دربربگیرند که کارکرد داشتن، مقصود، یا معنا می‌نامیم (نگاه کنید به فصل دوازدهم). این دانش‌واژه‌ها که خوب تعریف نشده‌اند باید با دانش‌واژه‌های جدیدی که بهتر تعریف شده باشند جایگزین شوند تا بازتاب‌دهنده فهم فزاینده از پدیدارهای مورد پرسش باشند. همان‌طور که در این کتاب نشان دادم، بخش عمده‌ای از پژوهش سیستم‌های پیچیده دربرگیرنده یکپارچگی مفاهیم دینامیک، اطلاعات، محاسبه و تکامل است.

یک واژگان جدید مفهومی و نوع جدیدی از ریاضیات باید از این یکپارچگی ساخته شود.

ریاضیدان استیون اشتروگاتس موضوع را اینگونه بیان می‌کند:
"تصور می‌کنم معادل مفهوم درستی برای آنالیز ریاضی به صورت شیوه‌ای برای دیدن پیامد برهم‌کنش‌های بیشماری که یک سیستم پیچیده را تعریف می‌کند، در اختیار نداریم. اگر این مافوق آنالیز در اختیارمان قرار می‌گرفت، شاید برای همیشه ورای درک انسان می‌بود. واقعا نمی‌دانیم."(۲۱)
داشتن واژگان مفهومی مناسب و ریاضیات مناسب لازمه توانایی فهم، پیش‌بینی، و در مواردی هدایت یا کنترل سیستم‌های خودسامانی است که خاصیت‌های نوظهوری دارند. ایجاد چنین مفاهیم و ابزارهایی بزرگترین چالش پیش روی علوم سیستم‌های پیچیده بوده و خواهد بود.



سادی کارنو[1]،
۱۷۹۶ـ۱۸۳۲

1. Sadi Carnot

در رشته ما لطیفه‌ای خاص دهان به دهان نقل می‌شود: "در انتظار کارنو" هستیم. سادی کارنو فیزیکدانی در اوایل قرن نوزدهم بود که برخی از مفاهیم کلیدی ترمودینامیک از تراوش‌های مغز اوست. به همان ترتیب، در انتظار مفاهیم و ریاضیات درستی هستیم که طوری صورت‌بندی شده باشند که اشکال متعددی از پیچیدگی را که در طبیعت می‌بینیم توضیح دهند.
تحقق بخشیدن به همه اینها مستلزم چیزی است که بیشتر شبیه اسحاق نیوتون مدرن باشد تا یک کارنو مدرن. پیش از ابداع آنالیز ریاضی، نیوتون مسئله‌ای مفهومی را پیش رو داشت شبیه آن چیزی که امروزه با آن رو در روییم. در زندگینامه نیوتون، جیمز گلیک موضوع را اینگونه توضیح می‌دهد: "آشوب زبان جلوی دست و پای او را گرفته بود - واژه‌هایی کماکان مبهم تعریف شده بودند، و واژه‌هایی واقعا در دسترس نبودند... نیوتون معتقد بود که اگر بتواند

فرهنگ لغات مناسبی پیدا کند، می‌تواند علم کامل حرکت را نظم بخشد."(۲۲) با ابداع آنالیز ریاضی، نیوتون سرانجام این فرهنگ لغات را خلق کرد. آنالیز ریاضی یک زبان ریاضی را فراهم می‌کند که به صورت منسجمی تغییر و حرکت را بر مبنای مفاهیمی چون بی‌نهایت کوچک، مشتق، انتگرال، و حد، توضیح می‌دهد. این مفاهیم قبلا هم در ریاضیات وجود داشت اما به صورتی تکه‌تکه؛ نیوتون توانست بفهمد که آنها چگونه به هم ربط دارند و بنای منسجمی را ساخت که آنها را یکپارچه و کاملا عمومی کرد. این بنا چیزی است که به نیوتون امکان داد علم دینامیک را خلق کند.

آیا ما هم می‌توانیم به صورت مشابهی آنالیز پیچیدگی را خلق کنیم ـ نوعی زبان ریاضی که منشأ و دینامیک خودسامانی، رفتار نوظهور و انطباق در سیستم‌های پیچیده را بیان کند؟ کسانی هستند که به این کار عظیم دست یازیده‌اند. برای مثال، همان‌طور که در فصل دهم توضیح دادم استفن ولفرام از بلوک‌های سازنده دینامیک و محاسبه در خودکارهای سلولی بهره می‌برد تا چیزی را خلق کند که به تصور او نظریه‌ای جدید و بنیادی درباره طبیعت است. همان‌طور که در بالا اشاره کردم، ایلیا پریگوژین و پیروان او کوشیده‌اند که بلوک‌های سازنده‌ای را شناسایی کنند و یک نظریه پیچیدگی را بر مبنای فهرست کوتاهی از مفاهیم فیزیکی به وجود آورند. فیزیکدان پر باک [۸۱۵]مفهوم بحرانی بودن خودسامان [۸۱۶]را بر مبنای مفاهیمی برگرفته از نظریه سیستم‌های دینامیک و گذارهای حالت[۸۱۷]، مطرح کرده و آن را به عنوان یک نظریه عمومی خودسامانی و پیدایش عرضه کرده (۲۳). است فیزیکدان جیم کراچفیلد نظریه‌ای را درباره ماشین‌های محاسباتی مطرح کرده که ایده‌هایی از سیستم‌های دینامیک، نظریه محاسبه، و نظریه استنتاج آماری را یکپارچه می‌کند و از این طریق پیدایش و ساختار رفتار پیچیده و انطباق‌پذیر را توضیح می‌دهد. (۲۴)

درحالی‌که هر یک از این رویکردها، همراه با مواردی دیگر که در اینجا درباره‌شان توضیح نمی‌دهم، هنوز با یک نظریه جامع تبیینی درباره سیستم‌های پیچیده فاصله زیادی دارند، هر یک دربرگیرنده ایده‌های بااهمیت و جدیدی بوده و کماکان عرصه پژوهش فعالی هستند. البته هنوز روشن نیست که آیا چنین نظریه‌ای وجود دارد یا نه؛ شاید پیچیدگی از طریق فرایندهای متفاوتی در سیستم‌هایی متفاوت پدیدار می‌شود و عمل می‌کند. در این کتاب، در زمینه اطلاعات، محاسبه، دینامیک، و تکامل، تکه‌های محتمل یک نظریه سیستم‌های پیچیده را مطرح کرده‌ام، البته اگر چنین نظریه‌ای وجود خارجی داشته باشد. چیزی که مورد نیاز است توانایی دیدن روابط عمیق آنها و نحوه‌ای است که در یک کل منسجم با هم سازگار می‌شوند - چیزی که شاید به صورت "سادگی در سمت دیگر پیچیدگی، (۲۵) قابل اشاره باشد.

گرچه بخش عمده علمی که در این کتاب توضیح دادم هنوز در مراحل اولیه است، از نظر من، چشم‌انداز دست‌یابی به چنین اهداف جاه‌طلبانه‌ای بخشی از آن چیزی است که سیستم‌های

پیچیده را به عرصه هیجان‌انگیزی برای پژوهش تبدیل می‌کند. یک چیز روشن است: جستجوی این اهداف مستلزم عزم فکری ماجراجویانه و تمایل به پذیرش خطر شکست و سرزنش با رفتن به فراسوی جریان عمده علم به سوی حیطه‌های نامشخص و نامکشوف است، همان‌طور که در مورد علوم طراز اول همیشه این‌گونه بوده است. به بیان آندره ژید[۸۱۸] که نویسنده‌ای بی‌پروا بود: "هیچ‌کس سرزمین‌های جدیدی کشف نمی‌کند مگر بر خود روا دارد که منظره ساحل مدت‌ها از چشمش پنهان شود."(۲۶) خواننده، آرزوی روزی را دارم که بتوانیم به اتفاق سرزمین‌های جدید پیچیدگی را سیاحت کنیم.

یادداشت‌ها و منابع

پیشگفتار

۱. Hofstadter, D. R., Gode, Escher, Bach: an Eterna Golden Braid. New York: Basic Books, ۱۹۷۹, p. ۳۱۲.

۲.Descartes, R., A Discourse on the Method. Transated by Ian Macean. Oxford: Oxford University Press, ۲۰۰۶/۱۶۳۷, p. ۱۷.

۳. به نقل از:

Horgan, J., The End of Science: Facing the imits of Knowedge in the Twiight of the Scientific Age. Reading, MA: Addison Wesey, ۱۹۹۶, p. ۱۹.

۴. خلاصه مذاکرات این گردهمایی به شکل کتاب منتشر شده است:

Pines, D., Emerging Syntheses in Science. Reading, MA: Addison - Wesey, ۱۹۸۸.

۵. G. Cowan, Pans for the future. In Pines, D., Emerging Syntheses in Science. Reading, MA: Addison - Wesey, ۱۹۸۸, pp. ۲۳۵, ۲۳۷.

۶. خلاصه مذاکرات این گردهمایی به شکل کتاب منتشر شده است:

Forrest, S., Emergent Computation. Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۹۱.

بخش یکم

۱. Pages, H., The Dreams of Reason. New York: Simon & Schuster, ۱۹۸۸, p. ۱۲.

فصل یکم: پیچیدگی چیست؟

۱. locke, J., An Essay Concerning Human Understanding.

Edited Nidditch. Oxford:CarendonPress, ۱۹۷۵/۱۶۹۰, p. ۲.۱۲.۱.

۲. این توصیف از ارتش مورچگان از منابع زیر گردآوری شده است:

Franks, N. R., Army ants: A collective intelligence. American Scientist, ۷۷ (۲l, ۱۹۸۹, pp. ۱۳۸-۱۴۵; and Hlldobler, B. and Wilson, E. O., The Ants. Cambridge, MA: Belknap Press, ۱۹۹۰.

۳. Franks, N. R., Army ants: A coective inteigence.

American Scientist, ۷۷ (۲l, ۱۹۸۹, pp. ۱۳۸-۱۴۵.

۴. E.g., Hodober, B. and Wison, E. O., The Ants.

Cambridge, MA: Beknap Press, ۱۹۹۰, p. ۱۰۷.

۵. Franks, N. R., Army ants: A coective inteigence.

American Scientist, ۷۷ (۲l, ۱۹۸۹, p. ۱۴۰.

۶. Hofstadter, D. R., Ant fugue. In Gode, Escher, Bach:

an EternaGoden Braid. New York: Basic Books, ۱۹۷۹.

فصل دوم: دینامیک، آشوب، پیش‌بینی

۱. Stoppard, T., Arcadia. New York: Faber & Faber, ۱۹۹۳,

pp. ۴۷ - ۴۸.

۲. به نقل از:

Westfa, R. S., Never at Rest: A Biography of Isaac Newton.

Cambridge: Cambridge University Press, ۱۹۸۳, p. ۳۸۹.

۳. laplace, P. S., Essai Philosophique Sur es Probabilites.

Paris: Courcier, ۱۸۱۴.

۴. liu, Huajie, A brief history of the concept of chaos, ۱۹۹۹ (http://members.tripod.com/~huajie/Paper/chaos.html.

۵. Poincare, H., Science and Method. Translated by Francis Maitland. london: Nelson and Sons, ۱۹۱۴.

۶. lorenz, E. N., Deterministic nonperiodic flow.Journal of Atmospheric Science, ۳۵۷, ۱۹۶۳, pp. ۱۳۰ - ۱۴۱.

۷. می‌توان استدلال کرد که این واقعا یک سیستم خطی نیست، چون جمعیت به صورت نمایی افزایش پیدا می کند:

$$n_t = 2^t n_0$$

اما، در این جا نگاشتی

$$n_t \text{ به } n_{t+1}$$

را مد نظر داریم که سیستم خطی مورد بحث را می‌سازد.

۸. برگرفته از (http://mathworld.wolfram.com/logisticEquation.html):

"معادله منطق گرا (که بعضی اوقات مدل ورهولست، (Verhulst) نگاشت منطق گرا، یا منحنی رشد منطق گرا نامیده می‌شود) مدلی از رشد جمعیت است که اولین بار پیر ورهولست آن را تدوین کرد (سال ۱۸۴۵). این مدل برحسب زمان پیوسته است، اما با تغییری در معادله پیوسته یک معادله ناپیوسته تراجعی به دست می‌آید که آن هم به عنوان معادله منطق گرا شناخته می‌شود." نگاشت منطق گرا شیوه فوق‌العاده مفیدی برای نشان دادن مدل منطق گرا است.

۹. مدل منطق گرا به صورت زیر است:

$$n_t + 1 = (\text{نرخ مرگ و میر} - \text{نرخ زاد و ولد}) [kn_t - n_t^2] / k,$$

که در آن

$$n_t$$

جمعیت نسل کنونی و k ظرفیت تحمل است. برای نتیجه‌گیری نگاشت منطق‌گرا از این مدل، فرض می‌کنیم

$$x_t = \frac{n_t}{k}$$

و (نرخ مرگ و میر-نرخ زاد و ولد) = R باشد. توجه کنید که "کسری از ظرفیت تحمل" است: نسبت جمعیت کنونی به حداکثر جمعیت ممکن.

چون میزان جمعیت همیشه بین ۰ و،k و همیشه بین ۰ و ۱ است، نتیجه می‌شود:

$$x_{t+1} = R_{xt} (1 - x_t).$$

۱۰. برای خواننده‌ای که از آموزش عمومی علمی برخوردار است، مراجع زیر مباحثی فنی را درباره نگاشت منطق‌گرا فراهم می‌کنند:

Feigenbaum, M. J., Universal behavior in nonlinear systems.

los Alamos Science, ۱ (۱), ۱۹۸۰, pp. ۴ - ۲۷; Hofstadter, D. R., Mathematical chaos and strange attractors. In Metamagical Themas. New York: Basic Books, ۱۹۸۵; Kadanoff, leo P., Chaos, A view of complexity in the physical sciences. In From Order to Chaos: Essays: Critical, Chaotic, and Otherwise.

Singapore: World Scientific, ۱۹۹۳.

۱۱. May, R. M., Simple mathematical models with very complicated dynamics. Nature, ۲۶۱, ۱۹۷۶, pp. ۴۵۹ - ۴۶۷.

۱۲. Ulam, S. M., and von Neumann, J., Bulletin of the American Mathematical Society, ۵۳, ۱۹۴۷, p. ۱۱۲۰. Metropolis, N., Stein, M. l., & Stein, P. R., On finite limit sets for transformations on the unit interval. Journal of Combinatorial Theory, ۱۵ (A), ۱۹۷۳, pp. ۲۵ -۴۴.

۱۳. چه طور به این نتیجه می‌رسیم که سیستم پس از تعداد زیادی تکرار در یک نوسان منظم قرار نمی‌گیرد؟ این امر را می‌توان به صورت ریاضی نشان داد؛

برای مثال، نگاه کنید به:

Strogtaz, S., Nonlinear Dynamics and Chaos. Reading, MA:

Addison - Wesley, ۱۹۹۴, pp. ۳۶۸ - ۳۶۹.

۱۴. یک مولد اعداد شبه تصادفی تابع یا آلگوریتمی قطعی است که توزیع و فقدان رابطه بین

مقادیر خروجی آن، آزمون‌های معین آماری تصادفی بودن را پشت‌سر می‌گذارد. این‌گونه آلگوریتم‌ها در برنامه‌های مختلف کامپیوتری مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از نگاشت منطق‌گرا به مانند مولد اعداد شبه تصادفی برای اولین بار در بولتن زیر مطرح شد:

Ulam, S. M. and von Neumann, J., On combination of stochastic and deterministic processes (abstractl.Bulletin of the American Mathematical Society, ۵۳, ۱۹۴۷, p. ۱۱۲۰.

بسیاری دیگر این موضوع را بیشتر بررسی کرده‌اند، برای مثال، نگاه کنید به:

Wagner, N. R., The logistic equation in random number generation. In Proceedings of the Thirtieth Annual Allerton Conference on Communications, Control, and Computing, University of Illinois Urbana-Champaign, ۱۹۹۳, pp. ۹۲۲۹۳۱.

۱۵. May, R. M., Simple mathematical models with very complicated dynamics. Nature, ۲۶۱, ۱۹۷۶, pp. ۴۵۹ - ۴۶۷.

۱۶. li, T. Y. and Yorke, J. A., Period three implies chaos.

American Mathematical Monthly ۸۲, ۱۹۷۵, p. ۹۸۵.

۱۷. برای مطالعه تاریخچه جالبی از آشوب، نگاه کنید به:

Aubin, D. and Dalmedico, A. D., Writing the history of dynamical systems and chaos: longue Duree and revolution, disciplines, and cultures. Historia Mathematica ۲۹, ۲۰۰۲, pp.

۲۷۳ - ۳۳۹.

۱۸. برای یک توضیح قابل فهم از نظریه فایگن‌بام، نگاه کنید به:

Hofstadter, D. R., Mathematical chaos and strange attractors.

In Metamagical Themas. New York: Basic Books, ۱۹۸۵.

۱۹. به نقل از:

Gleick, J., Chaos: Making a New Science. New York: Viking, ۱۹۸۷, p. ۱۸۹.

برای مثال نگاه کنید به:

۲۰. Selvam, A. M., The dynamics of deterministic chaos in numerical weather prediction models.Proceedings of the American Meteorological Society, ۸th Conference on Numerical Weather Prediction, Baltimore, MD, ۱۹۸۸; and lee, B. and Ajjarapu, V., Period-doubling route to chaos in an electrical power system. IEE Proceedings, Part C, ۱۴۰, ۱۹۹۳, pp.

@degar_goonesh

۴۹۰-۴۹۶.

۲۱. Coullet, P., and Tresser, C., Iterations d'endomor- phismes et groupe de renormalization.Comptes Rendues de Academie des Sciences, Paris A, ۲۸۷,۱۹۷۸, pp. ۵۷۷ - ۵۸۰.

فصل سوم: اطلاعات

۱. Eddington, A. E., The Nature of the Physical World.

Macmillan, New York, ۱۹۲۸, p. ۷۴.

۲.Cohen, I., Informational landscapes in art, science, and evolution. Bulletin of Mathematical Biology, ۶۸, ۲۰۰۶, p. ۱۲۱۸.

۳. Beinhocker, E. D., The Origin of Wealth: Evolution, Complexity,Radical Remaking Economics.

Cambridge, MA: Harvard Business School Press, ۲۰۰۶, p. ۱۲.

۴. Gell-Mann, M., The Quark and the Jaguar. New York:

W. H. Freeman, ۱۹۹۴, p. ۲۱.

۵.Rothman, T., The evolution of entropy. In Science a la Mode. Princeton, NJ: Princeton University Press, ۱۹۸۹, p. ۸۲.

۶. به نقل از:

leff, H. S. and Rex, A. F., Maxwell Demon: Entropy,

Information, Computing. Princeton University Press. Second edition ۲۰۰۳, Institute of Physics Pub., ۱۹۹۰, p. ۵.

۷. Szilard, l., On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings. Zeitschrift fuer Physik, ۵۳, ۱۹۲۹, pp. ۸۴۰ - ۸۵۶.

۸. استدلال‌های بنت زیرکانه هستند؛ مشروح آن را می‌توانید در این مقاله بخوانید:

Bennett, C. H., The thermodynamics of computation - a review. International Journal of Theoretical Physics, ۲۱, ۱۹۸۲, pp. ۹۰۵ - ۹۴۰.

بسیاری از این ایده‌ها را oliver penrose به طور مستقل کشف کرد:

(leff, H. S. and Rex, A. F., Maxwell Demon: Entropy, Information,Computing, Taylor & Francis, ۱۹۹۰; second edition Institute of Physics Pub., ۲۰۰۳l.

۹. Maddox, J., Slamming the door. Nature, ۴۱۷, ۲۰۰۷, p. ۹۰۳.

۱۰. ظاهرا خود بولتزمن هم منتقد تند و تیز آثار دیگران بود. آن طور که Everdell گزارش کرد، بولتزمن مقاله‌ای با این عنوان نوشته بود: "درباره یک نظریه شوپنهاور"، اما بعدها عنوان کرد که قصد داشته این عنوان را بر روی مقاله بگذارد: "اثبات این که شوپنهاور یک فیلسوف منحط، بی‌فکر، نادان، و مهمل گوست، که شعور او جز لفاظی توخالی و آشغال چیز دیگری را در بر

ندارد."

نگاه کنید به:

Everdell, W. R., The First Moderns: Profiles in the Origins of University of Twentieth-CenturyThought.Chicagoll:

Chicago Press,۱۹۹۸, p. ۳۷۰.

۱۱. این نگارش از آنتروپی بولتزمن مبتنی بر این فرض است که تمامی وضعیت‌های خرد متناظر با یک وضعیت کلان فرضی از احتمال یکسانی برخوردارند. بولتزمن در عین حال صورت‌بندی بسیارکلی‌تری را مطرح می‌سازد که آنتروپی را برای وضعیت‌های خردی نیز که احتمال‌شان نامتساوی است تعریف می کند.

۱۲. در معادله مربوط به آنتروپی بولتزمن، $S=k\log W$ ،S آنتروپی است، و ۷ تعداد وضعیت‌های خرد امکان‌پذیر متناظر با یک وضعیت کلان مفروض است، و k "ثابت بولتزمن" است، عددی که برای تطبیق آنتروپی با واحدهای استاندارد مورد استفاده قرار می گیرد.

۱۳. Shannon, C.,A mathematical theory of communication.

The Bell System Technical Journal, ۲۷,۱۹۴۸, pp. ۳۷۹ - ۴۲۳, ۶۲۳ - ۶۵۶.

۱۴. Pierce, J. R., An Introduction to Information Theory:

Symbols, Signals, and Noise. New York: Dover,۱۹۸۰, p. ۲۴.

(First edition,۱۹۶۱).

فصل چهارم: محاسبه

۱. leibniz, G. (۱۸۹۰).C.Gerhard (Ed.),Die PhilosophischenSchriften von Gottfried Wilhelm liebniz, Volume VII.Berlin: Olms. Translation from Russell, B., A History of Western Philosophy. Touchstone, ۱۹۶۷, p. ۵۹۲. (First edition, ۱۹۰۱.) ۲. Paton, R., Bolouri, H., Holcombe, M., Parish, J. H., and Tateson. R., editors.Computation in Cells and Tissues: Perspectives and Tools of Thought, Berlin: Springer-Verlag, ۲۰۰۴.

۳. Cohen, I. R., Immune system computation and the immunological homunculus. In O. Nierstrasz et al. (Editorsl, MoDElS ۲۰۰۶, lecture Notes in Computer Science ۴۱۹۹. Springer-Verlag, ۲۰۰۶, pp. ۴۹۹ - ۵۱۲.

۴. برگرفته از سخنرانی:David Pennock "Information and complexity in securities markets," Institute for Computational and Mathematical Engineering, Stanford University, November ۲۰۰۵. ۵. Peak, D., West, J. D., Messinger, S. M., and Mott, K. A., Evidence for complex, collective dynamics and emergent, distributed computation in plants.Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, ۱۰۱ (۴), ۲۰۰۴, pp. ۹۱۸ - ۹۲۲.

۶. به نقل از:

Hodges, A., Alan Turing: The Enigma, New York: Simon & Schuster, ۱۹۸۳, p. ۹۲.

۷. برای مطالعه شرحی عالی از اثبات، نگاه کنید به:

Nagel, E. and Newman, J. R., Godels Proof. New York: New York University, ۱۹۵۸; and Hofstadter, D. R., GGdel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid. New York: Basic Books, ۱۹۷۹.

۸. Hodges, A., Alan Turing: The Enigma. New York: Simon & Schuster, ۱۹۸۳, p. ۹۲.

۹. ریاضی‌دان دیگری،،Alonzo Church نیز این را اثبات کرد که در ریاضیات گزاره‌های تصمیم‌ناپذیر (undecidable) وجود دارد، اما نتایج تورینگ پر نفوذتر از کار درآمد.

۱۰. Turing, A. M., On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem.Proceedings of the london

Mathematical Society, ۲ (۴۲), ۱۹۳۶, pp. ۲۳۰ - ۲۶۵.

۱۱. Wang. H., Reflections on Kurt GGdel.Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۸۷.

فصل پنجم: تکامل

۱. Shaw, G. B., Annajanska, the Bolshevike Empress.

london: Kessinger Publishing, ۲۰۰۴/۱۹۱۹, p. ۱۵.

