طبقه‌بندی الگوهای پویای رفتاری سیستم‌ها

جعفر قیدر خلجانی
رضا حاجی قاسمی
حسن حاجی قاسمی

تاریخ دریافت: ۹۱/۶/۱۵
تاریخ پذیرش: ۹۱/۷/۲۰

چکیده:

امروزه استفاده از اصطلاحاتی همچون "سیستم"، "سیستم‌های پیچیده"، "سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر" و واژه‌هایی از این دست نسبت به گذشته بسیار افزایش یافته است که این امر نشان از اهمیت مفهوم سیستم دارد. لذا شناخت انواع سیستم‌ها و الگوهای رفتاری آن‌ها به منظور تجزیه‌وتحلیل صحیح آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در این مقاله سعی می‌شود که انواع الگوی پویای رفتاری سیستم‌ها که از آن به عنوان دامنه‌ی حالت سیستم‌ها یاد می‌شود، مورد بررسی قرار گیرند. بدین منظور ابتدا به تعریف سیستم و بررسی ویژگی‌های آن پرداخته و پس از آن با سیستم‌های پیچیده و سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر که نوع خاصی از سیستم‌ها می‌باشند آشنا می‌شویم. در نهایت هم انواع دامنه‌ی حالات سیستم‌ها، تفاوت‌ها و ویژگی‌های هر یک از این دامنه‌ی حالات در قالب جدولی ارائه می‌گردند.

واژه های کلیدی:

سیستم، سیستم پیچیده، سیستم پیچیده‌ی انطباق‌پذیر، دامنه‌ی حالت

۱) مقدمه

در چند دهه‌ی اخیر نظریه‌های جدیدی در زمینه‌ی کل‌نگری و نگرش سیستمی ارائه شده‌اند که مورد توجه محققان در کلیه‌ی علوم قرار گرفته و محققان با استفاده از آن‌ها به بیانی نوین از پدیده‌های پیچیده دست زده‌اند. این نگرش‌ها و نظریات منجر به ایجاد اصطلاحات و واژه‌هایی جدید همچون "سیستم‌های پیچیده" و "سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر" شده که هر یک از آن‌ها دارای ویژگی‌ها و الگوهای رفتاری خاص خود می‌باشند.

سیستم‌های پیچیده و همچنین سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر به سبب وجود عوامل متعدد، متغیرهای چندگانه، تنوع عناصر متمایز در ساختار سیستم و تعدد روابط آن دارای رفتاری پویا و بسیار پیچیده می‌باشند. این موارد باعث می‌شوند که پیش‌بینی رفتار این سیستم‌ها دشوار شود؛ به ویژه آن که این سیستم‌ها به ندرت ممکن است خطی باشند و غالبا از اجزای غیرخطی تشکیل شده و بر مبنای تعاملات غیرخطی رفتار می‌کنند.

با توجه به دشواری پیش‌بینی رفتار این سیستم‌ها، دلایل متعددی را می‌توان در ضرورت شناسایی و طبقه‌بندی الگوی پویای رفتاری سیستم‌ها عنوان نمود. اما در دنیای امروزی که سیستم‌ها و تعاملات میان آن‌ها به طور فزاینده‌ای در حال افزایش بوده است و توسعه‌ی توانایی طراحی صحیح انواع سیستم‌ها به امری اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است، شاید مهمترین دلیل ضرورت شناسایی و طبقه‌بندی الگوهای رفتاری این باشد که با این کار می‌توان به طراحی صحیح و مهندسی سیستم‌ها کمک شایانی نمود. در واقع شناسایی تفاوت‌های میان این الگوها سبب تسهیل دست‌یابی به این هدف می‌شود.

۲) سیستم چیست؟

تاکنون تعاریف گوناگونی برای سیستم ارائه گردیده‌اند اما هر کدام از این تعاریف بیانگر جنبه‌ی خاصی از سیستم‌ها می‌باشند. تعریفی که در این بخش برای سیستم بیان می‌گردد، تعریفی عمومی از سیستم بوده که می‌تواند در

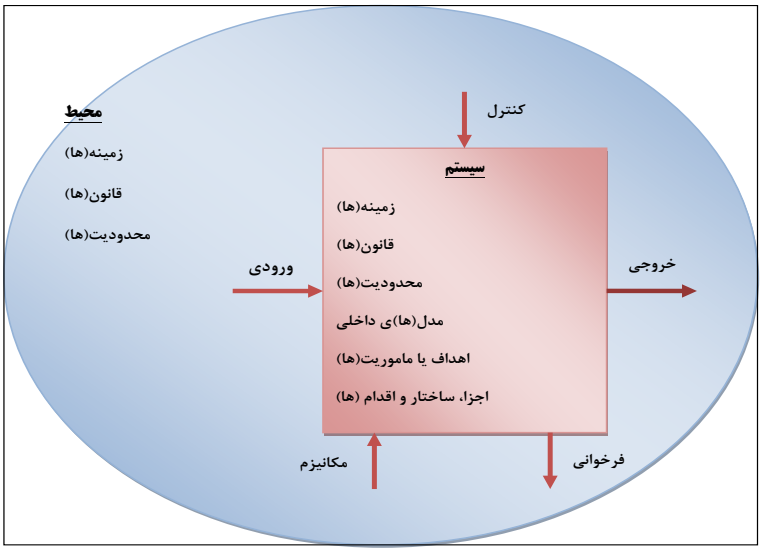
تمامی حوزه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

سیستم‌ها دارای برخی ویژگی‌های اساسی هستند که در توصیف سیستم از آن‌ها استفاده می‌شود. برخی از مهمترین ویژگی‌های سیستم عبارتند از:

- سیستم از ترکیب اجزایی[1] که متقابلا بریکدیگر تاثیرگذار هستند تشکیل می‌شود. برخی از این اجزا عبارتند از: افراد (شخص، گروهی از اشخاص، سازمانی از اشخاص و...)، اجزا و عناصر نامشهود (دکترین، روش‌ها، رویه‌ها، نظریات، نرم‌افزارها، پروسه‌ها، مفاهیم، ایده‌ها و...) و اجزا و عناصر مشهود (رایانه‌ها، ابزارهای شبکه، ابزارهای مکانیکی، وسایل ارتباطی و...)؛
- اجزا و عناصر سیستم با یکدیگر تعاملی پویا داشته و در محیط اطراف خود در حال رشد و توسعه می‌باشند؛
- اجزای سیستم به دنبال رسیدن به یک و یا چند هدف یا ماموریت می‌باشند؛
- سیستم در تعامل با محیط اطراف خود دارای آزادی عمل بوده و در نتیجه می‌تواند تمامی تبادلات لازم با محیط را از طریق مرزهایش[2] انجام دهد؛
- سیستم از طریق مکانیزم‌های تولید و تبدیل درونی، خروجی‌های خود را تولید نموده و آن‌ها را به محیط تحویل می‌دهد. این خروجی‌ها ممکن است در انواع و اشکال مختلفی بروز نمایند؛
- مکانیزم‌های تولید و تبدیل تحت تاثیر قوانین، ارزش‌ها، اعتقادات، محدودیت‌ها، فرهنگ و مدل‌های داخلی می‌باشند. این عوامل تاثیرگذار درونی خود تحت تاثیر محیط اطراف می‌باشند؛
- محیط اطراف سیستم ممکن است خطی، پیچیده و یا بی‌نظم و پرآشوب باشد؛
- سیستم مفهومی بازگشتی است. سیستم ممکن است از زیرسیستم‌هایی تشکیل شده باشد که خود آن‌ها نیز سیستم هستند.

