

Arkadiusz Kawa, Konrad Fuks, Piotr Januszewski

Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu, Wydział Zarządzania, Katedra Logistyki i Transportu

Adres do korespondencji: Arkadiusz Kawa, arkadiusz.kawa@ue.poznan.pl

SYMULACJA KOMPUTEROWA JAKO METODA BADAŃ W NAUKACH O ZARZĄDZANIU*

Abstrakt: Symulacje komputerowe znajdują coraz więcej zwolenników wśród przedstawicieli nauk ścisłych. Dowodzi tego rosnąca liczba artykułów naukowych, w których symulacje służą za metodę do weryfikowania różnych hipotez badawczych. Jednakże w naukach o zarządzaniu są jeszcze one stosunkowo mało wykorzystywane.

Artykuł ma charakter przeglądowy. Jego celem jest prezentacja symulacji komputerowych, a w szczególności narzędzi do ich modelowania i możliwości aplikacyjne tej metody badawczej w naukach o zarządzaniu. W artykule zaprezentowano związki między symulacją a eksperymentem i obserwacją, cele symulacji, procedurę przeprowadzenia badania naukowego z użyciem metody symulacji i techniki weryfikacji komputerowego modelu symulacyjnego. Przedstawiono także ograniczenia zastosowania symulacji w obszarze nauk o zarządzaniu.

Słowa kluczowe: metody badawcze, symulacja komputerowa, nauki o zarządzaniu.

Klasyfikacja JEL: C15, C53, C63.

COMPUTER SIMULATION AS A RESEARCH METHOD IN MANAGEMENT SCIENCES

Abstract: Computer simulations are becoming more and more popular amongst researchers. This is proven by a growing number of scientific papers in which simula-

* Publikacja została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/03/D/HS4/03367.

tions are carried out as a method to verify various hypotheses. However management sciences make relatively little use thereof. The aim of the paper is to present computer simulations and, in particular, tools to model them, as well as the application possibilities of this research method.

Keywords: research methods, computer simulation, management science.

Wstęp

W nauce nie ma uniwersalnego zbioru metod, które w takim samym zestawieniu pasowałyby do każdego postępowania badawczego. Poszczególne dyscypliny naukowe stosują często odrębne metody badawcze, jednakże w ostatnim czasie uczeni korzystają coraz częściej z metod zaadaptowanych z innych nauk. Wynika to przede wszystkim z tendencji do prowadzenia badań interdyscyplinarnych. Dzięki takiemu podejściu te same obiekty mogą być badane w różny sposób, co uzupełnia lub oferuje nowe poglądy na to badane zagadnienie. Przykładem tego są nauki o zarządzaniu, gdzie z powodzeniem wykorzystuje się metody badawcze zaczerpnięte z psychologii, socjologii, matematyki, statystyki, informatyki czy nawet fizyki [Kawa 2014]. Świadczy to o rozwoju nauki, bowiem, zadaniem naukowców, jest nie tylko ustalenie nowych problemów badawczych, ale także opracowanie nowych lub modyfikowanie czy nawet łączenie stosowanych metod do ich rozwiązywania [Mruk 2008].

W naukach społecznych metod badawczych jest dużo i wraz z rozwojem nauki powstają nowe. Wśród najbardziej popularnych można wymienić takie metody, jak: obserwacyjną, monograficzną, badania dokumentów, sondażu diagnostycznego, analizy i konstrukcji logicznej, eksperymentalną, heurystyczną, indywidualnych przypadków, analizy i krytyki piśmiennictwa, statystyczną i symulacji komputerowej [Apanowicz 2002]. Część z tych metod ma charakter jakościowy (np. obserwacyjna, indywidualnych przypadków), a część ilościowy (np. statystyczna, symulacja komputerowa). W ostatnim czasie, ze względu dużą popularność technologii informacyjnych, na szczególną uwagę zasługuje ostatnia z wymienionych metod – symulacja komputerowa.

Celem artykułu jest przedstawienie symulacji komputerowych, a w szczególności narzędzi do ich modelowania i możliwości aplikacyjne tej metody badawczej w naukach o zarządzaniu. W artykule przedstawiono również związki między symulacją a eksperymentem i obserwacją, cele symulacji, procedurę przeprowadzenia badania naukowego z użyciem metody symulacji

i techniki weryfikacji komputerowego modelu symulacyjnego. Zaprezentowano także ograniczenia zastosowania symulacji w obszarze nauk o zarządzaniu. Artykuł stanowi również próbę odpowiedzi na pytanie, dlaczego w naukach o zarządzaniu nadal stosunkowo rzadko stosuje się symulację komputerową jako metodę badawczą.

1. Symulacja komputerowa jako metoda badawcza

Symulacja komputerowa jest ściśle powiązana z dwiema innymi metodami – obserwacyjną i eksperymentalną. Metoda obserwacyjna polega na rejestracji faktów i przedstawianiu ich we wzajemnych związkach i zależnościach. W wyniku rozwoju innych metod badawczych traci ona jednak na znaczeniu i staje się coraz częściej metodą uzupełniającą. Przykładem jest eksperyment, w którym wykorzystuje się obserwację. Jednakże poza obserwacją bierną (charakterystyczną dla wspomnianej metody obserwacji) zawiera również obserwację czynną, a więc aktywny stosunek do poznawanej rzeczywistości. W eksperymencie celowo wprowadza się do procesu badawczego czynnik eksperymentalny, który jest zmienną niezależną. Zmiany, które zachodzą pod wpływem wprowadzonego czynnika eksperymentalnego, stanowią zmienne zależne [Apanowicz 2002].

Pewnym rodzajem eksperymentu w nauce jest symulacja. Najogólniej polega ona na opracowaniu modelu odzwierciedlającego pewne zjawisko i przeprowadzaniu eksperymentów, „manipulując” zmienną niezależną.

Słowo „symulacja” pochodzi od łacińskiego słowa *similis*, które oznacza podobny. W praktyce symulacja oznacza przybliżone, sztuczne odtwarzanie zjawiska lub zachowania danego obiektu lub zjawiska za pomocą jego modelu [Słownik 2013].

