Journal of Research on Archaeometry, 2018; 4 (1):67–80

Journal of Research on Archaeometry

DOI: 10.29252/jra.4.1.67

URL: http://jra-tabriziau.ir/

Original Paper

Developing an Agent-Based Model for Archaeological Applications

Mahdokht Farjamirad [*1], Kamal Aldin Niknami [2]

[1] *Postdoctoral fellowship, University of Tehran, Tehran, IRAN*

[2] *Professor, Department of Archaeology, University of Tehran, Tehran, IRAN*

Received: 12/12/2017 **Accepted: 26/06/2018**

Abstract

The aim of this paper is to consider what constitutes agent-based modelling (ABM) and how this can relate to archaeological reasoning. The development and construction of ABM models is an essential prerequisite for most archaeological reasoning. Both directly and indirectly, archaeologists are making extensive use of ideas and methods in applications that derive from archaeological, anthropological as well as ecological and behavioural theories. Technically before the development and wide spread use of computer soft wares these applications run statistical methods and are almost as varied in kind as is their quality. In applications, archaeologists today are concerned with developing or applying a model through using ABM idioms as the means for expressing relationships thought to characterize the data in question as ABM thinking is concerned with the conceptual system for which the model is constructed. The notion of an ABM model as a means to draw out what must be true in a hypothetical system through using and manipulating symbols to convey and represent concepts and properties which has been most extensively developed in the axiomatic method. Since the last decades of the twentieth century onwards there has been a rapidly growing interest in implementing agent-based modelling (ABM) in archaeological and anthropological studies. The biggest advantage of such model is creating an artificial ancient society and populating it with autonomous agents who live on spatial landscapes. In such models agents have been given certain rules of behaviour that define their way of interacting with their environment and with each other. The rules and behaviour of the agents are described by the modeller and most of the time they are stochastic. But they can also be defined based on real archaeological data and certain factors can be parameterised to test the authenticity of a hypothesis or to find out the reasons of an emergence. Emergence refers to the nonlinear relationship between multiple heterogeneous components and their interaction in their environment. Nowadays, emergence is an interesting topic to philosophy and science ranging from physics and chemistry to the social science and humanity. Our society is a good example of emergence. The creation of a society is the result of individuals' interaction that in return influences the behaviour of those individuals. At first glance, it may seem very coherent and well integrated, but in fact it is made of a complex system in which each of us, as a component, interact with our environment through our acts and decisions. It might imply that knowing the laws of a society enable us to predict the behaviour of its components. However, even using the most scientific methodologies may not be resulted in a reliable prediction. In fact, in a complex system like a human society each component, depending on their authorities, may take decisions that result in completely different outcomes. Simulation technology is a powerful tool that enables us to predict human behaviour and decision making defined parameters. Two main potentials of ABM and simulation in archaeology are theory building and hypothesis testing. This paper is an introduction to the design and application of agent-based modelling and the analysing methods of such systems for archaeological purpose.

Keywords: Agent-Based Modelling (ABN), Simulation, Net Logo, Archaeological Hypothesis, Archaeological Reasoning.

[*] Corresponding author: mahdokht.farjamirad@ugent.be

پژوهه باستان‌سنجی ۱۳۹۷؛ ۴(۱): ۶۷-۸۰

پژوهه باستان‌سنجی (علمی-پژوهشی)

DOI: 10.29252/jra.4.1.67

URL: http://jra-tabriziau.ir/

مقاله پژوهشی

طراحی مدل عامل‌محور و کاربرد آن در باستان‌شناسی

مهدخت فرجامی راد[1]*، کمال‌الدین نیکنامی[2]

۱. پژوهشگر دوره پسادکترا، گروه باستان شناسی دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استاد گروه باستان‌شناسی دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۹/۲۱ **تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۵**

چکیده

به‌کارگیری کامپیوتر و دانش نرم‌افزاری در تجزیه‌وتحلیل داده‌های باستان‌شناسی به‌طور چشم‌گیری در دهه‌های اخیر افزایش یافته است. یکی از تازه‌های علوم نرم‌افزاری در باستان‌شناسی استفاده از مدل‌سازی عامل محور برای مطالعه‌ی ارتباط میان انسان عصر باستان با محیط و آثار فیزیکی به‌جای مانده از آن و آزمایش فرضیات متداول در خصوص جوامع باستانی است. سیستم‌های عامل محور معمولاً در محیط برنامه‌نویسی نت لوگو و یا پایتون طراحی و اجرا می‌شوند. در باستان‌شناسی با به‌کارگیری دانش نرم‌افزاری و با استفاده از داده‌های باستان‌شناختی می‌توان یک جامعه‌ی باستانی را شبیه‌سازی کرد و با تعریف الگوهای رفتاری موردنظر برای عوامل تشکیل‌دهنده‌ی آن جامعه کنش و واکنش عوامل را در مواجهه با یکدیگر و با محیط اطرافشان سنجید و مورد تحلیل و ارزیابی قرار داد. یکی از ویژگی‌های سیستم‌های عامل محور قابلیت تعریف و اجرای چند پارامتر به‌طور هم‌زمان است. به‌این‌ترتیب می‌توان برای آزمایش چند فرضیه‌ی متداول و مهم در خصوص یک جامعه‌ی باستانی چند نوع داده‌ی متفاوت را به‌صورت متغیر در سیستم طراحی کرد و با تغییر دادن آن‌ها نتایج متفاوتی را در تحلیل داده‌ها به دست آورد و سپس آن‌ها را با داده‌های واقعی مقایسه کرد. به عبارتی ساده‌تر با استفاده از سیستم‌های عامل محور می‌توان یک جامعه‌ی باستانی را بازسازی کرده و با آزمایش آن با داده‌های متفاوت به روند شکل‌گیری یک الگوی رفتاری و اجتماعی خاص پی برد. این مقاله قصد دارد خوانندگان و علاقه‌مندان را با کاربرد سیستم‌عامل محور در باستان‌شناسی و روند طراحی، ساخت و تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از آن آشنا سازد. همچنین برای درک بهتر از چگونگی ساخت و کارکرد چنین سیستم‌هایی دو نمونه‌ی موفق از شبیه‌سازی عامل محور در مطالعات باستان‌شناسی در این مقاله معرفی شده‌اند.

واژگان کلیدی: عامل محور، شبیه‌سازی، Net Logo، فرضیه‌های باستان‌شناسی، استدلال در باستان‌شناسی.

* مسئول مکاتبات: دانشگاه تهران، دانشکده ادبیات و علوم انسانی. کد پستی: ۶۱۵۸-۱۴۱۵۵

پست الکترونیکی: mahdokht.farjamirad@ugent.be

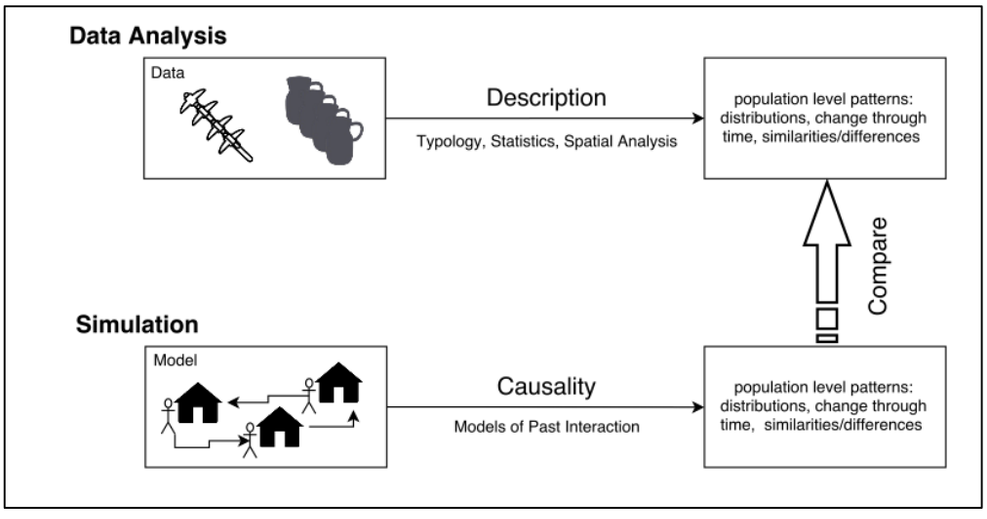
حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقاله چاپ شده را با دیگران به اشتراک بگذارد منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

۱. مقدمه

مدل‌های علمی و تخصصی در گذشته محدود به مدل‌های ریاضی بود که کاستی‌های بسیاری داشتند. درنتیجه تنها قادر به حل مسائل ساده‌ی ریاضی بوده‌اند و بسیاری از جنبه‌ها را در برنمی‌گرفتند. امروزه با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری (Simulation) محدودیت مدل‌های ریاضی برطرف شده و می‌توان با استفاده از کامپیوتر مدل‌های پیشرفته‌ای ساخت که خصوصیات بیشتری از یک جامعه واقعی را دربرمی گیرند. یکی از رایج‌ترین انواع شبیه‌سازی علمی مدل‌سازی عامل محور (agent-based modelling) است که امروزه در مطالعات علوم اجتماعی و انسانی کاربرد بسیاری دارد. با استفاده از این مدل‌ها محققین علوم اجتماعی و انسانی قادر به نمایش جوامع پیچیده، اشخاص و رفتار آن‌ها هستند. این مدل‌ها از لحاظ پیچیدگی با مدل‌های سنتی کاملاً متفاوت‌اند چراکه ابعادی چون زمان و مکان را در برمی‌گیرند و ازاین‌رو قادرند نشان دهند که چگونه عوامل و متغیرهای محیطی که بر آن‌ها تأثیر می‌گذارند می‌توانند در زمان، مکان و یا ابعاد دیگر متفاوت باشند.