۲. به نقل از:

Bowker, J. (editorl, The Cambridge Illustrated History of Religions.Cambridge, UK: Cambridge University Press, ۲۰۰۲, p. ۷۶.

۳. Isaiah ۵۱:۶. The Holy Bible, King James Version.

۴. Shakespeare, Sonnet ۶۵.

۵.Dennett, D. R., Darwin Dangerous Idea. New York:

Simon & Schuster, ۱۹۹۵, p. ۲۱.

۶.Darwin, E., The Temple of Nature; or, The Origin of Society: A Poem with Philosophical Notes.london: J. Johnson, ۱۸۰۳.

۷. به نقل از:

Grinnell, G. J., The rise and fall of Darwins second theory.

Journal of the History of Biology, ۱۸ (۱), ۱۹۸۵, p. ۵۳.

۸. Freud, S., Moses and Monotheism. New York: Vintage Books, ۱۹۳۹, pp. ۱۲۸ - ۱۲۹.

به نقل از:

Cochrane, E., Viva lamarck: A brief history of the inheritance of acquired characteristics. Aeon ۲:۲, ۱۹۹۷, pp.

۵ - ۳۹.

۹.Darwin, C. and Barlow, N. D., The Autobiography of Charles Darwin. Reissue edition, New York: W. W. Norton, ۱۹۹۳/۱۹۵۸, p. ۲۸.

۱۰. داروین در نامه‌ای به W. D. Fox (ژانویه ۱۸۲۹) می‌نویسد: "مطالعات من شامل آدام اسمیت و لاک است."

TheCorrespondence of CharlesDarwin,olum (F. Burkhardt an iambridge,U.K.:

Cambridge University Press, ۱۹۸۵, p. ۷۲.

۱۱. برای مطالعه بیشتر درباره این موضوع، نگاه کنید به:

Weiner, J., The Beak of the Finch: A Story of Evolution in Our Time. New York: Knopf, ۱۹۹۴.

۱۲. به نقل از:

Bowlby, J., Charles Darwin: A New life. New York W. W. Norton, ۱۹۹۲, p. ۲۵۴.

۱۳. Barrett, P. (editorl, CharlesDarwin Notebooks, ۱۸۳۶-۱۸۴۴: Geology, Transmutation of Species, Metaphysical Enquiries. Ithaca, NY: Cornell University Press, ۱۹۸۷, p. ۵۵۱.

۱۴. نامه داروین به Charles lyell،۱۸ ژوئن ۱۸۵۸:

Darwin Correspondence Online Database, (http://www.darwinproject.ac.ukl, letter ۲۲۸۵.

۱۵. نامه داروین به Charles Lyell ۲۵، ژوئن ۱۸۵۸، همان جا، نامه ۲۹۴ ۱۶. به نقل از:

Darwin, C., The Autobiography of Charles Darwin.lanham, MD: Barnes & Noble Publishing, Endnote ۲۱, ۲۰۰۵, p. ۳۸۲.

۱۷. نقل قول هاکسلی برگرفته از:

Provine, W. B., The Origins of Theoretical Population Genetics. Chicago: University of Chicago Press, ۱۹۷۱, p. ۴.

۱۸. دانش‌واژه "ترکیب مدرن" از کتاب تأثیرگذار Julian Huxley گرفته شده است:

Evolution: The Modern Synthesis, New York, london: Harper, ۱۹۴۲.

ترکیب مدرن به ترکیب نوداروینی (Neo-Darwinian Synthesis) و ترکیب تکاملی مدرن (Modern Evolutionary Synthesis) نیز معروف است. کسانی که به موضوع آشنا هستند آن را به اختصار ترکیب (Synthesis) می‌نامند.

۱۹. Tattersall, I., Becoming Human: Evolution and Human Uniqueness. New York: Harvest Books, ۱۹۹۹, p. ۸۳.

۲۰. برای مطالعه مباحثه‌ای درباره نظریه Kimura نگاه کنید به:

Dietrich, M. R., The origins of the neutral theory of molecular evolution. Journal of the History of Biology, ۲۷ (۱), ۱۹۹۴, pp. ۲۱ - ۵۹.

۲۱. برای مطالعه شرح مناسبی درباره نظرات آیگن و شوستر نگاه کنید به:

Eigen, M., Steps Towards life. Oxford: Oxford University Press, ۱۹۹۲. ۲۲. Gould, S.J., Is a new and general theory of evolution emerging? Paleobiology, ۶, ۱۹۸۰, p. ۱۲۰.

۲۳.Eldredge, N. and Tattersall, I., The Myths of Human Evolution.New York: Columbia Universty Press, ۱۹۸۲, p. ۴۳.

۲۴. Mayr, E., An overview of current evolutionary biology.
In Warren, l. and Koprowski, H. editorsl, New Perspectives on Evolution.
New York: Wiley liss, ۱۹۹۱, p. ۱۲.
۲۵.Dawkins.TheExtendedPhenotypeReprint editionl. Oxford University
Press, ۱۹۸۹, p. ۳۱۷. Originally published ۱۹۸۲.

فصل ششم: علم ژنتیک به زبان ساده

۱. Hofstadter, D. R. The Genetic Code: Arbitrary? In Metamagical Themas. New York: Basic Books, ۱۹۸۵, p. ۶۸۱.

فصل هفتم: تعریف و اندازه‌گیری پیچیدگی

۱. نگاه کنید به:

Pearson, H., "What is gene?" Nature, vol. ۴۴۱, ۲۰۰۶, pp.

۳۹۹ - ۴۰۱.

۲.lloyd, S., Measures of complexity: A non-exhaustive list. IEEE Control Systems Magazine, August ۲۰۰۱.

۳. کتاب زیر مرجع کاملی درباره اندیشه‌های،Kolmogorov،Chaitin و Solmonoff است:

li, M. and Vitanyi, P., An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications, ۲nd Edition, New York: Springer-Verlag, ۱۹۹۷.

۴.Gell-Mann, M. What is complexity? Complexity, ۱ (۱), ۱۹۹۵, pp. ۱۶ - ۱۹.

۵. McAllister, J. W., Effective complexity as a measure of information content.Philosophy of Science, ۷۰, ۲۰۰۳, pp.

۳۰۲ - ۳۰۷.

۶. Bennett, C. H., How to define complexity in physics, and why. In W. H. Zurek (editorl, Complexity, Entropy, and the Physics of Information, Reading, MA: Addison-Wesley,

۱۹۹۰, p. ۱۴۲.

۷. lloyd, S., The calculus of intricacy. The Sciences, ۳۰, ۱۹۹۰, p. ۴۲.

۸.lloyd, S. and Pagels, H., Complexity as thermodynamic depth. Annals of Physics, ۱۸۸, ۱۹۸۸, pp. ۱۸۶ - ۲۱۳.

۹.lloyd, S., The calculus of intricacy. The Sciences, ۳۰, ۱۹۹۰, p. ۴۲.

۱۰. Crutchfield, J. P. and Shalizi, C. R., Thermodynamic depth of causal states: When paddling around in Occam' pool shallowness is a virtue. Physical Review E, ۵۹ (۱), ۱۹۹۹, PP. ۲۷۵ - ۲۸۳.

۱۱. Wolfram, S., Universality and complexity in cellular automata. Physica D, ۱۰, ۱۹۸۴, pp. ۱ - ۳۵.

۱۲. Bennett, C. H., Dissipation, information, computa- tional complexity and the definition of organization. In D.

Pines (editorsl, Emerging Syntheses in Science. Redwood City, CA: Addison-Wesley, ۱۹۸۵, pp. ۲۱۵ - ۲۳۳.

۱۳.Crutchfield, J. P. and Young, K., Inferring statistical complexity,

Physics Review letters ۶۳, ۱۹۸۹, pp. ۱۰۵ - ۱۰۸.

۱۴. Varn, D. P., Canright, G. S., and Crutchfield, J. P.,

Discovering planar disorder in close-packed structures from X-ray diffraction: Beyond the fault model. Physical Review B, ۶۶, ۲۰۰۲, pp. ۱۷۴۱۱۰ -۱--۱۷۴۱۱۰ - ۴.

۱۵. Haslinger, R., Klindner, K. l., and Shalizi, C. R., The computational structure of spike trains. Unpublished manu- script, ۲۰۰۷.

۱۶. Mandelbrot, B. B., The Fractal Geometry of Nature.

New York: W. H. Freeman, ۱۹۷۷.

۱۷. Strogatz, S., Nonlinear Dynamics and Chaos. Reading, MA: Addison-Wesley, ۱۹۹۴.

۱۸. کتاب زیر مقدمه فوق‌العاده‌ای درباره فراکتال‌ها و مفهوم بعد فراکتال است:

Mandelbrot, The Fractal Geometry of Nature. New York: W.

H. Freeman, ۱۹۷۷.

۱۹. در منحنی کک، n = ۴ است، برای به دست آوردن بعد از هر دو طرف لگاریتم بگیرید (در هر مبنایی)، log(l = log(۴l dimension = log(mension.

۲۰. بنابراین dimension = log(۴l / log(۳l = ۱.۲۶. Bovill, C., Fractal Geometry in Architecture and Design.

Birkhauser, Boston, ۱۹۹۶, p. ۴.

۲۱. Simon, H.A., The architecture of complexity.

Proceedings of the American Philosophical Society, ۱۰۶ (۹۶), ۱۹۶۲, pp. ۴۶۷ -۴۸۲.

۲۲. Ibid, p. ۴۶۸.

۲۳. McShea, D.W., The hierarchical structure of

organisms: A scale and documentation of a trend in the maximum. Paleobiology, ۲۷ (۲), ۲۰۰۱, pp. ۴۰۵ - ۴۲۳.

بخش دوم

۱. به نقل از:

Grene, M. and Depew, D., The Philosophy of Biology: An Episodic History.

Cambridge University Press, ۲۰۰۴, p. ۱۴.

۲.lovelock, J. E., The Ages of Gaia. New York: W. W.

Norton, ۱۹۸۸, p. ۱۶.

فصل هشتم: برنامه‌های کامپیوتری تولیدمثل‌کننده

۱. بخشی از این فصل اقتباسی است از:

Mitchell, M., life and evolution in computers. History and Philosophy of the life Sciences, ۲۳, ۲۰۰۱, pp. ۳۶۱ - ۳۸۳.

۲. luisi, P. l., The Emergence of life: From Chemical Origins to Synthetic Biology. Cambridge: Cambridge Univer- sity Press, ۲۰۰۶; Fry, I., The Emergence of life on Earth: A Historical and Scientific Overview. Piscataway, NJ: Rutgers University Press, ۲۰۰۰.

۳. برای مطالعه بیشتر در مورد رشته حیات مصنوعی، برای مثال نگاه کنید به:

langton, C. G., Artificial life: An Overview. Cambridge, MA:

MIT Press, ۱۹۹۷; Adami, C., Introduction to Artificial life.

New York: Springer, ۱۹۹۸.

۴.Von Neumann, J., Theory of Self Reproducing Automata edited and completed by A. W. Burksl. Urbana: University of Illinois Press, ۱۹۶۶.

برای مطالعه توضیحات فون نویمن درباره خودکار خودتکثیرکننده نگاه کنید به:

Burks, A. W., Von Neumann self-reproducing automata. In A. W.Burks (editor), Essays on Cellular Automata. Urbana: University of Illinois Press, ۱۹۷۰; Mitchell, M., Computation in cellular automata: A selected review. In T. Gramss et al. (editorsl,NonstandardComputation,p.۹۵ - ۱۴۰. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.

برای شرحی درباره خودتکثیری در DNA و این که چگونه به منطق ریاضی و برنامه‌های کامپیوتری خود -کپی کننده مربوط می‌شود، نگاه کنید به:

Hofstadter, D. R., Godel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid. New York: Basic Books, ۱۹۷۹, pp. ۴۹۵ - ۵۴۸.

۵. به نقل از:

Heims, S. J., John Von Neumann and Norbert Wiener: From MathematicshTechnologiesDeath.

Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۸۰, pp. ۲۱۲ - ۲۱۳.

۶. Kurzweil, R., The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence. New York: Viking, ۱۹۹۹; Moravec, H., Robot: Mere Machine to Transcendent Mind. New York: Oxford University Press, ۱۹۹۹.

۷. Joy, B., Why the future doesnt need us. Wired, April ۲۰۰۰.

۸. Zykov, V. Mytilinaios, E., Adams, B., and lipson, H., Self reproducing machines. Nature, ۴۳۵, ۲۰۰۵, pp. ۱۶۳ -۱۶۴.

۹. به نقل از:

Macrae, N., John von Neumann. New York: Pantheon, ۱۹۹۲, p. ۵۲.

۱۰. به نقل از:

Macrae, N., John von Neumann. New York: Pantheon, ۱۹۹۲, p. ۲۳.

۱۱. Goldstine, H. H., The Computer, from Pascal to von Neumann. Princetion, NJ: Princeton University Press, first edition, ۱۹۷۲, p. ۱۹۱.

۱۲. Macrae, N., John von Neumann. New York: Pantheon, ۱۹۹۲, p. ۳۲.

۱۳. به نقل از:

Macrae, N., John von Neumann. New York: Pantheon, ۱۹۹۲, p. ۳۲۴.

۱۴. به نقل از:

Regis, E., Who Got Einsteins Office? Eccentricity and Genius at the Institute for Advanced Study. Menlo Park, CA:

Addison Wesley, ۱۹۸۷, p. ۱۱۴.

۱۵. Regis, E., Who Got Einsteins Office? Eccentricity and Genius at the Institute for Advanced Study. Menlo Park, CA: Addison Wesley, ۱۹۸۷, p. ۱۱۴.

فصل نهم: آلگوریتم‌های ژنتیک

۱. برای مطالعه تاریخچه پژوهش‌های اولیه در مورد محاسبه تکاملی نگاه کنید به:

Fogel, D. B., Evolutionary Computation: The Fossil Record.

New York: Wiley IEEE Press, ۱۹۹۸.

۲. به نقل از:

Williams, S. Unnatural selection. Technology Review, March ۲, ۲۰۰۵.

۳. Hammond, W. E.Design Methodologies for Space

Transportation Systems, ۲۰۰۱, Reston, VA: American Institute

of Aeronautics and Astronautics, Inc., p. ۵۴۸.

۴.Harvey, N. R., Theiler, J., Brumby, S. P., Perkins, S., Szymanski, J. J., Bloch, J. J., Potter, R. B., Galassi, M., and Young, A.C.Comparison of GENIE and conventional supervised classifierslipalfeature extraction. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, ۴۰, ۲۰۰۲, pp. ۳۹۳ - ۴۰۴.

۵. Begley, S. Software au naturel. Newsweek, May ۸, ۱۹۹۵.

۶. Ibid.

۷. Morton, O., Attack of the stuntbots. Wired. ۱۲.۰۱, ۲۰۰۴.

۸. "Virtual Stuntmen Debut in Hollywood Epic Troy," news release, NaturalMotion ltd.

(http://www.naturalmotion.com/files/nm troy.pdfl.

۹. Felton, M. J., Survival of the fittest in drug design.

Modern_Drug Discovery, ۳ (۹), ۲۰۰۰, pp. ۴۹ - ۵۰.

۱۰. Bolton, R. J. and Hand, D.J., Statistical fraud detection: A review.Statistical Science, ۱۷ (۳), ۲۰۰۲, pp.

۲۳۵ - ۲۵۵.

۱۱. Holtham, C., Fear and opportunity. Information Age, July ۱۱, ۲۰۰۷.

۱۲. Williams, F., Artificial intelligence has a small but loyal following. Pensions and Investments, May ۱۴, ۲۰۰۱.

۱۳. Coale, K., Darwin in a box. Wired, June ۱۴, ۱۹۹۷.

۱۴. (http://www.karlsims.coml.

۱۵. این مثال از پروژه‌ای در آزمایشگاه هوش مصنوعی دانشگاه MIT الهام گرفته است، در این پروژه ربوتی به نام "Herbert" در دفاتر و سرسراها قوطی‌های خالی آب

معدنی را برمی‌دارد و در سطل بازیافت می‌اندازد. نگاه کنید به:

Connell, J. H., Minimalist Mobile Robotics: A Colony-Style Architecture for an Artificial Creature. San Diego: Academic Press, ۱۹۹۰.

۱۶. پنج نوع مختلف پایگاه وجود دارد که هر کدام سه نوع مختلف محتوا دارند. در نتیجه ۳x۳x۳x۳x۳=۲۴۳ وضعیت مختلف امکان‌پذیر است.

۱۷. به نقل از:

Williams, S., Unnatural selection. Technology Review, March ۲, ۲۰۰۵.

بخش سوم

۱. گفته Chris langton به نقل از:

lewin, R., Complexity: life at the Edge of Chaos.New York: Macmillan, ۱۹۹۲, p. ۴۸.

فصل دهم: خودکار سلولی، حیات، جهان هستی

۱. Shouse, B., Getting the behavior of social insects to compute. Science, ۲۹۵ (۵۵۶۴), ۲۰۰۲, ۲۳۵۷.

۲.Churchland, P. S., Koch, C., and Sejnowski, T. J., What is computational neuroscience? In E. l., Schwartz editorl, Computational Neuroscience.Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۹۴, pp. ۴۶ - ۵۵.

۳. همان‌طورکه در این فصل توضیح خواهم داد، برای تعریف یک قاعده، باید با توجه به تمامی پیکربندیهای ممکن محلی وضعیت به روز شده لامپ مرکزی را مشخص کنید. چون هر محله شامل هشت همسایه به اضافه خود لامپ مرکزی است، و هر لامپ می‌تواند روشن یا خاموش باشد، تعداد پیکربندی‌های ممکن یک محله برابر است با ۲=۵۱۲. در هر پیکربندی، می‌توان یا "روشن" یا "خاموش" را به وضعیت به روز شده منتسب کرد، در نتیجه تعداد انتساب‌های ممکن در کل ۵۱۲ پیکربندی برابر است با ۴. بخش عمده‌ای از مطالبی را که در این جا آورده‌ام می‌توان در منابع زیر یافت:

Berlekamp, E., Conway, J. H., and Guy, R., Winning Ways for Your Mathematical Plays, Volume ۲. San Diego: Academic Press, ۱۹۸۲; Poundstone, W., The Recursive Universe. William Morrow, ۱۹۸۴:

و بسیاری از هزاران وبگاهی که به بازی زندگی اختصاص دارند.

۵.Berlekamp, E., Conway, J. H., and Guy, R., Winning Ways for Your Mathematical Plays, volume ۲. San Diego: Academic Press, ۱۹۸۲.

۶. برای مثال نگاه کنید به:

Rendell, P., Turing universality of the Game of life. In A. Adamatzky (editorl, Collision-Based Computing, pp. ۵۱۳ - ۵۳۹. london: Springer-Verlag, ۲۰۰۱.

۷. به یاد بیاورید که در اعداد اعشاری (مبنای ۱۰)، برای مثال، ۲۳۵، هر "محل رقم" در عدد متناظر است با توانی از ۱۰:

(۱۰۰=۱) در مبنای ۲، هر محل رقم متناظر است با توانی از ۲. برای مثال، ۲۳۵، در مبنای ۲ معادل است با ۱۱۱۰۱۰۱۱:

۲۳۵. = ۲۰+

۸. به نقل از:

Malone, M. S., God, Stephen Wolfram, and everything else.

Forbes ASAP, November ۲۷, ۲۰۰۰.

(http://members.forbes.com/asap/۱۶۲/۱۱۲۷/۲۰۰۰.htmll

۹. "Random Sequence Generators" U.S. Patent ۴۶۹۱۲۹۱, September, ۱, ۱۹۸۷.

۱۰. Wolfram, S., A New Kind of Science. Champaign, Il, Wolfram Media, ۲۰۰۲, p. ۲۳۵.

۱۱.Cook, M., Universality nelementary cellular automata. Complex Systems ۱۵ (۱l, ۲۰۰۴, ۱ - ۴۰.

۱۲. Wolfram, S., A New Kind of Science. Champaign; Il:

Wolfram Media, ۲۰۰۲, p. ۲۳۵.

۱۳. Moore, C., Recursion theory on the reals and

continuous-time computation.Theoretical Computer Science, ۱۶۲, ۱۹۹۶, pp. ۲۳ -۴۴.

۱۴. Wolfram, S., A New Kind of Science. Champaign, Il:

Wolfram Media, ۲۰۰۲, p. ۴۶۶.

۱۵. به نقل از:

levy, S., The man who cracked the code to everything... Wired, Issue ۱۰.۰۶, June ۲۰۰۲.

۱۶. نگاه کنید به:

Zuse, K., Rechnender Raum Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn, ۱۹۶۹ (English translation: Calculating Space.MIT

TechnicalTranslationAZT - ۷۰ - ۱۶۴ EMIMassachu- setts Institute of Technology (Project MACl, Cambridge, MA, ۰۲۱۳۹, February ۱۹۷۰l; and Wright, R., Did the universe just happen? Atlantic Monthly, April ۱۹۸۸, pp. ۲۹ - ۴۴.

فصل یازدهم: محاسبه با ذرات

۱. توضیح مشروحی درباره نتایج پژوهش ما در مورد خودکارها و ذره‌های سلولی را می‌توانید در آثار زیر ببینید:

Crutchfield, J. P., Mitchell, M., and Das, R., Evolutionary design of collective computation in cellular automata. In J. P.

Crutchfield and P.K.Schuster (editorslEvolutionary Dynamics - Exploring the Interplay of Selection, Neutrality, Accident, and Function. New York: Oxford University Press, ۲۰۰۳, pp. ۳۶۱ - ۴۱۱.

۲.Packard, N. H., Adaptation toward the edge of chaos.

In J. A. S. Kelso, A. J. Mandell, M. F. Shlesinger, eds., Dynamic Patterns in Complex Systems. Singapore: World Scientific, ۱۹۸۸, pp. ۲۹۳ -۳۰۱.

۳. در نوشتارهای مربوط به خودکارهای سلولی به طبقه‌بندی اکثریت با عنوان "طبقه‌بندی تراکم" (density classificationl نیز اشاره می‌شود.

۴.Crutchfield, J. P., and Hanson, J. E., Turbulent pattern bases for cellular automata. Physica D ۶۹, ۱۹۹۳, pp. ۲۷۹ - ۳۰۱. ۵. Wolfram, S., Twenty problems in the theory of cellular automata. Physica Scripta, T۹, ۱۹۸۵, pp. ۱۷۰ - ۱۸۳. ۶. Peak, D., West, J. D., Messinger, S. M., and Mott, K. A., Evidence for complex, collective dynamics and emergent, distributed computation ringthe National Academy of Sciences, USA, ۱۰۱ (۴), ۲۰۰۴, pp. ۹۱۸ - ۹۲۲.

فصل دوازدهم: پردازش اطلاعات در سیستم‌های زنده

۱. بخش‌هایی از این فصل اقتباسی است از:

Mitchell, M., Complex systems: Network thinking. Artificial Intelligence, ۱۷۰ (۱۸), ۲۰۰۶, pp. ۱۱۹۴ - ۱۲۱۲.

۲. پرسشهای من مربوط هستند به سه سطح از توضیح پردازش اطلاعات که David Marr در کتابش مطرح کرده است:

Marr, D. Vision. San Francisco, Freeman, ۱۹۸۲.

پرسشهای مشابهی را Ron McClamrock صورت‌بندی کرده است. نگاه کنید به:

McClamrock, R., Marr's three levels: A re-evaluation. Minds and_Machines, ۱ (۲), ۱۹۹۱, pp. ۱۸۵ - ۱۹۶.

۳. دو شرح مختصر فوق‌العاده درباره سیستم ایمنی عبارتند از:

Sompayrac, l. M., How the Immune System Works, ۲nd edition, Blackwell Publishing, ۱۹۹۱; and Hofmeyr, S. A., An interpretive introduction to the immune system. In l. A.

Segel and I. R. Cohen (editorsl, Design Principles for the Immune System and Other Distributed Autonomous Systems.

New York: Oxford University Press, ۲۰۰۱.

۴.lesley, R. Xu, Y., Kalled, S. l., Hess, D. M., Schwab, S.

