مقدمه‌ای بر پیچیدگی

ترجمهٔ آزاد: احمد ماکوئی

عضو هیئت علمی کارشناسی ارشد سازمان مدیریت صنعتی

چکیده: پیچیدگی جهان در تضاد با سادگی قوانین فیزیکی قراردارد. در سالهای اخیر رفتارهای غیر خطی و پویای سیستمها به طور وسیع مطالعه شده است، یعنی رفتارهایی که منجر به پیچیدگی و در نهایت آشوب می شوند. مطالعهٔ این رفتارها، منتهی به وضع قوانین جدیدی در طبیعت نشده ولی باعث شده‌اند تا بتوانیم قوانین موجود را عمیقتر درک کنیم. یکی از نکات جالب توجه در پیچیدگی این است که به رغم تصورات پیشین، قوانین ساده می‌توانند منجر به بروز رفتارهای بسیار پیچیده شوند. این موضوع می‌تواند منجر به شناخت عمیقتر عملکرد سیستمها و رفتارهای اجتماعی و سازمانی شود. از همین روست که در حال حاضر اندازه‌گیری پیچیدگی و راههای کاهش آن در سازمانها و فرآیندهای تصمیم گیری به یکی از مباحث روز تبدیل شده است. همین گستردگی مبحث پیچیدگی باعث شده است که مشارکت تمام علوم نظیر ریاضایت، فیزیک، مکانیک شاره‌ها، شیمی، مدیریت در تحلیل آن اجتناب ناپذیر شود.

در مقالهٔ حاضر سعی شده است تا کلیاتی از پیچیدگی و انواع آن ارائه شود و نقش آن در طبیعت و سیستمهای تولیدی مورد مطالعه قرار گیرد.

کلید واژه ها: پیچیدگی، پیچیدگی ایستا، پیچیدگی پویا، خود سازماندهی، آشوب

مقدمه

یکی از وجوه اساسی علم که آن را از هنر و ادبیات متمایز می کند امکان بیان آن به کمک اعداد و کمی کردن آن با استفاده از روابط ریاضی است.این پدیده چنان فراگیر شده است که بسیاری از اوقات کار علمی براساس کیفیت ریاضیات آن سنجیده می‌شود و نه محتوای تجربه‌اش. به‌کارگیری روابط ریاضی، علاوه بر ایجاد شرایط جدید برای نگرش به پدیده‌ها (نوآوری)، نوعی سیستم ارزشی برای اندازه‌گیری و کمی کردن نیز به‌وجود می آورد.

نظریهٔ پیچیدگی مطمئناً راه جدیدی برای نگاه کردن به پدیده‌هاست و به تدریج در حال تغییر دادن

تکنیکهای ریاضی سنتی است. به همین دلیل نیز برخی از دانشمندان نظریهٔ پیچیدگی را گنگ و مبهم می‌دانند و آن را شایستهٔ عنوان علم نمی‌شناسند. نیاز به تکنیکهای جدید ریاضی جهت مواجهه با علوم جدید، موضوع تازه‌ای نیست (ریاضیات نیوتونی و لایبنیتز، توپولوژی پوآنکاره، هندسهٔ غیر اقلیدسی ریمان، آمار بولتزمن و نظریهٔ مجموعه‌های کانتور). تمام این دیدگاههای جدید در ریاضیات به دلیل نیاز به کمی کردن نظریه‌های جدید علمی که در آن زمان پا به عرصه وجود گذاشته بودند ابداع شدند.

نظریهٔ پیچیدگی

بهتر است در اینجا نگاهی به اجزای اصلی یک سیستم پیچیده بیندازیم. به‌طور کلی هر سیستم پیچیده یک سیستم کاملاً عملکردی است که شامل اجزای متغیر و وابسته به هم است. به بیان دیگر، برخلاف یک سیستم کاملاً سنتی (نظیر هواپیما) اجزا دارای ارتباطات دقیقاً تعریف شده و رفتارهای ثابت یا مقادیر ثابت نیستند و عملکردهای انفرادی آنها نیز ممکن است با روشهای سنتی قابل تبیین نباشد. به رغم این ابهام، این سیستمها بخش اعظم جهان ما را تشکیل می‌دهند و ارگانیسمهای زنده و سیستمهای اجتماعی و حتی بسیاری از سیستمهای غیر ارگانیک طبیعی نیز در زمرهٔ آنها قرار می‌گیرند.