در سیستم‌های عامل محور اصطلاحاً به اجتماع طراحی‌شده محیط و به اعضای آن عامل گفته می‌شود. در این نوع سیستم با تعریف الگوهای رفتاری موردنظر برای عوامل می‌توانیم کنش و واکنش آن‌ها را در مواجهه با یکدیگر و با محیط اطرافشان با توجه به پارامترهای طراحی‌شده در سیستم بسنجیم یا رفتار تک‌تک عوامل را به‌صورت جداگانه مورد مطالعه و بررسی قرار دهیم. این کنش و واکنش میان عوامل در یک سیستم بر اساس قوانینی شکل می‌گیرد که توسط مدل‌ساز و اغلب با داده‌هایی که به شکل اتفاقی انتخاب شده‌اند طراحی شده است.

گاهی اوقات این قوانین ساده منجر به شکل‌گیری الگوهای غیرمنتظره‌ای می‌شوند که در اصطلاح به آن پیدایش (emergence) میگویند. در علوم، پیدایش به رابطه غیرخطی (non-linear) عوامل چندگانه و ناهمگون و تعامل آن‌ها در یک محیط اشاره دارد. برای مثال، جامعه ما نمونه‌ی بی‌نظیری از پیدایش است. شکل‌گیری یک جامعه درنتیجه تعامل افراد شکل می‌گیرد و زندگی اجتماعی به‌طور متقابل بر رفتار افراد تأثیر می‌گذارد[1]. در نگاه اول ممکن است به نظر برسد که جامعه‌ی انسانی یکپارچه و یک‌دست است اما هر جامعه از یک سیستم پیچیده ساخته‌شده است. در این سیستم هر یک از ما با اعمال و تصمیماتمان با محیط‌زیستمان ارتباط برقرار می‌کنیم و بر آن تأثیر می‌گذاریم. در یک سیستم پیچیده مانند یک جامعه بشری، هر مؤلفه، با توجه به اختیارات و قدرت تصمیم‌گیری ذاتی که در وجودش نهفته است، می‌تواند اتفاقات پیش بینی نشده‌ای را رقم بزند. جوامع باستانی نیز از همین رابطه‌ی غیرخطی میان مؤلفه‌هایی که دیگر برای ما شناخته‌شده نیستند تشکیل‌شده بوده‌اند. برای درک ارتباط میان این مؤلفه‌ها و چگونگی شکل‌گیری آن‌ها ممکن است پرسش‌های و فرضیه‌های زیادی وجود داشته باشد که با استفاده‌ی درست از مدل‌سازی عامل محور می‌توان به برخی از این پرسش‌ها پاسخ داد و یا درستی و نادرستی فرضیه‌های مطرح‌شده را در بوته‌ی آزمایش گذاشت. این علم جدید به ما راه‌های جدیدی برای پاسخگویی به پرسش‌ها و فرضیاتمان می‌آموزد و به ما این امکان را می‌دهد که مسائل جدیدی را طرح و به آن پاسخ دهیم. تصور بازگشت به گذشته و مطالعه‌ی تحولات جوامع باستانی برای هر باستان‌شناس و باستان‌سنجی شگفت‌انگیز ولی دست‌نیافتنی است. شاید بتوان گفت که با به‌کارگیری مدل‌سازی عامل محور این رؤیا تا حدی محقق شده و امکان مطالعه‌ی موردی بر روی پدیده‌های خاص و یا یافتن پاسخ برای برخی سؤالات را فراهم آورده است. با ساخت مدلی از یک جامعه‌ی باستانی می‌توان آن را بارها و بارها به حرکت درآورد و برای پی بردن به چرایی و چگونگی تحولات رخداده در آن، مدل را با پارامترهای متفاوت سنجید و موردبررسی قرار داد (شکل ۱). البته باید خاطرنشان ساخت که اگرچه این شیوه‌ی جدید دارای وجه علمی شناخته‌شده‌ای است و امروزه از آن به‌عنوان ابزاری قوی برای طرح سؤالات علمی و پاسخ به آن‌ها استفاده می‌شود اما هنوز تحلیل علمی مدل‌های عامل محور در آغاز راه تکامل است[2].



شکل ۱: در باستان‌شناسی ابزارها و شیوه‌های تحلیل و آنالیز داده‌ها برای شناخت و کشف الگوها مؤثر هستند، اما برای اینکه سناریوهای مختلف را مورد آزمایش قرار دهند کاربرد ندارند. شبیه‌سازی به باستان‌شناسان این امکان را می‌دهد که با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده مدلی از یک جامعه‌ی باستانی ساخته و نتایج به‌دست‌آمده از آن را با داده‌ای واقعی مقایسه کنند[2].

Fig. 1: Data analysis tools in archaeology are effective in finding patterns, but they are unable to test different scenarios. Simulation in archaeology makes it possible to construct a conceptual model of the past interactions and compare the generated data to the real archaeological records[2].

۲. ویژگی‌های مدل‌سازی عامل محور

با توجه به آنچه تاکنون بیان شد، در شبیه‌سازی یک جامعه‌ی باستانی به روش مدل‌سازی عامل محور اشخاص و عوامل مستقل و با ویژگی‌های خاص با یکدیگر و با محیط اطرافشان همان‌گونه که برنامه‌ریزی‌شده‌اند، تعامل می‌کنند. این عوامل می‌توانند انسان‌ها، ارگانیزم‌ها و یا حتی حیواناتی باشند که هدف مشخصی را در یک مدل دنبال می‌کند. در اینجا توضیح چند ویژگی مهم مدل‌سازی عامل محور ضروری به نظر می‌رسد:

الف. محیط مدل (Space)

در مدل‌سازی عامل محور رخدادها در فضایی که به‌طور مشخص و با ابعاد موردنظر طراحی‌شده روی می‌دهند. این فضا می‌تواند یک شبکه چندبعدی و یا یک شبکه‌ی اجتماعی متحرک باشد. تنها موضوع مهم آن است که محدوده‌ی مکانی محل به‌خوبی شکل‌گرفته و طراحی شده باشد[3]. در یک مدل عامل محور مشخصه‌هایی مانند اندازه، محل، منابع و تاریخ آن‌ها باید به‌درستی برای عوامل تعریف شوند. برای مثال اگر هدف ساخت مدلی از یک فرهنگ و یا یک جامعه‌ی باستانی مانند یک شهر یا یک روستا باشد برای طراحی عوامل باید مشخصه‌هایی چون مکان شکل‌گیری آن فرهنگ، تاریخ و ویژگی‌های مشخصی از آن فرهنگ در نظر گرفته شود.

ب. تعامل در محیط (local interaction)

به‌طورمعمول عوامل تنها با عوامل کناری خود در محیط طراحی‌شده ارتباط برقرار می‌کند و نه با تمامی عوامل طراحی‌شده در یک مدل. یک‌دست شدن و یکپارچگی در فضای طراحی‌شده بی‌معناست. آن‌ها آگاهی از محیط و شرایط محیطی ندارند و رفتارشان بر اساس قوانینی است که در سیستم برای آن‌ها تعریف شده است. مدل‌های عامل محور تصویر مجازی کوچکی از واقعیت را تولید می‌کنند که با استفاده از آمار و تحلیل علمی آن می‌توان داده‌های واقعی را با داده‌های دنیای کوچک‌شده سنجید[3,4].

ج. ناهمگونی (Heterogeneity)

همه‌ی عوامل تشکیل‌دهنده‌ی یک جامعه یکسان نیستند و ازنقطه‌نظرهای بسیاری چون فرهنگ، روابط اجتماعی، ژنتیک، سن و جنسیت با یکدیگر متفاوت هستند . اما همچنان در کنار یکدیگر یک جامعه و یا یک نهاد را به وجود می‌آورند[3].

د. خودمختاری (autonomous)

در مدل‌سازی عامل محور بر روی رفتار عوامل طراحی‌شده کنترلی وجود ندارد آن‌ها با توجه به رفتارهایی که برای آن‌ها تعریف شده به‌سوی هدف موردنظر در مدل درحرکت‌اند اما می‌توانند راه‌های کاملاً متفاوتی را برای رسیدن به این هدف انتخاب کنند[3]. برای مثال ارگانیسم‌ها به دنبال بقا و تولیدمثل هستند و یا در تجارت عوامل طراحی‌شده هدفشان درآمد بیشتر و بهره‌وری است. باوجودآنکه تمامی این عوامل دارای هدفی مشترک هستند اما همه‌ی آن‌ها لزوماً از یک الگو پیروی نمی‌کنند و ممکن است که در دنبال کردن هدفشان رفتاری کاملاً پیش‌بینی‌نشده داشته باشند. آن‌ها می‌توانند رفتارهای تعریف‌شده در سیستم را با شرایط کنونی خود و محیط اطرافشان تطبیق دهند و رفتاری کاملاً انطباقی از خود بروز دهند (adaptive behaviour) و الگوهایی متفاوت بسازند[1]. این امر نقطه قوت مدل‌سازی عامل محور است و همان چیزی است که یک مدل را به واقعیت یک اجتماع نزدیک می‌سازد.

