

سیری در  
نظریهٔ پیچیدگی

ملانی میچل

ترجمهٔ رضا امیرحیمی

فرهنگ نشر نو  
با همکاری نشر آسیم  
تهران-۱۳۹۵

# فهرست مطالب

## پیشگفتار ۱

بخش اول	پس زمینه و تاریخچه
فصل اول	پیچیدگی چیست؟ ۱۱
فصل دوم	دینامیک، آشوب، پیش بینی ۲۸
فصل سوم	اطلاعات ۶۴
فصل چهارم	محاسبه ۸۷
فصل پنجم	تکامل ۱۰۹
فصل ششم	علم ژنتیک به زبان ساده ۱۳۵
فصل هفتم	تعریف و اندازه گیری پیچیدگی ۱۴۴

بخش دوم	حیات و تکامل در کامپیورها
فصل هشتم	برنامه های کامپیوتری تولیدمثل کننده ۱۷۳
فصل نهم	آلگوریتم های ژنتیک ۱۹۱

بخش سوم	محاسبه نمایان
فصل دهم	خودکار سلولی، حیات، جهان هستی ۲۱۷
فصل یازدهم	محاسبه با ذرات ۲۴۰
فصل دوازدهم	پردازش اطلاعات در سیستم های زنده ۲۵۴
فصل سیزدهم	چگونه قیاس کنید (اگر کامپیوتر هستید) ۲۷۹
فصل چهاردهم	آینده مدل سازی کامپیوتری ۳۱۵

بخش چهارم	تفکر شبکه‌ای
فصل پانزدهم	علم شبکه ۳۴۳
فصل شانزدهم	کاربرد علم شبکه در شبکه‌های دنیای واقعی ۳۷۲
فصل هفدهم	راز میزان شدن ۳۹۰
فصل هجدهم	تکامل به زبان پیچیده ۴۱۳

بخش پنجم	نتیجه‌گیری
فصل نوزدهم	گذشته و آینده علوم پیچیدگی ۴۴۱

۴۶۳	یادداشت‌ها و منابع
۴۹۹	کتابشناسی
۵۲۱	واژه‌نامه

## پیشگفتار

تقلیل‌گرایی<sup>۱</sup> 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 نیمکرهٔ چپ مغزش تقلیل‌گرایی را رد کند. – داگلاس هوفستادر، گودیل، ایشر، باخ: آمیزه‌های گرانبها و ابدی<sup>[۱]</sup>\*

تقلیل‌گرایی از قرن هفدهم رویکرد حاکم بر علم بوده است. رنه دکارت 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 لازمهٔ 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.»<sup>[۲]</sup>

از زمان دکارت و نیوتون و سایر بنیادگذاران روش علمی مدرن، تا آغاز قرن بیستم، یکی از هدف‌های اصلی علم توضیح تقلیل‌گرایانهٔ همهٔ پدیده‌ها بر مبنای فیزیک بنیادی<sup>۲</sup> بوده است. در سال ۱۸۹۴ فیزیکدان آلبرت مایکلسون<sup>۳</sup> 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 عمدتاً در کاربرد این اصول در تمامی پدیده‌هایی جستجو کرد که در مرکز توجه ما قرار می‌گیرند.»<sup>[۳]</sup> این نظر او با استقبال اکثر فیزیکدانان اواخر قرن نوزدهم روبرو شد.

1. reductionism

\* شماره‌های درون [ ] نشانهٔ یادداشت‌های مؤلف است که در پایان متن کتاب آمده است.

2. fundamental physics      3. Albert Michelson

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 به‌طور کلی‌تر، 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<sup>۱</sup> اندام‌واره‌های<sup>۲</sup> زنده و بیماری‌هایی که آنها را تهدید می‌کنند؛ 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<sup>۳</sup>، زیست‌شناسی سیستم‌ها<sup>۴</sup>، اقتصاد تکاملی<sup>۵</sup>، و نظریه شبکه<sup>۶</sup> به ورای تقلیل‌گرایی گذار می‌کنند 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 تکیه کلام 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<sup>۷</sup> مبتنی بر بنیان‌هایی علمی هستند که هنوز ابداع نشده‌اند. پاره‌ای از تلاش‌ها برای ساخت چنین بنیان‌هایی، از جمله، شامل علم سیبرنتیک<sup>۸</sup>، علم هم‌افزایی<sup>۹</sup>، علم سیستم‌ها، و تازه در این اواخر علم سیستم‌های پیچیده بوده است.