پیچیدگی ایستا (نوع اول). براساس نظریهٔ پیچیدگی اجزایی که دارای برهم کنشهای بحرانی هستند خود را به گونه‌ای سازمان دهی می‌کنند که به سوی ساختارهای تکاملی پیش روند و سلسله مراتبی از خصوصیات سیستمهای غالب را ایجاد کنند. در این نظریه سیستمها را باید به صورت یک کل نگریست و برخلاف دیدگاههای سنتی، از تجزیه و ساده سازی آنها پرهیز کرد. به دلیل وجود عوامل غیر خطی در سیستمهای به شدت وابسته به هم، دیدگاههای سنتی قادر به تجزیه و تحلیل نیستند. در اینجا علتها و معلولها قابل تفکیک از هم نیستند و مجموع اجزا برابر با کل نخواهد شد. رویکرد مورد استفاده در نظریهٔ پیچیدگی بر مبنای تکنیکهای جدید ریاضی قرار دارد که سر منشأ آنها را باید در شاخه های مختلف چون فیزیک، زیست شناسی، هوش مصنوعی، سیاست و ارتباطات راه دور جستجو کرد. ساده‌ترین شکل پیچیدگی که معمولاً توسط ریاضی دانان و دانشمندان مورد مطالعه قرار می گیرد، در ارتباط با سیستمهای ثابت است. در اینجا فرض می کنیم که ساختار مورد نظر در طول زمان تغییر نمی کند. به بیان دیگر، به اصطلاح دانشمندان سیستم، با یک تصویر ثابت از سیستم سرو کار داریم. به عنوان مثال، می توان به یک ریز تراشهٔ کامپیوتر نگاه کرد و آن را پیچیده یافت. می‌توان آن را با یک مدار الکترونیک مرتبط دانست و برای تعیین پیچیدگی نسبی آن، آن را با سیستمهای جانشین مقایسه کرد (مثلاً از نظر تعداد ترانزیستورها).

می‌توان همین کار را با اشکال زندهٔ حیات نیز انجام داد و آنها را بر حسب تعداد سلولها، تعداد ژنها و غیره اندازه گیری کرد. تمامی این جنبه های کمی، فاقد مهمترین مسئلهٔ تفکر در پیچیدگی هستند و آن این است که آیا واقعاً پیچیدگی به تعداد اجزا بستگی دارد و چرا پیچیدگی سیستمی مثلاً با ۱۰۰ جزء متفاوت با سیستم دیگر با همین تعداد اجزاست. برای نگرشی دقیقتر به این سئوال، نیازمندیم به دنبال الگوها و آمارهای کمیتها باشیم. روشن است که پیچیدگی ترتیبی از ۵۰ توپ سفید و ۵۰ توپ سیاه، از پیچیدگی ۵ توپ سیاه، ۱۷ توپ سفید، ۳ توپ سیاه، ۳۳ توپ سفید و ۴۲ توپ سیاه کمتر است. با این حال معنای چنین ترتیبی نامشخص است. آیا ترتیب تصادفی است یا معنادار؟ هنگامی که چنین تحلیلهایی به سه بعد تعمیم داده می‌شوند و بیش از یک مشخصه برای هر جز تعریف می‌شود (اندازه، چگالی، شکل) پیچیدگیهای احتمالی به نحوه غیر قابل تصوری افزایش می یابند و توانایی ریاضیات موسوم را به چالش فرا می‌خوانند. در اینجا صرفاً یک سطح مورد نظر قرار داشت ولی در طبیعت سطوح مختلفی از ساختار در تمام سیستمها وجود دارند و این سطوح باعث افزایش پیچیدگی خواهند شد (پیچیدگی یک مولکول، به علاوهٔ سلول، به علاوهٔ ارگانیسم، به علاوهٔ اکوسیستم، به علاوهٔ سیارهٔ زمین و ...). این پدیده باعث می‌شود تا ریاضیات پیچیدگی ایستا نیز دشوار باشد.

پیچیدگی پویا (نوع دوم). با افزایش بعد چهارم، یعنی زمان، موقعیت بسیار بغرنجتر خواهد شد. از زاویهٔ دید مثبت، شاید تشخیص الگوها با تغییراتشان در زمان ساده تر از حالت سکون آنها باشد (فصول، ضربان). اما از سوی دیگر ممکن است با اجازه دادن به اجزا برای تغییر با زمان، الگوهای حالت سکونی را که قبلاً شناسایی کرده بودیم و طبقه بندیهای انجام گرفته بر پایهٔ آنها از دست بروند (برگها سبز هستند، به جز در پاییز که زرد می‌شوند و در زمستان که اصلاً وجود ندارند!).

تشخیص عملکرد، یکی از راههای اصلی تحلیل علمی است. پرسش «سیستم چه کاری انجام می‌دهد؟» و به دنبال آن «چگونه این کار را انجام می‌دهد؟» هر دو دارای مفهوم حرکت در زمان هستند. با توجه به ضعف ما در بررسی تجربیات تکرارپذیر، مهم خواهد بود که تشخیص دهیم آیا پدیدهٔ مورد مطالعه ایستاست یا آنکه دارای تغییرات دوره‌ای است. علم همواره با آزمایش و تأیید آزمایشها سروکار دارد و پیشنیاز این امر، داشتن نمونه‌های متعدد است. روابط ریاضی مورد استفاده به گونه‌ای هستند که برای داده‌های یکسان، همواره پاسخهای یکسانی را ارائه می کنند و این یک نکتهٔ اساسی در نظریهٔ پیچیدگی است. ما در بسیاری از اوقات ناچار می‌شویم تا به طور مصنوعی پیچیدگی

پدیدهٔ مورد بررسی را کاهش دهیم تا در چارچوب محدودیت فوق قرار گیریم. یک فرد دارای وجوه گوناگونی است ولی، او را با آن دسته از مشخصه‌هایش تعریف می کنیم که در طول زمان بدون تغییر باقی می‌مانند (و یا قابل پیش بینی هستند) نظیر نام، رنگ پوست، ملّیت یا سن، شغل، قد و مانند آنها. نظریهٔ پیچیدگی نیازمند آن است که سیستم را به صورت یک کل مورد بررسی قرار و از آن تعریفی به دست دهیم که تمامی جنبه‌های آن را پوشش دهد و در این نقطه است که روشهای سنتی و ریاضی پاسخگو نخواهند بود.

