فصلنامه علمی - ترویجی
سیاست‌نامه علم و فناوری
دورهٔ ۸ شمارهٔ ۲ تابستان ۱۳۹۷

کاربرد مدل‌سازی عامل‌بنیان در تحلیل سیستم‌های پیچیدهٔ اجتماعی: روش‌شناسی تحلیل سیستم‌های نوآوری

سعید روشنی[۱]

چکیده

هدف اصلی از نگارش این مقاله شرح روش‌شناسی تحلیل سیستم‌های اجتماعی پیچیده با تمرکز بر روش تحلیل سیستم‌های نوآوری است. در این مقاله تلاش شده نخست سیستم نوآوری، به‌منزلهٔ یک سیستم پیچیدهٔ اجتماعی تطابق‌پذیر، تحلیل شود و سپس، بر این اعتبار، روش‌شناسی مناسب تحلیل این قبیل سیستم‌ها تشریح گردد. رویکرد بسط‌داده‌شده در این تحقیق مدل‌سازی عامل‌بنیان است که مفاهیمی همانند نظریهٔ بازی‌ها، سیستم‌های پیچیده، ظهوریافتگی، علوم اجتماعی محاسباتی، سیستم‌های چندعاملی و روش‌های مونت کارلو را با یکدیگر ترکیب می‌کند تا منطقی منسجم برای درک سیستم‌های پیچیده ارائه نماید. نتایج این بررسی نظری نشان می‌دهد که درک و تحلیل هر سیستم نوآوری مستلزم به‌کارگیری روش‌های متناسب با سیستم‌های پیچیده است و بهترین رویکرد نظری برای تحلیل سیستم نوآوری مدل‌سازی عامل‌بنیان و استفاده از شبیه‌سازی پویایی‌های تبادل دانش در شبکه‌های نوآوری است که از رویکردهای مطرح در مدل‌سازی عامل‌بنیان شناخته می‌شود.

واژگان کلیدی: سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده، مدل‌سازی عامل‌بنیان، سیستم‌های نوآوری، شبیه‌سازی پویایی‌های تبادل دانش، شبکه‌های نوآوری.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

مقدمه

در سال ۱۹۴۸، ویور در کار کلاسیک خود با عنوان «علم و پیچیدگی» سه مسئلهٔ اساسی را مطرح کرد که علم در درجهٔ نخست و به‌تبع آن سیستم با آن مواجه است: سادگی،[۲] پیچیدگی سازمان‌نیافته[۳] و پیچیدگی سازمان‌یافته.[۴] در مسائل مرتبط با سادگی، سیستم به تعداد محدودی از متغیرها تقلیل داده می‌شود و روابط میان آن‌ها شناسایی می‌گردد. این نوع از سیستم‌ها عمدتاً با معادلات ریاضی نمایش داده می‌شوند. در مسائل مرتبط با پیچیدگی سازمان‌نیافته، سیستم انتزاعی است از علائق متنوع که هزاران متغیر را با یکدیگر ترکیب می‌کند و در آن، به‌جای مطالعهٔ رفتار تک‌تک اجزا و موجودیت‌ها، به مطالعهٔ ویژگی‌های کلی سیستم پرداخته می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، در این مسائل اثر همهٔ موجودیت‌های سیستم مطالعه می‌شود و صرفاً ورودی و خروجی سیستم اهمیت دارد و نه فهم ساختارهای درونی که به ایجاد برون‌دادهای مشخصی منجر می‌شوند. مسائل سطح سوم، که به

---

۱. دانشجوی دکتری مدیریت فناوری، دانشگاه علامه طباطبائی؛ Spr.roshany@gmail.com

2. Simplicity
3. Disorganized Complexity
4. Organized Complexity

پیچیدگی ساختاریافته مربوط‌اند، شامل سیستم‌هایی می‌شوند که در هریک از آن‌ها تعداد متوسطی از موجودیت‌هایی وجود دارد که به‌شدت با یکدیگر درتعامل‌اند. این دسته از مسائل عمدتاً با سؤالات چگونگی[1] درک می‌شوند و هدف از آن‌ها این است که از رفتار کلی سیستم و مبتنی بر تعاملات اجزای درونی آن شناخت حاصل شود (Weaver, 1991).

دانشمندان و محققان برای تحلیل سیستم‌های ساده و سیستم‌های پیچیدهٔ سازمان‌نیافته ابزارهای متنوعی را ابداع کرده‌اند؛ مثلاً ابزارهای ارائه‌شده در ریاضیات همانند معادلات دیفرانسیل و تکنیک‌های مختلف آماری تلاش‌های گسترده‌ای هستند برای فهم رفتار سیستم‌های ساده و سیستم‌های پیچیدهٔ سازمان‌نیافته. دراین‌میان، سیستم‌های سازمان‌یافتهٔ پیچیده، به‌علت ماهیت رفتار غیرخطی و ارتباطات غیرخطی میان موجودیت‌هایشان، با فقدان نسبی ابزارهای تحلیلی مواجه‌اند. تلاش‌های بسیاری در طول تاریخ صورت گرفته تا ماهیت این سیستم‌ها تشریح و نحوهٔ رفتار و عمل آن‌ها تبیین شود؛ مثلاً طرف‌داران نظریهٔ تطوری داروین در تلاش بودند تا نشان دهند چگونه عمل و عکس‌العمل‌های میان موجودیت‌های سیستمِ زیستی در طول زمان به تطبیق گروهی با محیط منجر می‌شود؛ آدام اسمیت با طرح نظریهٔ «دست نامرئی بازار»[2] در اقتصاد در تلاش بود تا نشان دهد چگونه منفعت‌طلبی هریک از موجودیت‌های یک سیستم اقتصادی، که حداکثرسازی منافع خود را دنبال می‌کنند، به بهبود شرایط اقتصادی و دستیابی به تعادل در سطح گروهی و کلی اقتصاد منجر می‌شود؛ دونالد هب[3] با طرح نظریهٔ «مجتمع سلولی»[4] می‌خواست تطابق نورون‌های مغز در فرایند یادگیری را شرح دهد و جان نیومن[5] از طریق نظریهٔ «اتوماتای سلولی»[6] خود در پی آن بود که فرایند خودبازتولیدکنندگی[7] سیستم را شرح دهد (Axelrod and Cohen, 2000, p. 19). ظهور کامپیوترها و رشد قابلیت‌های محاسباتی آن‌ها برای تحلیل روابط غیرخطی و تبیین رفتارهای تعاملی به ایجاد توانایی در شبیه‌سازی سیستم انجامیده است. مثلاً پارادایم شبیه‌سازی گسستهٔ پیشامد[8] به پیشرفت‌هایی در فهم مسائل سیستمی گوناگون انجامید. این پیشرفت‌ها عبارت‌اند از: توسعهٔ ابزارهایی برای ایجاد شبیه‌سازی سیستمی، بهبودهایی در جنبه‌های فنی شبیه‌سازی، تکنیک‌هایی برای تحلیل و تولید شاخص‌های سنجش برون‌داد سیستم و تکنیک‌هایی برای کمک به اعتبارسنجی و تأیید میزان تطابق شبیه‌سازی با جهان واقعی (Law et al., 1991, p. 2). پس از این پارادایم و با گسترش توان محاسباتی رایانه‌ها، پارادایمی که برای شبیه‌سازی مسائل مربوط به سیستم‌های پیچیدهٔ سازمان‌یافته توسعه داده شد مدل‌سازی عامل‌بنیان[9] است. مدل‌سازی عامل‌بنیان پارادایم شبیه‌سازی محاسباتی است که از موجودیت‌های خودمختار[10] ایجاد شده که با یکدیگر و با محیطشان تعامل برقرار می‌کنند (Ferber, 1999).