1. adaptive

2. organisms

3. chaos

4. systems biology

5. evolutionary economics

6. network theory

7. interdisciplinary

8. cybernetics

9. synergetics

در سال ۱۹۸۴، گروهی ناهمگون و چندرشته‌ای از بیست و چهار دانشمند و ریاضیدان در صحرای مرتفع سانتا فه<sup>۱</sup>، در نیومکزیکو<sup>۲</sup>، گرد هم آمدند تا این «ترکیب‌های<sup>۳</sup> نوظهور علم» را به بحث بگذارند.<sup>[۴]</sup> هدف آنها بنیادگذاری مؤسسه تحقیقاتی جدیدی بود که «درباره تعداد بیشماری از سیستم‌های بسیار پیچیده و برهم‌کنش<sup>۴</sup> 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 بپردازد».<sup>[۵]</sup> به این ترتیب انستیتوی سانتا فه، 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<sup>۵</sup> بود؛ یعنی این‌که چگونه کامپیوترها را واداریم مانند آدم‌ها فکر کنند. یکی از انگیزه‌های من در واقع 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 عمیقاً 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، اگر نه هیچ حرفی، حرف کمی برای گفتن داشت، حتی علم اعصاب هم که عملاً 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 صرفاً در سطح نوروها، سیناپس‌های منفرد، و مانند آنها، قابل فهم نبود.

1. Santa Fe

2. New Mexico

3. syntheses

4. interactive

5. artificial intelligence

در نتیجه، گرچه هنوز ابعاد ماجرا برایم روشن نبود، موضوع سیستم‌های پیچیده برایم جالب شده بود. در عین حال احساس می‌کردم رشته تحصیلی خود من، علم کامپیوتر، امکان منحصربفردی برای عرضه دارد. تحت تأثیر پیشگامان اولیه محاسبه<sup>۱</sup>، حس می‌کردم محاسبه در مقام اندیشه، موضوعی است بسیار عمیق‌تر از سیستم‌های عامل و زبان‌های برنامه‌سازی و پایگاه‌های داده‌ها<sup>۲</sup>، 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 برنامهٔ درسی‌اش، «محاسبه در سیستم‌های طبیعی» به همان اندازهٔ مهندسی نرم‌افزار و طراحی همگردان<sup>۳</sup> 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<sup>۴</sup>، در نیومکزیکو، در مورد «محاسبهٔ نوظهور»<sup>۵</sup> سخنرانی کند.<sup>[۶]</sup> او خیلی گرفتار بود و مرا به جای خودش فرستاد. از این‌که 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 مؤسسهٔ آنها که در سانتافه در همان حوالی قرار داشت، دقیقاً 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

1. computation

2. database

3. compiler

4. Los Alamos

5. emergent computation

آنجا حضور داشتند که همگی جنبه‌های متفاوت پرسش واحدی را می‌کاویدند: چگونه به فراسوی پارادایم<sup>۱</sup> سنتی تقلیل‌گرایی و به سوی فهم جدیدی از سیستم‌هایی گام برداریم که ظاهراً به طور کاستی‌ناپذیری پیچیده‌اند.

ایده نوشتن این کتاب وقتی شکل گرفت که برای سخنرانی یادبود آلْم در سانتافه از من دعوت شد - مجموعه سخنرانی‌های سالانه‌ای در مورد سیستم‌های پیچیده برای عموم، که به یادبود ریاضیدان بزرگ استانیسلاو آلْم<sup>۲</sup> برگذار می‌شود. عنوان رشته سخنرانی‌های من این بود: «گذشته و آینده علوم پیچیدگی». سردرآوردن از این‌که 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 در واقع 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، در گذشته و حال، مجذوب خود کرده است: چگونه است که آن سیستم‌هایی در طبیعت که پیچیده و انطباق‌پذیر نامیده می‌شوند - مغزها، جوامع<sup>۳</sup> حشرات، سیستم ایمنی<sup>۴</sup>، سلول‌ها، اقتصاد جهانی، تکامل زیست‌شناختی - چنین رفتار پیچیده‌ای را بر مبنای قواعد زیربنایی ساده‌ای شکل می‌دهند؟ چگونه اندام‌واره‌های وابسته به هم، اما منفعت‌جو<sup>۵</sup>، می‌توانند کنار هم قرار گیرند تا در حل مسائلی همکاری کنند که بقای آنها را در کل