R., Shu, H.B., and Cyster, J. G., Reduced competitiveness of autoantigen engaged B cells due to increased dependence on BAFF. Immunity, ۲۰ (۴), ۲۰۰۴, pp. ۴۴۱ - ۴۵۳.

۵. Bonabeau, E., Dorigo, M., and Theraulaz, G., Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. New York:

Oxford University Press, ۱۹۹۹.

۶. Gordon, D. M., Task allocation in ant colonies. In l.A.

Segel and I. R. Cohen. (editorsl, Design Principles for the Immune System and Other Distributed Autonomous Systems.

New York: Oxford University Press., ۲۰۰۱.

۷. lioni, A., Sauwens, C., Theraulaz, G., and Deneubourg, J.-l., Chain formation in OEcophylla longinoda. Journal of Insect Behavior, ۱۴ (۵), ۲۰۰۱, pp. ۶۷۹ - ۶۹۶.

۸. نقش تصادفی بودن در سیستم‌های پیچیده انطباق‌پذیر در متن زیر بررسی شده است:

Millonas, M. M., The importance of being noisy. Bulletin of the Santa Fe Institute, Summer, ۱۹۹۴.

۹. Ziff, E., and Rosenfield, I., Evolving evolution. The New York Review of Books, ۵۳, ۸, May ۱۱, ۲۰۰۶.

۱۰. Hofstadter D., Fluid Concepts and Creative Analogies. New York: Basic Books, ۱۹۹۵, p. ۹۲.

۱۱. موضوع در آثار زیر مورد بحث قرار گرفته است:

Holland, J. H., Adaptation in Natural and Artificial Systems. Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۹۲ (first edition, ۱۹۷۵):

Hofstadter, D. R. and Mitchell, M., The Copycat project: A model of mental fluidity and analogy -making. In K. Holyoak and J. Barnden (editorsl, Advances in Connectionist and Neural Computation Theory, Volume ۲: Analogical Connec- tions, ۱۹۹۴, pp. ۳۱ - ۱۱۲.

۱۲. برخی از کتاب‌ها و مقاله‌های متعددی که از نقطه نظر فلسفی این موضوع را بررسی کرده‌اند از این قرار است:

Hofstadter, D. R., Godel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid. New York: Basic Books, ۱۹۷۹; Dennett, D.R., ConsciousnessExplained. Boston: little, Brown ۱۹۹۱; Bickhard, M. H., The biological foundations of cognitive science. In Mind ۴: Proceedings of the ۴th Annual Meeting of the Cognitive Science Society of Ireland. Dublin, Ireland: J.

Benjamins, prosthe philosophy of information. Metaphilosophy, ۳۵ (۴), ۲۰۰۴, pp.

۵۵۴ -۵۸۲; and Hofstadter, D., I am a Strange loop. New York: Basic Books, ۲۰۰۷.

۱۳. Hofmeyr, S. A. and Forrest, S., Architecture for an artificial immune system. EvolutionaryComputation, ۸ (۴), ۲۰۰۰, pp. ۴۴۳ -۴۷۳.

۱۴. Dorigo, M. and Stitzle, T., Ant Colony Optimization, MIT Press, ۲۰۰۴.

فصل سیزدهم: چگونه قیاس کنید (اگر کامپیوتر هستید)

۱. بخش‌هایی از این فصل اقتباسی است از:

Mitchell, M., Analogy-Making as Perception, MIT Press, ۱۹۹۳; Mitchell, M., Analogy -making as a complex adaptive system.

In l. Segel and I. Cohen (editorsl, Design Principles for the Immune System and Other Distributed Autonomous Systems.

New York: Oxford University Press, ۲۰۰۱.

۲. lohr, S., This boring headline is written for Google.

New York Times, April ۹. ۲۰۰۶.

۳. نقل قول از Eric Horvitz در مقاله:

Markoff, J., Brainy robots start stepping into daily life.New York Times, July ۱۸, ۲۰۰۶.

۴. Minsky, M., The Society of Mind. New York: Simon & Schuster, ۱۹۸۷, p. ۲۹.

۵. Thoreau, H. D. (with l. D. Walls, editorl. Material Faith: Thoreau on Science. New York: Mariner Books, ۱۹۹۹, p. ۲۸.

۶. Hofstadter, D. R., Godel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid. New York: Basic Books, ۱۹۷۹.

۷. برای مطالعه تعدادی از این برنامه‌ها، از جمله برنامه مقلد، نگاه کنید به:

Hofstadter D., Fluid Concepts and Creative Analogies.New York: Basic Books, ۱۹۹۵.

۸. Rota, G.C., In memoriam of Stan Ulam - The barrier of meaning. Physica D, ۲ (۱-۳l, ۱۹۸۶, pp. ۱-۳.

فصل چهاردهم: آینده مدل‌سازی کامپیوتری

۱. Garber, D., Descartes, mechanics, and the mechanical philosophy. Midwest Studies in Philosophy ۲۶ (۱l, ۲۰۰۲, pp.

۱۸۵ - ۲۰۴.

۲.Kubrin, D., Newton and the cyclical cosmos: Providence and the mechanical philosophy.Journal of the History of Ideas, ۲۸ (۳l, ۱۹۶۷.

۳.Dennett, D. R., Elbow Room: The Varieties of Free Will Worth Wanting. Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۸۴, p. ۱۲.

۴. برای مطالعه مباحثه‌ای سرگرم‌کننده و روشنگرانه درباره دوراهی زندانی، و به طور کلی‌تر، درباره نظریه بازی‌ها و تاریخچه و کاربرد آن، نگاه کنید به:

Poundstone, W., Prisoners Dilemma. New York: Doubleday, ۱۹۹۲.

۵. Axelrod, R., The Evolution of Cooperation.New york: Basic Books, ۱۹۸۴, p. ۷.

۶. Hardin, G., The tragedy of the commons. Science, ۱۶۲, ۱۹۶۸, pp. ۱۲۴۳ - ۱۲۴۸.

۷. Axelrod, R., The Evolution of Cooperation. New York: Basic Books, ۱۹۸۴, p. ۳.

۸. استدلال‌های هابز درباره حکومت‌متمرکز را در Hobbes, T., leviathan بیابید، که ابتدا در سال ۱۶۵۱ منتشر شد؛ و ویراستی از آن در سال ۱۹۹۱:

R. Tuck. Cambridge University Press, ۱۹۹۱.

۹. اندیشه‌های اینشتین درباره حکومت جهانی و بسیاری از موضوعات دیگر را می‌توانید در مجموعه‌ای از نوشته‌های او بیابید:

Einstein, A., Out of My later Years.First published in ۱۹۵۰; revised edition published in ۲۰۰۵ by Castle Books.

۱۰. Axelrod, R., An evolutionary approach to norms.

AmericanPolitical Science Review, (۴l, ۱۰۹۵ - ۱۱۱۱.

۱۱. Ibid.

۱۹۸۶,pp. ۱۲. Nowak, M. A. and May, R. M., Evolutionary games and spatial chaos. Nature, ۳۵۹ (۶۳۹۸l, ۱۹۹۲, pp. ۸۲۶ - ۸۲۹.

۱۳. Ibid.

۱۴. Ibid.

۱۵. Sigmund, K., On prisoners and cells, Nature, ۳۵۹ (۶۳۹۸l, ۱۹۹۲, p. ۷۷۴.

۱۶. Holland, J. H., Emergence: From Chaos to Order.

Perseus Books, ۱۹۹۸, p. ۲۴۳.

۱.SACA Self-Organizing Protocol for Coordination in Peer-to-Peer Networks. IEEE Intelligent Systems, ۲۱ (۲), ۲۰۰۶, pp. ۲۹ - ۳۵.

۱۸.Kollock, P., The production of trust in online markets.

In E. J. lawler, M. Macy, S. Thyne, and H. A. Walker (editorsl, Advances in Group Processes, Vol. ۱۶. Greenwich, CT: JAI Press, ۱۹۹۹.

۱۹. Nowak, M.A., Five rules for the evolution of cooperation. Science, ۳۱۴ (۵۸۰۵), ۲۰۰۶, pp. ۱۵۶۰ - ۱۵۶۳.

۲۰. liebreich, M., How to Save the Planet: Be Nice, Retaliatory, Forgiving, & Clear. White Paper, New Energy Finance, ltd., ۲۰۰۷.

(http: // www.newenergyfinance.com/docs / Press / NEF WP Car bon-Game-Theory ۰۵.pdfl ۲۱. Cupitt, R. T., Target rogue behavior, not rogue states.

The Nonproliferation Review, ۳, ۱۹۹۶, pp. ۴۶ - ۵۴; Cupitt, R. T.

and Grillot, S. R., COCOM is dead, long live COCOM:

Persistence and change in multilateral security institutions.

British Journal of Political Science ۲۷, ۷, pp. ۳۶۱ - ۸۹; Friedheim, R. l., Ocean governance at the millennium:

Where we have been, where we should go: Cooperation and discord in the conocaCoastal Management, ۴۲ (۹), ۱۹۹۹, pp. ۷۴۷ - ۷۶۵.

۲۲.Nowak, M. A. and Sigmund, K., Biodiversity: Bacterial game dynamics. Nature, ۴۱۸, ۲۰۰۲, pp. ۱۳۸ -۱۳۹; Wiener, P., Antibiotic production in a spatially structured environment.

Ecology letters, ۳ (۲), ۲۰۰۰, pp. ۱۲۲ - ۱۳۰.

۲۳. Box, G.E.P. and Draper, N. R., Empirical Model Building and Response Surfaces. New York: Wiley ۱۹۹۷, p. ۴۲۴.

۲۴. Axelrod R., Advancing the art of simulation in the social sciences. In Conte, R., Hegselmann, R., Terna, P.

(editorsl, Simulating Social Phenomena. (lecture Notes in

@degar_goonesh

EconomicsMeatical Berlin:

Springer-Verlag,۱۹۹۷.

۲۵. Huberman, B. A. and Glance, N. S., Evolutionary games and computer simulations. Proceedings of the National Academy of Science, USA, ۹۰, ۱۹۹۳, pp. ۷۷۱۶ - ۷۷۱۸.

۲۶. Mukherji, A., Rajan, V., and Slagle, J. R., Robustness of cooperation. Nature, ۳۷۹,۱۹۹۶, pp. ۱۲۵ - ۱۲۶.

۲۷. Nowak, M. A., Bonhoeffer, S., and May, R. M., Spatial games and the maintenance of cooperation. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, ۹۱, ۱۹۹۴, pp. ۴۸۷۷ -۴۸۸۱; Nowak, M. A., Bonhoeffer, S., and May, R. M., Reply to Mukherji et al. Nature, ۳۷۹,۱۹۹۶, p. ۱۲۶.

۲۸.Galan, J. M. and Izquierdo, l. R., Appearances can be deceiving: reimplementing Axelrod Evolutionary Approaches to Norms.Journal of Artificial Societies and Social Simulation, ۸ (۳), ۲۰۰۵, (http://jasss.soc. surrey.ac.uk/۲/۳/۸.htmll.

۲۹. Anderson, Nobel Prize acceptance speech, ۱۹۷۷.

بخش چهارم

۱. Calvino, I. Invisible Cities. New York: Harcourt Brace Jovanovich, ۱۹۷۴, p. ۷۶. (Translated by W. Weaver.)

فصل پانزدهم: علم شبکه

۱. بخش‌هایی از این فصل اقتباسی است از:

Mitchell, M., Complex systems: Network thinking. Artificial Intelligence, ۱۷۰ (۱۸l, ۲۰۰۶, pp. ۱۱۹۴ - ۱۲۱۲.

۲. Milgram, S., The small-world problem.Psychology Today ۱, ۱۹۶۷, pp. ۶۱ - ۶۷.

۳.Kleinfeld, Could it be a big world after all? Society, ۳۹, ۲۰۰۲.

۴.Kleinfeld, J. S., Six degrees: Urban myth? Psychology Today, ۷۴, March/ April ۲۰۰۲.

۵.Kleinfeld, J. S., Could it be a big world after all? The "six degrees of separation" myth. Society, ۳۹, ۲۰۰۲.

۶. Barabasi A.-l., linked: The New Science of Networks.

Cambridge, MA: Perseus, ۲۰۰۲.

۷. Watts, D. J. and Strogatz, S.H., Collective dynamics of 'small world networks. Nature ۳۹۳, ۱۹۹۸, pp.۴۴۰ - ۴۴۲; Barabasi, A.-l. and Albert, R., Emergence of scaling in random networks, Science, ۲۸۶, ۱۹۹۹, pp. ۵۰۹ - ۵۱۲.

۸. Watts, D. J., Six Degrees: The Science of a Connected Age. New York: W. W. Norton & Co, ۲۰۰۳, p. ۳۲.

۹. Barabasi, A.l.linked: The New Science of Networks.

Cambridge, MA: Perseus, ۲۰۰۲, p. ۲۲۲.

۱۰. تمامی شمارش‌های پیوند ورودی در این فصل از وبگاه زیر گرفته شده:

(http://www.microsoft watch.org/cgi bin/ranking.html.

شمارش تنها شامل پیوندهای ورودی از بیرون حوزه صفحه وب است.

۱۱. Watts, D. J. and Strogatz, S. H., Collective dynamics of 'small world networks. Nature, ۳۹۳, ۱۹۹۸, pp. ۴۴۰ - ۴۴۲.

۱۲. این مقدار با استفاده از فرمولمحاسبه شده است./ میانگین طول مسیر، N تعداد گره‌ها، و k درجه هرگره است (در این جا ۲). نگاه کنید به:

Albert, R. and Barabasi, A.l., Statistical mechanics of complex networks. Reviews of Modern Physics, ۷۴, ۲۰۰۲, pp. ۴۸ - ۹۷.

۱۳. این مقدار بر مبنای نتایج مقاله زیر تخمین زده شده است:

Newman, M. E. J., Moore, C., and Watts, D. J., Mean field solution of the small-world network model. Physical Review letters, ۸۴, ۱۹۹۹, pp. ۳۲۰۱ - ۳۲۰۴.

۱۴. Watts, D. J., Six Degrees: The Science of a Connected Age. New York: W. W. Norton, ۲۰۰۳, p. ۸۹.

۱۵. تعریف صوری‌خاصیت دنیای کوچک این است که، گرچه ارتباط‌های راه دور نسبتا معدودی وجود دارد، کوتاه‌ترین طول مسیر (تعداد جهش‌های پیوند) بین دوگره در شبکه‌ای به اندازه، n برای میانگین درجه ثابت، به لحاظ لگاریتمی یا کندتر میزان می‌شود.

۱۶. به عنوان مثال نگاه کنید به:

(http://en.wikipedia.org/wiki/Six Degrees of Kevin Baconl.

۱۷. برای مطالعه بیشتر نگاه کنید به:

Achacoso, T. B. and Yamamoto, W. S., AY Neuroanatomy of C.Elegans for Computation. Boca Raton, Fl: CRC Press, ۱۹۹۱.

۱۸. مدل واتس -اشتروگاتز، به جای توزیع درجه قانون توان که در شبکه‌های دنیای واقعی بیشتر مشاهده می‌شود، توزیع درجه نمایی را شکل می‌دهد. برای اطلاعات مشروحی در این باره نگاه کنید به:

Albert, R. and Barabasi, A.l., (۲۰۰۲l.Statistical mechanics of complex networks. Reviews of Modern Physics, ۷۴, ۲۰۰۲, pp. ۴۸ - ۹۷.

۱۹. (http://www.americanfruitgrower.com/e notes/ page.php? page=newsl.

۲۰. (http://www.huonfranklincottage.com.au/events.html.

۲۱. توزیع درجه پیوند ورودی در وب انطباق معقولی با قانون توان k۲ و قطع i=۳۶۸۴ دارد. نگاه کنید به:

Clauset, A., Shalizi, C. R., and Newman, M. E.J., Power law distributions in empirical data. Preprint, ۲۰۰۷ (http://arxiv.org/abs/۰۷۰۶.۱۰۶۲).

شکل k که در این فصل آمده تقریبی برای ساده کردن بحث است؛ منحنی توزیع k۲ خیلی شبیه موردی است که در این فصل مطرح شده است.

فصل شانزدهم: کاربرد علم شبکه در شبکه‌های دنیای واقعی

۱. Bassett, D. S. and Bullmore, D., Small-world brain networks. The Neuroscientist, ۱۲, ۲۰۰۶, pp. ۵۱۲ -۵۲۳; Stam, C.

J. and Reijneveld, J. C., Graph theoretical analysis of complex networks in the brain. Nonlinear Biomedical Physics, ۱ (۱), ۲۰۰۷, p. ۳.

۲. برای اطلاعات مشروحی درباره کاربرد ایده‌های شبکه در تنظیم ژنی، نگاه کنید به:

Barabasi,NNetwork biology: Understanding the cell functionalorganization.

Reviews: Genetics, ۵, ۲۰۰۴, pp. ۱۰۱ - ۱۱۳.

Nature ۳. Jeong, H., Tombor, B., Albert, R., Oltvai, Z. N., and Barabasi, A.-l., The large-scale organization of metabolic networks. Nature, ۴۰۷, ۲۰۰۰, pp. ۶۵۱ - ۶۵۴.

مثال‌هایی از سایر نتایج پژوهشی در مورد ساختار شبکه سوخت و ساز عبارتند از:

Fell, D. A. and Wagner, A., The small world of metabolism. Nature Biotechnology, ۱۸, ۲۰۰۰, pp. ۱۱۲۱ -۱۱۲۲; Burgard, A. P., Nikolaev, E. V., Schilling, C.H., and Maranas, C. D., Flux coupling analysis of genomescale metabolic network reconstructions. Genome Research, ۱۴, ۲۰۰۴, pp. ۳۰۱ - ۳۱۲. ۴.Robbins, K. E., lemey, P., Pybus, O. G., Jaffe, H. W., Youngpairoj, A. S., Brown, T. M., Salemi, M., Vandamme, A. M., and Kalish, M. l., U.S. human immunodeficiency virus type ۱ epidemic: Date of origin, population history, and characterization of early strains. Journal of Virology, ۷۷ (۱۱l, ۲۰۰۳, pp. ۶۳۵۹ - ۶۳۶۶.

۵. liljeros, F., Edling, C. R., Nunes Amaral, l. A., Stanely, H. E., and Aberg. Y., The web of human sexual contacts.

Nature, ۴۴۱, ۲۰۰۱, pp. ۹۰۷ - ۹۰۸.

۶. Schneeberger, A., Mercer, C. H., Gregson, S.A., Ferguson, N. M., Nyamukapa, C. A., Anderson, R. M., Johnson, A. M., and Garnett, G. P., Scale free networks and sexually transmitted diseases: A description of observed patterns of sexual contacts in Britain and Zimbabwe. Sexually Transmitted Diseases, ۳۱ (۶l, ۲۰۰۴, pp. ۳۸۰ - ۳۸۷.

۷. Cohen, R., ben-Avraham, D., and Havlin, S., Efficient immunizationand populations. Physics Review letters, ۹۱ (۲۴l, ۲۰۰۳, p. ۲۴۷۹۰۱.

۸.Newman, M. E. J., Forrest, S., and Balthrop, J., Email networks and the spread of computer viruses. Physical Review E, ۶۶, ۲۰۰۲, p. ۰۳۵۱۰۱.

۹. Montoya, J. M. and Sole, R. V., Small world patterns in food webs. Journal of Theoretical Biology, ۲۱۴ (۳l, ۲۰۰۲, pp.

۴۰۵ - ۴۱۲; Dunne, J. A., Williams, R. J., and Martinez, N.D., Food web structure and network theory: The role of connectance and size. Proceedings of the National Academy of Science, USA, ۹۹ (۲۰l, ۲۰۰۲, pp. ۱۲۹۱۷ - ۱۲۹۲۲; Dunne, J. A., The network structure of food webs. In M. Pascual and J. A.

Dunne (editorsl, Ecological Networks: linking Structure to Dynamics in Food Webs.New York: Oxford University Press, ۲۰۰۶, pp. ۲۷ - ۸۶.

۱۰. بخش‌هایی از این قسمت اقتباسی است از:

Mitchell, M., Complex systems: Network thinking. Artificial Intelligence, ۱۷۰ (۱۸l, ۲۰۰۶, pp. ۱۱۹۴ - ۱۲۱۲.

۱۱. Barabasi, A.-l. and Albert, R., Emergence of scaling in random networks, Science, ۲۸۶, ۱۹۹۹, pp. ۵۰۹ -۵۱۲.

۱۲. Yule, G. U., A mathematical theory of evolution, based on the conclusions of Dr. J. C.Willis.Philosophical Transactions of the Royal Society of london, Ser. B ۲۱۳, ۱۹۲۴, pp. ۲۱ - ۸۷; Simon, H. A., On a class of skew distribution functions. Biometrika ۴۲ (۳ -۴l, ۱۹۵۵, p. ۴۲۵; Price, D.J., Networks of scientific papers. Science ۱۴۹, ۱۹۶۵, pp. ۵۱۰ - ۵۱۵.

۱۳. Redner, S., How popular is your paper? An empirical study of the citation distribution. European Physical Journal B, ۴ (۲l, ۱۹۹۸, pp. ۱۳۱ - ۱۳۴.

۱۴. Gladwell, M., The Tipping Point: How little Things Can Make a Big Difference. Boston: little, Brown, ۲۰۰۰.

۱۵. Clauset, A., Shalizi, C. R., and Newman, M. E.J., Power law distributions in empirical data. Preprint, ۲۰۰۷, (http://arxiv.org/abs/۰۷۰۶.۱۰۶۲l.

۶.Keller, E.F., Revisiting BioEssays, ۲۷, ۲۰۰۵, pp. ۱۰۶۰ - ۱۰۶۸.

scale free networks.

۱۷. Shalizi, C., Networks and Netwars, ۲۰۰۵. Essay at (http://www.cscs.umich.edu/~crshalizi/weblog/۳۴۷.htmll.

۱۸. Shalizi, C., Power law Distributions, ۱/f noise, long - Memory Time Series, ۲۰۰۷. Essay at (http://cscs.umich.

edu/~crshalizi/notebooks/powerlaws.htmll.

۱۹. برای مطالعه ارزیابی‌های این گونه ساز و کارها نگاه کنید به:

Mitzenmacher, M., A brief history of generative models for power law and lognormal distributions. Internet Mathematics, ۱ (۲l, ۲۰۰۳, pp. ۲۲۶ - ۲۵۱; Newman, M. E. J., Power laws, Pareto distributions and Zipf law.Contemporary Physics, ۴۶, ۲۰۰۵, pp. ۳۲۳ - ۳۵۱.

۲۰. درباره خرابی زنجیره‌ای و دلایل آن به گزارش مشروح زیر مراجعه کنید:

U.S.Canada Power System Outage Task Force Final

Report on the August ۱۴, ۲۰۰۳ Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations (https://reports. energy.gov/l.

۲۱.Schlossberg, D."lAX Computer Crash Strands International Passengers." ConsumerAffairs.com, August ۱۳, ۲۰۰۷, (http://www.consumeraffairs.com/news۰۸/۲۰۰۷/۰۴/lax co mputers.htmll; Schwartz, J., "Who Needs Hackers?" New York Times, September ۱۲, ۲۰۰۷.

۲۲. Government Accounting Office, long-Term Capital

Management: Regulators Need to Focus Greater Attention on Systemic Risk. Report to Congressional Request, ۱۹۹۹, (http:/www.gao.gov/cgi bin/getrpt?GGD-۰۰-۳l; Coy, P., Woolley, S.,

Spiro, l. N., and Glasgall, W., Failed wizards of Wall Street.

Business Week, September ۲۱, ۱۹۹۸.

۲۳. نقل قول از Andreas Antonopoulos در:

Schwartz, J., "Who Needs Hackers?" New York Times, September ۱۲, ۲۰۰۷.

۲۴. برای مطالعه مقدمه‌ای بر،SOC نگاه کنید به:

Bak, P., How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality. New York: Springer, ۱۹۹۶.

۲۵. برای مطالعه مقدمه‌ای بر،HOT نگاه کنید به:

Carlson, J. M. and Doyle, J., Complexity and robustness.

Proceedings of the National Academy of Science, USA ۹۹. ۲۰۰۲, pp. ۲۵۳۸ - ۲۵۴۵.