۳. کاربرد مدل‌سازی عامل محور در علوم انسانی

مدل را می‌توان نمایش هدفمند از یک سیستم واقعی تعریف کرد. هدف از ساخت یک مدل آزمایش یک فرضیه و یا پاسخ به پرسش‌هایی است که درباره یک سیستم یا بخش‌هایی از یک سیستم مطرح شده است[5]. درزمینه‌ی علوم ما همواره مشتاقیم کارکرد دنیای اطرافمان را درک کنیم، توضیحی برای الگوهایی که یافته‌ایم پیدا کنیم و رفتار یک سیستم را در مقابل تغییرات پیش‌بینی کنیم. در دنیای واقعی بازگشت به گذشته و مطالعه‌ی جوامع باستانی امکان‌پذیر نیست. بنابراین، ما به‌طور تجربی قادر به مطالعه شکل‌گیری و تحول در یک جامعه‌ی باستانی نیستیم. اما مدل‌سازی می‌تواند راه‌حل بسیار مناسبی برای انجام مطالعاتی ازاین‌دست باشد[6]. در ابتدا باید به این نکته توجه داشت که یک سیستم واقعی مانند یک جامعه‌ی باستانی بسیار پیچیده است. بنابراین، پیش از شروع به ساخت یک مدل باید از خود بپرسیم که چه جنبه‌هایی از یک سیستم اجتماعی را می‌توانیم در یک مدل بگنجانیم و چه جنبه‌هایی از آن را باید حذف کنیم. درواقع هدف از ساخت یک مدل پاسخ به همه‌ی پرسش‌های مطرح‌شده درباره‌ی یک سیستم نیست، بلکه آزمایش یک یا چند فرضیه و یافتن پاسخ برای پرسش‌هایی است که برای ما اهمیت بیشتری دارند. درنتیجه در ساخت یک مدل موفق کنار گذاشتن همه جنبه‌های غیرضروری که ارتباطی با هدف اصلی ما ندارند بسیار تعیین‌کننده است[1,4,6].

در باستان‌شناسی از شبیه‌سازی کامپیوتری می‌توان به‌عنوان ابزار پیش‌بینی استفاده کرد. اما دلایل بسیار دیگری نیز برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی در باستان‌شناسی وجود دارد. باور عمومی بر این است که تئوری‌های علمی بر اساس داده‌های موجود شکل می‌گیرند و درواقع این تئوری و نظریه است که به جمع‌آوری داده منجر می‌شود. به‌عبارتی‌دیگر بدون وجود یک تئوری مشخص نیست که چه نوع داده‌ای باید جمع‌آوری شود. یکی از فواید مدل‌سازی و ساخت جوامع مجازی سنجش داده‌های تاریخی و قرار دادن آن در بوته آزمایش مدل مجازی است. و مهم‌تر آنکه با ساخت یک مدل مجازی می‌توان حوزه‌های متعددی را باهم ترکیب کرد و مهارت‌های زیادی را باهم آمیخت تا از این طریق بهترین نتیجه از مطالعه حاصل شود.

مدل‌سازی و شبیه‌سازی جوامع باستانی همچنین به ما امکان تحلیل داده‌ها با پارامترهای متفاوت را می‌دهد. در مدل‌سازی امکان قرار دادن پارامترهای بسیاری وجود دارد که از طریق آن می‌توان سناریوهای زیادی را مورد آزمایش و مطالعه قرار داد تا بتوان مهم‌ترین ابهامات، نقاط قوت ظرفیت‌ها را شناسایی و مشخص کرد. اما باید به این نکته نیز توجه داشت که مدل‌ها ما را از قضاوت کردن بی‌نیاز نمی‌کنند. اما با مشخص کردن ابهامات و حساسیت‌ها یک مدل می‌توانند به تئوری‌های ما جهت داده و قضاوت‌های ناگزیر را بیشتر موردتوجه قرار دهد[7].

به‌طور خلاصه و مفید می‌توان گفت مهم‌ترین کاربردها و قابلیت‌های شبیه‌سازی در باستان‌شناسی عبارت‌اند از:

الف. مطالعه‌ی ارتباط میان انسان عصر باستان با محیط و آثار فیزیکی به‌جای مانده از آن (middle-range

research)؛ ب. ساخت تئوری (Theory building)؛ و ج. آزمایش فرضیه (Hypothesis testing).

الف. مطالعه‌ی ارتباط میان انسان عصر باستان با محیط و آثار فیزیکی به‌جای مانده از آن (middle-range research)

این روش مطالعه شیوه‌ی بسیار مناسبی برای بررسی سیستم‌های اجتماعی عصر باستان است. برای مثال، اگر بخواهیم ارتباط میان انسان و آثار باقی‌مانده از او در یک روستا یا یک جامعه‌ی کوچک کشاورزی در دنیای باستان را موردمطالعه و بررسی قرار دهیم می‌توانیم با استفاده از زبان برنامه‌نویسی مدل مجازی کوچکی از آن جامعه بسازیم. سپس باید مشخص کنیم که چه نوع آثاری از این جامعه باقی‌مانده است (معماری، سفال، تدفین یا غیره) و اینکه هدف ما از ساخت مدل پاسخ به چه پرسش یا پرسش‌هایی است. درنهایت با مقایسه داده‌هایی که از شبیه‌سازی به‌دست‌آمده با داده‌های واقعی حاصل از حفاری و بررسی‌های باستان‌شناسی می‌توان پیش‌بینی کرد که چه نوع فرایندهایی در گذشته اتفاق افتاده است. در این مقاله به معرفی و بررسی یکی از نمونه‌های موفق شبیه‌سازی یک جامعه‌ی باستانی خواهیم پرداخت.

ب. ساخت تئوری (Theory building)

شبیه‌سازی ابزاری کارآمد برای ساخت تئوری در خصوص داده‌های باستان‌شناسی است. یافته‌های باستان‌شناسی همواره پرسش‌های زیادی برای باستان شناسان به وجود می‌آورند و اما و اگرهای بسیاری را به دنبال دارند. گاهی اوقات مدل‌ها با هدف پیش‌بینی یا تولید ساخته نمی‌شوند، بلکه هدف از ساخت آن‌ها تائید کردن یک مسئله یا آزمودن این اما و اگرهاست. به این نوع مدل در اصطلاح مدل شرطی یا ذاتی (subjunctive model) می‌گویند[2].

برای روشن‌تر شدن این مطلب بهتر است به بیان یک مثال بپردازیم. پس از سقوط امپراتوری هخامنشی و با روی کار آمدن دولت سلوکی شکل و طرح سفال‌ها کاملاً تغییر یافت و گونه‌های متعددی از ظروف سفالی مورداستفاده قرار گرفت. این گونه‌های جدید باید مسیر بسیار پیچیده‌ای را در سیستم اقتصادی طی کرده باشند تا بتوانند به‌عنوان جایگزین برای ظروف سفالی قدیمی موردقبول جامعه قرار بگیرند. با بهره‌گیری از مدل‌سازی عامل محور می‌توان پی برد که یک نمونه سفال سلوکی چه فرایندی را برای فراگیر شدن طی کرده است. در نظر بگیریم که در هر حرکت در مدل ما ۱۰٪ از مردم به این نوع سفال علاقه نشان داده و آن را خریداری می‌کنند. اما در همین حین حدود ۲٪ از مردم نسبت به آن علاقه‌ای نشان نمی‌دهند و ترجیح می‌دهند که همان سفال‌های قدیمی را خریداری کنند. ساخت یک مدل ساده از این فرایند به ما می‌آموزد که چقدر زمان نیاز بوده که یک نوع جدید از سفال در بازار اشباع شود و چه فرایندی را برای اینکه موردتوجه خریداران قرار بگیرد پیموده است.

ج. آزمایش فرضیه (Hypothesis testing)

برای هر رویداد تاریخی ممکن است سناریوهای بسیاری وجود داشته باشد. یک واقعه‌ی تاریخی می‌تواند توسط چندین تاریخ‌نویس به‌گونه‌ای کاملاً متفاوت ثبت شده باشد و یا آثار و شواهد ضدونقیض و یا تائید کننده‌ای توسط باستان‌شناسان کشف شده باشد، اما چگونه می‌توان فهمید که روایت کدام تاریخ‌نویس درست‌تر و قابل‌اطمینان‌تر است و اینکه چه ارتباطی میان یافته‌های باستان‌شناسی و این روایت‌ها وجود دارد؟ باید گفت در چنین شرایطی اغلب فرضیه‌های بسیاری شکل می‌گیرد. شبیه‌سازی می‌تواند به‌عنوان یکی از علمی‌ترین شیوه‌های آزمایش فرضیه در این موارد به محققان کمک کند. با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری می‌توان یک یا چند فرضیه که بیش از سایر فرضیات پذیرفته شده‌اند را مورد آزمایش قرار داد تا بدین ترتیب محتمل‌ترین و غیرمحتمل‌ترین آن‌ها را از هم تمیز داد.

