

Wydział Informatyki i Zarządzania
Politechniki Wrocławskiej

**Symulacyjne modele
komputerowe
w zarządzaniu systemami
ratownictwa medycznego**

(rozprawa doktorska)

Bożena Mielczarek

(Promotor)

dr hab. inż. **Edward Radosiński,**
prof. nadzw. PWr

Wrocław 2000

SPIS TREŚCI

WSTĘP.....	5
1. ORGANIZACJA I ZADANIA SYSTEMU RATOWNICTWA MEDYCZNEGO.....	12
1.1. WPROWADZENIE.....	12
1.2. ORGANIZACJA SYSTEMU CYWILNEJ POMOCY DORAŻNEJ W POLSCE.....	16
1.3. SYSTEM RATOWNICTWA MEDYCZNEGO JAKO SYSTEM USŁUG PUBLICZNYCH.....	19
2. TEORETYCZNE PODSTAWY MODELOWANIA SYSTEMÓW RATOWNICTWA MEDYCZNEGO.....	21
2.1. PRZESŁANKI MODELOWANIA.....	21
2.2. PODSTAWOWY KONTEKST MODELOWANIA.....	22
2.3. CZASOWA STRUKTURA ZDARZEŃ.....	24
2.4. OCENA SKUTECZNOŚCI DZIAŁANIA	27
2.5. PROBLEMY DECYZYJNE.....	31
2.6. METODY BADAWCZE.....	37
3. MODELOWANIE SYMULACYJNE SYSTEMÓW RATOWNICTWA MEDYCZNEGO.....	44
3.1. SYMULACJA JAKO TECHNIKA ROZWIĄZYWANIA PROBLEMÓW – POJĘCIA.....	44
3.2. TECHNICZNE ASPEKTY MODELOWANIA SYMULACYJNEGO.....	47
3.3. ANALIZA PORÓWNAWCZA MODELI SYMULACYJNYCH SYSTEMÓW RATOWNICTWA MEDYCZNEGO.....	54
3.3.1. Krótki przegląd modeli.....	54
3.3.2. Systemy rzeczywiste.....	56
3.3.3. Problemy decyzyjne.....	58
3.3.4. Podstawowe założenia.....	59
3.3.5. Dane wejściowe.....	62
3.3.6. Metody oceny skuteczności działania systemów.....	63
3.3.7. Modele aspektów dynamicznych.....	63
3.3.8. Weryfikacja i walidacja modeli.....	67

4. METODYKA BUDOWY MODELU SYMULACYJNEGO SYSTEMU	
RATOWNICTWA MEDYCZNEGO	69
4.1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PROPONOWANEJ METODYKI.....	69
4.2. CHARAKTERYSTYKA BADANEGO SYSTEMU.....	73
4.3. OKREŚLENIE CELU BADAŃ	74
4.4. ZEBRANIE I ANALIZA DANYCH WEJŚCIOWYCH.....	75
4.4.1. Dane źródłowe.....	75
4.4.2. Analiza danych – wskazania lokalizacyjne.....	76
4.4.3. Analiza danych – określenie intensywności zgłoszeń	81
4.4.4. Analiza danych – pozostałe parametry.....	83
4.5. MODEL KONCEPTUALNY	89
4.5.1. Uwagi wstępne.....	89
4.5.2. Obiekty związane z elementem struktury „Jednostki Terytorialne”	90
4.5.3. Obiekty związane z elementem struktury „Jednostki Ratunkowe”	92
4.5.4. Obiekty związane z elementem struktury „Miejsca Leczenia Szpitalnego”	94
4.5.5. Opis zdarzeń.....	95
4.5.6. Opis procesów jednostkowych.....	97
4.6. MODEL FORMALNY.....	100
4.6.1. Konwencja opisu modelu.....	100
4.6.2. Model struktury.....	101
4.6.3. Model stanów.....	106
4.6.4. Model procesów.....	112
4.6.5. Generowanie zjawisk losowych.....	116
4.6.6. Model przemieszczania się karetek.....	118
4.6.7. Model intensywności napływania zgłoszeń	120
4.6.8. Sterowanie wpływem czasu.....	122
4.6.9. Formalizacja reguł werbalnych.....	124
4.6.10. Zmienne i parametry modelu.....	125
4.7. PROGRAM KOMPUTEROWY.....	126
4.7.1. Programowanie obiektowe – uwagi ogólne.....	126
4.7.2. Projekt systemu.....	126
4.7.3. Projekt obiektów.....	128

4.8. WERYFIKACJA I WALIDACJA MODELU	137
4.8.1. Weryfikacja i walidacja modeli symulacyjnych.....	137
4.8.2. Proponowany przebieg procesu WiW modelu symulacyjnego	140
4.8.3. Eliminacja wpływu warunków początkowych.....	141
4.8.4. Dobór liczby powtórzeń.....	144
4.8.5. Empiryczne testowanie założeń.....	145
4.8.6. Ocena poprawności danych wyjściowych.....	149
5. PROPONOWANE KIERUNKI ZASTOSOWAŃ MODELU SYMULACYJNEGO W ZARZĄDZANIU SYSTEMEM RATOWNICTWA MEDYCZNEGO.....	156
5.1. PRZESŁANKI STOSOWANIA SYMULACJI JAKO NARZĘDZIA WSPOMAGANIA DECYZJI.....	156
5.2. PROPONOWANE ZASTOSOWANIE MODELU SYMULACYJNEGO	158
5.3. DANE WYNIKOWE GENEROWANE PRZEZ MODEL RAMD.....	163
5.4. WYNIKI PRZYKŁADOWYCH EKSPERYMENTÓW SYMULACYJNYCH NA MODELU RAMD.....	166
PODSUMOWANIE	185
BIBLIOGRAFIA	187
ZAŁĄCZNIK 1 - ETAPY MODELOWANIA SYMULACYJNEGO	200
ZAŁĄCZNIK 2 - GENEROWANIE LICZB PSEUDOLOSOWYCH I ZMIENNYCH LOSOWYCH	208
ZAŁĄCZNIK 3 - PODSTAWY TEORETYCZNE ALGORYTMU SYMULACJI STOCHASTYCZNEJ WEDŁUG ROZKŁADÓW ZMIENNYCH LOSOWYCH ZE ZMIENNYMI PARAMETRAMI	215
SPIS TABEL	218
SPIS RYSUNKÓW	221

WSTĘP

Niniejsza praca zajmuje się zagadnieniem wykorzystania symulacji komputerowej w zarządzaniu systemami ochrony zdrowia. Celem rozprawy jest przygotowanie metodyki budowy symulacyjnych modeli komputerowych przeznaczonych do wspomagania procesów decyzyjnych w systemach ratownictwa medycznego z uwzględnieniem specyfiki polskich uwarunkowań, a następnie próba ich implementacji w wybranych obszarach sfery zarządzania tymi systemami. W szczególności, zadaniem badawczym było pokonanie niektórych trudności związanych z zastosowaniem stochastycznej symulacji komputerowej do modelowania systemów ratownictwa medycznego. Trudności te dotyczą przede wszystkim sformułowania wejściowych rozkładów losowych definiujących intensywność napływania zgłoszeń oraz sposobu przeprowadzenia procesu weryfikacji i walidacji modelu.

System ratownictwa medycznego¹ jest to skoordynowany i zorganizowany zespół ludzi i środków, których zadaniem jest niesienie pomocy i leczenie osób w sytuacjach nagłego zagrożenia życia lub zdrowia. Podmiotami tego systemu są zakłady opieki zdrowotnej oraz inne organizacje, które statutowo są zobowiązane do prowadzenia działań z zakresu ratownictwa medycznego. Niezależnie od przyjętych rozwiązań instytucjonalnych, na sprawność i powodzenie działań medycznych bezpośredni wpływ ma okres czasu jaki upływa od momentu zaistnienia urazu do momentu podjęcia interwencji lekarskiej.

Ograniczone środki finansowe większości systemów opieki zdrowotnej na świecie sprawiają, że istotnego znaczenia nabierają decyzje organizacyjne, które - w oparciu o dostępne informacje - pozwalają zaplanować niezbędne zasoby, określić struktury organizacyjne, ustalić procedury postępowania, ocenić jakość świadczonych usług, a także tak rozlokować dostępne zasoby, aby do minimum skrócić czas oczekiwania pacjenta na przyjazd zespołu.

Nie-kliniczne problemy decyzyjne występujące w systemach ratownictwa medycznego związane są przede wszystkim z optymalizacją strategii zarządzania zasobami w

¹ W literaturze przedmiotu pojawiają się również inne określenia utożsamiane z systemem ratownictwa medycznego, takie jak: *pomoc doraźna*, *pomoc medyczna w stanach nagłego zagrożenia życia* czy *pogotowie ratunkowe*. Znaczenie tych pojęć jest jednak węższe i odnosi się bądź do poszczególnych instytucji (np. pogotowie ratunkowe) bądź do określonych działań lekarskich (pomoc medyczna). W pracy stosowane będzie zamiennie określenie *system ratownictwa medycznego* lub *system medycznej pomocy doraźnej (mpd)*.

aspekcie alokacji przestrzennej i ilościowej jednostek mpd, z analizowaniem i przewidywaniem trendów zmian i skutków podjęcia określonych decyzji organizacyjnych, z analizą kosztową w odniesieniu zarówno do kosztów globalnych funkcjonowania systemu, jak i kosztów ponoszonych na obsługę poszczególnych kategorii zgłoszeń, oraz z zarządzaniem systemem mpd jako jednym z elementów złożonego systemu opieki zdrowotnej w danym regionie.

Od wielu lat we wspomaganiu zarządzania systemami usług publicznych, do których zaliczyć można systemy ratownictwa medycznego, wykorzystuje się metody badań operacyjnych (por. [1, 2, 9, 15, 20-22, 29, 30, 41-43, 56, 58, 61-64, 70-72, 74, 103-108, 138, 155, 156, 160, 169]). Przyczynia się do tego niewątpliwie złożoność problemów decyzyjnych występujących w tych systemach, wynikająca głównie z udziału czynników losowych i skomplikowanych, wzajemnych relacji pomiędzy poszczególnymi elementami. Obserwuje się jednocześnie dążenie decydentów do uzyskania narzędzi, które pozwoliłyby podejmować efektywne decyzje racjonalne ekonomicznie oraz pozwalające utrzymać pożądaną jakość świadczonych usług. W badaniach systemów usług publicznych powszechnie stosowane są takie techniki modelowania matematycznego jak programowanie matematyczne (por.[9, 15, 46-48, 96, 99, 169]), analiza sieciowa (por. [18, 23-27, 41-42, 127-128, 143-146, 160]), teoria masowej obsługi (por. [33-34, 61-64, 70-71, 103-108]), symulacja. Techniki te, poprzez analizę modelu matematycznego, umożliwiają planowanie wykorzystania zasobów danego systemu przy uwzględnieniu istniejących ograniczeń ludzkich, finansowych, rzeczowych.

Symulacja komputerowa (por.[4-6, 17, 32, 43, 49, 54-55, 58, 66-67, 85, 73, 136, 163]), chociaż nie jest jedynym narzędziem pozwalającym na obserwację systemu rzeczywistego poprzez model matematyczny, jest niewątpliwie instrumentem użytecznym i konkurencyjnym względem pozostałych metod. Główną zaletą modeli symulacyjnych jest brak ograniczeń odnośnie struktury i stopnia skomplikowania badanego systemu oraz możliwość uwzględnienia procesów stochastycznych. Pozwala to na modelowanie złożonych systemów rzeczywistych bez konieczności wprowadzania silnych założeń upraszczających, które stawiałyby pod znakiem zapytania zasadność konstruowanego modelu. Przeprowadzenie pełnego procesu symulacji poczynając od analizy systemu rzeczywistego i zebrania danych wejściowych, poprzez opracowanie modelu konceptualnego i napisanie kodu programu, aż po zaprojektowanie i wykonanie eksperymentów symulacyjnych na gotowym modelu jest jednak poważnym wyzwaniem. Nie dysponujemy jednolitą teorią, która jednoznacznie określałaby sposób i przebieg poszczególnych etapów budowy modelu

symulacyjnego. Każde badanie prowadzone na stochastycznym modelu symulacyjnym oferuje ponadto jedynie oszacowanie rzeczywistych charakterystyk dla konkretnego zestawu parametrów wejściowych.

Powyższe uwagi pozwalają zatem na sformułowanie tezy, że *opracowanie metodyki budowy modeli symulacyjnych systemów ratownictwa medycznego pokona niektóre ograniczenia stochastycznej symulacji komputerowej w odniesieniu do systemów mpd oraz określi kierunki wykorzystania symulacji do wspomagania procesów decyzyjnych w polskich systemach pomocy doraźnej.*

W zaprezentowanej pracy dokonano przeglądu literatury przedmiotu (por.rozdz.2) z zakresu modelowania systemów ratownictwa medycznego: przedstawiono podstawowy kontekst modelowania, omówiono rodzaje mierników oceny skuteczności działania systemów, scharakteryzowano najważniejsze problemy decyzyjne sfery zarządzania będące przedmiotem analizy w prowadzonych pracach badawczych. Dokonany przegląd pozwala wyróżnić zakres typów analizowanych problemów decyzyjnych. Są to przede wszystkim problemy: lokalizacyjne, określania pożądanej wielkości zasobów, wyboru reguł przydziału karetek, planowania pracy personelu medycznego i technicznego, ustalania dogodnych połączeń komunikacyjnych, minimalizowania kosztów funkcjonowania systemu, segregacji pacjentów pod kątem pilności dostarczenia chorych do szpitala oraz wyboru odpowiedniego szpitala, ustalenia warunków i okoliczności odmowy przyjęcia pacjenta przez szpital, organizacji pracy oddziałów szpitalnych przyjmujących pacjentów. Analiza możliwych rozwiązań pod kątem zastosowanych metod badawczych pozwala wyróżnić trzy podstawowe grupy podejść: teorię masowej obsługi, metody sieciowe wraz z metodami programowania matematycznego oraz symulację komputerową. W pracy pokrótce scharakteryzowano główne założenia metod kolejkowych i sieciowych, które można wspólnie określić mianem analitycznych. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu można stwierdzić, że modele analityczne w przeważającej liczbie dotyczą problemów lokalizacyjnych pozwalając na stosunkowo szybkie wyznaczenie konkretnego rozwiązania danego problemu decyzyjnego. Zastosowanie modeli analitycznych ograniczone jest jednak kilkoma czynnikami, z których najistotniejsze można określić jako: ograniczenia skali, ograniczenia zmienności i ograniczenia złożoności.

Nie kwestionując użyteczności metod analitycznych i trafności proponowanych rozwiązań, w dalszej części pracy skupiono się nad zastosowaniem symulacji komputerowej do wspomagania procesów decyzyjnych w systemach ratownictwa medycznego (por.rozdz.3). Dokonano przekrojowej analizy porównawczej modeli symulacyjnych systemów mpd: zidentyfikowano systemy rzeczywiste będące przedmiotem analizy symulacyjnej wprowadzając rozróżnienie na miejskie i regionalne systemy mpd, wyróżniono główne problemy decyzyjne wykazując, że najpowszechniej analizowane zagadnienia zaliczyć można do grupy problemów alokacji zasobów, omówiono założenia leżące u podstaw budowanych modeli symulacyjnych, opisano główne grupy danych wejściowych i sposób definiowania rozkładów prawdopodobieństw oraz przedstawiono najczęściej stosowane kryteria oceny skuteczności działania systemów. Szczególną uwagę poświęcono charakterystyce stosowanych modeli przemieszczania się karetek oraz procesowi weryfikacji i walidacji (WiW) modeli symulacyjnych. Przegląd opublikowanych prac pod kątem przebiegu analizy zasadności modelu symulacyjnego pozwala wysnuć następujący wniosek: albo autorzy nie uznają za istotne (lub celowe) dzielenie się swoimi doświadczeniami dotyczącymi zastosowanych przez siebie metod WiW, albo ocenę zasadności modelu potraktowali marginesowo. Autorka skłania się ku drugiemu wyjaśnieniu, tym bardziej, że w wielu publikacjach poświęconych teorii WiW modeli symulacyjnych można znaleźć stwierdzenie, że „problemy pojawiające się na polu modelowania symulacyjnego powstają najczęściej na skutek nieznamośności i niezrozumienia zasad prowadzenia WiW modelu symulacyjnego”. Aby zappełnić istniejącą lukę, wiele uwagi poświęcono temu właśnie etapowi procesu modelowania symulacyjnego.

Główna część pracy (por.rozdz.4) prezentuje metodykę budowy modelu symulacyjnego systemu ratownictwa medycznego na przykładzie opisu procesu opracowywania modelu symulacyjnego RAMD dla regionalnego systemu mpd. Zaproponowano procedurę definiowania atrybutów systemu szczególnie dużo uwagi poświęcając takim zagadnieniom jak: dobór wejściowych rozkładów losowych oraz projektowanie modułu przemieszczania się karetek. Podstawowe rozkłady wejściowe w modelach ratownictwa medycznego opisują momenty pojawiania się stanów nagłych oraz czas trwania obsługi pacjentów na miejscu wypadku. Modelujący ma do wyboru dwie drogi: opracowanie rozkładów teoretycznych lub wykorzystanie rozkładów empirycznych. Każde podejście ma swoje wady i zalety: przewagą rozkładów empirycznych jest to, że ściśle odpowiadają danym rzeczywistym. Rozkłady teoretyczne są jednak łatwiejsze do

wykorzystania, szczególnie w badaniach prognostycznych, w których chcemy poznać odpowiedź systemu na zdarzenia nie mające miejsca w rzeczywistości historycznej. W pracy przeanalizowano oba podejścia, zwracając uwagę zarówno na proces przygotowania danych do rozkładów teoretycznych i empirycznych, jak i na weryfikację przyjętych założeń w trakcie analizy zasadności modelu. Omówione zostały wnioski odnoszące się do fazy formułowania rozkładów danych wejściowych oraz ich algorytmizowania. Zaproponowano sposób wykorzystania algorytmu symulacji stochastycznej według rozkładów zmiennych losowych ze zmiennymi parametrami do opisu procesu intensywności strumienia napływania zgłoszeń do oddziałów mpd. Opracowano i przedstawiono własny model analityczny przemieszczania się karetek wykorzystując algorytm sieciowy Floyd'a.

Badania dotyczące rozkładów wejściowych prowadzone były w oparciu o dane empiryczne zebrane w Wojewódzkiej Stacji Pogotowia Ratunkowego we Wrocławiu w trakcie wcześniejszych prac badawczych, [118]. Próba losowa obejmowała dane z 7370 wyjazdów zespołów ratunkowych w okresie od 01.01.1995 do 28.02.1995 roku, które zgromadzono za pomocą systemu komputerowego POPR. Dane znajdujące się w bazie POPR zostały następnie przez autorkę rozprawy poddane szczegółowej analizie, korekcie i uzupełnieniom, o czym traktuje jeden z kolejnych rozdziałów (por.rozdz.4.4).

W rozdziałach 4.5 i 4.6 zaprezentowano model konceptualny oraz formalny regionalnego systemu ratownictwa medycznego demonstrując oryginalny sposób opisu systemu mpd w postaci trzech modeli cząstkowych: struktury, zdarzeń i procesów. Model matematyczny oprogramowano następnie w języku Borland Delphi 4.0 (por.rozdz.4.7) wykorzystując metodę programowania obiektowego. Należy zauważyć, że opracowany model symulacyjny jest modelem otwartym, to znaczy możliwe jest elastyczne kształtowanie struktury modelu systemu, co pozwoli kontynuować prace badawcze nawet po wprowadzeniu istotnych zmian do ustawodawstwa odnoszącego się do polskiego systemu ratownictwa medycznego.

Kluczowym etapem w procesie budowy modelu symulacyjnego jest przeprowadzenie analizy zasadności modelu, czyli udowodnienie, że model poprawnie opisuje badaną rzeczywistość. Jest to proces trudny i złożony w przypadku modeli systemów usług publicznych w ogóle, a systemów ratownictwa medycznego w szczególności, ze względu na takie cechy tej grupy systemów jak: wysoki udział czynników losowych, kwestionowana jakość dostępnych danych rzeczywistych, zmienność warunków działania, brak klarownych reguł decyzyjnych i algorytmów postępowania. Jednym z celów niniejszej pracy było

opracowanie metodologii procesu walidacji i weryfikacji modelu symulacyjnego systemu ratownictwa medycznego. Wnioski z przeprowadzonych badań i sugestie odnośnie sposobu prowadzenia analizy zasadności modeli symulacyjnych systemów mpd zostały przedstawione w rozdziale 4.8. Zaproponowano i omówiono algorytmy eliminacji wpływu warunków początkowych oraz doboru liczby przebiegów symulacyjnych. Proces weryfikacji i walidacji modelu przeprowadzono zgodnie z proponowaną przez T. Naylora trójstopniową analizą zasadności koncentrując się na drugim i trzecim etapie wspomnianej analizy, tj. na empirycznym testowaniu założeń oraz na ocenie poprawności danych wynikowych generowanych przez model.

W końcowym rozdziale pracy (por.rozdz.5) omówiono kierunki zastosowań modelu symulacyjnego w zarządzaniu systemem ratownictwa medycznego. Podano przykłady kilku analiz numerycznych wraz z interpretacją graficzną, przeprowadzonych na danych wynikowych uzyskanych w trakcie realizacji przebiegów symulacyjnych. Zakreślono potencjalne możliwości wykorzystania symulacji do: poszukiwania optymalnego schematu rozdziału i rozmieszczenia stałych i ruchomych zasobów systemu mpd, określania optymalnej wielkości zasobów poprzez analizę wybranych wskaźników działania, planowania pracy zespołów lekarskich przy różnym, dobowym nasileniu strumienia wezwań, wyboru reguł przydziału karetek, analizy kosztów w ujęciu globalnym jak i w odniesieniu do różnych grup świadczeń, wyboru odpowiedniej jednostki leczącej przez zespół ratunkowy. Przedstawiono również kilka zagadnień związanych z badaniami typu „co się stanie, jeśli?” podając przykłady decyzji operacyjnych i strategicznych jak i niektórych zdarzeń losowych oraz trendów, których skutki mogłyby być nieoczekiwane lub drastyczne, gdyby zjawiska te zaistniały w systemie rzeczywistym.

Wyniki uzyskane w trakcie przeprowadzonych badań pozwalają na stwierdzenie, że zaprezentowana w rozprawie metodyka budowy modeli symulacyjnych systemów ratownictwa medycznego może być wykorzystana do budowy użytecznych narzędzi ułatwiających podejmowanie decyzji nie-klinicznych na różnych szczeblach zarządzania systemem mpd. Opracowana metodyka pozwala na rozwiązanie niektórych istotnych zagadnień związanych z zastosowaniem symulacji stochastycznej do budowy modeli systemów ratownictwa medycznego.