پیچیدگی تکاملی (نوع سوم). یکی از پدیده‌های مهم در اطراف ما پدیده‌های ارگانیک هستند. بهترین مثالهای مربوط به این پدیده‌ها، مربوط به نظریهٔ نوین داروین در انتخاب طبیعی است که طی آن سیستمها در طول زمان تکامل پیدا می‌کنند و سیستمهای دیگری ابداع می‌شوند (مثلاً یک موجود دریایی تبدیل به یک موجود خشکی می‌شود). این شکل از تغییر که ظاهراً منتهایی نیز برای آن قابل تصور نیست، بسیار بغرنجتر از آن است که پیش از این انگاشته می‌شد. می‌توان همین مفهوم تغییرات غیردوره‌ای را با مواردی چون سیستمهای ایمنی بدن، آموزش، هنر و کهکشانها نیز توسعه داد. طبقه بندی پیچیدگی، عملاً به معنای برداشتن قدم دیگری، به سوی تاریکی خواهد بود چرا که اگر امکان شمارش مصداقهای آن وجود نداشته باشد چگونه می‌توان نام علم را بر آن نهاد؟

پاسخ این سئوال به مبحث الگو باز می‌گردد. در هر سیستم پیچیده، ترکیبات بسیار زیادی از اجزا می‌توانند وجود داشته باشند و در حقیقت می‌توان مشاهده کرد که بسیاری از این ترکیبات پیش از این هرگز در طول حیات جهان وقوع پیدا نکرده‌اند. با بررسی تعداد زیادی از سیستمهای متفاوت، می‌توان شباهتها (الگوها) را در آنها تشخیص داد و طبقه بندی هایی را برای تعریف آنها ایجاد کرد. این تکنیکها، که می توان آنها را آماری دانست، بسیار مناسب اند و راهنمایی‌هایی کلی ارائه می‌کنند، ولی فاقد یک نیازمندی اساسی در کار علمی هستند و آن قابلیت پیش‌بینی است. در به کارگیری علم (فناوری) ما نیازمند آن هستیم که سیستم را به گونه‌ای طراحی و ایجاد کنیم که وظایف خاصی را به انجام برساند واین یعنی خواسته‌ای که به نظر نمی‌آید از دیدگاه تکاملی قابل بررسی و تعمیم باشد.

پیچیدگی خود سازمان دهی (نوع چهارم). آخرین شکل سیستم پیچیده، شکلی است که مهمترین و جدیدترین نوع در نظریهٔ پیچیدگی محسوب می‌شود. در اینجا محدودیتهای داخلی سیستمهای بسته (نظیر ماشینها) با تکامل خلاقانهٔ سیستمهای باز (نظیر مردم) با همدیگر تلفیق

می‌شوند. در این دیدگاه سیستم با محیط خود تکامل می یابد به گونه‌ای که پس از مدتی، دیگر سیستم در طبقه بندی قبلی خود نمی‌گنجد. در اینجا می‌بایستی عملکردها و وظایف سیستم به گونه‌ای تعریف شوند که چگونگی ارتباط آنها با جهان وسیع خارج از سیستم مشخص شود. از انواع قبلی سیستمهای گسسته و سیستمهای خود نگهدارنده، به نظر می‌آید که به مفهومی از پیچیدگی رسیده‌ایم که نمی‌توان آن را از دیگاه کیفی یک سیستم جدا دانست.

عملاً سیستمهای خود تکاملی نظیر بوم‌شناسی و زبان سعی دارند عملکردهای خود را کاملاً با تطابق با محیط شکل دهند و عملاً از این دیدگاه می‌توان روش شناسی‌ای را تدوین کرد که طی آن فرایند طراحی از درون سیستم به برون آن سوق داده شود. ما می‌توانیم به جای طراحی خود سیستم، محیط آ ن را طراحی کنیم (محدودیتها) واجازه دهیم تا سیستم خود به گونه‌ای تکامل یابد تا پاسخ صحیح را بیابد، نه آنکه پاسخی از طرف ما به سیستم تحمیل شود. این دیدگاه در فناوری ارگانیک، دیدگاهی جدید و نتایج آن در حال حاضر در مهندسی ژنتیک و طراحی مدارها در حال بررسی است.

از دیدگاه نظریهٔ پیچیدگی، بسیار مایل هستیم پیش‌بینی کنیم کدام حل غالب از بین شقها و محدودیتهای گوناگون رخ خواهد داد.

مقدمات کمی سازی پیچیدگی

اگر اعتقاد داشته باشیم که روشهای سنتی کمی سازی در قالب پارامترهای ایستا و یا فرمولها، برای سیستمهای پیچیده غیر کافی هستند، پس چه جانشین دیگری را می‌توان برگزید؟ مخصوصاً با مقادیر ثابت و متغیرهایی که در طول عمر سیستم وقوع خواهند یافت چه باید کرد؟ اصولاً نیازمند آن هستیم که اجازه دهیم تمام پارامترها در سیستم متغیر باشند (در مقیاسهای متفاوت زمانی عمل کنند) و نیز اجازه دهیم تا تعداد پارامترها به صورتی پویا افزایش یا کاهش یابند (شبیه سازی تولد و مرگ). این پدیده نوعی تخطی از سنتها در علوم به شمار می‌رود و نیازمند چیزی است که **کوهن**[1] نام آن را انقلاب علمی گذاشته است.