۴. چگونه می‌توان یک مدل عامل محور ساخت؟

یکی از ساده‌ترین راه‌های مدل‌سازی برای ساخت جوامع مجازی استفاده از برنامه‌نویسی کامپیوتری و یا بهره‌گیری از سیستم‌های معادلاتی است. توانایی ساخت سیستم‌های عامل محور برای خطاب قرار دادن سؤالات خاص و پیچیده مستلزم داشتن و یا کسب مهارت‌هایی است که در زیر به آن‌ها اشاره می‌کنیم:

الف. دانستن زبان جدید برای توصیف کردن و ساختن

یک مدل. در مدل‌سازی عامل محور ما قادر نیستیم که از زبان آماری و معادلاتی استفاده کنیم چراکه مدل‌سازی عامل محور نیازمندی نمایش مفاهیمی چون پدیده‌های نوظهور، رفتار انطباقی و تعامل هستیم که مهم‌ترین المان‌های یک مدل عامل محور را تشکیل می‌دهند.

ب. داشتن مهارت‌های نرم‌افزاری برای ساخت مدل کامپیوتری آزمایش کنترل و تحلیل مدل ساخته‌شده. معمولاً تولید نرم‌افزارها برای مدل‌سازی عامل محور پیچیده‌تر از دیگر نرم‌افزارهای مدل‌سازی است. در حال حاضر ابزارهای برنامه‌نویسی نت لگو (NetLogo) [8] و پایتون (Python) محبوب‌ترین نرم‌افزارهای مورداستفاده در مدل‌سازی عامل محور هستند.

ج. داشتن برنامه برای تحلیل مدل. هیچ محدودیتی برای پیچیدگی یک مدل کامپیوتری وجود ندارد. اما اگر یک مدل بیش‌ازحد پیچیده باشد تعیین پارامترهای مهم و تحلیل آن بسیار دشوار خواهد شد. بنابراین برای ساخت یک مدل موفق باید تعیین کنیم که چه عوامل، متغیرها و فرایندهایی باید یا نباید به یک مدل افزوده شوند. همچنین روش تحلیل مدل پس از ساخت آن باید مشخص شود.

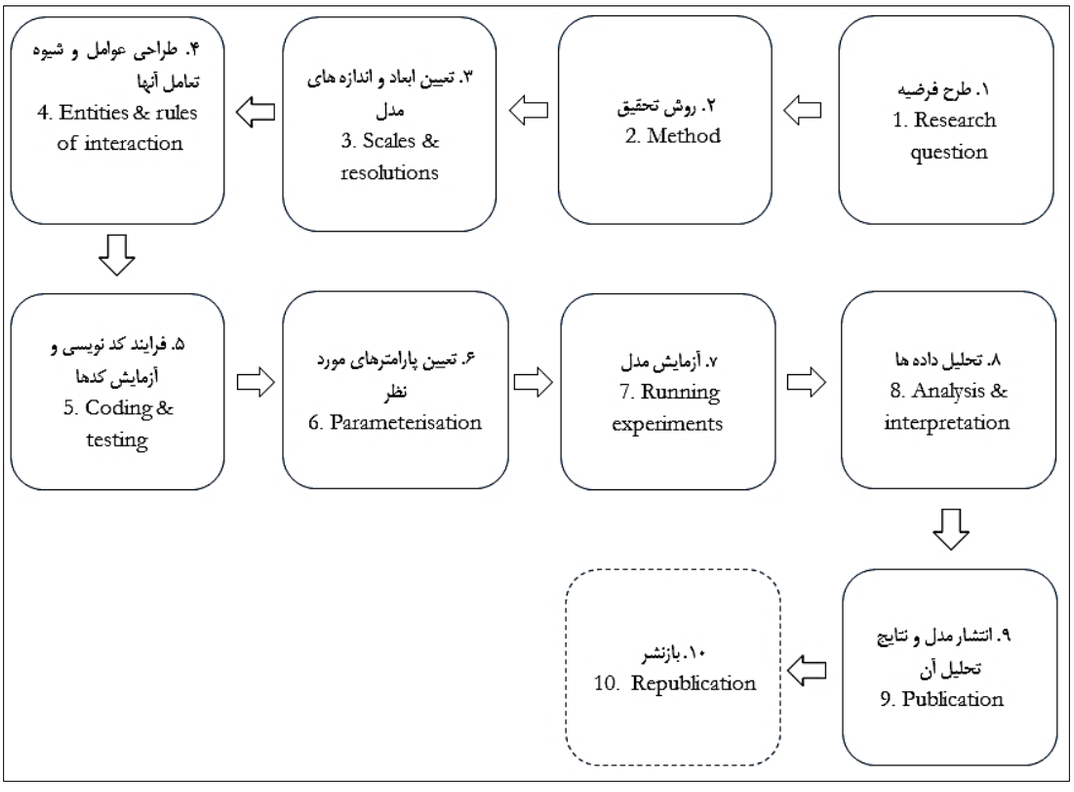
پس از آشنایی اولیه با مدل‌سازی عامل محور شاید نخستین پرسشی که به ذهن خطور می‌کند این باشد که برای ساخت یک مدل چه فاکتورها و عواملی اهمیت بیشتری در پاسخگویی به سؤالات ما دارد. پاسخ این است که ما به‌درستی قادر به دانستن این نکته نیستیم و به همین دلیل نیازمند ساخت، به‌کارگیری و تحلیل یک مدل هستیم. در این مرحله ما قادر خواهیم بود از ریاضیات و کامپیوتر برای آزمایش فرضیه‌ها و انگاشته‌هایمان استفاده کنیم. گام نخست در ساخت یک مدل داشتن دانش اولیه از ویژگی‌ها و عملکرد سیستمی است که برای آن مدل طراحی می‌کنیم. ایده‌ی اولیه برای ساخت یک مدل می‌تواند بر اساس آگاهی و دانش تجربی ما از رفتار یک سیستم یا بر پایه‌ی یک فرضیه و در یک محیط کاملاً مجازی شکل بگیرد. اما اگر آگاهی و دانش پیشین از چگونگی کارکرد یک سیستم وجود نداشته باشد ما قادر به ساخت یک مدل نخواهیم بود؛ بنابراین برای ساخت یک مدل ما به‌طورقطع نیازمند داده‌های باستان‌شناختی هستیم. در این مرحله پس از ساخت و آزمایش مدل اولیه می‌توانیم برای بخشی از پرسش‌هایمان پاسخی بیابیم، بر بخشی از فرضیاتمان خط بطلان بکشیم و فرضیه‌ها و پرسش‌های تازه‌تری را مطرح کنیم.

۵. فرایند ساخت یک مدل عامل محور

مدل‌سازی علمی و کارشناسانه مستلزم دنبال کردن فرآیند سامانمند و پویایی است که به‌طور مشخص و جامع تدوین شده است. در ساخت یک مدل چنانچه پیش‌تر نیز به آن اشاره کردیم نخست داشتن آگاهی و دانش عملی از چگونگی کارکرد سیستم موردنظر و مطالعه ما و سپس مستندسازی و مدیریت فرآیند ساخت مدل از مهم‌ترین و کلیدی‌ترین مراحل تولید و ساخت یک مدل هستند (شکل ۲). چرخه تولید و ساخت یک مدل موفق به شرح زیر است:

۱. طرح سؤال: برای ساخت یک مدل در نخستین گام ما به یک سؤال واضح و روشن نیاز داریم چراکه این سؤال در مراحل بعدی همانند راهنما و فیلتر در طراحی مدل کار خواهند کرد. اغلب طراحی یک سؤال روشن و مفید و طبقه‌ای بسیار مهم است که نیازمند تفکر بسیاری است. در بسیاری مواقع سؤال طرح‌شده بسیار تجربی است و گاه نیاز است که سؤال بازنگری شود و تغییر یابد. چراکه ممکن است پرسش ما به‌اندازه کافی روشن نبوده باشد و یا اینکه بسیار ساده و پیش‌پاافتاده و یا بسیار پیچیده باشد.

۲. طرح فرضیه برای ساختارها و فرایندهای موردنیاز: در مدل‌های عامل محور ارتباط و پیوستگی چندانی میان عوامل و متغیرهای تعریف‌شده در سیستم وجود ندارد و از این نظر مدل‌های عامل محور بسیار بی‌تجربه هستند. به‌صورت هدفمند این عوامل و رفتار آن‌ها را تعیین می‌کنیم. ما این عوامل را تولید می‌کنیم در فضای مجازی قرار می‌دهیم و سپس دنیای مجازی ساخته‌شده را به حرکت درمی‌آوریم تا ببینیم که ازآنچه چیزی می‌آموزیم. معمولاً به فرضیه‌های زیادی نیاز داریم تا بتوانیم به سؤال اصلی پاسخ دهیم برای مثال چه فاکتورهایی تأثیر بیشتری بر روی پدیده‌ی موردنظر ما دارند. آیا این فاکتورها مستقر هستند و یا وابسته به فاکتورهای دیگر ؟ آیا از فاکتورهای دیگر تأثیر می‌پذیرند ؟ برای این منظور



شکل ۲: فرایند طراحی، ساخت و نشر یک مدل[2]
Fig. 2: the model development sequence[2]

می‌توان یک فلوچارت یا یک‌روند نما طراحی کرد.