Wnioski przedstawione w niniejszej pracy stanowią podsumowanie kilkuletnich badań autorki na temat zastosowań stochastycznej symulacji komputerowej we wspomaganiu decyzji organizacyjnych w systemach ochrony zdrowia a w szczególności w systemach ratownictwa medycznego. Efekty prac badawczych były przedstawiane na naukowych konferencjach krajowych (por.[119, 123, 126]) i zagranicznych (por.[122,124]) oraz publikowane w czasopismach naukowych (por.[116, 117, 125]). Wyniki ostatnio prowadzonych badań zostaną zaprezentowane na Siódmej Międzynarodowej Konferencji „System Science in Health Care”, Budapeszt 2000 i opublikowane w materiałach konferencyjnych.

1. ORGANIZACJA I ZADANIA SYSTEMU RATOWNICTWA MEDYCZNEGO

1.1. WPROWADZENIE

Świadczenie pomocy medycznej w stanach nagłego zagrożenia¹ zdrowia lub życia realizowane jest przez instytucje należące do systemu opieki zdrowotnej. Chociaż instytucje te kojarzone są powszechnie z „pogotowiem ratunkowym”, to należy wyraźnie odróżnić jednostki pogotowia ratunkowego od systemu ratownictwa medycznego jako *zorganizowanej, ogólnokrajowej struktury organizacyjnej umożliwiającej zespół przedsięwzięć mających na celu ratowanie zdrowia i życia ludzi w nagłym zagrożeniu*, [140]. System ratownictwa medycznego oznacza skoordynowane i zorganizowane zespoły ludzi i środków, których celem jest niesienie pomocy i leczenie osób w sytuacji nagłego zagrożenia życia lub zdrowia. Podmiotami tego systemu są zakłady opieki zdrowotnej, placówki naukowe, służby działające na rzecz bezpieczeństwa i porządku publicznego, stowarzyszenia, organizacje oraz osoby, które ustawowo lub statutowo zobowiązane są do prowadzenia działań z zakresu ratownictwa medycznego.

Sprawnie funkcjonujący system ratownictwa medycznego staje się obecnie jednym z ważniejszych elementów systemu opieki zdrowotnej. Przyczynia się do tego szybko postępujący rozwój cywilizacyjny, którego nieodłącznym atrybutem jest narastająca liczba urazów². Światowa Organizacja Zdrowia przewiduje [167], że do roku 2020 urazy będą pierwszą pozycją wśród przyczyn zgonów na świecie, zarówno w krajach rozwiniętych jak i rozwijających się. Również w Polsce obserwuje się bardzo silny wzrost umieralności w następstwie wypadków w przeliczeniu na 100.000 ludności [129]. Jeżeli wskaźnik ten w roku 1960 wynosił 43,0 to po 30 latach, czyli w 1990 roku wynosił on już 78,6 i był o 81,2% wyższy niż w roku 1960. Zgony w następstwie wypadków w 1990 roku stanowiły trzecią przyczynę śmierci po chorobach układu krążenia i schorzeniach nowotworowych.

¹ Nagłe zagrożenie to nagłe i niespodziewane zdarzenie wywołane czynnikiem zewnętrznym lub przyczyną wewnętrzną, prowadzące do szybkiego pogarszania się stanu zdrowia lub zagrażające utratą życia [140]. Najczęstszymi przyczynami nagłych zagrożeń są urazy wielonarządowe, ostre choroby układu krążenia i układu oddechowego.

² Międzynarodowa Klasyfikacja Chorób, Urazów i Zgonów wyróżnia w klasie „Urazy i Zatrucia” (ICD9:E800-E999) grupę wypadków i upadków, samobójstwa, zabójstwa i zatrucia.

Leczenie stanów nagłego zagrożenia zdrowia i życia to domena intensywnej terapii oraz medycyny ratunkowej³. Ta ostatnia ma do dyspozycji od kilku do około 60 minut na podjęcie medycznych działań ratunkowych, które mogą uratować życie. Tak zwana *złota godzina* to czas potrzebny do pełnego rozwinięcia skutków urazu, których bezpośrednim następstwem są nieodwracalne zmiany w organizmie prowadzące często do trwałego kalectwa lub śmierci. Podstawowym zadaniem systemu ratownictwa medycznego jest zapewnienie pacjentowi w stanie nagłego zagrożenia zdrowia lub życia, specjalistycznego postępowania lekarskiego w możliwie krótkim czasie – określanym na 30-40 minut. Pewne medyczne działania ratunkowe podejmowane są w warunkach przedszpitalnych i w czasie transportu do szpitala, inne – w tak zwanych szpitalnych oddziałach ratunkowych.

Zgodnie z zaleceniami Światowej Organizacji Zdrowia [167], działanie systemu ratownictwa medycznego powinno opierać się na rejonowych i regionalnych centrach ratunkowych. Rejonowy (szpitalny) oddział ratunkowy (np. wydzielony oddział szpitala wieloprofilowego) powinien przypadać na ok. 200 tys. mieszkańców i obejmować rejon o promieniu 10-15 km. Jego zadaniem byłoby odebranie wezwania o pomoc, podjęcie działań przedszpitalnych, transport ciężko chorego, podtrzymanie funkcji życiowych, szybka diagnostyka, wstępna intensywna terapia, podjęcie decyzji o leczeniu specjalistycznym. Regionalne centrum ratunkowe, oparte o pełnoprofilowy szpital regionalny lub uniwersytecki, powinno funkcjonować w każdej 1 mln populacji i podejmować leczenie specjalistyczne. Powinno dysponować wyspecjalizowanym personelem, odpowiednim zapleczem medycznym, pełnym zapleczem diagnostycznym i radiologicznym.

System pogotowia ratunkowego wprowadzony w Polsce po II wojnie światowej w niewielkim stopniu odpowiada współcześnie pojmowanemu ratownictwu medycznemu. Poziom świadczeń zdrowotnych oferowanych w naszym kraju znacznie odbiega od standardów przyjętych w krajach Unii Europejskiej. Jak wynika z badań przeprowadzonych w 1995 roku [125], znaczący odsetek zgonów w szpitalach (37.6% spośród ogółu zgonów w następstwie wypadków) spowodowany jest nie tylko „agresywnością” urazu, lecz również sprawnością sieci pomocy doraźnej i skutecznością działań na miejscu wypadku oraz w czasie transportu rannego do szpitala. Przeprowadzona analiza przyczyn zgonów [91] wykazała, że zdecydowana większość zgonów w następstwie wypadków zdarza się na miejscu urazu, bądź

³ *Medycyna ratunkowa* to samodzielna dyscyplina medyczna lub nadspecjalizacja w: anestezjologii i intensywnej terapii, chirurgii, ortopedii, chorobach wewnętrznych i pediatrii [140]

w drodze do szpitala, a tylko 37,6% osób zmarło w szpitalu. Spośród zmarłych w szpitalach w następstwie wypadków aż 41,0% przyjęto po upływie 3 godzin od chwili wypadku. Tak duże opóźnienie w udzieleniu właściwej pomocy medycznej znacznie zmniejsza szanse na uratowanie życia. Porównanie danych liczbowych na temat kształtowania się zgonów w następstwie urazów i zatruc w wybranych krajach Europy oraz w Polsce na początku lat 90-tych [91], wypada zdecydowanie niekorzystnie dla naszego kraju (por.tab.1.1). Wskaźnik urazów i zatruc śmiertelnych w okresie ostatniego ćwierćwiecza wzrósł z 6 na 10 tys. ludności w 1970 roku do 8.2 w 1991 roku i następnie rozpoczął się spadek tego wskaźnika utrzymując jednak nadal wysoki poziom (7.3), aby w 1994 roku wzrosnąć do wartości zbliżonych do odnotowanych w 1980 roku (7.5) – por.tab.1.2.

Tabela 1.1. Zgony z powodu urazów i zatruc w wybranych krajach Europy.
Wskaźniki na 100 tys. ludności danej płci. Dane wg [91] z 1990-1991 roku; Polska i Czechy z 1992.

KRAJ	MĘŻCZYŹNI	KOBIETY
Austria	95,3	84,1
Finlandia	137,6	116,9
Francja	105,1	168,6
Hiszpania	73,2	121,5
Niemcy	72,4	119,6
Szwajcaria	99,9	94,2
W.Brytania	46,3	134,5
POLSKA	120,8	134,8
Białoruś	179,3	205,0
Czechy	106,8	63,7
Litwa	195,7	68,0
Rosja	235,6	86,0
Ukraina	179,3	205,0
Węgry	165,1	73,5

Urazy stanowią w Polsce poważny problem społeczny a natężenie tego zjawiska jest jednym z wyższych w krajach europejskich. Waga tego problemu została doceniona w Narodowym Programie Zdrowia 1996-2005 [132], bowiem jednym z celów operacyjnych NPZ jest „zwiększenie sprawności i skuteczności pomocy doraźnej w nagłym zagrożeniu życia” poprzez, między innymi:

- skrócenie czasu dojazdu do osób w stanie zagrożenia życia do 15 minut,
- zmniejszenie umieralności ofiar wypadków w pierwszej godzinie po zaistnieniu urazu,

- skrócenie czasu upływającego od chwili ostrego epizodu do udzielenia pomocy w ostrych stadiach chorób układu krążenia,
- przygotowanie projektu ustawy o ratownictwie medycznym,
- ujednolicenie struktur publicznego pogotowia ratunkowego.

Tabela 1.2. Zgony na 10 tys. ludności w wyniku urazów i zatruc w latach 1970-1994 (wg [148]).

PRZYCZYNA	LATA	OGÓŁEM	MIASTO	WIEŚ
Urazy i zatrucia (ICD9:E800-E9999)	1970	6.0	6.1	5.8
	1980	7.6	7.1	8.3
	1985	7.3	6.9	7.8
	1990	7.8	7.3	8.6
	1991	8.2	7.8	9.0
	1992	7.8	7.4	8.5
	1993	7.3	6.9	8.0
	1994	7.5	7.0	8.5

Wdrażana reforma opieki zdrowotnej zakłada przeprowadzenie zmian również w systemie ratownictwa medycznego. Projekt ustawy „O ratowaniu zdrowia i życia osób w stanach nagłego zagrożenia” [140] przewiduje powstanie Systemu Ratownictwa Medycznego, którego zasadniczymi elementami byłyby szpitale posiadające oddział ratunkowy⁴ oraz zakłady opieki zdrowotnej dysponujące zespołami ratownictwa medycznego⁵. Projekt ustawy zakłada m.in. ujednolicenie procedur postępowania, standaryzację sposobów oceny jakości i skuteczności funkcjonowania systemu oraz uporządkowanie metodyki planowania i postępowania w nagłych i nadzwyczajnych zagrożeniach.

Wydaje się, że chwila obecna to odpowiedni moment na podjęcie prac badawczych z zakresu wspomagania decyzji organizacyjnych w systemach pomocy doraźnej. Istotnym fragmentem takich badań powinno być opracowanie metodologii zastosowań usystematyzowanego podejścia do formułowania, analizy i rozwiązywania problemów decyzyjnych w systemach mpd, opartego na metodologii nauk ścisłych. Jedną z grup metod naukowych dedykowanych rozwiązywaniom złożonych problemów decyzyjnych jest modelowanie symulacyjne, a ściślej symulacja komputerowa. Celowe zatem będzie

⁴ *szpitalny oddział ratunkowy* to oddział szpitalny wyspecjalizowany w działaniach leczniczych w zakresie medycyny ratunkowej, spełniający odpowiednie kryteria dla tej dyscypliny medycznej.

⁵ *Zespół ratownictwa medycznego* to zespół ratownictwa przedszpitalnego, w skład którego wchodzi lekarz i osoby uprawnione do udzielania kwalifikowanej pomocy medycznej, wyposażone w środek transportu, środki łączności, działający na zlecenie i w porozumieniu z lekarzem.

opracowanie metodyki⁶ budowy symulacyjnych modeli komputerowych przeznaczonych do wspomagania procesów decyzyjnych w systemach ratownictwa medycznego z uwzględnieniem specyfiki polskich uwarunkowań.

1.2. ORGANIZACJA SYSTEMU CYWILNEJ POMOCY DORAŻNEJ W POLSCE⁷

W chwili obecnej w Polsce nie istnieje system ratownictwa medycznego, który gwarantowałby specjalistyczną i wysoko kwalifikowaną pomoc w przypadkach katastrof, wypadków i stanów zagrożenia życia. Ratownictwem zajmuje się pogotowie ratunkowe, straż pożarna, policja drogowa, ratownictwo wojskowe i kolejowe, obrona cywilna. Działania tych podmiotów nie są jednakże ze sobą skorelowane i nie opierają się na jednolitym systemie łączności i koordynacji.

Głównymi elementami systemu cywilnej pomocy dorażnej w Polsce są obecnie wojewódzkie stacje pogotowia ratunkowego, które tworzą w mniejszych miastach oddziały i filie terenowe, (por.tab.1.3). System ten zapewnia tzw. strukturę pionową pogotowia ratunkowego, a tym samym większą dyspozycyjność i racjonalność wykorzystania zasobów, ale nie zapewnia tzw. integracji poziomej z innymi zakładami opieki zdrowotnej. Działy pomocy dorażnej współpracują na zasadzie funkcjonalnej, ale bez ścisłych powiązań strukturalnych ze szpitalami, do których przewożeni są pacjenci wymagający dalszego leczenia. Kadra lekarska to częściowo kadra własna, a częściowo lekarze zatrudniani w ramach zleceń.

Tabela 1.3. Pomoc doraźna cywilnej służby zdrowia, wg [148].

Wyszczególnienie	1980	1985	1990	1995	1996
Działy i oddziały pomocy dorażnej	393	404	412	373	361
Wojewódzkie stacje pogotowia ratunkowego	5	8	15	30	33
Kolejowe stacje pogotowia ratunkowego	44	45	46	31	28
Filie pomocy dorażnej	-	-	-	88	101
Karetki sanitarne	3984	4777	4983	4202	3730

⁶ *Metodyka* to zbiór zasad dotyczących sposobów wykonywania jakiejś pracy lub trybu postępowania prowadzącego do określonego celu.

⁷ Stan na dzień 30 kwietnia 2000 roku.

Obok jednostek pogotowia ratunkowego funkcjonuje system kolumn transportu sanitarnego, którego podstawową funkcją jest tak zwany transport sanitarny, czyli obsługa pogotowia ratunkowego, specjalistyczne przewozy chorych oraz materiałów biologicznych. Kolumny transportu sanitarnego uzyskują środki finansowe w drodze zawierania umów z Kasami Chorych, zakładami opieki zdrowotnej i z innymi podmiotami.

Jednostki pomocy doraźnej realizują w ciągu roku znaczną liczbę wyjazdów do pacjentów (por.tab.1.4).

Tabela 1.4. Wyjazdy do zachorowań i wypadków, wg [148].

Wyjazdy do:	1980	1985	1990	1995	1996
Zachorowań: w tysiącach	4064	4516	3625	3215	3207
Zachorowań: na 1000 ludności	114	121	95	83	83
Wypadków: w tysiącach	426	405	376	349	368
Wypadków: na 1000 ludności	12	11	10	9	10

Aktem prawnym regulującym niektóre zagadnienia z zakresu pomocy doraźnej jest ustawa o zakładach opieki zdrowotnej z dnia 30 sierpnia 1991 roku (Dz. U. Nr 91, poz.408 z późniejszymi zmianami), która stwierdza, że zakład pomocy doraźnej (pogotowie ratunkowe) jest zakładem opieki zdrowotnej⁸ i „udziela świadczeń zdrowotnych w razie wypadku, urazu, porodu, nagłego zachorowania lub nagłego pogorszenia stanu zdrowia powodujących zagrożenie życia”. Ustawa o powszechnym ubezpieczeniu zdrowotnym z dnia 6 lutego 1997 roku (Dz. U. Nr 28, poz.153 z późn.zm.) stwierdza natomiast, że ubezpieczonemu przysługują, między innymi, „świadczenia zdrowotne służące [...] ratowaniu życia”, oraz „przewozy środkiem transportu sanitarnego w przypadkach przewozu osób wymagających natychmiastowego leczenia w zakładzie opieki zdrowotnej oraz przewozów wynikających z potrzeby zachowania ciągłości leczenia w przypadkach schorzeń zagrażających zdrowiu lub życiu”.

Istotna nowelizacja ustawy o zakładach opieki zdrowotnej (Dz. U. Nr 91, poz.408) która miała miejsce 18 marca 1999 roku (Dz.U. Nr 28, poz.256), ustaliła formy działalności kolumn transportu sanitarnego. Zostały one przekształcone w jednostki organizacyjne posiadające osobowość prawną, które pokrywają koszty swej działalności z posiadanych środków i uzyskiwanych przychodów.

⁸ Zakład opieki zdrowotnej jest wyodrębnionym organizacyjnie zespołem osób i środków majątkowych utworzonym i utrzymywanym w celu udzielenia świadczeń zdrowotnych i promocji zdrowia (Dz.U. Nr 91 poz.408 i Nr 104 poz.661).

31 grudnia 1998 roku powołany został Krajowy Zespół ds. Ratownictwa Medycznego, którego głównym zadaniem jest przygotowanie projektu ustawy o ratownictwie medycznym. Zespół przygotował projekt Ustawy o Ratowaniu Zdrowia i Życia Osób w Stanach Nagłego Zagrożenia (por. [171]), która określa organizację i zasady prowadzenia działań podejmowanych celem zapewnienia pomocy medycznej osobom w stanach nagłego zagrożenia zdrowia lub życia. Zgodnie z przygotowywanym zapisem, podstawowymi podmiotami systemu ratownictwa medycznego w Polsce będą wszystkie służby ratownicze zobowiązane do udzielania pomocy w stanach zagrożenia, a w szczególności: centra powiadamiania ratunkowego, szpitalne oddziały ratunkowe, publiczne pogotowie ratunkowe w zakresie ratownictwa przedszpitalnego i inne zakłady opieki zdrowotnej posiadające zespoły ratownictwa medycznego. Głównymi ogniwami będą szpitalne oddziały ratunkowe, które powstaną na bazie istniejących szpitalnych izb przyjęć. Izby zostaną zmodernizowane, wyposażone w konieczny sprzęt medyczny a w następnych latach będą miały możliwość przekształcenia się w pełnoprofilowy szpitalny oddział ratunkowy. Zapisy ustawy tworzą System Ratownictwa Medycznego będący integralną częścią systemu bezpieczeństwa publicznego. System zapewni każdemu człowiekowi w stanie nagłego zagrożenia zdrowia i życia możliwość:

- natychmiastowego wezwania pomocy ujednoliconymi środkami łączności ratunkowej. W tym celu powołane zostaną centra powiadamiania ratunkowego, dokąd spływać będą wszystkie wezwania ratunkowe. Dyspozytor Centrum będzie uruchamiał właściwe i konieczne podmioty systemu,
- niezwłocznego przybycia na miejsce zdarzenia właściwych podmiotów systemu,
- podjęcia na miejscu zdarzenia właściwych działań ratowniczych według określonych kompetencji, standardów i algorytmów postępowania oraz zapewnienie stosownego transportu sanitarnego,
- niezwłocznego przyjęcia do najbliższego, stosownego do sytuacji szpitalnego oddziału ratunkowego, który jest wyspecjalizowanym w dziedzinie medycyny ratunkowej oddziałem szpitalnym.

Mocą rozporządzenia Ministra Zdrowia z marca 1999 r. tworzona jest również nowa specjalizacja: medycyny ratunkowej.

Równolegle z prowadzonymi pracami nad ustawą o ratowaniu życia w stanach zagrożenia, od 1999 roku Ministerstwo Zdrowia wdraża program „Zintegrowane Ratownictwo Medyczne”, stanowiący podstawę do budowania Systemu Ratownictwa

Medycznego. Celem programu jest zintegrowanie wszystkich podmiotów ratownictwa w jeden system mający wspólną sieć łączności, wspólne procedury ratownicze, kompatybilny sprzęt medyczny. System objąłby opieką wszystkie osoby znajdujące się na terenie naszego państwa. Założenia programu integrują system ratownictwa medycznego z Systemem Ratowniczo-Gaśniczym Państwowej Straży Pożarnej. Krokiem w tym kierunku jest Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 29 grudnia 1999 r. (Dz.U. z dnia 31 grudnia 1999 r.) w sprawie szczególnych zasad organizacji krajowego systemu ratowniczo-gaśniczego. Rozporządzenie to włącza ratownictwo medyczne do krajowego systemu ratowniczo-gaśniczego powierzając mu, w przypadku walki z pożarami i innymi klęskami żywiołowymi, działania planistyczno-organizacyjne i stosowanie technik z zakresu pomocy medycznej mających na celu ratowanie życia i zdrowia w warunkach pozaszpitalnych, w czasie transportu poszkodowanych i we wczesnej fazie leczenia szpitalnego.

Komitety Spraw Obronnych Rady Ministrów na posiedzeniu w dniu 10 stycznia 2000 roku zaakceptował generalne założenia integrujące ratownictwo medyczne z krajowym systemem ratowniczo-gaśniczym (por.[101]).

1.3. SYSTEM RATOWNICTWA MEDYCZNEGO JAKO SYSTEM USŁUG PUBLICZNYCH

Systemy usług publicznych (ang. *urban services systems*) świadczą różnorodne usługi, których celem jest zaspokojenie tych potrzeb ludności, które mają charakter powszechny i są ściśle związane z rozwojem urbanizacji. Do systemów usług publicznych zaliczamy między innymi: policję, straż pożarną, pomoc doraźną, służby oczyszczania miasta, transport miejski, służby drogowe i inne. Występujące tam procesy decyzyjne są najczęściej związane z alokacją zasobów, mają wyraźnie „przestrzenny” charakter i charakteryzują się znaczną złożonością.

Pomimo ogromnej różnorodności, która występuje w systemach określanych jako „systemy usług publicznych”, można wyróżnić pewne cechy, charakterystyczne dla całej grupy:

- są to systemy o wysokim stopniu złożoności będące kombinacją zasobów ludzkich, fizycznych i finansowych, w których decydującą rolę odgrywa człowiek,

- zasoby, którymi dysponują są ograniczone i najczęściej w dużym stopniu odbiegają od rzeczywistych potrzeb obsługiwanej populacji,
- zachodzące procesy przebiegają przy wysokim udziale czynników losowych o trudnych do oszacowania zależnościach i związkach liczbowych,
- dane, na podstawie których prowadzona jest analiza działania systemu są obarczone błędami mającymi swe przyczyny między innymi w: braku obiektywnej możliwości zebrania wszystkich danych, niepełnych informacjach faktycznie gromadzonych w systemie, przekłamaniu informacji (zamierzonym i niezamierzonym), niejednolitości stosowanej terminologii,
- brakuje jasno sprecyzowanych reguł decyzyjnych i algorytmów postępowania (na przykład ustalanie priorytetu zgłoszeń czy procedury decyzyjne w przypadku wystąpienia masowych katastrof),
- warunki działania systemu charakteryzuje wysoka zmienność,
- nie jest możliwe wyznaczenie obiektywnych miar oceny efektywności działania systemu,
- procesy decyzyjne zachodzą w warunkach niepewności związanej z czasem, miejscem, typem i ilością potrzeb, które należy zaspokoić.

Złożoność procesów decyzyjnych występujących w systemach ratownictwa medycznego jest dodatkowo jeszcze potęgowana przez fakt, że od jakości i sprawności działania tych systemów bezpośrednio zależy zdrowie i życie jego „klientów”, czyli pacjentów którym udzielana jest doraźna pomoc medyczna.

