



4. Modelowanie symulacyjne i analiza



Poprzez modelowanie i analizę symulacyjną (SMA) dąży się do spełnienia wymagań twierdzenia Conanta-Ashby'ego (Conant i Ashby, 1970), definiując model systemu jako dobry regulator, posiadający tyle samo uchwytów, części i stanów, co jego oryginalny fizyczny odpowiednik; zapewniając w ten sposób możliwość zbudowania jego cyfrowego modelu i stworzenia cyfrowego laboratorium, które umożliwi jego eksplorację, adaptację i optymalizację. Wynikowe modele symulacyjne są abstrakcyjne, dynamiczne i w większości przypadków stochastyczne, ponieważ ich zmienne systemowe są modelowane przez rozkłady prawdopodobieństwa.

4.1 Symulacja w logistyce

W logistyce SMA może dostarczyć cennych danych wejściowych do optymalizacji łańcucha dostaw (SC) i sieci ruchu (TN). Modelowanie symulacyjne może być wykorzystywane do graficznej wizualizacji czasowych przepływów przez złożone procesy i zasoby SC i TN, umożliwiając przewidywanie i kwantyfikację możliwych wyników różnych scenariuszy. Pomaga to podmiotom SC i TN uzyskać cenny wgląd i zrozumieć wpływ ich potencjalnych decyzji na wydajność SC i TN, w tym czasy realizacji SC, czasy podróży TN i koszty. W związku z tym SMA w modelowaniu SC i TN może przyczynić się do analizy SC i TN oraz do ulepszenia ich projektów w celu osiągnięcia wyższej wydajności i zrównoważonego rozwoju.

Istnieje wiele aspektów SC, reprezentujących różne perspektywy zarządzania SC. Spojrzenie kierownika produkcji na SC różni się od spojrzenia kierownika ds. marketingu, które z kolei różni się od spojrzenia kierownika ds. zaopatrzenia itd. Dlatego też stosowane modele są różne, nawet dla tej samej firmy, nie mówiąc już o całym SC.

Podczas rozwiązywania problemów SMA w logistyce, menedżerowie muszą podejmować decyzje na poziomie strategicznym, taktycznym i operacyjnym, w zależności od ich wpływu na SC lub TN jako całość. Ze względu na ich współzależności, menedżerowie często nie są w stanie rozwiązywać problemów na pojedynczym poziomie. Jednocześnie trudno jest



obserwować wszystkie trzy poziomy z perspektywy pojedynczego podmiotu. Z perspektywy SMA można obserwować SC lub TN na dwóch poziomach:

1. Poziom makro:

- samoorganizacja,
- współewolucja podmiotów,
- zależność od połączeń/tras transportowych.

2. Poziom mikro:

- liczne i niejednorodne podmioty,
- lokalne interakcje między podmiotami,
- podmioty strukturyzowane,
- podmioty adaptacyjne.

Chociaż są one wykonywane w czasie rzeczywistym, czasowy aspekt operacji SC jest nieco niejednoznaczny. W zależności od poziomu i perspektywy, czas trwania operacji może być mierzony w dniach, tygodniach lub nawet miesiącach w przypadku działań międzyorganizacyjnych, podczas gdy operacje wewnątrzorganizacyjne są mierzone w godzinach lub nawet sekundach. W zależności od charakteru modelowanego problemu, czas trwania najkrótszej operacji lub maksymalna częstotliwość przychodzących/wychodzących żądań determinuje nie tylko reprezentację czasu w modelu SMA, ale także jego ziarnistość. Im krótszy jest minimalny czas trwania najkrótszej operacji lub im wyższa jest najwyższa częstotliwość żądań, tym drobniejsza jest ziarnistość czasu lub innymi słowy precyzja utrzymywania czasu w modelu. Jest to ważne dla modelującego, ponieważ czas reakcji modelu nie może być krótszy niż wstępnie zdefiniowana ziarnistość czasu. W związku z tym należy z wyprzedzeniem oszacować czas trwania wszystkich operacji i czasy między kolejnymi sygnałami przychodzącymi/wychodzącymi, aby móc poprawnie określić jednostki czasu modelu systemu.

W modelu symulacyjnym czas może płynąć od transakcji do transakcji poprzez zdarzenia krytyczne lub w sposób ciągły. W tym drugim przypadku progresja czasu w modelu jest niezależna od częstotliwości operacji. W przypadku przepływu czasu wyzwalanego zdarzeniami krytycznymi, operacje są wywoływane zgodnie z czasem ich wystąpienia, czyli zdarzeniami krytycznymi. Zaletą SMA jest to, że podczas symulacji można przyspieszyć postęp czasu w modelu, dzięki czemu procesy działają szybciej niż w czasie rzeczywistym. W ten sposób można wcześniej przewidzieć następujące zdarzenia.