رشد روزافزون و ناگهانی علوم پیچیدگی به شکل‌گیری و توسعهٔ مدل‌سازی عامل‌بنیان در حکم ابزاری مفید برای تحلیل سیستم‌های اجتماعی پیچیده منجر شد. ازسوی دیگر، بهبودهایی که در پردازش داده‌ها حاصل شد مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده در سیستم‌ها را ممکن ساخت (McGlade and Garnsey, 2006, p. 1). برای تحلیل سیستم‌های اجتماعی پیچیده استفاده از روش‌های معادلات دیفرانسیل کاربرد ندارد، بنابراین از مدل‌سازی عامل‌بنیان و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری استفاده می‌شود که روش‌هایی پرکاربرد و مفسرند (Pyka and Fagiolo, 2007). به‌واسطهٔ رویکردهای عامل‌بنیان می‌توان تاریخ را، که شامل وابستگی به مسیر طی‌شده و تغییرناپذیری[11] است، ملاحظه کرد و نوسانات تصادفی و انقطاع[12]های زمانی را نشان داد (Garcia, 2005, p. 381). مدل‌سازی عامل‌بنیان و شبیه‌سازی از سایر روش‌های مدل‌سازی مورد استفاده در تحقیقات، همچون معادلات دیفرانسیل و روش‌های آماری پیشرفته، انعطاف‌پذیرتر است و دچار محدودیت‌های ناشی از حجم داده نیز نمی‌شود (Brenner and Werker, 2007). براین‌اساس، هدف اصلی از نگارش این مقاله شرح روش‌شناسی عامل‌بنیان به‌منزلهٔ رویکردی توانمند در تحلیل سیستم‌های اجتماعی پیچیده است. با رویکردی تبارشناسانه، مدل‌سازی عامل‌بنیان از بُعد هستی‌شناسی به دیدگاه‌های عینی و جبری و در بُعد معرفت‌شناسی به رویکردهای اثبات‌گرا و تحصل‌گرا می‌رسد. این رویکرد نظری از منظر روش‌شناختی جهت‌گیری‌های تجربی و نظام‌مند دارد و در آن کنترل متغیرها و تبیین روابط بین آن‌ها با دقت بسیار زیاد از اصول اساسی است. بر اساس چنین دیدگاهی، فقط حقایق مشهود و تجربه‌های عینی را می‌توان ملاک معتبر علمی دانست (زاهدی و دیگران، ۱۳۷۶، ص ۲۵۹).

مدل‌سازی عامل‌بنیان در زمرهٔ جدیدترین بنیان‌های نظری است که ماهیت سیستمی موجود در زمینه‌های اکولوژیکی پدیده‌های اجتماعی را قابل فهم و شناخت می‌سازد. بر اساس این نظریه، سیستم‌ها به تعامل دائمی با محیطشان و تأثیرگذاری متقابل با یکدیگر می‌پردازند و با تقسیر و تغییر اطلاعات، الگوهای جدیدی را پدید می‌آورند که خود باعث تغییر و تحول بنیادی در میدان‌های

1. How Questions
2. Hidden Hand
3. Donald Hebb
4. Cell Assembling
5. John Neumann
6. Cellular Automata
7. Self-reproducing
8. Discrete
9. Agent Based Modeling
10. Autonomous
11. Irreversibility
12. Disruption

تعاملی می‌شود. انطباق‌پذیری، خودتنظیمی، بازخوردهای مثبت، استقلال از مقیاس و ظهوریافتگی برخی از مؤلفه‌های اصلی چنین سیستم‌هایی هستند که فقط از طریق رویکردهای عامل‌بنیان و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری می‌توان آن‌ها را تحلیل کرد.

در این مقاله، تلاش شده است تا نخست سیستم‌های پیچیده معرفی و سپس روش مدل‌سازی عامل‌بنیان تشریح شود. درنهایت، سیستم نوآوری به صورت سیستمی پیچیده معرفی و روش تحلیل مناسب آن با توجه به رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان ارائه می‌گردد.

۱. سیستم‌های پیچیده

مطالعهٔ سیستم‌های پیچیده توسط انسان قدمتی به طول هزاران سال دارد. نخستین تلاش‌های وی برای فهم الگوهای آب‌وهوایی و حرکت ماه و خورشید در آسمان تا فهم رفتار آتش و... تا طراحی روش‌های محاسباتی و کامپیوتری نشان‌دهندهٔ اهمیت فهم سیستم‌های پیچیده برای اوست. پیچیدگی نتیجهٔ ارتباطات متقابل، تعامل و اتصال میان موجودیت‌های هر سیستم با یکدیگر و با محیط سیستم است. بسیاری از سیستم‌های طبیعی (مغز، سیستم ایمنی بدن، جوامع و...) و بسیاری از سیستم‌های مصنوعی (سیستم‌های محاسباتی موازی و توزیع‌شده، سیستم‌های هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و...) به واسطهٔ رفتارهای پیچیده‌ای شناخته می‌شوند که از تعاملات غالباً غیرخطی و وابسته به فضا ـ زمانِ تعداد زیادی از اجزای سیستم ظهور می‌یابند (Chan, 2001). بررسی مبانی نظری نشان می‌دهد که تعابیر متعدد و عموماً یکسانی از سیستم‌های پیچیده وجود دارد که تحت عناوین مختلفی همانند نظریهٔ آشوب،[1] نظریهٔ پیچیدگی،[2] علوم پیچیدگی[3] و تفکر سیستمی[4] ارائه شده‌اند (Palmberg, 2009, p. 1).

به‌طورکلی سیستم پیچیده عبارت است از: سیستمی با شبکه‌ای بزرگ از اجزا که هیچ کنترل مرکزی‌ای در آن وجود ندارد. قواعد حاکم بر این سیستم‌ها از الگوهای ساده‌ای تبعیت می‌کنند که به پدیدارشدن رفتار پیچیدهٔ جمعی، پردازش اطلاعات درهم‌تنیده و انطباق[5] از راه یادگیری یا تطور منجر می‌شود (Mitchell, 2009). حوزهٔ دانشی سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده عمدتاً در خصوص سیستم‌های زیستی مورد توجه محققان قرار گرفت و بیشتر بر این مسئله متمرکز گردید که رفتارهای انطباقی پیچیده چگونه از تعامل میان موجودیت‌های خودمختار منتج می‌شوند (Macal and North, 2005). یکی از مهم‌ترین مشارکت‌های نظری که به توسعهٔ حوزهٔ دانشی سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده و مدل‌سازی عامل‌بنیان منجر گردید به همت هالند صورت پذیرفت (Holland, 1995). هالند در مقالهٔ خود چهار ویژگی و سه سازوکار مشترکِ سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده را شناسایی و معرفی کرده است. او تلاش کرده تا همهٔ ویژگی‌های سیستم‌های پیچیده را که تا آن زمان محققان متعددی شناسایی کرده بودند گردآوری کند و دسته‌بندی روشن و مشخصی از آن‌ها ارائه دهد. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از: ۱) تجمع،[6] ویژگی‌ای که به گروه‌ها امکان شکل‌گرفتن می‌دهد؛ ۲) غیرخطی‌بودن،[7] به این مفهوم که برون‌دادهای کلی سیستم بیشتر از جمع جبری برون‌دادهای تک‌تک اجزاست؛ ۳) جریان‌ها،[8] که انتقال و تبادل منابع و اطلاعات را در درون سیستم میسر می‌سازند، و ٤) تنوع،[9] که موجودیت‌های درون سیستم را قادر می‌سازد تا بتوانند به شکل متمایزی از دیگران رفتار کنند و غالباً منجر به پابرجایی[10] سیستم می‌شود. همچنین، سازوکارهایی که هالند مطرح می‌سازد عبارت‌اند از: ۱) علامت‌گذاری،[11] که موجودیت‌های سیستم را قادر می‌سازد تا نام‌گذاری و شناخته شوند؛ ۲) مدل‌های درونی،[12] که موجودیت‌های سیستم را قادر می‌سازد تا از محیطشان درک پیدا کنند و تصمیم‌گیری نمایند، و ۳) عناصر پایه‌ای،[13] که به سیستم و موجودیت‌های آن امکان می‌دهند که از ترکیب سطوح بسیار ساده‌تری از اجزا شکل بگیرند. ویژگی‌هایی که هالند برای سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده ذکر کرد به ایجاد مرز معیّنی میان انوع سیستم‌ها انجامید که درنهایت مسیر توسعهٔ نظری این حوزه را تسهیل کرد. برای سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده ویژگی‌های بسیاری در مبانی نظری ذکر شده است، ویژگی‌هایی برای تبیین ماهیت این سیستم‌ها. در جدول زیر تلاش شده است تا به مهم‌ترین ویژگی‌هایی که محققان برشمرده‌اند اشاره شود.