2. TEORETYCZNE PODSTAWY MODELOWANIA SYSTEMÓW RATOWNICTWA MEDYCZNEGO

2.1. PRZESŁANKI MODELOWANIA

Od wielu już lat w zarządzaniu systemami¹ usług publicznych stosowane są metody badań operacyjnych² (por. [1, 2, 9, 15, 20-22, 29, 30, 41-43, 56, 61-64, 70-72, 74, 103-108, 138, 155, 156, 160, 169]). Przyczynia się do tego niewątpliwie duża złożoność problemów decyzyjnych występujących w tych systemach, wynikająca głównie z wysokiego udziału czynników losowych i skomplikowanych, wzajemnych relacji pomiędzy poszczególnymi elementami. Obserwuje się jednocześnie silne dążenie decydentów do uzyskania narzędzi, które pozwoliłyby podejmować efektywne decyzje racjonalne ekonomicznie oraz pozwalające utrzymać oczekiwaną jakość świadczonych usług.

Podstawową cechą badań operacyjnych jest zastosowanie usystematyzowanego podejścia do rozwiązywania problemów i posługiwanie się modelem³ matematycznym opisującym działanie rozpatrywanego systemu rzeczywistego. Rozważania prowadzone są na modelu matematycznym w miejsce wykorzystania modelu fizycznego lub przeprowadzania eksperymentu czynnego na obiekcie rzeczywistym. Takie podejście pozwala na sformułowanie właściwego problemu decyzyjnego, szczególnie trudne w systemach usług publicznych gdzie zakres odpowiedzialności poszczególnych elementów składowych może pokrywać się na różnych poziomach zarządzania. Umożliwia także testowanie różnych strategii działania i ocenianie skutków podjęcia alternatywnych decyzji, jak również ocenę stopnia niepewności, który będzie miał wpływ na decyzję oraz na skutki zaistniałe w wyniku podjęcia tej decyzji. Kluczem do efektywnego planowania jest zrozumienie funkcjonowania danego systemu na tyle, aby móc przewidzieć jego zachowanie w różnych, zaistniałych w przyszłości warunkach. Manipulowanie modelem umożliwia testowanie hipotez, reguł decyzyjnych, procedur operacyjnych oraz struktury systemu przy różnych założeniach i ograniczeniach.

¹ Przez *system* rozumiemy pewien zbiór powiązanych ze sobą obiektów scharakteryzowanych za pomocą atrybutów (cech), które również mogą być ze sobą powiązane [52].

² *Badania operacyjne* to naukowa metoda rozwiązywania problemów z zakresu podejmowania decyzji kierowniczych [164].

W badaniach systemów ratownictwa medycznego powszechnie stosowane są takie techniki modelowania matematycznego jak symulacja (por.[4-6, 17, 32, 43, 49, 54-55, 58, 66-67, 73, 136, 163]), programowanie matematyczne (por.[9, 15, 46-48, 96, 99, 169]), analiza sieciowa (por. [18, 23-27, 41-42, 127-128, 143-146, 160]), teoria masowej obsługi (por.[33-34, 61-64, 70-71, 103-108]). Techniki te, poprzez analizę modelu matematycznego, umożliwiają planowanie wykorzystania zasobów danego systemu przy uwzględnieniu istniejących ograniczeń ludzkich, finansowych, rzeczowych i innych.

2.2. PODSTAWOWY KONTEKST MODELOWANIA

System ratownictwa medycznego obejmuje trzy istotne fazy procesu leczenia pacjenta w stanie nagłego zagrożenia zdrowia lub życia, [4]: (1) fazę przedszpitalną, na którą składają się wszelkie czynności zaistniałe od momentu wystąpienia stanu nagłego do momentu dowiezienia pacjenta do właściwej jednostki leczącej, (2) fazę szpitalną, w trakcie której prowadzony jest właściwy proces leczenia bezpośrednio odnoszący się do zaistniałego urazu oraz (3) fazę poszpitalną obejmującą rehabilitację i dalsze leczenie w innych jednostkach opieki zdrowotnej. System ten można opisać wyróżniając jego podstawowe elementy: stany nagłe, zespoły, oddziały ratunkowe i sieć transportową.

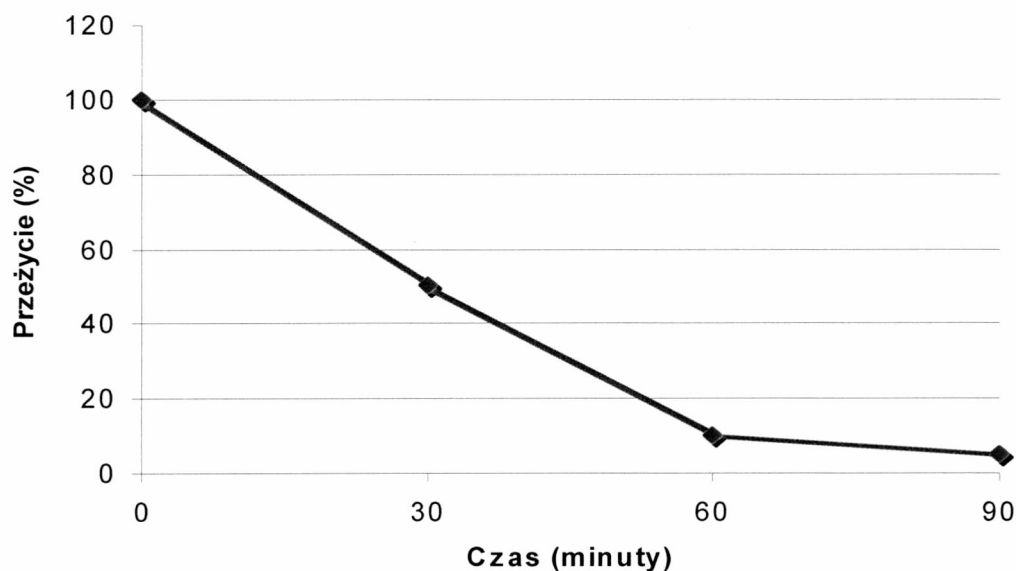
Stany nagłe, to nagłe zachorowania, wypadki, katastrofy lub wypadki masowe pojawiające się niezależnie w czasie i w dowolnym punkcie analizowanego obszaru. Każdy stan nagły może dotyczyć jednego lub kilku pacjentów, jak również może mieć charakter zdarzenia masowego czyli katastrofy⁴. W wielu opracowaniach medycznych [87, 157] podkreśla się znaczenie czasu, po którym rozpoczęta została kwalifikowana pomoc medyczna (por. rys.2.1.). Najbardziej krytycznym okresem jest czas jaki upływa od chwili wystąpienia urazu, poprzez powiadomienie służb ratowniczych do momentu przyjazdu karetki. Stany nagłe są zróżnicowane pod względem stopnia zagrożenia życia, co determinuje rodzaj i szybkość działań, które należy podjąć w celu dostarczenia chorego do szpitala.

Zespół ratowniczy to lekarz i/lub osoby uprawnione do udzielania kwalifikowanej pomocy medycznej, wyposażone w środek transportu, środki łączności, sprzęt medyczny i

³ *Model* to formalne przedstawienie teorii lub też formalny opis empirycznej obserwacji, bądź kombinacja powyższych [52].

⁴ Definicja WHO podaje, że *katastrofa* to „zdarzenie powodujące śmierć, obrażenia i zniszczenie mienia o takim nasileniu, przy którym nie wystarczają działania podejmowane rutynowo celem ograniczenia jego skutków”

leki. Karetki poruszają się po rejonie w sposób, który ograniczony jest istniejącą siecią komunikacyjną. Personel wykonuje najczęściej podstawowe czynności lekarskie, chociaż można wskazać systemy, w których karetki pełnią wyłącznie funkcję transportową. Rodzaj udzielanej pomocy uzależniony jest od stanu chorego, ze szczególnym uwzględnieniem wydolności układu krążenia i oddechowego, a w przypadku urazów – od stopnia ich ciężkości oraz zdolności do szybkiego udzielenia definitywnej pomocy chirurgicznej. Czas od podjęcia działań ratowniczych do przekazania pacjenta właściwemu oddziałowi ratunkowemu nie powinien przekraczać 30 minut [39], ponieważ przeżycie chorych, którym zbyt późno udzielono pomocy gwałtownie spada.



Rys.2.1. Przeżywalność chorych z urazami mnogimi w zależności od czasu rozpoczęcia leczenia kwalifikowanego – „złota godzina”, wg [157]

Oddziały (lub centra) ratunkowe to oddziały przyszpitalne, ambulatoria, kliniki i inne zakłady opieki zdrowotnej, które stale lub okresowo świadczą usługi medyczne w zakresie medycyny ratunkowej. Po przyjęciu pacjenta w stanie nagłym oddział wykonuje niezbędne działania ratunkowe (podtrzymanie funkcji życiowych, diagnostyka, wstępna intensywna terapia) a następnie przekazuje chorego do właściwego zakładu, zgodnie z podjętą decyzją o konieczności leczenia specjalistycznego. Tym miejscem może być np. oddział szpitalny szpitala macierzystego lub pełnoprofilowy szpital regionalny, w którym kontynuowane będzie dalsze leczenie, lub – dowolne miejsce poza systemem opieki zdrowotnej, dla pacjentów którym dalsza pomoc medyczna nie jest konieczna.

Sieć transportowa to zbiór istniejących dróg, autostrad, mostów i wiaduktów. Czas transportu chorego zależy głównie od odległości od miejsca zdarzenia do przyjmującego oddziału ratunkowego, przepustowości sieci komunikacyjnej, warunków atmosferycznych i technicznego stanu dróg.

Powyższa charakterystyka odzwierciedla jedynie podstawowy kontekst modelowania systemów ratownictwa medycznego. Odnotowane w literaturze rozwiązania proponują ponadto:

- (a) rozróżnienie miejskich i terenowych systemów ratownictwa medycznego [68,73].
Konieczność rozróżnienia pomiędzy tymi dwoma typami systemów wynika m.in. z zasadniczo różnych uwarunkowań geograficznych, odmiennej struktury pilności zgłoszeń, różnego poziomu wyposażenia, różnej dostępności do specjalistycznej opieki medycznej (szpitale kliniczne),
- (b) podział na zgłoszenia rzeczywiście pilne i zgłoszenia przewozowe [44]. Podział ten ma fundamentalne znaczenia dla sposobu organizacji obsługi zgłoszeń,
- (c) skupienie się zagadnieniach związanych z dojazdem do pacjenta i przewiezieniem go do szpitala, lub wyłącznie na organizacji pracy szpitalnych oddziałów ratunkowych [44, 95, 120, 165] i inni,
- (d) determinizm lub losowość [23-27] procesów opisujących np. czas dojazdu do pacjenta czy dostępność karetki w chwili nadejścia wezwania,
- (e) pomijanie lub uwzględnianie przypadków wezwania do kilku pacjentów jednocześnie (wypadek z wieloma ofiarami) [18, 35, 39, 64],
- (f) wprowadzenie założeń dotyczących mobilności lub braku mobilności zespołów wyjazdowych, [25, 27]. W wielu modelach przyjmuje się dla uproszczenia, że karetka może być wysłana jedynie bezpośrednio z oddziału ratunkowego (stacji pogotowia, bazy, itd.), inne modele przewidują natomiast możliwość wysłania karetki bezpośrednio z miejsca poprzedniego wezwania, lub karetki powracającej już do bazy.

2.3. CZASOWA STRUKTURA ZDARZEŃ

Skuteczność udzielanej pomocy medycznej determinują medyczne działania ratunkowe wykonywane w warunkach przedszpitalnych w czasie transportu do szpitala. Dostępne wyniki badań, oparte na szerokim materiale klinicznym, wskazują jednak również

na inne istotne czynniki rzutujące na poziom śmiertelności i zachorowalności populacji. Najważniejsze spośród nich to:

1. Czas jaki upływa od zaistnienia urazu do powiadomienia odpowiednich służb systemu ratownictwa medycznego.
2. Czas potrzebny zespołowi wyjazdowemu na dojazd do miejsca wezwania.
3. Poziom wykształcenia (fachowości) zespołu wyjazdowego.
4. Czas potrzebny na uwolnienie/wyswobodzenie ofiar wypadków.
5. Czas transportu chorego do oddziału pomocy doraźnej.

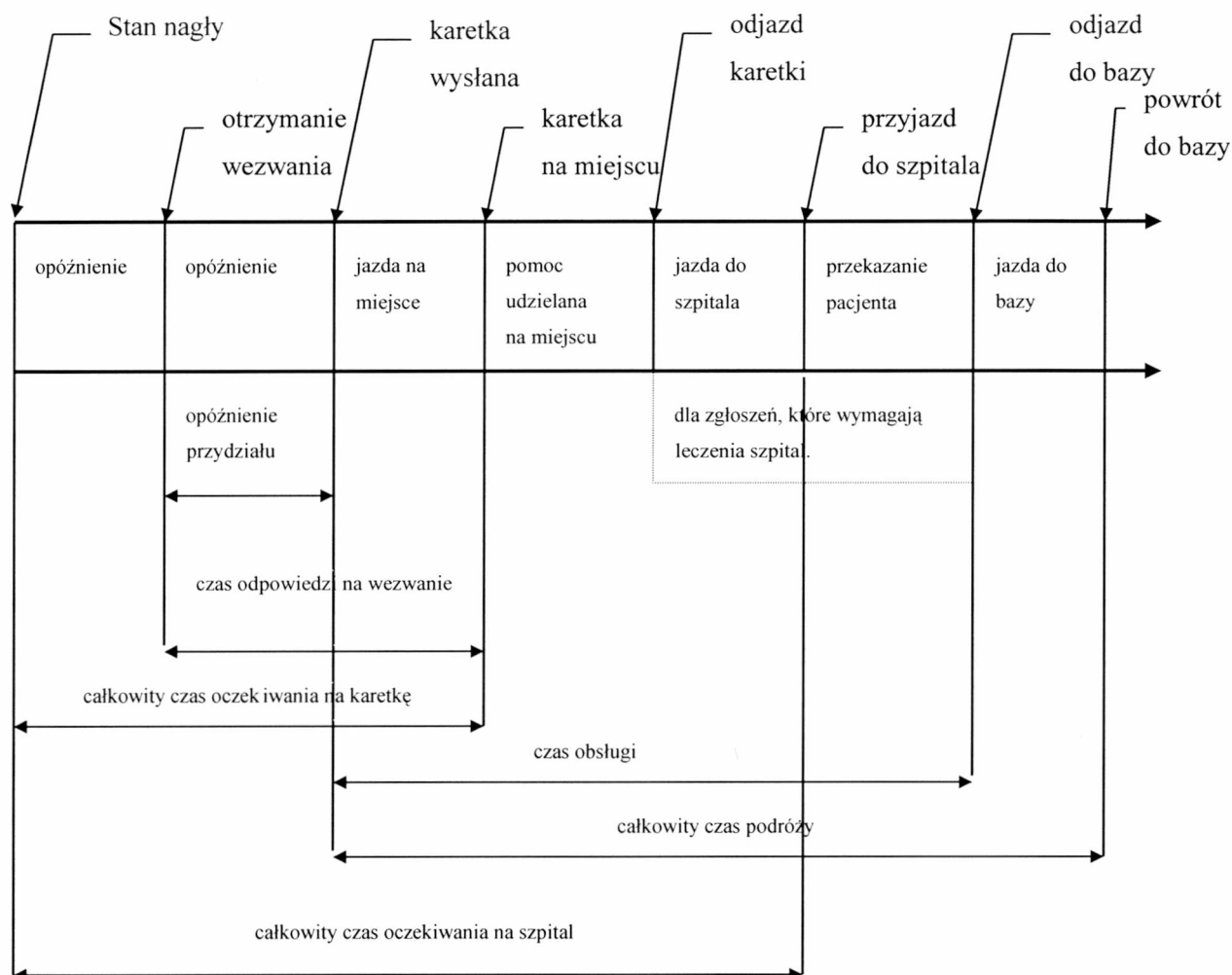
Można zatem stwierdzić, że powodzenie medycznych działań podejmowanych przez zespoły ratunkowe zależy przede wszystkim od czasu jaki upływa od zaistnienia urazu do momentu podjęcia kwalifikowanej interwencji lekarskiej. Większość badań prowadzonych od lat 70 (por. [3, 20, 22, 26, 34, 70, 108 i inne] skupia się na analizie sposobów redukcji czasu odpowiedzi na wezwanie, a ściślej na sposobach zapewnienia właściwej opieki lekarskiej w przeciągu 60 minut od momentu wystąpienia urazu. Przyjmuje się, że poprawa tych wskaźników może w sposób zdecydowany wpłynąć na skuteczność świadczonych usług.

Funkcjonowanie systemu ratownictwa medycznego można zdefiniować za pomocą czasowej struktury zdarzeń, rozpoczynającej się w chwili zaistnienia potrzeby wezwania pomocy doraźnej, a kończącej się w momencie dowiezienia pacjenta do szpitala (por.rys.2.2.).

Po wystąpieniu zdarzenia, które nagłe zagraża zdrowiu bądź życiu pacjenta upływa pewien okres czasu zanim wiadomość o tym fakcie dotrze do systemu ratownictwa medycznego (czas potrzebny na dojsie do telefonu, czas trwania połączenia, itd.). Dyspozytor klasyfikuje zgłoszenie na przykład według stopnia pilności obsługi i decyduje o tym, czy zespół powinien być natychmiast wysłany na miejsce zgłoszenia, czy też zgłoszenie może oczekiwać w kolejce do momentu, w którym dostępny będzie jeden z zespołów w pobliskim rejonie. Nawet dysponując wolną karetką, dyspozytor może umieścić zgłoszenie o małym stopniu pilności obsługi w kolejce, aby zapewnić sobie możliwość natychmiastowego wysłania karetki w momencie pojawienia się zgłoszenia pilniejszego.

Zespół, który otrzymał od dyspozytora polecenie wyjazdu wyrusza na wskazane miejsce. Czas potrzebny na dojazd do miejsca zgłoszenia zależy od wzajemnego położenia karetki i pacjenta, połączeń komunikacyjnych, warunków drogowych. Na miejscu pacjentowi udzielana jest pomoc medyczna a po jej zakończeniu karetka albo transportuje pacjenta do odpowiedniego szpitalnego oddziału ratunkowego, albo wyrusza w drogę powrotną do bazy,

albo wyjeżdża do kolejnego zgłoszenia. W przypadku decyzji o transporcie pacjenta całkowity czas obsługi wydłuża się o czas dojazdu do szpitala i czas pobytu w szpitalu.



Rys.2.2. Czasowa struktura zdarzeń w systemie ratownictwa medycznego.

Z czasową strukturą zdarzeń ściśle związane są takie mierniki dynamiki systemu, jak:

- (a) opóźnienie przydziału, tj. czas jaki upływa od momentu otrzymania wezwania do momentu przydziału karetki. Wysoka średnia wartość tego wskaźnika świadczy o tym, że zgłoszenia musiały często oczekiwać na zwolnienie karetki (zasoby systemu są zbyt niskie w stosunku do intensywności zgłoszeń),
- (b) czas aktywacji zespołu, tj. czas potrzebny załodze na przygotowanie się do wyjazdu,
- (c) czas odpowiedzi na wezwanie, tj. czas jaki upływa od otrzymania wezwania do momentu przyjazdu karetki na miejsce zgłoszenia,

- (d) całkowity czas oczekiwania na karetkę, tj. czas jaki upływa od zaistnienia stanu nagłego do momentu przyjazdu karetki na miejsce zgłoszenia,
- (e) czas obsługi, tj. czas jaki upływa od wyjazdu karetki do momentu przekazania pacjenta do szpitala,
- (f) czas obsługi na miejscu, czyli czas jaki upływa od przyjazdu karetki na miejsce wezwania do momentu wyjazdu karetki z pacjentem do szpitala,
- (g) całkowity czas usługi, tj. czas od wyjazdu karetki do momentu powrotu do bazy,
- (h) czas oczekiwania na szpital: czas od zaistnienia stanu nagłego do momentu przywiezienia pacjenta do szpitala.

2.4. OCENA SKUTECZNOŚCI DZIAŁANIA

W sytuacji idealnej, każde działanie władz administracyjnych systemu zmierzające do zmiany we wzajemnych powiązaniach między wielkością zatrudnionego personelu, finansami i zasobami materialnymi powinno być wyrażone w kategoriach śmierci, kalectwa i cierpienia jako najbardziej obiektywnymi miernikami działania. W literaturze medycznej napotkać można pojęcie „zgonów możliwych do uniknięcia” [130] (ang. Preventable Trauma Deaths – PTD). Odnosi się ono do zgonów, których można było uniknąć pod warunkiem zastosowania innego, bardziej odpowiedniego sposobu leczenia. Trudność w stosowaniu tego wskaźnika wynika z konieczności przeprowadzenia drobiazgowej analizy przypadków zgonów przez wykwalifikowany personel medyczny.

Najszerzej stosowanym na świecie systemem oceny stanu fizjologicznego pacjenta jest Skala Ciężkości Urazu (ang. TS – Trauma Score) lub Zmodyfikowana Skala Ciężkości Urazu (ang. RTS – Revised Trauma Score), na które składają się: wartość ciśnienia tętniczego krwi, częstość oddechów, ocena ruchomości klatki piersiowej, powrót krążenia włosniczkowego oraz skala Glasgow. Ciężkość Urazu wyznacza się za pomocą odpowiedniego wzoru matematycznego a uzyskana wartość punktowa pozwala ocenić stan zaburzeń fizjologicznych u chorego. Służby medyczne w Stanach Zjednoczonych, które stosują TS lub RTS jako kryterium transportu chorych, uznają wartość poniżej 13 punktów według TS jako wskazanie ewakuacji chorego do szpitala pierwszego poziomu referencyjnego ze względu na prawdopodobieństwo śmierci większe niż 10%. Powszechne stosowanie ujednoliconych mierników (np. TS, RTS lub innych) mogłoby doprowadzić do

stworzenia bazy danych pozwalającej oceniać skuteczność leczenia urazów wielonarządowych.

Systemy oceny jakości świadczeń w pomocy doraźnej oparte o analizę adekwatności działań lekarskich w odniesieniu do fizjologicznego stanu zdrowia chorego są nieprzydatne w modelach systemów ratownictwa medycznego, w których najczęściej nie są uwzględniane aspekty kliniczne udzielanej pomocy. Stosuje się tam prostsze do zastosowania mierniki, które można podzielić na trzy klasy;(por.[57,103-108]):

- (1) mierniki opisujące strukturę i zasoby systemu,
- (2) mierniki funkcjonowania systemu,
- (3) mierniki wyjściowe, opisujące rezultaty osiągnięte przez system.