شکل ۱ دیدگاهی مفهومی از سیستم و محیط اطرافش را به تصویر می‌کشد. سیستم ورودی‌ها را از محیط اطراف خود دریافت کرده و براساس مکانیزم‌های تولید و یا تبدیل خود خروجی‌های مورد نظر را تولید نموده و آن را به محیط تحویل می‌دهد. مدل‌ها، قوانین، عقاید، محدودیت‌ها، ماموریت‌ها یا اهداف و زمینه‌ای که سیستم در آن مشغول به کار است از عوامل تعیین کننده‌ی مکانیزم‌های تولید و یا تبدیل می‌باشند.

ممکن است سیستم توسط سیستم‌های دیگری کنترل گردد (عبارت کنترل در شکل)، از مکانیزم‌های خارجی استفاده نماید (مکانیزم) و یا سیستم‌های دیگر را نیز فرا بخواند (فراخوانی). ممکن است محدودیت‌ها و قوانینی نیز از سوی محیط نیز به سیستم اعمال شود.



شکل ۱) شمایی مفهومی از سیستم و محیط اطراف آن

۱. سیستم از بخش‌هایی که با یکدیگر دارای تعامل هستند، تشکیل می‌شود. این بخش‌های متعامل، اجزا نامیده می‌شوند. خود اجزا نیز ممکن است سیستم باشند.
۲. ماموریت و یا اهداف سیستم ممکن است نشان‌دهنده‌ی چشم‌اندازی باشند که تعیین‌کننده‌ی مرزهای سیستم است.

برخی از مهمترین جنبه‌های این تعریف که بایستی مورد تاکید قرار گیرند عبارتند از:

- پویایی سیستم: سیستم‌ها در طول زمان در حال رشد و توسعه می‌باشند. سیستم‌ها مجموعه‌هایی از اجزای ایستا نمی‌باشند چرا که تنها با فعال بودن اجزای سیستم می‌توان خروجی‌ها را تولید و یا ورودی‌ها را به خروجی مورد نظر تبدیل نمود. یک قطعه‌ی فیزیکی ایستا، پتانسیل تبدیل شدن به یک سیستم را دارد. ولی این تبدیل زمانی رخ می‌دهد که این قطعه در کنار اجزای دیگری چون انسان، فرآیندها و... به فعالیت بپردازد. پویایی سیستم یکی از مفاهیم اساسی تئوری پیچیدگی می‌باشد (Beech, 2004) سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده (که نوعی خاصی از انواع سیستم‌ها می‌باشند) را این گونه تعریف کرده اند:

"شبکه‌های پیچیده‌ای که انطباق‌پذیر و یا پویا می‌باشند چرا که روابط متقابل بین اجزای آن‌ها به طور پیوسته و براساس نیازهای عوامل فردی و تاثیرات محیطی، در حال تغییر می‌باشد".

- اغلب عوامل انسانی نیز در سیستم‌ها حضور دارند: عوامل انسانی اغلب جزء جدایی‌ناپذیر سیستم می‌باشند. سینگه نیز در اظهارات خود بر این نکته تاکید می‌نماید: کسب و کار و دیگر تلاش‌های بشری را نیز می‌توان نوعی از سیستم به شمار آورد. به عنوان مثال برای برقرای موثر ارتباطات رادیویی، هدایت تانکرهای حمل سوخت و نرم‌افزاهای فرماندهی و کنترل نظامی نیاز به مشارکت فعال عوامل انسانی می‌باشد. سیستم‌هایی چون نرم‌افزارهای خودکار، رایانه‌ها و یا ابزارهای شبکه‌ی اتوماتیک وابستگی کمتری به عوامل انسانی دارند. اما حتی این سیستم‌ها نیز برای عملیاتی ماندن در مدت زمان طولانی، نیاز به نگه‌داری و راه‌اندازی مجدد داشته که این کار توسط عوامل انسانی صورت می‌گیرد. حضور یا عدم حضور انسان به عنوان بخشی از سیستم بستگی به نحوه‌ی تعامل اجزای سازنده‌ی آن دارد. در بخش‌های آتی برای این موضوع مثالی بیان خواهد شد. از طرف دیگر، سیستم‌هایی نیز وجود دارند که مستقل از حضور انسان هستند. سیستم‌های بیولوژیکی، نمونه‌ای از این گونه سیستم‌ها می‌باشند.
- سیستم‌ها ممکن است شامل اجزای نامشهود نیز باشند. منظور از اجزای نامشهود، تمامی اجزا و عناصر غیرفیزیکی یا غیرقابل‌لمس می‌باشد. نرم‌افزارها و رویه‌های کاری، نمونه‌هایی از این اجزا می‌باشند. تفاوت میان اجزای مشهود و نامشهود همانند تفاوت میان مدل‌های داخلی نامشهود و ساختار و ترکیب مشهود سیستم می‌باشد. به عنوان مثال: مدل‌های ذهنی از ادراک (عنصر نامشهود) در بدن انسان (عنصر مشهود) باعث شکل‌گیری شخص و یا شخصیت فرد (سیستم کلی) می‌شوند.

۳) مرزها و حدود سیستم

مرز سیستم، مفهومی ذهنی بوده که ممکن است در طول زمان دچار تغییر گردد. دیدگاه ناظران و در نظرگرفتن ملاحظات زمانی، معیارهای تعیین و تعریف مرزها و حدود سیستم می‌باشند.

٤) مرزهای حاصل از دیدگاه ناظران

مفاهیم ذهنی و دیدگاه ناظران، مرزها و حدود سیستم را تعیین می‌کنند. دیدگاه‌ها شیوه‌های ذهنی نگرش به سیستم هستند. به عنوان مثال می‌توان دیدگاه را برحسب کارکردهای خاص سیستم تعریف نمود.

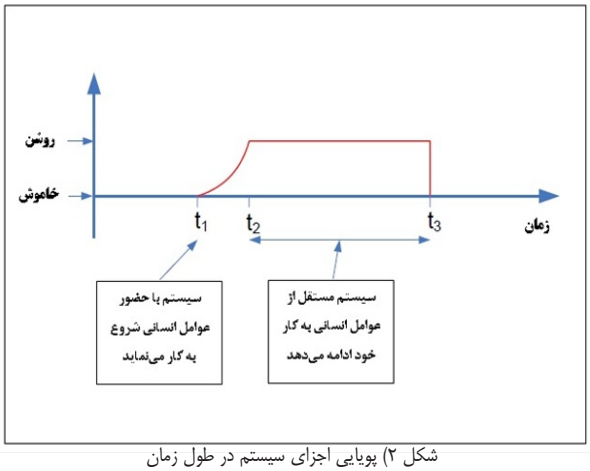
می‌توان از خودرو در حال کار به عنوان نمونه‌ای از یک سیستم کلی که در آن مرزها و حدود بر حسب کارکردها تعریف می‌شوند، نام برد. ممکن است ناظری خودرو را ابزاری برای حرکت رو به جلو پندارد، در حالیکه ناظری دیگر آن را ابزاری برای آسایش و امنیت به شمار آورد. هر کدام از این دیدگاه‌ها منجر به تعریف حدود و مرزهایی متفاوت برای خودرویی واحد خواهد شد. هر یک از این حد و مرزها شامل اجزا و زیرسیستم‌های مخصوص به خود می‌باشند.