Symulację uznaje się za specyficzną metodę badawczą. Umiejscawia się ją często między badaniem obiektów fizycznie istniejących (eksperymentowanie z systemami rzeczywistymi) i badaniem analitycznym (budowanie modeli matematycznych, formalnych). Stosuje się ją dla osiągnięcia wielu celów i na rzecz różnych odbiorców, używając zróżnicowanych technik i metodyk modelowania. Symulację cechuje więc dość duża niejednorodność, która jest szczególnie widoczna wśród modeli systemów społeczno-gospodarczych [Balcerak i Kwaśnicki 2005].

Najogólniej cele symulacji można podzielić na trzy kategorie: cele progностyczne, identyfikacyjne i racjonalizacyjne. W celu prognostycznym wyznacza się ilościowe i/lub jakościowe cechy funkcjonowania badanego systemu

w określonych warunkach. Cel identyfikacyjny polega na przygotowaniu ilościowych i/lub jakościowych opisów zasad funkcjonowania badanego systemu. Natomiast cel racjonalizacyjny wiąże się z określeniem warunków funkcjonowania badanego systemu, gdzie ilościowe i/lub jakościowe cechy systemu spełniają określone kryteria racjonalności [Stańczyk-Hugiet 2013].

Symulacje w nauce zaczęto stosować już w latach 40. XX wieku. Początkowo służyły do rozwiązywania modeli matematycznych. W tamtych czasach nie znano jeszcze maszyn cyfrowych, więc były one bardzo uproszczone. Wraz z dynamicznym rozwojem technologii informacyjnych badania symulacyjne były przeprowadzane coraz częściej z użyciem komputera. W ten sposób powstała nowa odmiana metody symulacji, zwana powszechnie symulacją komputerową. Najogólniej ujmując, symulacja komputerowa jest programem uruchomionym na jednym lub wielu komputerach jednocześnie, który umożliwia naśladowanie zachowań abstrakcyjnego modelu analizowanego systemu.

Każdy eksperyment, a w tym symulacja komputerowa, wymaga zastosowania odpowiedniej procedury przeprowadzenia badania naukowego. Składa się ona z następujących etapów [Stańczyk-Hugiet 2013]:

1. Identyfikacja problemu badawczego.
2. Sformułowanie hipotezy lub hipotez.
3. Opracowanie projektu badań (identyfikacja zmiennych, opracowanie harmonogramu badania, wybór narzędzia komputerowego do symulacji).
4. Budowa i weryfikacja modelu symulacyjnego.
5. Przeprowadzenie eksperymentu symulacyjnego.
6. Zebranie i kodowanie danych.
7. Analiza statystyczna.
8. Wnioski z przeprowadzonego badania.

Pierwsze i ostatnie trzy punkty powyższej procedury są charakterystyczne dla większości badań naukowych. Z perspektywy metody symulacji odmienne są budowa i weryfikacja modelu symulacyjnego oraz przeprowadzenie eksperymentu.

Współczesne oprogramowanie do przeprowadzenia eksperymentów symulacyjnych umożliwia budowanie skomplikowanych modeli. Symulacje komputerowe charakteryzują się znacznie większą elastycznością niż modele matematyczne, między innymi z powodu mniejszej liczby wymaganych założeń i ograniczeń przy tej samej użyteczności wyniku [Mitchell 2009]. Umożliwiają również odwzorowanie systemów uczących się, tj. pod wpływem wyników jednej iteracji eksperymentu parametry kolejnych mogą ulec zmianie.

W badaniach coraz częściej naukowcy decydują się na symulację jako jedną z metod badawczych ze względu na to, że [Balcerak i Kwaśnicki 2005]:

- Umożliwia efektywne badanie systemów, które nie istnieją.
- Jest tańszym rozwiązaniem niż eksperymentowanie z systemami rzeczywistymi.
- Prowadząc badania w zmienionej skali czasu i przestrzeni, możliwe jest uchwycenie oddziaływań i zachowań, które w rzeczywistej czasoprzestrzeni byłyby trudne do zauważenia i analizy.
- Daje możliwość kontrolowania wpływu czasu zarówno przez przyspieszenie, jak i spowolnienie, dopasowując go do oczekiwań i możliwości percepcyjnych badacza.
- Umożliwia powtarzalność przeprowadzania eksperymentów, czyli badanie wpływu zmian wartości parametrów modelu dla tej samej serii liczb losowych reprezentujących, np. proces stochastyczny obserwowany w rzeczywistości.

Warto jednak pamiętać, że za pomocą symulacji nie uzyska się informacji o tym, jak dokładnie zachowa się system w rzeczywistości. Można jedynie określić jego typowe zachowanie, czyli takie, które ma największą szansę zaistnienia [Mielczarek 2005]. Ponadto wnioski wyciągane z wyników przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych nie są przydatne, dopóki nie zostanie wcześniej zweryfikowana poprawność modelu. Wyróżnia się następujące techniki weryfikacji komputerowego modelu symulacyjnego [Ahrweiler, Pyka i Gilbert 2011]:

- Wyświetlanie powiadomień o ograniczeniach (*add assertions*) – jeśli niektóre zmienne mogą przyjąć wartości z określonego zakresu, podczas przeprowadzania symulacji zmienne te powinny być sprawdzane pod kątem możliwych wartości, w przypadku gdy dana zmienna przyjmie inną wartość niż dozwolona, powinien zostać wyświetlony komunikat ostrzegawczy.
- Testowanie wartości parametrów w ramach znanego scenariusza – jeśli istnieją scenariusze (rzeczywiste odwzorowania rzeczywistości), dla których znane są parametry zarówno wejścia, jak i wyjścia, model powinien zostać przetestowany z wykorzystaniem tych wartości, aby odtworzyć znaną sytuację, tj. przy danych parametrach wejścia badacz powinien uzyskać wyniki zbliżone do tych, którymi dysponował na początku eksperymentu.
- Przeprowadzenie testów na wartościach skrajnych (*corner testing*) – jest to technika często wykorzystywana w inżynierii polegająca na sprawdzeniu funkcjonowania danego urządzenia, aplikacji itp. pod wpływem skrajnych wartości wszystkich lub tylko niektórych parametrów. W ten sposób sprawdzane jest, czy zachowanie modelowanych systemów będzie realistyczne w momencie, gdy niektóre z parametrów zależnych przyjmą wartości skrajne.