۲۶. Watts, D. J., Six Degrees: The Science of a Connected Age. New York:

W. W. Norton, ۲۰۰۳, p. ۱۶۱.

فصل هفدهم: راز میزان شدن

۱. فرض کنید V حجم را نشان می‌دهد، S سطح را نشان می‌دهد، و R شعاع را. V با r متناسب است، در نتیجه ریشه سوم V متناسب با شعاع است. سطح متناسب است با، r۲ در نتیجه با ریشه سوم،v یعنی با.۲ V. در این مثال، قانون توان به این صورت است:

metabolic rate o body mass.

۴۹۲ اگر از طرفین لگاریتم بگیریم، خواهیم داشت:

log(metabolic ratel ۴/۳ log(body massl.

که این معادله یک خط مستقیم با شیباست، اگر log(metabolic ratel را نسبت به log(body massl ترسیم کنیم، عملا همان منحنی شکل ۱۶.۲ به دست می‌آید.

۳. Grant, B., The powers that be. The Scientist, ۲۱ (۳l, ۲۰۰۷.

۴. نقل قول از G. B. West برگرفته است از:

Mackenzie, D., Biophysics: New clues to why size equals destiny. Science, ۲۸۴ (۵۴۲۰l, ۱۹۹۹, pp. ۱۶۰۷ - ۱۶۰۹.

۵. توضیحی فنی اما نه چندان دشوار از مدل میزان شدن سوخت و ساز در مقاله زیر آمده است:

West, G. B. and Brown, J. H., life universal scaling laws.

Physics Today, ۵۷ (۹l, ۲۰۰۴, pp. ۳۶ - ۴۳.

۶. West, G. B., Brown, J. H., and Enquist, B. J., The fourth dimension oflife: Fractal geometry and allometric scaling of organisms. Science, ۲۸۴, pp. ۱۶۷۷ - ۱۶۷۹.

۷. Grant, B., The powers that be. The Scientist, ۲۱ (۳l, ۲۰۰۷.

۸.Niklas, K. J., Size matters! Trends in Ecology and Evolution ۱۶ (۸l, ۲۰۰۱, p. ۴۶۸.

۹.West, G. B. and Brown, J. H., The origin of allometric scaling laws in biology from genomes to ecosystems: Towards a quantitative unifying theory of biological structure and organization. Journal of Experimental Biology ۲۰۸, ۲۰۰۵, pp.

۱۵۷۵ - ۱۵۹۲.

۱۰. مروری بر نقدهای وارده بر نظریه میزان شدن در مقاله زیر آمده است:

Agutter, P. S. and Wheatley, D. N., Metabolic scaling:

Consensus or Controversy? Theoretical Biology and Medical Modeling, ۱۸, ۲۰۰۴, pp. ۲۸۳ - ۲۸۹.

۱۱. نقل قول از H. Horn در مقاله زیر آمده است:

Whitfield, J., All creatures great and small. Nature, ۴۱۳, ۲۰۰۱, pp. ۳۴۲ - ۳۴۴.

۱۲. نقل قول از H. Miller-landau در مقاله زیر آمده است:

۱۳.Kozlowski, J. and Konarzweski, M., Is West, Brown and Enquist model of allometric scaling mathematically correct and biologically relevant? Functional Ecology, ۱۸, ۲۰۰۴, pp. ۲۸۳ - ۲۸۹.

Grant, B., The powers that be. The Scientist, ۲۱ (۳l, ۲۰۰۷.

۱۴. West, G. B., Brown, J. H., and Enquist, B. J., Yes, West, Brown and Enquist model of allometric scaling is both mathematically correct and biologically relevant. (Reply to Kozlowski and Konarzweski, ۲۰۰۴.l Functional Ecology, ۱۹, ۲۰۰۵, pp. ۷۳۵ -۷۳۸; Borrell, B., Metabolic theory spat heats up. The Scientist (Newsl, November ۸, ۲۰۰۷.

(http://www.the - scientist.com/news/display/۵۳۸۴۶/l.

۱۵. نقل قول از G. West در مقاله زیر آمده است:

Grant, B., The powers that be. The Scientist, ۲۱ (۳l, ۲۰۰۷.

۱۶. نقل قول از H. Miller-landau که در مقاله زیر آمده است:

Borrell, B., Metabolic theory spat heats up. The Scientist (Newsl, November ۸, ۲۰۰۷.

(http://www.the - scientist.com/news/display/۵۳۸۴۶/l.

۱۷. Willinger, W., Alderson, D., Doyle, J. C., and li, l.,

More than normal: Scaling distributions and complex systems. In R. G. Ingalls et al., Proceedings of the ۲۰۰۴ Winter Simulation Conference, pp. ۱۳۰-۱۴۱. Piscataway, NJ: IEEE Press, ۲۰۰۴.

۱۸. اثر اصلی Zipf در این مورد، کتاب زیر است:

Zipf, G. K., Selected Studies of the Principle of Relative Frequency in language.Cambridge, MA: Harvard University Press, ۱۹۳۲.

۱۹. Mandelbrot. B., An informational theory of the statistical structure of languages. In W.Jackson (editorl, Communication Theory, Woburn, MA: Butterworth, ۱۹۵۳, pp.

۴۸۶ - ۵۰۲.

۲۰. Simon, H. A., On a class of skew distribution functions.

"Biometrika ۴۲ (۳ - ۴l, ۱۹۵۵, p. ۴۲۵.

۲۱. Mitzenmacher, M., A brief history of generative models for power law and lognormal distributions. Internet Mathematics, ۱ (۲l, ۲۰۰۳, pp. ۲۲۶ - ۲۵۱.

۲۲. Miller, G. A., Some effects of intermittent silence. The American Journal of Psychology, ۷۰, ۱۹۵۷, pp. ۳۱۱ - ۳۱۴.

فصل هجدهم: تکامل به زبان پیچیده

۱. مقاله‌ای فنی درباره نقش عناصر متحرک ژنی در تنوع مغز:

Muotri, A. R., Chu, V. T., Marchetto, M. C. N., Deng, W., Moran, J. V. and Gage, F. H., Somatic mosaicism in neuronal precursor cells mediated by ۱ retrotransposition.Nature, ۴۳۵, ۲۰۰۵, pp. ۹۰۳ - ۹۱۰.

۲. گزارشی درباره این مطلب در مقاله زیر آمده است:

Pearson, H., What is a gene? Nature, ۴۴۱, ۲۰۰۶, pp. ۳۹۹ - ۴۰۱.

۳. Ibid.

۴.Dean, W., Santos, F., Stojkovic, M., Zakhartchenko, V., Walter, J., Wolf E., and Reik, W., Conservation of methylation reprogramming in mammaliandevelopment:

Aberrant reprogramming in cloned embryos.Proceedings of the National Academy of Science, USA, ۹۸ (۲۴l, ۲۰۰۱, pp. ۱۳۷۳۴ - ۱۳۷۳۸.

۵. Mattick, J. S., RNA regulation: A new genetics? Nature Reviews: Genetics, ۵, ۲۰۰۴, pp. ۳۱۶ -۳۲۳; Grosshans, H. and Filipowicz, W., The expanding world of small RNAs.Nature, ۴۵۱, ۲۰۰۸, pp. ۴۱۴ - ۴۱۶.

۶. برای مطالعه بحثی درباره تحقیقات و مناقشات در این موضوع نگاه کنید به:

Hiittenhofer, A., Scattner, P., and Polacek, N., Non-coding RNAs: Hope or Hype? Trends in Genetics, ۲۱ (۵l, ۲۰۰۵, pp. ۲۸۹ - ۲۹۷.

۷. Caruso, D., A challenge to gene theory, a tougher look at biotech. New York Times, July ۱, ۲۰۰۷.

۸. قانون ثبت اختراع ایالات متحده، که همان جا از آن نقل قول شده است.

۹. Ibid.

۱۰. تخمین‌های منتشر شده از همپوشانی DNA در میان انسان‌ها و موجودات مختلف تفاوت می‌کند. اما، به نظر می‌رسد "مشارکت ۹۰%" گفته چندان بیراهی نباشد.

۱۱.Carroll, S. B., Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo and the Making of the Animal Kingdom.

New York: W. W. Norton, ۲۰۰۵, p. ۷.

۱۲. In the video Gene Regulation; Science, ۳۱۹, no ۵۸۷۱, ۲۰۰۸.

۱۳. Yoon, C. K., From a few genes, lifes myriad shapes.

New York Times, June ۲۶, ۲۰۰۷.

۱۴. درباره این پژوهش در مقاله زیر توضیح داده شده است.

Travis, J., Eye-opening gene. Science News Online, May ۱۰, ۱۹۹۷.

۱۵. برای مطالعه توضیحاتی درباره این مناقشه نگاه کنید به:

Erwin, D. H., The developmental origins of animal bodyplans.

In S. Xiao and A. J.Kaufman (editorsl, Neoproterozoic

Geobiology and Paleobiology, New York: Springer, ۲۰۰۶, pp.

۱۵۹ - ۱۹۷.

۱۶. Horgan, J., From complexity to perplexity. Scientific American, ۲۷۲, June ۱۹۹۵, pp. ۷۴ - ۷۹.

۱۷.Kauffman, S.A., At Home in the Universe. New York:

Oxford University Press, ۱۹۹۵, p. ۲۶.

۱۸. Ibid, p. ۲۶.

۱۹. Ibid, p. ۲۵.

۲۰.Kauffman, S. J., Investigations. New York: Oxford

University Press, ۲۰۰۲, p. ۳.

۲۱. Kauffman, S. A., The Origins of Order. New York:

Oxford University Press, ۱۹۹۳.

۲۲. Burian, R. M. and Richardson, R. C., Form and order in evolutionary biology: Stuart Kauffman transformation of theoretical biology.In PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Vol. ۲:

Symposia and Invited Papers, ۱۹۹۰, pp. ۲۶۷ - ۲۸۷.

۲۳. Ibid.

۲۴.Bak, P., How NatureWorks: The Scienceof

Self-Organized Criticality. New York: Springer, ۱۹۹۶.

۲۵. Dover, G. A., On the edge, Nature, ۳۶۵, ۱۹۹۳, pp.

۷۰۴ - ۷۰۶.

۲۶. Ibid.

۲۷.Goodrich, C. S. and Matache, M. T., The stabilizing effect of noise on the dynamics of a Boolean network. Physica A, ۳۷۹ (۱l, ۲۰۰۷, pp. ۳۳۴ - ۳۵۶.

۲۸. Hoelzer, G., A., Smith, E., and Pepper, J. W., On the logical relationship

between natural selection and self- organization. Journal of Evolutionary Biology, ۱۹ (۶l, ۲۰۰۷, pp.

۱۷۸۵ - ۱۷۹۴.

۲۹. D. W. McShea از طریق ارتباط شخصی.

۳۰. D. W. McShea از طریق ارتباط شخصی.

بخش پنجم

۱. Millay, E. St. Vincent, Mine the Harvest: A Collection of New Poems. New York: Harper, ۱۹۴۹, p. ۱۳۰.

فصل نوزدهم: گذشته و آینده علوم پیچیدگی

۱. Horgan, J., From complexity to perplexity. Scientific American, ۲۷۲, June۱۹۹۵, pp. ۷۴ - ۷۹.

۲. Horgan, J., The End of Science: Facing the limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age. Reading, MA:
Addison - Wesley, ۱۹۹۶.

۳.Crutchfield, J. P., Farmer, J. D., Packard, N. H., and Shaw, R. S., Chaos. Scientific American, ۲۵۵, December۱۹۸۶.

۴. این نقل قول به طور معمول به اینشتین نسبت داده می‌شود. اما، به ظاهر عبارت‌بندی دوباره آراسته‌تری از آن حرفی است که در واقع زد: "عاشق شدن احمقانه‌ترین کاری نیست که آدم‌ها می کنند. اما نمی‌توانیم جاذبه را مسئول آن بدانیم." نقل قولی که در کتاب زیر آمده است:
Dukas, H. and Hoffmann B. (editorsl, Albert Einstein, The Human Side: New Glimpses from His Archives. Princeton, NJ: Princeton University Press, ۱۹۷۹, p. ۵۶.

۵.Gordon, D. M., Control without hierarchy. Nature, ۴۴۶ (۷۱۳۲l, ۲۰۰۷, p. ۱۴۳.

۶. تاریخچه‌های جذابی از علم سایبر را می‌توانید در کتاب‌های زیر بیابید:
Aspray, W., John von Neumann and the Origins of Modern Computing. Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۹۰; Heims, S. The Cybernetics Group. Cambridge, MIT Press, ۱۹۹۱.

۷. Wiener, N.Cybernetics.Cambridge, MA: MIT Press,
۱۹۴۸, p. ۱۱.

۸. Ashby, R. H., Design for a Brain. New York: Wiley,
۱۹۵۴.

۹. McCulloch, W. and Pitts, W., A logical calculus of ideas immanent in nervous activity.Bulletin of Mathematical Biophysics ۵, ۱۹۴۲, pp. ۱۱۵ - ۱۳۳.

۱۰. Bateson, G., Mind and Nature: A Necessary Unity.
Cresskill, NJ: Hampton Press, ۱۹۷۹.

۱.Wiener,NCybernetics:thControland Communication in the Animal and the Machine.Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۴۸; Wiener, N. The Human Use of Human Beings. Boston: Houghton Mifflin, ۱۹۵۰.

۱۲. نقل قول Gregory Bateson برگرفته از:

Heims, S., The Cybernetics Group. Cambridge: MIT Press, ۱۹۹۱, P. ۹۶.

۱۳. نقل قول Max Delbrick برگرفته از:

Heims, S., The Cybernetics Group. Cambridge: MIT Press, ۱۹۹۱, p. ۹۵.

۱۴. نقل قولی از leonard Savage که در متن زیر آمده:

Heims, S., The Cybernetics Group, ۱۹۹۱, p. ۹۶.

۱۵. Aspray, W., John von Neumann and the Origins of ModernComputing. Cambridge: MIT Press, pp.

۲۰۹ - ۲۱۰.

۱۶. Von Bertalanffy, l, General System Theory:

Foundations, Development, Applications, New York: G.

Braziller, ۱۹۶۹; Rapoport, A. General System Theory: Essential Concepts and Applications, Cambridge, MA: Abacus Press, ۱۹۸۶.

۱۷. Von Bertalanffy, l., An outline of general system theory. The British Journal for the Philosophy of Science, ۱ (۹۲l, ۱۹۵۰, pp. ۱۳۴ - ۱۶۵.

۱۸. Maturana, H. R. and Varela, F. J., Autopoiesis and Cognition: The Realization of the living. Boston, MA: D.

Reidel Publishing Co., ۱۹۸۰.

۱۹. Haken, H., The Science of Structure: Synergetics, New York: Van Nostrand Reinhold, ۱۹۸۴; Prigogine, I. From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences, San Francisco: W. H. Freeman, ۱۹۸۰.

۲۰. Nicolis, G. and Prigogine, I., Exploring Complexity, New York: W. H. Freeman and Co., ۱۹۸۹, p. x.

۲۱. Strogatz, S., Sync: How Order Emerges from Chaos in the Universe, Nature, and Daily life. New York: Hyperion, ۲۰۰۴, p. ۲۸۷.

۲۲. Gleick, J., Isaac Newton, New York: Pantheon Books, ۲۰۰۳, pp. ۵۸ - ۵۹.

۲۳. Bak, P., How NatureWorks: The Scienceof

Self-Organized Criticality. New York: Copernicus, ۱۹۹۶.

۲۴. Crutchfield, J. P., The calculi of emergence. Physica D, ۷۵, ۱۹۹۴, ۱۱ - ۵۴.

۲۵. این نقل قول مشهور، "برای سادگی در این طرف پیچیدگی پشیزی ارزش قائل نیستم، اما

برای سادگی در طرف دیگر پیچیدگی جانم را می‌دهم" به طور معمول به Oliver Wendell Holmes نسبت داده می‌شود، اما من نتوانستم منبع این گفته را پیدا کنم. در مواردی دیده‌ام که این گفته به شاعر Gerald yelnaM snikpoH نسبت داده می‌شود.

۲۶. نگاه کنید به:

Gide, A., The Counterfeiters.

York: Vintage, ۱۹۷۳, p. ۳۵۳.

Translated by D. Bussy.New

مشخصات متن اصلی فرانسوی:

Paris: librairie Gallimard, Journaldes Faux-Monnayeurs. ۱۹۲۷.

کتابشناسی

Achacoso, T. B. and Yamamoto, W. S. AYs Neuroanatomy of C.Elegans for Computation. Boca Raton, Fl: CRC Press, ۱۹۹۱.

Adami, C. Introduction to Artificial life, Springer, ۱۹۹۸.

Agutter P. S and Wheatley D.N.Metabolic scaling: Consensus Controversy TheoreticalBiologyand Medical Modeling, ۱۸, ۲۰۰۴, pp. ۲۸۳ - ۲۸۹.

Albert, R. and Barabasi, A.l. Statistical mechanics of complex networks. Reviews of Modern Physics, ۷۴, ۲۰۰۲, pp. ۴۸ - ۹۷.

Ashby, H. R. Design for a Brain. New York: Wiley, ۱۹۵۴.

Aspray, W. John von Neumann and the Origins of Modern Computing. Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۹۰.

Aubin, D. and Dalmedico, A. D. Writing the history of dynamical systems and chaos:longDurand revolution, disciplines, and cultures. Historia Mathematica ۲۹, ۲۰۰۲, pp. ۲۷۳ - ۳۳۹.

Axelrod, R. The Evolution of Cooperation. New York: Basic Books, ۱۹۸۴.

An evolutionary approach to norms.American Political Science Review, ۸۰ (۴l, ۱۹۸۶, pp. ۱۰۹۵ -۱۱۱۱.

Advancing the art of simulation in the social sciences.

In Conte, R., Hegselmann, R., Terna, P. (editorsl.

SimulatingPhenomena.in Economics and Mathematical Systems۵۶lBerlin: Springer-Verlag, ۱۹۹۷.

Bak, P. How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality. New York: Springer, ۱۹۹۶.

Barabasi, A.l.linked: The New Science of Networks.

Cambridge, MA: Perseus, ۲۰۰۲.

Barabasi, A.-l. and Albert, R. Emergence of scaling in random networks. Science, ۲۸۶, ۱۹۹۹, pp. ۵۰۹ - ۵۱۲.

Barabasi,Networkbiology: Understanding the cells functional organization.Nature

Reviews: Genetics, ۵, ۲۰۰۴, pp. ۱۰۱ - ۱۱۳.

Barrett, P. (editorl. Charles Darwins Notebooks, ۱۸۳۶-۱۸۴۴:

Geology, Transmutaiton of Species, Metaphysical Enquiries.

Ithaca, NY: Cornell University Press, ۱۹۸۷.

Bassett, D. S. and Bullmore, D. Small-world brain networks.

The Neuroscientist, ۱۲, ۲۰۰۶, pp. ۵۱۲ - ۵۲۳.

Bateson, G. H. Mind and Nature: A Necessary Unity. Skokie, Il: Hampton

Press, ۱۹۷۹.

Beinhocker,..TheOriginofWealth:Evolution,

Complexity, and the Radical Remaking of Economics.

Cambridge, MA: Harvard Business School Press. ۲۰۰۶.

Bennett, C.H.The thermodynamics of computation a review. International Journal of Theoretical Physics, ۲۱, ۱۹۸۲, pp. ۹۰۵ - ۹۴۰.

Dissipation, information, computational complexity and the definition of organization. In Pines, D. (editorl, Emerging Syntheses in Science. Redwood City, CA: Addison Wesley, ۱۹۸۵, pp. ۲۱۵ - ۲۳۳.

How to define complexity in physics, and why. In W.

H. Zurek (editorl, Complexity, Entropy, and the Physics of Information.

Reading, MA: Addison-Wesley, ۱۹۹۰, pp.

۱۳۷ - ۱۴۸.

Berlekamp, E., Conway, J. H., and Guy, R. Winning Ways for Your Mathematical Plays, volume ۲. San Diego, CA: Academic Press, ۱۹۸۲.

Bickhard, M. H. The biological foundations of cognitive science. In Mind ۴: Proceedings of the ۴th Annual Meeting of the Cognitive Science Society of Ireland. Dublin, Ireland:

J. Benjamins, ۱۹۹۹.

Bolton, R. J. and Hand, D. J. Statistical fraud detection: A review. Statistical Science, ۱۷ (۳l, ۲۰۰۲, pp. ۲۳۵ - ۲۵۵.

Bonabeauidistributed autonomous systems: Insights from social insects.

In l. A.

Segel and I. R. Cohen (editorsl, Design Principles for the

ImmuneSystemantherDistributedAutonomous Systems. New York: Oxford Universtiy Press, ۲۰۰۱.

Bonabeau, E., Dorigo, M., and Theraulaz, G., Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. New York: Oxford University Press, ۱۹۹۹.

Borrell, B. Metabolic theory spat heats up. The Scientist (Newsl, November ۸, ۲۰۰۷.

(http://www.the-scientist.com/news/display/۵۳۸۴۶/l.

Bovill, C. Fractal Geometry in Architecture and Design. Boston: Birkhauser. ۱۹۹۶.

Bowker, J. (editorl. The Cambridge Illustrated History of Religions.Cambridge, UK: Cambridge University Press, ۲۰۰۲.

Bowlby, J. Charles Darwin: A New life. New York: Norton, ۱۹۹۲.

Box, G. E. P. and Draper, N. R. Empirical Model Building and Response Surfaces. New York: Wiley, ۱۹۹۷.

Burgard, A. P., Nikolaev, E. V., Schilling, C. H., and Maranas, C. D. Flux coupling analysis of genome scale metabolic network reconstructions. Genome Research, ۱۴, ۲۰۰۴, pp.

۳۰۱ - ۳۱۲.

Burian, R. M. and Richardson, R. C. Form and order in evolutionary biology: Stuart Kauffman transformation of theoretical biology. In PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Vol. ۲:

Symposia and Invited Papers, ۱۹۹۰, ۲۶۷ - ۲۸۷.

Burkhardt, F. and Smith, S. (editorsl.The Correspondence of Charles Darwin, Volume ۱. Cambridge, UK: Cambridge University Press, ۱۹۸۵.

Burks, A. W. Von Neumann self-reproducing automata.In A.W.Burks (editorl, Essays on Cellular Automata.

Urbana: University of Illinois Press, ۱۹۷۰.

Calvino, I.Invisible Cities.New York: Harcourt Brace Jovanovich, ۱۹۷۴.

(Translated by W. Weaver.l Carlson, J. M. and Doyle, J. Complexity and robustness.

Proceedings of the National Academy of Science, USA ۹۹, ۲۰۰۲, pp. ۲۵۳۸ - ۲۵۴۵.

Carroll, S. B. Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo and the Making of the Animal Kingdom. New York: Norton, ۲۰۰۵.

Caruso, D. A challenge to gene theory, a tougher look at biotech. New York Times, July ۱, ۲۰۰۷.

Churchland, P. S., Koch, C., and Sejnowski, T. J. What is computational neuroscience? In E. l. Schwartz (editorl, Computational Neuroscience. Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۹۴, pp. ۴۶ - ۵۵.

Clauset, A. Shalizi, C. R., and Newman, M. E. J. Power law distributions in empirical data. Preprint, ۲۰۰۷, (http://arxiv.org/abs/۰۷۰۶.۱۰۶۲l.

Coale, K. Darwin in a box. Wired, June ۱۴, ۱۹۹۷.

Cochrane, E.Viva lamarck: A brief history of the inheritance of acquired characteristics. Aeon ۲ (۲l, ۱۹۹۷, ۵ - ۳۹.

Cohen, I. Informational landscapes in art, science, and evolution. Bulletin of Mathematical Biology, ۶۸, ۲۰۰۶, pp.

۱۲۱۳ - ۱۲۲۹.

Immune system computation and the immunological homunculus. In O. Niestrasz, J. Whittle, D. Harel, and G.

Reggio (editorsl,MoDElS ۲۰۰۶,lectureNotesin Computer Science, ۴۱۹۹, ۲۰۰۶, pp. ۴۹۹-۵۱۲.Berlin:

Springer-Verlag.

Cohen, R., ben-Avraham, D., and Havlin, S.Efficient immunization strategies for computerkand populations. Physics Review letters, ۹۱ (۲۴l, ۲۰۰۳, p.