می‌توان این دو سیستم تعریف شده را به عنوان جزئی از یک سیستم کلی‌تر که همان خودرو می‌باشد، به شمار آورد. مطالعه‌ی این دو سیستم برای درک کامل کل خودرو، کافی نمی‌باشد. بایستی بسیاری از دیدگاه‌های دیگر که به سایر کارکردها توجه دارند را نیز در نظر گرفت. علاوه بر این بایستی در دیدگاه کلی، تعامل میان دیدگاه‌ها را نیز مورد توجه قرار داد تا بتوان نحوه‌ی همکاری اجزای سیستم با

یکدیگر را درک نمود.

۵) ارزیابی مرزها و حدود بر اساس زمان

معیار دومی که برای تعیین مرزهای سیستم استفاده می‌شود، زمان می‌باشد. ممکن است ترکیب و ساختار سیستم در تمامی زمان‌ها یکسان و مشابه نباشد. به عنوان مثال می‌توان این پرسش را مطرح نمود: چه زمانی می‌توان عوامل انسانی را به عنوان یک جزء خاص سیستم به شمار آورد؟ شکل ۲ وضعیت سیستمی فرضی (محور Y) را برحسب زمان (محور X) نشان می‌دهد که در آن در بازه‌ی زمانی t_1 تا t_2 که سیستم شروع به کار می‌نماید، عوامل انسانی نیز به عنوان بخشی از سیستم مشغول به فعالیت می‌باشند اما در بازه‌ی زمانی t_2 تا t_3، سیستم به صورت خودکار عمل نموده و مستقل از حضور عوامل انسانی می‌باشد. در این مثال عوامل انسانی تنها در بازه‌ی زمانی t_1 تا t_2، به عنوان جزئی از سیستم به شمار آمده و ممکن است پس از زمان t_2، دیگر جزئی از سیستم در نظر گرفته نشوند.



شکل ۲) پویایی اجزای سیستم در طول زمان

این مثال ساده به خوبی نشان می‌دهد که مرزهای سیستم تعیین کننده‌ی ترکیب درونی و ساختار احتمالی سیستم در هرلحظه از زمان بوده و این ترکیب و ساختار در طول زمان دچار تغییر می‌گردند.

٦) انواع رفتارهای سیستمی

(Gharajedaghi, 1999) رفتارهای سیستمی را در چهار گروه اصلی طبقه‌بندی می‌نماید که عبارتند از: غیرفعال[1]، انفعالی[2]، واکنشی[3] و فعال[4] (یا فعال پیشگیرانه). سیستم‌هایی که دارای چنین رفتارهایی باشند را به ترتیب خطی[5]، خودنگه‌دار[6]، هدف‌جو[7] و هدفمند[8] می‌نامند. جدول شماره‌ی ۱ به معرفی این چهار دسته سیستم، انواع مختلف ابزارهایی که مورد استفاده قرار می‌دهند و سرانجام هر یک از آن‌ها می‌پردازد.

سیستم‌های خطی مانند ابزارهای اختصاصی که برای انجام فعالیت‌هایی خاص وجود دارند، رفتارهای غیرفعال از خود بروز می‌دهند. ابزارها و سرانجام این سیستم‌ها هم در مرحله‌ی طراحی و هم در مرحله‌ی توسعه ثابت بوده و خصوصیات آن تعریف‌شده و معین می‌باشند.

سیستم‌های خودنگه‌دار در محیط‌های متغیر رفتاری انفعالی از خود بروز می‌دهند؛ آن‌ها توانایی واکنش به تغییرات محیط اطراف خود را داشته و در شرایط متغیر محیطی، وضعیتشان را ثابت نگه می‌دارند. چناچه بخواهیم سرانجام این سیستم‌ها ثابت باشد، بایستی ابزارها و اجزای آن‌ها بر اساس الگوهای از پیش تعیین شده (برای تطابق با تغییرات محیطی)، تغییر نمایند.

سیستم‌های هدف‌جو در پاسخ به تغییرات محیطی، رفتاری واکنشی از خود نشان می‌دهند. این سیستم‌ها تا زمانی که خروجی‌های مشخصی را تولید می‌کنند، می‌توانند در محیط‌های متفاوت و یا مشابه، واکنش‌های متفاوتی را نسبت رخدادهای متفاوت بروز دهند. اجزا و ابزارهای این سیستم‌ها وابسته به انتخاب‌های متفاوتی است که برای این سیستم‌ها و در پاسخ به تغییرات مشاهده‌شده صورت می‌گیرد. سرانجام این سیستم‌ها ممکن است وابسته به تغییرات محیطی مشاهده‌شده باشد اما در هر صورت دارای محدودیت‌هایی از پیش تعیین‌شده می‌باشد. هرچند این سیستم‌ها تنها در ابزارها و اجزا دارای حق انتخاب می‌باشند اما در هرصورت رفتار آن‌ها واکنشی می‌باشند و نه انفعالی.

هوش و استقلال سیستم‌های هدفمند بیش از هر سیستم دیگری می‌باشد. از آنجاییکه این نوع سیستم‌ها فعال و کنشی بوده، نیاز به حق انتخاب و تغییرپذیری در اجزا و سرانجام خود دارند. این سیستم‌ها علاوه بر اینکه می‌توانند در محیط‌های مشابه، به شیوه‌های متفاوت خروجی

1. Passive
2. Reactive
3. Responsive
4. Active
5. linear
6. self-maintaining
7. goal-seeking
8. purposeful

یکسانی را تولید کنند می‌توانند هم در محیط‌های متغیر و هم در محیط‌های مشابه، خروجی‌های متفاوتی را تولید نمایند. سیستم‌های هدفمند تمامی قابلیت‌های سیستم‌های هدف‌جو و خودنگه‌دار را دارند. امکان کنترل رفتار افراد صاحب اراده از طریق نظارت، در این چنین سیستم‌هایی که اندیشه‌ها و طرزفکرهای بسیاری بر آن‌ها حاکم است، کمتر وجود داشته و حتی خیلی مطلوب هم نمی‌باشد. بنابراین برای مدیریت این سیستم‌ها از طریق خودکنترلی اعضا و پرهیز از نظارت بر آن‌ها، نیاز به ساختارهای اجتماعی جدیدی می‌باشد که از اجزای پیچیده‌ی بسیاری تشکیل شده‌اند. این ساختارها بایستی چارچوب‌های جدیدی را ارائه نمایند که در آن اعضای سازمان از لحاظ عمودی، افقی و زمانی با یکدیگر سازش‌پذیر باشند. به عبارت دیگر عملکرد سیستم‌های پیچیده‌ای که درآن‌ها نظارت و کنترل، نسبتا در میان اجزا توزیع گردیده است نسبت به سیستم‌هایی که کنترل را به صورت صلب و به شدت سلسله‌مراتبی انجام می‌دهند، بهتر می‌باشد.