1. paradigm

2. Stanislaw Ulm

3. colony

4. immune system

5. self-interested



تحت تأثیر قرار می‌دهد؟ آیا اصول یا قوانین عمومی وجود دارد که در چنین پدیده‌هایی کاربرد داشته باشد؟ و آیا می‌توان حیات و هوش و انطباق<sup>۱</sup> را به صورت ماشین‌وار<sup>۲</sup> و محاسباتی<sup>۳</sup> فهمید؟ اگر این‌طور است، آیا واقعاً 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<sup>۴</sup>، خود-سامانی<sup>۵</sup>، و پیدایش<sup>۶</sup> (همچنین خود پیچیدگی). 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). 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 اطلاعاتی از آنها کسب می‌کنیم. چیزهایی هستند که این‌گونه علم را

1. adaptation

2. mechnistic

3. computational

4. spontaneous order

5. self-organization

6. emergence

بسیار هیجان آور و لذت بخش و ارزشمند می‌کنند، هم برای این‌که آن را به کار ببندیم و هم برای این‌که از آن شناخت پیدا کنیم. از همه چیز گذشته، امیدوارم بتوانم گیرایی عمیق این ایده‌ها و مناظره‌ها، و هیجان بی نظیر دنبال کردن آنها را به خواننده منتقل کنم.

این کتاب پنج بخش دارد. در بخش اول زمینه‌ای را دربارهٔ پیشینه و درون‌مایهٔ چهار حیطهٔ موضوعی مطرح می‌کنم که برای مطالعهٔ سیستم‌های پیچیده اساسی است: اطلاعات، محاسبه، دینامیک<sup>۱</sup> و آشوب، تکامل. در بخش‌های دوم تا چهارم توضیح می‌دهم که چگونه می‌توان در کامپیوترها<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup> عمیقی را می‌یابد بررسی خواهیم کرد، سیستم‌هایی از قبیل گروه‌های اجتماعی، اینترنت، بیماری‌های همه‌گیر، و سیستم‌های سوخت و ساز<sup>۴</sup> اندام‌واره‌ها. چندین مثال را توضیح خواهیم 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 مسئلهٔ 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

۱. 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.

۲. Computer، به معنای محاسبه‌گر است. با توجه به اهمیت مفهوم محاسبه در این کتاب خواننده باید به این معنا توجه داشته باشد. — م.

3. commonality

4. metabolic system

راهنمایی خواهیم کرد. امیدوارم این کتاب هم برای دانشمندان و هم غیر دانشمندان ارزش خواندن را داشته باشد. گرچه مطلب فنی نیست، کوشیده‌ام که در همهٔ موارد به صورت بنیادی به موضوع بپردازم. برای کسانی که خواهان مطالعهٔ 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 بیاید گشت‌مان را آغاز کنیم.

## بخش اول

# پس زمینه و تاریخچه

علم، عالم خرد<sup>۱</sup> و عالم کلان<sup>۲</sup> را اکتشاف کرده است؛ برداشت خوبی از وضعیت آنها داریم. مرز بزرگ نامکشوف پیچیدگی است.  
– هاینز پاگلز، رویاهای خرد<sup>[۱]</sup>

## فصل یکم

### پیچیدگی چیست؟

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

– جان لاک، جستار درباره فهم 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 بادبزی 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 اترفاگاه 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 بمیرند.»<sup>[۳]</sup> اما نیم میلیون از آنها را کنار هم بگذارید، و این گروه در کل به چیزی تبدیل می‌شود که برخی آن را «آبراندام‌واره»<sup>۱</sup> می‌دانند که «هوش جمعی»<sup>۲</sup> دارد.<sup>[۴]</sup>