۲۴۷۹۰۱.

Connell, J. H. Minimalist Mobile Robotics: A Colony-Style Architecture for an Artificial Creature. San Diego, CA:

Academic Press, ۱۹۹۰.

Cook, M.Universality in elementary cellular automata.

Complex Systems ۱۵ (۱l, ۲۰۰۴, pp. ۱ - ۴۰.

Coullet, P. and Tresser, C. Iterations d'endomorphismes et groupe de renormalization. Comptes Rendues de Academie des Sciences, Paris A, ۲۸۷,۱۹۷۸, pp. ۵۷۷ - ۵۸۰.

Coy, P., Woolley, S., Spiro, l. N., and Glasgall, W. Failed wizards of Wall Street, Business Week, September ۲۱,۱۹۹۸.

Crutchfield, J. P. The calculi of emergence. Physica D, ۷۵,۱۹۹۴,۱۱ - ۵۴.

Crutchfield, J. P., Farmer, J. D., Packard, N. H., and Shaw, R.

S. Chaos. Scientific American, ۲۵۵, December۱۹۸۶.

Crutchfield, J. P., and Hanson, J. E. Turbulent pattern bases for cellular automata. Physica D ۶۹,۱۹۹۳, pp. ۲۷۹ - ۳۰۱.

Crutchfield, J. P., Mitchell, M., and Das, R. Evolutionary design of collective computation in cellular automata. In J.

P. Crutchfield and P. K. Schuster (editorsl, Evolutionary Dynamics - Exploring the Interplay of Selection, Neutrality, Accident, and Function. New York: Oxford University Press, ۲۰۰۳, pp. ۳۶۱ - ۴۱۱.

Crutchfield, J. P. and Shalizi, C. R. Thermodynamic depth of causal states: When paddling around in Occam pool shallowness is a virtue. Physical Review E, ۵۹ (۱l,۱۹۹۹, pp. ۲۷۵ - ۲۸۳.

Crutchfield, J. P. and Young, K.Inferring statistical

complexity. Physical Review letters ۶۳,۱۹۸۹, pp. ۱۰۵ - ۱۰۸.

Cupitt, R. T. Target rogue behavior, not rogue states. The Nonproliferation Review, ۳,۱۹۹۶, pp. ۴۶ - ۵۴.

Cupitt, R. T. and Grillot, S.R. COCOM is dead, long live COCOM: Persistence and change in multilateral security institutions. British Journal of Political Science ۲۷,۱۹۹۷, pp.

۳۶۱ - ۳۸۹.

Darwin, C. The Autobiography of Charles Darwin.lanham, ۲۰۰۵.Originally MD:Noble Publishing, published ۱۸۸۷.

Darwin, C. and Barlow, N. D. The Autobiography of Charles Darwin (Reissue editionl.New York: Norton.۱۹۹۳.

(Originally published ۱۹۵۸l.

Darwin, E. The Temple of Nature; or, The Origin of Society: A Poem with Philosophical Notes. london: J. Johnson, ۱۸۰۳.

Dawkins, R. The Extended Phenotype (Reprint editionl.New York: Oxford University Press, ۱۹۸۹. (Originally published ۱۹۸۲.l

Dean, W., Santos, F., Stojkovic, M., Zakhartchenko, V., Walter, J., Wolf, E., and Reik, W. Conservation of methylation reprogramming in mammalian development: Aberrant reprogramming in cloned embryos.Proceedings of the National Academy of Science, USA, ۹۸ (۲۴l, ۲۰۰۱, pp. ۱۳۷۳۴-۱۳۷۳۸.

Dennett, D. R. Elbow Room: The Varieties of Free Will Worth Wanting. Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۸۴.

Consciousness Explained. Boston: little, Brown & Co, ۱۹۹۱.

Darwins Dangerous Idea. New York: Simon & Schuster, ۱۹۹۵.

Descartes, R. A Discourse on the Method. Translated by Ian World Classics,Oxford Maclean.london: Oxford University Press, ۲۰۰۶ (۱۶۳۷l.

Dietrich, M. R. The origins of the neutral theory of molecular evolution. Journal of the History of Biology, ۲۷ (۱l, ۱۹۹۴, pp. ۲۱ - ۵۹.

Dorigo, M. and Stitzle, T. Ant Colony Optimization, MIT Press, ۲۰۰۴.

Dover, G. A. On the edge. Nature, ۳۶۵, ۱۹۹۳, pp. ۷۰۴ - ۷۰۶.

Dukas, H. and Hoffmann B. (editorsl, Albert Einstein, The Human Side: New Glimpses from His Archives. Princeton University Press, ۱۹۷۹.

Dunne, J. A. The network structure of food webs. In M. Pascual and J. A. Dunne (editorsl, Ecological Networks: linking Structure to Dynamics in Food Webs.New York: Oxford University Press, ۲۰۰۶, pp. ۲۷ - ۸۶.

Dunne, J. A. Williams, R. J. and Martinez, N. D. Food web structure and network theory: The role of connectance and size. Proceedings of the National Academy of Science, USA, ۹۹ (۲۰l, ۲۰۰۲, pp. ۱۲۹۱۷ - ۱۲۹۲۲.

Eddington, A. E. The Nature of the Physical World. New York: Macmillan, ۱۹۲۸.

Eigen, M. How does information originate? Principles of biological self-organization. In S. A. Rice (editorl, For Ilya Prigogine. New York: Wiley ۱۹۷۸, pp. ۲۱۱ - ۲۶۲.

Steps Towards life. Oxford: Oxford University Press, ۱۹۹۲.

Einstein, A.Out of My later Years (revised editionl. Castle Books, ۲۰۰۵ (originally published ۱۹۵۰, New York: Philosophical Books.l Eldredge, N. and Tattersall, I. The Myths of Human Evolution.

New York: Columbia University Press, ۱۹۸۲.

Erwin, D. H. The developmental origins of animal bodyplans. In S. Xiao and A. J.Kaufman (editorsl, Neoproterozoic Geobiology and Paleobiology. New York: Springer, ۲۰۰۶, pp. ۱۵۹ - ۱۹۷.

Everdell, W. R. The First Moderns: Profiles in the Origins of Twentieth-Century Thought.Chicago, Il: University of Chicago Press, ۱۹۹۸.

@degar_goonesh

Feigenbaum, M. J. Universal behavior in nonlinear systems.

los Alamos Science, ۱ (۱l, ۱۹۸۰, pp. ۴ - ۲۷.

Fell, D. A. and Wagner, A. The small world of metabolism.

Nature Biotechnology, ۱۸, ۲۰۰۰, pp. ۱۱۲۱ - ۱۱۲۲.

Felton, M. J. Survival of the fittest in drug design. Modern Drug_Discovery, ۳ (۹l, ۲۰۰۰, pp. ۴۹ - ۵۰.

Floridi, l., Open problems in the philosophy of information.

Metaphilosophy, ۳۵ (۴l, ۲۰۰۴, pp. ۵۵۴ - ۵۸۲.

Fogel, D. B.Evolutionary Computation: The Fossil Record.

New York: Wiley IEEE Press, ۱۹۹۸.

Forrest, S.Emergent Computation.Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۹۱.

Franks, N. R. Army ants: A collective intelligence. American Scientist, ۷۷ (۲l ۱۹۸۹, pp. ۱۳۸ - ۱۴۵.

Freud, S. Moses and Monotheism. New York: Vintage Books, ۱۹۳۹.

Friedheim, R. l. Ocean governance at the millennium:

Where we have been, where we should go: Cooperation and discord in the world economy. Ocean and Coastal Management, ۴۲ (۹l, pp. ۷۴۷ - ۷۶۵, ۱۹۹۹.

Fry, I. The Emergence of life on Earth: A Historical and Scientific Overview. Piscataway, NJ: Rutgers University Press, ۲۰۰۰.

Galan, J. M. and Izquierdo, l. R. Appearances can be deceiving: lessons learned re-implementing Axelrod Evolutionary Approaches to Norms." Journal of Artificial Societies and Social Simulation, ۸ (۳l, ۲۰۰۵, (http://jasss.

soc.surrey.ac.uk/۲/۳/۸.htmll.

Garber,.Descartes mechanics, and the mechanical philosophy. Midwest Studies in Philosophy ۲۶ (۱l, ۲۰۰۲, pp. ۱۸۵ - ۲۰۴.

Gell-Mann, M. The Quark and the Jaguar.New York:

Freeman, ۱۹۹۴.

What is complexity? Complexity, ۱ (۱l, ۱۹۹۵, pp. ۱۶ - ۱۹.

Gide, A. The Counterfeiters. Translated by D. Bussy.New York: Vintage,

۱۹۷۳, p.۳۵.Original:Joualdes Faux-Monnayeurs, librairie Gallimard, Paris,۱۹۲۷.

Gladwell, M. The Tipping Point: How little Things Can Make a Big Difference. Boston: little, Brown, ۲۰۰۰.

Gleick, J. Chaos: Making a New Science. New York: Viking, ۱۹۸۷.

Isaac Newton, New York: Pantheon Books, ۲۰۰۳.

Goldstine, H. H. The Computer, from Pascal to von Neumann.

Princeton, NJ: Princeton University Press, ۱۹۹۳.First

edition, ۱۹۷۲.

Goodrich, C. S. and Matache, M. T. The stabilizing effect of noise on the dynamics of a Boolean network, Physica A, ۳۷۹ (۱l, ۲۰۰۷, pp. ۳۳۴ - ۳۵۶.

Gordon, D. M. Task allocation in ant colonies. In l. A. Segel and I. R. Cohen (editorsl, Design Principles for the Immune System and Other Distributed Autonomous Systems. New York: Oxford University Press, ۲۰۰۱. p.۱۴۳.

Control without hierarchy. Nature, ۴۴۶ (۷۱۳۲l, ۲۰۰۷, Gould, S. J. Is a new and general theory of evolution emerging? Paleobiology, ۶, ۱۹۸۰, pp. ۱۱۹ - ۱۳۰.

Sociobiology and the theory of natural selection. In G. W. Barlow and J. Silverberg (editorsl, Sociobiology:

Beyond Nature/Nurture?, pp. ۲۵۷ -۲۶۹.Boulder, CO:

Westview Press Inc. ۱۹۸۰.

Government.long-Ter,Capital Management: Regulators Need to Focus Greater Attention on Systemic Risk. Report to Congressional Request, ۱۹۹۹ (http://www.gao.gov/cgi-bin/getrpt?GGD-۰۰-۳l.

Grant, B. The powers that be. The Scientist, ۲۱ (۳l, ۲۰۰۷.

Grant, M. and Depew, D., The Philosophy of Biology: An Episodic History.

Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, ۲۰۰۴.

Grinnell, G. J. The rise and fall of Darwin second theory.

Journal of the History of Biology, ۱۸ (۱l, ۱۹۸۵, pp. ۵۱ - ۷۰.

Grosshans, H. and Filipowicz, W. The expanding world of small RNAs.

Nature, ۴۵۱, ۲۰۰۸, pp. ۴۱۴ - ۴۱۶.

Hales, D. and Arteconi, S. SlACER: A Self-Organizing Protocol for Coordination in PeertoPeer Networks.

IEEE Intelligent Systems, ۲۱ (۲l, ۲۰۰۶, pp. ۲۹ - ۳۵.

Hardin, G. The tragedy of the commons. Science, ۱۶۲, ۱۹۶۸, pp. ۱۲۴۳ - ۱۲۴۸.

Heims, S. The Cybernetics Group. Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۹۱.

Heims, S. J. John von Neumann and Norbert Wiener: From Mathematics to the Technologies of life and Death.

Cambridge: MIT: Press, ۱۹۸۰.

U.K:Cambridge Hobbes,leviathan.Cambridge, University Press,

(۱۹۹۱/۱۶۵۱l.

Hodges, A. Alan Turing: The Enigma. New York: Simon & Schuster, ۱۹۸۳.

Hoelzer, G. A., Smith, E., and Pepper, J. W., On the logical relationshipself-organization. Journal of Evolutionary Biology, ۱۹ (۶l, ۲۰۰۷, pp. ۱۷۸۵ - ۱۷۹۴.

Hofmeyr, S. A. An interpretive introduction to the immune system. In l. A. Segel and I. R. Cohen (editorsl, Design Principles for the Immune System and Other Distributed Autonomous Systems. New York: Oxford University Press, ۲۰۰۱.

Hofmeyr, S. A. and Forrest, S. Architecture for an artificial immune system. Evolutionary Computation, ۸ (۴l, ۲۰۰۰, pp. ۴۴۳ - ۴۷۳.

Hofstadter, D. R., Godel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid. New York: Basic Books, ۱۹۷۹.

Mathematical chaos and strange attractors. Chapter ۱۶ in Metamagical Themas. New York: Basic Books, ۱۹۸۵.

The Genetic Code: Arbitray? Chapter ۲۷ in Fluid Concepts and Creative Analogies. New York:

Metamagical Themas. New York, Basic Books, ۱۹۸۵.

Basic Books, ۱۹۹۵.

I am a Strange loop. New York: Basic Books, ۲۰۰۷.

Hofstadter, D. R. and Mitchell, M. The Copycat project: A model of mental fluidity and analogy -making.In K.

HolyoakriAdvancesin Connectionist and Neural Computation Theory, Volume ۲:

Analogical Connections, ۱۹۹۴, pp. ۳۱ - ۱۱۲.

Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems.

Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۹۲. (First edition, ۱۹۷۵l.

Emergence: From Chaos to Order.Perseus Books, ۱۹۹۸.

Holldobler, B. and Wilson, E. O. The Ants. Cambridge, MA:

Belknap Press, ۱۹۹۰.

Holtham, C. Fear and opportunity. Information Age, July ۱۱, ۲۰۰. (http://www.information age.com/article/۲۰۰۶/febru ary/fear and opportunityl.

Horgan, J. From complexity to perplexity. Scientific American, ۲۷۲, June ۱۹۹۵, pp. ۷۴ - ۷۹.

The End of Science: Facing the limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age.Reading, MA:

Addison - Wesley, ۱۹۹۶.

Huberman, B. A. and Glance, N. S. Evolutionary games and computer simulation.ProceedingstheNational Academy of Science, USA, ۹۰, ۱۹۹۳, pp. ۷۷۱۶ - ۷۷۱۸.

Hiittenhofer, A., Scattner, P., and Polacek, N. Non-coding RNAs: Hope or Hype? Trends in Genetics, ۲۱ (۵l, ۲۰۰۵, pp. ۲۸۹ - ۲۹۷.

Huxley, J. Evolution: The Modern Synthesis.New York, london: Harper & Brothers, ۱۹۴۲.

Jeong, H., Tombor, B., Albert, R., Oltvai, Z. N., and Barbasi, A.l. The large-scale organization of metabolic networks.

Nature, ۴۰۷, ۲۰۰۰, pp. ۶۵۱ - ۶۵۴.

Joy, B. Why the future doesnt need us. Wired, April ۲۰۰۰.

Kadanoff, leo P. Chaos: A view of complexity in the physical sciences. In From Order to Chaos: Essays: Critical, Chaotic, and Otherwise. Singapore: World Scientific, ۱۹۹۳.

Kauffman, S. A. The Origins of Order. New York: Oxford University Press,

۱۹۹۳.

At Home in the Universe. New York: 0xford University Press, ۱۹۹۵.

۲۰۰۲.

Investigations. New York: 0xford University Press,

Keller, E. F. Revisiting 'scale free networks.BioEssays, ۲۷, ۲۰۰۵, pp. ۱۰۶۰ - ۱۰۶۸.

Kleinfeld, J. S. Could it be a big world after all? The "six degrees of separation" myth. Society, ۳۹, ۲۰۰۲.

Six degrees: Urban myth? Psychology Today, ۷۴, March/April ۲۰۰۲.

Kollock, P. The production of trust in online markets. In E. J.

lawler, M. Macy, S. Thyne, and H. A. Walker (editorsl, Advances in Group Processes, ۱۶, Greenwich, CT: JAI Press, ۱۹۹۹.

Kozlowski, J. and Konarzweski, M. Is West, Brown and Enquist model of allometric scaling mathematically correct and biologically relevant? Functional Ecology, ۱۸, ۲۰۰۴, pp. ۲۸۳ - ۲۸۹.

Kubrin, D. Newton and the cyclical cosmos: Providence and the mechanical philosophy. Journal of the History of Ideas, ۲۸ (۳l, ۱۹۶۷.

Kurzweil, R. The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence. New York: Viking, ۱۹۹۹.

langton, C. G. Artificial life: An Overview. Cambridge, MA: MIT Press, ۱۹۹۷.

laplace, P. S. Essai Philosophique Sur les Probabilites.Paris:

Courcier, ۱۸۱۴.

lee, B. and Ajjarapu, V. Period doubling route to chaos in an electrical power system. IEE Proceedings, Part C, ۱۴۰, ۱۹۹۳, pp. ۴۹۰ - ۴۹۶.

leff, H. S. and Rex, A. F. Maxwell Demon: Entropy, Information,Computing.Princeton

University Press. Second edition ۲۰۰۳, Institute of Physics Pub., ۱۹۹۰.

leibniz, G. In C. Gerhardt (Ed.l, Die Philosophischen Schriften von Gottfried Wilhelm leibniz. Volume vii. Berlin: Olms, ۱۸۹۰.

lesley, R. Xu, Y., Kalled, S. l., Hess, D. M., Schwab, S.R., Shu, H. -B., and Cyster, J. G. Reduced competitiveness of autoantigen engaged B cells due to increased dependence on BAFF. Immunity, ۲۰ (۴l, ۲۰۰۴, pp. ۴۴۱ -۴۵۳.

levy, S. The man who cracked the code to everything. Wired, Issue ۱۰.۰۶, June ۲۰۰۲.

lewin, R. Complexity: life at the Edge of Chaos.New York: Macmillan, ۱۹۹۲.

li, M. and Vitanyi, P.An Introduction to Kolmogorov

Complexity and Its Applications. ۲nd Edition. New York:

Springer-Verlag, ۱۹۹۷.

li, T. Y. and Yorke, J. A. Period three implies chaos.

American Mathematical Monthly ۸۲, ۱۹۷۵, p. ۹۸۵.

liebreich, M. How to Save the Planet: Be Nice, Retaliatory, Forgiving, & Clear. White Paper, New Energy Finance, ltd., ۲۰۰۷ (http://www.newenergyfinance.com/docs/Press/ NEF WP Carbon GameTheory ۰۵.pdfl.

liljeros, F., Edling, C. R., Nunes Amaral, l. A., Stanely, H. E., and Aberg, Y. The web of human sexual contacts.

Nature, ۴۴۱, ۲۰۰۱, pp. ۹۰۷ - ۹۰۸.

lioni, A., Sauwens, C., Theraulaz, G., and Deneubourg, J.-l.

Chain formation in OEcophylla longinoda. Journal of Insect Behavior, ۱۴ (۵l, ۲۰۰۱, pp. ۶۷۹ - ۶۹۶.

liu, H. A brief history of the concept of chaos, ۱۹۹۹ (http://members.tripod.com/~huajie/Paper/chaos.html.

lloyd, S. The calculus of intricacy. The Sciences, ۳۰, ۱۹۹۰, pp. ۳۸ - ۴۴.

Measures of complexity: A non-exhaustive list.IEEE Control Systems Magazine, August ۲۰۰۱.

lloyd, S. and Pagels, H. Complexity as thermodynamic depth.

Annals of Physics, ۱۸۸, ۱۹۸۸, pp. ۱۸۶ - ۲۱۳.

locke, J. An Essay concerning Human Understanding.Edited by P. H. Nidditch. Oxford: Clarendon Press, ۱۹۷۵/۱۶۹۰.

lohr, S. This boring headline is written for Google. New York Times, April ۹, ۲۰۰۶.

lorenz, E.N.Deterministic nonperiodic flow.Journal of Atmospheric Science, ۳۵۷, ۱۹۶۳, pp. ۱۳۰ - ۱۴۱.

lovelock, J. E. The Ages of Gaia. New York: Norton, ۱۹۸۸.

luisi, P. l. The Emergence of life: from Chemical Origins to Synthetic Biology. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, ۲۰۰۶.

Mackenzie, D. Biophysics: New clues to why size equals destiny. Science, ۲۸۴ (۵۴۲۰l, ۱۹۹۹, pp. ۱۶۰۷ - ۱۶۰۹.

Macrae, N. John von Neumann. New York: Pantheon Books, ۱۹۹۲.

Maddox, J. Slamming the door. Nature, ۴۱۷, ۲۰۰۷, p. ۹۰۳.

Malone, M. S. God, Stephen Wolfram, and everything else.

Forbes ASAP, November ۲۷, ۲۰۰۰.

(http://members.forbes.com/asap/۱۶۲/۱۱۲۷/۲۰۰۰.htmll.

Mandelbrot. B. An informational theory of the statistical tructure.Jackson(editorl, Communication Theory, Woburn, MA: Butterworth, ۱۹۵۳, pp. ۴۸۶ - ۵۰۲.

Mandelbrot, B. B. The Fractal Geometry of Nature. New York: W.H. Freeman, ۱۹۷۷.

Markoff, J. Brainy robots start stepping into daily life, New York Times, July ۱۸, ۲۰۰۶.

Marr, D. Vision. San Francisco: Freeman, ۱۹۸۲.

Mattick, J. S. RNA regulation: A new genetics Nature Reviews: Genetics, ۵, ۲۰۰۴, pp. ۳۱۶ - ۳۲۳.

Maturana, H. R. and Varela, F. J. Autopoiesis and Cognition: The Realization of the living, Boston: D. Reidel Publishing Co., ۱۹۸۰.

Maxwell, J. C. Theory of Heat. london: longmans, Green and Co, ۱۸۷۱.

May,R.M.Simple mathematical models with very complicated dynamics. Nature, ۲۶۱, ۱۹۷۶, ۴۵۹ - ۴۶۷.

Mayr, E. An overview of current evolutionary biology. In New Perspectives on Evolution, ۱۹۹۱, pp. ۱ - ۱۴.

McAllister, J. W. Effective complexity as a measure of information content. Philosophy of Science ۷۰, ۲۰۰۳, pp. ۳۰۲ - ۳۰۷.

McClamrock, R. Marr three levels: A re-evaluation. Minds and_Machines, ۱ (۲l, ۱۹۹۱, pp. ۱۸۵ - ۱۹۶.

McCulloch, W. and Pitts, W. A logical calculus of ideas immanent in nervous activity.Bulletin of Mathematical Biophysics ۵, ۱۹۴۲, pp. ۱۱۵ - ۱۳۳.

McShea, D. W. The hierarchical structure of organisms: A scale and documentation of a trend in the maximum.

Paleobiology, ۲۷ (۲l, ۲۰۰۱, pp. ۴۰۵ - ۴۲۳.

Metropolis, N., Stein, M. l., and Stein, P. R. On finite limit sets for transformations on the unit interval. Journal of Combinatorial Theory, ۱۵ (Al, ۱۹۷۳, pp. ۲۵ - ۴۴.

Milgram, S. The small-world problem. Psychology Today ۱, ۱۹۶۷, pp. ۶۱ - ۶۷.

Millay, E. St. Vincent. Mine the Harvest: A Collection of New Poems.New York: Harper, ۱۹۴۹.

Miller, G.A. Some effects of intermittent silence.The American Journal of Psychology, ۷۰, ۱۹۵۷, pp. ۳۱۱ - ۳۱۴.

Millonas, M. M. The importance of being noisy.Bulletin of the Santa Fe Institute, Summer, ۱۹۹۴.

Minsky, M. The Society of Mind, Simon & Schuster, ۱۹۸۷.

Mitchell, M. Computation in cellular automata: A selected review.In T.Grams alditorslNonstandard

Computation. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, ۱۹۹۸, pp. ۹۵ - ۱۴۰.

Analogy-Making as Perception, MIT Press, ۱۹۹۳.

Analogy -making as a complex adaptive system. In l.

Segel and I. Cohen (editorsl, Design Principles for the ImmuneSystemantherDistributedAutonomous Systems. New York: Oxford University Press, ۲۰۰۱.

Philosophy of the life Sciences, ۲۳, ۲۰۰۱, pp. ۳۶۱ - ۳۸۳.