با توجه به مسائل گوناگونی که در نظریهٔ پیچیدگی با آنها مواجه خواهیم بود، حال می‌توان به مجموعهٔ کارهایی که در خصوص کمی کردن این نظریه در حال انجام هستند اشاره کرد. این کارها براساس ۵۰ سال تحقیقات روی نظریهٔ عمومی سیستمها یا سیبرنتیک، در زبان، دینامیک و بوم شناسی، ژنتیک مدرن، علوم تلفیقی و هوش مصنوعی قرار دارند. موفقیتها و شکستهای این ۵۰ سال به ما کمک خواهند کرد تا بتوانیم با ایجاد فرضیات صحیحتر و بهره ورتر راه درست را بیابیم.

---

1. Kuhn

فرضیات و اهداف. در تفکر پیچیدگی، ما به دنبال معیارها و اندازه‌گیریهای مطلقی هستیم که بتوان آنها را در تمامی محدوده‌ها به کار گرفت. این فرض، در کنار دیگر فرضهای مرتبط، نظیر غیر قابل پیش بینی بودن، عدم تعادل، حلقه‌های علّی، غیر خطی بودن و باز بودن، بدین معناست که جهان ما از بسیاری جهات بسیار متفاوت با آن چیزی است که علوم سنتی به دست می دهند.

اهداف زیادی را می‌توان برای نظریهٔ پیچیدگی بیان کرد که عبارت‌اند از:

- توضیح ساختارهای غالب (خودسازمان دهی)[1]
- اندازه گیری پیچیدگی نسبی(پارامترهای چند گانه سلسله مراتبی)
- تدارک روشهای کنترل سیستمهای پیچیده (نقاط عطف)[2]
- به وجود آوردن مدلهای کارآ (تلخیص)
- به دست دادن پیش گویی کننده های آماری (محدودیتها)
- حل مسائل غیر معمول (میان بر)[3]
- نمایش کاربردهای جدید محتمل (نوآوری)
- کمی کردن قوانین ترتیب و اطلاعات

برای تمام اهداف می بایستی روشهای عملی کمی سازی ایجاد شوند (یعنی باید قابل محاسبه باشند). ما نیازمند ریاضیاتی هستیم که قادر باشد سیستمها را به همان راحتی که انسان الگوها را تشخیص و طبقه‌بندی می‌کند از همدیگر تشخیص دهد و به علاوه امیدوار هستیم که قادر به پیشگویی لااقل برخی از جنبه های آیندهٔ سیستم از رفتار گذشتهٔ آن یا وضعیت حال آن باشیم و به این طریق برخی کنترلها را بر سیر توسعهٔ آن اعمال کنیم.

تحلیل سیستمهای پیچیده. پیش از تلاش برای اعمال هر نوع تکنیک کمی سازی به سیستمها یا سازمانها، می‌باید تصمیم بگیریم که آیا آنها در تمام جنبه‌های خود پیچیده هستند و نیز آیا پیچیدگی خود سازمان دهی در آنها وجود دارد یا خیر. برای این منظور می‌توان از خصوصیات عمومی SOC برای طبقه بندی این نوع از سیستمها استفاده کرد:

۱. نمایهٔ نحوهٔ اتصال

اجزا به طور متوسط دارای بیش از یک ورودی و بیش از یک خروجی هستند (ولی نه آنقدر زیاد که منتهی به آشوب شود)

۲. وضعیت تبدیل

نسبت به ورودیهای مورد استفادهٔ سیستم و متوسط خروجیهای ایجاد شده توسط آن به طور تقریبی برابر با ۱ است. اگر این اختلاف بسیار کمتر از ۱ باشد سیستم به سمت یک وضعیت ایستا همگرا و اگر بسیار بیشتر از ۱ باشد، سیستم به سمت وضعیت آشوبناک واگرا خواهد شد.

---

1. Self-organization
2. Steering points
3. Breakthrough

۳. قابلیت یادگیری

اجزا قابلیت یادگیری از تجارب گذشته را دارند. این یادگیری برای تغییر دادن قواعد سیستم و بهینه سازی انتقال وضعیتها به کار می رود.

۴. عملکرد موازی

برخی از اجزا به طور خودکار و موازی فعالیت می کنند. این پدیده باعث ارتقای سرعت پاسخگویی و قابلیت تطابق سیستم خواهد شد.

۵. تغییر برهم کنشها

اجزا قادرند اجزای دیگر را که با آنها برهمکنش دارند تغییر دهند. این تغییر می‌تواند دائمی یا موقت باشد.

۶. حلقه های بازخورد

در حلقهٔ بازخورد خروجیها به سمت ابتدای فرایند بازگشت داده می‌شوند به گونه‌ای که نتایج عملکردهای واقعی باعث تصحیح فرآیند خواهد شد.