- Obserwacja symulacji krok po kroku – podobnie jak w przypadku implementacji oprogramowania każda linia kodu i każda funkcja powinny być sprawdzane pod kątem zwracania spodziewanej wartości. Element ten ma na celu wychwycenie ewentualnych błędów, szczególnie błędów składni kodu.
- Korzystanie z testów jednostkowych (*unit testing*) – jest to kolejna technika stosowana w programowaniu polegająca na testowaniu pojedynczych elementów (jednostek) programu i sprawdzaniu ich wyników pod kątem poprawności ze względu na ich wartość. W przypadku języków zorientowanych obiektowo do każdej biblioteki programowej dołączana jest metoda pozwalająca na autonomiczne uruchomienie biblioteki i sprawdzenie poprawności wykonywanych w niej procedur.

2. Narzędzia do symulacji komputerowych

Wraz ze wzrostem zainteresowania symulacją komputerową jako metody badawczej zaczęły pojawiać się coraz to nowsze języki programowania i narzędzia umożliwiające przeprowadzanie eksperymentów symulacyjnych. Narzędzia te można podzielić na kilka grup, takich jak:

- symulacje z wykorzystaniem arkuszy kalkulacyjnych,
- dedykowane środowiska symulacyjne,
- rozwiązania w technologii wieloagentowej,
- języki programowania.

Wybór odpowiedniego narzędzia przed implementacją modelu symulacyjnego w środowisku komputerowym jest jednym z podstawowych elementów postępowania badawczego. W zależności od wymagań, środków materialnych i umiejętności modelującego powinny zostać wybrane takie narzędzia, które pozwolą na najskuteczniejsze rozwiązanie problemu.

2.1. Symulacje z wykorzystaniem arkuszy kalkulacyjnych

Najprostszą grupą narzędzi, zarówno pod względem obsługi, jak i oferowanych możliwości, są arkusze kalkulacyjne. Pojęcie arkusz kalkulacyjny rozumiane jest najczęściej jako oprogramowanie komputerowe umożliwiające sprawną obróbkę danych zorganizowanych w układzie tabelarycznym. W praktyce gospodarczej bardzo szybko dostrzeżono ich potencjał, czego następstwem jest powszechność stosowania oprogramowania tej klasy jako narzędzia pracy biurowej występującym praktycznie w każdym przedsiębiorstwie. Niezależnie

od platformy sprzętowej można znaleźć rozwiązania informatyczne oferujące podobną funkcjonalność. W dużym uproszczeniu można stwierdzić, że zbiór funkcjonalności arkuszy kalkulacyjnych najczęściej przypomina ten oferowany w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel, powszechnie stosowanym i znanym między innymi w biznesie, nauce, edukacji i administracji. Pomimo swojej popularności większość użytkowników arkuszy kalkulacyjnych zna jedynie podstawowe funkcje oprogramowania tej klasy, dlatego warto nadmienić, że dają one również możliwości prowadzenia prostych symulacji.

Ze względu na specyfikę symulacji często charakterystycznym ich elementem jest opieranie wyników na wygenerowanych pseudolosowych zbiorach liczb. W pakiecie Excel generuje się je, korzystając z odpowiedniej z funkcji. Ponadto istnieje możliwość korzystania z próbkowania za pomocą rozkładu normalnego, gamma itp. W programie tym można znaleźć narzędzia przeznaczone do symulowania zjawisk. Pozwalają one, przykładowo, na definiowanie i analizę wariantów, które mogą zajść w trakcie przeprowadzania eksperymentu symulacyjnego. Excel ma natomiast ograniczone możliwości wizualizacji uzyskanych danych. Praktycznie nie pozwala na ich animacje, ograniczając tym samym możliwość śledzenia parametrów ulegających zmianie w czasie.

Wymienione wcześniej możliwości, jakie oferują arkusze kalkulacyjne, w odniesieniu do symulacji są ograniczone i zazwyczaj nieodzowna jest przynajmniej podstawowa wiedza z zakresu programowania, aby z sukcesem zaimplementować model symulacyjny. Przy modelowaniu złożonych zjawisk najczęściej korzysta się z makr lub języka VBA (*visual basic for applications*) [Fertsch i Pawlewski 2009], jednak uruchomienie skomplikowanych obliczeń lub wielu wątków obliczeniowych jednocześnie powoduje widoczny spadek wydajności oprogramowania, co w przypadku skomplikowanych modeli znacznie utrudnia lub niekiedy wręcz uniemożliwia pracę. Z uwagi na poważne ograniczenia nie zaleca się stosowania narzędzi tego typu do symulowania systemów o skomplikowanej charakterystyce, które często występują w naukach o zarządzaniu

2.2. Dedykowane środowiska symulacyjne

Grupę programów komputerowych, zaprojektowanych z myślą o prowadzeniu w nich symulacji komputerowych, można określić mianem dedykowanych środowisk symulacyjnych. W chwili obecnej dostępny jest cały zbiór narzędzi, komercyjnych i bezpłatnych, które umożliwiają modelowanie i przeprowadzanie eksperymentów symulacyjnych. Różnią się one pod wieloma względami, między innymi wydajnością, elastycznością, możliwościami przetwarzania cią-

głego czy dyskretnego, jak również wyglądem i związanym z nim interfejsem użytkownika. W praktyce biznesowej najczęściej stosowane są komercyjnie dostępne pakiety symulacyjne, takie jak iGrafx i Flexsim.

Flexsim to narzędzie pozwalające na symulację systemów między innymi w obszarze produkcji, gospodarki materiałowej, pakowania, logistyki i transportu. Charakteryzuje się dużą elastycznością, dając użytkownikowi możliwość parametryzacji praktycznie każdego modelowanego obiektu. Wśród dostępnych parametrów są wszystkie potrzebne do rzeczywistego odwzorowania badanego systemu – począwszy od określenia czasów potrzebnych na wykonanie poszczególnych czynności, poprzez liczbę osób obsługujących dane stanowiska aż po odległości, które muszą zostać pokonane przez poszczególne elementy. Oprogramowanie ma również rozbudowane możliwości trójwymiarowej wizualizacji procesów. Można dzięki niej zaobserwować przepływ poszczególnych elementów przez system w postaci graficznej. Nie jest to jednak jedyna możliwa forma obserwacji wyników przeprowadzanych symulacji. W dowolnym momencie istnieje możliwość eksportu danych wyjściowych do plików, w formatach zgodnych z obowiązującymi standardami.