Complex systems: Network thinking. Artificial life and evolution in computers. History and Intelligence, ۱۷۰ (۱۸l, ۲۰۰۶, pp. ۱۱۹۴ - ۱۲۱۲.

Mitchell, M., Crutchfield, J. P., and Das, R. Evolving cellular automata to perform computations: A review of recent work. In Proceedings of the First International Conference on Evolutionary Computation and its Applications (EvCA ۹۶l. Moscow: Russian Academy of Sciences, ۱۹۹۶, pp. ۴۲ - ۵۵.

Mitzenmacher, M. A brief history of generative models for powertributionInternet Mathematics, ۱ (۲l, ۲۰۰۳, pp. ۲۲۶ - ۲۵۱.

Montoya, J. M. and Sole, R. V. Small world patterns in food webs.Journal

of Theoretical Biology, ۲۱۴ (۳l, ۲۰۰۲, pp. ۴۰۵ - ۴۱۲.

Moore,theory continuous timecomputation.

Science, ۱۶۲, ۱۹۹۶, pp. ۲۳ - ۴۴.

Nand Theoretical Computer Moravec, H.Robot: Mere Machine to Transcendent Mind. New York: Oxford University Press, ۱۹۹۹.

Morton, O. Attack of the stuntbots. Wired, ۱۲.۰۱.۲۰۰۴.

Mukherji, A., Rajan, V., and Slagle, J. R. Robustness of cooperation. Nature, ۳۷۹, ۱۹۹۶, pp. ۱۲۵ -۱۲۶.

Muotri, A. R., Chu, V. T., Marchetto, M. C. N., Deng, W., Moran, J. V. and Gage, F. H. Somatic mosaicism in neuronalby retrotransposition. Nature, ۴۳۵, ۲۰۰۵, pp. ۹۰۳ - ۹۱۰.

lNagel, E. and Newman, J. R. GGdels Proof. New York: New York University Press, ۱۹۵۸.

Newman, M.E.J. Power laws, Pareto distributions and Zipfs law. Contemporary Physics, ۴۶, ۲۰۰۵, pp. ۳۲۳ - ۳۵۱.

Newman, M.E.J., Moore, C., and Watts, D. J. Mean field solution of the small-world network model.Physical Review letters, ۸۴, ۱۹۹۹, pp. ۳۲۰۱ - ۳۲۰۴.

Newman, M.E.J., Forrest, S., and Balthrop, J. Email networks and the spread of computer viruses. Physical Review E, ۶۶, ۲۰۰۲, p. ۰۳۵۱۰۱.

Nicolis, G. and Progogine, I. Exploring Complexity. New York: W.H.Freeman, ۱۹۸۹.

Niklas, K. J. Size matters! Trends in Ecology and Evolution ۱۶ (۸l, ۲۰۰۱, p. ۴۶۸.

Nowak, M. A. Five rules for the evolution of cooperation.

Science, ۳۱۴ (۵۸۰۵l, ۲۰۰۶, pp. ۱۵۶۰ - ۱۵۶۳.

Nowak, M. A., Bonhoeffer, S., and May, R. M. Spatial games and the maintenance of cooperation.Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, ۹۱, ۱۹۹۴.pp.

۴۸۷۷ - ۴۸۸۱.

Reply to Mukherji et al. Nature, ۳۷۹, ۱۹۹۶, p. ۱۲۶.

Nowak, M. A. and May, R. M. Evolutionary games and spatial chaos. Nature, ۳۵۹ (۶۳۹۸l, ۱۹۹۲, pp. ۸۲۶ - ۸۲۹.

Nowak, M. A. and Sigmund, K. Biodiversity: Bacterial game dynamics. Nature, ۴۱۸, ۲۰۰۲, pp. ۱۳۸ - ۱۳۹.

Packard, N. H. Adaptation toward the edge of chaos. In J.A.S Kelso, A. J. Mandell, M. F. Shlesinger (editorsl, Dynamic Patterns in Complex Systems, pp. ۲۹۳ -۳۰۱. Singapore:
World Scientific, ۱۹۸۸.

Pagels, H. The Dreams of Reason. New York: Simon & Schuster, ۱۹۸۸.

Paton, R., Bolouri, H., Holcombe, M., Parish, J. H., and Tateson, R. (editorsl, Computation in Cells and Tissues:

Perspectives and Tools of Thought. Berlin: Springer-Verlag, ۲۰۰۴.

Peak, D., West, J. D., Messinger, S. M., and Mott, K. A.

Evidence for complex, collective dynamics and emergent, distributed computation in plants.Proceedings of the

National Academy of Sciences, USA, ۱۰۱ (۴l, ۲۰۰۴, pp.

۹۱۸ - ۹۲۲.

Pearson, H. What is a gene? Nature, ۴۴۱, ۲۰۰۶, pp. ۳۹۹ - ۴۰۱.

Pierce, J. R. An Introduction to Information Theory: Symbols, Signals, and Noise. New York: Dover, ۱۹۸۰. (First edition, ۱۹۶۱l.

Pines, D. (editorl, Emerging Syntheses in Science.Reading MA: Addison - Wesley, ۱۹۸۸.

Poincare, H. Science and Method. Translated by Francis Maitland. london: Nelson and Sons, ۱۹۱۴.

Poundstone, W. The Recursive Universe.William Morrow, ۱۹۸۴.

Poundstone, W. Prisoners Dilemma. New York: Doubleday, ۱۹۹۲.

Price, D. J. Networks of scientific papers. Science ۱۴۹, ۱۹۶۵, pp. ۵۱۰ - ۵۱۵.

Provine, W. B. The Origins of Theoretical Population Genetics.

University of Chicago Press, ۱۹۷۱.

Rapoport, A. General System Theory: Essential Concepts and Applications, Cambridge, MA: Abacus Press, ۱۹۸۶.

Redner, S. How popular is your paper? An empirical study of the citation distribution. European Physical Journal B, ۴ (۲l, ۱۹۹۸, pp. ۱۳۱ - ۱۳۴.

Regis, E. Who Got Einsteins Office? Eccentricity and genius at the Institute for Advanced Study. Menlo Park, CA: Addison - Wesley, ۱۹۸۷.

Rendell, P. Turing universality of the game of life. In A.

Adamatzky (editorl, Collision-Based Computing.london:

Springer-Verlag, ۲۰۰۱, pp. ۵۱۳ - ۵۳۹.

Robbins, K. E., lemey, P., Pybus, O. G., Jaffe, H.W., Youngpairoj, A. S., Brown, T. M., Salemi, M., Vandamme, A. M. and Kalish, M. l., U.S. human immunodeficiency virus type ۱ epidemic: Date of origin, population history, and characterization of early strains. Journal of Virology, ۷۷ (۱۱l,

۲۰۰۳, pp. ۶۳۵۹-۶۳۶۶.

Rota, G.C, In memoriam of Stan Ulam The barrier of meaning. Physica D, ۲, ۱۹۸۶, pp. ۱-۳.

Rothman, T. The evolution of entropy. Chapter ۴ in Science a la_Mode. Princeton, NJ: Princeton University Press, ۱۹۸۹.

Russell, B. A. History of Western Philosophy, Touchstone, ۱۹۶۷ (First edition, ۱۹۰۱.l

Schlossberg, D. lAX Computer Crash Strands International Passengers.ConsumerAffairs.com, August ۱۳, ۲۰۰۷. (http://www.consumeraffairs.com/news۰۸/۲۰۰۷/۰۴/lax comp uters.htmll.

Schneeberger, A., Mercer, C. H., Gregson, S. A., Ferguson, N. M., Nyamukapa, C. A., Anderson, R. M., Johnson, A. M., and Garnett, G. P. Scale free networks and sexually transmitted diseases: A description of observed patterns of sexual contacts in Britain and Zimbabwe.Sexually Transmitted Diseases, ۳۱ (۶l, ۲۰۰۴, pp. ۳۸۰-۳۸۷.

Schwartz, J. Who needs hackers? New York Times, September ۱۲, ۲۰۰۷.

Selvam, A. M. The dynamics of deterministic chaos in numerical weather prediction models. Proceedings of the AmericanMeteorologicalSociety, ۸th Conferencon Numerical Weather Prediction, Baltimore, MD, ۱۹۸۸.

Shalizi, C. Networks and Netwars, ۲۰۰۵. Essay at (http:// www.cscs.umich.edu/~crshalizi/weblog/۳۴۷.htmll.

Power law Distributions, ۱/f noise, longMemory Time-Series, ۲۰۰۷. Essay at (http://cscs.umich.edu/~crsha lizi/notebooks/power laws.htmll.

Shannon, C. A mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal, ۲۷, ۱۹۴۸, pp. ۳۷۹-۴۲۳, ۶۲۳-۶۵۶.

Shaw, G. B. Annajanska, the Bolshevik Empress.Whitefish, MT: Kessinger Publishing, ۲۰۰۴. (Originally published ۱۹۱۹l.

Shouse. B. Getting the behavior of social insects to compute.

Science, ۲۹۵ (۵۵۶۴l, ۲۰۰۲, p. ۲۳۵۷.

Sigmund, K. On prisoners and cells. Nature, ۳۵۹ (۶۳۹۸l, ۱۹۹۲, p. ۷۷۴.

Simon, H.A. On a class of skew distribution functions.

Biometrika ۴۲ (۳ - ۴l, ۱۹۵۵, p. ۴۲۵.

The architecture of complexity. Proceedings of the American Philosophical Society, ۱۰۶ (۶l, ۱۹۶۲, pp. ۴۶۷ - ۴۸۲.

Sompayrac, l. M. How the Immune System Works, ۲nd edition. Blackwell Publishing, ۱۹۹۱.

Stam, C. J. and Reijneveld, J. C. Graph theoretical analysis of complex networks in the brain.Nonlinear Biomedical

Physics, ۱ (۱l, ۲۰۰۷, p. ۳.

Stoppard, T. Arcadia. New York: Faber & Faber, ۱۹۹۳.

Strogatz, S. Nonlinear Dynamics and Chaos. Reading, MA:Addison - Wesley, ۱۹۹۴.

Sync: How Order Emerges from Chaos in the Universe, Nature, and_Daily life. New York: Hyperion, ۲۰۰۴, p. ۲۸۷.

Szilard, l. On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings.Zeitschrift fuer Physik, ۵۳, ۱۹۲۹, pp. ۸۴۰ - ۸۵۶.

TattersallBecomingHumanEvolutionandHuman Uniqueness. New York: Harvest Books, ۱۹۹۹.

Travis, J. Eye-opening gene. Science News Online, May ۱۰, ۱۹۹۷.

Turing, A. M. On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem.Proceedings of the london Mathematical Society, ۲ (۴۲l, ۱۹۳۶, pp. ۲۳۰ - ۲۶۵.

Ulam, S. M. and von Neumann, J. On combination of stochastic and deterministic processes (abstractl.Bulletin of the American Mathematical Society, ۵۳, ۱۹۴۷, ۱۱۲۰.

Varn, D. P., Canright, G.S., and Crutchfield, J.P.

Discovering planar disorder in close packed structures from X-ray diffraction: Beyond the fault model. Physical Review B, ۶۶, ۲۰۰۲, pp. ۱۷۴۱۱۰ - ۱--۱۷۴۱۱۰ - ۴.

Verhulst,..Recherches mathematiques loi

dccroissementNouv.mm.de l'Academie Royale des Sci. et Belles-lettres de Bruxelles۱۸,۱۸۴۵, pp.۱ - ۴۱.

Von Bertalanffy, l. An outline of general system theory.The British Journal for the Philosophy of Science,۱ (۹۲l,۱۹۵۰,۱۳۴ - ۱۶۵.

Von Bertalanffy, l. An outline of general system theory.The British Journal for the Philosophy of Science,۱ (۹۲l,۱۹۵۰,۱۳۴ - ۱۶۵.

General System Theory: Foundations, Development,

Applications New York: G. Braziller,۱۹۶۹.

Von Neumann, J.Theory of Self-Reproducing Automata (edited and completed.BurkUrbana:

University of Illinois Press,۱۹۶۶.

Wagner, N.R. The logistic equation in random number

generation. Proceedings of the Thirtieth Annual Allerton Conference on Communications, Control, and Computing, University of Illinois at Urbana-Champaign,۱۹۹۳, pp. ۹۲۲ - ۹۳۱.

Wang, H. Reflections on Kurt GGdel. Cambridge, MA: MIT Press,۱۹۸۷.

Watts. D. J. Six Degrees: The Science of a Connected Age. New York: Norton,۲۰۰۳.

Watts, D. J. and Strogatz, S. H.Collective dynamics of 'small world networks, Nature. ۳۹۳,۱۹۹۸, pp. ۴۴۰ - ۴۴۲.

Weiner, J. The Beak of the Finch: A Story of Evolution in Our Time. New York: Knopf,۱۹۹۴.

Wiener, N. The Human Use of Human Beings.Boston:

Houghton Mifflin,۱۹۵۰.

Cybernetics: Or the Control and Communication in the Animal and the Machine.Cambridge, MA: MIT Press,۱۹۴۸.

Wiener, P. Antibiotic production in a spatially structured environment. Ecology letters,۳ (۲l,۲۰۰۰, pp.۱۲۲ - ۱۳۰.

West, G. B., Brown, J. H., and Enquist, B. J. The fourth dimension of life: Fractal geometry and allometric scaling of organisms. Science,۲۸۴,۱۹۹۹, pp.۱۶۷۷ - ۱۶۷۹.

West, G. B., Brown, J. H., and Enquist, B. J. Yes, West, Brown and Enquist model of allometric scaling is both mathematically correct and biologically relevant. (Reply to Kozlowski and Konarzweski, ۲۰۰۴.l Functional Ecology, ۱۹, ۲۰۰۵, pp. ۷۳۵ - ۷۳۸.

West, G. B. and Brown, J. H. lifes universal scaling laws.

Physics Today, ۵۷ (۹l, ۲۰۰۴, p. ۳۶.

The origin of allometric scaling laws in biology from genomes to ecosystems: Towards a quantitative unifying theory of biological structure and organization. Journal of Experimental Biology ۲۰۸, ۲۰۰۵, pp. ۱۵۷۵ - ۱۵۹۲.

Westfall, R. S. Never at Rest: A Biography of Isaac Newton.

Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, ۱۹۸۳.

Whitfield, J. All creatures great and small. Nature, ۴۱۳, ۲۰۰۱, pp. ۳۴۲ - ۳۴۴.

Williams, F.Artificial intelligence has a small but loyal following. Pensions and Investments, May ۱۴, ۲۰۰۱.

Williams, S. Unnatural selection. Technology Review, March ۲, ۲۰۰۵.

Willinger, W., Alderson, D., Doyle, J. C., and li, l. More normal than normal: Scaling distributions and complex systems. In R. G. Ingalls et al., Proceedings of the ۲۰۰۴ Winter Simulation Conference, pp. ۱۳۰ - ۱۴۱.Piscataway, NJ: IEEE Press, ۲۰۰۴.

Wolfram, S. Universality and complexity in cellular automata.

Physica D, ۱۰, ۱۹۸۴, pp. ۱ - ۳۵.

Twenty problems in the theory of cellular automata.

Physica Scripta, T۹, ۱۹۸۵, pp. ۱۷۰ - ۱۸۳.

Media, ۲۰۰۲.

A New Kind of Science. Champaign, Il: Wolfram Wright, R. Did the universe just happen? Atlantic Monthly, April ۱۹۸۸, pp. ۲۹ - ۴۴.

Yoon, C. K. From a few genes, lifes myriad shapes. New York Times, June ۲۶, ۲۰۰۷.

Yule, G. U. A mathematical theory of evolution, based on the conclusions of Dr. J. C. Willis.Philosophical Transactions of the Royal Society of

london, Ser. B, ۲۱۳, ۱۹۲۴, pp.

۲۱ - ۸۷.

Zi - pf, E. and Rosenfield, I. Evolving evolution. The New York Review of Books, ۵۳ (۸l, May ۱۱, ۲۰۰۶.

Zipf, G. K. Selected Studies of the Principle of Relative Frequencylanguage.

University Press, ۱۹۳۲.

Cambridge, MA: Harvard Zuse, K. Rechnender Raum. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn, ۱۹۶۹. English translation: Calculating Space.

Cambridge,Translation AZT - ۷۰ - ۱۶۴ - GEMIT,of Technology (Project

MACl, ۰۲۱۳۹, February ۱۹۷۰.

Zykov, V., Mytilinaios, E., Adams, B., and lipson, H.

Self reproducing machines.Nature, pp. ۱۶۳ - ۱۶۴.

واژه‌نامه

action at a distance	کنش از دور	autoimmune	خود ایمن
adaptation	انطباق	automating	خودکار کردن
adaptationist	انطباق‌گرا	automaton [automata :جمع]	خودکار
adaptive	انطباق‌پذیر	axiom	اصل
allele	آلل	axon	آکسون
alternative splicing	به هم چسباندن بدیل	base	باز
analogy	قیاس	bias	سوگیری
analogy-maker	قیاس‌کننده	bifurcation	دوشاخگی
animated	متحرک	binary	دوگان
antibody	پادتن	binding	پیوند
anticodon	پادکُدون	binding site	پیوندگاه
anticopy	ضد نسخه	biodiversity	تنوع زیستی
antigen	پادگِن	bioinformatics	علم زیست ـ اطلاعات
a priori	پیشینی	blank	تهی
argument	برهان	blending inheritance	وراثت آمیخته
arithmetic	حساب	Boolean	بولی
arrow of time	پیکان زمان	buble chamber	اتاقک حباب
artificial intelligence	هوش مصنوعی	bug	اِشکال
asynchronous	ناهمزمان	calculus	آنالیز ریاضی، حسابان
attractor	جلب کننده	carriage return	ناقل به خط بعد
		carrying capacity	ظرفیت تحمل

compiler	همگردان
computaion	محاسبه
computational	محاسباتی
concentration	تجمع
concentration-based	تجمع ـ پایه
conceptual slippage	جابه‌جایی مفهومی
consciousness	آگاهی
consistent	سازگار
constant motion	حرکت یکنواخت
context	زمینه
continuous-seeming	ظاهراً پیوسته
convergent evolution	تکامل همگرا
copycat	مقلد
copying	کپی کردن
counter	شمارنده
counterintuitive	غیرشهودی
critical	بحرانی
criticality	بحرانی بودن
cross-polination	دگر ـ گرده افشانی
cross-wise	ضربدری
cryptography	رمزنویسی
cumulative	انباشتی
curly bracket	آکُلاد
curve-fitting	انطباق منحنی
cutting-edge	پیشرو، پیشگام
cyber-terrorist	تروریست سایبری
cybernetic	سیبرنتیک، سیبرنتیکی
cybernetics	علم سیبرنتیک
cytoplasm	سیتوپلاسم

cell-body	بدنهٔ سلول
cellular automaton	خودکارِ سلولی
census data	داده‌های آماری
central	بنیادی، اساسی
central processing unit	واحد پردازشگر مرکزی
chain food	زنجیره غذایی
channel capacity	ظرفیت کانال
chaos	آشوب
chaotic	آشوبناک
chip	تراشه
chromodynamics	فام پویایی
chromosome	کروموزوم
cipher	رمز
circular	دوری
citation network	شبکهٔ نقل قول
clockwork universe	کائنات کوکی
cloned	کلون شده
clustering	خوشه‌بندی
coarse-grain	درشت بافت
coding theory	نظریه کُدگذاری
codon	کُدون
coevolutionary	هم‌تکاملی
cognive scientist	شناخت پژوه
collective	جمعی
colonial organism	اندام‌وارهٔ گروه‌زی
colony	جامعه، کولونی، گروه
coloured body	جسم رنگین
command	فرمان
commonality	همانندی، وجه مشترک

cytoplasmic	سیتوپلاسمی
data base	پایگاه داده‌ها
data compression	فشردگی داده
decentralized	نامتمرکز
decidable	تصمیم‌پذیر
decision theorist	نظریه‌پرداز تصمیم
decision theory	نظریهٔ تصمیم
decode	گشودن کُد
decoder	کُدیاب
decompiler	واگردان
definite procedure	روال معین
degree	درجه
degree of hierarchy	درجه سلسله مراتب
dendrite	دندریت
derivative	مشتق
detector	آشکارساز
deterministic	قطعی
dimension	بُعد
diploid	دیپلویید
discrete	ناپیوسته
disprove	ابطال کردن
dissipative structure	ساختار محوشونده
distributed	نامتمرکز، توزیعی
dominant	غالب
double helix	مارپیچ دوتایی
double logarithmic	لگاریتمی دو برابر
drive	رانش
drift	انحراف
duplicate	تکثیر کردن / شدن
duplication	تکثیر
dwarf	کوتاه
dynamics	دینامیک، پویایی
ecological science	علم بوم شناختی
ecologist	بوم‌شناس
ecosystem	نظام زیست
effective complexity	پیچیدگی مؤثر
effective measure complexity	اندازهٔ مؤثر پیچیدگی
egg	تخمک
electromagnetic	الکترومغناطیسی
elemental	بنیادی
elementary particle	ذره بنیادی
embryology	رویان‌شناسی
emergence	پیدایش
emergent	نوظهور
encode	کدگذاری کردن
encrypt	به رمز در آوردن
ensemble	مجموعه
entity	موجودیت
entropy	آنتروپی
epidemiologist	متخصص بیماریهای واگیردار
epigenetics	علم پس‌زایی
eukaryotic	هسته‌دار
evolutionary computation	محاسبهٔ تکاملی
evolutionary developmental biology	زیست‌شناسی تکاملی مربوط به رشد

evolutionary economics	اقتصاد تکاملی
evolve	تکامل یافتن
evolving	در حال تکامل
expression	نمود
extended synthesis	ترکیب گسترده
fabric	بافت
factor	عامل
failure	خرابی
fertilization	لقاح
fine-grainded	ریز بافت
fittest	اصلح
fitness	صلاحیت
fixed point	نقطهٔ ثابت
fluctuation	نوسان
flux	دگرگونی مداوم، جریان
formal	به‌قاعده؛ صوری
formalize	صوری کردن
format	قالب
fractal attractor	جلب‌کنندهٔ فراکتال
frequency	بسامد
fundamental physics	فیزیک بنیادی
generality	جامعیت
generation	نسل
generative	زاینده
genetic	ژنتیکی، ژنتیک
genetic code	کد ژنتیک
genetic switches	کلیدهای ژنتیک
genetics	علم ژنتیک
geneticist	ژن‌شناس
germ cell	سلول زایشی
global	فراگیر، سرتاسری
glycolysis	هضم قند
goal directedness	معطوف به هدف
gradualism	تدریجی‌گرایی
graph theory	نظریهٔ گراف
gravitational	جاذبه‌ای
grid	شبکه
hacker	هَکِر
halt	توقف
halting problem	مسئلهٔ توقف
head	هِد
heredity	وراثت
heritable	موروثی
heritor	میراث بر
heterogeneity	ناهمگنی
historical contingency	تصادف تاریخی
historicist	تاریخ‌گرا
hub	هاب
hump	پشته
hyperlink	فوق پیوند
hypervolume	بیش حجم
idea model	مدل ایده
idealize	صورت مطلوب دادن به
immunologist	ایمنی شناس
in-degree	درجه ورودی
in-link	پیوند ورودی
inanimate	بی‌جان
incompleteness theorem	قضیهٔ ناتمامیت

indentation	فاصله از سر سطر
index	نمایه
individual	فرد
inertial mass	جرم اینرسی
infinite loop	حلقهٔ بی‌نهایت
infinitesimal	بی‌نهایت کوچک
influence	عامل مؤثر
informal	بی‌قاعده
information	اطلاعات
information theory	نظریهٔ اطلاعات
inhibition	بازداری
instance	مورد
instantiate	مثال آوردن
instruction	دستور عمل
integral	انتگرال
intelligence	هوش
interactive	برهم‌کنشی، تعاملی
interdisciplinary	چند رشته‌ای
interpreter	مفسر
intracellular	بین سلولی
invisible hand	دست نامرئی
irreducible	کاستی‌ناپذیر
irreversible	برگشت‌ناپذیر
isolated	منزوی
iterating the model	تکرار مدل
kinematics	سینماتیک
kinetics	جنبشی
knock-out mutation	جهش حذف‌کننده
large-scale	کلان ـ مقیاس
leading space	فاصلهٔ راهنما
limit	حد
link	پیوند
literal	تحت لفظی
load	بار کردن
location	مکان حافظه
logical depth	عمق منطقی
logician	منطق‌دان
logistic	منطق‌گرا
loop	حلقه
lymph node	گره لنف
lymphocyte	لنفوسیت
machinery	ماشین‌آلات، آلات و ادوات
macrocosmos	عالَم کلان
macrophage	درشت‌خوار
macroscale	کلان مقیاس
macrostate	وضعیت کلان
magnification	بزرگ‌نمایی
many body problem	مسئلهٔ چند جسم
map	نگاشت
mapping	نگاشت
marker	نشانگر
market efficiency	کارایی بازار
master gen	ژن حاکم
mate	جفت کردن
mathematical biologist	زیست ـ ریاضی‌دان
mathematical economics	علم اقتصاد ریاضیاتی
measure	مقیاس