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 اظهار نظر می‌کند، «من ای. برِکلی»<sup>۳</sup> (گونه متداول ارتش مورچگان) را مورد مطالعه قرار داده‌ام، و برای من اسرار سازمان اجتماعی آن به مراتب سریع‌تر از آنچه می‌توان درباره ساختار اجتماعی‌اش فهمید، افزایش می‌یابد.»<sup>[۵]</sup>

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<sup>۴</sup>، 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<sup>۵</sup> 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

1. superorganism

2. collective intelligence

3. *E. burchelli*

4. termite

5. machinery

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

این‌گونه پرسش‌ها از جمله مباحث سیستم‌های پیچیده هستند، حیطة‌ای چندرشته‌ای از پژوهش که می‌خواهد توضیح دهد چگونه تعداد زیادی از موجودیت‌های<sup>۱</sup> نسبتاً ساده، بدون برخورداری از هرگونه کنترل‌کننده مرکزی، خود را به شکل یک کل جمعی سازمان می‌دهند که الگوهایی<sup>۲</sup> را به وجود می‌آورد و اطلاعات را به کار می‌گیرد، و در مواردی تکامل می‌یابد و یاد می‌گیرد. واژه *complex* (= پیچیده) از ریشه لاتینی *plectere* می‌آید که به معنی بافتن و درهم 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. بیاپید موضوع را از نزدیک 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 نسبتاً 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 نسبتاً 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

دهند: دقیقاً به چه صورت کنش‌های فردی مورچگان ساختارهای بزرگ و پیچیده 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 تک تک آنها و پیچیدگی جمعی آنها وجود دارد.

## مغز

شناخت پژوه<sup>۱</sup> داگلاس هوفستادر، در کتابش به نام گودل، اشر، باخ، [۶] مقایسه‌ی پر دامنه‌ای بین اجتماع مورچگان و مغز به عمل می‌آورد، که هر دو سیستم‌های پیچیده‌ای هستند که در آنها اجزای ساده‌ای که ارتباط صرفاً ساده‌ای بین خودشان دارند، در جمع منجر به رفتار بفرنج و پیچیده‌ای در سراسر سیستم<sup>۲</sup> («فراگیر»)<sup>۳</sup> 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 ۱-۲ (بالا) به نمایش درآمده‌اند. هر نورون شامل سه بخش اصلی است: بدنه سلول<sup>۴</sup> (جسم<sup>۵</sup>)، شاخه‌هایی که ورودی ارسالی از سایر سلول‌ها را به سلول منتقل می‌کند (دندریت‌ها<sup>۶</sup>)، و تنه واحدی که خروجی سلول به سایر سلول‌ها را منتقل می‌کند (آکسون<sup>۷</sup>). حدوداً می‌توان گفت که هر نورون یا در وضعیت فعال (آتش کردن<sup>۸</sup>) است یا در وضعیت غیرفعال (آتش نکردن). نورون وقتی آتش می‌کند که از طریق دندریت‌هایش

1. cognitive scientist

2. system-wide

3. global

4. cell-body

5. soma

6. dendrite

7. axon

8. firing



از سایر نورون‌ها به حد کفایت سیگنال دریافت کرده باشد. آتش کردن شامل ارسال یک تپ الکتریکی<sup>۱</sup> از طریق آکسون است، که سپس از طریق موادی شیمیایی به نام ناقل عصبی<sup>۲</sup> 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 از مورچگان 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 ۱-۲، 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

1. electrical pulse

2. neurotransmitter

بازیگران قهرمان سیستم ایمنی سلول‌های سفید خون هستند که لنفوسیت<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> روبرو شوند - زنگ خطر را به صدا درآورند. وقتی یک لنفوسیت فعال می‌شود، تعداد بسیار زیادی مولکول - پادتن<sup>۳</sup> - ترشح می‌کند، که می‌توانند مهاجمین مشابه را تشخیص دهند. این پادتن‌ها در جریان یک مأموریت جستجو - و - انهدام در سراسر بدن حرکت می‌کنند. هر لنفوسیت فعال درعین حال با سرعتی فزاینده تقسیم می‌شود و لنفوسیت‌های دختری<sup>۴</sup> 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<sup>۵</sup> که قبلاً مشاهده شده بدن را ایمن می‌کنند.