۲. سیستم نوآوری به‌مثابهٔ سیستم پیچیدهٔ انطباق‌پذیر

رویکرد سیستم‌های نوآوری[14] که در طول دو دههٔ اخیر ظهور پیدا کرده و از بُعد نظری توسعه یافته است مترصد نشان‌دادن راهی برای مطالعهٔ فرایندهای نوآوری به‌منزلهٔ جزء درون‌زا[15]ی اقتصاد بوده است. این رویکرد، اگرچه نظریه‌ای رسمی شناخته نمی‌شود و عمدتاً در حکم چارچوبی مفهومی از آن یاد شده، در میان متفکران و محققان

1. Chaos Theory
2. Complexity Theory
3. Complexity Science
4. System Thinking

۵. یکی از عناصر اساسی در سیستم‌های پیچیده که گاهی محل تمایز میان سیستم‌های پیچیدهٔ انطباق‌پذیر و سیستم‌های پیچیدهٔ انطباق‌ناپذیر می‌شود، همانند طوفان یا رفتار یک رودخانهٔ خروشان. در این مقاله سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده بررسی شده‌اند.

6. Aggregation
7. Nonlinearity
8. Flows
9. Diversity
10. Robustness
11. Tagging
12. Internal Models
13. Building Blocks
14. System of Innovation
15. Endogenous

جدول ۱: ویژگی‌های سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده

ردیف	ویژگی	شرح	منبع
۱	کنترل توزیع‌شده یا خودسازمان‌دهی	در سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده هیچ سازوکار کنترلی متمرکزی رفتار موجودیت‌های سیستم را کنترل نمی‌کند. به بیان دیگر، الگوهای رفتاری جدید در درون سیستم نتیجهٔ تعاملات و ارتباطات میان موجودیت‌های درون سیستم‌اند.	Chan, 2001; Anderson, 1999; Axelrod and Cohen, 2000; Goodwin, 1994
۲	انطباق	همهٔ این سیستم‌ها، برای افزایش امکان بقا یا موفقیت خود در محیط از راه یادگیری یا تطور، رفتار خود را تغییر می‌دهند و با تغییرات سایر موجودیت‌های سیستم و محیط تطبیق پیدا می‌کنند.	Michell, 2009; Ellis and Herbert, 2011; Chan, 2001
۳	تنوع	در سیستم‌های پیچیده، موجودیت‌های درون سیستم با یکدیگر متفاوت (ناهمگون) هستند و عملکرد آن‌ها در وجه نخست به سایر موجودیت‌ها و به عملکرد سیستم در حالت کلی وابسته است.	Holland, 1995; Axelrod and Cohen, 2000
۴	موجودیت‌های (عوامل) مستقل و خودمختار	هر سیستم انطباق‌پذیر پیچیده شامل موجودیت‌هایی است که بدون وابستگی به سایر عوامل درون سیستم فکر می‌کند، ادراک دارد و تصمیم می‌گیرد و در برابر نتایج تصمیمات خود پاسخ‌گوست. هر موجودیت (عامل) حافظه دارد و می‌تواند از تجارب خود سرمشق بگیرد و پاسخ‌های جدید تولید کند.	Kelly and Allison, 1999; Richardson, 2008
۵	ظهوریافتگی[1]	ظهوریافتگی پدیده‌ای است که از تعامل موجودیت‌های درون سیستم به‌وجود می‌آید. به بیان دیگر، ظهوریافتگی ایجادشدن ویژگی‌ها، ساختار و قابلیت‌هایی است که در ذات موجودیت‌های سیستم وجود ندارند و از تعامل میان موجودیت‌ها پدید می‌آیند.	Gharajedaghi, 1999; Tapscott and Williams, 2006; Axelrod and Cohen, 2000; Michell, 2009
۶	هم‌تطوری[2]	موجودیت‌های درون هر سیستم ممکن است بر اساس تعاملاتشان با یکدیگر و با محیط تغییر کنند. به‌علاوه، الگوهای رفتاری موجودیت‌های سیستم شاید در طول زمان تغییر کنند. موجودیت‌های درون سیستم در همکاری و یا رقابت با یکدیگر به عمل و عکس‌العمل می‌پردازند.	Kelly and Allison, 1999; Axelrod and Cohen, 2000

مطالعات توسعه و اقتصاد دانایی مقبولیت فراوانی پیدا کرده و توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. ایدهٔ اصلی‌ای که این چارچوب بر آن تکیه می‌کند این است که عملکرد اقتصادی در سطوح مختلف، همانند عملکرد اقتصادی در سطح ملی یا منطقه‌ای، نه‌تنها به چگونگی عملکرد بنگاه‌های تجاری، بلکه به چگونگی تعامل آن‌ها با یکدیگر و با سایر اجزای سیستم اقتصادی در خلق دانش و انتشار آن وابسته است. بر اساس ایدهٔ محوری این رویکرد، بنگاه‌های نوآور در نوعی ترتیب نهادی به فعالیت می‌پردازند. با این اعتبار، کانون اصلی توجه این رویکرد «نوآوری، خلق دانش و انتشار آن است. نوآوری و خلق دانش به صورت فرایندهایی تعاملی و انباشتی درنظر گرفته می‌شوند که مشروط به ترتیبات نهادی‌اند» (Fischer, 2001).

هر سیستم نوآوری را می‌توان به‌صورت مجموعه‌ای از کنشگران یا موجودیت‌ها همانند بنگاه‌ها، سازمان‌ها و نهادها تفسیر کرد که در خلق دانش جدید و بهره‌برداری و استفاده از آن و از منظر اقتصادی قابل‌استفاده با یکدیگر تعامل می‌کنند (Lundvall, 1992). رویکرد سیستم‌های نوآوری چارچوبی تحلیلی دراختیار می‌گذارد تا بتوان مبتنی بر آن شرح داد چرا برخی بنگاه‌ها، بخش‌ها یا مناطق از منظر اقتصادی موفق‌تر و برخی دیگر ناموفق‌اند. نگاه سیستمی به نوآوری به سه علت اهمیت و ضرورت دارد (Korber et al., 2009):

- رویکرد سیستمی نوآوری و خلق و انتشار دانش را در کانون تمرکز قرار می‌دهد و از نگاهی محدود به نوآوری فراتر می‌رود و بر ماهیت تعاملی و پویای آن تمرکز می‌کند.
- این رویکرد نگاه مکتب شبکه‌ای به نوآوری را ارتقا می‌دهد و تمرکز از بنگاه به بخش را به تمرکز بنگاه خالق دانش به بخش خالق دانش سوق می‌دهد.
- این رویکرد نوآوری را یک فرایند اجتماعی پیچیده درنظر می‌گیرد و به زمینهٔ نهادی و اَشکالی که دانش در آن خلق و منتشر

1. Emergence
2. Co-Evolution
3. Endogenous

می‌شود تمرکز می‌کند.

بنابر این نگاه سیستمی به نوآوری، مطالعات مختلفی نیز نشان می‌دهند که پدیدهٔ نوآوری و خلق دانش درون سیستم نوآوری و انتشار آن پدیده‌ای است پیچیده. به‌طورکلی، سیستم نوآوری سیستمی است که از منظر سطح تحلیل سیستم تطابق‌پذیر پیچیده خوانده می‌شود (Fischer et al., 2007; Pyka and Fagiolo, 2007; Frenken, 2006).