در فرایند طراحی و ساخت مدل عامل محور باید از ساده‌ترین پرسش شروع کرد. چرخه تولید و ساخت مدل باید با ساخت ساده‌ترین مدل آغاز شود چراکه هدف ما از تهیه یک مدل توسعه درک ما از مسئله به‌صورت تدریجی است. یکی از بزرگ‌ترین اشتباهات مدل‌سازان مبتدی ساخت مدل‌های پیچیده از ابتدای کار است چراکه باور دارند بسیاری از عوامل و فاکتورها را نمی‌توان نادیده گرفت. شاید این دیدگاه درست باشد اما در ابتدای کار باید از ساده‌ترین و مهم‌ترین فاکتورها شروع کرد و سپس بنا بر نیاز به پاسخگویی به فرضیات مطرح‌شده فاکتورهای جدیدی را به آن اضافه کرد. باید ابتدا آموخت که برداشت ابتدایی ما از یک سیستم برای اینکه تصمیم بگیریم کدام فاکتورها مهم‌تر و یا بی‌اهمیت هستند کافی نیست. هدف اصلی یک مدل این است که به ما بیاموزد که چه چیز اهمیت بیشتری دارد. بنابراین پس از طرح سؤال و داشتن این فرضیه اولیه عاقلانه آن است که مدلی ساده برای آن بسازیم. هرچه مدل ساده‌تر باشد فهم آن و تحلیل آن نیز ساده‌تر است[9].

۳. انتخاب اندازه، عوامل متغیر، فرایند و پارامترها: پس از طرح سؤال اصلی و فرضیات و ساخت مدل ابتدایی زمان آن است که درباره‌ی جزئیات کار بیندیشیم. در این مرحله باید پیش‌طرح مدل را طراحی کرده و بنویسیم. این مرحله از کار و به‌روز کردن آن تا پایان کار برای ارائه آن بسیار مهم است[9].

۴. راه‌اندازی مدل: در چرخه مدل‌سازی تکنیکی‌ترین بخش استفاده از ریاضیات و برنامه‌نویسی کامپیوتری برای تبدیل مدل توصیف‌شده به انیمیشن یا تصویر متحرک است. اما چرا متحرک؟ پاسخ این است که با متحرک‌سازی مدل زندگی و پویایی مستقلی می‌یابد که از منطق تعریف‌شده برای آن گرفته شده است. فرضیات ما ممکن است ناقص و یا نادرست از آب دربیایند اما مدل ساخته‌شده به ما اجازه می‌دهد تا فرضیاتمان را بسنجیم و درستی یا نادرستی آن‌ها را دریابیم[9].

۵. تحلیل، آزمایش و تغییر مدل: درحالی‌که بیشتر مبتدی‌ها در مدل‌سازی باور دارند که طراحی و ساخت و به حرکت درآوردن یک مدل بیشتر بخش از کار است باید گفت که مهم‌ترین و بزرگ‌ترین بخش آن درواقع تحلیل داده‌های مدل و آموختن نکات جدید از آن است. هدف از مدل‌سازی تنها ساخت یک دنیای مجازی و تعریف رفتارهای مشخص برای عوامل آن نیست بلکه می‌خواهیم بدانیم که عوامل ایجادشده چگونه بر اساس رفتارهایی که برای آن‌ها تعریف کرده‌ایم عمل می‌کند و اینکه این دنیای مجازی را با سیستم واقعی مقایسه کنیم و برای رفتارها و خصوصیاتی که بر روی آن‌ها تمرکز کرده‌ایم توضیح بیابیم[9].

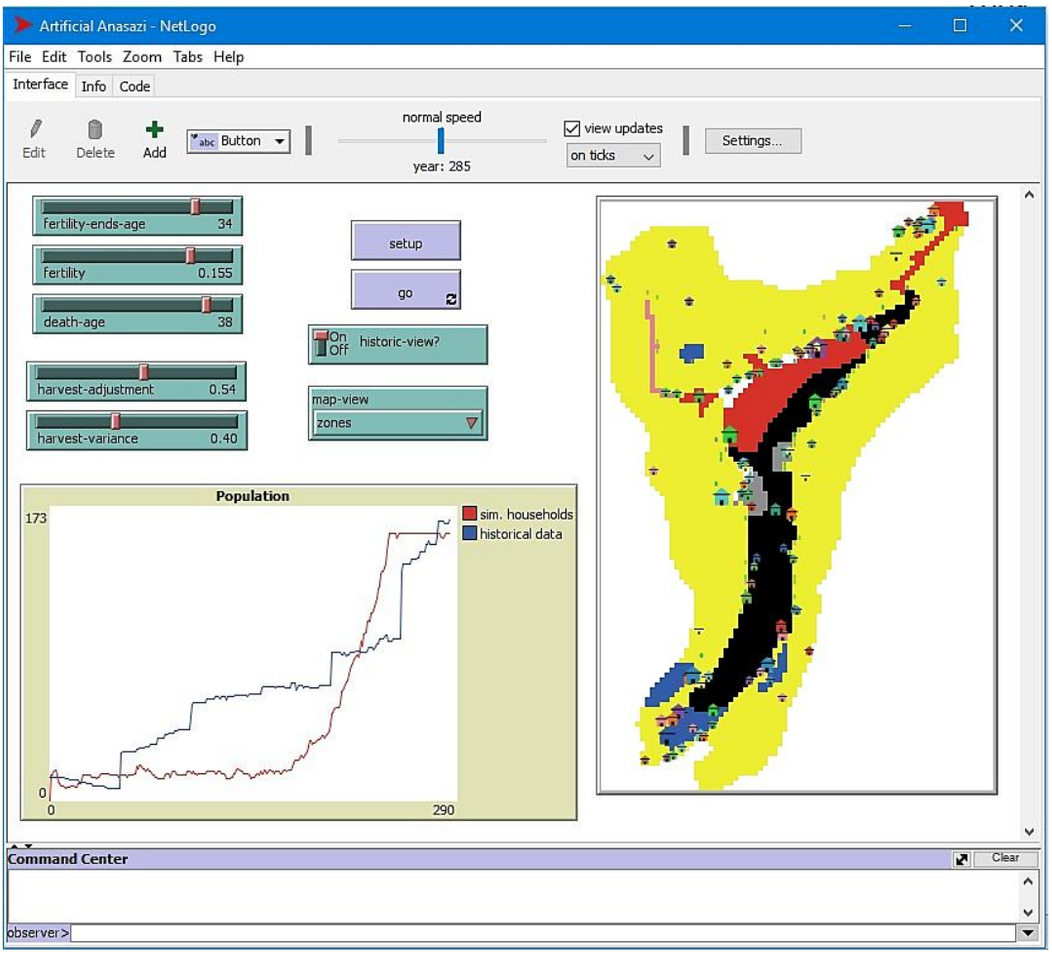
همچنین راه‌اندازی و آزمایش مدل و در صورت نیاز بهبود آن بخش مهم دیگری از چرخه‌ی مدل‌سازی هستند. رعایت تمامی موارد گفته‌شده در چرخه مدل‌سازی و مستندنگاری تمامی مراحل ساخت مدل از اهمیت بالایی برخوردار است و می‌تواند ما را در بهبود و تکامل مدل ساخته‌شده در پژوهش‌های آینده یاری کنند[2,9].

۶. پروژه‌ی دره آناسازی

پروژه آناسازی مجازی یکی از بهترین نمونه‌های مدل‌سازی عامل محور در باستان‌شناسی است که به‌منظور مطالعه بر روی یک دوره‌ی ۵۰۰ ساله از سکونت در دره آناسازی واقع در شمال شرق آریزونا ساخته شده است. هدف اصلی از طراحی این مدل مقایسه داده‌های موجود باستان‌شناسی از این دره با مدل مجازی ساخته‌شده بر اساس این داده‌ها است و در نوع خود نمونه‌ی موفقی از مطالعه‌ی ارتباط میان انسان عصر باستان با محیط و آثار فیزیکی به‌جای مانده از آن (middle-range research) به شمار می‌آید. نسخه‌ی اولیه‌ی مدل آناسازی در دهه‌ی نود میلادی توسط تیمی متشکل از باستان شناسان و مدل‌سازان در دانشگاه سانتافه نیومکزیکو ساخته شد. پرسش اصلی در این مطالعه یافتن توضیح برای ناپدید شدن ناگهانی جمعیت در این منطقه بود و نخستین فرضیه مطرح‌شده احتمال خشک‌سالی و تغییرات آب و هوایی بود. بدین منظور تنها بخش کوچکی از دره آناسازی به نام کاینتا آناسازی (Kayenta Anasazi) واقع در دره لانگ هاوس (Long House Valley) در شمال شرق آریزونا در فاصله سال‌های ۸۰۰ تا ۱۳۰۰ م. موردمطالعه قرار گرفت. ازآنجاکه هدف اصلی از ساخت چنین مدلی بررسی نقش تأثیرات جوی بر میزان جمعیت دره آناسازی بود باید شبیه‌سازی دقیقی از محیط فیزیکی (هیدرولوژی، کاشت و برداشت ذرت، خطر خشک‌سالی، بارندگی و دیگر داده‌های جغرافیایی) صورت می‌گرفت. بنابراین طیف وسیعی از داده‌های جغرافیایی در زمینه‌ی آب‌وهوا، نوع خاک و یافته‌های باستان‌شناسی شامل تعداد نفرات یک خانوار، پراکندگی جمعیت، کشاورزی، شیوه‌های ذخیره‌سازی ذرت و غیره برای ساخت مدل اولیه به زبان برنامه‌نویسی و در محیط نرم‌افزار نت لوگو (NetLogo) تدوین شد (شکل ۳)[10].