Innym narzędziem służącym do modelowania procesów ekonomicznych jest pakiet iGrafx, który składa się z szeregu modułów odpowiedzialnych za modelowanie procesów, prezentowanie danych uzyskanych z przeprowadzonej symulacji itp. Istnieją również dodatkowe moduły rozszerzające możliwości programu, umożliwiając, przykładowo, prowadzenie szczegółowej analizy pod kątem metod Six Sigma [Chaberek i Jezierski 2010]. W przeciwieństwie do Flexsim iGrafx nastawiony jest na modelowanie zgodne ze specyfikacją BPMN (*business process modeling notation*). Możliwości wizualizacji oprogramowania nie są aż tak rozbudowane jak we Flexsim, zachowana jest jednak bardzo duża elastyczność w modelowaniu.

2.3. Rozwiązania w technologii wieloagentowej

W teorii systemów komputerowych skomplikowane, rozproszone problemy decyzyjne często przetwarzane są w tzw. środowiskach wieloagentowych. Idea działania takich środowisk polega na współdziałaniu określonej liczby autonomicznych programów zwanych agentami, które podejmują próby osiągnięcia celów zdefiniowanych przez delegujące je podmioty (użytkowników lub inne programy). Koncepcja ta została również przełożona na programowalne środowisko symulacyjne, w którym każdy element systemu reprezentowany jest przez autonomicznego agenta, podejmując działania zgodnie z określonymi procedurami i wchodzącą w interakcję z otaczającymi go agentami. Na

rynku istnieje wiele rozwiązań stanowiących skuteczne środowiska do modelowania prostych i złożonych systemów. Wśród najważniejszych rozwiązań tego typu, cieszących się jednocześnie dużą popularnością, należą cztery narzędzia komputerowe: NetLogo, Repast, Swarm i GAMA.

NetLogo jest zintegrowanym środowiskiem symulacji, ale jednocześnie językiem programowania. Jest stosunkowo prostym językiem do nauczania, w szczególności przez „nieinformatyków”. Z jednej strony umożliwia pracę początkującym, ale z drugiej – może także sprostać potrzebom zaawansowanych użytkowników. Ponadto NetLogo ma wbudowaną obszerną bibliotekę ponad kilkudziesięciu modeli z różnych dziedzin, takich jak: ekonomia, biologia, fizyka, chemia, informatyka, matematyka, psychologia [Wilensky 1999].

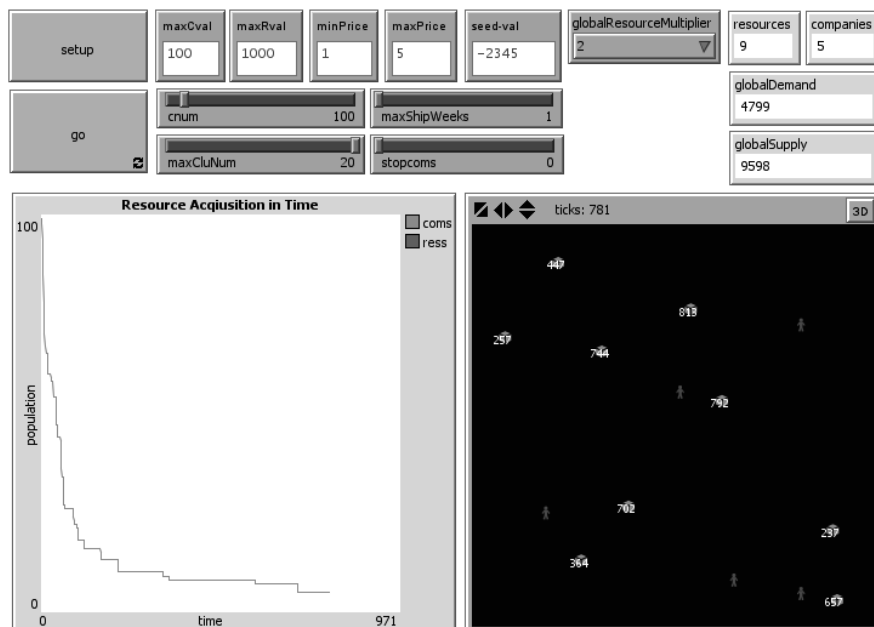
W NetLogo osoba modelująca może dać instrukcje wielu niezależnie działającym agentom, które mogą wzajemnie na siebie oddziaływać i wykonywać wieloaspektowe zadania. Dzięki temu możliwe jest zbadanie związku pomiędzy zachowaniem pojedynczych osobników i prawidłowościami wynikającymi z interakcji pomiędzy nimi. W NetLogo wyróżnia się trzy główne typy agentów:

- *Mobilne*. Poruszają się one w dwuwymiarowym środowisku mającym kształt szachownicy. W ramach tego typu agentów można tworzyć nieograniczoną liczbę podtypów (tzw. rasa – *breed*). Umożliwia to w pełni elastyczne projektowanie zachodzących w symulowanych modelach procesów (np. interakcje na giełdach elektronicznych, negocjacje, rozprzestrzenianie epidemii, korki uliczne itp.).
- *Stacjonarne*. Każde „pole” powyższej „szachownicy” jest również niezależnym, jednak w pełni stacjonarnym agentem. Interakcje tego typu agenta są ograniczone do najbliższych „sąsiadów” oraz mobilnych agentów, które obecnie przebywają na danym „polu”.
- *Wynikowe*. Nazywane są również „linkami” łączącymi agenty mobilne, które nawiązały określony typ relacji. Do zaistnienia tego typu agenta niezbędna jest obecność dwóch agentów mobilnych (niezależnie od ich rasy) oraz zajścia określonego na etapie projektowania symulacji zdarzenia (np. agent *x* buduje łańcuch dostaw z agentem *y*, a ta relacja jest zobrazowana za pomocą agenta *z*, który jest agentem wynikowym – „linkiem”).

Ważnymi elementami NetLogo są również dodatkowe narzędzia wspomagające realizację eksperymentu symulacyjnego. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- narzędzie do przeprowadzenia eksperymentu w partiach (*batch run*), które pozwala na zdefiniowanie zmienności parametrów modelu symulacyjnego, określenie liczby powtórzeń symulacji oraz eksportu wszystkich wyników do określonego pliku tekstowego;

- narzędzie do prostej wizualizacji wyników symulacji oraz graficzny interfejs ustalania warunków początkowych symulacji (rysunek);
- narzędzie łączenia NetLogo z zewnętrznymi aplikacjami do analizy, przetwarzania i wizualizacji danych (np. Mathematica, R, GIS).