این سیستم به علت وجود عناصری همانند وابستگی به مسیر طی‌شده،[1] یادگیری و پدیدهٔ ظهوریافتگی سیستمی است ماهیتاً پیچیده و به علت استقلال هریک از عوامل در تصمیم‌گیری و قدرت تطابق عوامل با محیط و تغییر شرایط محیطی، سیستمی است تطابق‌پذیر (Cooke, 2012). به باور ادکوئیست، «سیستم نوآوری شامل همهٔ عوامل مهم اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، سازمانی و نهادی‌ای است که در توسعه و انتشار نوآوری و استفاده از آن اثر می‌گذارد و به‌وسیلهٔ وابستگی متقابل میان عوامل و محیط شناخته می‌شود» (Edquist, 2004, pp. 485-487). مک‌کلوی و همکارانش برآن‌اند که «ظهور عوامل جدید، ارتباطات و شبکه‌ها در سیستم‌های نوآوری ماحصل رژیم‌های یادگیری و انتخاب است» (McKelvey et al., 2004, pp. 74-75). فیشر و فرولیخ باور دارند که «ما می‌توانیم انتظار رفتارهای پیچیده را از سیستم نوآوری داشته باشیم، همانند سازمان‌های ناهمگون که با یکدیگر تعامل برقرار می‌کنند، از هم یاد می‌گیرند، تطابق پیدا می‌کنند و دوباره سازمان می‌یابند، تنوعشان را گسترش می‌دهند و انتخاب‌های متنوع و جدیدی را جست‌وجو می‌کنند» (Fischer and Fröhlich, 2001, p. V). به بیان آرتور و همکارانش، «تعاملات میان عوامل در سیستم نوآوری به منزلهٔ فرایندهای تطوری و تاریخی مد نظر قرار می‌گیرند که اغلب به شکلی آزادانه و غیرمتمرکز هماهنگ می‌شوند و به‌احتمال زیاد برآمده از پویایی‌های غیرخطی پیچیدهٔ سیستمی و تقریباً پیش‌بینی‌پذیرند» (Arthur et al., 1997, pp. 3-4). به گفتهٔ فیشر، «هر سیستم نوآوری یک جنبهٔ پویا دارد که به واسطهٔ حلقه‌های بازخور ایجاد می‌شود» (Fischer, 2002, pp. 16-17). به نظر ییلماز، «نوآوری یک مسیر خطی را که از پژوهش آغاز می‌شود و از طریق توسعه، طراحی، مهندسی و تولید (درنتیجه معرفی محصولات و فرایندهای جدید) به راه خود ادامه می‌دهد طی نمی‌کند، بلکه فرایندی است غیرخطی با حلقه‌های بازخور بین مراحل مختلف توسعه. نوآوری پدیدهٔ ظهوریافتگی سیستم اجتماعی انطباق‌پذیر پیچیده است» (Yilmaz, 2008). لیدسدورف و اتزکوویتز،[2] پیشروان استفاده از استعارهٔ تریپل هلیکس، درتلاش‌اند تا یک سیستم نوآوری پیچیده را از طریق ارتباط میان دانشگاه‌ها، دولت و سازمان‌های صنعتی شرح دهند. در سال‌های اخیر، تلاش‌های بسیاری در جهت مدل‌سازی ویژگی خودسازماندهی تریپل هلیکس صورت گرفته تا نشان داده شود چگونه ساختارهای فراکتالی یک سیستم نوآوری با فعالیت‌های نوآوری در مقیاس‌های گوناگون تکرار می‌شود (Katz, 2016).

در سال‌های اخیر، محققان بسیاری تلاش کرده‌اند تا با استفاده از تکنیک‌های برآمده از علوم پیچیدگی به پدیدهٔ نوآوری همان گونه بنگرند که به سیستم‌های پیچیده می‌نگرند (Leydesdorff and van den Besselaar, 1994; Foster and Hölzl, 2004). اساس همهٔ مطالعات مختلف در خصوص پدیدهٔ نوآوری بر پیچیدگی ذاتی و درونی سیستم استوار است که تعاملات غیرخطی و عدم‌قطعیت‌های بسیار عناصر برسازندهٔ آن‌اند. اگرچه استفاده از نظریهٔ پیچیدگی در اقتصاد و مطالعات نوآوری حوزه‌ای نوظهور است، اساس این مطالعات، که در آن‌ها نوآوری پدیداری پیچیده عنوان شده است، استفاده از تکنیک‌های جدید مدل‌سازیِ برآمده از علوم پیچیدگی برای تحلیل سیستم نوآوری است (Anderson et al., 1988; Leydesdorff and van den Besselaar, 1994; Arthur et al., 1997). با اعتبار موارد مطرح‌شده در بالا، تلاش شده است تا یکی از رویکردهای مرسوم در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیدهٔ اجتماعی با عنوان «مدل‌سازی عامل‌بنیان» شرح داده شود و سپس کاربرد این روش در تحلیل سیستم‌های نوآوری به منزلهٔ سیستمی پیچیده ارائه گردد.

۳. مدل‌سازی عامل‌بنیان

مدل عامل‌بنیان یکی از انواع مدل‌های محاسباتی برای شبیه‌سازی کنش‌ها و تعاملات عوامل (افراد یا موجودیت‌های جمعی همانند گروه‌ها و سازمان‌ها) درون سیستم است که با هدف ارزیابی آثار هر عامل در سیستم، هر عامل در سایر عوامل و سنجش عملکرد کلی سیستم طراحی می‌شود. روش‌شناسی عامل‌بنیان عناصری همانند نظریهٔ بازی،[3] سیستم‌های پیچیده،[4] ظهوریافتگی، علوم اجتماعی محاسباتی،[5] سیستم‌های چندعاملی[6] و روش‌های مونت کارلو[7] را با یکدیگر ترکیب می‌کند (Grimm and Railsback, 2005). مدل‌های عامل‌بنیان از دسته مدل‌های کوچک‌مقیاس‌اند که عملیات و تعاملات میان عوامل مختلف درون سیستم را هم‌زمان بررسی و شبیه‌سازی می‌کنند و هدف آن‌ها پیش‌بینی پدیدارهای پیچیدهٔ درون‌سیستمی است. در مدل‌سازی عامل‌بنیان سیستم به صورت مجموعه‌ای از موجودیت‌های تصمیم‌گیرنده مدل‌سازی می‌شود که مستقل‌اند و به آن‌ها عامل گفته می‌شود. هر عامل درون سیستم موقعیتش را ارزیابی می‌کند و مبتنی بر قواعد محلی[8] حاکم

1. Path Dependency
2. Leydesdorff and Etzkowitz

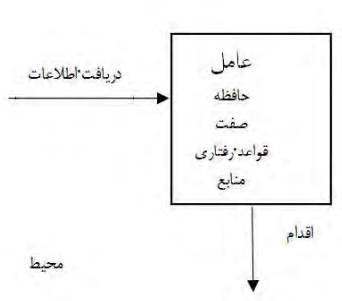
3. Game Theory
4. Complex Systems
5. Computational Social Science
6. Multy Agent Systems
7. Monte Carlo
8. Local Rules

بر عملکردش به تصمیم‌گیری می‌پردازد. در این روش‌شناسی، موجودیت‌های سیستم عامل درنظر گرفته می‌شود و قواعد کلی سیستم و قواعد حاکم بر رفتار هر عامل شناسایی می‌گردد.

مدل‌سازی عامل‌بنیان به مدل‌سازان امکان می‌دهد که قواعد رفتاری و وضعیتی را که افراد در آن قرار می‌گیرند مشخص کنند و درنهایت با اجرای مدل‌سازی یا شبیه‌سازی، رفتار افراد و گروه‌ها را در خروجی مدل مشاهده نمایند. همچنین مدل‌سازی عامل‌بنیان از ایجاد مدل‌های قطعی و تصادفیِ سلسله‌مراتبی پشتیبانی می‌کند، جایی که نتایج در سطوح بالاتر بر روی کنش‌ها و واکنش‌های سطوح پایین‌تر به‌سادگی قابل‌چشم‌پوشی نیست. از دیگر ویژگی‌های مدل‌سازی عامل‌بنیان این است که از ایجاد و مطالعهٔ سیستم‌های جامع با سطوح چندگانه، که در آن‌ها سطوح بالاتر و پایین‌تر هم‌زمان یکدیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهند، پشتیبانی می‌کند (Niazi and Hussain, 2011). در مدل‌های عامل‌بنیان، عموماً عامل‌ها نمایندهٔ تصمیم‌گیران در سیستم‌اند. عامل‌ها در هر وضعیتی گرایش به این دارند که انطباقی و انعطاف‌پذیر رفتار کنند. همچنین، آن‌ها می‌توانند بخش زیادی از داده‌ها را با هم به‌اشتراک بگذارند. مفهوم کلی عامل را می‌توان از اصطلاح عقلانیت محدود هربرت سایمون (Simon, 1957) برداشت کرد. از دیدگاه سایمون، عقلانیت محدود به این معناست که عامل‌ها فقط می‌توانند از بخش محدودی از اطلاعات استفاده کنند؛ به‌عبارتی آن‌ها نمی‌توانند در مدت‌زمان نامحدود به بررسی گزینه‌ها بپردازند و تصمیم‌گیری کنند و این موضوع در تضاد کامل با مفروضات پارادایم سنتی مانند اقتصاد نئوکلاسیک قرار دارد که بر اساس آن‌ها تصمیم‌گیران برای استفاده از اطلاعات نامحدود برای تصمیم‌گیری زمان نامحدود دارند. عامل‌ها، علاوه‌بر این ویژگی، فقط می‌توانند از اطلاعات محلی استفاده کنند (Macal and North, 2007).