در این مدل فضای مجازی بسیار نزدیک به واقعیت خلق شده است. عوامل در این مدل به‌صورت خانوار نمایش داده شده‌اند. هر خانوار می‌تواند به‌طور میانگین پنج عضو شامل زن، شوهر و فرزندان مذکر یا مؤنث داشته باشد. با گذشت هرسال سن اعضای خانواده افزایش میابد، والدین پیر می‌شوند و فرزندان به سن ازدواج می‌رسند و خانواده تشکیل می‌دهند. آن‌ها قادرند با توجه به شرایط محیطی مناسب‌ترین زمین برای سکونت و کشاورزی را انتخاب کنند. تعداد خانوارها و محل سکونت آن‌ها بر اساس یافته‌ها و داده‌های باستان‌شناسی بازسازی‌شده و سعی بر آن بوده تا با واقعیت مطابقت داشته باشد. در سیستم طراحی‌شده نظام اجتماعی کاملاً یکپارچه است و هیچ طبقه‌ی اجتماعی از موقعیت ویژه‌ای برخوردار نیست. بر این اساس همه‌ی عوامل به یک اندازه قادر به تصمیم‌گیری برای انتخاب محل سکونت و کشاورزی هستند و تنها عامل بازدارنده شرایط زیست‌محیطی است. چندین متغیر نیز برای کاشت و برداشت محصول در نظر گرفته شده است که با تغییر ضریب آن‌ها می‌توان نتایج متفاوتی به دست آورد[1].

نتیجه‌ی که از تحلیل مدل اولیه به دست آمد حاکی از آن بود که عوامل محیطی تأثیر بسیاری در انتخاب محل سکونت، شیوه زندگی، پراکندگی و تراکم جمعیت و ایجاد سکونتگاه‌های موقت داشته اما به‌طور قطعی دلیل

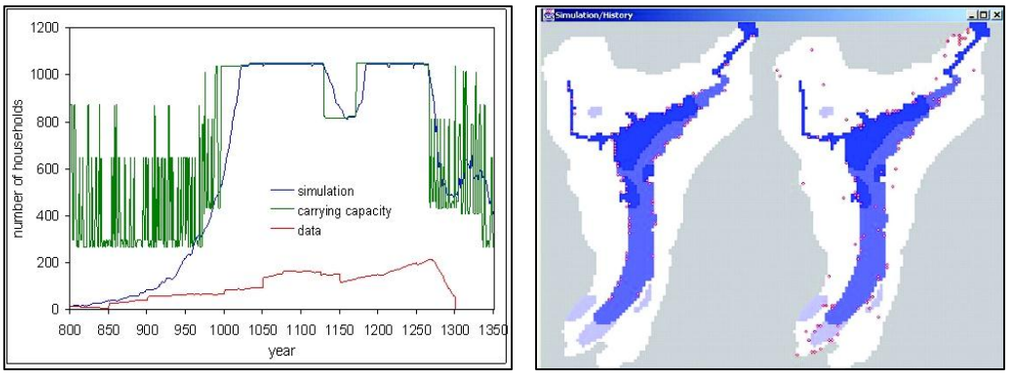


شکل ۳: نمایی از مدل آناسازی ساخته‌شده در محیط نرم‌افزار نت لوگو (NetLogo) [11]

Fig. 3: Anasazi model simulated in NetLogo software[11]

متروکه شدن این منطقه نبوده، چراکه شرایط جوی و جغرافیایی در دره‌ی آناسازی برای ادامه سکونت کاملاً مساعد بوده است. بنابراین دلیل متروکه شدن این دره فاکتورهای زیست‌محیطی نبوده است بلکه به‌احتمال‌قوی دلایل آیینی و مذهبی داشته است. البته فاکتورهای دیگری مانند مالکیت زمین، و درگیری‌های قومی و قبیله‌ای نیز می‌توانسته در این زمینه دخیل بوده باشند. نکته‌ی قابل‌توجه دیگر این بود که نتیجه‌ی این بازسازی که با استفاده از قانون ساده‌ی انتخاب محل زندگی شکل گرفته بود بسیار به داده‌های دموگرافیک باستانی منطقه نزدیک بود (شکل ۴).

در اینجا ذکر این نکته ضروری است که نباید تصور داشت که این مدل تمامی مشکلات و ناشناخته‌های تمدن دره آناسازی را حل کرده و به‌تمامی پرسش‌های ما پاسخ داده است بلکه شاید مدل کامل‌تر و دقیق‌تر از آن هم به‌تمامی این پرسش‌ها پاسخ ندهد. اما ساخت یک مدل موفق می‌تواند زمینه‌ساز پرسش‌ها و ایجاد فرضیات تازه‌ای باشد. چنانچه پیش‌تر در بخش فرایند ساخت یک مدل گفتیم پس از ساخت و تحلیل نسخه‌ی اولیه یک مدل می‌توان با برطرف کردن نقاط ضعف مدل اولیه و تکمیل آن با داده‌های بیشتر فرضیه‌های بیشتری ساخت و به آن‌ها پاسخ داد. در همین راستا و به‌منظور آزمایش فرضیه‌ای تازه تغییراتی در مدل داده شد. در نسخه‌ی جدیدتر برای عوامل سن باروری، پایان سن باروری و میانگین سنی در نظر گرفته شد درحالی‌که در نسخه‌ی اول این مسئله در نظر گرفته نشده بود که این تغییرات تا حدی نتیجه‌ی به‌دست‌آمده را تغییر داد اگرچه در کلیات آن تأثیر قابل‌توجهی نداشت[14].



شکل ۴: راست) در تصویر می‌توان تفاوت دو مدل شبیه‌سازی‌شده از آناسازی واقعی و آناسازی شبیه‌سازی‌شده را مشاهده نمود. هر نقطه نمودی از یک خانوار است. در مدل سمت راست موقعیت واقعی و در مدل سمت چپ موقعیت شبیه‌سازی‌شده هر دو سال ۱۱۴۴ م. را نشان می‌دهد. در هر دو مورد عوامل که به شکل خانوار نمایش داده‌شده‌اند در حاشیه مناطق قابل کشاورزی و دسترسی به آب سکنی گزیده‌اند (سطح پررنگ)[12] چپ) نتایج به‌دست‌آمده بر اساس پارامترهای تعیین‌شده. خط آبی در این نمودار بیانگر تعداد خانوارهایی است که توسط مدل شبیه‌سازی‌شده و خط قرمز نمایشگر تعداد خانوارهایی است که با استفاده از داده‌های باستان‌شناسی تخمین زده شده‌اند. خط سبز نشان‌دهنده‌ی ظرفیت منطقه برای تأمین غذای یک خانوار است [13].

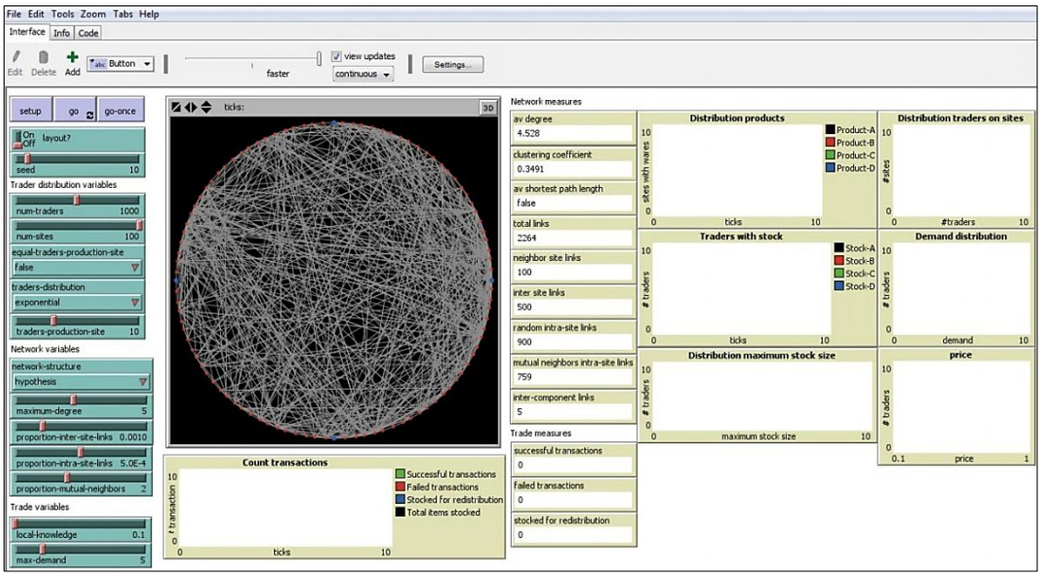
Fig. 4: Right) the model represent the difference between the simulated and historical settlement patterns in Anasazi Valley. Each point represents a household. The model on the right side is based on the real data and the left side model is the simulation of the year 1444. In both cases, agents were settled closed to water sources and fertile lands [12]
Left) the results of the simulation based on the defined parameters. The blue line indicates the number of households simulated by the model and the red line represents the number of households estimated by archaeological data. The green line shows the carrying capacity of the area.[13].