Mierniki opisujące strukturę i zasoby systemu ratownictwa medycznego

Mierniki te określają zasięg działania systemu, jego elementy składowe, a także potencjalne możliwości świadczenia usług. Z ich pomocą można określić:

- obszar działania systemu: wielkość, warunki geograficzne,
- zasoby materialne: liczbę i rodzaje karet, liczbę karet na jednostkę powierzchni lub na jednego mieszkańca, liczbę wyjazdów przypadających na jedną karetę, liczbę szpitali w rejonie, itd.,
- załogę: strukturę ilościową i zawodową personelu, liczbę lekarzy na całodobowych dyżurach,
- strukturę demograficzną regionu: wielkość populacji, strukturę wieku i płci, rozkład gęstości zaludnienia, przestrzenny i czasowy rozkład strumienia wezwań.

Powyższe mierniki są łatwe do uzyskania, mają jednak niewielką wartość jako narzędzie służące ocenie czy porównaniu skuteczności działania systemów pomocy doraźnej. Interpretacja wskaźnika określającego, na przykład, liczbę karet przypadającą na jednego mieszkańca może rodzić pytania typu: „czy z dwóch systemów o różnej wartości tego wskaźnika, jeden ma zbyt wysoką liczbę karet, czy może drugi zbyt niską?”. Omawiane wskaźniki są zbyt ogólne - pomijają lokalne warunki demograficzne i geograficzne, rozkład środków materialnych w rejonie oraz umiejętności i fachowość personelu.

Odmianą powyższych wskaźników są tak zwane *mierniki zagregowane*, określające ilościowy stosunek zasobów do populacji (na przykład liczba lekarzy czy też liczba stacji pogotowia przypadająca na daną liczbę mieszkańców). Wskaźniki te pomijają jednak

zróźnicowanie natężenia zgłoszeń w różnych częściach regionu i mogą doprowadzić do nadmiernego zwiększenia lub deficytu ilości zasobów. Nie uwzględniają one również rozdziału zasobów między poszczególnymi jednostkami. Ta sama liczba łóżek w oddziałach ratunkowych przypadająca na jednostkę populacji może odnosić się do znacznej liczby mniejszych oddziałów lub do kilku większych.

Mierniki funkcjonowania systemu

Celem stosowania mierników działania (inaczej – funkcjonowania) jest sprawdzenie, czy system we właściwy sposób wykorzystuje swoje zasoby do zaspokojenia potrzeb pacjentów. Najczęściej stosowane mierniki działania dotyczą opóźnienia karettek: od otrzymania zgłoszenia do przydziału karetki, od przydziału do przybycia karetki do chorego, od przybycia do przewiezienia pacjenta do szpitala. Określane są one miernikami szybkości pracy systemu i wyrażane są w postaci: średniego czasu oczekiwania na obsługę, procentu wezwań dla których czas oczekiwania na obsługę jest wyższy od przyjętego limitu, prawdopodobieństwa, że wezwanie pilne będzie zbyt długo oczekiwało na obsługę, itp. Decyzje podejmowane w oparciu o te wskaźniki mają na celu taką alokację zasobów, aby doprowadzić do zminimalizowania wielkości opóźnień. Nie zawsze są to jednak decyzje najlepsze dla pacjenta. Czasem lepiej jest wysłać chorego do dalej położonego szpitala, ale za to dysponującego lepszą aparaturą. Procedura przyjmowania zgłoszeń przez dyspozytora może z kolei celowo wydłużać czas zbierania informacji o zdarzeniu, aby zwiększyć prawdopodobieństwo podjęcia właściwej decyzji klasyfikującej jego pilność. Traktowany często jako kluczowy wskaźnik czasu oczekiwania pacjenta na przewiezienie do szpitala, nie bierze z kolei pod uwagę zintensyfikowanych działań medycznych podjętych przez lekarza na miejscu zdarzenia. W publikowanych analizach pomija się natomiast często istotny miernik związany również z opóźnieniami, a mianowicie czas jaki upływa od wystąpienia stanu nagłego do przekazania informacji do systemu pomocy doraźnej. W przypadku stanów rzeczywiście nagłych, opóźnienie to może decydować o życiu lub zdrowiu chorego.

Inne mierniki zaliczane do omawianej klasy to wskaźniki określające czy udzielona pomoc medyczna była odpowiednia. Obrazują one stosunek usług uzasadnionych do wszystkich usług, procent błędów popełnianych podczas przydziału karetki polegających na przykład na wysłaniu karetki tam, gdzie nie była pilnie potrzebna, a odmówieniu pomocy tam, gdzie była niezbędna. Wymienia się tu najczęściej dwa wskaźniki: wskaźnik wyjazdów nieuzasadnionych oraz wskaźnik zgłoszeń pilnych, którym odmówiono pomocy. Pierwszy z

nich określa zdolność systemu do unikania wyjazdów niepotrzebnych, drugi odnosi się do umiejętności przeprowadzania właściwej analizy napływających informacji.

Wykorzystanie wskaźników działania jest kosztowniejsze niż wskaźników opisujących zasoby i strukturę systemu. Te ostatnie bowiem opisują system w stanie statycznym, podczas gdy wskaźniki działania, związane z dynamiką systemu, muszą być bezustannie kontrolowane i uaktualniane. Ponadto te wskaźniki działania, które oceniają odpowiedniość udzielanej pomocy mogą być stosowane jedynie przy wykorzystaniu fachowej wiedzy lekarzy i pielęgniarek.

Mierniki wyjściowe opisujące rezultaty osiągnięte przez system

Mierniki wyjściowe, odnoszące się do stanu zdrowotnego pacjentów bezpośrednio po zakończeniu świadczenia stanowią najbardziej miarodajne źródło oceny funkcjonowania systemu. Zaliczyć do nich można m.in.: ilościową analizę zgonów (np. wg wieku i płci), analizę przypadków trwałego kalectwa (np. liczbę dni, w których pacjent był niesprawny), procent wypadków które miały trwały wpływ na dalsze życie pacjenta, itd. Są to jednak mierniki najrzadziej stosowane ze względu na swoją specyfikę. Niezwykle trudno jest bowiem wyprowadzić ścisłą zależność pomiędzy śmiercią chorego a rodzajem i jakością udzielanej pomocy przez lekarzy pogotowia. Przyczynę zgonu należy powiązać z właściwym źródłem: stanem zdrowia pacjenta, naturą zaistniałego stanu nagłego, rodzajem użytych zasobów systemu. Również subiektywne opinie pacjentów na temat skuteczności zastosowanego postępowania, nie znajdują uzasadnienia w ocenach ekspertów. Jak wykazały badania przeprowadzone w Polsce [84], na każde 100 zachorowań nagłych w ocenie pacjenta, tylko 36% zostało potwierdzonych jako rzeczywiście nagłe w ocenie eksperta.

Badania przeprowadzone w Polsce nad problemem jakości opieki w pomocy doraźnej [84] doprowadziły do sformułowania listy kilkudziesięciu mierników pomiędzy którymi odszukać można wszystkie wyszczególnione powyżej wskaźniki oceny skuteczności działania systemu mpd. Autorzy zwracają uwagę zarówno na wskaźniki o charakterze strukturalnym (warunki lokalowe, wyposażenie, dostępność geograficzna stacji, sposób organizacji jednostek terenowych stacji i inne), wskaźniki oceniające szybkość reakcji pogotowia (czas wysłania zespołu od momentu zgłoszenia, czas dotarcia karetki do najdalej położonego miejsca w rejonie działania stacji) jak i wskaźniki uwzględniające strukturę celów pogotowia (liczba zgonów wynikająca z zaniedbań lekarzy, zgodność pomiędzy rozpoznaniem

postawionym przez lekarza pogotowia a rozpoznaniem szpitalnym, merytoryczna ocena działań lekarskich na etapie pomocy przedszpitalnej). W Narodowym Programie Zdrowia 1996-2005, [132] wyróżniono natomiast trzy grupy wskaźników służących monitorowaniu i ewaluacji wyników. Są to: (1) liczba i częstość śmiertelnych wypadków drogowych, w tym zgonów na miejscu wypadku, (2) liczba i częstość podejmowanych oraz skutecznych usiłowań przywrócenia życia poza szpitalem, oraz (3) liczba, rozmieszczenie i wyposażenie stacji pogotowia ratunkowego.

Z powyższego, niezwykle bogatego zestawu mierników oceny skuteczności działania systemów ratownictwa medycznego, w modelach matematycznych tych systemów najczęściej stosowane są mierniki klasy drugiej, a szczególnie ta grupa, która pozwala ocenić szybkość reakcji systemu na wezwanie.

2.5. PROBLEMY DECYZYJNE

Opisane w literaturze modele odnoszą się do różnorodnych aspektów funkcjonowania systemów ratownictwa medycznego. Próba klasyfikacji tych modeli pozwala wyróżnić kilka podstawowych obszarów decyzyjnych, które związane są ze sferą zarządzania systemem mpd. Są to m.in problemy: lokalizacyjne, określania pożądanej wielkości zasobów, wyboru reguł przydziału karetek, planowania pracy personelu medycznego i technicznego, ustalania dogodnych połączeń komunikacyjnych, minimalizowania kosztów funkcjonowania systemu, segregacji pacjentów pod kątem pilności dostarczenia chorych do szpitala oraz wyboru odpowiedniego szpitala, ustalenia warunków i okoliczności odmowy przyjęcia pacjenta przez szpital, organizacji pracy oddziałów szpitalnych przyjmujących pacjentów i inne.

Problemy lokalizacyjne - rozdziału/rozmieszczenia zasobów

Efektom podjęcia decyzji lokalizacyjnej jest przestrzennie uwarunkowany rozdział zasobów systemu mpd, zarówno stacjonarnych jak i ruchomych. Problemy rozdziału/rozmieszczenia zasobów dotyczą najczęściej:

- przestrzennego umiejscowienia zasobów. Decyzje mogą dotyczyć zarówno zasobów stacjonarnych (np. podstacji pogotowia ratunkowego) jak i rozmieszczenia zasobów ruchomych (np. karetek w poszczególnych podstacjach),

- podziału rejonu (przestrzeni) na określone strefy, tak aby w każdym wydzielonym obszarze uzyskać pewien (żądany) poziom obsługi.
- równoważenia stopnia wykorzystania karetek. Zagadnienie to zajmuje się takim przydziałem karetek do zgłoszeń, aby każda karetka była w porównywalnym stopniu wykorzystana,
- projektowania lub zmian organizacyjnych w systemach mpd.

Jednym z najbardziej znanych modeli lokalizacyjnych jest model Larsona, [103-108] zwany *modelem hiperprzestrzennym*. Za pomocą tego modelu można przeanalizować niektóre z wymienionych problemów lokalizacyjnych, poprzez obliczanie wartości wskaźników operacyjnych, dotyczących m.in.:

- a) całego regionu: średni czas dojazdu karetki na miejsce, stopień wykorzystania karetek, procent wezwań do których przydzielono karetkę z innego regionu,
- b) karetek: stopień wykorzystania, średni czas dojazdu na miejsce, ilość wyjazdów do innych stref,
- c) poszczególnych stref: średni czas dojazdu, procent wezwań obsługiwanych przez karetki z innych stref,
- d) miejsc wezwań: średni czas dojazdu, procent wezwań obsługiwanych przez każdą karetkę.

Problemem rozmieszczenia zasobów zajmował się także Hall (por.[71-72]. Skala analizy była niewielka, bowiem rozważany model kolejkowy systemu uwzględniał jedynie cztery karetki. Dla modelu z jedną, dwoma, trzema i czterema karetkami analizowano następujące metody rozmieszczenia:

- przydział karetek do regionów o najwyższej liczbie zgłoszeń,
- równomierny rozkład karetek w całym regionie,
- umieszczenie karetek w jednym ustalonym miejscu regionu (w bazie).

Optymalną liczbę karetek i ich rozmieszczenie na terenie regionu wybrano na podstawie kryterium dostępności karetek.

W pracach [32] i [108] przedstawiono metody optymalnego podziału regionu obsługiwanego przez dwie karetki na obszary podlegające obu karetkom. Analizowano model z dwoma stanowiskami obsługi typu (M/M/2), a jako kryterium optymalności przyjęto średni czas jazdy karetki do zgłoszenia.

Hakimi [70] sformułował natomiast problem lokalizacyjny w postaci modelu "p-median", którego istotą jest określenie takich lokalizacji posiadanych zasobów, przy których średnie odległości pomiędzy miejscami lokalizacji a ich użytkownikami są

minimalne. Tak sformułowany problem był rozpatrywany i udoskonalany przez wielu innych autorów (por. bibliografia w [143]).

Problemy określania optymalnej wielkości zasobów

Optymalną wielkość zasobów wyznacza się poprzez obliczanie wartości niektórych wskaźników działania systemu, które mogą być przedstawione w postaci (por.[161]):

- prawdopodobieństwa, że w chwili nadejścia zgłoszenia pilnego mniejsza od dopuszczalnej liczba karetek będzie osiągalna,
- średniego czasu oczekiwania na obsługę,
- prawdopodobieństwa, że zgłoszenie będzie oczekiwać na obsługę dłużej niż T min,
- rozkładu prawdopodobieństwa czasu dojazdu karetki na miejsce wezwania, (por.[155]).

Do prac zajmujących się tym problemem należy zaliczyć klasyczną publikację Bella i Allena [20], w której za pomocą modelu (M/M/m) określono liczbę karetek, która wystarczy do zapewnienia możliwości rozpoczęcia obsługi natychmiast po otrzymaniu wezwania.

Problemy wyboru reguł przydziału karetek

Modele matematyczne mogą także służyć do ustalania optymalnych reguł przydziału karetek do zgłoszeń. Przykładowo w [92] przedstawiono model systemu mpd dla R stanowisk obsługi i N typów zgłoszeń. Ustalono, że w sytuacji małego nasilenia ruchu drogowego, należy przydzielać karetki o najmniejszym "koszcie przydziału", np. o najkrótszym czasie dojazdu na miejsce lub o najkrótszym czasie odpowiedzi na wezwanie. W przypadku dużego nasilenia ruchu drogowego, autorzy proponują algorytm ustalania optymalnej reguły przydziału karetek.

Berman i Rahnama w [27] przedstawiają algorytm przydziału karetek do zgłoszeń, oparty o model sieciowy systemu mpd. Zakładają, że dyspozytor posiada ciągłą i wiarygodną informację o aktualnym położeniu wszystkich karetek oraz że może się z nimi komunikować za pomocą radia. Dyspozytor rozważając kwestię przydziału karetki może wybierać jednostki znajdujące się w bazie lub te, które przebywają w terenie, ale nie obsługują żadnych innych zgłoszeń (wracają do bazy, wykonują przejazd prewencyjny, kończą pracę, są przemieszczane przez dyspozytora). Zgłoszenia pojawiają się losowo w węzłach sieci, natomiast pewna liczba karetek wyjeżdża z bazy w różnych porach, porusza się po różnych trasach i dociera na miejsce docelowe w różnym czasie.

Problemy ustalania dogodnych połączeń komunikacyjnych

Przyjmujący zgłoszenia dyspozytor musi bezustannie rozwiązywać problem wyboru trasy dla wszystkich wolnych karetek rozmieszczonych w regionie, ewentualnie także i tych które obsługują zgłoszenia o najniższym priorytecie. Spośród wszystkich alternatywnych możliwości, powinien wybrać ten zespół, którego aktualne położenie zapewni minimalny czas dojazdu na miejsce zgłoszenia. Z podobnym problemem spotykają się także kierowcy karetek w momencie wyboru najdogodniejszego połączenia komunikacyjnego między miejscem pobytu a strefą docelową. Problemy wyboru najdogodniejszych połączeń komunikacyjnych mogą być rozwiązywane z wykorzystaniem klasycznych algorytmów sieciowych, przykładowo:

- w zadaniach wyboru najkrótszej (najtańszej, najszybszej) drogi zastosowanie znajduje algorytm Dijkstry lub algorytm Floyd'a (por.[26]),
- w zadaniach wyboru trasy o określonych własnościach (np. przy planowaniu trasy przejazdu dla karetki przewozowej realizującej kilka zleceń przewozowych z różnych rejonów miasta) stosowane są algorytmy dla problemu komiwojażera (por.[26]).

W literaturze przedmiotu można wskazać także prace, w których proponuje się podejścia wykorzystujące specyficzne cechy problemów występujących w systemach mpd. Berman i Rahnema [28] zajmowali się problemem wyboru optymalnej trasy dla pojedynczego zespołu wyjazdowego nie obsługującego w danym momencie żadnego zgłoszenia. Celem stosowania algorytmu nie był wybór najkrótszej trasy przejazdu ale takiej, która zminimalizuje czas odpowiedzi na następne wezwanie. Autorzy opracowali dwa modele sieciowe i wykorzystali w nich m.in. algorytmy programowania dynamicznego uwzględniające probabilistyczną naturę zgłoszeń. Zauważyli, że długi czas przejazdu karetki może jednocześnie powodować skrócenie czasu odpowiedzi na wezwanie.

Kryteria segregacji pacjentów

Stosowanie kryteriów segregacji pacjentów (ang. triage criteria) umożliwia personelowi zespołu ratunkowego podjęcie decyzji o konieczności leczenia szpitalnego. Metody oceny stanu pacjenta po urazie mogą wykorzystywać:

- skalę urazu, na którą składają się pomiary fizjologiczne (takie jak Skala Ciężkości Urazu TS, lub Zmodyfikowana Skala Ciężkości Urazu RTS, - por.pkt.2.3.3),
- ocenę i klasyfikację poszczególnych uszkodzeń anatomicznych u chorego (na przykład Skala Ciężkości Urazu ISS, Injury Severity Score).

Służby medyczne w Stanach Zjednoczonych i Wielkiej Brytanii stosują powszechnie skalę TS lub RTS jako kryterium transportu chorego do szpitala. Wears [166] analizuje wpływ zmian w stosowanych kryteriach segregacji pacjentów na skuteczność działania systemu, mierzoną z dwóch perspektyw. Pierwsza odnosi się do systemu i wyrażana jest (a) w liczbie pacjentów przyjmowanych przez poszczególne szpitale, co pozwala wyznaczyć stopień wykorzystania poszczególnych zakładów, jak również (b) jako wskaźnik czasu, w którym szpital osiągnął maksymalną, przewidzianą liczbę leczonych pacjentów. Druga dotyczy pacjentów i opisywana jest czasem oczekiwania na pomoc szpitalną i wskaźnikiem przeżycia w fazie przedszpitalnej oraz w późniejszej, szpitalnej fazie opieki. Za pomocą modelu symulacyjnego autor badał jaki wpływ na wymienione wyżej wskaźniki ma przesunięcie punktu ciężkości na skali RTS, który decyduje o przewiezieniu pacjenta do szpitala specjalistycznego. Wyniki badań sugerują, że powszechnie dyskutowany problem poziomu wartości punktowej skali urazu decydujący o przewiezieniu pacjenta do szpitala specjalistycznego ma mniejszy wpływ na skuteczność działania systemu (mierzoną jak wyżej) niż stosowana reguła przewożenia ciężko chorych pacjentów (o niskiej wartości punktów w skali RTS) do dalej położonego centrum leczenia z pominięciem bliżej położonych szpitali miejskich.

Minimalizowanie kosztów funkcjonowania systemu

Obniżenie kosztów funkcjonowania systemu ratownictwa medycznego jest nierozdzielnie związane z posiadaniem informacji na temat optymalnie najtańszych sposobów rozmieszczenia zasobów.

Daberkow w [40] zajął się szacowaniem zapotrzebowania na usługi mpd, określeniem najbardziej efektywnych (najtańszych) miejsc lokalizacji jednostek tak aby zaspokojone było występujące zapotrzebowanie; analizą kosztów założenia, rozmieszczenia i utrzymania wskazanych jednostek zgodnie z obowiązującym standardem świadczenia usług. Autor zastosował wskaźniki czasu odpowiedzi na wezwanie i całkowitego czasu obsługi, które w opracowanym modelu programowania liniowego pełniły rolę ograniczeń. W modelu uwzględniono następujące kategorie kosztów:

- stałe koszty założenia i utrzymania jednostki mpd oraz koszty amortyzacji sprzętu,
- zmienne koszty transportu jednego pacjenta na danej odległości oraz transportu jednego pacjenta niezależnie od przebytej odległości.

Achabal (por.[2]) przedstawił propozycję projektowania (reorganizacji) systemu mpd, w której uwzględniono zarówno rozpoznane potrzeby ludności w zakresie pomocy doraźnej oraz koszty świadczenia tych usług. Opracowany model lokalizacyjny minimalizuje całkowite koszty, na które składają się zarówno koszty transportu pacjentów, jak i koszty utrzymania systemu. Przedstawione podejście jest szczególnie przydatne w fazie planowania nowego systemu lub całościowej reorganizacji istniejącego systemu pomocy doraźnej na poziomie regionalnym.

Koszty uwzględnione w modelu obejmują koszty rzeczowe oraz tzw. koszty przestrzenne. Koszty rzeczowe obejmują wszelkie koszty bezpośrednio związane ze świadczeniem usług medycznych, np. płace personelu. Jednakże uwzględnione są tylko te koszty, które ulegają zmianie w zależności od rozważanego projektu lokalizacji. Na przykład koszty leków i materiałów zużytych w trakcie udzielania określonego typu pomocy medycznej nie są uwzględniane, ponieważ nie zależą od przyjętego modelu lokalizacji jednostek. Koszty przestrzenne obejmują koszty bezpośrednie oraz koszty pośrednie. Koszty bezpośrednie są kombinacją kosztów stałych (np. koszt wysłania karetki na miejsce wezwania) i kosztów zmiennych (koszty transportu pacjenta zmieniające się wraz z odległością). Koszty pośrednie to tzw. koszty społeczne ponoszone przez pacjenta, które w modelu proponuje się zastąpić wskaźnikiem średniej odległości (lub średniego czasu dojazdu) od pacjenta do jednostki pogotowia.

Organizacja pracy oddziałów szpitalnych

Modelowanie systemu ratownictwa medycznego jest najczęściej zawężane do pierwszej fazy działania systemu (por. pkt.2.3), ponieważ tam właśnie mają miejsce zdarzenia wywierające największy wpływ na skuteczność udzielanej pomocy przy urazach. Spotkać można jednak w literaturze również prace, zajmujące się szpitalnymi oddziałami ratunkowymi, do których pacjenci trafiają bądź to bezpośrednio, bądź są przywożeni przez zespoły ratunkowe. Prowadzone badania mają wówczas najczęściej charakter poznawczy i koncentrują się na określeniu wpływu wybranych czynników na efektywność funkcjonowania oddziału. Definiuje się procesy bezpośrednio związane z opieką nad pacjentem (takie jak rejestracja pacjenta przez pielęgniarkę, badanie lekarskie, badania diagnostyczne, testy laboratoryjne) od momentu pojawienia się pacjenta na oddziale do momentu wypisania lub przeniesienia na inny oddział, jak również czynności realizowane przez personel medyczny i techniczny związane z zapewnieniem ciągłej i płynnej pracy całego oddziału (wykonywanie

poleceń lekarzy, praca administracyjna, utrzymanie właściwej higieny, koordynacja współpracy z innymi oddziałami szpitalnymi, itd.). Rodzaj i charakter procesu obsługi jest zdeterminowany przez stopień zagrożenia zdrowia pacjenta oraz postawioną diagnozę.