یکی دیگر از پارامترهای مهم در مدل‌سازی عامل‌بنیان محیط است. برعکس عامل، محیط در تصمیم‌گیری مشارکت مستقیم ندارد. هرچند تعامل در محیط ممکن است به تکامل و تغییر در طول زمان منجر شود، به‌هرحال محیط شاید شکلی از حافظه برای ذخیره‌سازی اطلاعات مربوط به نتایج رفتارهای گذشتهٔ عامل باشد که تصمیم‌گیری آتی آن عامل را تحت‌تأثیر قرار خواهد داد. داده‌های مربوط به عامل‌ها ممکن است گسسته یا پیوسته باشند و تحت‌تأثیر رفتارها و تعاملات عامل‌ها در محیط قرار گیرند. همچنین، رفتارها و کنش‌های عامل‌ها امکان دارد هم‌زمان یا غیرهم‌زمان جایگزین یکدیگر شوند (Johnston, 2013).

عامل در سیستم به مؤلفه‌ای اطلاق می‌شود که بتواند به شکلی از محیط خود یاد بگیرد و در پاسخ به محیط، رفتارش را تغییر دهد. عامل‌ها قوانین پایه‌ای برای کنترلشان و در سطح بالاتر مجموعه‌ای از قوانین برای کنترل رفتار سیستمی دارند. شکل زیر مشخصات یک عامل را نشان می‌دهد (Pyka et al., 2007).



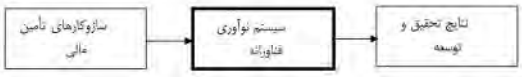
شکل ۱: ساختار درونی یک عامل (Pyka et al., 2007)

بر اساس این تصویر، عامل حافظه، ویژگی‌ها، صفات رفتاری مختلف (همانند جنس و سن)، قواعد رفتاری مشخص، منابع معلوم و... دارد که با محیط خود (محیطی که در آن عمل می‌کند و شامل سایر عوامل نیز می‌شود) به تعامل می‌پردازد و بر اساس ویژگی‌های درونی‌اش اقدام و عمل می‌کند. گتشل در پژوهش خود در سال ۲۰۰۸ ویژگی‌های عوامل را چنین عنوان کرده است:

- هدفمندی: هر عامل به صورتی عمل می‌کند که به هدفی مشخص و ازپیش‌تعیین‌شده دست یابد.
- واکنش/ ادراک: هر عامل محیط اطرافش را حس و به‌گونه‌ای عمل می‌کند که از محیطش آگاهی داشته باشد.
- تعامل: هر عامل می‌تواند با سایر عوامل یا با محیط به تعامل بپردازد و اطلاعات کسب کند. این تعامل ممکن است در رفتار عامل تأثیر بگذارد یا عملکردش را تحت تأثیر قرار دهد.
- سازگاری: تغییر حالت یک عامل به سبب تعامل با محیط و سایر عوامل، شکل کارآمدی از یادگیری و حافظه را برای عامل ایجاد می‌کند. هر عامل توانایی تطبیق خود با محیط و شرایط موجود در سیستم را دارد.
- استقلال: هر عامل مستقلانه عمل می‌کند و برای عمل از قوانین مربوط به خود استفاده می‌کند.

۴. شبیه‌سازی پویایی‌های تبادل دانش در سیستم‌های نوآوری فناورانه

تحلیل سیستم نوآوری فناورانه در دو سطح خرد و کلان صورت می‌پذیرد. در سطح خرد، پویایی‌های تبادل دانش در میان عوامل سیستم نوآوری بررسی می‌شود و مدل‌سازی سطح خرد انجام می‌پذیرد. تحلیل‌گران این سطح درتلاش‌اند تا قابلیت‌های درونی عامل‌ها و روابط میان آن‌ها را بررسی کنند (تبادلات دانشی و تعامل میان عوامل). سطح کلان عمدتاً شامل استفاده از شاخص‌های کلان همانند نرخ هزینه‌کرد تحقیق و توسعه، نرخ تولید پتنت، نرخ تولید مقالات و نرخ تولید محصولات و خدمات نوآورانه است (Fischer et al., 2001). در این پژوهش، در سطح کلان ارتباط



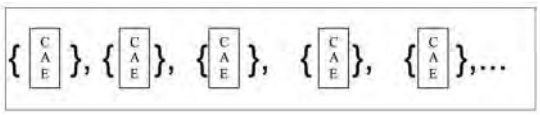
شکل ۲: سیستم نوآوری در حکم جعبه‌سیاه در چشم‌انداز تحلیلی سطح کلان

میان مداخلهٔ مستقیم دولت (تأمین مالی مستقیم) و برون‌دادهای سیستم نوآوری بررسی می‌شود و مبتنی بر مدل‌سازی عامل‌بنیانِ صورت‌گرفته در سطح خرد، مبادرت به شبیه‌سازی کامپیوتری می‌گردد. در چشم‌انداز کلان، ورودی سیستم نوآوری منابع مالی است و برون‌داد آن نتایج مختلف تحقیق و توسعه همانند پتنت و مقاله. مبتنی بر این چشم‌انداز، سیستم نوآوری فناورانه جعبه‌سیاه تلقی می‌شود و صرفاً اثر درون‌داد در برون‌داد مورد سنجش قرار می‌گیرد. شکل زیر شِمای کلی چارچوب پژوهش در سطح کلان را نشان می‌دهد.

در تحلیل سطح خرد، هر واحد دانشی با سه‌گانه‌ای شامل قابلیت[1] بنگاه (C) در یک گسترهٔ علمی، فناورانه یا کسب‌وکار نشان داده می‌شود که تصادفاً عددی بین ۱ تا ۱۰۰۰ را به خود اختصاص می‌دهد؛ توانایی[2] (A) برای به‌انجام‌رساندن فعالیت‌ها در آن حوزهٔ علمی یا فناورانه (مثلاً ساخت تجهیزات آزمایشگاهی برای نانوفناوری) که تصادفاً عددی در طیف ۱ تا ۱۰ را به خود اختصاص می‌دهد و سطح تخصص[3] (E)، که عامل با توجه به توانایی‌اش آن را به‌دست آورده است، عددی از ۱ تا ۱۰ را به خود اختصاص می‌دهد. kene یک عامل مجموعه‌ای از سه‌گانهٔ C/A/E است(Ahrhrweiller et al., 2004). شکل ۳ kene را نشان می‌دهد.

در شکل ۴ تلاش شده است تا مدل تحلیلی سیستم در سطح خرد و کلان نشان داده شود.

با توجه به شکل ۴، سیستم نوآوری فناورانه شامل عوامل گوناگونی همانند دانشگاه و مؤسسات پژوهشی و صنعتی است که در بالا به‌تفصیل به آن‌ها پرداخته شد. تعاملات دانشی بین این عوامل در درون سیستم شامل تعاملات پژوهشی، جابه‌جایی نیروی انسانی، آموزش، خلق شرکت‌های نوپا و زایشی، اعطای مجوز لیسانس و مشاوره است که در سطح تحلیل خرد بررسی می‌شوند. این تعاملات میان اجزای درون سیستم به شکل‌گیری رفتار نهایی سیستم می‌انجامد که همهٔ ویژگی‌های سیستم‌های پیچیده را دربر خواهد داشت. درنهایت، این مدل تحلیلی با شبیه‌سازی کامپیوتری همراه می‌شود و مداخلات دولت و ترکیب‌های مختلف دولتی در سطح کلان بررسی می‌شوند تا اثر هریک در خروجی‌های سیستم نوآوری و تابع نهایی برازش مدل استخراج گردد.