۷. پروژه‌ی مرکوری

مدل شبیه‌سازی‌شده در آناسازی تنها مدل موفق ساخته‌شده در زمینه‌ی تحقیقات تجربی و میان‌رشته‌ای در باستان‌شناسی نیست. نمونه‌ی موفق دیگری از مدل‌سازی عامل محور مدل موسوم به مرکوری (Mercury) است که برای مطالعه پراکندگی انواع سفال در شرق مدیترانه در دوران روم باستان ساخته شده است. بر اساس بررسی‌ها و حفاری‌هایی که تاکنون در این بخش از امپراتوری روم باستان صورت گرفته است چهار نوع سفال بیش از دیگر انواع آن کاربرد داشته است. بنابراین، مدل مرکوری باهدف مطالعه بر روی چگونگی گسترش این چهار نوع سفال ساخته شده است. این سفال‌ها همگی در مناطق شرق مدیترانه و در فاصله پایان عصر هلنیستی و سال ۱۵۰ م. تولید شده و مورداستفاده بوده‌اند، اما تنها یکی از این انواع بیش از باقی آن گسترش یافته است[15].

فرضیه‌های بسیاری در خصوص گسترش یافتن این چهار گونه خاص سفال توسط باستان شناسان مطرح گردیده است. ارتباط تنگاتنگ میان مردم شهرنشین و نواحی دوردست که مرکز تولید سفال بوده‌اند، فشار اعمال‌شده از سوی حکومت‌های محلی که قدرت اجرایی اقتصادی مذهبی و نظامی داشته‌اند، الگوی ارتباطی میان مردم و پیوستگی استقرارها و مناطق مسکونی و وجود یک سیستم سیاسی ازجمله فرضیات مطرح شده هستند[۲]. ازآنجاکه تعداد فرضیه‌ها در این خصوص کم نیست پرسش اصلی در این مطالعه مشخص نمودن فاکتورهای اصلی در شکل‌گیری این الگوهاست. در این مطالعه با استفاده از سفال‌هایی که تاکنون جمع‌آوری مطالعه و منتشر شده بود یک مدل کامپیوتری ساخته شد تا با آن بتوان به آزمایش فرضیات مطرح‌شده پرداخت [15].

در این مطالعه بر روی چهار نمونه سفال‌های رایج در دوره هلنی و سفال لعاب‌دار قرمز رومی تأکید شده است. تمامی این چهار نوع سفال به‌طور گسترده‌ای در شرق مدیترانه تولید شده و مورد استفاده بوده‌اند. اما یکی از این انواع بیشتر از بقیه رواج داشته است. این تفاوت در تولید نوع خاصی از سفال را باید در نظام اقتصادی عصر باستان موردمطالعه قرار داد. سرمایه‌گذاری بر روی تولید این انواع خاص از سفال سبب به وجود آمدن فعالیت‌های اقتصادی متفاوتی شده است که به‌طور گسترده‌ای به کشاورزی

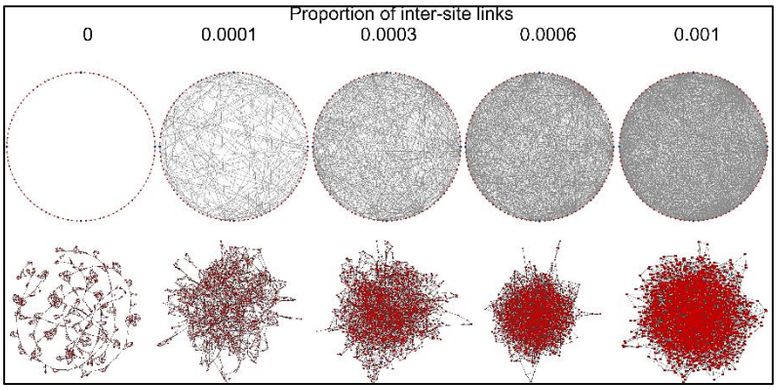


شکل ۵: نمایی از محیط مدل مرکوری ساخته‌شده در محیط نرم‌افزار نت لوگو [16](Net Logo)
Fig. 5: Mercury model simulated in NetLogo software[16]

مرتبط و وابسته بوده است[15].

مدل مرکوری یک مدل عامل محور است که در محیط نرم‌افزار نت لوگو طراحی شده است (شکل ۵). هدف این مدل بررسی چگونگی گسترش و پراکندگی سفال و شبیه‌سازی ساختار شبکه‌های اجتماعی میان بازرگانان است که به‌صورت یک کانال ارتباطی برای مبادله اطلاعات و کالا عمل می‌کنند. در این مدل هزار بازرگان درصد بازار پراکنده شده‌اند. بازرگانان به‌طور گروه‌های جداگانه در یک شبکه اجتماعی قرار گرفته‌اند که به‌طور محدود با دیگر گروه‌ها در ارتباط‌اند. این شیوه ارتباطی نشان‌دهنده‌ی ساختار یک صنف است. بازرگانان به شکل دوبه‌دو در یک شبکه اجتماعی با یکدیگر در ارتباط‌اند و قادرند اطلاعات بازرگانی مانند عرضه و تقاضا و تخمین قیمت‌ها را باهم مبادله کنند و به تجارت سفال بپردازند. آن‌گونه که در سیستم طراحی شده اگر مبادله اطلاعات بازرگانی و کالا میان بازارها بالا باشد بازاری منسجم خواهیم داشت. اما اگر این همکاری متقابل وجود نداشته باشد پیوستگی نیز بسیار اندک است. بنابراین میزان مشارکت و پیوستگی بازار کاملاً نسبی است. بدین معنا که اگر بازرگانان در یک‌سو ارتباط کمتری با بازرگانانی که در سوی دیگری هستند داشته باشد احتمال دریافت اطلاعات بازرگانی و یا کالا محدود می‌شود و میزان همبستگی میان دو سمت نیز کاهش می‌یابد. این نسبت با تغییر دادن یک متغیر در مدل آزمایش شد. میزان بالای این متغیر نشان‌دهنده‌ی مشارکت و پیوستگی صددرصدی در بازار و میزان پایین آن بیانگر مشارکت ضعیف بود.

در این مدل چهار عدد از بازارهایی که مرکز تولید چهار نوع سفال بوده‌اند موردمطالعه هستند. در هر حرکت بازرگانانی که در این بازارها هستند کالاهایی که محصول بازار محلی هستند را خریداری می‌کنند. سپس میزان تقاضا را در بازار محلی تخمین می‌زنند و قیمت مناسب را بر اساس آگاهی که از عرضه و تقاضا از دیگر بازرگانان به دست آورده‌اند برآورد می‌کنند. اگر بخشی از بازرگانانی که یک بازرگان با آن‌ها در ارتباط است داده‌های تجاری را به اشتراک نگذارند دانسته‌های یک بازرگان محدود خواهد شد. این رفتار بازرگانان به‌صورت یک متغیر در مدل طراحی شده است که میزان کم آن به گردش اندک اطلاعات تجاری درست و قابل‌اطمینان منجر خواهد شد. در هر حرکت مدل بازرگانانی که در یک شبکه باهم در ارتباط‌اند سفال خریدوفروش می‌کنند و زمانی که یک کالا در بازار توسط بازرگانان خریداری می‌شود آن‌ها قادرند تصمیم بگیرند که آیا کالا را به یک مصرف‌کننده‌ی محلی بفروشند و یا آن را برای توزیع



شکل ۶: نمونه‌هایی از ساختارهای شبکه‌ی بازرگانی که توسط مدل مرکوری و با ایجاد تغییر در پارامترهای تعریف‌شده در سیستم ساخته شده است. ردیف بالا مجموعه‌ای از محوطه‌ها را حول یک دایره نشان می‌دهد که در چهار طرف آن چهار بازار قرار گرفته است. ردیف پایین نشان‌دهنده‌ی همان شبکه است اما گره‌ها بازرگانان و شبکه‌ی اجتماعی آن‌ها را نشان می‌دهد [17].

Fig. 6: Example of the network structure generated by MERCURY model using different parameters. The top row indicate a network of sites with the traders located on the edges of circles as red points. The bottom row shows the same networks but nodes represent traders and the traders' social network[17].

مجدد ذخیره کنند و اندکی بعد به قیمت بالاتری آن را به فروش برسانند. متغیرهای کلیدی در این مدل میزان ارتباط میان بازرگانان و میزان اطلاعاتی است که آن‌ها با یکدیگر مبادله می‌کنند[15]. با ایجاد تغییر در این دو متغیر می‌توان الگوهای توزیع و پراکندگی سفال را بررسی کرد و فاکتورهای مؤثر و غیرمؤثر در شکل‌گیری الگوهایی که یافته‌های باستان‌شناسی به ما عرضه می‌دارند را شناسایی نمود. بدین‌صورت می‌توان پی برد که در چه شرایطی سفال‌های موردمطالعه توزیع و پراکنده شده است.