۷. قابلیت کنترل

تمام متغیرها برای ثبات باید قابل کنترل باشند (متغیرهای غیر قابل کنترل معرف پتانسیل آشوب هستند) ولی کنترل نباید باعث ایجاد تغیر شود، بلکه صرفاً باید سیستم را در محدوده‌های تعریف شده نگهدارد.

۸. حوزه های جذب

راههای مختلفی در دسترس هستند که می‌توانند به یک هدف برسند. انعطاف‌پذیری پاسخ و آزادی خلاقیت در اینجا مطرح است.

۹. مرزهای خارجی

مرزهای سیستم نه کاملاً بسته‌اند و نه کاملاً باز، از صافی گذراندن اطلاعات در اینجا لازم به نظر می‌رسد.

۱۰. عملکرد سیستم

اهداف یا عملکردها می‌توانند چند گانه باشند، این امر یک وجههٔ چند بعدی به سیستم خواهد بخشید.

۱۱. بلوکهای سازنده

زیر سیستمها در ابعاد مختلف می‌توانند وجود داشته باشند که یک ساختار مدولی و فراکتال به سیستم می‌بخشند.

۱۲.خواص غالب

عملکردهای برنامه‌ریزی نشده در طول عملیات مغلوب و به کنار گذارده خواهند شد.

در حقیقت مدولها، بر اثر برهم کنش اجزا خود را سازمان دهی می‌کنند.

۱۳. ثبات سیستم

برخی اختلالات داخلی و خارجی می‌توانند در درون سیستم مضمحل شوند ولی برخی دیگر باعث بروز عوارض غیر منتظره‌ای در سیستم می‌شوند. قانونی برای میزان انتشار و طول اثر گذاری اختلالات باید وجود داشته باشد.

۱۴. کنترل غیر متمرکز

کنترل در تمام سیستم توزیع شده است و تصمیمهای موضعی توسط اجزا و یا مدولها و در محدودهٔ محدودیتها اتخاذ می‌شوند.

۱۵. جریان اطلاعات

افزایش جریان اطلاعات می‌تواند معرف حرکتی از ثبات به سمت آشوب باشد. در سیستمهای اجتماعی می‌توان این پدیده را از طریق فناوری اطلاعات مورد بررسی قرار داد.

البته این یک نشانهٔ کاملاً مشخص نیست ولی سیستمی که بسیاری از شرایط فوق را داراست بهتر می‌توان با نظریهٔ پیچیدگی تحلیل تا روشهای آماری و با فرض رفتار قطعی و خطی. این نوع معیارها می توانند برای بازسازی اهداف نیز مورد استفاده قرار بگیرند، به خصوص اگر بخواهیم سیستمی را از اشکال ساده به سمت پیچیدگی خود سازمان دهی به پیش ببریم. این امر باعث خواهد شد تا سیستم از طریق نوآوری، بقا و قابلیت تطابق منافع بسیاری را کسب کند.

تکنیکهای کمی سازی

الف) تکنیکهای رویان[1]

با این فرض که توانسته ایم یک سیستم بالقوه پیچیده را شناسایی کنیم، سئوال بعدی چگونگی کمی کردن این پیچیدگی است. تکنیکهای زیر توسط محققان پیچیدگی برای ایجاد دقت ریاضی در این مبحث به کار گرفته شده اند.

آنتروپی. آنتروپی نقطهٔ شروع خوبی برای بررسی است زیرا به‌طور سنتی از آن برای اندازه‌گیری بی‌نظمی استفاده می‌شود. متأسفانه انواع متعددی از آنتروپی وجود دارد که باعث می‌شوند این مفهوم در عمل چندان کاربردی جلوه نکند. مشل اصلی اینجاست که یک مفهوم نمی تواند به تنهایی قادر به تشخیص و اندازه گیری اشکال گوناگون باشد.

نظریهٔ اطلاعات. این تکنیک که توسط **کولوموگروف** و **چایتین** ابداع شده است سیستمهای پیچیده را بر اساس کوتاهترین برنامهٔ کامپیوتری که می‌تواند آن سیستمها را ایجاد کند مورد بررسی قرار می دهد. از این رو، در اینجا طول برنامه معیاری برای پیچیدگی خواهد بود که مشکل اینجاست که این روش ارزش زیادی برای نوفهٔ[2] تصادفی (که ما عملاً آن را پیچیده نمی‌دانیم) قائل است. در عین حال این روش برای زمان اجرای برنامه اهمیتی قائل نیست. به رغم اینکه تحقیقاتی برای منظور کردن این عوامل در دست انجام است ولی هنوز این روش یک بعدی تلقی می‌شود.

انتقالات فاز. سیستمهای خود سازمان ده، سیستمهایی هستند که از حالتهای ایستا یا آشوبناک، به سمت حالتهای نیمه متعادل حرکت می کنند. این خاصیت در ارتباط با ایدهٔ فیزیک در خصوص انتقالات فاز قرار دارد (مثلاً حالت از یخ به آب تغییر می‌کند) و توسط **ویلسون** پیشنهاد شده است. تلاش

1. Embryo

2. Noise

جهت کمی کردن این دیدگاه را می‌توان در کارهای **لانگتون** روی لاندا و اندازه‌گیریهای مشابه مشاهده کرد. بزرگترین مشکل این است که چنین تحلیلی صرفاً به سیستمهای با ابعاد کوچک (تعداد کم متغیر) محدود می‌شود.