4.2 Symulacja zdarzeń dyskretnych



Analiza DES oferuje kierownikowi produkcji najbardziej szczegółowy wgląd w proces logistyczny (produkcyjny) dzięki spójnemu i konsekwentnemu modelowi. Dlatego DES jest wysoko cenionym narzędziem do określania zachowania w czasie rzeczywistym i wykorzystania zasobów w przemyśle przetwórczym, w tym w logistyce.

Konstrukcja:

- Jednostki przepływu reprezentują jednostki symulacji (np. zamówienia, materiały itp.), które wchodzą do systemu na wejściu (wejściach) i przechodzą przez model systemu.
- Procesory reprezentują mobilne (np. ludzie, wózki widłowe itp.) i stałe (np. maszyny, linie produkcyjne itp.) zasoby, które przetwarzają jednostki symulacji.
- Kolejki przechowują jednostki przepływu do momentu ich przejścia do następnego dostępnego procesora.
- Łączniki definiują promocię jednostek poprzez model systemu.

Właściwości:

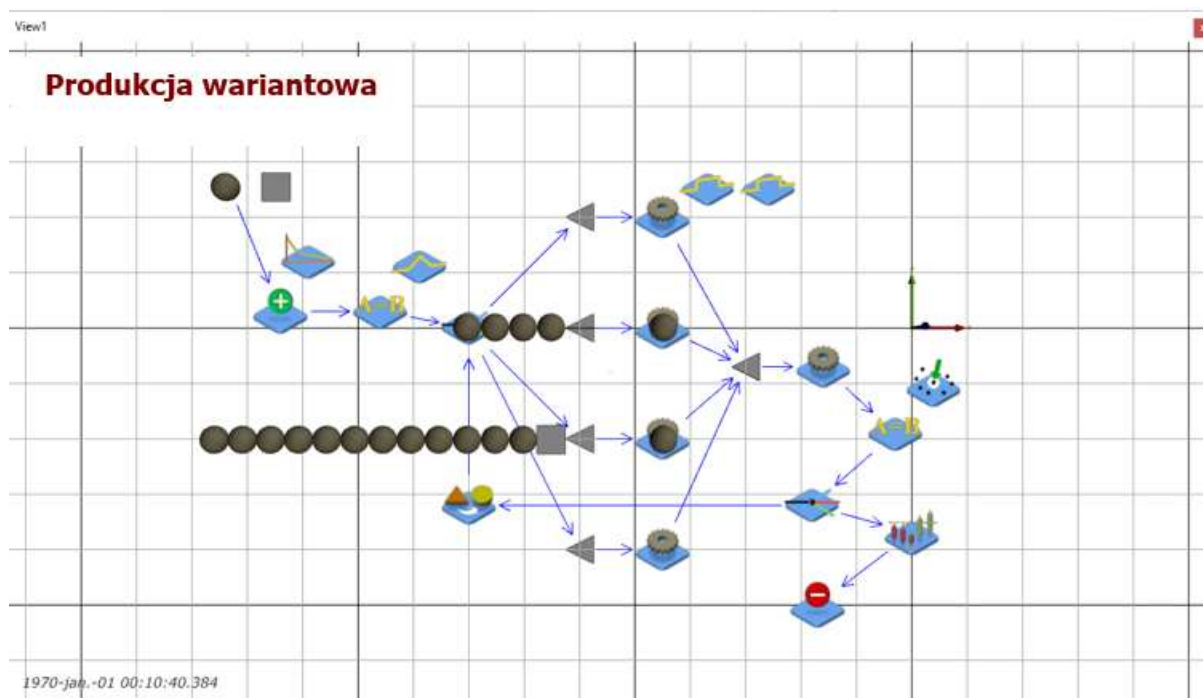
- zorientowanie na proces,
- koncentruje się na szczegółowym modelowaniu procesów,
- niejednorodne podmioty,
- mikropodmioty są obiektami pasywnymi,
- zdarzenia wprowadzają dynamikę do systemu,
- dyskretna progresja czasowa; od jednego (czasowego) zdarzenia do następnego,
- elastyczność osiąga się poprzez zmianę struktury modelu; struktura systemu podczas symulacji jest stała.