Przykład interfejsu graficznego środowiska NetLogo

Kolejnym narzędziem opartym na technologii agentowej jest Repast. Cały pakiet składa się z dwóch wersji oprogramowania. Pierwsza z nich – Repast Symphony 2.0 to napisana w języku Java wersja oprogramowania bardziej przyjazna użytkownikowi, mająca jednak pewne ograniczenia wydajnościowe. W sposobie przeprowadzania symulacji bardzo przypomina wcześniej wspomniane NetLogo. Druga wersja natomiast – Repast HPC jest przeznaczona dla ekspertów gotowych poświęcić więcej czasu i mających znacznie większą wiedzę informatyczną. Myślą przewodnią tej wersji było umożliwienie przeprowadzania skomplikowanych obliczeniowo symulacji z wykorzystaniem klastrów i superkomputerów, pozwalających na równoległe przetwarzanie skomplikowanych modeli. Idea działania pakietu, niezależnie od wersji, jest bardzo zbliżona do NetLogo, polega na zdefiniowaniu środowiska, w którym agenty programowe wypełniają powierzone im zadania. Pakiet nie oferuje

tak mocno rozbudowanego interfejsu użytkownika, jak poprzednik, pozwala jednak na łatwy eksport uzyskanych danych do zewnętrznych formatów. Dzięki temu analizę i ewentualną wizualizację uzyskanych wyników można przeprowadzić w innym oprogramowaniu.

Oprogramowanie SWARM jest kolejnym z możliwych dostępnych pakietów symulacyjnych. Jest to oprogramowanie stosunkowo stare, opracowane przez instytut Santa Fe w połowie lat 90. ubiegłego wieku. W przeciwieństwie do wyżej wymienionych pakietów SWARM jest problematyczny w użyciu i stosunkowo trudny do nauczenia. Z tego też powodu ma znacznie mniejszą grupę zwolenników niż przedstawione wcześniej pakiety symulacyjne. Podstawową jednostką operacji w pakiecie jest rój (*swarm*) agentów programowych, który wykonuje sekwencyjnie powierzone zadania, zachowując przy tym hierarchiczną organizację. Oznacza to, że rój może składać się z mniejszych rojów itd. Taka organizacja logiki funkcjonowania pakietu symulacyjnego, choć zapewnia dużą swobodę, utrudnia niekiedy właściwe przełożenie rzeczywistości na model symulacyjny.

Ostatnim prezentowanym rodzajem oprogramowaniem jest GAMA – najmłodszy ze wspomnianych projekt środowiska symulacyjnego. Oprogramowanie rozwijane jest od 2007 roku przez grupę naukowców głównie z Francji i Wietnamu. Opiera się na powszechnie stosowanym w środowisku programistycznym Eclipse. Pakiet nie ma ani rozbudowanych możliwości wizualizacji otrzymanych danych, ani znanych z NetLogo możliwości graficznego interfejsu użytkownika. Wykorzystanie środowiska Eclipse jako bazy może potencjalnie oznaczać znaczne rozbudowanie funkcji pakietu w najbliższym czasie, dlatego rozsądnym wydaje się potraktowanie tego oprogramowania jako potencjalnie skutecznego narzędzia, z którego będzie można korzystać w przyszłości.

2.4. Języki programowania

Ostatnią grupą narzędzi, o których mowa w niniejszym rozdziale, są języki programowania. W szczególności uwagę poświęcono językom dedykowanym symulacjom. Są to języki opracowane w konkretnym celu, z tego powodu wiele z nich ma rozbudowane biblioteki programowe, pozwalające na korzystanie z istniejących typów funkcjonalności niezbędnych do budowania modeli symulacyjnych. Wśród nich można wyróżnić rozbudowane możliwości generowania liczb pseudolosowych, wizualizacji danych, ułatwień w eksporcie do formatów zewnętrznych itp. Większość z języków tego typu została zoptymalizowana pod kątem wykorzystania dostępnego sprzętu. Takie podejście pozwala na skoncentrowanie wysiłków na usprawnieniu ich

wydajności zamiast dopracowywaniu niuansów kompatybilności wszelkich dostępnych konfiguracji sprzętowych. Największą różnicą widoczną pomiędzy poszczególnymi językami symulacyjnymi jest wspieranie symulacji w czasie ciągłym i dyskretnym. Większość z nich umożliwia budowanie modeli zgodnie z jednym lub drugim kryterium czasu, jednak niektóre są w stanie zapewnić symulacje wykorzystujące oba kryteria jednocześnie. Do najbardziej znanych rozwiązań pozwalających na symulacje dyskretne należą:

- GPSS – jeden z pierwszych języków symulacyjnych charakteryzuje się dużą prostotą użycia, ale mniejszą elastycznością. Symulacja odbywa się w nim krokowo, przekazując zmiany stanów elementów symulacji do ich następców, przez co język ten jest często wykorzystywany do symulowania działań operacyjnych linii produkcyjnych.
- Simula – grupa dwóch języków programowania wykorzystujących paradygmat obiektowy, uważana za pierwszy obiektowy język programowania. Dzięki przejrzystej składni był przez wiele lat głównym językiem programowania symulacji.
- Simscript – jeden z najstarszych języków programowania i dzisiaj często używany, przykładowo, w symulacjach ruchu powietrznego na lotniskach. Pozwala na wydajne przeprowadzanie symulacji o dużej złożoności obliczeniowej.

Symulacje ciągle wymagają innego podejścia programistycznego. Można je prowadzić, wykorzystując jeden z poniższych języków:

- ACSL (*advanced continuous simulation language*) – język przeznaczony głównie do łatwej cyfrowej reprezentacji ciągłych modeli matematycznych. Wykonywanie programu zależne jest od hierarchii równań, nie od sekwencyjności kodu.
- DYNAMO – język opracowany z wykorzystaniem podejścia dynamiki systemów. Pierwotnie wykorzystany przez J.Z. Forreстера podczas badań nad efektem byczego bicia w latach 50. XX wieku.

Ponadto istnieje grupa języków symulacyjnych pozwalających na wybór lub łączenie opisanych kryteriów czasowych. Do rozwiązań hybrydowych, umożliwiających prowadzenie obu rodzajów symulacji należą między innymi:

- Symulink – narzędzie graficznego programowania dynamicznych systemów i symulacji ich zachowań. Podstawowym trybem pracy jest graficzny interfejs pozwalający na zbudowanie schematu działań, do którego w późniejszym czasie dopisywany jest szczegółowy kod programowy.
- EcosimPro – rozwiązanie dedykowane symulacjom złożonych procesów fizycznych, w których istotna jest możliwość działania w czasie ciągłym i dyskretnym.

3. Obszary zastosowań symulacji komputerowych w nauce i biznesie

Możliwości zastosowania symulacji komputerowych w usprawnianiu procesów biznesowych zauważono już w momencie początków popularyzacji komputerów. Zarówno praktycy biznesu, jak i naukowcy szybko zauważyli potencjał symulacji komputerowych, o czym świadczy między innymi duża liczba artykułów naukowych, w których zastosowano tę metodę badawczą. Modelowanie i symulacje wykorzystywane są w wielu aspektach działalności przedsiębiorstw. Główne obszary, w których wykorzystuje się symulacje, to między innymi decyzje inwestycyjne, produkcja wraz z logistyką i transportem, a także wszelkie systemy obsługi klienta [Greasley 2004], jak i szeroko rozumiane sieci międzyorganizacyjne.

Jednym z obszarów, w którym często wykorzystuje się symulacje komputerowe, są inwestycje firmy. Decyzje dotyczące ulokowania środków pieniężnych przedsiębiorstwa, w szczególności w środki trwałe, obarczone są niejednokrotnie wysokim ryzykiem. Wykorzystanie wariantowej analizy scenariuszy pozwala na lepsze dopasowanie wymogów przedsiębiorstwa do poszczególnych opcji zakupu [Greasley 1999]. Możliwości zastosowania symulacji w tym obszarze są bardzo duże, poczynając od prostych obliczeń w ramach analiz typu „co-jeśli” (*what-if analysis*), a skończywszy na skomplikowanych prognozach uwzględniających całe grupy parametrów i zdarzeń mało prawdopodobnych. Wyniki symulacji w tym przypadku pełnią rolę rozbudowanych analiz przedinwestycyjnych, w których możliwe jest porównywanie opłacalności poszczególnych wariantów zakupowych.

Optymalizacja procesów produkcyjnych jest podstawą funkcjonowania wielu przedsiębiorstw. Z uwagi na skomplikowaną naturę procesów produkcji, symulacje stały się powszechnie stosowanym narzędziem osiągania oczekiwanych rezultatów. Greasley [1999, 2004] przedstawił wiele studiów przypadków opisujących linie produkcyjne wdrażające różne warianty zarządzania przepływem produktów. W każdym z nich wykorzystano symulatory, pozwalające na sprawdzenie skuteczności danego rozwiązania, przed podjęciem rzeczywistych kroków wdrożenia danego wariantu. Wśród tych przypadków badano zarówno następstwa przebudowy linii produkcyjnych, jak i podejmowano decyzje o budowie nowej linii.

Symulacja jest obecnie używana również do analizy wielu procesów obsługi klienta [Banks 1998]. Ma to na celu zwiększenie poziomu obsługi klienta przy jednoczesnej redukcji kosztów. Greasley [2003] przedstawił studium

przypadku stosowania symulacji do analizy zaproponowanego systemu przepływu dokumentów (*workflow*) dla grupy agencji nieruchomości. Celem systemu miało być zmniejszenie liczby papierowych dokumentów w obiegu, symulacja natomiast pozwoliła na prognozowanie poziomu popytu, który dany system musiał obsłużyć, jak również umożliwiła identyfikację wąskich gardeł, co w efekcie końcowym przyczyniło się do zwiększenia poziomu obsługi klienta.

Również działania związane z reinżynierią procesów biznesowych BPR (*business process reengineering*) mogą być wspomagane symulacjami komputerowymi. BPR ma na celu poprawę funkcjonowania organizacji za pomocą analizy procesów i ich przeprojektowania w celu polepszenia wydajności. Symulacje są wykorzystane do analizy przebiegu zmian w procesach i ich wpływu na funkcjonowanie pozostałych elementów systemu. Greasley i Barlow [1998] przedstawili studium przypadku opisujące wykorzystanie symulacji podczas przemian BPR w jednym z brytyjskich aresztów. Celem przeprowadzanych symulacji była optymalizacja procesów, głównie administracyjnych. Po analizie część z nich zlikwidowano, uznając je za niepotrzebne, podczas gdy inne zostały przebudowane, w ostatecznym rozrachunku poprawiając wydajność placówki.

Kolejnym przykładem zastosowania symulacji komputerowych są sieci międzyorganizacyjne. Charakteryzują się one dużą skalą złożoności wynikającej z nieliniowych współzależności między ich elementami. Jednocześnie zachodzą w nich ciągle zmiany poszczególnych czynników – popytu, podaży, zmiany uczestników sieci, czynników zewnętrznych [Golińska i Kawa 2010; Czakon 2007; Niemczyk, Stańczyk-Hugiet i Jasiński 2012]. Ponadto podlegają one ciągłym zmianom w czasie. Te istotne właściwości systemu sprawiają, że niezwykle trudno jest modelować, analizować i przewidywać skutki zmian zarówno w ujęciu całej sieci, jak i poszczególnych jej elementów [Fuks i Kawa 2011]. Poziom skomplikowania oddziaływań w sieciach międzyorganizacyjnych wymaga złożonego postępowania w celu rozwiązywania problemów optymalizacyjnych zachodzących w nich procesów. Z tego powodu wykorzystanie elastycznych narzędzi wspomagających analizę procesów stało się nieodzowne. Symulacje komputerowe są jedną z alternatywnych opcji dających możliwość skutecznego badania zjawisk zachodzących w sieciach międzyorganizacyjnych. Pozwalają one testować wariantowe projekty sieci w celu upewnienia się, że będą one funkcjonować zgodnie z przewidywaniami w obliczu zmienności otoczenia i że będą spełniać wymagania prowadzonego biznesu.

4. Ograniczenia wykorzystania symulacji komputerowej w naukach o zarządzaniu

W przypadku analizowania zjawisk społeczno-gospodarczych, składających się na system ekonomiczny, głównym elementem jest człowiek. Jako twórca, inicjator, wykonawca i widz człowiek wpływa na kształt i efekt procesów przez swoje decyzje, bądź też ich brak. Z tego powodu analiza zachowań ludzkich jest ważnym elementem prowadzonych badań w naukach o zarządzaniu. Należy zwrócić uwagę na zakres i siłę wpływu człowieka na model symulacyjny oraz przebieg eksperymentu symulacyjnego.

Niestety, badania podstawowe dotyczące zachowań ludzkich nie dały odpowiedzi, jak zachowuje się człowiek. Koncepcja człowieka racjonalnego, ekonomicznego (*homo oeconomicus*) została obalona. Ludzie podejmują często decyzje dalekie od racjonalności czy rachunku ekonomicznego, kierując się trudno mierzalnymi czynnikami i przesłankami. Ta „nieobliczalność” zachowań ludzkich stanowi bardzo często podstawowy problem w modelowaniu symulacyjnym zjawisk i systemów społeczno-gospodarczych. Jednostka ludzka będąca składową modelowanego systemu może przejawiać ukryte zachowania oportunistyczne czy podejmować trudne do identyfikacji działania warunkowane, np. nepotyzmem. Symulacje komputerowe za pomocą modeli, w których człowiek stanowi podmiot badania, stanowi wielką trudność, a według autorów opracowania jest przy obecnym stanie wiedzy i możliwościach obliczeniowych niemożliwe. Z tego powodu badania z wykorzystaniem symulacji komputerowej w naukach o zarządzaniu, ale również w innych dyscyplinach naukowych, gdzie główną rolę mają zachowania ludzkie, wykorzystują modele o większym zakresie podmiotowym (podpunkt 4). Z jednej strony analizie poddaje się większe zbiorowości, które składają się na przedsiębiorstwo (czy ogólnie określoną organizację z perspektywy nauk o zarządzaniu), rynek, klaster, sieć czy gospodarkę, z drugiej natomiast – „symuluje” się procesy, przepływy, które traktują człowieka jako przedmiot badania, czynnik wpływający, ale nie kluczowy dla symulowanego komputerowo modelu. Oba ujęcia symulacji komputerowej w naukach o zarządzaniu wymagają odpowiednio szczegółowej obserwacji zjawiska (modelowanie systemów odzwierciedlających rzeczywistość) lub dokładnej analizy możliwych przypadków zachowania modelu (modelowanie systemów zakładających hipotetyczne zjawiska).

Ważnym ograniczeniem wykorzystania symulacji komputerowej w naukach o zarządzaniu jest pozyskanie odpowiednich danych wejściowych dla

modelowania symulacyjnego. Bardzo trudne jest zbieranie danych, gdzie niezbędna jest obserwacja zachowań pojedynczego człowieka, a w szczególności tych ukrytych, niejawnych. Z tego powodu bardzo często badacze muszą stosować uogólnienia i uproszczenia opisywanych w modelu zjawisk. To, niestety, przekłada się na spadek precyzji badania i może prowadzić do niewłaściwych wniosków, przy źle dobranym podmiocie i przedmiocie badania.

Pomimo licznych narzędzi informatycznych wspomagających symulację komputerową dla prawidłowego przeprowadzenia procesu badawczego ważne są umiejętności programistyczne czy podstawy algorytmiki. Bez tej wiedzy zespół badawczy nie będzie w stanie przygotować modelu i poprawnie przeprowadzić eksperyment symulacyjny złożonych zjawisk. Wynika to przede wszystkim z faktu, że nieumiejętne przygotowanie modelu symulacyjnego może wpływać negatywnie na wiarygodność wyników badania. Im bardziej złożone jest zjawisko poddawane symulacji komputerowej, tym większa liczba parametrów, które należy brać pod uwagę. Niedoświadczony lub nieposiadający odpowiedniej wiedzy badacz może przykładowo pominąć niewielkie odchylenia zmiennych, które w dłuższym horyzoncie czasu (duża liczba iteracji eksperymentu) zmodyfikują znacznie mierzony wskaźnik.

Kolejnym ważnym ograniczaniem wynikającym z braku wiedzy informatycznej jest brak technicznej możliwości realnego przeprowadzenia eksperymentu symulacyjnego. Z jednej strony oznacza to, że pomimo poprawnego modelu badacz nie potrafi odpowiednio przygotować eksperymentu w narzędziu informatycznym wspomagającym symulację komputerową. Odwzorowanie niektórych niestandardowych, unikatowych procesów, zachowań czy zjawisk wymaga dedykowanego oprogramowania algorytmu symulacji, a to często wykracza poza umiejętności badaczy reprezentujących nauki o zarządzaniu. Nawet podstawowa czy średnio zaawansowana wiedza z zakresu informatyki przy odpowiednio skomplikowanych modelach może skutkować niewydajnym algorytmem i wydłużonym czasem eksperymentu, nawet o kilka rzędów wielkości. Z drugiej strony brak wiedzy informatycznej wiąże się często z niedoszacowaniem odpowiedniej mocy obliczeniowej niezbędnej do akceptowalnego czasu trwania eksperymentu. Nawet najlepiej zamodelowane, a następnie oprogramowane symulacje komputerowe w przypadku skomplikowanych strukturalnie bądź nieliniowych w zachowaniach systemów społeczno-ekonomicznych są w stanie wykorzystać moc obliczeniową nawet wielu komputerów. To przekłada się na wysoki koszt badania (konieczność wykupienia znacznych mocy obliczeniowych) lub bardzo długi czas jego realizacji w dostępnej infrastrukturze.

Warto zaznaczyć, że wspomniane ograniczenia wynikające z braku umiejętności technicznych są w badaniach z zakresu nauk o zarządzaniu eliminowane przez budowanie interdyscyplinarnych zespołów badawczych, gdzie następuje synergia kompetencji ekonomicznych i informatycznych w ramach współpracy przedstawicieli dwóch i więcej dyscyplin naukowych.