معیار خود سازمان دهی. این تکنیک، که توسط **بک**[1] پیشنهاد شده است دارای مشابهت بسیاری با روش انتقالات فازی است ولی بر خلاف آن، روی خصوصیت توزیع پیشامدها متمرکز می‌شود (مرز فازها) و آن را شاخصی از خود سازمان دهی می‌داند. این امر اجازه می‌دهد تا بتوان سیستمهای با ابعاد بیشتر را مورد تحلیل قرار داد، ولی نقطهٔ ضعف آن این است که اطلاعات بسیار کمی را در خصوص طبیعت درونی سیستم به دست می‌دهد.

شیمی آلگوریتمی .یک دیدگاه از این واقعیت بهره می جوید که اجزای سیستم به طور آزادانه عمل می‌کنند. یعنی همانند یک عنصر شیمیایی و همانگونه که عناصر شیمیایی با همدیگر واکنش نشان می دهند و بر هم اثر می‌گذارند، اجزای سیستم نیز چنین واکنشهایی بر همدیگر دارند. تحلیل ریاضی چنین سیستمهایی توسط **فونتانا**[2] انجام شده است. این طرز تلقی از اجزا، هیچ نوع کمی سازی را از ساختار غالب به وجود آمده به دست نمی‌دهد.

جذب کننده‌ها. تشخیص ساختارهای محتمل با ثبات در سیستمهای متصل، نیازمند ایجاد مفهوم جذب کننده‌هاست و این مفهوم توسط **هوپفیلد**[3] در شبکه های عصبی، **کونن**[4] در نقشه های وجوه و **ونش** در شبکه‌های گسسته به‌کار گرفته شده است. درحال حاضر این تکنیک بهترین تکنیک در تحلیل ساختار داخلی شبکه‌هاست ولی ضعف آن دشواری اجرا در سیتمهای واقعی و با ابعاد بزرگ است.

هم تکامل. با استفاده از مفهوم بیولوژیک تطابق، می‌توان سیستمهایی را چون بوم‌شناسی که اجزای آنها با هم تکامل می‌یابند، مدلسازی کرد. می‌توان این دیدگاه را برای مدلسازی سیستمهای چندگانه نظیر مدل NKCS **کافمان**[5] توسعه داد و مقدار تطابق سیستم را اندازه‌گیری کرد. مشکل این دیدگاه این است که در عمل مدلهای محتمل بسیاری وجود دارند که صرفاً می‌توانیم نمونه‌ای از آنها را انتخاب و شاخصهای آماری را از آنها استخراج کنیم.

دینامیک نمادی. این تکنیک که از زبان شناسی گرفته شده است، سیستمها را در قالب دستور زبان می‌نگرد و به دنبال قواعد ترکیب و ساختار است. **هلند** از این روش استفاده کرده ولی مشکل آن یافتن قواعد سیستمهای موجود است.

میزان دور بودن از تعادل. تحلیل سیستمهایی که

1. Bak
2. Fontana

3. Hopfield
4. Kohnen
5. Kuaffman

در حال تعادل نیستند تکنیکی است که هنوز مراحل اولیهٔ تکامل خود را طی می‌کند. این تکنیک توسط **پریگوژین**[1] در سیستمهای فیزیکی و **ماتورانا**[2] **و وارلا**[3] در سیستمهای بیولوژیک مورد استفاده قرار گرفته است. این سیستمهای خود نگهدار، ساختارهای خود سازمان ده هستند ولی باز هم در آنها توجه مستقیم کمی به الگو شده است.

ب) دیدگاههای دیگر

برخی تکنیکهای دیگر وجود دارند که کمتر توسط محققان به‌کار گرفته شده‌اند ولی به تدریج شناخت نسبت به کاربرد آنها در نظریهٔ پیچیدگی رو به افزایش است.

نظریهٔ بازیها. در علوم سیاسی، نظریهٔ بر هم کنش میان تصمیمهای متفاوت و برد و باختهای ناشی از این تصمیمها، توسط **آکسل رود** مورد تحلیل قرار گرفته است. اصولاً نظریهٔ بازیها یک نظریهٔ برای شرایط رقابتی است که طی آن تصمیم گیرندگان مجموعه‌ای از اقدامات در اختیار دارند و هر تصمیم گیرنده بدون اطلاع از تصمیم حریفان خود اقدامی را انتخاب می کند. در نتیجهٔ این انتخاب و همزمان انتخابهای حریفان، برد یا باختی عاید تصمیم گیرنده خواهد شد.

یکی از مشکلات این روش، دشواری اعمال آن بر سیستمهای بغرنج است ولی بزرگترین مزیت آن قابلیت تشخیص بین مسیرهای تکامل مثبت از منفی است.

شیشه‌های اسپینی[4]. این تکنیک نیز که از فیزیک گرفته شده است می‌تواند بسیاری از پدیده‌های فیزیکی را مدلسازی کند (کارهای **راکر**[5]). این تکنیک برای شبیه سازی بسیار مناسب است ولی از نظر ریاضی دشوار و برای دستیابی به حالتهای غالب و ساختار سطح بالاتر خوب است.