Przykład

Przykład DES (rysunek 4.1, zaczerpnięty ze środowiska symulacyjnego JaamSim (JaamSim Development Team, 2023)) obejmuje model produkcji wariantowej, w którym wytwarzane są cztery różne produkty (Gumzej i Rakovska, 2020). Zgodnie z planem produkcji produkowanych jest odpowiednio około 10, 30, 40 i 20% typów produktów 1, 2, 3 i 4. Wybór typu produktu jest indukowany przez trójkątny rozkład między 1 a 4 z modulo na 3. Każdy typ produktu ma dedykowaną linię produkcyjną. Zlecenia produkcyjne są realizowane zgodnie z rozkładem



wykładniczym wokół średniej wartości czasu 30 s. Produkcja każdego pojedynczego produktu trwa 100-120 s zgodnie z rozkładem jednostajnym dyskretnym. Po zakończeniu produkcji produkty są sprawdzane pod kątem jakości w dedykowanym miejscu testowym. Kontrola jakości trwa 10 s. Z doświadczenia firmy wynika, że średnio 1 na 10 produktów nie przechodzi kontroli. Produkty o niewystarczającej jakości są transportowane z powrotem na oryginalną linię produkcyjną. Ich ponowne przetworzenie zajmuje 120-130 s, zgodnie z jednostajnym dyskretnym rozkładem. Czas trwania produkcji, kontroli jakości i ponownego przetwarzania nie zależy od rodzaju produktu. Po pomyślnym przejściu kontroli jakości gotowe produkty są transportowane z zakładu produkcyjnego do magazynu produktów gotowych. Ponowne wytwarzanie wadliwych produktów jeszcze w trakcie produkcji jest skutecznym sposobem na zmniejszenie zarówno wpływu na środowisko, jak i kosztów produkcji.



Rysunek 4.1 Produkcja wariantowa z kontrolą jakości

Podsumowanie

Następujące parametry procesu mogą być analizowane i optymalizowane przez DES:

- czas cyklu produkcji i wydajność,
- wykorzystanie komórek i przestrzeni produkcyjnych,



- pojemność przestrzeni magazynowej oraz czas przebywania w niej jednostki magazynowej,
- wykorzystanie zasobów mobilnych (np. operatorów, przenośników, wózków widłowych).

Analiza DES oferuje kierownikowi produkcji najbardziej szczegółowy wgląd w proces logistyczny (produkcyjny) dzięki spójnemu i konsekwentnemu modelowi. Jego czas jest zgodny ze światem rzeczywistym. Dlatego DES jest wysoko cenionym narzędziem do określania zachowania w czasie rzeczywistym i wykorzystania zasobów w przemyśle procesowym, w tym w logistyce.

4.3 Dynamika systemu



Analiza SD reprezentuje spojrzenie menedżera SC na proces produkcyjny za pomocą spójnego i konsekwentnego modelu. SD jest uważana za narzędzie najlepiej nadające się do określenia struktury, a także optymalnych ilości (kiedy i ile poszczególnych wejść, zapasów i wyjść). Dlatego też pozwala na efektywne wykorzystanie obiektów produkcyjnych i magazynowych.

Konstrukcja:

- Zapasy reprezentują bufor, które mogą przechowywać elementy dostawy w łańcuchu dostaw.
- Przepływy reprezentują kanały dostaw.
- Pętle sprzężenia zwrotnego reprezentują parametry dostrajania uzupełniania zapasów.

Właściwości:

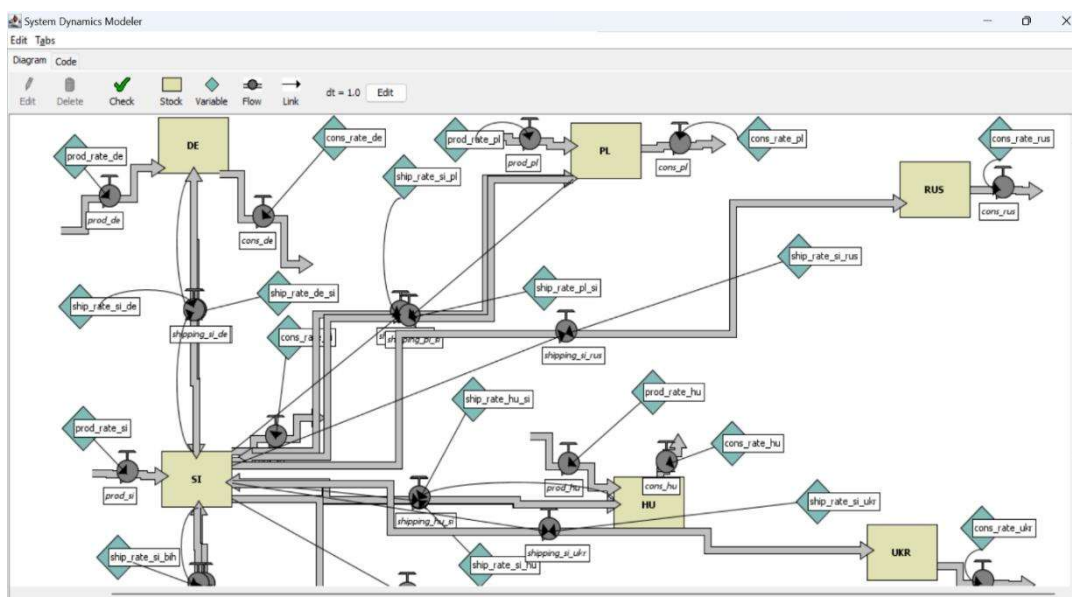
- zorientowanie na system,
- zorientowane na kluczowe wskaźniki wydajności modelowanie zmiennych systemowych,
- jednostki jednorodne,
- podmioty na poziomie mikro są pomijane,
- dynamika jest wprowadzana przez sprzężenie zwrotne,
- ciągła progresja czasowa; czas postępuje synchronicznie dla wszystkich komponentów modelu systemu,