یک گروه از لنفوسیت‌ها سلول‌های B نامیده می‌شوند (B نشان‌دهنده این است که این‌گونه 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<sup>۶</sup>، 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

1. lymphocyte

2. matching

3. antibody

4. daughter

5. pathogen

6. mutation

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 -و- انهدام ریز اندام‌واره‌های<sup>۱</sup> خاطی بی‌نهایت کارا شده باشند.

انواع متعدد دیگری از سلول‌ها در این هم‌نوایی واکنش ایمنی مشارکت دارند. سلول‌های T (که در غده تیموس<sup>۲</sup> رشد می‌کنند) نقش مهمی در تنظیم واکنش سلول‌های B دارند. درشت‌خوارها<sup>۳</sup> 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 بشمار می‌آید ناشی می‌شود که عملاً 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 دقیقاً 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 خطرهای ایمنی درازمدت را فراهم کند. هنوز دقیقاً نمی‌دانیم این سیستم چگونه از حمله به خود بدن اجتناب می‌کند؛ یا چه چیزی موجب نواقص سیستم می‌شود - مانند بیماری‌های خودایمن<sup>۴</sup>، که در نتیجه آن سیستم به خود بدن حمله

1. microorganism

2. thymus

3. macrophage

4. autoimmune

می‌کند؛ یا راهبردهای تفصیلی ویروس نقص ایمنی انسان<sup>۱</sup> (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 درجهٔ 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 خُرد و هم کلان انطباق‌پذیر هستند. در سطح خُرد، 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<sup>۲</sup> خُرد، 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<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. اقتصاددان قرن هجدهم، آدام اسمیت، این رفتار خود-سامان<sup>۴</sup> بازارها را «دست نامرئی»<sup>۵</sup> نامید: که از کنش‌های خُرد بشمار خریدارها و فروشنده‌ها پدیدار می‌شود.

1. human immunodeficiency

2. self-interest

3. market efficiency

4. self-organizing

5. invisible hand

اقتصاددان‌ها به این موضوع می‌پردازند که بازارها چگونه کار 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 قبلاً در تشریح سایر سیستم‌های پیچیده به کار رفته است: الگوهای پویای نه چندان پیش‌بینی‌پذیر در رفتار اقتصاد جهانی - از جمله، الگوهای حباب<sup>۱</sup> و سقوط<sup>۲</sup> 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 با 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 خود-سامان تصور کرد: افراد، با کمترین یا هیچ‌گونه نظارتی کارهای ساده‌ای را به انجام می‌رسانند: ایجاد<sup>۳</sup> صفحات وب، و برقراری پیوند<sup>۴</sup> 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<sup>۵</sup> بین رفتار موتورهای جستجو و

1. bubble

2. crash

3. posting

4. link

5. coevolutionary

## خواص مشترک سیستم‌های پیچیده

هرگاه جزئیات این سیستم‌های گوناگون را در نظر می‌گیریم کاملاً 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 وبگاه‌ها)، و همچنان که انتظار می‌رود از قواعد نسبتاً ساده‌ای پیروی می‌کنند، بدون این‌که هیچ‌گونه کنترل مرکزی یا رهبری وجود داشته باشد. این کنش‌های جمعی اجزای بشمار 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.

(بعضی اوقات بین سیستم‌های پیچیده انطباق‌پذیر، که در آنها انطباق نقش مهمی بازی می‌کند، و سیستم‌های پیچیده انطباق‌ناپذیر<sup>۱</sup>، 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 خود-سامان 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<sup>۲</sup> و نوظهور و خود-سامان 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 دقیقاً 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<sup>۳</sup>‌های متفاوت بیشماری را در نظر گرفته‌اند؛ اما هیچ یک به صورت فراگیر مورد پذیرش

1. nonadaptive

2. nontrivial

3. measure

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، 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 درعین حال 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.