natural selection	انتخاب طبیعی
near-decomposability	تجزیه‌پذیری نسبی
negative selection	انتخاب منفی
neighborhood	همسایگی
nestedness	آشیانگی
network theory	نظریهٔ شبکه
neural	عصبی
neurology	عصب‌شناسی
neurotransmitter	ناقل عصبی
neutral evolution	تکامل خنثی
non-scale-free	غیر بی‌میزان
non-self-binding	غیر ـ خود ـ پیوند
nonadaptive	تطبیق‌ناپذیر
noncoding	غیر کدگذار
nondeterministic	غیرقطعی
nonfunctional	غیر کارکردی
nongene	غیرژن
nonlinear	غیرخطی
nonlinearity	غیرخطی بودن
nontrivial	نابدیهی
nucleotide	نوکلئوتید
nutrient	مادهٔ غذایی
observer	مشاهده‌گر
observing power	توان مشاهده
ontogeny	هستی‌زایی
ontological	هستی‌شناختی
operator	عملگر
optimal	بهینه، مطلوب
optimized	بهینه

mechanism	سازوکار
mechanistic	ماشین‌وار، مکانیکی
meiosis	میوز
message	پیام
messenger	پیام‌رسان، پیک
messenger RNA	RNA پیام رسان
metabolic	سوخت و سازی
metabolic pathway	مسیر سوخت و ساز
metabolic scaling theory	نظریهٔ میزان شدن سوخت و ساز
metabolic system	سیستم سوخت و ساز
metabolize	سوزاندن
metanorm	کلان هنجار
methylated	متیلاتی
methylation	متیلات سازی
microcosmos	عالَم خُرد
microorganism	ریز اندام‌واره
microscale	ریز مقیاس
microstate	وضعیت خُرد
microworld	دنیای خُرد
minimal	حداقلی
mitosis	میتوز
momentum	اندازهٔ حرکت
morphology	ریخت‌شناسی
mutated	جهش‌یافته
mutation	جهش
mutually sustaining	نگهدارندهٔ هم
nano-machine	نانو ـ ماشین

power-law قانون توان
predecessor سَلَف
predictability پیش‌بینی‌پذیری
preexistence موجودیت پیشین
preferential attachment
انضمام ترجیحی
primate نخستی
principle of computational
equivalence اصل هم‌ارزی محاسباتی
probabilistic احتمالاتی، تصادفی
probable محتمل، احتمالی
programmable برنامه‌پذیر
progression پیشرفت، فراگشت
prokaryotic پیش هسته‌ای
protein evolution تکامل پروتئینی
punctuate قطع کردن
pulse تَپ
punctuated equilibria تعادل منقطع
purist پاک انگار
purpose مقصود

quantum information theory
نظریهٔ کوانتومی اطلاعات
quarter-power scaling laws
قوانین میزان شدن توان یک چهارم
quasi-species شبه نوع

random تصادفی
random access memory
حافظهٔ دستیابی تصادفی
random number عدد تصادفی
randomness تصادفی بودن

order نظم
ordered منظم
order of magnitude مرتبهٔ بزرگی
organism اندام‌واره

paleontologist دیرین‌شناس
paradigm پارادایم
parallel terraced scan
مرور موازی و پلکانی
parallelism موازی‌گرایی
pathogen بیماری‌زا
pattern الگو
payoff matrix ماتریس بازده
peer-to-peer همتا ـ به ـ همتا
perceptual ادراکی
period دورهٔ تناوب
phase transition گذار حالتی
phenotype رُخ مون
pheromone فرومون
physics of information
فیزیک اطلاعات

physiology تنکردشناسی
place محل رقم [در عدد]
pointer اشاره‌گر
population جمعیت
population biologist
زیست ـ جمعیت‌شناس
population genetics
علم ژنتیک جمعیتی
posting web page ایجاد صفحه وب
potentially بالقوه

علم شبکه	science of network
پرسش جستجو	search query
دانه	seed
خود ـ پیوند	self-binding
خودکپی‌کننده	self-copying
خود ـ پیوند	self-link
مولکول خودی	self-molecule
خود ـ سامانی	self-organization
خود ـ سامان	self-organizing
خود ـ گرده افشانی	self-polination
خود ارجاعی	self-reference
خود ـ ارجاع	self-referential
خود ـ تکثیری	self-replication
تولیدمثل	self-reproduction
خود ـ مانندگی	self-similarity
خود ـ مانند	self-similiar
وابستگی حساس	sensitive dependence
زنجیره، توالی، ردیف	sequence
ردیف شده	sequenced
مرتب کردن	sequencing
متوالی	serial
نشان	signature
شبیه‌ساز	simulator
پایگاه، خانه، جایگاه	site
اندازه	size
نامنظم	skewed
جا به جا کردن	slip
جا به جایی	slippage
جسم	soma

rate	آهنگ، میزان، سرعت
receptor	گیرنده
recessive	مغلوب
recombination	بازترکیب
reductionism	تقلیل‌گرایی
redundancy	افزونگی
refuse-sorting	سروسامان دادن به پسماند
regress	تسلسل
regularity	نظم
regulatory	نظم‌دهنده
renormalization	عادی سازی مجدد
replicate	عیناً بازسازی کردن
replication	تکثیر، عیناً بازسازی کردن
reproduce	تولیدمثل
reproductive	تولیدمثلی
reversible	برگشت‌پذیر
ribosome	ریبوزوم
riffer	بداهه‌سرا
RNA editing	ویرایش RNA
roboticist	ربوت‌شناس
robustness	استحکام
rule	قاعده
running	اجرا
sameness	همانندی
scale	میزان، مقیاس
scale-free	بی‌مقیاس
scaling	میزان کردن، میزان شدن
science historian	تاریخ‌دان علم
science philosopher	فیلسوف علم

@degar_goonesh

survival instinct	غریزهٔ بقا
swarm intelligence	هوش گله‌ای
symbol	نماد
symmetry breaking	شکستن تقارن
synchronization	همگاهی
synchronized	همگاه
synergy	هم‌افزایی
synergetics	علم هم‌افزایی
synthesis [syntheses :جمع]	ترکیب
system-wide	در سراسر سیستم
systems biology	زیست‌شناسی سیستم‌ها
systems science	علم سیستم‌ها
task allocation	تقسیم کار
tautology	اینهمانی
teleological	غایت شناختی
teleology	غایت‌شناسی
territoriality	قلمرو‌داری
theoretical biologist	زیست‌شناس نظری
thymus	[غده] تیموس
tipping point	نقطه عطف
to bind	پیوند برقرار کردن، پیوند خوردن
topological	مکان‌شناختی
topology	مکان‌شناسی
trait	خصیصه
trajectory	خط سیر
transcribe	نسخه‌برداری
transcription	نسخه‌برداری
sophistication	بغرنجی
source	منبع
space	فاصله؛ فضا
speciation	گونه‌زایی
sperm	اسپرم
split	دوپاره کردن
spontaneous order	نظم خودانگیخته
state	وضعیت
statement	گزاره
statistical behavior	رفتار آماری
statistical effect	حالت آماری
statistical inference	استنتاج آماری
statistical mechanics	مکانیک آماری
stoma [stomata :جمع]	روزنه هوایی
stop-codon	کُدون پایان
strand	تار، رشته
string theory	نظریهٔ ریسمان
structuralist	ساختارگرا
subatomic	زیر اتمی
subcellular	زیر سلولی
subsequence	زیر رشته
subshape	زیر شکل
substrate	شالوده، زیر لایهٔ بافتی
substring	زیر رشته
subsystem	زیر سیستم
successor	جانشین، خَلَف
successorship	جانشینی
superorganism	اَبَر اندام‌واره
surface hypothesis	فرضیهٔ سطح
surfing	گردش

محاسبهٔ عام	universal computation	RNA ناقل	transfer RNA
کامپیوتر عام	universal computer	تبدیل	transformation
فراگیر بودن، عام بودن	universality	گذار	transition
ماشین تورینگ عام	Universal Turing Machine	ترجمه، برگردان	translation
پیش‌بینی‌ناپذیری	unpredictability	درست، صادق	true
معتبر	valid	گردش	turnover
ارزش	value	حل‌ناپذیر	unsolvable
گوناگونی	variation	عدم قطعیت	uncertainty
آوندی	vascular	محاسبه‌ناپذیری	uncomputability
کارآمد	viable	تصمیم‌ناپذیری	undecidability
رشته کامل	whole-string	تصمیم‌ناپذیر	undecidable
تار، وب	web	به صورت یکنواخت	uniformally
وبگاه	web site	تک وجهی	unimodal
		عام، فراگیر	universal

یادداشت‌ها

[←۱]

reductionism شماره‌های درون () نشانه یادداشت‌های مؤلف است که در پایان متن کتاب آمده است.

[←۲]

fundamental physics

[←۳]

Albert Michelson

[←۴]

adaptive

[←۵]

organisms

[←۶]

chaos

[←۷]

systems biology

[←۸]

evolutionary economics

[←۹]

network theory

[←۱۰]

interdisciplinary

[←۱۱]

cybernetics

[←۱۲]

synergetics

[←۱۳]

Santa Fe

[←۱۴]

. New Mexico

[←۱۵]

syntheses

[←۱۶]

interactive

[←۱۷]

artificial intelligence

[←۱۸]

computation

[←۱۹]

database

[←۲۰]

compiler

[←۲۱]

Los Alamos

[←۲۲]

emergent computation

[←۲۳]

paradigm

[←۲۴]

Stanislaw Ulm

[←۲۵]

colony

[←۲۶]

immune system

[←۲۷]

self-interested

[←۲۸]

adaptation

[←۲۹]

mechnistic

[←۳۰]

computational

[←۳۱]

spontaneous order

[←۳۲]

self-organization

[←۳۳]

emergence

[←۳۴]

dynamics. در زمینه سیستم‌های مکانیکی و طبیعی بیشتر از واژه دینامیک و در سایر موارد از معادل پویایی نیز استفاده کرده‌ام. در هر حال دینامیک و پویایی به یک معنا به کار رفته است. _م.

[←۳۵]

Computer. به معنای محاسبه‌گر است. با توجه به اهمیت مفهوم محاسبه در این کتاب خواننده باید به این معنا توجه داشته باشد _م.

[←۳۶]

commonality

[←۳۷]

metabolic system

[←۳۸]

microcosmo

[←۳۹]

macrocosmos

[←۴۰]

superorganism

[←۴۱]

collective intelligence

[←۴۲]

E. burchelli

[←۴۳]

termite

[←۴۴]

machinery

[←۴۵]

entity

[←۴۶]

pattern

[←۴۷]

cognitive scientist

[←۴۸]

system-wide

[←۴۹]

global

[←۵۰]

cell-body

[←۵۱]

soma

[←۵۲]

dendrite

[←۵۳]

axon

[←۵۴]

firing

[←۵۵]

electrical pulse

[←۵۶]

neurotransmitter

[←۵۷]

bone marrow

[←۵۸]

. lymph node

[←۵۹]

. lymphocyte

[←۶۰]

matching

[←۶۱]

. antibody

[←۶۲]

. daughter

[←۶۳]

pathogen

[←۶۴]

mutation

[←۶۵]

microorganism

[←۶۶]

thymus

[←۶۷]

macrophage

[←۶۸]

autoimmune

[←۶۹]

human immunodeficiency

[←۷۰]

self-interest

[←۷۱]

market efficiency

[←۷۲]

self-organizing

[←۷۳]

invisible hand

[←۷۴]

bubble

[←۷۵]

crash

[←۷۶]

posting

[←۷۷]

link

[←۷۸]

coevolutionary

[←۷۹]

Web-site

[←۸۰]

. nonadaptive

[←۸۱]

nontrivial

[←۸۲]

measure

[←۸۳]

order

[←۸۴]

dynamical systems theory

[←۸۵]

flux

[←۸۶]

calculus

[←۸۷]

kinematic

[←۸۸]

constant motion

[←۸۹]

inertial mass

[←۹۰]

clockwork universe

[←۹۱]

Pierre Simon Laplace

[←۹۲]

in principle

[←۹۳]

in practice

[←۹۴]

uncertainty principle

[←۹۵]

Werner Heisenberg

[←۹۶]

momentum

[←۹۷]

chaotic

[←۹۸]

sensitive dependence on initial condition

[←۹۹]

James Clerk Maxwell

[←۱۰۰]

finite being

[←۱۰۱]

henri poincare

[←۱۰۲]

three-body problem

[←۱۰۳]

many body

[←۱۰۴]

topology

[←۱۰۵]

Edward Lorenz

[←۱۰۶]

. linear

[←۱۰۷]

nonlinear

[←۱۰۸]

magnification

[←۱۰۹]

population biologist

[←۱۱۰]

logistic

[←۱۱۱]

carrying capacity

[←۱۱۲]

iterating the model

[←۱۱۳]

به نویسندگان کتاب‌های علمی که مخاطبینی عام دراند در دروم این قاعده ادرشه داده می‌شود: هر معادله‌ای در کتاب‌تان تعداد خوانندگان را به نصف کاهش می‌دهد. من هم استثنا نیستم - ناشر من این حقیقت را به وضوح گوشزد کرد. بنابراین هر کدام از شما که وقتی معادله‌ای را می‌بینید کتاب را به بیرون پرتاب می‌کنید خط بعدی را نادیده بگیرید.

[←۱۱۴]

mathematical biologist

[←۱۱۵]

Nature

[←۱۱۶]

Mitchell Feigenbaum

[←۱۱۷]

fixed point

[←۱۱۸]

attractor

[←۱۱۹]

period

[←۱۲۰]

trajectory

[←۱۲۱]

strange attractor

[←۱۲۲]

deterministic

[←۱۲۳]

randomness

[←۱۲۴]

census data

[←۱۲۵]

universal

[←۱۲۶]

period-doubling

[←۱۲۷]

bifurcation

[←۱۲۸]

P. J. Myrberg

[←۱۲۹]

Los Alamos National Laboratory

[←۱۳۰]

parabola

[←۱۳۱]

hump

[←۱۳۲]

unimodal

[←۱۳۳]

programmable

[←۱۳۴]

rate

[←۱۳۵]

renormalization

[←۱۳۶]

phase transition

[←۱۳۷]

critical phenomena

[←۱۳۸]

Leo Kadanof

[←۱۳۹]

solar variability

[←۱۴۰]

Pierre Coullet

[←۱۴۱]

Charles Tresser

[←۱۴۲]

idea model

[←۱۴۳]

entropy

[←۱۴۴]

thermodynamics

[←۱۴۵]

mutually sustaining

[←۱۴۶]

stem cell

[←۱۴۷]

Holy Grail طبق روایات قرون وسطایی، مسیح در آخرین شب زندگی‌اش از آن نوشید. در طول تاریخ مسیحیت یافتن این جام انگیزه بسیاری از جستجوها بوده است و در وجه کنایی حاکی از چیزی است که بسیاری بدون نتیجه به دنبالش گشته‌اند. م.

[←۱۴۸]

Irun Cohen

[←۱۴۹]

Eric Beinhocker

[←۱۵۰]

Murray Gell-Mann

[←۱۵۱]

demon

[←۱۵۲]

energia

[←۱۵۳]

kinetics

[←۱۵۴]

trope

[←۱۵۵]

transformation

[←۱۵۶]

isolated

[←۱۵۷]

arrow of time

[←۱۵۸]

Tony Rothman

[←۱۵۹]

James Clerk Maxwell

[←۱۶۰]

Theory of Heat

[←۱۶۱]

Leo Szilard

[←۱۶۲]

bit

[←۱۶۳]

Leon Brillouin

[←۱۶۴]

Denis Gabor

[←۱۶۵]

Charles Bennett

[←۱۶۶]

reversible computing

[←۱۶۷]

Rolf Landauer

[←۱۶۸]

. information theory

[←۱۶۹]

physics of information

[←۱۷۰]

statistical mechanics

[←۱۷۱]

Rudolph Clausius

[←۱۷۲]

Ludwig Boltzman

[←۱۷۳]

ensemble

[←۱۷۴]

microstate

[←۱۷۵]

macrostate

[←۱۷۶]

Claude Shannon

[←۱۷۷]

Bell Labs

[←۱۷۸]

American Telephone and Telegraph Company

[←۱۷۹]

channel capacity

[←۱۸۰]

surprise

[←۱۸۱]

coding theory

[←۱۸۲]

data compression

[←۱۸۳]

code. از این واژه این معنا را مدنظر داشته‌ام: سیستمی از نمادها واژه‌ها، حرف‌ها، اعداد، اشکال و تصاویر که بازنمود سیستم دیگری است، و به کمک یک مفسر یا مترجم یا به طور مستقیم نحوه اقدام را در موجودات زنده یا ماشین‌ها معین می‌کند. در ترجمه هر کجا که این معنا مطرح است، و همچنین در واژه‌های مشتق از آن، از واژه کد به عنوان معادل استفاده کردم.
هر کجا که محرمانه بودن نیز موردنظر بوده از واژه رمز استفاده شده، در مورد واژه‌هایی مثل rhyther که صراحتا به محرمانه بودن اشاره دارند از واژه رمز استفاده شده است. م.

[←۱۸۴]

cryptography

[←۱۸۵]

bioinformatics

[←۱۸۶]

gene sequence

[←۱۸۷]

John Pierce

[←۱۸۸]

quantum information theory

[←۱۸۹]

mutual information

[←۱۹۰]

spreadsheet

[←۱۹۱]

distributed

[←۱۹۲]

Art Burks

[←۱۹۳]

ballistic

[←۱۹۴]

David Hilbert

[←۱۹۵]

complete

[←۱۹۶]

statement

[←۱۹۷]

axiom

[←۱۹۸]

true

[←۱۹۹]

consistent

[←۲۰۰]

decidable

[←۲۰۱]

definite procedure

[←۲۰۲]

entscheidungsproblem

[←۲۰۳]

Kurt Godel

[←۲۰۴]

incompletenss theorem

[←۲۰۵]

arithmetic

[←۲۰۶]

. Andrew Hodges

[←۲۰۷]

Alan Turing

[←۲۰۸]

Max Newman

[←۲۰۹]

symbol

[←۲۱۰]

Turing machine

[←۲۱۱]

format

[←۲۱۲]

encode

[←۲۱۳]

binary

[←۲۱۴]

decode

[←۲۱۵]

word count

[←۲۱۶]

text

[←۲۱۷]

proof by contradiction

[←۲۱۸]

. infinite loop

[←۲۱۹]

detector

[←۲۲۰]

halting problem

[←۲۲۱]

Institue for Advanced Study in Princeton

[←۲۲۲]

cipher

[←۲۲۳]

Enigma

[←۲۲۴]

neurology

[←۲۲۵]

physiology

[←۲۲۶]

developmental biology

[←۲۲۷]

Daniel Dennett

[←۲۲۸]

mechanism

[←۲۲۹]

George Louis Leclerc de Buffon

[←۲۳۰]

Historie Naturelle

[←۲۳۱]

Erasmus Darwin

[←۲۳۲]

Jean-Baptiste Lamarck

[←۲۳۳]

Philosophie Zoolgique

[←۲۳۴]

wading

[←۲۳۵]

advanced

[←۲۳۶]

Darwinism

[←۲۳۷]

Origin of Species

[←۲۳۸]

H. M. S. Beagle

[←۲۳۹]

Principles of Geology

[←۲۴۰]

Charles Lyell

[←۲۴۱]

Essay on the Principle of Population

[←۲۴۲]

. Thomas Malthus

[←۲۴۳]

struggle for existence

[←۲۴۴]

Wealth of Nation

[←۲۴۵]

finch

[←۲۴۶]

Galapagos

[←۲۴۷]

Phaedo

[←۲۴۸]

necessary ideas

[←۲۴۹]

preexistence

[←۲۵۰]

Alfred Russel Wallace

[←۲۵۱]

On the Tendency of Varieties to Depart_Indefinitely from the Original Type

[←۲۵۲]

Linnean Society

[←۲۵۳]

Patrick Matthew

[←۲۵۴]

On Naval Timber and Arboriculture

[←۲۵۵]

. Gardiners Chronicle

[←۲۵۶]

Thomas Huxley

[←۲۵۷]

bias

[←۲۵۸]

heredity

[←۲۵۹]

Gregor Mendel

[←۲۶۰]

character

[←۲۶۱]

factor

[←۲۶۲]

discrete

[←۲۶۳]

self-pollination

[←۲۶۴]

cross-pollination

[←۲۶۵]

value

[←۲۶۶]

allele

[←۲۶۷]

dominant

[←۲۶۸]

recessive

[←۲۶۹]

blending inheritance

[←۲۷۰]

Experiments in Plant Hybridization

[←۲۷۱]

synthesis

[←۲۷۲]

mutation theory

[←۲۷۳]

phenotype

[←۲۷۴]

Ronald Fisher

[←۲۷۵]

Francis Galton

[←۲۷۶]

J.B. S. Haldane

[←۲۷۷]

Sewall Wright

[←۲۷۸]

random genetic drift

[←۲۷۹]

fluctuation

[←۲۸۰]

recombination

[←۲۸۱]

macroscale

[←۲۸۲]

. Ian Tattersal

[←۲۸۳]

organismic biology

[←۲۸۴]

paleontologist

[←۲۸۵]

Stephen Jay Gould

[←۲۸۶]

Niles Eldredge

[←۲۸۷]

punctuate

[←۲۸۸]

punctuated equilibria

[←۲۸۹]

gradualism

[←۲۹۰]

historical contingency

[←۲۹۱]

tape of life

[←۲۹۲]

drive

[←۲۹۳]

adaptationist

[←۲۹۴]

Motoo Kimura

[←۲۹۵]

neutral evolution

[←۲۹۶]

Manfred Eigen

[←۲۹۷]

Peter Schuster

[←۲۹۸]

quasi-species

[←۲۹۹]

synthetic

[←۳۰۰]

Ernst Mayr

[←۳۰۱]

Richard Dawkins

[←۳۰۲]

cumulative

[←۳۰۳]

mitosis. تقسیم سلول که در جریان آن تعداد کروموزوم‌ها ثابت می‌مانند._ م

[←۳۰۴]

meiosis تقسیم سلولی همراه با کاهش تعداد کروموزوم‌ها.

[←۳۰۵]

diploid. جانداری که دو مجموعه کروموزوم دارد.

[←۳۰۶]

germ cells

[←۳۰۷]

fertilization

[←۳۰۸]

Walter Sutton

[←۳۰۹]

Thomas Hunt Morgan

[←۳۱۰]

ribonucleic acid

[←۳۱۱]

deoxyribonucleic acid

[←۳۱۲]

James Watson

[←۳۱۳]

Francis Crick

[←۳۱۴]

double helix

[←۳۱۵]

genetic code

[←۳۱۶]

substring

[←۳۱۷]

recombination

[←۳۱۸]

sequence

[←۳۱۹]

nucleotid

[←۳۲۰]

base

[←۳۲۱]

strand

[←۳۲۲]

subsequence

[←۳۲۳]

phenylalanine

[←۳۲۴]

valine

[←۳۲۵]

codon

[←۳۲۶]

transcription

[←۳۲۷]

polymerase

[←۳۲۸]

messenger

[←۳۲۹]

anticopy

[←۳۳۰]

translation

[←۳۳۱]

cytoplasmic

[←۳۳۲]

ribosome

[←۳۳۳]

anticodon

[←۳۳۴]

transfer RNA

[←۳۳۵]

isoleucine

[←۳۳۶]

flash card

[←۳۳۷]

stop-codon

[←۳۳۸]

expression

[←۳۳۹]

@degar_goonesh

subcellular

[←۳۴۰]

paired

[←۳۴۱]

replication

[←۳۴۲]

self-reference

[←۳۴۳]

coded version

[←۳۴۴]

decoder

[←۳۴۵]

circularity

[←۳۴۶]

self-referential

[←۳۴۷]

geneticist

[←۳۴۸]

Maurice Wilkins

[←۳۴۹]

Har Gobind Korana

[←۳۵۰]

Robert Holley

[←۳۵۱]

Marshal Nirenberg

[←۳۵۲]

Doyne Farmer

[←۳۵۳]

Jim Crutchfield

[←۳۵۴]

Stephnie Forrest

[←۳۵۵]

Eric Smith

[←۳۵۶]

John Miller

[←۳۵۷]

Alfred Hibler

[←۳۵۸]

Bob Eisenstein

[←۳۵۹]

decision theory

[←۳۶۰]

formal

[←۳۶۱]

informal

[←۳۶۲]

action at a distance

[←۳۶۳]

Seth Lloyd

[←۳۶۴]

degree of organization

[←۳۶۵]

nongene

[←۳۶۶]

noncoding regions

[←۳۶۷]

Human Genome Project

[←۳۶۸]

sequenced

[←۳۶۹]

mustard plant

[←۳۷۰]

Arabidopsis

[←۳۷۱]

nonfunctional

[←۳۷۲]

algorithmic

[←۳۷۳]

Kolmogorov

[←۳۷۴]

Gregory Chaitin

[←۳۷۵]

Ray Solomonoff

[←۳۷۶]

pseudo-random

[←۳۷۷]

regularity

[←۳۷۸]

ordered

[←۳۷۹]

viable

[←۳۸۰]

Occam Razor test

[←۳۸۱]

regulatory

[←۳۸۲]

logical depth

[←۳۸۳]

Charles Bennett

[←۳۸۴]

state

[←۳۸۵]

thermodynamic depth

[←۳۸۶]

Heinz Pagels

[←۳۸۷]

computational capacity

[←۳۸۸]

Stephen Wolfram

[←۳۸۹]

Jim Crutchfield

[←۳۹۰]

Karl Young

[←۳۹۱]

Peter Grassberger

[←۳۹۲]

effective measure complexity

[←۳۹۳]

prominence

[←۳۹۴]

self-similarity

[←۳۹۵]

Benoit Mandelbrot

[←۳۹۶]

self-similiar

[←۳۹۷]

fractal attractor

[←۳۹۸]

Koch

[←۳۹۹]

subshape

[←۴۰۰]

jaggedness

[←۴۰۱]

fragmentation

[←۴۰۲]

Herbert Simon

[←۴۰۳]

near-decomposability

[←۴۰۴]

metabolic

[←۴۰۵]

substrates

[←۴۰۶]

Daniel McShea

[←۴۰۷]

nestedness

[←۴۰۸]

prokaryotic

[←۴۰۹]

aggregate

[←۴۱۰]

eukaryotic

[←۴۱۱]

colonies

[←۴۱۲]

colonial organisms

[←۴۱۳]

portuguese man war

[←۴۱۴]

part

[←۴۱۵]

level

[←۴۱۶]

History Of Animals

[←۴۱۷]

Golem، از دوران باستان در فرهنگ عامه یهود موجود متحرک انسان گونه‌ای بوده، که تماما از ماده بی‌جان خلق شده است. _م.

[←۴۱۸]

Pygmalion. شخصیت اساطیری مربوط به قبرس باستان، در اثر اوید او مجسمه‌سازی است که عاشق مجسمه‌ای می‌شود که خود تراشیده و با بوسه او جان می‌گیرد. _ م.

[←۴۱۹]

Ovid. شاعر بزرگ دوران امپراطوری رم ۴۳ قبل از میلاد تا ۱۷ میلادی. _م.

[←۴۲۰]

BladeRunner

[←۴۲۱]

the Matrix

[←۴۲۲]

sim life

[←۴۲۳]

self-reproduction

[←۴۲۴]

Deep Blue. کامپیوتر مشهور شرکت IBM که برای نخستین بار گاسپاروف را شکست داد. _ م.

[←۴۲۵]

regress

[←۴۲۶]

command

[←۴۲۷]

instruction

[←۴۲۸]

space of indentation

[←۴۲۹]

John Von Neumann

[←۴۳۰]

central processing unit

[←۴۳۱]

random access memory

[←۴۳۲]

self-copying

[←۴۳۳]

automaton

[←۴۳۴]

address

[←۴۳۵]

location

[←۴۳۶]

pointer

[←۴۳۷]

leading space

[←۴۳۸]

loop command

[←۴۳۹]

counter

[←۴۴۰]

command line

[←۴۴۱]

interpreter

[←۴۴۲]

meaning

[←۴۴۳]

self-replication

[←۴۴۴]

Arthur Burks

[←۴۴۵]

potentiality

[←۴۴۶]

Ray Kurzweil

[←۴۴۷]

Hans Moravec

[←۴۴۸]

nano - machine

[←۴۴۹]

Bill Joy

[←۴۵۰]

Sun Microsystems

[←۴۵۱]

Wired

[←۴۵۲]

roboticist

[←۴۵۳]

Hod Lipson

[←۴۵۴]

Institute for Advancd Study (IAS)

[←۴۵۵]

game theory

[←۴۵۶]

Atomic Energy Commission

[←۴۵۷]

Eugene Wigner

[←۴۵۸]

Edward Teller

[←۴۵۹]

Denis Gabor

[←۴۶۰]

Paul Erds

[←۴۶۱]

John Kemeny

[←۴۶۲]

Peter Lax

[←۴۶۳]

Norman MacRae

[←۴۶۴]

meteorologist

[←۴۶۵]

Freeman Dyson

[←۴۶۶]

evolutionary computation

[←۴۶۷]

John Holland

[←۴۶۸]

Logic of Computers

[←۴۶۹]

Ronald Fisher

[←۴۷۰]

The Genetical Theory of Natural Selection

[←۴۷۱]

Adaptation In Natural and Artificial Systems

[←۴۷۲]

population

[←۴۷۳]

fltness. از میان معادل‌های این واژه در زبان فارسی به این دلیل صلاحیت را انتخاب کردم که flt در اصطلاح The Survival of the Fittest به بقای اصلح برگردانده شده، و صلاحیت و اصلح از یک ریشه هستند. _م.

[←۴۷۴]

individual

[←۴۷۵]

General Electric Company

[←۴۷۶]

Los Alamos National Lab

[←۴۷۷]

John Deere Company

[←۴۷۸]

Lord of The Rings: The Return of The King

[←۴۷۹]

Capital One

[←۴۸۰]

First Quadrant

[←۴۸۱]

George Pompidou Center

[←۴۸۲]

site

[←۴۸۳]

. knock-out mutation

[←۴۸۴]

transcribe

[←۴۸۵]

Jason Lohn

[←۴۸۶]

Human Competitive Award

[←۴۸۷]

idealize

[←۴۸۸]

formalize

[←۴۸۹]

operator

[←۴۹۰]

synchronized

[←۴۹۱]

neighborhood

[←۴۹۲]

cell update rule

[←۴۹۳]

Stan Ulam

[←۴۹۴]

universal computer

[←۴۹۵]

John Conway

[←۴۹۶]

glider gun

[←۴۹۷]

logical operation

[←۴۹۸]

nontrivial؛ ویژگی جوابی از یک مجموعه معادلات خطی همگن که در آن دست کم یکی از متغیرها مقداری مخالف صفر داشته باشد. _م.

[←۴۹۹]

parallelism

[←۵۰۰]

Stephen Wolfram

[←۵۰۱]

quantum chromodynamics

[←۵۰۲]

MacArthur Foundation

[←۵۰۳]

elementary

[←۵۰۴]

binary

[←۵۰۵]

decimal

[←۵۰۶]

Mathematica

[←۵۰۷]

Matthew Cook

[←۵۰۸]

A New Kind oF Science

[←۵۰۹]

Principle of Computational Equivalence

[←۵۱۰]

C. Elegans. ساده‌ترین جاندار دارای سیستم عصبی و اولین جانداری است که ترتیب ژنوم آن و طرح اتصال نورون‌های آن کاملا مشخص شده است. ـم.

[←۵۱۱]

Wolfram Media

[←۵۱۲]

Konrad Zuse

[←۵۱۳]

Edward Fredkin

[←۵۱۴]

Norman Packard

[←۵۱۵]

Peter Hraber

[←۵۱۶]

Rajarshi Das

[←۵۱۷]

majority classification

[←۵۱۸]

Jim Crutchfield

[←۵۱۹]

. information processing structure

[←۵۲۰]

bubble chamber. ظرفی است مملو از مایع فوق‌العاده داغ و شفاف که برای تشخیص حرکت ذرات دارای بار الکتریکی که از میان آن عبور می‌کنند به کار می‌رود.ـ م.

[←۵۲۱]

annihilation

[←۵۲۲]

Keith Mott

[←۵۲۳]

David Peak

[←۵۲۴]

decentralized

[←۵۲۵]

ontological

[←۵۲۶]

formal

[←۵۲۷]

mapping

[←۵۲۸]

compiler

[←۵۲۹]

decompiler

[←۵۳۰]

negative selection

[←۵۳۱]

. self-molecules

[←۵۳۲]

autoimmune

[←۵۳۳]

rheumatoid arthritis

[←۵۳۴]

non-self-binding

[←۵۳۵]

self-binding

[←۵۳۶]

cytokine

[←۵۳۷]

pheromone

[←۵۳۸]

ecologist

[←۵۳۹]

Deborah Gordon

[←۵۴۰]

Red Harvester

[←۵۴۱]

metabolic pathway

[←۵۴۲]

intracellular

[←۵۴۳]

glycolysis

[←۵۴۴]

pryruvate

[←۵۴۵]

citic acid cycle

[←۵۴۶]

adenosine triphosphate

[←۵۴۷]

Edward Ziff

[←۵۴۸]

science historian

[←۵۴۹]

Israel Rosenfield

[←۵۵۰]

. fine-grained

[←۵۵۱]

parallel terraced scan

[←۵۵۲]

redundancy

[←۵۵۳]

well-being

[←۵۵۴]

context

[←۵۵۵]

، spam. پیام‌های نامربوط یا ناشایست که از طریق اینترنت برای تعداد زیادی از کاربران ارسال می‌شود. ـم.

[←۵۵۶]

literal-minded

[←۵۵۷]

Sacramento Bee:. روزنامه‌ای سراسری که در ساکرامنتو ایالت کالیفرنیا منتشر می‌شود. م

[←۵۵۸]

Eric Horvitz

[←۵۵۹]

Marvin Minsky

[←۵۶۰]

analogy

[←۵۶۱]

Perrier:. شرکت تولیدکننده آب‌های بطری شده. ـم.

[←۵۶۲]

Falklands

[←۵۶۳]

Las Malvinas

[←۵۶۴]

baroque

[←۵۶۵]

Muzak

[←۵۶۶]

Hey Jude

[←۵۶۷]

Hideki Yukawa

[←۵۶۸]

slip

[←۵۶۹]

Henry David Thoreau

[←۵۷۰]

Pulitzer Prize

[←۵۷۱]

National Book Award

[←۵۷۲]

microworld

[←۵۷۳]

Pleistocene.: از دوران‌های زمین‌شناسی که ۲.۵۸۰.۰۰۰ تا ۱۱.۷۰۰ سال قبل رامی‌پوشاند. انسان در این دوران به شکل کنونی خود تکامل یافت. _م.

[←۵۷۴]

fabric

[←۵۷۵]

group length

[←۵۷۶]

successorship

[←۵۷۷]

successor

[←۵۷۸]

predecessor

[←۵۷۹]

University of Michigan

[←۵۸۰]

Ann Arbor

[←۵۸۱]

a priori

[←۵۸۲]

quantun tunneled: اشاره دارد به پدیده‌ای در فیزیک کوانتوم که ذرات در مانعی نقب می‌زنند و راه خود را باز می‌کنند، که در فیزیک کلاسیک قابل تصور نیست. ـم.

[←۵۸۳]

slipnet

[←۵۸۴]

activation

[←۵۸۵]

resistance

[←۵۸۶]

opposite

[←۵۸۷]

codelet

[←۵۸۸]

applet

[←۵۸۹]

sameness

[←۵۹۰]

same

[←۵۹۱]

crosswise

[←۵۹۲]

letter category

[←۵۹۳]

rule-building

[←۵۹۴]

whole-string

[←۵۹۵]

whole

[←۵۹۶]

Gian-Carlo Rota

[←۵۹۷]

mathematical biology

[←۵۹۸]

mechanism

[←۵۹۹]

aetheral

[←۶۰۰]

mechanistic

[←۶۰۱]

string theory

[←۶۰۲]

intuition pump

[←۶۰۳]

swarm intelligence

[←۶۰۴]

Prisoner Dilemma

[←۶۰۵]

self-interested

[←۶۰۶]

selfish

[←۶۰۷]

primate

[←۶۰۸]

mathematical game

[←۶۰۹]

Merril Flood

[←۶۱۰]

Melvin Drescher

[←۶۱۱]

payoff matrix

[←۶۱۲]

turn

[←۶۱۳]

defect

[←۶۱۴]

Thomas Hobbes

[←۶۱۵]

noncooperative

[←۶۱۶]

Anatol Rapoport

[←۶۱۷]

metanorm

[←۶۱۸]

mathematical biologist

[←۶۱۹]

Martin Nowak

[←۶۲۰]

Robert May

[←۶۲۱]

nonspatial

[←۶۲۲]

Karl Sigmund

[←۶۲۳]

territoriality

[←۶۲۴]

simulator

[←۶۲۵]

peer-to-peer

[←۶۲۶]

New Energy Finance

[←۶۲۷]

replicate

[←۶۲۸]

Bernardo Huberman

[←۶۲۹]

Natalie Glance

[←۶۳۰]

Arijit Mukherji

[←۶۳۱]

Vijay Rajan

[←۶۳۲]

James Slagle

[←۶۳۳]

Sebastian Bonhoeffor

[←۶۳۴]

Manuel Galan

[←۶۳۵]

Luis Izquierdo

[←۶۳۶]

Box

[←۶۳۷]

Draper

[←۶۳۸]

Phillip Anderson

[←۶۳۹]

Ersilia

[←۶۴۰]

Portland

[←۶۴۱]

Oregon

[←۶۴۲]

George Lendaris

[←۶۴۳]

. Stanley Milgram

[←۶۴۴]

Episcopal Theological Seminary

[←۶۴۵]

Judith K leinfeld

[←۶۴۶]

synapse. شکاف موجود در محل اتصال دندریت‌ها و اکسون‌های یک نورون با نورون دیگر.

-م.

[←۶۴۷]

graph theory:. در ریاضیات و علم کامپیوتر به معنی پژوهش بر روی گراف‌هاست.

گراف یک ساختار ریاضی است که در مدل‌سازی روابط بین اشیا به کار می‌رود._م.

[←۶۴۸]

Duncan Watts

[←۶۴۹]

Steven Strogatz

[←۶۵۰]

scaling

[←۶۵۱]

Albert-Laszlo Barabasi

[←۶۵۲]

Reka Albert

[←۶۵۳]

routing

[←۶۵۴]

hyperlink

[←۶۵۵]

clustering

[←۶۵۶]

degree

[←۶۵۷]

hub

[←۶۵۸]

small world

[←۶۵۹]

scale-free

[←۶۶۰]

Tom Cruise

[←۶۶۱]

Max von Sydow

[←۶۶۲]

Minority Report

[←۶۶۳]

Cameron Diaz

[←۶۶۴]

Julia Roberts

[←۶۶۵]

My Best Friend 's Wedding

[←۶۶۶]

Kevin Bacon

[←۶۶۷]

C. Elegance

[←۶۶۸]

collective dynamics of «small world» network

[←۶۶۹]

selective

[←۶۷۰]

page rank

[←۶۷۱]

in-link

[←۶۷۲]

hit

[←۶۷۳]

crawling

[←۶۷۴]

order of magnitude: تخمینی از اندازه یا مقدار که معمولا با توانی از ده نشان داده می‌شود.

م.

[←۶۷۵]

bell shaped curve: خم نشان‌دهنده یک توزیع پیوسته فراوانی، که شکل آن شبیه برش عمودی از زنگ است و معمولا برای توزیع نرمال یا طبیعی به کار می‌رود._م.

[←۶۷۶]

characteristic

[←۶۷۷]

normal distribution

[←۶۷۸]

normal

[←۶۷۹]

heterogeneity

[←۶۸۰]

power-law: اشاره به تابعی دارد که مقدار آن برابر با حاصلضرب یک مقدار ثابت در توانی از یک متغیر مستقل است. ـم.

[←۶۸۱]

Web surfing

[←۶۸۲]

macaque. تیره‌ای از میمون‌ها که پژوهش زیادی بر روی سیستم عصبی آنها صورت گرفته است.ـم.

[←۶۸۳]

hippocampus: ساختار عصبی در مغز که عمده ارتباطهای نیمکره‌های راست و چپ از طریق آن صورت می گیرد.ـم.

[←۶۸۴]

visual cortex

[←۶۸۵]

E. Coli. نوعی باکتری که به تعداد زیاد در دستگاه گوارش انسان و جانوران خونگرم زندگی می کند و بعضی از انواع آن قادر به ایجاد بیماریهای وخیم هستند.ـم.

[←۶۸۶]

repressor

[←۶۸۷]

Stuart Kauffman

[←۶۸۸]

. glucose-۶-phosphate

[←۶۸۹]

. fructose-۶-phosphate

[←۶۹۰]

epidemiology

[←۶۹۱]

Gaetan Dugas

[←۶۹۲]

ecosystem

[←۶۹۳]

self-referential

[←۶۹۴]

. preferential attachment

[←۶۹۵]

citation

[←۶۹۶]

Malcolm Gladwell

[←۶۹۷]

tipping point

[←۶۹۸]

robustness

[←۶۹۹]

generality

[←۷۰۰]

curve-fitting. تعیین منحنی با یک ویژگی خاص که بیشترین نزدیکی و انطباق را با تعدادی نقطه در صفحه داشته باشد. م.

[←۷۰۱]

non-scale-free

[←۷۰۲]

Fox Keller

[←۷۰۳]

Cosma Shalizi

[←۷۰۴]

packet:. واحد ارسال اطلاعات در شبکه‌های کامپیوتری که دارای قالب معینی است. در مقایسه با ارسال بیت یا علامت، پکت کاراتر و با قابلیت اطمینان بیشتر اطلاعات را متقل می‌کند. ـ م.

@degar_goonesh

[←۷۰۵]

. U.S Customs and Border Protection

[←۷۰۶]

. Long-Term Capital Management (LTCM)

[←۷۰۷]

Andreas Antonopoulos

[←۷۰۸]

scaling

[←۷۰۹]

Max Rubner

[←۷۱۰]

hamster

[←۷۱۱]

surface hypothesis

[←۷۱۲]

Max Kleiber

[←۷۱۳]

double logarithmic

[←۷۱۴]

log-log

[←۷۱۵]

quarter-power scaling laws

[←۷۱۶]

signature

[←۷۱۷]

James Brown

[←۷۱۸]

Brian Enquist

[←۷۱۹]

topological

[←۷۲۰]

metabolic scaling theory

[←۷۲۱]

terminal unit

[←۷۲۲]

hypervolume

[←۷۲۳]

mitochondria

[←۷۲۴]

Walter Willinger

[←۷۲۵]

George Kingsley Zipf

[←۷۲۶]

Benoit Mandelbrot

[←۷۲۷]

Herbet Simon

[←۷۲۸]

Information and Control

[←۷۲۹]

copying

[←۷۳۰]

sequencing

[←۷۳۱]

ribosome: هریک از اندامک‌های درون سلول که از مولکول RNA و پروتئین تشکیل شده است. ـ م.

[←۷۳۲]

duplication

[←۷۳۳]

identical twins

[←۷۳۴]

alternative splicing

[←۷۳۵]

RNA editing

[←۷۳۶]

epigenetics

[←۷۳۷]

methylation

[←۷۳۸]

methylated

[←۷۳۹]

cloned

[←۷۴۰]

bio-tech

[←۷۴۱]

Evo-Devo

[←۷۴۲]

evolutionary developmental biology

[←۷۴۳]

morphologic

[←۷۴۴]

embryology

[←۷۴۵]

Sean Carroll

[←۷۴۶]

master gen

[←۷۴۷]

junk DNA

[←۷۴۸]

signature subsequence

[←۷۴۹]

binding site

[←۷۵۰]

speciation

[←۷۵۱]

John Mattick

[←۷۵۲]

calmodulin

[←۷۵۳]

Carol Kaesuk Yoon

[←۷۵۴]

nut-cracking finch

[←۷۵۵]

cactus driller

[←۷۵۶]

convergent evolution

[←۷۵۷]

Walter Gehring

[←۷۵۸]

body plans

[←۷۵۹]

Stuart Kauffman

[←۷۶۰]

riffer

[←۷۶۱]

Boolean

[←۷۶۲]

Random Boolean Network

[←۷۶۳]

George Boole

[←۷۶۴]

selflink

[←۷۶۵]

edge of chaos

[←۷۶۶]

genomic

[←۷۶۷]

zygote

[←۷۶۸]

Rube Goldberg machine. این اصطلاح که برگرفته از نام روبی گلدبرگ مخترع و کارتونیست امریکایی (۱۸۸۳۱۹۷۰) است، اشاره دارد به ماشین یا سیستمی که مهندسی پیچیده‌ای در آن به کار رفته ولی کار ساده‌ای را انجام می‌دهد.ـ م.

[←۷۶۹]

The Origins of Order

[←۷۷۰]

extended synthesis

[←۷۷۱]

Guy Hoelzer

[←۷۷۲]

John Pepper

[←۷۷۳]

Eric Smith

[←۷۷۴]

Dan McShea

[←۷۷۵]

historicist

[←۷۷۶]

structuralist

[←۷۷۷]

John Horgan

[←۷۷۸]

fact-free

[←۷۷۹]

pop-science

[←۷۸۰]

complexologist

[←۷۸۱]

Jim Crutchield

[←۷۸۲]

Doyne Farmer

[←۷۸۳]

Norman Packard

[←۷۸۴]

Robert Shaw

[←۷۸۵]

fractal circulation network

[←۷۸۶]

Josiah Macy, Jr

[←۷۸۷]

circular causal

[←۷۸۸]

teleological

[←۷۸۹]

Norbert Wiener

[←۷۹۰]

Warre McCulloh

[←۷۹۱]

Margaret Mead

[←۷۹۲]

Gregory Bateson

[←۷۹۳]

W. Ross Ashby

[←۷۹۴]

Walter Pitts

[←۷۹۵]

Cybernetics

[←۷۹۶]

The Human Use of Human Beings

[←۷۹۷]

Treaty of Versailles: معاهده‌ای که در پایان جنگ جهانی اول به امضاء رسید و به برقراری صلح بین آلمان و قدرت‌های متفق انجامید. ـم.

[←۷۹۸]

decision theorist

[←۷۹۹]

Ludwig von Bertalanffy

[←۸۰۰]

Anatol Rapoport

[←۸۰۱]

Humberto Maturana

[←۸۰۲]

Francisco Varela

[←۸۰۳]

autopoiesis

[←۸۰۴]

self-construction

[←۸۰۵]

synergetics. علم هم‌افزایی اشاره دادر به پژوهش در سیستم‌های در حال تحول، همرا با تأکید بر رفتار کل سیستم و نه اجزای جداگانه آن. ـم.

[←۸۰۶]

dissipative structures

[←۸۰۷]

nonequilibrium systems

[←۸۰۸]

Ilya Prigogine

[←۸۰۹]

critical

[←۸۱۰]

Gregoir Nicolis

[←۸۱۱]

symmetry breaking

[←۸۱۲]

Carlos Gershenson

[←۸۱۳]

. Complexity: ۵ Questions

[←۸۱۴]

predictive

[←۸۱۵]

. Per Bak

[←۸۱۶]

self-organized criticality

[←۸۱۷]

phase transition

[←۸۱۸]

Andre Gide