رفتار	اجزا و ابزار	پایان/ سرانجام
غیرفعال (ابزارهای خطی)	ثابت	ثابت
انفعالی (سیستم‌های خودنگه‌دار)	متغیر و معین	ثابت
واکنشی (سیستم‌های هدف‌جو)	متغیر و انتخابی	متغیر و معین
فعال (سیستم‌های هدفمند)	متغیر و انتخابی	متغیر و انتخابی

جدول شماره‌ی ۱) انواع مختلف سیستم‌ها، ابزارها و سرانجام مرتبط با آن‌ها

۷) سیستم‌های پیچیده

ادبیات علمی پیچیدگی هنوز به تعریفی جامع از سیستم پیچیده که مورد توافق همگان باشد، دست نیافته است. یکی از دلایل این مسئله این است که تئوری پیچیدگی هنوز به سطوح نهایی بلوغ خود نرسیده است.

اغلب سیستم‌های پیچیده را بر اساس خصوصیاتشان تعریف می‌نمایند. به عنوان مثال استاندارد ONCE-CS (2006)[1]– سیستم پیچیده را این گونه تعریف می‌نماید: این سیستم‌ها از تعداد زیادی اجزا و عناصر تشکیل شده‌اند. عناصر تشکیل دهنده‌ی این سیستم‌ها با یکدیگر تعاملات فراوانی دارند. این سیستم‌ها به علت الگوها و نوسانات زمانی و مکانی و عدم تعادل خود، دارای پویایی بسیاری می‌باشند. برجسته‌ترین ویژگی سیستم‌های پیچیده که در ظاهر اشتراک کمی بایکدیگر دارند این است که اغلب به طور قابل ملاحظه‌ای به تسهیم ساختارها و منابع سازمانی مشابه می‌پردازند. مجموعه‌ای از ماشین‌آلات مورد استفاده در یک کارخانه‌ی تولیدی، مجموعه‌ای از گیرنده‌های شیمیایی موجود بروی سطح یک پیل و یا حتی عوامل انسانی موجود در یک مجموعه‌ی اقتصادی نمونه‌هایی از سیستم‌های پیچیده می‌باشند.

نکات زیر بیانگر جنبه‌های مختلف تعریف سیستم پیچیده می‌باشند:

- سیستم پیچیده از ترکیب اجزای مستقلی[2] تشکیل می‌شود که در راستای رسیدن به هدف و یا ماموریتی مشترک با یکدیگر به همکاری می‌پردازند؛
- هر جزء بر اساس مجموعه‌ی قوانین، اعتقادات، محدودیت‌ها و مدل‌های داخلی خود و در پاسخ به تعامل با دیگر اجزا و یا محیط اطراف خود، رفتار می‌نماید. "هدایت اجزا بر اساس ارزیابی‌های درونی و تحریک آن‌ها بر اساس تشخیص ضرورت جفت شدن با دیگر اجزا صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر اجزا برای برآورده ساختن نیازهای متقابل خود به برقراری روابط دوطرفه و تعامل با یکدیگر می‌پردازند. اجزا دائما به ارزیابی مجدد اولویت نیازهای خود

1. Open Network of Centres of Excellence in Complex Systems (ONCE-CS)

۲. اجزا و سیستم‌های پیچیده، خود گونه‌ی خاصی از سیستم‌ها می‌باشند. به عنوان مثال اجزای سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر ممکن است به لحاظ مدیریتی، مالی و یا سلسله‌مراتبی مستقل بوده و دارای استقلال نسبی باشند.

و میزان تعهدات خود به دیگر اجزای سیستم می‌پردازند؛ (Beech, 2004)"؛

- سیستم‌های پیچیده از طریق تعاملات پیچیده میان اجزای خود به ماموریت‌ها، اهداف و یا کارکردهای خود، نائل می‌شوند. چناچه اجزا را از یکدیگر جدا نماییم، توانایی کمتری خواهند داشت. به عبارت دیگر اجزای سیستم در کنار یکدیگر دارای هم‌افزایی می‌باشند؛
- تعاملات پیچیده‌ی میان اجزای سیستم پیچیده باعث تحریک ظهور پدیده‌های پیچیده می‌شود؛
- حتی در صورتی که قوانین درونی اجزا نیز ساده و معین باشند، رفتار کل سیستم اغلب پیچیده بوده و در مقیاس‌های زمانی بلندمدت و میان مدت به سختی پیش‌بینی می‌شود؛
- سیستم‌های پیچیده غیرخطی بوده و دارای پس‌خورانه می‌باشند؛
- سیستم‌های پیچیده می‌توانند بر اساس ضرورت، بدون طرح‌های از پیش تعیین شده و یا مکانیزم‌های کنترل متمرکز، به خودسازماندهی دست یابند؛
- سیستم‌های پیچیده نزدیک به آنچه کافمن لبه‌ی آشوب[1] خواند، می‌باشند. در لبه‌ی آشوب سیستم برای انطباق‌پذیری بهینه گردیده، تعداد اجزا به اندازه‌ای زیاد است که تغییرات جدید می‌توانند رخ دهند اما سیستم کاملا ناپایدار نمی‌شود. "تغییرات بر طبق توزیع قانون توانی[2] رخ می‌دهند (Cal-houn, 2004)."
- "سیستم‌های پیچیده تحت شرایط متغیر محیطی دارای پیوستگی بوده و بدون جهت‌گیری و یا برنامه‌ریزی مرکزی به انجام اقدامات و پیش‌بینی‌های مشروط می‌پردازند (Holland, 1996)".

شکل ۲ شمایی مفهومی از سیستمی پیچیده را در محیط اطرافش، ارائه می‌نماید. این سیستم از دوازده جزء یا عنصر متعامل و مستقل ($S_1 - S_{12}$) و تعدادی اجزای خارجی که با حرف S نشان داده شده‌اند، تشکیل شده است. برخی از اجزای موجود در این شکل توسط دیگر اجزا کنترل می‌شوند (S_4 و S_3)، برخی از اجزا با یکدیگر همکاری دارند (S_9 و S_5) و برخی دیگر نیز در حال رقابت با یکدیگر هستند (S_4 و S_9). در این شکل در بین اجزای مختلف سیستم، انواع تعاملات وجود دارند. در بین برخی از اجزا نیز حلقه‌ی بازخور[3] وجود دارد (بین S_9 و S_{11}و همچنین بین S_{10} و S_8). توسعه‌ی همزمان این اجزا باعث می‌شود که سیستم پویایی بالایی داشته، غیرخطی شده و قابلیت تجزیه شدن به اجزای سازنده‌ی خود را از دست بدهد. سیستم‌های پیچیده ممکن است دارای زمینه‌ها، محدودیت‌ها و ماموریت‌های خاص خود باشند که این موضوع در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است.