Najczęściej stosowanym miernikiem jest średni czas pobytu pacjentów na oddziale i średni czas oczekiwania pacjenta na rozpoczęcie badania lekarskiego (por.[49, 120, 44, 95]). Dodatkowo uwzględnia się czasami stopień wykorzystania personelu pielęgniarskiego, sprzętu diagnostycznego i poszczególnych gabinetów/stanowisk/poczekalni na terenie oddziału [44]. Testowane zmiany organizacyjne dotyczą najczęściej różnych scenariuszy rozplanowania pracy personelu lekarskiego, pielęgniarskiego i technicznego (różne grafiki dyżurów, zatrudnienie dodatkowych osób, wydłużenia czasu pracy oddziału) i technicznych zmian w sposobach obsługi pacjentów, na przykład wprowadzenie wydzielonego punktu diagnostycznego dla pacjentów z lekkim stopniem urazu, wykonywanie badań laboratoryjnych bezpośrednio w miejscu diagnozowania pacjenta i inne.

2.6. METODY BADAWCZE

Spotykane w literaturze modele systemów ratownictwa medycznego zbudowane są w oparciu o różne podejścia, jednak najczęściej pojawiają się modele opracowane zgodnie z założeniami teorii masowej obsługi, metod sieciowych, programowania matematycznego i symulacji. W niniejszym rozdziale omówione zostaną podstawowe założenia modeli budowanych w oparciu o pierwsze trzy metody badań, natomiast modele symulacyjne zostaną szczegółowo przedstawione w rozdziale następnym.

Teoria masowej obsługi

Problemy masowej obsługi związane są z sytuacjami, w których z jednej strony, powstaje zapotrzebowanie na wykonanie pewnych usług, a z drugiej konieczność zaspokojenia ich przez stanowiska obsługi. W systemie ratownictwa medycznego pojawiające się zgłoszenia (wezwania do stanów nagłych) można traktować jako powstanie zapotrzebowania na pomoc (usługę) zespołu wyjazdowego. Zgłoszenia, które pojawiają się w systemie w chwili, kiedy wszystkie zespoły są zajęte obsługą innych zgłoszeń, muszą oczekiwać na zwolnienie karetki. Są wtedy traktowane jako zgłoszenia oczekujące w kolejce na obsługę. Dążeniem systemu ratownictwa medycznego jest zmniejszenie

prawdopodobieństwa wystąpienia sytuacji, w której zgłoszenie rzeczywiście pilne musi oczekiwać na obsługę. Celem budowy modelu kolejkowego jest zatem znalezienie takich rozwiązań, które zagwarantują, że prawdopodobieństwo oczekiwania przez zgłoszenie na przydział zespołu ratunkowego będzie mniejsze od pewnego, zadanego poziomu. Poziom ten określany jest na podstawie norm lokalnych lub ogólnokrajowych.

W najprostszym, hipotetycznym przykładzie możemy założyć, że w pewnym mieście każda karetka ma przydzielony „swój” region, do którego nie może być wysłana karetka z innego regionu. W przypadku, kiedy karetka zajęta jest obsługą zgłoszenia, pozostałe zgłoszenia z tego regionu muszą być umieszczane w kolejce. Za pomocą wzorów matematycznych proponowanych przez teorię kolejek, można wyznaczyć taką minimalną liczbę regionów (a więc również minimalną liczbę karetek), przy której średni czas oczekiwania zgłoszeń w każdym regionie nie przekroczy zadanego poziomu.

Modele kolejkowe rzeczywistych systemów mpd opierają się najczęściej na założeniu wielokanałowości. N jednostek obsługi jest umieszczonych w jednym miejscu (oddziale ratunkowym) lub rozmieszczonych w całym regionie. Podstawowe założenia przyjmowane w najprostszych modelach to umieszczanie zgłoszeń w kolejce gdy wszystkie karetki są zajęte, równorzędny priorytet obsługi dla wszystkich zgłoszeń, wykładniczy czas obsługi zgłoszeń oraz proces napływania zgłoszeń opisany rozkładem Poissona.

Jednym z pierwszych modeli, który zapoczątkował nurt wykorzystania teorii kolejek do budowy modeli systemów usług publicznych był tzw. „model hypercube” Larsona [103-108]. Autor założył, że region objęty działaniem systemu podzielony jest na K stref, obsługiwanych przez N karetek. Zgłoszenia pojawiają się zgodnie z rozkładem Poissona o średniej λ zgłoszeń na godzinę niezależnie w każdej strefie. Do każdego zgłoszenia przydzielany jest dokładnie jeden zespół. Jeżeli wszystkie N zespołów jest zajętych w chwili nadejścia zgłoszenia, zgłoszenie wstawiane jest do kolejki i obsługiwane zgodnie z zasadą FIFO. Model wykorzystywany był przede wszystkim do analizy problemów lokalizacyjnych oraz do równoważenia stopnia wykorzystania poszczególnych zespołów wyjazdowych.

Późniejsze modele opracowywane przez innych autorów uwzględniały również takie aspekty systemów rzeczywistych jak podział zgłoszeń na zgłoszenia pilne i zwykłe, przyporządkowywały zgłoszeniom o różnym priorytecie inny czas obsługi na miejscu zdarzenia [43], a także zakładały możliwość wysłania do jednego zgłoszenia kilku zespołów wyjazdowych [43, 73].

Ciekawy model kolejkowy zaproponowała Green [62, 64]. Autorka zbudowała model, w którym uwzględnia dwa typy stanowisk obsługi: zespoły główne (na przykład dwuosobowe wozy patrolowe w systemie policyjnym czy karetka z lekarzem w systemie medycznym) oraz zespoły pomocnicze (odpowiednio jednoosobowe wozy patrolowe i zespoły paramedyczne). Do każdego zgłoszenia napływającego do systemu przydzielany jest jeden „zespół główny”, natomiast do pewnej frakcji zgłoszeń dodatkowo wysyłane jest wsparcie w postaci „zespołu pomocniczego”.

Taylor [161] wykorzystał model kolejkowy do określenia liczby karetek obsługujących miejski system mpd, w którym obsługiwane są zgłoszenia rzeczywiście nagłe oraz zgłoszenia transportowe. Autor uwzględnił w modelu procedurę przydziału karetek, która polegała na tym, że do zgłoszeń zwykłych (o niskim priorytecie obsługi) była przydzielana karetka wyłącznie wtedy, kiedy dostępna była pewna (zadana) liczba karetek NI . W przeciwnym przypadku zgłoszeniom albo odmawiano usługi, albo umieszczano je w kolejce, w której oczekiwały do momentu zwolnienia odpowiedniej (NI) liczby karetek.

Modele kolejkowe są przydatne szczególnie w rozwiązywaniu lokalizacyjnych problemów systemów mpd. Dostarczają informacji na temat zalecanej lokalizacji stacji, liczby zespołów wyjazdowych, wielkości i wzajemnego rozmieszczenia rejonów podlegających poszczególnym oddziałom ratunkowym. Podstawowym miernikiem oceny działania systemu jest w nich najczęściej średni czas oczekiwania zgłoszeń w kolejce, średnie opóźnienie pomiędzy odebraniem zgłoszenia a dojazdem zespołu na miejsce lub ilość (procent) zgłoszeń, które nie mogły być natychmiast obsłużone (były umieszczane w kolejce zgłoszeń oczekujących).

Metody sieciowe / modele programowania matematycznego

W klasie często wykorzystywanych w badaniach operacyjnych modeli sieciowych wyróżnić można podklasę modeli zwanych też modelami sieci połączeń. W tego typu modelach węzły mają zwykle interpretację przestrzenną jako pewne miejsca na rozpatrywanym terenie, z kolei łuki oznaczają połączenia pomiędzy poszczególnymi miejscami. Wartości liczbowe określają wielkości powiązań pomiędzy danymi miejscami wyrażone na przykład w kilometrach, w jednostkach czasu, w jednostkach monetarnych (koszt przejazdu pomiędzy miejscami), czy w jednostkach naturalnych (liczba przewożonych pacjentów). W spotykanych w literaturze przedmiotu modelach sieciowych, analiza sieci połączeń dotyczy najczęściej problemów lokalizacyjno-transportowych, z których

najistotniejsze to problemy wyboru drogi oraz problemy rozmieszczenia zasobów zarówno stacjonarnych (podstacje pogotowia ratunkowego) jak i ruchomych (karetki). Podstawowe założenia najprostszych modeli sieciowych są następujące:

- zapotrzebowania na obsługę występują tylko w węzłach sieci komunikacyjnej,
- zasoby (karetki) nie są rozróżnialne, a każde zlecenie jest obsługiwane przez najbliższą karetkę,
- karetki są zawsze sprawne,
- zakłada się deterministyczny charakter powiązań i odległości w sieci.

Koncepcję sieciowego modelu lokalizacyjnego w postaci tak zwanego „modelu mediany” przedstawił Hakimi [70] nie podając jednak algorytmu na rozwiązanie postawionego problemu. Model mediany był uogólniony przez Carbona, a także przez Khumawale oraz Toregas i in. [162-163]. Uogólnienia tego modelu dotyczyły:

- analizy lokalizacyjnej na sieciach stochastycznych, tj. przy założeniu, że czasy transportu są zmiennymi losowymi o znanych, dyskretnych rozkładach prawdopodobieństwa (por.[127] i [128]),
- dopuszczenia zmiany lokalizacji jednostek obsługi oraz wprowadzenia ruchomych jednostek obsługi (por.[22]),
- uwzględnienia przypadków, kiedy niektóre jednostki obsługi są przeciążone pracą i nie są w stanie zapewnić natychmiastowej obsługi (por.[25]).

Modele mediany były stosowane w praktyce do usprawnienia systemów mpd. Przykładowo Swoveland i in. [159] opracowali probabilistyczną procedurę wyznaczania miejsc lokalizacji karetek w Vancouver w Kanadzie, tak aby średni czas przybycia karetki był najmniejszy. Także Berlin i in. [22] zastosowali model mediany do minimalizacji średniego czasu obsługi zlecenia z uwzględnieniem czasu transportu do szpitala.

Inna, znacząca liczbowo, grupa modeli sieciowych to tzw. *modele pokrycia*. Stosuje się je wtedy, gdy zadane są normy lub ściśle określone są wymagania odnoszące się do stopnia zaspokojenia zapotrzebowania na usługi. Przedmiotem decyzji jest wyznaczenie wielkości zasobów (np. liczby podstacji i liczby karetek w każdej podstacji) i miejsc lokalizacji tych zasobów tak, aby zapewnić spełnienie nałożonych warunków. Toregas i in. [163] sformułowali "lokalizacyjny problem pokrycia" jako znalezienie najmniejszej liczby jednostek obsługi i punktów ich lokalizacji tak, aby dla każdego źródła zapotrzebowania istniała jednostka obsługi osiągalna w czasie nie dłuższym niż S jednostek. Uogólnieniem

powyższego problemu jest model "maksymalnego pokrycia" sformułowany przez Churcha i ReVella [36] jako przydział p jednostek obsługi do punktów na sieci w taki sposób, aby możliwie największa część punktów zapotrzebowania miała zagwarantowaną obsługę w oznaczonym czasie.

Wymienione modele sieciowe były uogólniane i udoskonalane przez wielu autorów. Przykładowo Daskin [41] uwzględniał w modelach aspekty probabilistyczne, m.in. dotyczące problemu niedostępności jednostek obsługi w momentach nadejścia nowych zgłoszeń. Z kolei ReVelle i in. [145] rozważali zastosowanie obydwu modeli pokrycia do lokalizacji stacji pomocy doraźnej w USA. Jarvis i in. [89] zastosowali lokalizacyjny model pokrycia do planowania organizacji pomocy doraźnej w stanie Virginia w USA.

Algorytm rozwiązania proponowany w większości modeli sieciowych oparty jest o założenia metody programowania matematycznego. Problem badawczy sformułowany w postaci zadania programowania matematycznego polega na poszukiwaniu wszystkich rozwiązań, które maksymalizują (bądź minimalizują) funkcję celu, a jednocześnie spełniają warunki ograniczeń. W zależności od przyjętych założeń mówimy o programowaniu liniowym, programowaniu stochastycznym, programowaniu dyskretnym lub programowaniu dynamicznym. Modele systemów ratownictwa medycznego budowane w oparciu o założenia teorii programowania matematycznego zajmują się najczęściej *problemami lokalizacyjnymi*. W modelach tych zakłada się najczęściej, że:

- każde wezwanie reprezentuje pewien ściśle określony punkt obszaru geograficznego, do którego powinien dojechać zespół ratunkowy,
- każdy zespół przypisany jest do pewnego punktu obszaru geograficznego i może obsłużyć pewną liczbę punktów znajdujących się w jego zasięgu.

Można zatem stwierdzić, że każdy punkt obszaru geograficznego znajduje się w zasięgu pomocy zespołu wyjazdowego, jeżeli odległość pomiędzy tymi dwoma lokalizacjami (tzn. lokalizacją wezwania i lokalizacją zespołu) nie jest większa od pewnej maksymalnej odległości. Funkcję celu można zdefiniować jako minimalizowanie liczby zespołów (lub oddziałów ratunkowych) niezbędnych do zaspokojenia potrzeb regionu w taki sposób, aby każdy punkt obszaru geograficznego znajdował się w zasięgu co najmniej jednego zespołu (oddziału ratunkowego) w czasie nie większym od przyjętego za zalecany.

Problem można zatem sformułować matematycznie jako:

$$\text{Minimalizuj } \sum_{j \in J} X_j, \quad \text{jeżeli}$$

$$\sum_{j \in COV(i)} X_j \geq 1, \quad \text{dla każdego } i \in I,$$

$$X_j \in \{0,1\}, \quad \text{dla każdego } j \in J,$$

gdzie

$$X_j = 1, \quad \text{jeżeli wybrano zespół } j$$

$$X_j = 0 \text{ w p.p.}$$

J = zbiór zespołów (oddziałów ratunkowych);

I = zbiór wezwań;

$COV(i)$ = zbiór zespołów oddziałów znajdujących się w odpowiedniej (tzn nie większej niż zalecana) odległości od wezwania i .

Omówione podejście (zaproponowane przez [163]) było modyfikowane przez wielu badaczy, ponieważ uznano ([145]), że nie jest konieczne pokrywanie wszystkich punktów analizowanego obszaru. Zaproponowano model, w którym funkcja celu maksymalizuje liczbę punktów znajdujących się w zasięgu oddziału (zespołu), przy założeniu, że liczba oddziałów (zespołów) jest stała i pewne punkty obszaru nie muszą być obsłużone w założonym czasie. Kolejne modele uwzględniały aspekty probabilistyczne. Założono na przykład ([41]), że znane jest prawdopodobieństwo tego, iż zespół wyjazdowy jest wolny w momencie nadejścia wezwania i tym samym może być skierowany w odpowiedni punkt obszaru. W innej pracy ([143]) zaproponowano model, który proponuje rozwiązanie problemu lokalizacyjnego tak, aby prawdopodobieństwo dojazdu zespołu ratunkowego do wezwania w wyznaczonym czasie nie było mniejsze niż ustalona wartość. W niektórych modelach (np. [14]) proponowano wprowadzenie strumienia zgłoszeń generowanego w oparciu o rozkład zmiennej losowej, jak również przyjęcia niedeterministycznego czasu obsługi wezwania.

Podsumowując powyższe rozważania dotyczące modeli analitycznych systemów ratownictwa medycznego można stwierdzić, że modele te w przeważającej liczbie zajmują się problemami lokalizacyjnymi pozwalając na stosunkowo szybkie wyznaczenie konkretnego

rozwiązania analizowanego problemu decyzyjnego. Zastosowanie modeli analitycznych ograniczone jest jednak kilkoma czynnikami, z których najistotniejsze dotyczą:

ograniczenia skali; wyniki uzyskane za pomocą modeli analitycznych dotyczą ściśle określonych, zazwyczaj stałych parametrów opisujących działanie obiektu, ściśle określonego horyzontu czasowego i określonej skali czasowej. Oznacza to, że decyzje podejmowane przy wykorzystaniu modeli analitycznych, odnośnie obserwowanego lub spodziewanego zachowania obiektu w ściśle określonym okresie, są najlepsze jedynie w niezmiennych warunkach działania obiektu i jedynie w odniesieniu do całego rozpatrywanego okresu,

ograniczenia zmienności; w modelach analitycznych jedynie w ograniczonym zakresie można uwzględnić zagadnienie niepewności informacji i aspekty dynamiczne. Nie jest możliwe natomiast uwzględnienie dynamiki zjawisk (np. systematycznego wzrostu zgłaszalności w związku ze zwiększaniem się liczby mieszkańców objętych opieką pogotowia) lub sezonowości zjawisk (w poszczególnych dniach tygodnia, porach doby lub okresach roku),

ograniczenia złożoności; istotnym ograniczeniem zastosowania modeli analitycznych jest brak możliwości wykorzystania typowych modeli analitycznych do opisanie dużych, złożonych obiektów rzeczywistych. Istnieje oczywiście możliwość poczynienia wielu upraszczających założeń, znacznego ograniczenia wykazu zmiennych i parametrów opisujących rzeczywisty obiekt i wybrania stosownego modelu (np. odpowiedniego modelu masowej obsługi). Otrzymany model będzie jednak w uproszczony sposób opisywał działanie obiektu, a otrzymane wyniki mogą okazać się zbyt przybliżone. Próba zbudowania modelu uwzględniającego wszystkie czynniki, które są istotne (w tym - czynniki ekonomiczne i społeczne) może okazać się z kolei nieudana z punktu widzenia możliwości zastosowania metod i technik matematycznych.

3. MODELOWANIE SYMULACYJNE SYSTEMÓW RATOWNICTWA MEDYCZNEGO

3.1. SYMULACJA JAKO TECHNIKA ROZWIĄZYWANIA PROBLEMÓW - POJĘCIA

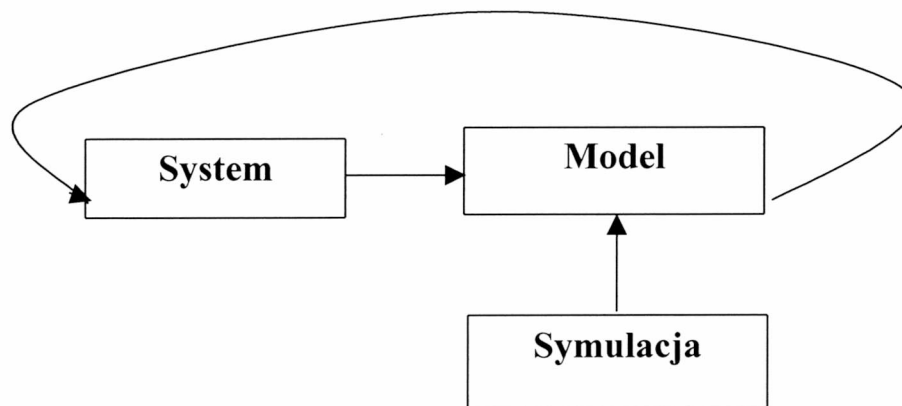
Modelowanie symulacyjne jest jedną z najczęściej wykorzystywanych technik rozwiązywania problemów, obok programowania liniowego i metod statystycznych, [109]. Symulacja wywodzi się z teorii statystyki i z metod analizy złożonych stochastycznych systemów fizycznych. W obu podejściach wykorzystuje się liczby i zmienne losowe w celu oszacowania uzyskanych wyników i/lub proponowanego rozwiązania. Jedno z pierwszych, bardziej znanych nowożytnych zastosowań modelowania symulacyjnego miało miejsce w czasie II wojny światowej. Za pomocą symulacji badano dyfuzję neutronów w czasie prac nad konstrukcją bomby atomowej. Ponieważ było to ściśle tajne zadanie, nadano mu kryptonim „Monte Carlo” wiążąc losowość zdarzeń ze światowej sławy gniazdem hazardu.

Zastosowania analizy symulacyjnej zaznaczyły się początkowo głównie w sektorze produkcyjnym (planowanie, sterowanie zapasami, linie produkcyjne) ale stopniowo modele symulacyjne powstawały także w sektorach nie-produkcyjnych, np. usługowym i rządowym (analiza szpitalnego systemu przyjęć i wypisów, systemy transportowe i inne).

Definicja symulacji może sprawić wiele trudności, ponieważ w pojawiających się publikacjach pojawiają się liczne przykłady definicyjne tego pojęcia. Na potrzeby pracy przyjęto, że **symulacja** to *proces projektowania matematycznego i/lub logicznego modelu systemu rzeczywistego a następnie prowadzenia na tym modelu eksperymentów komputerowych w celu opisanie, wyjaśnienia lub predykcji zachowań systemu rzeczywistego* [131].

Aby system można było poddać naukowym badaniom, należy poczynić pewne założenia odnośnie struktury i procesów w nim zachodzących. Założenia te, przedstawiane najczęściej w formie matematycznych i logicznych założeń, tworzą model. Model poddawany jest analizie a sformułowane wnioski przenoszone są następnie na badany system (por.rys.3.1.). Jeżeli relacje występujące w modelu są na tyle proste, że możliwe jest wykorzystanie metod matematycznych (algebra, rachunek prawdopodobieństwa, obliczenia) w celu uzyskania dokładnej odpowiedzi na postawione pytania – mówimy o rozwiązaniu *analitycznym*. Jednakże większość systemów rzeczywistych jest zbyt złożona aby możliwe

było wykorzystanie podejścia analitycznego – wtedy stosowana jest *symulację*. W symulacji wykorzystuje się metody numeryczne w celu zgromadzenia danych, które następnie służą do oszacowania szukanych charakterystyk modelu.



Rys. 3.1. Relacja System- Model- Symulacja.

Modele symboliczne, użyteczne w prowadzeniu analizy symulacyjnej mogą być klasyfikowane w różnych przekrojach, z których najistotniejsze są trzy wymienione poniżej. Modele dyskretne/ciągłe. Klasyfikacja ta odnosi się do zmiennych występujących w modelu. Zmienne ciągłe mogą przyjmować wartość każdej liczby rzeczywistej, podczas gdy zmienna dyskretna przyjmuje wartości tylko z pewnego, ściśle określonego podzbioru liczb rzeczywistych. Szczególnie istotny jest tutaj charakter zmiennej czasu. Jeżeli zmiany w modelu występują w sposób ciągły w miarę upływu czasu, to określamy model jako ciągły. Jeżeli natomiast zmiany występują w ściśle określonych chwilach czasowych – mówimy o modelu dyskretnym.

Modele stochastyczne/deterministyczne W modelu deterministycznym nie uwzględnia się czynników przypadkowych (losowych) a wszystkie obiekty mają jednoznacznie ustalone względem siebie matematyczne lub logiczne powiązania. Konsekwencją tego rodzaju powiązań jest całkowita jednoznaczność rozwiązań. W modelu stochastycznym przynajmniej część zmienności ma charakter losowy. Działanie systemu jest również opisane szeregiem wzorów określających współzależności pomiędzy poszczególnymi zmiennymi, jednakże z uwagi na to, że niektóre zmienne określają czynniki przypadkowe (losowe), nie jest możliwe jednoznaczne określenie zmian stanu systemu w następstwie podjęcia określonych decyzji lub w następstwie upływu czasu.