Zakończenie

Wraz z rozwojem technologii informacyjnych symulacje komputerowe mają coraz większe zastosowanie w nauce. Jednakże zakres wykorzystania symulacji zależy w głównej mierze od dyscypliny naukowej. Nadal wielu naukowców waha się użyć symulacji w szerokim zakresie. Tendencja ta jest odzwierciedlona w stosunkowo małej liczbie publikacji w międzynarodowych czasopismach o dużym uznaniu w takich dziedzinach, jak ekonomia lub socjologia [Lorscheid, Heine i Meyer 2011]. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest według wielu autorów [Lorscheid, Heine i Meyer 2011; Grimm 2006; Axelrod 1997] problem ze zrozumieniem specyfiki symulacji przez naukowców. Wielu z nich traktuje symulacje komputerowe jako „czarną skrzynkę”, którą zasila się danymi w celu uzyskania danych wyjściowych, które w późniejszym czasie można poddać analizie. W wyniku niezrozumienia idei symulacji wielu naukowców kwestionuje przydatność uzyskanych w ten sposób rezultatów badań, w najlepszym przypadku podchodząc do nich z dystansem. Taki stan rzeczy w dużej mierze wynika z faktu, że w publikacjach, których wyniki oparte są na modelowaniu symulacyjnym, rzadko przedstawia się całą metodykę przeprowadzonych badań. Istnieje zatem potrzeba propagowania tej metody badawczej, w szczególności przedstawiania jej przydatności w prowadzonych badaniach w obszarze nauk o zarządzaniu i korzyści z niej wynikających, takich jak: skrócenie czasu i kosztu badania, możliwość badania zjawisk hipotetycznych, identyfikacja niejawnych zachowań i procesów społeczno-ekonomicznych. Trzeba również pamiętać o ograniczeniach stosowania tej metody, takich jak: reprezentatywność modelu, która jest szczególnie trudna, bo człowiek jest składową badanego zjawiska i w związku z tym istotne znaczenie mają jego umiejętności informatyczne dla poprawności i efektywności eksperymentu symulacyjnego jako metody badawczej.

Bibliografia

- Ahrweiler, P., Pyka, A., Gilbert, N., 2011 *A New Model for University-industry Links in Knowledge-based Economies*, Journal of Product Innovation Management, vol. 28, no. 2.
- Apanowicz, J. 2002, *Metodologia ogólna*, Wydawnictwo Bernardinum, Gdynia.
- Axelrod, R., 1997, *Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences*, w: Conte, R., Hegselmann, R., Terna, P. (eds.), *Simulating Social Phenomena*, Springer, Berlin.
- Balcerak, A., Kwaśnicki, W., 2005, *Modelowanie symulacyjne systemów społeczno-gospodarczych – różnorodność podejść i problemów*, w: Balcerak, A., Kwaśnicki, W. (red.), *Symulacja systemów społeczno-gospodarczych*, Prace Naukowe IOiZ Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Banks, J., 1998, *Handbook of Simulation. Principles, Methodology, Advances, Applications, Practice*, John Wiley & Sons, New York.
- Chaberek, M., Jezierski, A., 2010 *Informatyczne narzędzia procesów logistycznych*, Wydawnictwo CeDeWu, Warszawa.
- Czakon, W., 2007, *Dynamika więzi międzyorganizacyjnych przedsiębiorstwa*, Prace Naukowe, Akademia Ekonomiczna w Katowicach, Katowice.
- Fertsch, M., Pawlewski, P., 2009, *Comparison of process simulation software technics*, w: Fertsch, M., Grzybowska, K., Stachowiak, A. (eds.), *Modelling of Modern Enterprises Logistics*, Publishing House of Poznań University of Technology, Poznań.
- Fuks, K., Kawa, A. 2011, *Virtual Organization Networking Strategies – Simulations Experiments*, w: O'Shea, J. i in. (eds.), *Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications*, Springer Berlin – Heidelberg, s. 602–609.
- Golińska, P., Kawa, A., 2010, *Supply Chain Arrangements in Recovery Network*, w: Jędrzejewicz, P. i in. (eds.), *Agent and Multi-Agent Systems. Technologies and Applications*, Springer Berlin – Heidelberg, s. 292–301.
- Greasley, A., 1999, *Simulation Management in Business*, Stanley Thornes, Publishers Ltd., Cheltenham.
- Greasley, A., 2003, *A Simulation of a Workflow Management System*, Work Study, Now International Journal of Productivity, 52(5), s. 256–261.
- Greasley, A., 2004, *Simulation Modelling for Business*, Asgate Publishing Company, Aldershot.
- Greasley, A., Barlow, S., 1998, *Using Simulation Modelling for BPR: Resource Allocation in a Police Custody Process*, International Journal of Operations & Production Management, 18(9/10), s. 978–988.
- Grimm, V., 2006, *A Standard Protocol for Describing Individual-based, Agent-based Models*, Ecological Modelling, International Journal on Ecological Modelling, Systems Ecology, 198(1), s. 115–126.
- Kawa, A., 2014, *Analiza sieciowa jako metoda badawcza w naukach o zarządzaniu*, Management Forum, nr 2, s. 40–49.

- Lorscheid, I., Heine, B.-O., Meyer, M., 2011, *Opening the Black Box of Simulations: Increased Transparency of Simulation Models, Effective Results Reports through the Systematic Design of Experiments*, Research Papers Series Hamburg University of Technology.
- Mielczarek, B., 2005, *Aspekty losowości w modelach symulacyjnych*, w: Balcerak, A., Kwaśnicki, W. (red.), *Symulacja systemów społeczno-gospodarczych*, Prace Naukowe IOiZ Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Mitchell, S., 2009 *Unsimple Truths: Science, Complexity, Policy*, University of Chicago Press, Chicago.
- Mruk, H., 2008, *Istota i klasyfikacja metod naukowych*, w: Sławińska, M., Witczak, H. (red.), *Podstawy metodologiczne prac doktorskich w naukach ekonomicznych*, PWE, Warszawa.
- Niemczyk, J., Stańczyk-Hugiet, E., Jasiński, B. (red.), 2012, *Sieci międzyorganizacyjne. Współczesne wyzwania dla teorii i praktyki zarządzania*, Wydawnictwo C.h. Beck, Warszawa.
- Słownik języka polskiego, 2013, Wydawnictwo Naukowe PWN, <http://sjp.pwn.pl> [dostęp: 10.02.2015].
- Stańczyk-Hugiet, E., 2013, *Metody eksperymentalne i symulacyjne w badaniach ekonomicznych*, w: Czakon, W. (red.), *Podstawy metodologii badań w naukach o zarządzaniu*, Wolters Kluwer, Warszawa.
- Wilensky, U., 1999, NetLogo itself, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> [dostęp: 10.02.2015].