شکل ۳: ساختار kene یک عامل (Ahrhrweiller et al., 2004)

عامل، هنگامی‌که آمادهٔ فعالیت می‌شود، مقدار مشخصی سرمایه دارد که می‌تواند، مبتنی بر آن، محصولش را به بازار برساند و بنیاد دانشی‌اش را ارتقا دهد. مقدار سرمایه‌ای که عامل کسب می‌کند سنجه‌ای برای اندازهٔ عامل است و در مقدار دانشی که می‌تواند ایجاد کند اثر می‌گذارد و به‌وسیلهٔ تعداد سه‌گانهٔ kene آن مشخص می‌شود (Ahrhrweiller et al., 2004). هر عاملی تلاش می‌کند تا عملکرد نوآوری خود را ارتقا دهد و با بهبود بنیاد دانشی خود، از طریق یادگیری تدریجی یا رادیکال و همکاری و شبکه‌سازی با سایر عوامل، محصولش را بفروشد (Mahmoudzadeh et al., 2014). هر بنگاه دانشش را به‌کار می‌بندد تا محصولات نوآورانه‌ای خلق کند که امکان موفقیت در بازار را دارند. تمرکز اصلی هر بنگاه روی تولید است که یک نوآوری بالقوه است و برانگاشت نوآوری[4] شناخته می‌شود. در مدل SKIN، برانگاشت نوآوری (IH) شامل

شکل ۴: مدل تحلیل سیستم‌های نوآوری فناورانه بر اساس دو سطح تحلیل خرد و کلان

1. Capability
2. Ability
3. Expertize
4. Innovation Hyothesis

زیرمجموعه‌ای از سه‌گانهٔ kene عامل است (Ahrhrweiller et al., 2004). محصول هر بنگاه (P) به‌واسطهٔ برانگاشت نوآوری آن بنگاه خلق می‌شود که از طریق معادلهٔ زیر محاسبه می‌گردد (Mahmoudzadeh et al., 2014):

$$P = (C1 * A1) + (C2 * A2) + \cdots (Cn * Am)$$

به بیان دیگر، هر عامل (i) ai= ۱, ... ,I) مجموعه‌ای از kene دارد (ki) که بیان‌کنندهٔ بنیاد دانشی آن عامل است که در آن k عبارت است از:

$$Ki = \{(rm, cn,\ Yimn | Yimn > 0; m = 1, \ldots, M; n = 1, \ldots, N;\} \ and \ ie\{1, \ldots, I\}$$

و هر ki برای هر عامل ai عناصری از مجموعهٔ زیر است:

$$Ki = \{(rm, cn,\ Yimn | Yimn > 0; m = 1, \ldots, M; n = 1, \ldots, N;\} \ and \ ie\{1, \ldots, I\}$$

که در آن rm-حوزهٔ پژوهش و cn شایستگی محوری است و Yimn سطح تخصصی است که عامل ai در حوزهٔ پژوهشی rm و شایستگی محوری cn دارد.

برخی از ویژگی‌های عوامل در جدول ۲ آمده است.

حوزهٔ پژوهش هر عامل دامنهٔ فعالیت‌های علمی، فناورانه و کسب‌وکار آن عامل است که یکی از اجزای kene عامل در بنیاد دانشی آن است (Pyka et al., 2007).

ازسوی دیگر، این عوامل صرفاً مبتنی بر بنیاد دانشی‌شان شناخته نمی‌شوند، بلکه به‌واسطهٔ سایر ویژگی‌هایی معرفی می‌شوند که در جدول ۲ ارائه شده‌است. این ویژگی‌های عوامل، اگرچه مستقیماً تعیین‌کنندهٔ رفتار عامل در درون سیستم نیستند، در تعیین رفتار عامل به‌شدت حیاتی‌اند. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از: سطح سرمایه، استراتژی همکاری، استراتژی جست‌وجوی همکار و جهت‌گیری پژوهش عامل (Ahrhrweiller et al., 2004).

از سوی دیگر، هر عامل در هر مقطع زمانی و با شروع فرایند شبیه‌سازی، بنیاد دانشی خود را در تعامل با سایر عوامل به‌اشتراک می‌گذارد. اگرچه این تعامل و نوع ارتباط وابسته به ویژگی‌هایی است که در بالا به آن‌ها اشاره شد، عنصر مهم در این فرایند که بن‌مایهٔ مفهومی مدل‌سازی عامل‌بنیان را ایجاد می‌کند یادگیری هر عامل از فعالیتش و پس از آن یادگیری از سیستم است (Gilbert et al., 2007). یادگیری، اگرچه فرایندی طولانی و گران‌قیمت است، مبنایی برای کنش عوامل است و برای پژوهش ضروری است. منطقی که در مدل SKIN پذیرفته شده یادگیری از طریق انجام/استفاده/ تعامل است. رومر، در سال ۱۹۸۷، در تعریف نظریهٔ رشد درون‌زا معادلهٔ زیر را برای عملکرد تولید بنگاه طرح می‌کند:

$$Y = F(K, L, e)\ \mathbb{R}(E)$$

که در آن امکانات تولیدی بنگاه (Y) تابعی است از سرمایه (K)، ورودی نیروی انسانی (L)، و سطح سرمایهٔ دانشی خصوصی بنگاه (€)، در زمانی که سرمایه دانشی جمعی (E) را در درون بنگاه یک‌پارچه می‌سازد. کوهن و لوینتال، در پژوهش خود در سال ۱۹۹۰، بر این دو نوع دانش در تابع تولید بنگاه تأکید و نقشی دوگانه برای تحقیق و توسعه تعریف می‌کنند. بر اساس نظر این محققان، تحقیق و توسعه به خلق محصولات نوآورانه می‌انجامد و درعین‌حال، توانایی بنگاه برای شناسایی، بهره‌برداری و استفاده از دانش درون محیط را، که «یادگیری» یا «ظرفیت جذب» خوانده می‌شود، افزایش می‌دهد. بر اساس مدل SKIN، هر عامل که جهت‌گیری تحقیق و توسعه، چه کاربردی و چه پایه‌ای، داشته باشد می‌تواند فرایند یادگیری را طی کند (Gilbert et al., 2007). براین‌اساس، اگر یک kene موجود در بنیاد دانشی یک عامل در تحقیق و توسعه مورد استفاده قرار بگیرد و در این مسیر برانگاشت نوآوری رخ دهد، آن‌گاه سطح توانایی بنگاه (Yimn) به اندازهٔ یک واحد افزایش می‌یابد. هر عاملی که بتواند به‌طور مستمر به تحقیق و توسعه بپردازد، سطح تخصصش دائماً افزایش می‌یابد و از این طریق می‌تواند به حوزهٔ پژوهشی جدیدی (rm) دست یابد. درنهایت و در طول این مسیر، عاملی که سطح تخصصش افزایش یافته و حوزه‌های پژوهشی جدیدی به‌دست آورده می‌تواند خروجی تحقیق و توسعهٔ جدیدی خلق کند و باعث جذب سایر عوامل شود و خلق عامل جدید در سیستم را در آن حوزهٔ پژوهشی ممکن سازد (Korber et al., 2009).

درنهایت، هر عامل در درون سیستم مبتنی بر برانگاشت نوآوری خود به تولید خروجی تحقیق و توسعه می‌پردازد. این خروجی‌ها را می‌توان در سه دستهٔ اصلی قرار داد: مقالات علمی، پتنت و محصولات نوآورانه. مدل‌سازی عامل‌بنیان سیستم نوآوری در سطح تحلیلی کلان شامل مداخلات دولتی است که رفتار سیستم نوآوری را در سطح خرد با تغییر و واکنش مواجه می‌کند.

هرکدام از این خروجی‌های تحقیق و توسعه به‌واسطهٔ جهت‌گیری تحقیق و توسعهٔ عامل تولیدکننده محقَق می‌شود. سازگاری[1] برانگاشت نوآوری یک عامل (Di)، پس از تحقیق و توسعهٔ درونی آن عامل، بر اساس تابع سازگاری (f) محاسبه می‌شود:

$$fi = \begin{cases} 1 \ if \ \left({(I-1)\tilde{f}i} \Big/ {\sum_{u=1}^{I} \tilde{f}u} \right) \\ 0 \qquad otherwise \end{cases}$$

که در آن:

$$\tilde{f}i = y'imn"y"\text{imn} + ""imn$$

و $y'imn, y""\text{mn}, y'"""mn$ عبارت‌اند از: سطح تخصص kene مرتبط با عامل (ai) در برانگاشت نوآوری (Di).