درجه‌ی پیچیدگی سیستم اشاره به توان بالقوه‌ی بروز رفتارهای معلول پدیده‌های پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی دارد (Chan, 2001). اقتصاد، اکوسیستم‌ها و مغز انسان نمونه‌هایی از سیستم‌های پیچیده می‌باشند. افراد و بنگاه‌های تجاری، اجزای تشکیل دهنده‌ی اقتصاد به عنوان یک سیستم پیچیده می‌باشند. اجزای تشکیل دهنده‌ی اکوسیستم، انواع گونه‌های گیاهی و حیوانی بوده و سلول‌های عصبی نیز اجزای تشکیل دهنده‌ی سیستم پیچیده‌ای به نام مغز انسان می‌باشند.

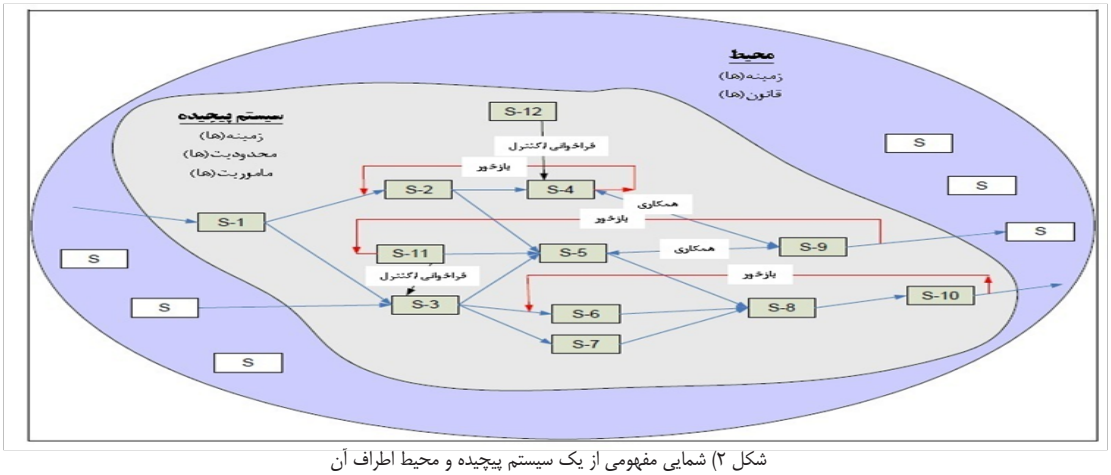
هر سیستم پیچیده، از شبکه‌ای از اجزا و عناصر که به صورت همزمان با یکدیگر و با محیط اطراف خود در تعامل هستند، تشکیل شده است. بین عناصر و عوامل مختلف کنش‌ها و واکنش‌های پیوسته‌ای صورت گرفته و در واقع هیچ چیزی ثابت نیست.

هر یک از اجزای سیستم پیچیده تا حد معینی مستقل بوده و ممکن است ماموریتی که به طور اختصاصی برای خود دارد، لزوما در راستای ماموریت کل سیستم نباشد. توانایی و یا تمایل هر عنصر برای تطبیق یا همراستا ساختن ماموریت خود با ماموریت کلی سیستم، پارامترهایی هستند که اثربخشی و کارایی کل سیستم را در رسیدن به ماموریت کلی تحت تاثیر قرار می‌دهند. این توانایی یا تمایل همچنین می‌توانند تا حدودی باعث ایجاد نظم در سیستم شوند.

1. edge-of-chaos

۲. تابع نمایی منفی

۳. حلقه‌های بازخور موجود در این سیستم پیچیده، داخلی هستند. حلقه‌های بازخور ممکن است در سطوح بالاتر نیز مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۲) شمایی مفهومی از یک سیستم پیچیده و محیط اطراف آن

۸) انواع تعاملات موجود میان اجزای سیستم پیچیده

(Gharajedaghi, 1999) در طبقه‌بندی رفتارهای سیستمی، حداقل چهار نوع تعامل را در میان اجزای سیستم پیچیده، شناسایی می‌نماید. این تعاملات بر اساس سطح انطباق‌پذیری میان ابزارها و سرانجام این سیستم‌ها تعریف می‌گردند. این تعاملات عبارتند از:

- همکاری: هنگامی که ابزارهای اجزای سیستم پیچیده و پایان یا سرانجام آن‌ها با یکدیگر سازگار باشد، میان اجزا همکاری صورت می‌گیرد.
- ائتلاف: هنگامی که ابزارهای اجزای سیستم با یکدیگر سازگار بوده اما سرانجام این اجزا با یکدیگر ناسازگار باشند، ائتلاف رخ می‌دهد. ائتلاف ممکن است شامل دو حالت متضاد باشد. در حالت اول دو سیستم سازگار برای رسیدن به هدف یا ماموریتی واحد و مشترک، با یکدیگر همکاری می‌کنند. در حالت دوم دو سیستم سازگار با یکدیگر همکاری نمی‌کنند اما برای رسیدن به هدفی مشترک در تلاش هستند. بنابراین ائتلاف ممکن است به تعاملات سازنده یا بی‌غرضانه منجر شود.
- رقابت: رقابت زمانی رخ می‌دهد که ابزارهای اجزا با یکدیگر ناسازگار هستند اما پایان یا سرانجام آن‌ها با یکدیگر سازگار هستند. سیستم‌هایی که در رقابت هستند، در راستای رسیدن به اهداف خود، رسیدن به بالاترین جایگاه یا نتیجه، تلاش می‌کنند. هر دو سیستم سعی می‌کنند به بهترین وجه کار کنند تا بتوانند در کوتاه‌ترین زمان ممکن به بهترین نتایج برسند. این نوع تعامل به صورت کلی ممکن است به نتایج سازنده‌ای منجر شود چرا که پایان اجزا با یکدیگر سازگار هستند.
- تعارض: تعارض زمانی رخ می‌دهد که هم ابزارهای اجزای سیستم پیچیده و هم پایان آن‌ها با یکدیگر ناسازگار باشند. تعارض ممکن است منجر به تعاملات مخرب و درگیری میان اجزای سیستم شود. در این حالت سیستم‌ها به قصد تخریب، علیه یکدیگر می‌جنگند.

کارایی و اثربخشی سیستم‌های پیچیده در رسیدن به اهداف یا ماموریتش ممکن است همزمان به ترکیبی از انواع تعاملات میان اجزای سیستم وابسته باشد (Gharajedaghi, 1999).

۹) سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق پذیر[1]

در ادبیات علمی تفاوت آشکاری میان سیستم‌های پیچیده و سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر وجود ندارد. تعاریفی که قبلا برای این گونه سیستم‌ها ارائه شده است اغلب عمومی‌تر از تعاریف کنونی هستند. بعضا اصطلاح سیستم‌های پیچیده را برای سیستم‌های طبیعی اما غیرزنده نیز به کار می‌برند. جان هالند که از پیشگامان حوزه‌ی پیچیدگی می‌باشد، اصطلاح سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر را ایجاد نمود تا بتواند توسعه‌ی پیوسته‌ی سیستم‌های پیچیده را توصیف نماید. (Holland, 1998) سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر را بدین گونه تعریف می‌نماید: بسیاری از سیستم‌های طبیعی (مثل مغز، سیستم‌های ایمنی

1. Complex adaptive systems (CASs)

بدن، اکولوژی‌ها و جوامع بشری) و همچنین بسیاری از سیستم‌های مصنوعی که تعداد آن‌ها به طور فزاینده‌ای در حال افزایش است (مانند سیستم‌های محاسبات موازی یا توزیعی، سیستم‌های هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و برنامه‌های تکاملی و پویا) و دارای رفتارهای پیچیده‌ی مشخصی هستند که این رفتار ناشی از تعاملات زمانی و مکانی بین تعداد زیادی از اجزای سیستم در سطوح مختلف سازمان می‌باشد را سیستم پیچیده‌ی انطباق‌پذیر گویند. چارچوب تئوریک این سیستم‌ها مبتنی بر مطالعاتی است که در علومی طبیعی همچون فیزیک، شیمی و زیست‌شناسی پیرامون آن‌ها صورت گرفته است. تجزیه‌وتحلیل سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر، توسط ترکیبی از روش‌های کاربردی، نظری و تجربی صورت می‌گیرد (به عنوان مثال از روش‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای).

(Dooley, 1996) سیستم پیچیده‌ی انطباق‌پذیر را این گونه تعریف می‌نماید: سیستمی است که از تعداد زیادی بخش شبه‌خودکار متعاملی (اغلب از این بخش‌ها تحت عنوان عامل نام برده می‌شود) تشکیل شده است که هر بخش دارای چندین رفتار اختصاصی ساده بوده اما هنگامی که این بخش‌ها با یکدیگر جمع شوند می‌توانند سیستمی را تولید نمایند که دارای رفتاری بسیار پیچیده می‌باشد.

(Dodder & Dare, 2000) با الهام از تلاش‌هایی که در بنگاه سانتافه صورت گرفته بود، خصوصیات بیشتری را به این سیستم‌ها اضافه نمودند. از نظر آن‌ها سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر شبکه‌هایی هستند که در آن عناصر زیادی در حال جمع‌آوری اطلاعات، یادگیری و فعالیت در محیطی که از طریق تعاملات میان همین اجزا تشکیل شده است، می‌باشند. این سیستم‌ها از جنبه‌های گوناگون در محیط اطراف خود در حال رشد و توسعه است و وضعیت آن‌ها از نظم تا اغتشاش متغیر بوده که این اغتشاش در حالت جدی به آشوب تبدیل می‌شود. در پدیده‌های نوظهور و یا انتقالی هم به جای آن که وضعیت سیستم از پیش تعیین شده باشد، نظم بر آن حاکم است.

سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر در سطوح مختلف سازمان وجود دارند بدین معنا که اجزای یک سطح، بلوک‌های سازنده‌ی اجزا در سطوح دیگر می‌باشند. به عنوان مثال سلول‌ها اجزای تشکیل دهنده‌ی موجودات زنده‌ای هستند که خود آن‌ها با یکدیگر تشکلیل یک اکوسیستم می‌دهند. در آخر هم بایستی بدین نکته توجه داشت که پیش‌بینی آینده‌ی سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر دشوار است چرا که این سیستم‌ها ماهیتی غیرخطی دارند. سرچشمه و اساس زندگی بر روی کره‌ی زمین، تکامل زیستی، رفتار موجودات زنده در سیستم‌های اکولوژیکی، سیستم‌های ایمنی بدن پستانداران، یادگیری و تفکر در حیوانات، تکامل جوامع و رفتارهای سرمایه‌گذاران در بازارهای مالی، مثال‌هایی از این نوع سیستم‌ها می‌باشند.

۱۰) حالات مختلف سیستم‌ها

در این بخش طرحی برای طبقه‌بندی سیستم‌ها ارائه می‌شود. این طبقه‌بندی مبتنی بر وضعیت پویای سیستم‌ها و برگرفته از کارهای اولیه‌ای است که توسط پیشگامان این عرصه، دکتر کافمن[1] و دکتر ولفرام[2]، صورت پذیرفته است. تحقیقات دکتر استوارت کافمن در دهه‌ی شصت به منظور درک تکامل سیستم‌های بیولوژیکی در سطح ژن‌ها صورت گرفت. کافمن به مطالعه و بررسی پرسش‌هایی همچون رابطه‌ی موجود میان متوسط ارتباطات میان ژن‌ها با توانایی کلی رشد و نمو سیستم‌های زنده پرداخت. سپس کافمن مشاهده نمود که می‌توان پرسش‌های مشابهی را در مورد ارتباطات ما بین شرکت‌ها در یک اقتصاد یا انواع مختلف گونه‌ها در یک اکوسیستم و یا در هر نوع سیستم انطباق‌پذیر پیچیده‌ی دیگری مطرح نمود.

آزمایشات کافمن الگوهای قانونی پویایی که ممکن است در سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر وجود داشته باشند را آشکار ساخت. این آزمایشات را می‌توان به طور خلاصه این گونه شرح داد: درخت کریسمسی را در نظر بگیرید که دارای N لامپ می‌باشد. هر یک از این لامپ‌ها دو وضعیت داشته؛ خاموش یا روشن. هر لامپ از طریق سیم

1. Dr. Kauffman
2. Dr. Wolfram

به K لامپ دیگر متصل شده است. قانون ساده‌ای وجود دارد که عملکرد هر لامپ را تشریح می‌کند. به عنوان مثال فرض کنید که K=3، بدان معنا که هر لامپ از طریق سیم به ۳ لامپ دیگر متصل است. از این لحظه به بعد هر لامپی باید تصمیم بگیرد که بر اساس وضعیت لامپ‌های اطرافش خاموش باشد و یا روشن. قانونی که معمولا برای این موارد وجود دارد قانون اکثریت است، بدین معنا که اگر ۲ یا ۳ لامپ کناری روشن باشند، لامپ مورد نظر نیز روشن خواهد شد و در غیر اینصورت خاموش خواهد بود. هنگامی که جریان الکتریسته در این سیستم برقرار شود، رفتار سیستم چگونه خواهد بود؟ کافمن دریافت که دو الگوی رفتاری برای این سیستم‌ها وجود دارد: رفتار منظم (خطی) و یا نامنظم (آشفته)[1] .

پس از آن الگوی رفتاری سومی نیز توسط لانگتون[2] ارائه گردید که در آن نقطه‌ی گذاری را بین نظم و آشوب مطرح نمود. رفتار این نقطه به اندازه‌ای متفاوت است که بتوان آن را به عنوان یک الگویی جدید معرفی نمود. لانگتون این نقطه‌ی گذار را، لبه‌ی آشوب نامید. این سه الگو عبارتند از:

(۱) الگوی رفتاری ثابت یا دوره‌ای: این الگو مربوط به زمانی است که در آزمایش کافمن K کوچک باشد (K=۱). در این حالت برخی از لامپ‌ها چندین بار روشن و خاموش می‌شوند اما بیشتر لامپ‌های این رشته خیلی زود خاموش شده و دیگر چشمک نخواهند زد.

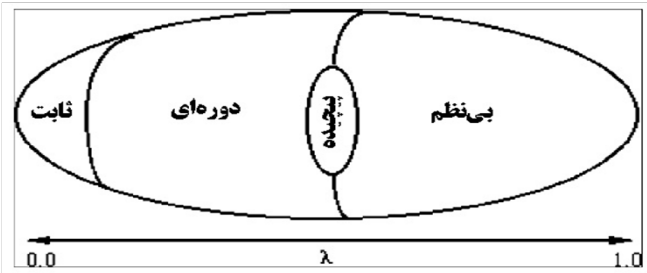
(۲) الگوی رفتاری پیچیده: در این الگو K در حدود ۲ می‌باشد. در این حالت لامپ‌ها به صورت جزیره‌ای روشن و خاموش شده و شکل آن‌ها در مرزهایشان متغیر است.

(۳) الگوی رفتاری بی‌نظم (آشفته): در این الگو K بزرگ بوده و لامپ‌ها به صورت غیرمنظم در حال چشمک زدن هستند چرا که آن‌ها یکدیگر را خاموش یا روشن می‌نمایند.

دکتر کافمن و ولفرام دریافتند که شبکه‌هایی از لامپ‌های متصل به هم که دارای الگوی ثابت و یا بی‌نظم هستند نمی‌توانند اطلاعات را منتقل کرده و همچنین خاصیت تطبیق‌پذیری ندارند. اما لانگتون خاصیتی جالب توجه از سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر را در لبه‌ی آشوب کشف نمود. او دریافت که یک شبکه‌ی پیچیده‌ی در نزدیکی لبه‌ی آشوب هم می‌تواند اطلاعات را منتقل کرده و هم خاصیت تطبیق‌پذیری داشته باشد.

اخیرا دکتر استفان ولفرام به منظور آشکار ساختن پویایی رفتار پیچیده‌ی ربات‌های دارای بافت سلولی، نوع دیگری از آزمایشات را به انجام رساند[3] . در یک ربات سلولی دوبعدی ساده که از شبکه‌ای از سلول‌ها با رنگ‌های مختلف تشکیل شده است، یک ردیف از سلول‌های شبکه روشن می‌شوند. هر سلول رنگ خود را با رنگ نزدیک‌ترین سلول کناری خود مقایسه نموده و بر اساس اصول موجود تصمیم می‌گیرد که سلول رنگی ردیف بعدی را روشن نماید و یا نه؟ این آزمایش معادل با همان مدل دو بعدی NK است که می‌توان در آن K را نزدیک‌ترین سلول مجاور بروی شبکه تعریف نمود.

ولفرام از این آزمایش چهار نوع الگوی رفتاری را استخراج نمود که عبارتند از: ثابت، دوره‌ای، پیچیده و بی‌نظم. لانگتون معیاری (پارامتر λ در شکل ۳) را طراحی نمود که مربوط به ماهیت قوانین حاکم در بین سلول‌ها بوده است و رفتار کلی ربات‌های سلولی را مشخص می‌نماید. او تشخیص داد که دسته‌ی سوم رفتاری آزمایش او برابر با الگوی پیچیده‌ی لانگتون است. در واقع این گونه رفتار ما بین الگوهای دوره‌ای و بی‌نظم واقع شده و در لبه‌ی آشوب قرار دارد. هر چند استفاده از روش ربات‌های سلولی برای مطالعه‌ی پیچیدگی با روش‌هایی که در مدل‌های NK استفاده می‌شوند متفاوت است اما هر دوی این روش‌ها مثال‌های شهودی و قابل درکی را از رفتار پیچیده مشابه در نقطه‌ی انتقال بین الگوی خطی و بی‌نظم فراهم می‌آورند.



شکل ۴: طبقه‌بندی رفتاری لانگتون برای ربات‌های سلولی

1. disordered (chaotic)
2. Langton

۳. برای انجام این آزمایش از شبیه‌سازی کامپیوتری استفاده می‌شود. یک سیستم پویای گسسته که از ردیفی از سلول‌ها تشکیل شده و هر یک از سلول‌های آن همانند یک ربات وضعیت–محدود رفتار می‌نمایند، کار شبیه‌سازی را انجام می‌دهند. تمامی تعاملات به صورت موضعی صورت گرفته و حالت بعدی یک سلول وابسته به وضعیت فعلی خود سلول و سلول مجاور آن می‌باشد.

این الگوی پویای رفتاری را می‌توان دامنه‌ی حالت[1] نامید. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، دامنه‌ی حالت خطی در سمت چپ محور X قرار دارد، دامنه‌ی حالت پیچیده در میانه‌ی محور X و در سمت راست محور هم دامنه‌ی حالت بی‌نظم قرار دارد.

برخی از تفاوت‌های میان این دامنه‌ها را می‌توان در قالب موارد زیر بیان نمود:

حالت: سیستم‌هایی که در دامنه‌ی حالت خطی قرار دارند، حالتی از پیش تعریف شده دارند. این سیستم‌ها محدود بوده و کاملا کنترل شده می‌باشند. سیستم‌هایی که در محدوده‌ی دامنه‌ی حالت پیچیده یا بی‌نظم قرار می‌گیرند، تعداد حالات بسیاری دارند. پیش‌بینی رفتار آن‌ها در مقیاس‌های زمانی بلند و میان مدت سخت و یا غیرممکن می‌باشد.

نظم: ساختار و عناصر سیستم متعلق به دامنه‌ی حالت خطی، به صورت منظم باقی می‌مانند. این سیستم‌ها معمولا این حالت را در تمام مدت عملکرد سیستم نگه می‌دارند. سیستم‌های متعلق به دامنه‌ی حالت پیچیده نیز منظم می‌باشند اما این سیستم‌ها قادر هستند که به سازماندهی اجزای خود پرداخته (خاصیت خودسازماندهی داشته) و خود را با تغییرات داخلی و خارجی تطبیق دهند[2]. در سیستم‌هایی که متعلق به دامنه‌ی حالت بی‌نظمی هستند، به سختی می‌توان نظم را مشاهده نمود چرا که این سیستم‌ها در طول زمان به سرعت و پیوسته در حال تغییر هستند.

خطی بودن: با حرکت از دامنه‌ی حالت خطی به سمت دامنه‌ی حالت بی‌نظمی خطی بودن سیستم‌ها به سرعت کاهش می‌یابد. سیستم‌هایی که در دامنه‌ی حالت پیچیده قرار می‌گیرند، دارای خواص غیرخطی کمتری نسبت به سیستم‌های بی‌نظم هستند.

ورودی در مقابل خروجی: اختلالات کوچک در ورودی سیستم‌ها می‌توانند تاثیرات متفاوتی را بر انواع سیستم‌ها بگذارند. این تفاوت تاثیرات به قرار گرفتن سیستم در دامنه حالت‌های مختلف، وابسته است. تغییرات کوچک در ورودی سیستم‌های خطی، تاثیر چندانی بر آن‌ها ندارد. در بدترین حالت، هنگامی که تغییرات ورودی از مقدار پیش تعیین شده بیشتر شود، سیستم متوقف خواهد شد. وضعیت سیستم‌های متعلق به دامنه‌ی حالت‌های پیچیده و یا بی‌نظم متفاوت است. اختلالات کوچک در ورودی سیستم‌های پیچیده یا بی‌نظم، منجر به تاثیراتی کاملا متفاوت خواهد شد. هر چه به سمت دامنه‌ی حالت بی‌نظمی نزدیکتر شویم، حساسیت نسبت به اختلالات ورودی بیشتر خواهد شد.

کنترل: برخلاف سیستم‌های خطی که نسبتا می‌توان آن‌ها را به سادگی کنترل کرد، سیستم‌های پیچیده و بی‌نظم را به واسطه‌ی ماهیت پیچیده‌ای که دارند، نمی‌توان به سادگی کنترل کرد. تغییر تنها یک عنصر در یک سیستم پیچیده ممکن است منجر به دشوار شدن پیش‌بینی رفتار کلی سیستم در بازه‌ی زمانی میان و بلند مدت شود. پیش‌بینی در سیستم‌های بی‌نظم غیرممکن بوده و این سیستم‌ها کاملا پیش‌بینی‌ناپذیر هستند.

۱۱) بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی گردید تا با بررسی انواع تعاریف موجود در زمینه‌ی سیستم، سیستم‌های پیچیده و سیستم‌های پیچیده‌ی انطباق‌پذیر، تعریفی جامع از آن‌ها ارائه شده و انواع الگوهای رفتاری آن‌ها معرفی شوند. این الگوهای پویایی رفتاری دامنه‌ی حالت نامیده شده و بر اساس طبقه‌بندی لانگتون سه دامنه‌ی حالت خطی، پیچیده و بی‌نظم (آشفته) را می‌توان شناسایی نمود. سیستم‌هایی که در هر یک از این دامنه‌ی حالات قرار می‌گیرند، دارای ویژگی‌های خاص خود بوده و رفتارهای ویژه‌ای را از خود بروز می‌دهند.

سیستم‌های متعلق به دامنه‌ی حالت خطی دارای تعدد حالات محدود و نظم از پیش تعیین شده است، به سادگی کنترل می شود، تغییرات ورودی در آن‌ها تاثیر چندانی بر خروجی آن‌ها ندارد، دارای پویایی است اما انعطاف‌پذیری چندانی ندارند. سیستم‌های متعلق به دامنه‌ی حالت پیچیده نسبت به سیستم‌های خطی دارای تعدد حالات بیشتری منظم هستند اما خودسازماندهی در آن‌ها موجب ایجاد

1. State Domain

۲. این تغییرات ممکن است شامل تغییر ساختار و یا ترکیب این سیستم‌ها نیز باشد.

تغییرات می‌شود. این سیستم‌ها غیرخطی و انعطاف پذیرند و به علت وجود حلقه‌های پس‌خور منفی برای پایدار نگه‌داشتن سیستم، کنترل‌پذیری کمتری دارند. تغییرات اندک در ورودی این سیستم‌ها منجر به تغییر خروجی شده که اغلب پیش‌بینی این تغییر دشوار می‌باشد. سیستم‌های بی‌نظم یا آشفته نیز تعدد حالات بسیار زیادی داشته، بسیار غیرخطی و پیش‌بینی ناپذیرند و مشاهده‌ی نظم در آن‌ها دشوار می‌باشد. در این سیستم‌ها تغییرات اندک در ورودی منجر به تغییر کلی خروجی به گونه‌ای که این تغییر قابل پیش بینی نیست می شود. کنترل این سیستم‌ها از طریق شیوه‌های کلاسیک پویایی‌شناسی سیستم تقریبا غیرممکن می‌باشد.

در دنیای مدرن امروزی که سیستم‌ها و تعاملات میان آن‌ها به طور فزاینده‌ای در حال افزایش است و توسعه‌ی توانایی طراحی صحیح انواع سیستم‌ها به امری اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است، شاید مهمترین دلیل ضرورت شناسایی و طبقه‌بندی الگوهای رفتاری این باشد که با این کار می‌توان به طراحی صحیح و مهندسی سیستم‌ها کمک شایانی نمود. در واقع شناسایی تفاوت‌های میان این الگوها ابزار توانمندی را در جهت تسهیل دست‌یابی به این هدف فراهم و به بهره‌وری بالاتر سیستم‌ها کمک نماید.

شکل ۵) انواع دامنه‌های حالت

۱۲) مراجع

1.Beech, F. Michael, 2004. Observing Al Qaeda through the Lens of Complexity Theory : Recommendations for the National Strategy to Defeat Terrorism. Center for Strategic Leadership, Student Issue Paper, Volume S04-01, can be found at: http://www.carlisle.army.mil/usacsl/Publications/.

2.Beer, S. (1984). The Viable System Model: Its Provenance, Development, Methodology, and Pathology, Journal of Operational Research Society, Vol. 35, pp. 7-26.

3.Calhoun, T. Mark, 2004. Complexity

and Innovation: Army Transformation and the Reality of War. Fort Leavenworth, KS: School of Advanced Military Studies, Army Command and General Staff College, can be found at: http://handle.dtic.mil/100.2/ADA429156.

4.Chan, Serena, 2001. Complex Adaptive Systems. ESD.83 Research Seminar in Engineering Systems, Massachusetts Institute of Technology, October 31, 2001/November 6, 2001, can be found at: http://web.mit.edu/esd.83/www/notebook/.

5.Coutur, M, 2007. Complexity and chaos - State-of-the-art; Overview of theoretical concepts, Defence R&D Canada – Valcartier, Technical Memorandum, DRDC Valcartier TM 2006-453, August 2007.

6.Dodder, Rebecca and Robert Dare, 2000. Complex Adaptive Systems and Complexity Theory: Intere-related Knowledge Domains. ESD.83 Research Seminar in Engineering Systems, Massachusetts Institute of Technology, October 31, 2000, can be found at: http://web.mit.edu/esd.83/www/notebook/.

7.Dooley, K., 1996. A Nominal Definition of Complex Adaptive Systems. The Chaos Network, Volume 8, Number 1.

8.Holland, J.H., 1992. Adaptation in Natural and Artificial Systems. MIT Press.

9.Holland, J.H., 1996. Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity. Harper Collins Canada, Perseus Books, ISBN: 0201442302.

10.Holland, J.H., 1998. Emergence: from chaos to order. Oxford University Press or Harper Collins Canada, Perseus Books, ASIN: 0201149435.

11.Gharajedaghi, Jamshid, 1999. Systems Thinking: Managing Chaos and Complexity: A Platform for Designing Business Architecture. Butterworth-Heinemann, Reed Elsevier Group, ISBN: 0750671637, number of pages: 302.

12.Kauffman, Stuart, 1995. At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity. Oxford University Press, New York, NY, US, ISBN: 0195111303, number of pages: 336.

13.Klir, G. (1985). Complexity: Some General Observations, Systems Research, Vol. 2, No. 2, pp. 131-140.

14.Langton, C., 1986. Studying artificial life with cellular automata. In Farmer, D., Lapedes, A., Packard, N., Wendroff, B., eds.: Evolution, Games, and Learning: Models for Adaptation in Machines and Nature, Proceedings of the Fifth Annual Conference of the Center for Nonlinear Studies.

15.Langton, C. G., 1989. Artificial life. In C.G. Langton (Ed.), Artificial Life, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Proc. Vol. VI, (1-48), Addison Wesley, Redwood City, CA.

16.Langton CG., 1990. Computation at the edge of chaos: phase transitions and emergent
computation. Physica D 42:12–37

17.Langton CG., 1991. Computation at the edge of chaos: phase transitions and emergent
computation. PhD diss. University of Michigan.