- elastyczność jest osiągana poprzez zmianę struktury modelu
- struktura systemu podczas symulacji jest stała.

Przykład

Przykład SD (rysunek 4.2, wyodrębniony ze środowiska symulacyjnego NetLogo (Wilensky, 1999) obejmuje SC firmy produkującej sprzęt AGD i opisuje przepływy materiałów między jej spółkami zależnymi (Gumzej i Rakovska, 2020). Firma posiada wiele zakładów produkcyjnych: główny zakład w Słowenii (SI), a także firmy partnerskie w Niemczech (DE), Polsce (PL), na Węgrzech (H) i w Bośni i Hercegowinie (BIH). Oprócz zakładów produkcyjnych, zakłady sprzedaży brutto znajdują się w Rosji (RUS), na Ukrainie (UKR) i w Rumunii (RU). Zakłady produkcyjne zaopatrują własne rynki w gotowe produkty, a siebie nawzajem w komponenty produktów.

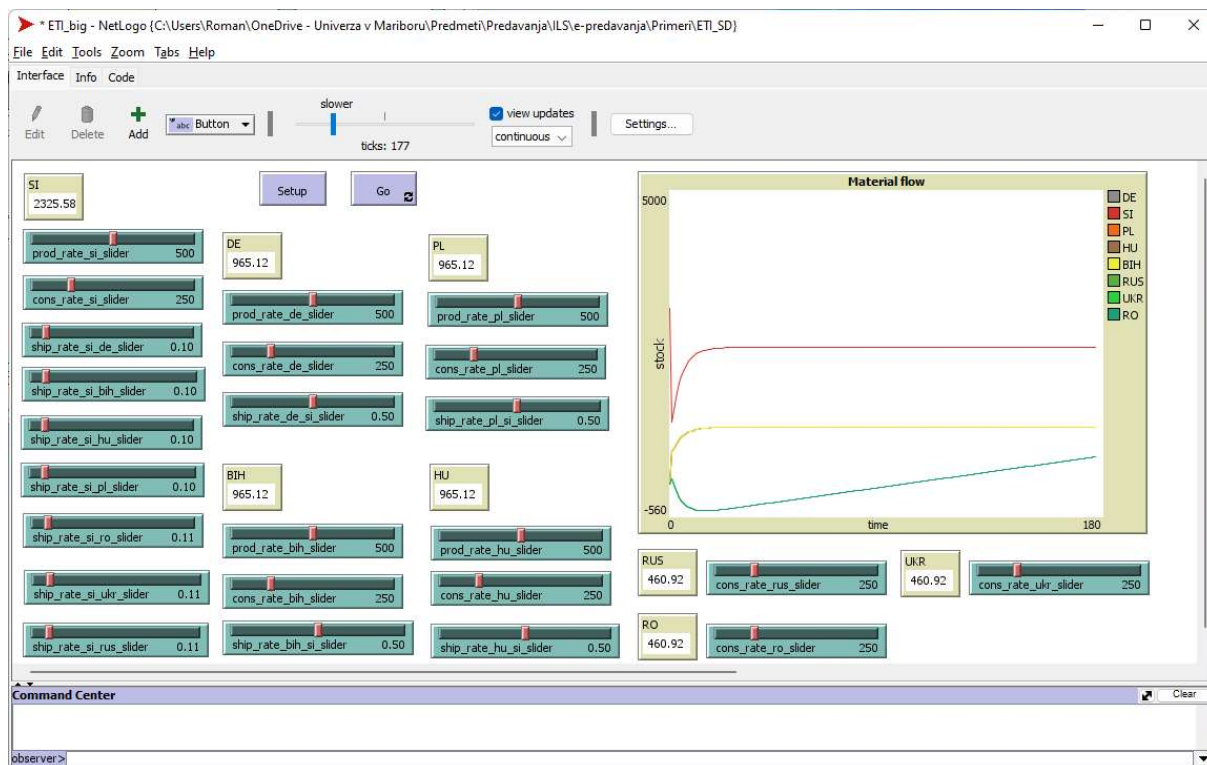


Rysunek 4.2 Układ SC

Powiązany pulpit nawigacyjny NetLogo (rysunek 4.3) służy jako narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji (DST) w celu powiązania wielkości produkcji i zapasów z predyspozycjami i ich fizyczną dystrybucją. Przepływ czasu jest ciągły w transakcjach każdego dnia, tj. każdego dnia pewna liczba komponentów jest wysyłana między zakładami produkcyjnymi, a pewna