تحلیل سریهای زمانی. تحلیل نظم حاکم بر رفتار یک سیستم در طول زمان، از مباحث مهم در تحلیل سریهای زمانی است. تعیین جذب کننده‌های دوره‌ای یا آشوبناک نیز از نتایج این تحلیل است. برخی اوقات این تکنیک در سیستمهای مالی به‌کار گرفته می‌شود. مشکل روش نیاز به حجم زیاد داده‌هاست. ولی مزیت عمدهٔ آن این است که می‌توان حدودی را برای رفتار سیستم تعیین کرد.

منطق فازی. در تحلیل سیستمهای غیر خطی، نیازمند کمی سازی بسیاری از متغیرهای کیفی هستیم و منطق فازی چنین امکانی را فراهم می‌کند، استفاده از این تکنیک در تحلیل پیچیدگی به تازگی آغاز شده است.

1. Prigogine
2. Maturana
3. Varela

4. Spin Glasses
5. Rucker

روش آنتروپی در محاسبهٔ پیچیدگی ایستا و پویا در فرآیندهای تولید

شرکتهای صنعتی و تولیدی در جهان امروز، با مواجه هستند. برای سازگاری با چنین محیط متغیری، شرکتها ناچارند انعطاف بیشتری به فرآیندها و سیستمهای خود بدهند (**می یو، ۱۹۹۰؛ پای، ۱۹۹۶**). به رغم اینکه داشتن انعطاف می‌تواند مزایایی چون افزایش تولید و افزایش مشتری گرایی را در پی داشته باشد، ولی در صورت کنترل نشدن صحیح ممکن است منجربه تصمیم گیریهای ناکارآمد، زمانهای تحویل طولانی، برنامه‌های غیر قابل دسترس، بالا رفتن حجم موجودیها، هزینه‌های زیاد و عدم رضایت مشتریان شود. (**افستاشیو و همکاران، ۱۹۹۶**)، (**بائو و همکاران، ۱۹۹۱**)، (**لویس و همکاران، ۱۹۹۵**)، (**اسلاک و همکاران، ۱۹۹۵**)، (**نیلی و همکاران، ۱۹۹۵**). افزایش انعطاف پذیری باعث خواهد شد تا تعداد جانشینهای زمان‌بندی افزایش یابد و در نتیجه پیچیدگی تصمیم گیری بیشتر شود. (**استوپ و همکاران، ۱۹۹۶**)، (**برمجو و همکاران، ۱۹۹۷**)، (**مک کی و همکاران، ۱۹۹۵**). به همین جهت یافتن تعادلی میان انعطاف پذیری سیستم و میزان پیچیدگی آن یکی از مسائل مهم پیش روی مدیران است. عوامل ایجاد کنندهٔ پیچیدگی در تولید به صورت زیر معرفی شده‌اند (**کالینسکو** و همکاران (۱)، ۱۹۹۷)، (**کالینسکو** و همکاران (۲)، ۱۹۹۷).

الف) ساختار محصول (تعداد زیر مونتاژها، زمانهای چرخه، اندازهٔ دسته های تولیدی، نوع وتوالی منابع تولید و...)

ب) ساختار کارگاه یا کارخانه (تعداد و نوع منابع تولید، آرایش، زمانهای راه اندازی، اعمال نگهداری و تعمیرات، زمانهای بیکاری و...)

ج) برنامه ریزی و زمان بندی (راهکارهای برنامه ریزی و زمان بندی)

د) پویایی، تغییر پذیری و عدم قطعیت در محیط

مدل کلاسیک اندازه گیری پیچیدگی ایستا بر مبنای کار **فریزل** و **دودماک** قرار دارد (**فریزل و همکاران، ۱۹۹۴**)، (**فریزل، ۱۹۹۶**). این مدل دارای سه فرضی اساسی است:

- هر سیستم یک فرآیند دریافت- ارسال است.
- هر چه پیچیدگی یک فرآیند بیشتر شود، قابلیت اطمینان آن کمتر خواهد شد.
- فرآیند با پیچیدگی بیشتر، با احتمال زیاد، گلوگاه خواهد بود.

پیچیدگی ایستا را می توان برای سیستم S ، از رابطهٔ زیر محاسبه کرد.

$$H_{\text{ایستا}}(S) = -\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N_j} P_{ij}.\log_2 P_{ij}$$

که در آن:

M تعداد منابع تولید

N_j تعداد وضعیتهای محامل برای منبع j

p_{ij} احتمال اینکه منبع i در وضعیت j قرار داشته باشد.

معمولاً پیچیدگی ایستا در طی یک دورهٔ زمانی بلند مدت (یک سال) اندازه گیری می‌شود.

روش محاسبهٔ پیچیدگی پویا بر اساس مشاهدهٔ مستقیم فرآیند و بخصوص رفتار صفها در سیستم قرار دارد. تحقیق در خصوص علل ایجاد صفها کمک خواهد کرد تا نقاط کور در فرآیند تولید معلوم شوند.

پیچیدگی پویا توسط منابع داخلی (نظیر خوب یا بد کنترل شدن تجهیزات) و یا منابع خارجی (تأثیرات مشتریان و بازار) ایجاد شود.