جذابیت منابع مالی به صورت ملاحظهٔ بسیار مهمی طرح می‌شود که همهٔ عوامل درون سیستم نوآوری درتلاش‌اند برای به‌دست‌آوردن آن دست به فعالیت‌های تحقیق و توسعه بزنند. سازمان‌ها از درون یا از بیرون دست به تأمین مالی پروژه‌هایشان می‌زنند، دولت‌ها با تأمین مالی مستقیم به مداخله در عملکرد

1. Fitness

جدول ۲: ویژگی‌های عوامل درون سیستم در سطح تحلیل خرد[۱]

ویژگی[۲]	کد	نوع مقیاس[۳]	نشانه[۴]	ارزش[۵]	منبع
نوع سازمان	OT	قطعی (categorical)	-	صنعت (بنگاه‌های کوچک و متوسط، زایشی، دانش‌بنیان و...) دانشگاه مؤسسات پژوهشی (دولتی و خصوصی)	
حوزهٔ پژوهش	-	قطعی (categorical)	r_m	۱, ...,۱۰۰۰	Gilbert et al., 2007;Ahrhrweiller et al., 2004
شایستگی محوری	-	قطعی (categorical)	C_n	۱, ...,۱۰	Gilbert et al., 2007; Ahrhrweiller et al., 2004
سطح تخصص		ترتیبی (ordinal)	Y_{imn}	۱, ...,۱۰	Gilbert et al., 2007;Ahrhrweiller et al., 2004
سطح سرمایه	FS	نسبتی (ratio)			Pyka and Fagiolo, 2007; Korber et al., 2009
تعداد کارکنان	EM	نسبتی (ratio)			Pyka and Fagiolo, 2007; Korber et al., 2009
کارکنان R & D	RE	نسبتی (ratio)			Pyka and Fagiolo, 2007; Korber et al., 2009
سال تأسیس	FR	قطعی (categorical)			Pyka and Fagiolo, 2007; Korber et al., 2009
جهت‌گیری R & D		سه‌بخشی (suomotohcirt)	O_i	بدون تحقیق و توسعه	
استراتژی R & D	RS	دوبخشی (dichtomous)		تدریجی، رادیکال	Ettlie et al., 1984
استراتژی جست‌وجوی همکار	PS	دوبخشی (suomothcid)		محافظه‌کارانه، ترقی‌خواهانه	Pyka et al., 2007
استراتژی همکاری	CS	دوبخشی (suomothcid)		تقلیدی، اشتراکی	Pyka et al., 2007

۱. این ویژگی مبتنی بر مبانی نظری و بر اساس مدل NIKS از مبانی نظری استخراج شده و در فرایند مدل‌سازی هر پژوهش منحصربه‌فردی ممکن است متفاوت باشد.

2. Attribute
3. Scale Type
4. Notation
5. Value

سیستم نوآوری می‌پردازند و بنگاه‌های سرمایه‌گذار ماجراجویانه و فرشتگان کسب‌وکار نقش بسیار مهمی در تأمین مالی پروژه‌های پژوهشی ایفا می‌کنند (Gruber, 2009). تمرکز اصلی این پژوهش بر تأمین مالی توسط دولت است که به دو بخش تأمین مالی بالا به پایین (همانند مداخلهٔ مستقیم دولت) و تأمین مالی پایین به بالا (همانند تأمین مالی نهادی یا توسط سازمان‌ها) تقسیم می‌شود. طبق نظر ماکال و نورث (Macal and North, 2010)، هر مدل‌سازی عامل‌بنیان سه جزء اساسی دارد که چارچوب اصلی مدل‌سازی سیستم نوآوری بر آن بنیان نهاده شده است: نخست، شناسایی مجموعه‌ای از عوامل، ویژگی‌های آن‌ها و رفتارشان؛ دوم، شناسایی مجموعه‌ای از روابط میان عوامل و روش‌های تعامل آن‌ها: مکان‌شناسی اصولی ارتباطات میان عوامل که تعیین‌کنندهٔ چگونگی روابط و تعیین عامل ارتباط‌برقرارکننده است؛ سوم، تبیین محیط عوامل، که نشان‌دهندهٔ بستری است که عوامل علاوه‌بر ارتباط با یکدیگر با آن تعامل برقرار می‌کنند، در آن اثر می‌گذارند و از آن اثر می‌پذیرند (ibid). در این مدل‌سازی عوامل عبارت‌اند از: بنگاه‌ها، دانشگاه‌ها و مراکز پژوهش و توسعهٔ دولتی و غیردولتی.

شبیه‌سازی پویایی‌های دانش در شبکه‌های نوآوری (SKIN) یک مدل چندعاملی است که شامل عوامل ناهمگون است که در محیطی پیچیده و درحال تغییر فعالیت می‌کنند. این عوامل بنگاه‌های نوآوری هستند که یک بنیاد دانشی[1] دارند. این بنیاد دانشی که مختص هر عامل است kene شناخته می‌شود و شامل تعدادی از واحدهای دانشی[2] است (Gilbert, 1997).

تحلیل و جمع‌بندی

در این مقاله تلاش شد تا نخست مفهوم سیستم‌های پیچیده شرح داده شود و ویژگی‌های سیستم پیچیده بررسی گردد. همان‌طور که در بخش نخست نشان داده شد، هر سیستم پیچیده ویژگی‌هایی اساسی دارد که موجب تمایز این سیستم‌ها از سایر انواع سیستم می‌شود. کنترل توزیع‌شده، انطباق‌پذیری، تنوع، موجودیت‌های مستقل و خودمختار و ظهوریافتگی از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های سیستم‌های پیچیده‌اند. در بخش دوم مقاله، تلاش شد تا یک سیستم اجتماعی به نام سیستم نوآوری بررسی شود و ویژگی‌های اصلی آن سیستم از منظر ماهیت با ویژگی‌های سیستم‌های پیچیده مقایسه گردد. در این بررسی نشان داده شد که بر اساس پژوهش‌های محققان مختلف، همهٔ ویژگی‌های ذاتی سیستم نوآوری مطابق با ویژگی‌های سیستم پیچیده است. محققان مختلف ویژگی‌هایی نظیر استقلال موجودیت‌های سیستم نوآوری و ناهمگونی آن‌ها، انطباق‌پذیری موجودیت‌های درون سیستم نوآوری، تنوع آن‌ها و شکل‌گیری پدیدهٔ ظهوریافتگی درون سیستم نوآوری را بررسی و تأیید کرده‌اند.

بررسی‌های نظری و تجربی مختلف درمورد سیستم‌های پیچیده نشان می‌دهند که استفاده از روش‌های سنتی تحلیلی همانند استفاده از روش‌های ریاضی همانند معادلات دیفرانسیل و روش‌های تحلیلی آمار پیشرفته کاربرد ندارد و تحلیل این قبیل سیستم‌ها مستلزم به‌کارگیری روش‌شناسی متناسب با ماهیت این سیستم‌هاست. وجود موجودیت‌های (عوامل) خودمختار و عمدتاً ناهمگون در سیستمی پیچیده که با یکدیگر تعامل می‌کنند، تطور می‌یابند، تغییر پیدا می‌کنند و در واکنش به رفتار محیط و رفتار سایر موجودیت‌های درون سیستم رفتارشان را تغییر می‌دهند به پیچیدگی ذاتی این سیستم‌ها منجر می‌شود. بررسی نظری مطالعات مختلف نشان داد که نوآوری به‌مثابهٔ پدیدهٔ ظهوریافتگیْ سیستم اجتماعی پیچیده‌ای است که ماحصل تعامل میان موجودیت‌های مستقل اقتصادی همانند بنگاه‌های فعال در یک کشور، منطقه، بخش یا یک فناوری منحصربه‌فرد است. وجود این تعاملات میان موجودیت‌های درون یک سیستم نوآوری به بروز پدیدارهایی نظیر وابستگی ذاتی به مسیر طی‌شده و عدم‌قطعیت منجر می‌شود که درک و تحلیل آن‌ها با استفاده از روش‌های سنتی ممکن نیست. عدم‌قطعیت ذاتی در تعامل میان موجودیت‌های درون سیستم نوآوری و عدم‌قطعیت موجود در محیط به افزایش پیچیدگی درون سیستم منجر می‌شود و تحلیل آن را با مشکل مواجه می‌کند. از سوی دیگر، ازآنجاکه هر عامل درون سیستم نوآوری حافظه دارد و از رفتار خود و سایر عوامل درون سیستم و محیط یاد می‌گیرد، رفتار آیندهٔ سیستم در سطح تحلیلی کلان و رفتار هر عامل در سطح تحلیلی خرد، وابسته به تجارب قبلی خود است و درک وضعیت سیستم و پیش‌بینی رفتار آن به‌شدت به درک تجارب قبلی عوامل و سیستم وابسته است. از سوی دیگر، وجود عقلانیت محدود در تصمیم‌گیری‌های عوامل درون سیستم نوآوری نشان می‌دهد که رفتار عقلایی در گرفتن تصمیم‌های گوناگون استراتژیک همانند جست‌وجوی همکار، استراتژی تحقیق و توسعه و استراتژی پیوستن به شبکه‌های نوآوری مبتنی بر عقلانیت و وجود اطلاعات کامل نیست و این موضع نیز بر گسترش عدم‌قطعیت درون سیستم می‌افزاید. با اعتبار موارد مطرح‌شده، واضح است که تحلیل هر سیستم با مفروض‌پنداشتن موارد طرح‌شده در بالا مستلزم به‌کارگیری روش‌های متناسب با تحلیل این سیستم‌هاست که با قدرت پردازش کامپیوتری برای محاسبات حجیم طراحی شده است.

در بخش سوم مقاله تلاش شد تا مدل‌سازی عامل‌بنیان، که بسیاری از محققان حوزهٔ علوم پیچیدگی آن را ابزار مناسب تحلیل سیستم‌های پیچیده معرفی کرده‌اند، بررسی شود. در این بخش نشان داده شد که در وجه نخست عامل چیست و چگونه هر عامل در سیستم نوآوری را می‌توان عاملی در سیستم پیچیده

1. Knowledge Base
2. Unit of Knowledge

درنظر گرفت وجود ویژگی‌هایی نظیر یادگیری، موقعیت (از منظر زمانی و جغرافیایی)، اندازهٔ بنگاه‌های درگیر در سیستم نوآوری و زمان نشان می‌دهد که هر موجودیت درون سیستم نوآوری همسان با عوامل یک سیستم پیچیده است و می‌توان آن را به منزلهٔ یک عامل تحلیل و بررسی کرد. از سوی دیگر، تلاش گردید تا نشان داده شود که رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان، به سبب کارآمدی‌اش در تحلیل قواعد رفتاری عوامل و پیاده‌سازی رفتار آن‌ها، تناسب زیادی با سیستم‌های پیچیده دارد. مدل‌های عامل‌بنیان می‌توانند از رفتارهای تصادفی درون‌سیستمی پشتیبانی کنند و در مواردی که نتایج در سطوح بالاتر بر روی کنش‌ها و واکنش‌های سطوح پایین‌تر به‌سادگی قابل‌چشم‌پوشی نیست، به بهترین شیوهٔ ممکن عمل کنند. این مدل‌ها، به علت استفاده از توان پردازش کامپیوتری و استفاده از قواعد محلی برای رفتار تک‌تک عوامل، می‌توانند با تکرار یک قاعده برای یک عامل رفتار آن عامل را تحلیل کنند. تحلیل قواعد محلی هر عامل و پردازش گستردهٔ رفتارها این روش را توانمند می‌سازد تا بتواند ظهوریافتگی را، که روش‌های سنتی در فهم و تحلیل آن ناتوان‌اند، نشان دهد. تکرار مداوم الگوها و قواعد رفتاری سیستم و موجودیت‌های آن در مقیاس بالا و پردازش نتایج آن مدل‌های عامل‌بنیان را قادر می‌سازد تا الگوهای بازتکرارشوندهٔ درون سیستم را تحلیل و وابستگی به مسیر طی‌شده را واکاوی کنند.

درنهایت، تلاش شد تا یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین تکنیک‌های عامل‌بنیان در تحلیل سیستم‌ها و شبکه‌های نوآوری با عنوان شبیه‌سازی پویایی‌های تبادل دانش در شبکه‌های دانشی بررسی شود. این تکنیک، که به تحلیل سیستم‌های نوآوری و شبکه‌های نوآور توسعه اختصاص داده شده، مدلی است عامل‌بنیان که بر اساس تعریف سیستم‌های نوآوری که خلق، انتشار و توسعهٔ دانش را میان موجودیت‌های سیستم مورد تمرکز قرار می‌دهد، تبادلات دانشی را در درون سیستم و بین موجودیت‌های آن تحلیل می‌کند و روش‌شناسی مناسبی را برای فهم پدیدارهای درون سیستم نوآوری ارائه می‌دهد. با این تکنیک، تلاش می‌شود تا موقعیت هر عامل در درون سیستم نوآوری مبتنی بر مفهومی به نام بنیاد دانشی آن عامل بررسی شود و چگونگی ایجاد و توسعهٔ قوانین محلی در درون سیستم نوآوری گسترش داده شود. این تکنیک، که بر اساس منطق مدل‌های عامل‌بنیان توسعه یافته است، نه‌تنها موقعیت هر عامل در درون سیستم را شرح می‌دهد و برانگاشت نوآوری آن را توصیف می‌کند، بلکه می‌تواند وابستگی به مسیر طی‌شدهٔ عامل و رفتار سیستم را بر اساس تبادلات دانشی صورت‌گرفته در درون سیستم شرح دهد. از سوی دیگر، این تکنیک قدرتمند می‌تواند، بر اساس تابعی به نام تابع سازگاری برانگاشت نوآوری یا پدیدهٔ ظهوریافتگی، سیستم نوآوری را، که در چارچوب مقالات، کتب، پتنت‌ها، محصولات و خدمات جدید بروز می‌یابد، محاسبه و تفسیر کند. این تکنیک می‌کوشد با استفاده از موقعیت هر عامل، جهت‌گیری رفتاری آن عامل، جهت‌گیری یادگیری آن، استراتژی‌های مختلف عامل در جست‌وجوی همکار و مشارکت در تحقیق و توسعه را مد نظر قرار دهد و با پردازش داده‌های با مقیاس بالا برون‌دادهای سیستم را شبیه‌سازی و تحلیل کند.

منابع

Anderson, P. (1999). "Complexity Theory and Organization Science". *Organization Science*, 10 (3), 216-232.

Anderson, P. W., Arrow, K. J. and Pines, D. (eds.) (1988). *The Economy as an Evolving Complex System*. Reading, Mass.: Addison-Wesley.

Arthur, W. B., Durlauf, S. N. and Lane, D. A. (eds.) (1997). *The Economy as an Evolving Complex System II*. Reading, Mass.: Addison-Wesley.

Axelrod, R. (1997). "Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences". *Simulating Social Phenomena*, 21-40. Springer Berlin Heidelberg.

Axelrod, R. and Cohen, M. D. (2000). *Harnessing Complexity; implications of a scientific frontier*. The Free Press. New York: Basic Books.

Chan, S. (2001, October). "Complex Adaptive Systems". In ESD. 83 *Research Seminar in Engineering Systems*, vol. 31.

Ellis, B. and Herbert, S. (2011). "Complex Adaptive Systems (CAS): An Overview of Key Elements, Characteristics and Application to Management Theory". *Journal of Innovation in Health Informatics*, 19(1), 33-37.

Ferber, J. (1999). *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*, vol. 1. Reading: Addison-Wesley.

Goodwin, B. (1994). *How the Leopard Changed Its Spots: The Evolution of Complexity*. London: Weidenfeld and Nicholson.

Holland, J. H. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. New York: Basic Books.

Lansing, J. S. (2003). "Complex Adaptive Systems". *Annual Review of Anthropology*, 32(1), 183-204.

Law, A. M., Kelton, W. D. and Kelton, W. D. (1991). *Simulation Modeling and Analysis*, vol. 2.

New York: McGraw-Hill.

Leydesdorff, L. and van den Besselaar, P. (eds.) (1994). *Evolutionary Economics and Chaos Theory: New Directions in Technology Studies*. London: Pinter.

Macal, C. M. and North, M. J. (2005, December). "Tutorial on Agent-Based Modeling and Simulation". *Simulation Conference*, 2005 Proceedings of the Winter. IEEE.

Mitchell, M. (2009). *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press.

Weaver, W. (1991). "Science and Complexity". *Facets of Systems Science*, 449-456. Springer US.

Palmberg, K. (2009). *Complex Adaptive Systems: Properties and Approaches*.

Gharajedaghi, J. (1999). *Systems Thinking: Managing Chaos and Complexity*. Woburn, US: Butterworth-Heinemann.

Tapscott, D. and Williams, A. (2006). *Wikinomics; How Mass Collaboration Changes Everything*. New York: Penguin Group.

Frenken, K. (2006). "Technological Innovation and Complexity Theory". *Economics of Innovation and New Technology*, 15(2), 137-155.

Yilmaz, L. (2008). "Innovation Systems Are Self-Organizing Complex Adaptive Systems". *AAAI Spring Symposium: Creative Intelligent Systems*, 142-148.

Katz, J. S. (2016). "What Is a Complex Innovation System?". *PloS One*, 11(6), e0156150.

Leydesdorff, L. and Etzkowitz, H. (1996). "Emergence of a Triple Helix of University-Industry-Government Relations". *Science and Public Policy*, 23, 279-286.