Modele statyczne/dynamiczne. Model statyczny albo pomija udział czasu, albo też opisuje chwilowy stan systemu w pewnym momencie czasu. Model dynamiczny wyraźnie podkreśla upływ czasu.

Należy zauważyć, że w badaniach symulacyjnych dotyczących zachowania złożonych obiektów rzeczywistych, ze względu na występowanie znaczącej liczby zmiennych, parametrów i duże zbiory danych wejściowych stosuje się prawie wyłącznie symulację komputerową.

Cele prowadzenia eksperymentów symulacyjnych są zróżnicowane. Modelowanie symulacyjne może dotyczyć realnie istniejących systemów i obiektów rzeczywistych (np. systemu medycyny ratunkowej w określonym województwie) lub systemów hipotetycznych (np. w przypadku projektowania nowej struktury organizacyjnej systemu mpd). Badania symulacyjne można podzielić, zależnie od przeznaczenia wyników symulacji, na:

- badania identyfikacyjne, polegające na tworzeniu opisów zasad funkcjonowania systemu i tym samym ułatwiające zrozumienie jego funkcjonowania (np. znalezienie odpowiedzi na konkretne pytania dotyczące trendów występujących w zgłaszalności pacjentów),
- badania prognostyczne (ang. „what if models”) ułatwiające podejmowanie decyzji, tak strategiczno-taktycznych jak i operacyjnych. Istotą tych badań jest analiza różnorodnych alternatyw decyzyjnych, poprzez wyznaczenie charakterystyk funkcjonowania badanego systemu dla określonych warunków,
- badania racjonalizacyjne, polegające na wyznaczeniu warunków funkcjonowania badanego systemu, przy których jego charakterystyki spełniają określone kryteria racjonalności.
- symulacje treningowe, służące do ćwiczenia osób związanych z określonym systemem (lub typem systemów) w posługiwaniu się wiedzą z określonej dziedziny.

Przedstawiony powyżej pobieżny przegląd alternatywnych form symulacji systemów pozwala zorientować się w rozległości typów modeli symulacyjnych. Modele symulacyjne systemów ratownictwa medycznego zajmują niewielki stosunkowo fragment obszaru wytyczonego przez różne typy modeli symulacyjnych oraz różne rodzaje prowadzonych badań. Przegląd modeli ratownictwa medycznego pozwala stwierdzić (co zostanie wykazane w dalszej części rozdziału), że są to najczęściej modele dyskretne, dynamiczne i stochastyczne budowane w celach prognostycznych i racjonalizacyjnych.

3.2. TECHNICZNE ASPEKTY MODELOWANIA SYMULACYJNEGO

Wybór metody symulacji

Jeżeli zmiany stanu¹ w systemie można wyrazić za pomocą zdarzeń² dyskretnych to oznacza to, że badanie systemu najlepiej jest przeprowadzić budując dyskretny model symulacyjny. W systemach ratownictwa medycznego pojawiają się zgłoszenia wraz z zapotrzebowaniem na obsługę, a system zaspokaja tę potrzebę natychmiast lub zgłoszenie przetrzymywane jest do chwili, w której zaistnieją warunki pozwalające na jego obsługę. Fakt pojawienia się zgłoszenia, przydział karetki, rozpoczęcie czynności medycznych, przekazanie pacjenta do szpitala traktowane mogą być jako zdarzenie dyskretne i stąd - modele symulacyjne systemów pomocy doraźnej budowane są w oparciu o symulację zdarzeń dyskretnych.

Istnieje kilka koncepcji traktowania zdarzeń dyskretnych w modelu. W jednej z nich, zwanej *koncepcją planowania zdarzeń*, symulacja ma za zadanie śledzenie zmian następujących w miarę pojawiania się pojedynczych zdarzeń. W drugiej, tak zwanej *koncepcji interakcji procesów*³, nacisk kładzie się na obserwację rozwoju obiektu od chwili pojawienia się aż do momentu zaniku. Niezależnie jednak od wybranego podejścia, symulacja realizowana jest poprzez rejestrowanie czasów wystąpienia wszystkich zdarzeń oraz poprzez wyznaczanie chwil zdarzeń przyszłych. Istnieją dwie podstawowe metody uaktualniania zegara symulacji. Według pierwszej czas zegarowy ustawiany jest na chwilę, w której ma wystąpić zdarzenie. Jest to tak zwana metoda *kolejnych zdarzeń*. W drugiej metodzie zegar zwiększa się o mały przyrost czasu i w każdej chwili sprawdza czy jest to czas wystąpienia jakiegoś zdarzenia. Ta metoda nosi nazwę *stałego kroku*. W symulacji systemów mpd przerwy między zdarzeniami pojawiają się w sposób losowy i mają zróżnicowaną długość, można zatem wykorzystać metodę kolejnych zdarzeń. Zaletą tego podejścia polega na tym, że nie uwzględnia się w modelowaniu okresów braku aktywności pomiędzy kolejnymi zajściami zdarzeń, co ma ogromne znaczenie dla realizacji komputerowej modelu. Kluczowymi funkcjami w omawianej koncepcji są *planowanie i wybieranie zdarzenia*. *Zaplanowanie*

¹ Stan systemu to opis wszystkich obiektów, atrybutów i działań w danej chwili czasu [59].

² Przez *zdarzenie* rozumiemy wystąpienie zmiany stanu systemu w pewnej chwili czasu [59]. Zdarzenie może wywołać zmianę wartości atrybutów obiektu, stworzyć lub zlikwidować obiekt lub też rozpocząć lub zatrzymać działania.

zdarzenia polega na określeniu typu zdarzenia i czasu pojawienia w systemie, w momencie gdy trwa jeszcze poprzednie zdarzenie. Zaplanowane zdarzenie umieszczane jest na specjalnej liście (tak zwanym *kalendharzu zdarzeń*), która przeglądana jest po napotkaniu funkcji *wybierania zdarzenia*. Badane są wtedy wszystkie zapisy w celu odszukania zdarzenia, które pojawi się w systemie najwcześniej. Czas symulacyjny zostaje przesunięty do czasu pojawienia się zaplanowanego zdarzenia, dokonując w ten sposób przeskoku przez okres braku aktywności. Po wybraniu zdarzenia realizowane są kroki opisane w modelu.

Struktura modelu symulacyjnego

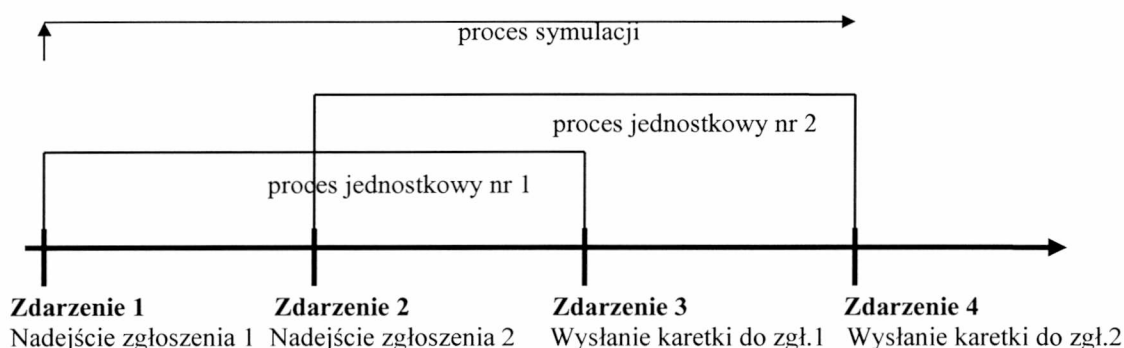
Każdy dyskretny model symulacyjny ma "trójstopniową strukturę hierarchiczną" (por. [52]). Najwyższy stopień zajmuje procedura *odmierzania czasu*. Środkowy poziom zajmują procedury dokonujące *symulacji zdarzeń*, natomiast na najniższym poziomie znajdują się funkcje *operacji podstawowych* (np. obliczenia matematyczne lub generowanie liczb losowych). Proces symulacji polega na tym, że procedura odmierzania czasu wybiera z listy zaplanowanych zdarzeń zdarzenie następne. Spośród wszystkich zdarzeń wybierane jest takie, którego planowany czas realizacji jest najbliższy bieżącemu symulowanemu czasowi. Po przesunięciu czasu symulowanego do zaplanowanego momentu pojawienia się zdarzenia proces kontroli przechodzi na poziom drugi, czyli do bloku, który wykonuje operacje na zdarzeniu. W trakcie procesu realizacji zdarzeń blok z poziomu drugiego posiłkuje się poziomem trzecim, który wykonuje podstawowe operacje matematyczne. Blok drugi odsyła następnie kontrolę z powrotem do procedury odmierzania czasu, która wybiera następne zdarzenie z listy (kalendarza).

Przedstawienie czasu

Kluczowym obiektem dyskretnego modelu symulacyjnego jest *kalendharz zdarzeń*, w którym przechowywane są informacje na temat wszystkich planowanych zdarzeń. Kalendharz zdarzeń służy do sterowania upływem czasu w trakcie symulacji. Terminy wystąpienia wszystkich zaplanowanych zdarzeń przechowywane są w nim w sposób uporządkowany według dnia i godziny. Kalendharz dopuszcza też możliwość przechowywania zdarzeń o tym samym terminie realizacji. Zdarzenia takie realizowane są sekwencyjnie, w kolejności zapisu

³ *Proces* to uporządkowany w czasie zbiór zdarzeń oddzielonych od siebie odcinkami czasu, które to zdarzenia opisują przejście obiektu przez system, począwszy od pojawienia się w systemie do momentu opuszczenia go [109].

do kalendarza. W miarę prowadzenia procesu symulacji, informacje zawarte w kalendarzu zdarzeń są uaktualniane, tzn. wykreślane są z niego dane dotyczące zdarzeń już zrealizowanych (lub będących w trakcie realizacji) a dopisywane są czasy wystąpienia nowych zdarzeń. Pobranie zdarzenia z kalendarza powoduje przesunięcie zegara symulacji na godzinę odpowiadającą terminowi realizacji zdarzenia. W zależności od typu pobranego zdarzenia inicjowany jest odpowiedni proces jednostkowy (por.rys.3.2).



Rys. 3.2. Zdarzenia, procesy jednostkowe, proces symulacji.

Elementy losowości

Losowość zdarzeń wymaga zastosowania mechanizmu generującego ciąg zdarzeń, z których każde charakteryzuje się określonym *rozkładem prawdopodobieństwa*. Rozkład ten określa losowe zachowanie się każdego elementu ciągu. W badaniach symulacyjnych najczęściej zakłada się, że zdarzenia ciągu są niezależne i mają taki sam rozkład. Pierwszym etapem realizacji losowości zdarzeń w badaniach symulacyjnych jest przygotowanie *liczb losowych*. Zasadniczą cechą liczb losowych jest to, że znajomość liczb występujących w przeszłości nie wpływa na skuteczność przewidywania liczb przyszłych, a szanse uzyskania kolejnej liczby przy kolejnej próbie nie ulegają zmianom.

Źródło liczb losowych powinno być wybrane po analizie trzech zagadnień:

- generowane liczby losowe powinny być niezależne i równomierne,
- liczba losowa powinna zawierać wyłącznie takie cyfry, dla których zbiór liczb pochodzący z przedziału (0, 1) będzie odpowiednio "gęsty",
- źródło powinno być efektywne.

W praktyce nie da się pogodzić tych trzech wymogów i w większości aktualnie stosowanych algorytmów generujących liczby losowe tworzy się nielosowe ciągi liczb

nazywane *liczbami pseudolosowymi*. Generatory liczb pseudolosowych dostarczają ciągów liczb, które spełniają pewne statystyczne własności jednakże są całkowicie deterministyczne. Znając bowiem konstrukcję generatora oraz jego parametry możemy bezbłędnie przewidzieć cały ciąg liczb. Takie podejście ma jednak swoje zalety, bowiem własności statystyczne uzyskanych ciągów liczb są zadowalające, a ponadto takie rozwiązanie pozwala na powtarzanie eksperymentu symulacyjnego w dokładnie takich samych warunkach wielokrotnie, co nie byłoby możliwe przy rezygnacji z determinizmu liczb produkowanych przez generatory.

Drugim etapem w przygotowaniu losowości procesów symulacyjnych jest wybór algorytmu generującego wartości zmiennej losowej o rozkładzie jednostajnym określonym w przedziale $(0, 1)$. Ostatni etap to przekształcenie zmiennej losowej o rozkładzie jednostajnym na zmienną losową X o danym rozkładzie (ciągłym, wykładniczym lub innym). Jeśli mamy do czynienia z eksperymentem symulacyjnym o dużych rozmiarach to trudnością może być efektywność metody generowania liczb pseudolosowych jak i zmiennych losowych. Należy więc wtedy położyć nacisk na szybkość metody kosztem innych parametrów.

Ocena zasadności modelu symulacyjnego

Jednym z trudniejszych problemów, z którymi musi zmierzyć się twórca modelu symulacyjnego jest sprawdzenie, czy zbudowany model w sposób właściwy opisuje modelowaną rzeczywistość. W teorii symulacji wprowadza się pojęcie *weryfikacji*⁴, *walidacji*⁵ i *wiarygodności*⁶ modelu. W procesie walidacji modelu dąży się do sprawdzenia czy model symulacyjny poprawnie opisuje system rzeczywisty. Proces *weryfikacji* pozwala sprawdzić, czy konceptualny model symulacyjny został poprawnie przetłumaczony na program komputerowy. Weryfikacja dotyczy zatem wewnętrznej spójności modelu, natomiast walidacja odnosi się do związków pomiędzy modelem a rzeczywistością. Model, który pomyślnie przeszedł weryfikację i walidację, i jest wykorzystywany w procesach decyzyjnych, uznawany jest za wiarygodny.

⁴ *Weryfikacja modelu* to proces dowodzenia, że transformacja modelu z jednej postaci w drugą przebiegała z odpowiednią dokładnością [10-13].

⁵ *Walidacja modelu* to proces dowodzenia, że model, w zakresie zastosowań dla których został skonstruowany, wykazuje się satysfakcjonującą dokładnością, spójną z założonymi celami badawczymi [10-13].

⁶ Jeżeli model symulacyjny i jego wyniki zostały zaakceptowane przez użytkowników, do których model jest adresowany, to model ten można uznać za *wiarygodny* [109].

W literaturze przedmiotu (por. [7, 8, 10-13, 90, 150-152]) wyróżniono kilkanaście zasad właściwie przeprowadzonego procesu walidacji i weryfikacji modelu. Trzy najistotniejsze z nich głoszą, że: (1) walidacja i weryfikacja modelu symulacyjnego nie są procesami jednostkowymi i nie stanowią wyraźnie wyodrębnionego etapu badania symulacyjnego. Traktować je należy jako proces ciągły, zachodzący podczas całego cyklu modelowania, (2) wyników procesu symulacji nie należy odbierać w kategoriach *prawda-falsz*. Nie można zatem dążyć do stwierdzenia, że model jest całkowicie fałszywy albo całkowicie poprawny. Ponieważ model jest tylko opisem rzeczywistości, całkowita poprawność budowanej repliki nie jest możliwa i (3) każdy model symulacyjny budowany jest w określonym celu i ocena jego wiarygodności odnosi się wyłącznie do postawionego celu. Sformułowany cel badania symulacyjnego określa w jakim stopniu model powinien być wiarygodny – czasami wystarcza jedynie 90% dokładności, czasami jednak aż 95%.

Jedną z ważniejszych prac zajmujących się problemem walidacji modeli symulacyjnych jest praca Naylora [131] przedstawiająca koncepcję trójstopniowej oceny zasadności modeli symulacyjnych. Autor wskazuje na wagę problemu rozwinięcia możliwie uniwersalnych kryteriów akceptowania modelu symulacyjnego i proponuje procedurę zawierającą metodologię stanowiska racjonalistycznego, empiryzmu oraz ekonomii pozytywistycznej argumentując, że „każde z wymienionych powyżej stanowisk metodologicznych stanowi konieczną procedurę oceny zasadności [...], ale też, że żadne z nich nie jest procedurą wystarczającą”. Pierwszy stopień oceny zasadności modeli polega na sformułowaniu zbioru postulatów dotyczących hipotez opisujących zachowanie się systemu (ang. *face validity*), który to zbiór powinien zostać zaakceptowany przez osoby związane z badanym systemem (eksperci, kierownicy, pracownicy) i nie powinien pozostawać w sprzeczności do obowiązującej teorii i wyników wcześniej przeprowadzanych badań. Drugi stopień polega na jakościowym sprawdzaniu założeń za pomocą dostępnych testów statystycznych. Trzeci stopień dotyczy testowania możliwości dokonania przez model predykcji zachowania się badanego systemu. W badaniu tym dąży się do sprawdzenia, czy wyniki procesu symulacji są porównywalne z danymi, których można spodziewać się poddając obserwacji system rzeczywisty. Wykorzystuje się w tym celu dane historyczne (tzw. walidacja historyczna) pochodzące z systemu rzeczywistego oraz dane uzyskane w wyniku eksperymentów symulacyjnych. Można również przeprowadzić symulację działania systemu w pewnej niedalekiej przyszłości i po upływie tego okresu porównać dane symulowane ze stanem faktycznym.

Podejście zaproponowane przez Naylora było rozwijane później przez innych autorów (por. [10-13, 93,150-152]) i obecnie dostępnych jest kilkadziesiąt technik, z których każda przeprowadza częściową walidację lub weryfikację modelu symulacyjnego. Niestety, nie jest dostępny algorytm ani procedura, które umożliwiłyby dokonanie wyboru właściwych technik co sprawia, że - analogicznie jak w przypadku pozostałych etapów procesu modelowania symulacyjnego - również przebieg oceny zasadności modelu zależy w dużej mierze od kompetencji i doświadczenia osób prowadzących badanie.

Projektowanie eksperymentów symulacyjnych i analiza wyników symulacji

Celem prowadzenia badań symulacyjnych jest uzyskanie informacji o zachowaniu się systemu, które byłyby użyteczne w procesach podejmowania decyzji. Jednak wyniki procesu symulacji nie dostarczają wprost odpowiedzi na postawione pytania. Rezultatem procesu symulacyjnego są zbiory danych, z *których* należy wyznaczyć szukane charakterystyki. Zatem wyniki symulacji muszą posiadać cechy prób losowych: muszą być reprezentatywne dla typowego zachowania systemu i muszą być odpowiednio liczne. W stochastycznych modelach symulacyjnych (a zatem także w modelach systemów ratownictwa medycznego) znaczącą rolę odgrywają procesy losowe, co sprawia, że wynik procesu symulacji należy również traktować jako zmienną losową. Przeprowadzając jednostkowe badanie symulacyjne i wykorzystując następnie uzyskane wyniki do oceny zachowania systemu rzeczywistego łatwo jest popełnić błąd i przeprowadzić fałszywe wnioskowanie. Aby wykryć zależności istniejące w systemie należy zrealizować wiele przebiegów symulacyjnych, a badania te zaplanować jako serię eksperymentów⁷.

W terminologii projektowania eksperymentów mówi się o *czynnikach*⁸ i *odpowiedziach*⁹. Czynniki można sklasyfikować jako *ilościowe*, czyli posiadające wartość numeryczną oraz *jakościowe*, czyli takie, których nie daje się w sposób naturalny skwantyfikować lub jako *kontrolowalne* oraz *niekontrolowalne*. Projektowanie układu eksperymentu ma na celu wyróżnienie takiej konfiguracji czynników, aby zrealizować cel badań symulacyjnych, czyli uzyskać poszukiwaną informację za pomocą jak najmniejszej liczby przebiegów symulacyjnych. W początkowej fazie eksperymentowania, kiedy nie można jeszcze wyróżnić tych czynników, które mają największy wpływ na szukaną

⁷ *Eksperyment symulacyjny* to jednokrotne wykonanie procesu symulacji na modelu komputerowym, [109].

⁸ *Czynnik* (ang. factor) to parametr wejściowy lub założenie strukturalne podstawowe dla opisu modelu [109].

⁹ *Odpowiedź* to informacja wynikowa opisująca działanie systemu [109].

odpowieź systemu, niezwykle przydatny jest *układ pełnoczynnikowy*, który uwzględnia kilka wartości (tzw. *poziomów*) wszystkich czynników lub *układ czynnikowy z częściową replikacją*, który pozwala ustalić główne efekty oraz interakcje dwuczynnikowe, z wykluczeniem skutków interakcji trzyczynnikowych i wyższego rzędu. W miarę nabywania coraz większej wiedzy na temat zachowania modelu, możemy posłużyć się *układami metamodeli*¹⁰ lub *układami powierzchni reakcji*¹¹.

Przed wykonaniem zaplanowanego układu eksperymentów prowadzący badanie musi jeszcze rozwiązać szereg problemów, które mogą doprowadzić do błędnej interpretacji danych wynikowych. Są to m.in.: (1) problem wyboru warunków początkowych symulacji, (2) problem wyboru warunków końcowych symulacji (czas trwania eksperymentu, wielkości próby), (3) problem wyboru momentów czasu, w których dokonywane będą obserwacje, (4) problem ustalenia długości czasu dochodzenia modelu do stanu równowagi i inne. Sposób rozwiązania powyższych problemów wiąże się ściśle z typem systemu i odpowiadającym mu rodzajem symulacji, która może być (analogicznie do typu systemu) skończona¹² lub nieskończona¹³. Równie istotne jest rozróżnienie danych zbieranych w trakcie stanu przejściowego (ang. transient phase) oraz stanu równowagi (ang. steady-state). W przypadku *symulacji skończonej* wystarczy przeprowadzić proces badania symulacyjnego taką ilość razy, aby uzyskać odpowiednio liczną próbę losową, którą następnie można poddać standardowym analizom statystycznym. W *symulacji nieskończonej* można posłużyć się jedną z technik, szczegółowo opisanych w pozycjach literaturowych (por. [131], [109]), na przykład metodą replikacji (arbitralne podejmowanie decyzji o długości przebiegu symulacyjnego a następnie powtarzanie przebiegów podobnie jak w symulacji skończonej), metodą średnich odcinkowych (wykonanie dostatecznie długiego przebiegu, najlepiej nie zawierającego okresu z zaznaczającym się wpływem warunków początkowych, a następnie podział przebiegu na odcinki o równej długości), metodą korelacyjną (estymacja wartości średniej z próbki z uwzględnieniem wpływu autokorelacji, za pomocą metody stosowanej przy analizie dyskretnych procesów stochastycznych), metodą analizy widmowej (posłużenie się funkcją

¹⁰ *Metamodel* to przybliżony model algebraiczny (np. regresji) modelu symulacyjnego pozwalający przewidzieć niektóre z jego odpowiedzi.

¹¹ *Układ powierzchni reakcji* to, mówiąc skrótowo, zbiór numerycznych odpowiedzi modelu na wybraną konfigurację czynników.

¹² *Symulacja skończona* (ang. terminating simulation) to taka symulacja, w której występuje naturalne zdarzenie wyznaczające długość okresu symulacji, [131].

korelacji do obliczenia wariancji) czy metodą regeneracyjną (wyszukiwania momentów powrotu systemu do stanu, który miał już miejsce). Każda z wymienionych metod ma swoje wady i zalety a dokonany wybór nigdy nie będzie w pełni satysfakcjonujący.

3.3. ANALIZA PORÓWNAWCZA MODELI SYMULACYJNYCH SYSTEMÓW RATOWNICTWA MEDYCZNEGO

3.3.1. Krótki przegląd modeli

Prekursorem modelowania symulacyjnego systemów pomocy doraźnej był Savas, który w roku 1969 opracował model dla jednej z dzielnic Nowego Jorku [153]. Model ten jest szczególnie istotny tak ze względu na swój nowatorski charakter, jak i z uwagi na przeprowadzony przez autora zakres prac badawczych. Prowadzone badania miały na celu testowanie alternatywnych decyzji lokalizacyjnych, w tym między innymi wprowadzenia dodatkowej stacji karetek i przeniesienia tam pewnej liczby zespołów, zwiększenia liczby karetek stacjonujących w szpitalu i utworzenia dodatkowej stacji. Za pomocą modelu wyznaczano nie tylko wartości podstawowych wskaźników działania (np. średniego czasu oczekiwania pacjenta na przyjazd karetki), ale także przeprowadzono szacunek kosztów związanych z wprowadzeniem nowych rozwiązań (zakup karetek, pensje personelu, założenie i utrzymanie nowej bazy).

Praca Savasa zapoczątkowała liczne badania nad modelami symulacyjnymi systemów mpd. Niektórzy autorzy stosowali połączenie metod symulacyjnych z analitycznymi, zarówno sieciowymi jak i teorii masowej obsługi. Berlin i Liebman [22] rozdzielili problem lokalizacyjny na dwa zagadnienia: zagadnienie lokalizacji kilku oddziałów mpd na terenie regionu oraz zagadnienie rozmieszczenia karetek w poszczególnych oddziałach. Do rozwiązania pierwszego problemu autorzy zastosowali lokalizacyjny model pokrycia zbiorów Toregasa i in. [por. 163], natomiast drugi problem rozwiązywali za pomocą modelu symulacyjnego. Swoveland i in [159] wykorzystali najpierw symulację do wyznaczenia podstawowych parametrów statystycznych (np. średniego czasu odpowiedzi na wezwanie) dla różnych reguł przydziału karetek, a następnie metodą podziału i ograniczeń poszukiwali

¹³ *Symulacja nieskończona* (ang. non-terminating lub inaczej steady-state simulation) to taka symulacja, dla której nie można określić zdarzenia wyznaczającego w sposób naturalny długość okresu symulacji, [131]. W modelach symulacyjnych systemów ratownictwa medycznego mamy do czynienia z symulacją nieskończoną.

najlepszego rozwiązania. Krańcowo odmienną metodę zastosowali Fujiwara i inn. [54-55] oraz Goldberg i inn [58], budując najpierw model programowania matematycznego w celu uzyskania zbioru kilku rozwiązań spełniających postawione warunki, a następnie przeprowadzając badania symulacyjne poddające szczegółowej analizie wcześniej uzyskane rozwiązania. Podejście stanowiące połączenie stochastycznej symulacji komputerowej i teorii masowej obsługi przedstawili m.in. Franci [56] oraz Fitzsimmons [53].

Szczególne stanowisko kwestionujące zasadność stosowania teorii masowej obsługi do rozwiązywania problemów mpd zaprezentowali Cantwell i in. [30], uważając że prawdopodobieństwo tworzenia się kolejek zgłoszeń, szczególnie w terenowych systemach mpd, jest bardzo małe. Swoje badania oparli zatem wyłącznie na symulacji komputerowej.

Odmienne zastosowanie modelowania symulacyjnego do analizy systemów mpd zademonstrowali Ignall i inn. [85]. Autorzy wykorzystali symulację w procesie walidacji prostych modeli analitycznych, stosowanych później z powodzeniem w jednym z okręgów Nowego Jorku.

Hamilton [74] opisuje szeroko zakrojone badania symulacyjne, których celem było zidentyfikowanie oraz ocena prawdopodobnych skutków zmian strukturalnych i operacyjnych planowanych w systemie ratownictwa medycznego w Filadelfii. Wyniki badań symulacyjnych miały również zapoczątkować intensywne prace badawcze nad globalnym modelem planowania usług zdrowotnych w okręgu.

Stosunkowo liczna grupa autorów [43, 58, 15] prezentuje modele symulacyjne, których celem jest rozwiązanie problemów lokalizacji / rozmieszczenia zasobów. Badania symulacyjne wyznaczają wartości wskaźników umożliwiających ocenę działania systemu mpd dla poszczególnych wariantów lokalizacyjnych.

Również w Polsce prowadzone były prace badawcze mające na celu opracowanie koncepcji wykorzystania stochastycznej symulacji komputerowej do wspomagania procesów decyzyjnych w systemach mpd, (por. [116-119, 122-126]). Efektem badań jest klasa prostych modeli symulacyjnych lokalnych systemów mpd [116-117], ogólny model symulacyjny uwzględniający specyfikę miejskich i regionalnych systemów ratownictwa medycznego [118,122,124], oraz - częściowo zrealizowany - mikrokomputerowy system wspomagania decyzji „EMS” ukierunkowany na zastosowania dydaktyczne [123]. Prowadzone prace miały początkowo na celu śledzenie zmian podstawowych charakterystyk lokalnego systemu mpd dla różnych wielkości zasobów i różnych parametrów rozkładów czasu pomiędzy zgłoszeniami. W dalszych etapach prac rozpatrywano problemy decyzyjne występujące w zarządzaniu systemem

mpd na poziomie województwa, na przykład: decyzje w przypadku wystąpienia wypadku masowego (katastrofy) z dużą liczbą ofiar, symulację działań organizacyjnych w systemie w przypadku lokalizacji nowej podstacji, podejmowanie strategicznych decyzji alokacyjnych, prognozę koniecznych środków przy aktualnych trendach potrzeb, zasobach i kosztach jednostkowych. Końcowym efektem prowadzonych prac jest opracowanie koncepcji pakietu dydaktycznego z zakresu symulacyjnego wspomagania decyzji w systemach mpd.

Wszystkie wymienione wyżej modele symulacyjne stosowały ilościowe wskaźniki działania w celu oceny skuteczności działań podejmowanych przez system ratownictwa medycznego, bądź w celu oceny wartości sugerowanych rozwiązań lokalizacyjnych. Alloway i Haddock [4-5] proponowali wykorzystanie modeli symulujących fizjologiczny stan pacjenta argumentując, że karetka jest tylko pojazdem mechanicznym natomiast to rodzaj i jakość świadczeń medycznych decydują o wyleczeniu pacjenta. Autorzy nie przedstawili jednak modelu, który skutecznie rozwiązywałby powyższy problem. Spójny model symulacyjny zawierający submodel fizjologiczny pozwalający wyznaczyć skalę urazu RTS zaprezentowali natomiast Wears i Winton [166]. Wartość RTS stanowiła podstawę do podjęcia decyzji o typie szpitala (pierwszy, drugi, trzeci poziom referencyjny¹⁴), do którego przewożony był pacjent.

3.3.2. Systemy rzeczywiste

Warunki funkcjonowania systemów ratownictwa medycznego położonych na terenach wiejskich i zurbanizowanych różnią się na tyle, że wprowadza się wyraźny podział na miejskie i terenowe (wiejskie) systemy mpd.

Jak wynika z badań przeprowadzonych w Stanach Zjednoczonych [68] w okręgu Waszyngton, gdzie mniej więcej połowa ludności zamieszkuje tereny miejskie a druga połowa tereny wiejskie, większość przypadków wezwań ma miejsce na terenach wiejskich, jednak obsługa tych przypadków jest zdecydowanie dłuższa. Wykazano, że zarówno średni czas odpowiedzi na wezwanie jak i średni czas transportu do szpitala są około dwukrotnie wyższe dla regionów wiejskich. Również prawdopodobieństwo zgonu pacjenta przed

¹⁴ W Polsce, określenie *pierwszy poziom referencyjny* obejmuje szpitale udzielające świadczeń zdrowotnych w czterech podstawowych specjalnościach medycznych: chorób wewnętrznych, chirurgii ogólnej, położnictwa i ginekologii, a także z zakresu anestezjologii i intensywnej terapii. *Drugi poziom referencyjny* obejmuje szpitale

przyjazdem karetki jest prawie siedmiokrotnie wyższe dla ofiar pochodzących z terenów nieurbanizowanych. Badania prowadzone w Polsce również potwierdzają tę prawidłowość. Jak wykazano w [91] natężenie umieralności z powodów urazów i zatruc przeważa wśród mężczyzn – mieszkańców wsi. Analiza wskaźnika zgonów z powodu urazów i zatruc w przeciągu ostatnich 25 lat w Polsce wskazuje na wyraźnie wyższą umieralność wśród ludności wiejskiej (por. również tab.1.2).

Różnice w parametrach obsługi pacjentów zamieszkujących tereny wiejskie i miejskie związane są z takimi aspektami systemów rzeczywistych, jak gęstość zaludnienia, drogowa sieć komunikacyjna oraz stan zasobów.

- Gęstość zaludnienia. Słabo zaludnione ale za to rozległe obszary wiejskie sprawiają, że znacznie wydłuża się zarówno czas dojazdu na miejsce wypadku jak i czas przewozu do szpitala przy jednoczesnym pogorszeniu, ze względu na stan dróg, warunków transportu chorego.
- Zasoby. Terenowe systemy mpd dysponują zazwyczaj niewielką (w porównaniu z oddziałami miejskimi) liczbą dobokaretek, natomiast dostęp do pomocy specjalistycznej jest znacznie trudniejszy, zarówno pod względem organizacyjnym jak i czasowym. Prowadzi to wydłużenia czasu oczekiwania na przyjazd karetki jak i do znacznych opóźnień w udzieleniu właściwej opieki specjalistycznej.
- Sieć komunikacyjna. Sieć dróg jest rzadsza na terenach nieurbanizowanych, ponadto jakakolwiek przeszkoda (zamknięty odcinek drogi, mostu) sprawia, że czas dojazdu do chorego może się znacznie wydłużyć.

Typowy terenowy system mpd w Polsce obsługuje jedno, dwa większe miasta oraz kilkadziesiąt miasteczek, wsi i osad. Jedno z miast stanowi stolicę regionu, mieszcząc na swoim terenie władze administracyjne (gminne) oraz publiczny ZOZ, któremu podlega system ratownictwa medycznego oraz szpital(e). Większość ludności regionu zamieszkuje tereny wiejskie. Stacja mpd związana jest najczęściej ze szpitalem i wyposażona jest w kilka zespołów wypadkowo-chorobowych oraz, czasami, w zespół „R-kowy” i/lub pediatryczny. W dotychczasowej strukturze systemów mpd funkcjonowały również karetki przewozowe. Pacjenci odwożeni są najczęściej do szpitala znajdującego się terenie regionu chociaż zdarzają się przypadki przewozu pacjentów do szpitala specjalistycznego położonego, na

wojewódzkie, natomiast *trzeci poziom referencyjny* to szpitale kliniczne państwowych uczelni medycznych oraz jednostki badawczo-rozwojowe podlegające Ministrowi Zdrowia i Opieki Społecznej.

przykład, w mieście wojewódzkim. Zgłoszenia napływające do systemu mpd odbierane są przez dyspozytorkę, która podejmuje decyzję o wysłaniu (bądź nie) karetki, ewentualnie wskazując również na typ zespołu (np. zespół reanimacyjny).

Struktura systemów pomocy doraźnej funkcjonujących w większych miastach jest bardziej złożona. W ich skład wchodzi zazwyczaj kilka mniejszych jednostek organizacyjnych - stacji pogotowia, z których każda dysponuje pewną liczbą zespołów chorobowo-wypadkowych, i/lub pediatrycznych i/lub „R-kowych”. Poszczególne stacje obejmują swoim działaniem pewien fragment całego obszaru. Zgłoszenia docierają poprzez (najczęściej) jeden numer telefoniczny do dyspozytora, który kieruje je do odpowiedniej podstacji. Miejsca odwozu medycznego obejmują ambulatoria, szpitale miejskie, wybrane przychodnie, kliniki.

Wszelkie informacje związane z obsługą wezwań spisywane są na tzw. kartach zleceń wyjazdu karetek.

Należy zauważyć, że również w innych krajach Europy oraz w Stanach Zjednoczonych ogólna struktura systemu ratownictwa medycznego (tj. wydzielona główna baza, podstacje, różne typy zespołów, rejestrowanie zgłoszeń i przydział karetek poprzez dyspozytora, różne typy miejsc odwozu pacjentów) jest podobna.

3.3.3. PROBLEMY DECYZYJNE

Zdecydowana większość modeli symulacyjnych systemów ratownictwa medycznego zajmuje się problemami alokacji zasobów. Podstawowym zadaniem modelu jest najczęściej pomoc w wyznaczeniu najlepszej lokalizacji stacji mpd [74, 58, 43, 153, 159, 30, 22, 154, 30-31], przy czym sposób oceny efektywności (skuteczności) działania systemu jest w różny sposób definiowany przez poszczególnych autorów (por. pkt. 3.3.6). Alokacja zasobów trwałych (czyli stacji mpd) jest też często łączona z problemem rozmieszczenia karetek w poszczególnych stacjach, przy uwzględnieniu (lub nie) różnych typów zespołów wyjazdowych (np. karetki „R-kowe”, pediatryczne, zwykłe i inne).

Rozszerzeniem zwykłego problemu lokalizacyjnego są badania polegające na analizie różnych konfiguracji lokalizacyjnych systemu pogotowia, na które składają się na przykład: zamknięcie pewnej liczby stacji, połączenie kilku mniejszych stacji w jedną większą, ustalenie innej lokalizacji istniejącej już stacji [74, 153], czy – zmiana lokalizacji stacji w

ciągu doby [58] zgodnie z naturalnymi trendami przemieszczania się populacji (przepływ ludności w ciągu dnia w kierunku z dzielnic mieszkalnych do centrum przemysłowo-handlowego oraz powrót w godzinach wieczornych).

Analiza problemu lokalizacji zasobów bywa też łączona z badaniami prognostycznymi, pozwalającymi ocenić skuteczność działania systemu mpd przy zmienionej intensywności zgłoszeń [54-55], w zmienionych warunkach drogowych powodujących na przykład wydłużenie czasów dojazdu na miejsce wypadku, czy w przypadku zmiany czasu trwania pomocy medycznej na miejscu [43].

W niektórych modelach symulacyjnych autorzy zajmują się, obok problemu alokacji zasobów, również analizą procedur obsługi zgłoszeń [58, 159], a w szczególności kryteriami przydziału karetek. Najczęściej stosowanym kryterium podstawowym jest czas dojazdu karetki na miejsce wypadku (wybór karetki o najniższym spodziewanym czasie dojazdu) modyfikowany o czynniki opisujące stan, dostępność i przepustowość ulic miejskich [58]. Rozważa się również kryterium uwzględniające ścisłą rejonizację pracy karetek [159]. W pierwszej kolejności przydziela się zawsze karetkę administracyjnie przypisaną do danego regionu, nawet jeżeli karetka z innego regionu znajduje się bliżej miejsca wypadku.

Obok głównego nurtu zastosowań modeli symulacyjnych do rozwiązywania problemów lokalizacyjnych systemów ratownictwa medycznego, pojawiają się również modele koncentrujące się na aspektach klinicznych udzielanych świadczeń. Analizie poddawana jest globalna strategia podejmowania decyzji o miejscu odwozu medycznego, które uzależnia się od fizjologicznego stanu pacjenta [166]. Badania mają na celu takie zmodyfikowanie stosowanych reguł wyboru szpitala leczącego przez zespół pogotowia aby, nie pogarszając wskaźników dostępu pacjenta do fachowej opieki medycznej, poprawić jednocześnie wskaźniki przyjęć w szpitalach każdego poziomu referencyjnego.

3.3.4. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA MODELI SYMULACYJNYCH

Jednym z istotniejszych założeń, które muszą przyjąć twórcy modeli symulacyjnych systemów mpd jest określenie sposobu wprowadzania danych o zgłoszeniach do modelu. Stosowane są dwa podejścia, z których każde ma swoje wady i zalety. Pierwsze z nich polega na przyjęciu rozkładu teoretycznego, za pomocą którego opisuje się odstęp czasu pomiędzy kolejnymi zgłoszeniami (por.[52, 59]). Przy opisie systemów mpd (jak i innych systemów masowej obsługi) można przyjąć założenie, że zgłoszenia są całkowicie przypadkowe, to

znaczy mogą wystąpić w dowolnej chwili z jedynym ograniczeniem, że zachowane musi być średnie natężenie zgłoszeń. Przy tych założeniach można wykazać, że rozkład interwałów jest wykładniczy, a funkcja gęstości prawdopodobieństwa interwału dana jest wzorem: $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ ($t \geq 0$), gdzie λ jest średnią liczbą zgłoszeń na jednostkę czasu. Z kolei prawdopodobieństwo nadejścia n zgłoszeń w przedziale o długości t opisane jest rozkładem dyskretnym, zwanym rozkładem Poissona:

$$P(n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

Krytycy tego podejścia uważają, że nie można mówić o całkowitej przypadkowości powstawania stanów nagłych, ponieważ częstotliwość pojawiania się tychże stanów związana jest ze zmieniającą się lokalizacją populacji w ciągu dnia. Proponują oni zatem wykorzystanie danych empirycznych do opisu strumienia zgłoszeń, co z kolei budzi zastrzeżenia w przypadku prowadzenia badań prognostycznych.

Ze strumieniem zgłoszeń ściśle związane jest założenie odnoszące się do podziału wszystkich wezwań na w miarę jednorodne grupy. Najczęściej przyjmuje się, że w systemie rzeczywistym występują dwa podstawowe typy zgłoszeń, to jest zgłoszenia rzeczywiście pilne (ostre stany nagłego zagrożenia życia) oraz zgłoszenia zwykłe. W polskiej rzeczywistości należy uzupełnić ten podział o zgłoszenia przewozowe, nie wymagające obecności lekarzy, który były dotychczas dominującą pozycją w ogólnej strukturze wezwań.

Z typem zgłoszenia związany jest z kolei czas trwania pomocy medycznej na miejscu urazu. W modelach przyjmuje się albo pewną stałą, uśrednioną wartość charakterystyczną dla danego typu zgłoszenia, albo przeprowadza się bardziej szczegółową analizę wyznaczając losowy rozkład czasów obsługi zależny nie tylko od typu zgłoszenia (rzeczywiście pilne \ zwykłe) ale także od typu zespołu („R-kowy”, wypadkowo-chorobowy).

Wprowadzenie do modelu symulacyjnego procedur przydziału i wysyłania karetek na miejsce urazu wymaga zdefiniowania relacji logicznych, które w sposób spójny i niesprzeczny opiszą zachowanie się systemu. Analiza danych pochodzących z różnych źródeł wskazuje, że w rzeczywistym systemie nie funkcjonują przejrzyste i w pełni przewidywalne zasady przydziału karetek. Decyzja podejmowana przez dyspozytora zależy od tak wielu czynników, że trudno jest zdefiniować powielany schemat postępowania. Niemniej jednak przyjmuje się pewne „intuicyjnie poprawne” założenia opisujące procedurę przydziału karetek:

- (1) do urazu wysyłana jest najbliższa karetka (spośród wszystkich dostępnych lub spośród administracyjnie przydzielonych do obsługi danego regionu),
- (2) karetka może być powtórnie przydzielona dopiero po powrocie do bazy lub możliwe jest zawrócenie karetki do innego, pilniejszego urazu;
- (3) do każdego stanu nagłego wysyłana jest jedna karetka.

Powyższe założenia mogą być oczywiście modyfikowane, na przykład w modelu uwzględniającym urazy masowe, do których wysyłanych jest jednocześnie kilka zespołów.

Kolejne założenie dotyczy klinicznych aspektów udzielanej pomocy. Zdecydowana większość modeli symulacyjnych systemów mpd klasyfikuje (mniej lub bardziej szczegółowo) przyczyny wezwań i uzależnia od nich zarówno czas dojazdu karetki na miejsce jaki i czas trwania interwencji, nie zajmując się jednak oceną adekwatności i skuteczności udzielanej pomocy. Niektórzy jednak autorzy [166] uwzględniają fizjologiczny stan pacjenta i zmiany które w nim zachodzą na skutek odniesionych obrażeń i przeprowadzanych zabiegów medycznych. Informacje te są wykorzystywane do wyznaczania poziomu Skali Ciężkości Urazu TS, stanowiącego podstawę do podejmowania decyzji terapeutycznych i transportowych przez personel pogotowia.

W większości modeli symulacyjnych systemów ratownictwa medycznego szczegółowej analizie poddaje się jedynie pierwszą część procesu obsługi zgłoszenia, to jest okres czasu od przyjęcia wezwania do momentu dojazdu karetki na miejsce wypadku. Część druga tego procesu obejmująca pobyt zespołu u pacjenta a następnie przewóz do szpitala jest najczęściej opisywana za pomocą odpowiednich losowych rozkładów czasowych. Przyjmuje się przy tym założenie o nieustannej dostępności szpitali oraz o wszechstronności usług świadczonych przez poszczególne jednostki leczące. Założenia te wynikają ściśle z przyjętego podstawowego celu badawczego, którym jest (por.pkt.3.2.3) rozwiązanie problemu lokalizacyjnego w taki sposób, aby zapewnić pacjentowi odpowiednio krótki czas dostępu do świadczeń pogotowia (t.j. do przyjazdu karetki). Modele symulacyjne, które zajmują się problemami natury strategicznej (np. wypracowanie ogólnych reguł ułatwiających wybór szpitala leczącego), muszą zdefiniować zasady zapewniania pacjentowi dalszych świadczeń medycznych. W tym celu wprowadzają założenia określające typ szpitala – miejsca odwozu medycznego, zasady dostępności szpitala a nawet warunki, które muszą być spełnione aby szpital, do którego przewieziony został pacjent mógł odesłać go do innej jednostki leczącej.

3.3.5. DANE WEJŚCIOWE

Dane, które należy zebrać i przetworzyć aby następnie zasilić nimi model symulacyjny można podzielić na kilka podstawowych grup. Grupa pierwsza to dane na temat struktury regionu administracyjnego obsługiwane przez system ratownictwa medycznego. Rodzaj zbieranych informacji ściśle zależy od zastosowanego modułu umiejscawiania zgłoszeń i ustalania trasy przemieszczania się karetek (por.pkt.3.3.7), jednak na pewno niezbędne jest pozyskanie charakterystyk terytorialnych (gminy, miejscowości, ulice), transportowych (sieć dróg i połączeń komunikacyjnych) a czasami także demograficznych i epidemiologicznych.

Druga grupa danych wejściowych to informacje o strukturze i zasobach systemu mpd. Należy uzyskać opis podziału systemu na poszczególne typy jednostek administracyjnych (filie, podstacje) z zaznaczonym rejonem działania (jeżeli podział taki występuje), charakterystykę zasobów mobilnych (typy zespołów ratunkowych oraz ich liczba stacjonująca w każdej podstacji z uwzględnieniem harmonogramu pracy) oraz wykaz, lokalizację i charakterystykę jednostek leczących (szpitale, kliniki, przychodnie), do których przewożeni są pacjenci pogotowia.