liczba gotowych produktów jest zużywana na miejscu lub wysyłana do miejsc dystrybucji. W oparciu o początkowy zapas 300 jednostek w lokalizacji SI i 0 zapasów w innych lokalizacjach oraz model dystrybucji, ilości zapasów w poszczególnych lokalizacjach



reprezentują średnie zapasy zgodnie z danymi wskaźnikami produkcji (szt.), zużycia (%) i wysyłki (%).



Rysunek 4.3 Pulpit nawigacyjny S.C

Podsumowanie

Symulacja dynamiki systemów pozwala na:

- planowanie układu S.C.,
- optymalizację zdolności produkcyjnych i dystrybucyjnych,
- oszacowanie obciążeń kanałów dystrybucji i powiązanych kosztów.

4.4 Symulacja agentowa

Analiza ABS oferuje strategiczne spojrzenie menedżera lub regulatora rynku na rynek. W związku z tym ABS jest uważany za narzędzie najlepiej nadające się do określenia optymalnej struktury i układu/asortymentu danego rynku i/lub SC poprzez uwzględnienie ich globalnych cech (np. demografii, klimatu, PKB, jakości, świadomości itp.).



Konstrukcja:

Agenci reprezentujący węzły łańcucha dostaw (np. dostawców, sprzedawców detalicznych i inspektorów) wraz z ich właściwościami, relacjami i zachowaniem.

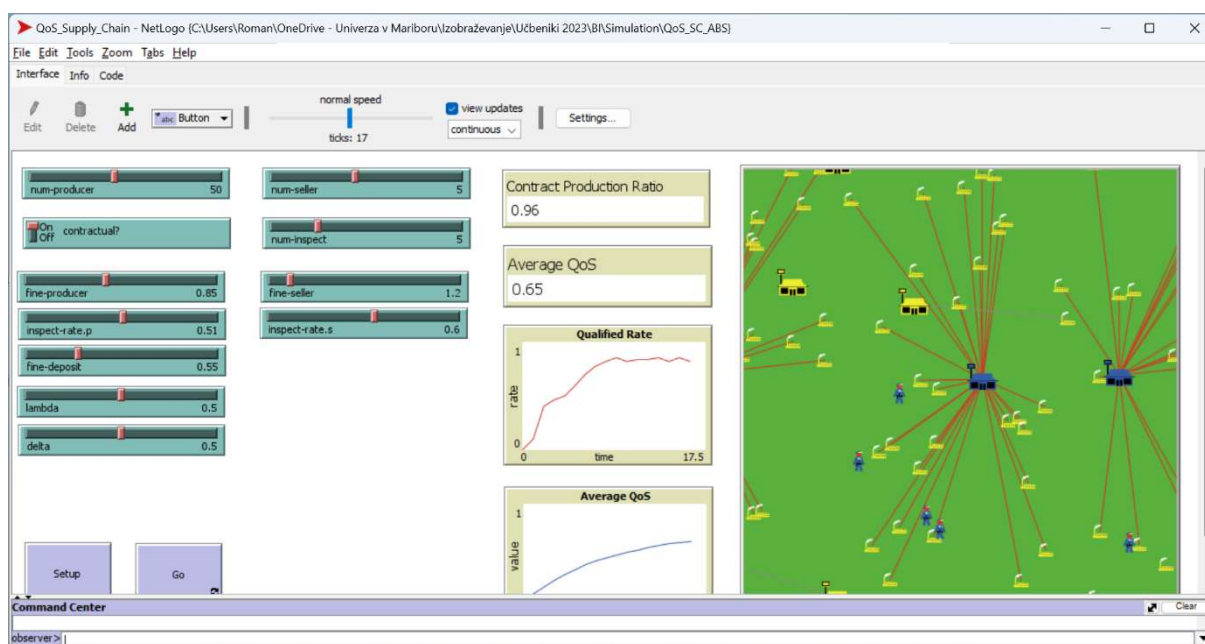
Właściwości:

- skoncentrowanie na jednostce,
- zorientowanie na problem modelowanie podmiotów i ich interakcji,
- niejednorodność podmiotów,
- mikropodmioty są aktywnymi obiektami, które działają w swoich środowiskach, komunikują się między sobą i autonomicznie podejmują decyzje,
- decyzje i interakcje między agentami wprowadzają dynamikę do systemów,
- agenci i ich środowiska stanowią modele formalne,
- przepływ czasu jest dyskretny i uniwersalny na poziomie modelu; czas modelu jest zgodny z częstotliwością transakcji SC i cyklami życia węzłów SC,
- elastyczność modelu jest osiągana dzięki zmieniającej się strukturze systemu i zachowaniu agentów,
- struktura systemu podczas symulacji jest zmienna.



Przykład

Przykład ABS (rysunek 4.4, wyodrębniony ze środowiska symulacyjnego NetLogo (Wilensky, 1999)) został wykorzystany do analizy zachowania szczebli SC na otwartym rynku (Gumzej i Rakowska, 2020), w odniesieniu do ich jakości usług (QoS). W tym przykładzie różne polityki dotyczące całkowitego zarządzania jakością firmy zostały zbadane przez model obejmujący jej dostawców, klientów i regulatorów rynku.



Rysunek 4.4 Regulacje dotyczące rynku

Podsumowanie

Symulacja agentowa pozwala na:

- planowanie układu S.C.,
- modelowanie dynamicznego wzrostu S.C.,
- modelowanie zachowań partnerów w ramach S.C.,
- optymalizację wskaźników globalnych.

4.5 Symulacja sieciowa



Analiza NS oferuje widok sieci z punktu widzenia regulatora sieci. W związku z tym NS jest uważana za narzędzie najlepiej nadające się do określenia optymalnej struktury, układu i asortymentu sieci, biorąc pod uwagę jej globalne cechy (np. przepustowość, emisje, wskaźniki QoS itp.)

Konstrukcja:

- Agenci reprezentujący obiekty przepływu wraz z ich właściwościami, relacjami i zachowaniem.
- Sieć reprezentująca sieć nakładkową (np. sieć ruchu), w której obiekty przepływu dojeżdżają.

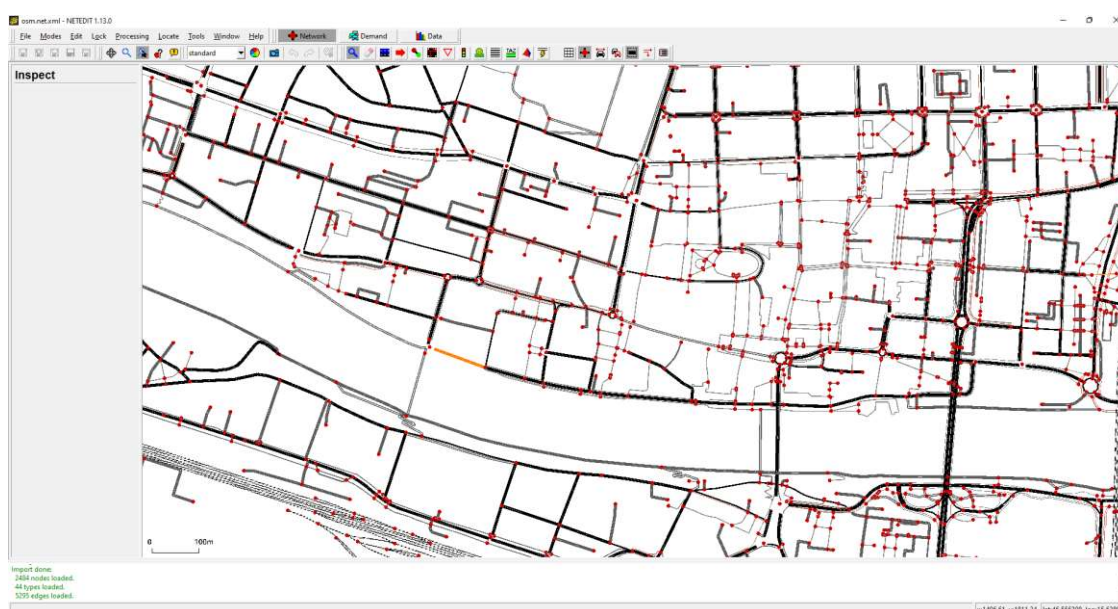


Właściwości:

- zorientowanie na system,
- zorientowanie na problem modelowanie podmiotów i ich interakcji,
- niejednorodność podmiotów,
- mikropodmioty są aktywnymi obiektami, które działają w swoich środowiskach, komunikują się między sobą i autonomicznie podejmują decyzje,
- decyzje i interakcje między agentami wprowadzają dynamikę do systemów,
- agenci i ich środowiska stanowią modele formalne,
- przepływ czasu jest dyskretny i uniwersalny na poziomie modelu; czas jest zgodny ze względnymi prędkościami obiektów przepływu,
- elastyczność modelu jest osiągana poprzez zmianę struktury sieci, która jest stała podczas symulacji, oraz zachowania agentów, które różnią się w zależności od stanu sieci (ruchu) i ich celów.

Przykład

Przedstawiony przykład (rysunek 4.5, wyodrębniony ze środowiska symulacyjnego SUMO (Pablo i in., 2018)) został wykorzystany do określenia przepływów ruchu i przepustowości ulic w centrum miasta dotkniętych planowaną blokadą dróg (Šinko i Gumzej, 2021). Ponadto zmierzono wskaźniki związane z ruchem, takie jak czas podróży, zużycie paliwa i emisje spalin.



Rysunek 4.5 Sytuacja na drogach i sieć



Podsumowanie

Symulacja sieci pozwala na:

- planowanie układu sieci,
- modelowanie dynamicznego zachowania sieci w celu określenia wąskich gardeł i słabych ogniw,
- modelowanie przepływu elementów sieci,
- optymalizację globalnych wskaźników sieciowych.

4.6 Projekty symulacji logistycznych

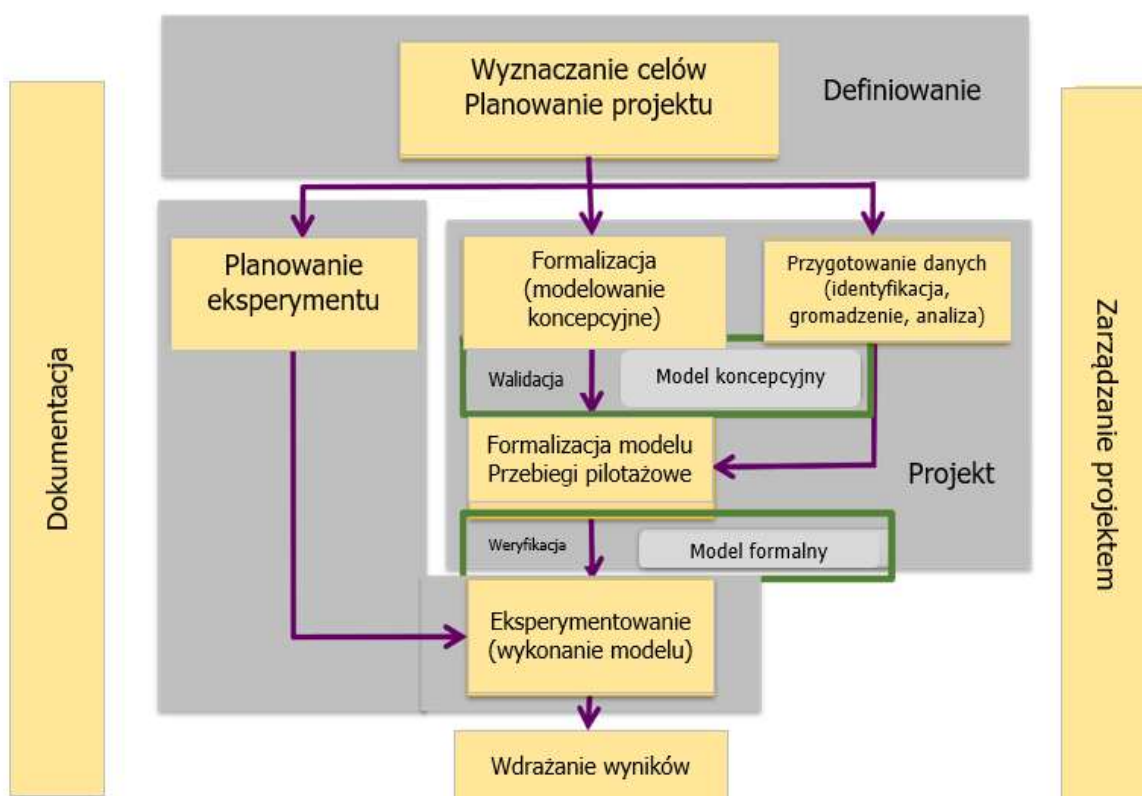


Projekty symulacji logistycznych są projektowane zgodnie z paradygmatem Projektowanie na potrzeby Six Sigma (DFSS) i opierają się na cyklu doskonalenia Deminga:

- Planowanie: definicja systemu i celów,
- Wykonanie: projekt modelu symulacyjnego,
- Analiza: eksperymentowanie z modelem symulacyjnym i ocena alternatywnych rozwiązań,
- Działanie: wykorzystanie wyników symulacji do wdrożenia ulepszeń.