نتیجه‌ای که از تحلیل این مدل به دست آمد این بود که تفاوت در میزان دسترسی به داده‌های تجاری تأثیری بر تفاوت عمیقی که در توضیح این چهار نوع سفال وجود دارد نداشته است. به‌عبارت‌دیگر متغیر داده‌های تجاری در توزیع و پراکندگی سفال‌ها اثری نداشته است. اما این متغیر بر روی تنوع سفال‌ها در هر مجموعه مؤثر بوده است . تنظیم متغیر بر روی بالاترین درجه به تنوع کمتر مجموعه سفال‌ها منجر شد و کمترین درجه تنوع بیشتری را به وجود آورد. از سوی دیگر با افزایش میزان پیوستگی و مشارکت در بازار پراکندگی و تنوع سفال‌ها بیشتر شد که این حالت به وضعیت سال‌های ۱۰۰–۱۵۰ م. قابل‌مقایسه است. با افزایش میزان مشارکت و پیوستگی در بازار و تعداد نابرابر بازرگانان در هر مرکز تولیدی پراکندگی و تنوع سفال‌ها افزایش یافت اما بیش از هر چیز تغییر در ساختار ارتباطی میان بازرگانان و بازارها بود که سبب تنوع و پراکندگی بیشترِ سفال‌ها می‌شد. همچنین بر اساس این مطالعه زمانی که یک مرکز تولید سفال تعداد بیشتری بازرگان دارد آن نوع از سفال بیش از دیگر انواع گسترش یافته است (شکل ۶).

بر اساس یافته‌های این مطالعه تعداد برابر بازرگانان در یک مرکز تولید سفال میزان کم مشارکت در بازار و محدودیت دسترسی به داده‌های تجاری الگویی که مشابه به یافته‌های باستان‌شناسی باشد را نمی‌سازند. بیشترین شباهت پراکندگی سفال در مدل شبیه‌سازی‌شده با یافته‌های باستان‌شناسی زمانی است که تعداد بازرگانان در مراکز تولیدی برابر نیستند و بازرگانان قادرند به بهترین شکل به تقاضا در بازار پاسخ دهند[15]. این مطالعه اهمیت عرضه و تقاضای جمعی را نشان می‌دهد که معمولاً در جوامع شهری رخ می‌دهند. اما باید اذعان داشت که داده‌های باستان‌شناسی برای یک مطالعه قیاسی بر روی محوطه‌ای مانند شهرهای بزرگ یا کوچک کافی نیست. تنها نتیجه‌ای که با اطمینان از این مطالعه می‌توان گرفت این است که مراکز شهری بزرگ که در نزدیکی مراکز تولید سفال قرار داشته‌اند به‌احتمال‌زیاد به‌عنوان یک مرکز تجاری پر تقاضا عمل می‌کرده‌اند و همین امر انگیزه‌ی اصلی تولید انبوه سفال بوده است. بنابراین، بزرگ‌ترین دستاورد پروژه مرکوری کنار گذاشتن فاکتورهای

غیرضروری و متمرکز شدن بـر فاکتورهـای اساسـی‌تـر و قابل‌قبول‌تر است[15].

۸. نتیجه‌گیری

اگرچه شبیه‌سازی به روش عامل محور علمـی نـو پـا بـه شمار می‌رود, اما دارای اعتبـار و وجهـه علمـی بـالایی در مطالعات باستان‌شناسی است. به‌طـور خلاصـه ازآنچـه تـا بدین جا گفتیم می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی عامل محـور روشـی قدرتمنـد بـرای مطالعـات تجربـی اسـت، تکنیکی که در آن عوامل گاه انسـان هسـتند و گـاه غیـر انسان. البته چنانچه پیش‌تر نیز گفتیم نباید انتظـار داشـته باشیم که با سـاخت و تحلیـل یـک مـدل بـرای تمـامی سوالات و فرضیه‌هایمان پاسخی بیابیم. مهم‌ترین پرسـش در طراحی و تحلیل یک مدل این است که آیـا فرضـیات مطرح‌شده بـرای بازتولیـد پدیـده‌ی مشـاهده‌شـده کـافی هستند؟ پاسخ به این سؤال می‌تواند مثبت یا منفـی باشـد. در بیشتر موارد این پاسخ منفی است کـه بـه مـدل‌سـازی عامل محور به‌عنوان یک ابـزار علمـی اعتبـار مـی‌بخشـد چراکه فرضیه‌های نادرست را از چرخـه خـارج مـی‌کنـد و امکان تمرکز بر روی فرضـیه‌هـای محتمـل‌تـر را فـراهم می‌آورد. بنابراین می‌توان با اطمینان گفت که بزرگ‌تـرین دستاورد ساخت یک مدل عامل محـور یـافتن توضـیحی منطقی برای رونـد شـکل‌گیـری یـک پدیـده و آزمـایش فرضیه‌های مطرح‌شـده در رابطـه بـا آن اسـت. مطالعـه و درک پدیده‌ها و الگوهای شـکل‌گرفتـه در یـک جامعـه‌ی باستانی و آزمایش فرضیه به‌وسیله‌ی مـدل‌سـازی عامـل محور علمی جامع و مدون است کـه کمـک بسـیاری بـه روند تحقیقات باستان‌شناسـی مـی‌کنـد. امـا دسـتیابی بـه نتیجه‌ی موفق به خلاقیت، سطح بالای دانش دانشـگاهی در موضوع موردتحقیق و داشتن دانش نرم‌افزاری کـافی و تسط به زبان برنامه‌نویسی است. از دیگر موارد بسیار مهم در مدل‌سازی عامل محور دنبال کردن موبـه‌مـو و دقیـق پروتکل تعریف‌شده برای اجرای چنین پـروژه‌هـایی اسـت که در این مقاله به‌اختصار به شرح آن‌ها پرداخته شد.

پی‌نوشت

۱. برای مطالعه بیشتر مدل آناسازی، رک.
https://www.openabm.org/model/2222/version/2/view (Stonedahl & Wilensky, 2010, Axtell et al., 2002, p. 7275-7279, Swedlund et al, 2015, p. 40-42, see also Epstein, 1999, p. 45.

۲. برای اطلاع بیشتر، رک. Bes, 2015.

References

[1] Lake MW. Explaining the past with ABM: on modelling philosophy. Agent-based Model. Simul. Archaeol., Springer; 2015, p. 3–35.

[2] Romanowska I. So You Think You Can Model? A Guide to Building and Evaluating Archaeological Simulation Models of Dispersals. Hum Biol 2015;87:169–92. doi:https://doi.org/10.13110/humanbiology.87.3.0169.

[3] Epstein JM. Agent-based computational models and generative social science. Complexity 1999;4:41–60.

[4] Epstein JM. Why model? J Artif Soc Soc Simul 2008;11:12.

[5] Starfield AM, Smith KA, Bleloch AL. How to model it: Problem solving for the computer age. Interaction Book Company; 1994.

[6] Gilbert N, Troitzsch K. Simulation for the social scientist. McGraw-Hill Education (UK); 2005.

[7] Epstein JM. Why model? J Artif Soc Soc Simul 2008;11:12.

[8] Wilensky U. NetLogo. Center for Connected Learning and ComputerBased Modeling. Northwest Univ Evanst 1999:http://ccl.northwestern.edu/netlogo/.

[9] Grimm V, Railsback SF. Individual-based Modeling and Ecology:(Princeton Series in Theoretical and Computational Biology) 2005.

[10] Dean JS, Gumerman GJ, Epstein JM, Axtell RL, Swedlund AC, Parker MT, et al. Understanding Anasazi culture change through agent-based modeling. Dyn Hum Primate Soc Agent-Based Model Soc Spat Process 2000:179–205.

[11] Stonedahl F, Wilensky U. NetLogo Artificial Anasazi model. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Northwest Univ Evanst 2010:http://ccl.northwestern.edu/netlogo

/models/Artific.
[12] Axtell RL, Epstein JM, Dean JS, Gumerman GJ, Swedlund AC, Harburger J, et al. Population growth and collapse in a multiagent model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley. Proc Natl Acad Sci 2002;99:7275–9. doi:https://doi.org/10.1073/pnas.092080799.
[13] Janssen MA. Understanding artificial anasazi. J Artif Soc Soc Simul 2009;12:13.
[14] Swedlund AC, Sattenspiel L, Warren AL, Gumerman GJ. Modeling archaeology: origins of the artificial Anasazi project and beyond. Agent-based Model. Simul. Archaeol., Springer; 2015, p. 37–50.
[15] Brughmans T, Poblome J. Roman bazaar or market economy? Explaining tableware distributions through computational modelling. Antiquity 2016;90:393–408. doi:https://doi.org/10.15184/aqy.2016.35.
[16] Brughmans T, Poblome J. MERCURY: an ABM of tableware trade in the Roman East. CoMSES Comput Model Libr 2015.
[17] Brughmans T, Poblome J. MERCURY: an agent-based model of tableware trade in the Roman East. J Artif Soc Soc Simul 2016;19:3.doi:https://doi.org/10.18564/jasss.2953.