رابطهٔ زیر معرف پیچیدگی است.

$$H_{پ}(S) = -P\log_2 P - (1-P)P\log_2(1-P) - (1-P)\left(\sum_{i=1}^{M^q}\sum_{j=1}^{N^q} p^q ij \log_2 p^q ij + \sum_{i=1}^{M^m}\sum_{j=1}^{N^m} p^m ij \log_2 p^m ij + \sum_{i=1}^{M^b}\sum_{j=1}^{N^b} p^b ij \log_2 p^b ij\right)$$

که در آن p احتمال تحت کنترل بودن سیستم، p^q نشان دهندهٔ احتمال وجود صفهای با طول متغیر بیش از ۱، p^m نیز احتمال داشتن صفهای با طول ۱ یا ۰، p^b احتمال داشتن وضعیتهای غیر قابل برنامه‌ریزی شدن، M نشان دهندهٔ تعداد منابع و N_j نشان تعداد وضعیتها در منبع J است.

در عین حال داریم

$$N_j = N^q_j + N^m_j + N^b_j$$

روش فوق نیازمند آن است که ملاحظات مستقیم در دوره‌های زمانی تعریف شده از سیستم صورت گیرد. زمان بندی، تواتر و طول مدت اندازه‌گیری بایستی با توجه به اطلاعات جزیی در فرآیند تعیین شود. چرخهٔ زمانی ماشین، پیش زمان تولید، اطلاعات مربوط به نوبت کاری، تواتر از کار افتادگی و مانند آنها. یکی از رویکردهای جدید در محاسبهٔ پیچیدگی ایستا این است که برای هر حال یا وضعیتی که سیستم می‌تواند در آن قرار بگیرد، سهم متفاوتی را در پیچیدگی در نظر بگیریم. این امر باعث خواهد شد تا با مجموعه ای از مدلهای برنامه‌ریزی خطی برای محاسبهٔ پیچیدگی ایستا مواجه شویم (**ماکویی** و همکاران، ۲۰۰۳).

نتیجه گیری

درک پیچیدگی، قدمی است برای درک واقع بینانه‌تر جهان هستی، قدمی است به سمت واقعیتی

که همواره بشر در طول تاریخ خود سعی در گریز از آن داشته است. واقعیت ساده ولی به شدت تکان دهنده این است که جهان بسیار بغرنجتر از آن است که ذهن محدود انسان بتواند آن را فهم کند. جهان و هستی را نباید ساده انگاشت و هر تلاشی را در جهت درک پیچیدگی آن باید به فال نیک گرفت و ارج نهاد.

مرجعها

1- Meyer W and Isenberg R (1990). Knowledge- based factory supervision: EP 923 Results. Int J CIM 3:206-233

2- Pai C and Naylor P (1996). Yet it is painful but are not alone- Application of supply chain planning techniques from cognate industries. Presented at the 2nd International conference on production planning and control in the metals Industry, London, UK, November 12-14, 1996. (Available from 12 Technological Inc. Eagle House, The Ring, Bracknell, Berks (RG12 ITB)

3- Efstashiou J, Calinescu A and Bermejo J (1996). Modeling the complexity of production planning and control. Processing of the 2nd International Conference on Production planning and Control in the Metals Industey, institute of Materials, London, pp 60-66.

4- Bauer A et al (1991). Shop Floor Control System: from Design to Implementation. Chapman & Hall: London, UK.

5- Lewis FL, huang HH, pastravanu OC and Gurel A (1995). Control system design for flexible manufacturing system. In: Raouf A and Daya MB (eds). Flexible Manufacturing Systems: Recent Developments. Elservier Science: Amsterdam; New York

6- Slack N et al (1995), Operations Management. Pitman publishing: London, UK

7- Neely A, Gregory M and pllats K (1995). Performance measurement system design. Int J Opns & Prod Mgmt 15 (4): 80-116

8- Stoop PPM and wiers VCS (1996). The complexity of scheduling in practice. Int J opns & Prod Mgmt 16 (10): 37-53

9- McKay KN, Safeyeni FR and Buacott JA (1995). Common sense realities of planning and scheduling in printed circuit board production. Int Prod Res 33(6): 1585-1603

10- Berjemo J, Calinescu A, Efstathiou J and Schrin J (1997). Dealing with uncertainty in manufacturing: the impact on scheduling. In: Kochhar A (ed). Proceeding of the 32nd international matador Conference, Macmillan Press, UK. Pp 149-154

11- Frizella G and Woodcock E (1994). Measuring complexity as an aid to developing operational strategy. Int J Opns & Prod Mgmt 15(5): 26-39

12- Frizelle GDM. (1996). An entropic measurement of complexity in manufacturing operations Research. Report. Departement of Engineering, University of Cambridge, UK.

13- Calinsecu A, Efstathiou J, Berjemo J and Schrin J (1997). Modeling and simulation of a real complex process-based manufacturing system. In: Kochhar A (ed). Processing of the 32nd International Matador Conference, Macmillan Press, UK. Pp137-142.

14- Calinescu A, Efstathiou E, Berjemo J and Schrin J (1997). Assessing decision-making and process complexity in a manufacturer through simulation. In: Brant D (ed). Processing of the 6th IFAC Symposium on Automated Systems Based on Human Skill, IFAC, Germany, pp 159-162.

15- www.calresco.org/Lucas/quantify (2001)

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی