

## با هسته‌های تحقیقاتی مرکز

### مقیاس

فیزیک به طور سنتی دارای مقیاس مشخصی بوده است. مثلاً، مبحث انرژی‌های بالا به بررسی پدیده‌های ذرات بنیادی اطلاق می‌شود. مقیاس این انرژی در شتابگرهای بزرگ در حدود  $2 \times 10^4$  GeV است. ابزار ریاضی نظریه‌های فیزیک انرژی بالا، نظریه میدان کوانتومی است. اما، مقیاس ابعاد در فیزیک اتمی شعاع اتم هیدروژن، مقیاس انرژی در حدود الکترون ولت، و ابزار ریاضی در این مقیاس، معادله شرودینگر است. مطالعه پدیده‌هایی که در تمامی مقیاسها با آنها مواجه می‌شویم، ابزار ریاضی جدیدی را می‌طلبد. این ابزار از لحاظ تاریخی ناموفق بوده‌اند، در حالیکه بسیاری از پدیده‌های طبیعی در مقیاسهای متعدد یافت می‌شوند. زمین لرزه در مقیاس وسیعی از انرژی در پوسته روی می‌دهد (شکل ۱). جالب اینجاست که سیستمهای پیچیده خصوصیات مستقل از مقیاس هم نشان می‌دهند؛ مثلاً، ساختار ساحل دریا و یا شکل ابرها فرکتالی است. ساختار این پدیده‌ها در تمامی مقیاسها تکرار می‌شود.

سیستمهای پیچیده در کلیه مقیاسها واجد پدیده‌های جدید و اطلاعات اند. هرگاه به سیستم غیر پیچیده‌ای در مقیاس خاص نگاه کنیم، اطلاعات به دست آمده در ظرف زمان و مکان تغییر نخواهد کرد؛ در حالیکه در سیستم پیچیده چنین نیست. در هر مقیاس و هر مقطع زمانی، محتوای اطلاعاتی می‌تواند تغییر کند. البته، باید توجه داشت که در سیستمهای واقعی با سیستمهای محدودی سروکار داریم. در نتیجه، ممکن است پس از مدت زمانی خیلی طولانی سرانجام به تعادل برسیم، و همبستگی اطلاعات حاصل آید. مثلاً، بیش از یک میلیارد سال زمان لازم است تا بیوسپنم (سازگان زیستی) کره زمین به تعادل برسد.

### خارج از تعادل

پیش فرض مهم روش تقلیلی این است که می‌توان سیستمهای بسته‌ای را مطالعه کرد که در حالت تعادل اند، و یا دست کم زمان و اهلش آنها چندان کوتاه است که سیستم همواره در نزدیکی حالت تعادل فرار می‌گیرد. خصوصیت سیستمهای پیچیده عبارت است از دوری آنها از حالت تعادل و یا دست کم کوتاه‌تر بودن مدت زمان مشاهده از زمان و اهلش سیستم. مدل‌های شیمه‌اسینی چنین خصوصیتی دارند. در مدل‌های شیمه‌اسینی، تعداد زیادی اسپین برهمکنشهای کاتوره‌ای دارند:

$$H = \sum_{i,j} S_i W_{ij} S_j \quad P(W_{ij}) \times e^{-W_{ij}/J}$$

از مدلها برای توصیف کارکرد شبکه‌های عصبی انسان نیز استفاده شده است<sup>۲</sup>. شاید تصور حالت مغزمان برای ما آسان نباشد، ولی دوری از تعادل واضح است. در مدلی که هاپفیلد از حافظه ساخته است، شبکه عصبی

### سیستمهای پیچیده

شاهین روحانی

مرکز تحقیقات فیزیک نظری و ریاضیات

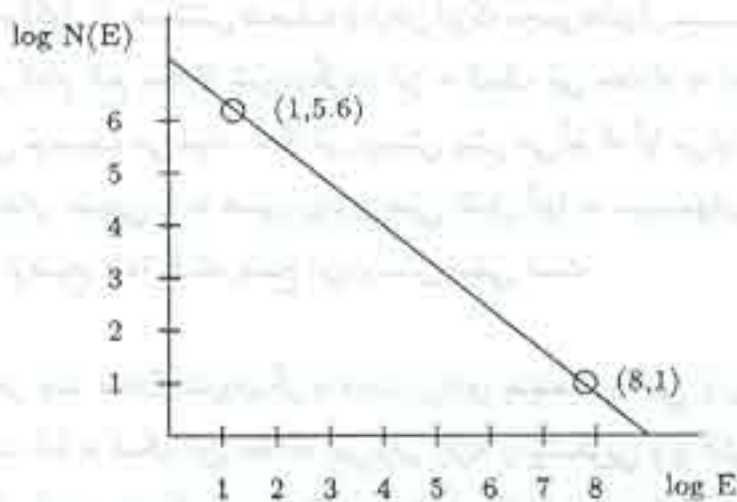
معادله شرودینگر پدیده‌های بسیاری، از جمله طیف اتم هیدروژن و جدول مندلیف، را توضیح می‌دهد. سیستمهای پیچیده‌تر، مانند گازهای متشکل از چند مولکول با برهمکنش ضعیف، با فرض این که مجموعه‌ای از سیستمهای اندک هر کدام تابع معادله شرودینگرند، نیز به کمک این معادله به نحو نسبتاً دقیقی توصیف می‌شوند. حالا این پرسش پیش می‌آید که آیا می‌توان تمامی پدیده‌های طبیعی را به همین روش، یعنی تقلیل آنها به سیستمهای ساده و بسته توضیح داد؟ البته، پاسخ این پرسش منفی است.

هر چند معادله شرودینگر با دقت زیادی پدیده‌های اتمی را پیش‌بینی می‌کند، اما به کمک این معادله نمی‌توان زلزله را پیشگویی و یا آتش سوزی جنگل را توصیف کرد. به اعتقاد جمله فیزیکدانان، این ناتوانی ناشی از محاسبات بسیار پیچیده‌ای است که باید از مقیاس ملکولهای درختان جنگل گرفته، تا مقیاس کل جنگل در حال سوختن، انجام شود. البته، این محاسبات از عهده هیچ کامپیوتری هم بر نمی‌آید. اما عده کمی از فیزیکدانان هم معتقدند که سیستمهای در طبیعت یافت می‌شوند که به روش تقلیلی تن نمی‌دهند. رفتار این سیستمها را در مقیاس بزرگ، نمی‌توان از قوانین کوچک مقیاس آنها پیش‌بینی کرد. چنین سیستمهایی را پیچیده می‌نامیم.

در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ پدیده آشوب در سیستمهای دینامیکی کشف شد. در سیستمهای آشوبناک، همبستگی زمانی پس از مدت مشخصی از بین می‌رود، و هر چند سیستم از قانون جبرگرایانه (Deterministic) پیروی می‌کند، اما امکان پیش‌بینی دراز مدت برای آن وجود ندارد. همین پدیده را در فضا هم تصور کنید. یعنی، سیستمی را در نظر بگیرید که در آن خطاهای مشاهده در فواصل کوتاه زمانی از رشد بسیار زیادی برخوردار باشند و از مقیاس کمیت مشاهده شده فراتر روند. چنانچه اطلاعات مربوط به یک سیستم در محدوده وسیعی از مقیاسهای فضا و زمان واجد انسجام و همبستگی نباشد، چنین سیستمی «پیچیده» است. برای توصیف این گونه سیستمها به روشهای جدید نیاز داریم. روشهای تحلیل سیستمهای پیچیده، در طی سالهای اخیر به تدریج تدوین شده‌اند<sup>۱</sup>.

به این سیستمها در بسیاری از حوزه‌های علوم، مانند فیزیک، زیست‌شناسی، و حتی اقتصاد برمی‌خوریم. سیستمهای یاد شده خصوصیات مشخصی دارند. ما در اینجا به اختصار به دو ویژگی سیستمهای پیچیده می‌پردازیم.

سیستم در یک حالت بحرانی قرار دارد که در آن دائماً اشکال خود مشابه به وجود می‌آیند و از بین می‌روند. در این حالت، سیستم با عملکرد S.O.C و خارج از تعادل، به حالت بحرانی با طول عمر طولانی می‌رسد. مشخصه این حالت بحرانی فورانه‌های تبدیل انواع است. فرض کنید که هر رویداد به تعدادی رویداد در نسل بعدی منجر شود. اگر میانگین تعداد رویدادهای نسل بعدی یک باشد، هر آشکار تبدیل انواع، نهایتاً پایان خواهد یافت. از نظریه فرایندهای شاخه‌ای (branching processes) بی‌برده می‌شود که احتمال مشاهده یک مجموعه از رویدادها با ابعاد  $s$ ، با  $s^{-2/2}$  متناسب است؛ شباهت این رابطه با وقوع زلزله (شکل ۱) جالب است.



شکل ۱

چند قرن است که طرز تفکر تقلیل‌گرا (reductionist) بر حوزه علم فیزیک حاکم است و بشر فقط به بررسی پدیده‌های تقلیل پذیر پرداخته و سایر پدیده‌ها را به عنوان مسائل دشوارتر، کنار نهاده است؛ در حالیکه این پدیده‌ها در واقع تقلیل ناپذیر بوده‌اند.

در چند سال اخیر بررسی پدیده‌های تقلیل ناپذیر آغاز شده است. تقلیل ناپذیری با خصوصیتی توأم است که توصیف آنها را دست کم در مقیاس بالا ممکن می‌کند. در پرتو این پیشرفت، تحلیل پدیده‌های مهمی از قبیل زلزله، تلاطم، و تبدیل انواع در یک چارچوب، میسر شده است.

از توزیع انرژی در شبیه سازی زلزله، قانون کوتبرگدیشتر، یعنی رابطه  $N(E) \times E^{-\alpha}$  به دست می‌آید (تعداد زلزله با انرژی  $N(E) = E^{-\alpha}$ ) رفتار نمایی در سیستم‌های پیچیده در تمامی مقیاسها به چشم می‌خورد.

### مراجع

1. M. Pak and M. Paczaski, *Physica World* 39(1993).
2. Kirkpatrick, D. Sherrington, *Phys. Rev. Lett.* 35(1975), 1792.
3. D. J. Amit, *Modeling Brain Function*, Wiley, 1989.
4. G. Parisi, *Replica Symmetry Breaking*, *J. Phys. A* 13(1980), 1887.
5. Kirkpatrick, D. Sherrington, *Phys. Rev. Lett.* 59(1981).
6. N. Barton and S. Rouhani, *Genetic Research*, 26 (1992), 403.
7. S. Kaufman, *origins of order*, Oxford University Press, 1989.
8. P. Bak and M. Pacruski, *Physica World*, 39(1993).

می‌نیم‌های متعددی دارد و هر یک از می‌نیم‌های اصلی یک حافظه را تشکیل می‌دهد. اما این سیستم، می‌نیم‌های موضعی متعدد هم دارد که هر لحظه ممکن است در نزدیکی یکی از این می‌نیم‌های متعدد قرار داشته باشد. عملکرد حافظه با حضور سیستم در یکی از می‌نیم‌های اصلی مترادف است. وجود ایشیم‌های متعدد، از نشانه‌های سیستم پیچیده به شمار می‌آید. مثلاً، در مدل هابیلد شکست تقارن تشابهی اتفاق می‌افتد<sup>۲</sup>، شکست این تقارن که فضای فاز این سیستم را به قطعات متعدد تقسیم می‌کند، که نهایتاً شکل خود مشابه به خود می‌گیرد. در برخی سیستم‌های پیچیده، انرژی به طور مرتب دریافت و انباشته می‌شود، که یا یکباره (ریزش بهمن، زلزله) رها، و یا در تمام مقیاسها به صورت آبخاری متلاطم، تلف می‌شود. در صورت اول، سیستم ظاهراً در حالت تعادل است، ولی مقدار اندکی انرژی به پیدایش بهمن بزرگی از انرژی می‌انجامد. پرباک، چاو تانک، و کرت ویزنفلد<sup>۵</sup> نشان داده‌اند که شیب کره یا تپه شنی قبل از ریزش حالت بحرانی دارد. شکل آن از شکل نیروهای میکروسکوپی مستقل است.

سیستم‌های تعادلی ترمودینامیکی نیز دارای حالت بحرانی‌اند. این سیستم‌ها، مانند سیستم‌های «پیچیده»، از مشخصه‌های حالت سیستم بحرانی عالم به شمار می‌آیند؛ یعنی، از نیروهای میکروسکوپی مستقل‌اند. اما حالت بحرانی آنها فقط در مقدار خاصی از یک پارامتر، مانند دما، حاصل می‌شود. در حالیکه در برخی سیستم‌های پیچیده مثل ریزش بهمن، حالت بحرانی خود به خود حاصل می‌شود و به تعیین پارامتر خاصی نیاز نیست. به این پدیده در سیستم‌های پیچیده «بحرانی بودن خود سازمان یافته» می‌گویند، که نخستین بار در مقاله پرباک، چاو تانک و کرت ویزنفلد از آن یاد شده است. همین گروه نشان داده‌اند که نوفه  $1/f$  که در بسیاری از پدیده‌ها یافت می‌شود، می‌تواند ناشی از S.O.C باشد.

سیستم‌های بیولوژیکی، با برخورداری از پیچیدگی و زمان و اهلیش طولانی، از جمله نامزدهای مطلوب سیستم‌های پیچیده در می‌آیند. کاربرد مدل‌های فیزیک نظری و بیولوژی، سابقه نسبتاً موفقی دارد. برخی از پدیده‌های ماکروسکوپی بیولوژیکی را می‌توان در چارچوب پدیده‌های بحرانی توصیف کرد<sup>۶</sup>.

بنابریکی از مدل‌های اکوسیستم، حیات به صورت «تطابق در مرز آشوب» بیان می‌شود. شبکه‌ای از اجزای مرتبط به هم را در نظر بگیرید، که هر جزء یا عضو تحت قانون مشخصی با همسایگانش برهمکنش دارد. مدل شیماسپینی چنین سیستمی است. نظریه کئی چنین سیستم‌هایی را خودکار یاخته‌ای (cellular automata) نامیده‌اند. کافمن<sup>۷</sup> چنین مدلی را از اکوسیستم ارائه می‌کند. این مدل می‌تواند در دو فاز متفاوت به حالت تعادل برسد. یکی فاز منظم که طی آن تمامی اعضای شبکه به حالت ثابتی رسیده‌اند و شاید در میان دریای نظم، جزیره‌های کوچکی از اجزای متغیر باقی بمانند. فاز دیگر، نامنظم است که برعکس فاز اول اغلب اجزای آن، جز جزیره‌های سکون، در حالت تغییر و ناهماهنگ قرار دارند. بین این دو فاز،