Każdy projekt symulacji logistycznej (rysunek 4.6) składa się z siedmiu faz:

1. Plan strategiczny: analiza istniejących i proponowanych zasobów i procesów.
2. Model koncepcyjny: abstrakcyjny model systemu i definicja predyspozycji, gromadzenie danych.
3. Model logiczny: przepływ obiektów, pętla sprzężenia zwrotnego lub diagram sieciowy modelu systemu
4. Model symulacyjny: opracowanie odpowiedniego modelu symulacyjnego.
5. Weryfikacja i walidacja modelu symulacyjnego: sprawdzenie zgodności i spójności modelu.
6. Analiza oparta na modelu symulacyjnym: projektowanie i przeprowadzanie eksperymentów.
7. Wykorzystanie wyników symulacji do opracowania planu działania: projekcja ulepszeń procesu.



Rysunek 4.6 Proces modelowania i analizy symulacyjnej (SMA)

4.7 Wnioski

W logistyce SMA jest ważnym elementem badań operacyjnych (OR), umożliwiającym optymalizację procesów.

Dynamika systemowa (SD) to metodologia analizy złożonych, dynamicznych i nieliniowych interakcji w systemach, w wyniku której powstają nowe struktury i polityki mające na celu poprawę zachowania systemu. W tym przypadku przepływy fizyczne i informacyjne są uwzględniane w celu zmniejszenia ich opóźnień i ostatecznie inwentaryzacji SC.

Inną popularną metodologią zorientowaną na proces jest symulacja zdarzeń dyskretnych (DES). Jest to jedno z najczęściej stosowanych i najbardziej elastycznych narzędzi analitycznych w SMA systemów produkcyjnych. Z powodzeniem radzi sobie z niepewnością i zapewnia możliwości porównania alternatywnych sposobów skrócenia czasu realizacji, a także optymalizacji wykorzystania maszyn i zasobów.



Metodologią pomocną w zrozumieniu zachowań organizacji i ich interakcji (np. SC i ich podmiotów) jest symulacja agentowa (ABS). Symulacja sieci (NS), będąca specjalnym rodzajem ABS, pozwala na modelowanie i optymalizację sieci nakładkowych (ruchu).

Prowadzi to do wniosku, że holistyczne podejście do stosowania SMA w logistyce w znacznym stopniu przyczynia się do podejmowania złożonych decyzji dotyczących projektowania procesów, w których występuje wiele zmiennych wchodzących ze sobą w interakcje. Przydatne zintegrowane podejście, obejmujące metodologie SD, DES i ABS, które może kwantyfikować przepływy pracy na różnych poziomach łańcucha dostaw, zostało przedstawione w (Gumzej & Rakovska, 2020). W analizie i optymalizacji przepływu ruchu metodologia NS zapewnia niezbędne ramy w zakresie monitorowania i dostrajania kluczowych wskaźników wydajności (Šinko i Gumzej, 2021).

BIBLIOGRAFIA DO ROZDZIAŁU 4.

- Conant R.C. and Ashby W.R. (1970). Every good regulator of a system must be a model of that system, *Int. J. Systems Sci.*, 1(2), pp. 89-97.
- Gumzej, R. and Rakovska, M. (2020). Simulation modeling and analysis for sustainable supply chains. In *Ecoproduction – Sustainable logistics and production in industry 4.0 : new opportunities and challenges*, Grzybowska, K., Awasthi, A., Sawhney, R. (ed.). Springer Nature, pp. 145-160.
- JaamSim Development Team (2023). JaamSim: Discrete-Event Simulation Software. Version 2023-08. [Available at: <https://jaamsim.com>, dostęp November 8th, 2023]
- Šinko, S. and Gumzej, R. (2021). Towards smart traffic planning by traffic simulation on microscopic level. *International journal of applied logistics*, 11(1), pp. 1-17.
- Wilensky, U. (1999). NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. [Dostępne: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, access November 8th, 2023]
- Pablo A.L., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.-P., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P. and Wießner, E. (2018). Microscopic Traffic Simulation using SUMO. In: 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), IEEE. The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, 4.-7. Nov. 2018, Maui, USA, pp. 2575-2582.