Trzecia grupa danych dotyczy działania systemu mpd i obejmuje informacje na temat miejsca pochodzenia zgłoszeń i godziny ich wpłynięcia do dyspozytora pogotowia oraz - na temat przebiegu procesów obsługi zgłoszeń przez zespoły medyczne. Zaliczyć tu należy informacje o typie wysłanego zespołu, miejscu stacjonowania zespołu w momencie przydziału zgłoszenia, godzinie wyjazdu karetki, godzinie dojazdu karetki na miejsce, czasie prowadzenia czynności medycznych na miejscu wypadku, postawionej diagnozie, typie szpitala do którego wysłany został pacjent, czasie zwolnienia karetki i inne. Informacje tej grupy znajdują się przeważnie na kartach zleceń wyjazdów zespołów ratunkowych, chociaż może okazać się, że nie wszystkie potrzebne dane są dostępne. Zebrane dane mogą być wykorzystane bądź jako zawartość rozkładów empirycznych, bądź - mogą posłużyć do zdefiniowania teoretycznych rozkładów losowych oraz do wyestymowania parametrów tych rozkładów.

W modelach, które zostały rozszerzone o symulację stanu fizjologicznego pacjenta, należy zgromadzić dane umożliwiające zastosowanie wybranego systemu oceny. Przykładowo, w przypadku uwzględniania w modelu skali ciężkości urazu RTS potrzebne będą informacje na temat wartości ciśnienia skurczowego krwi, częstości oddechów oraz oceny centralnego układu nerwowego.

3.3.6. METODY OCENY SKUTECZNOŚCI DZIAŁANIA SYSTEMÓW

Kryteria oceny skuteczności działania systemu stosowane najczęściej w modelach symulacyjnych systemów ratownictwa medycznego należą do grupy tak zwanych *mierników funkcjonowania systemu* (por. pkt. 2.4.). Kryterium podstawowym jest zwykle średni czas jaki upływa pomiędzy odebraniem przez dyspozytora zgłoszenia a dojazdem karetki na miejsce urazu. Jeżeli w modelu symulacyjnym zgłoszenia klasyfikowane są z podziałem na zgłoszenia nagłego zagrożenia życia (tzw. zgłoszenia rzeczywiście pilne) oraz zgłoszenia zwykłe, analizuje się oddzielnie oba symulowane czasy. Odmianą tego wskaźnika jest wyznaczanie prawdopodobieństwa zdarzenia, że czas odpowiedzi na wezwanie przekroczy pewien, ustalony jako maksymalny, poziom. Drugim kryterium, traktowanym jako kluczowe w analizie wyników symulacji, jest stopień wykorzystania poszczególnych karetek liczony najczęściej jako procent nominalnego czasu pracy zespołu, w którym karetka była zajęta obsługą zgłoszeń.

Dodatkowe wskaźniki stosowane w modelach są najczęściej również związane z szybkością reagowania systemu i wyraża się je na przykład, jako: procent zgłoszeń, dla których czas reakcji przekroczył pewien poziom, najdłuższy zarejestrowany czas oczekiwania zgłoszenia na przyjazd karetki, liczbę zgłoszeń, do których natychmiast nie została wysłana karetka, czas oczekiwania zgłoszeń w kolejce i inne.

W nielicznych pracach napotkać można wskaźniki informujące o dodatkowych kosztach całkowitych i operacyjnych, które powstaną na skutek zwiększenia liczby karetek czy też uruchomienia nowej podstacji.

W modelach, w których symulowany jest również stan fizjologiczny pacjenta, mogą być stosowane wskaźniki odnoszące się bezpośrednio do stanu zdrowia chorego, a ściślej – do zmian, które następują w organizmie na skutek upływu czasu.

3.3.7. MODELE ASPEKTÓW DYNAMICZNYCH

W każdym modelu symulacyjnym systemu ratownictwa medycznego, w którym podejmowany jest problem wyboru karetki według kryterium odległości bądź spodziewanego czasu dojazdu na miejsce urazu, oraz symulowane są procesy przemieszczania się karetek po

obsługiwanym regionie (dojazd do chorego, przewóz do szpitala, powrót do bazy) należy opracować moduł pozwalający wyznaczyć czasy przejazdu zespołów pomiędzy dwoma dowolnymi punktami regionu. W tym celu budowane są różne modele analityczne, zwane *modelami przemieszczania się karetek* (ang. „travel time models”).

Jedno z podejść, zaproponowane przez Volza [169], pozwala wyznaczyć średni czas przejazdu karetki a następnie oszacować, na podstawie danych empirycznych, wariancję. Zaletą tego podejścia jest to, że nie są naliczane czasy przejazdu pomiędzy każdymi dwiema przylegającymi do siebie strefami, oraz że nieznanym pozostaje rozkład losowy opisujący czasy dojazdu karetek na miejsce urazu. Model zaproponowany przez Volza został rozwinięty, zmodyfikowany i wykorzystany w modelu symulacyjnym opisanym przez Goldberga i in. [58]. Autorzy stwierdzili, że algorytm przemieszczania się karetek powinien umożliwiać wyznaczenie dwóch wielkości: średniego czasu przejazdu oraz wariancji czasu przejazdu pomiędzy każdą parą punktów typu *baza-dowolna strefa*. Czas przejazdu karetki od bazy do miejsca urazu charakteryzuje się bowiem wysoką wariancją wynikającą z następujących przesłanek:

- dokładny punkt lokalizacji karetki, w którym rozpoczynana jest obsługa zgłoszenia, pozostaje nieznanym,
- różna jest lokalizacja zgłoszeń w obrębie tej samej strefy,
- szlaki komunikacyjne, po których poruszają się karetki charakteryzują się różnym stopniem nasilenia ruchu

i stąd – czasy przejazdu po dwóch identycznych trasach mogą znacznie różnić się między sobą. W modelu zakłada się, że do zgłoszeń karetka wysyłana może być wyłącznie z bazy. Założenie to zgodne jest z wynikami obserwacji empirycznych przeprowadzonych w systemie rzeczywistym. Po drugie, wszystkim zgłoszeniom pochodzącym z danej strefy przypisuje się jedną „uśrednioną” lokalizację wewnątrz strefy. Poprawność tego założenia jest tym wyższa im mniejsza jest dana strefa. Trzecie założenie dotyczy stacjonarności rozkładu wariancji czasu przejazdu ze względu na godzinę wpłynięcia zgłoszenia do systemu oraz lokalizację urazu. Czwarte założenie uwzględnia fakt, że na różnych typach dróg rozwijana jest różna prędkość przez kierowcę karetki. Rozróżnia się cztery typy dróg: F (autostrady), M (drogi szybkiego ruchu), NM (inne drogi główne), L (drogi lokalne). Dla każdej pary punktów *baza-strefa* ustala się trasę przejazdu karetki uwzględniając cztery typy dróg, a następnie szacuje się czas przejazdu za pomocą następującej funkcji regresji:

$$\hat{t}_{ij} = b_0 + b_1 F + b_2 M + b_3 NM + b_4 L + e$$

gdzie $\hat{t}_{ij}$ to przewidywany średni czas przejazdu pomiędzy bazą i a strefą j . Współczynniki regresji b_1, b_2, b_3, b_4 określają prędkość osiąganą na drodze każdego typu powyżej pewnego stałego współczynnika b_0 , natomiast współczynnik e to błąd pomiędzy wielkością przewidywaną a rzeczywistą, który można wyznaczyć za pomocą standardowej metody błędu średniokwadratowego. Wariancję czasu przejazdu określa się poprzez porównanie rzeczywistego i przewidywanego czasu przejazdu i wyliczenie wielkości popełnionego błędu. Wartości błędów uzyskane dla każdego zgłoszenia rzeczywistego są przedstawiane w postaci histogramu i normalizowane w celu uzyskania funkcji rozkładu błędu.

Algorytm wyznaczania czasu przejazdu pomiędzy dowolną parą *baza-strefa* składa się z następujących kroków: wyznaczenie średniego przewidywanego czasu przejazdu za pomocą funkcji regresji, dodanie składnika losowego uzyskanego z funkcji rozkładu błędu, wygenerowanie liczby losowej z przedziału $[0,1]$ i odczytanie za pomocą histogramu wartości, przy której skumulowany rozkład błędu osiąga wartość równą wygenerowanej liczbie losowej.

Cantwell i in [30] nie badali czasu dojazdu na miejsce urazu ale całkowity czas obsługi, czyli czas jaki upływa od wyjazdu karetki do powrotu do bazy. Założono, że czas ten składa się z dwóch składników: minimalnego czasu przejazdu wyznaczanego na podstawie odległości, którą pokonuje karetka oraz składnika losowego. Przyjęto, że prędkość karetki jest wielkością stałą, równą 30 mil/godzinę, stąd możliwe było wyznaczenie czasu potrzebnego na dojazd karetki na miejsce urazu i powrót do bazy. Po odjęciu uzyskanej wielkości od posiadanych danych empirycznych o całkowitym czasie obsługi, możliwe było wyznaczenie rozkładu czasu pobytu na miejscu wypadku. Autorzy przyjęli, że uzyskana wielkość to czas spędzony bezpośrednio u chorego plus dodatkowy składnik, który wynika z różnej lokalizacji zgłoszeń w danej strefie w stosunku do przyjętego centralnego punktu tej strefy. Bezpośrednio przeprowadzane obserwacje pozwoliły określić rozkład czasu pobytu u chorego co pozwoliło ostatecznie wyznaczyć wielkość rozkładu czynnika losowego.

Prostszy model szacowania czasu przejazdu przedstawili Fujiwara i in [54, 55]. Autorzy założyli, że odległość pomiędzy dwoma dowolnymi punktami jest iloczynem odległości euklidesowej oraz pewnej stałej, wyznaczonej za pomocą funkcji regresji liniowej dla posiadanego zbioru danych (w modelu wyliczono wartość tej stałej jako 1.2). Zależność

między czasem przejazdu a odległością wyznaczana jest za pomocą tak zwanego prawa kwadratów. Autorzy założyli, że przy mniejszych odległościach karetka nie osiąga nigdy prędkości maksymalnej, ale przez pierwszą połowę trasy zwiększa prędkość, by następnie hamować w trakcie pokonywania drugiej połowy. Przy dłuższych przejazdach, po początkowym okresie zwiększania prędkości, karetka osiąga prędkość maksymalną, z którą następnie porusza się przez większość pokonywanej trasy. Matematycznie, zależność tę wyraża się następująco:

$$E(t) = \begin{cases} c\sqrt{D} & \text{dla } D \leq d, \\ a + bD & \text{dla } D \geq d. \end{cases}$$

gdzie $E(t)$ to oczekiwany czas przejazdu na odległość D , natomiast d to odległość, po przebyciu której karetka osiąga prędkość maksymalną. Parametry a , b , c i d są oszacowane empirycznie za pomocą metody regresji najmniejszych kwadratów. Powyższy algorytm autorzy stosują do wyznaczenia wartości trzech czasów przejazdu: z bazy na miejsce wypadku, z miejsca wypadku do szpitala oraz ze szpitala do bazy.

Jeszcze inne podejście zaprezentowali Wears i Winton, [166] oraz Lubicz i Mielczarek, [118]. Sformułowanie zagadnienia ustalania trasy przejazdu karetek w postaci problemu lokalizacyjnego pozwala potraktować strukturalną mapę regionu obsługiwanego przez system mpd jako sieć połączeń, w której każdy wyróżniony obszar geograficzny (takie jak poszczególne dzielnice mieszkalne, mosty, szpitale, itd.) można uznać za węzły sieci, natomiast odległości pomiędzy środkami tych obszarów można przedstawić w postaci dwustronnych łuków sieci. Łukom przypisuje się pewne wagi (wyrażone na przykład jako czas przejazdu pomiędzy węzłami sieci), które mogą zmieniać się w ciągu doby i odzwierciedlać w ten sposób różne warunki komunikacyjne panujące na drogach. Takie sformułowanie problemu pozwala zastosować znane algorytmy sieciowe, na przykład do wyszukania najkrótszej drogi w sieci połączeń lub też do wyznaczenia najkrótszego połączenia między dowolnymi węzłami sieci. Zaletą tego podejścia jest możliwość wcześniejszego wyznaczenia czasów przejazdu między dowolnymi węzłami sieci i przechowywanie uzyskanych wyników w bazie danych, z której następnie pobierane są informacje w trakcie trwania procesu symulacji. Pozwala to na znaczne skrócenie czasu trwania eksperymentów symulacyjnych.

3.3.8. WERYFIKACJA I WALIDACJA MODELI

Wysiłek twórców modeli symulacyjnych systemów ratownictwa medycznego jest w głównej mierze kierowany na proces budowy i oprogramowania modelu natomiast etap walidacji i weryfikacji (WiW), stanowiący integralną część całego procesu modelowania, uzyskuje zdecydowanie mniej uwagi. Spostrzeżenie to pozwala wysnuć następujący wniosek: *albo autorzy nie uznają za istotne (lub celowe) dzielenie się swoimi doświadczeniami dotyczącymi zastosowanych przez siebie metod WiW, albo ocenę zasadności modelu potraktowali marginesowo*. Jednocześnie ukazuje się wiele publikacji poświęconych teorii WiW modeli symulacyjnych (por. [10-13], [150-152]), w których autorzy stwierdzają, że „problemy pojawiające się na polu modelowania symulacyjnego powstają najczęściej na skutek nieznamomości i niezrozumienia zasad prowadzenia WiW modelu symulacyjnego”, [10]. Często praktyką jest również przerzucenie na użytkownika odpowiedzialności za właściwy wybór różnicowanych parametrów i zgłębianie przyczyn zaobserwowanych różnic pomiędzy obserwowanymi wynikami rzeczywistymi a symulowanymi.

Najczęstszą metodą walidacji modeli symulacyjnych systemów mpd jest walidacja historyczna (por.[44, 49, 86, 119]), to znaczy porównanie wyników działania modelu z posiadanymi danymi rzeczywistymi. Przy planowaniu eksperymentów symulacyjnych autorzy chętnie posługują się wariancją wybranego wskaźnika (lub wskaźników) i na tej podstawie wyznaczają liczbę przebiegów oraz ich długość (por. [44, 49]). Wyboru wskaźników dokonuje się najczęściej arbitralnie, biorąc pod uwagę cel prowadzonych badań oraz rozwiązania przyjęte w literaturze przedmiotu (por. pkt.3.3.6).

Jedną z nielicznych prac, w której szczegółowo opisano walidację modelu symulacyjnego systemu mpd jest [58]. Do celów walidacji autorzy użyli trzech wskaźników: ogólnego wskaźnika odpowiedzi na wezwanie (procent wszystkich zgłoszeń, do których karetka dotarła w ciągu 8 minut), strefowego wskaźnika odpowiedzi na wezwanie (procent zgłoszeń z danej strefy, do których karetka dotarła w ciągu 8 minut), oraz współczynnika wykorzystania karetek. Ocenie poddano przede wszystkim reguły przydziału karetek ze strefy bazowej w celu sprawdzenia czy poszczególne strefy były obsługiwane przez właściwą karetkę. Autorzy uznali bowiem, że przydział karetki nie pokrywający się z tym, który miał miejsce w systemie rzeczywistym, dyskwalifikuje model. Ocenę zasadności modelu przeprowadzono w czterech aspektach: walidacji „zewnętrznej” (model powinien być

zaakceptowany przez jego późniejszych użytkowników), „strukturalnej” (wyniki funkcjonowania modelu powinny pokrywać się z tymi, które obserwowane są w systemie rzeczywistym), „technicznej” (założenia dotyczące danych nie powinny odbiegać od rzeczywistości), oraz „replikatywnej” (model powinien poprawnie odtwarzać historyczne stany systemu). Na podstawie pięciu pilotowych przebiegów symulacyjnych oszacowano wariancje wybranych wskaźników działania, co z kolei umożliwiło wyznaczenie liczby powtórzeń w eksperymencie symulacyjnym. Szczególnej uwadze poddano model przemieszczania się karetek, modyfikując kilkakrotnie zastosowaną formułę analityczną poprzez porównywanie wyników uzyskiwanych przez model z danymi rzeczywistymi. Poprawiano też zastosowany w modelu podział regionu na strefy oraz zmieniano prędkości karetek na różnych typach dróg.

Wears i Winton, [166] wspominają w swojej pracy o weryfikacji programu komputerowego poprzez niezależnie przeprowadzoną kontrolę poszczególnych procedur oraz śledzenie działania całego programu symulacyjnego. Autorzy przeprowadzili walidację historyczną modelu opierając się na posiadanych danych medycznych, ale przyznają że proces oceny zasadności modelu powinien być kontynuowany.

Lubicz i Mielczarek (por.[118], [119]) przeprowadzili wstępną weryfikację i walidację regionalnego modelu symulacyjnego systemu mpd. Realizacja komputerowa modelu poddawana była szczegółowej weryfikacji w miarę dobudowywania kolejnych procedur do głównej struktury programu. Analizą walidacyjną objęto natomiast dwie spośród trzech faz wielostopniowej oceny zasadności modeli podanej przez Naylora. Uzasadniając postulaty przyjęte przy budowie modelu, poddano analizie wybrane parametry wejściowe modelu, wykorzystując standardowy test zgodności chi-kwadrat. Testem objęto między innymi: rozkład czasu pomiędzy nadejściem dwóch kolejnych zgłoszeń, udział procentowy zgłoszeń o poszczególnych priorytetach w ogólnej strukturze zgłoszeń oraz udział procentowy zgłoszeń wymagających hospitalizacji w całkowitej liczbie zgłoszeń. W drugiej fazie walidacji zastosowano analizę prospektywną - badano wpływ zmian parametrów wejściowych na podstawowe parametry wyjściowe. I tak, analizowano wpływ zmiany liczby karetek i intensywności napływania zgłoszeń na kształtowanie się trzech parametrów wyjściowych: średniego czasu oczekiwania na rozpoczęcie obsługi, średniego czasu oczekiwania na hospitalizację oraz stopnia wykorzystania karetek.

4. METODYKA BUDOWY MODELU SYMULACYJNEGO SYSTEMU RATOWNICTWA MEDYCZNEGO

4.1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PROPONOWANEJ METODYKI

Analiza symulacyjna jest opisową techniką modelowania. Oznacza to, że nie istnieje zestaw reguł, procedur, kroków, które stanowiłyby integralną część modelu. Procedura budowy i wykorzystania modelu symulacyjnego musi być stworzona każdorazowo podczas prowadzenia analizy symulacyjnej. Mimo to, w procesie tym można wyróżnić kilka podstawowych etapów. Są to (patrz również Załącznik nr 1):

1. Sformułowanie problemu
2. Zebranie i analiza danych wejściowych
3. Sformułowanie modelu matematycznego
4. Budowa programu komputerowego
5. Weryfikacja i walidacja modelu
6. Projektowanie układu eksperymentów
7. Analiza wyników

Poszczególne etapy modelowania symulacyjnego, chociaż wymieniane sekwencyjnie, nie są realizowane ściśle w tej kolejności ale pojawiają się kilkakrotnie w trakcie analizy symulacyjnej a ich powtórna realizacja wymuszana jest przez wyniki prac nad innymi etapami lub – na skutek uzyskania dodatkowych informacji zmieniających w sposób zasadniczy wizję realizacji każdego kroku analizy.

Fakt braku szczegółowych reguł tworzenia modeli symulacyjnych rzutuje znacząco na rzeczywiste możliwości wykorzystania symulacji we wspomaganiu procesów decyzyjnych. W symulacji systemów ratownictwa medycznego pojawia się kilka zagadnień, które dodatkowo jeszcze w istotny sposób utrudniają budowę zasadnych i użytecznych modeli symulacyjnych. Zagadnienia te to przed wszystkim:

- określenie stopnia złożoności modelu, który powinien jednocześnie umożliwiać analizę problemów na szczeblu makro w odniesieniu do całego systemu pomocy doraźnej w danym regionie, jak i na szczeblu mikro zajmując się indywidualnym procesem leczniczym poszczególnych grup pacjentów,

- definicja wejściowych rozkładów losowych charakteryzujących się niestacjonarnością, co z definicji wyklucza stosowanie, powszechnie przyjmowanego w literaturze z dziedziny symulacji, rozkładu wykładniczego o stałym parametrze do opisu strumienia intensywności napływania zgłoszeń,
- uwzględnienie modeli aspektów dynamicznych, do których przede wszystkim zaliczane są modele przemieszczania się karetek,
- przebieg procesu weryfikacji i walidacji modelu, który ściśle związany jest z pozyskaniem niezależnych obserwacji w systemie działającym w sposób nieprzerwany, a więc takim, gdzie nie występuje jasno określony moment zakończenia funkcjonowania systemu (i zaprzestania procesu symulacji).

Zaproponowana w niniejszej pracy metodyka budowy modelu symulacyjnego systemu ratownictwa medycznego wykorzystuje podejście, które można określić mianem *stochastycznej, dyskretnej symulacji zdarzeniowej*. Ze względu na fakt, że większość zmienności występujących w systemie mpd ma charakter losowy (czas nadejścia zgłoszenia, lokalizacja i charakter zgłoszenia, czas trwania pomocy medycznej udzielanej przez zespół, konieczność leczenia szpitalnego oraz wiele innych) i do ich opisu powinny być wykorzystane losowe rozkłady prawdopodobieństw, symulacja stochastyczna wydaje się być odpowiednim narzędziem modelowania. W stanach obiektów systemu ratownictwa medycznego zmiany pojawiają na skutek zaistnienia zdarzeń dyskretnych (nadejście zgłoszenia, wyjazd zespołu, dojazd na miejsce wypadku i inne). Do przeprowadzenia procesu symulacji można zatem wykorzystać jeden ze sposobów budowy modeli zdarzeń dyskretnych, a mianowicie koncepcję planowania zdarzeń (symulację zdarzeniową).

Przedstawiona metodyka budowy modeli symulacyjnych systemów ratownictwa medycznego jest zgodna z ogólną strukturą procesu modelowania symulacyjnego, w którym wyróżnia się kilka podstawowych etapów modelowania (por. Załącznik 1).

Budowę modelu symulacyjnego rozpoczęto od przedstawienia badanego systemu i sformułowania celu badań (por. rozdziały 4.2 i 4.3). Następnie (etap zebrania i analizy danych – por. roz. 4.4) zaproponowano procedurę definiowania atrybutów wejściowych systemu ratownictwa medycznego szczególnie dużo uwagi poświęcając takim zagadnieniom jak dobór wejściowych rozkładów losowych oraz projektowanie modułu przemieszczania się karetek. Podstawowe rozkłady wejściowe w modelach ratownictwa medycznego opisują momenty pojawiania się stanów nagłych oraz czas trwania obsługi pacjentów na miejscu wypadku.

Modelujący ma do wyboru dwie drogi: opracowanie rozkładów teoretycznych lub wykorzystanie rozkładów empirycznych. Każde podejście ma swoje wady i zalety: przewagą rozkładów empirycznych jest to, że ściśle odpowiadają danym rzeczywistym. Rozkłady teoretyczne są jednak łatwiejsze do wykorzystania, szczególnie w badaniach prognostycznych, w których chcemy poznać odpowiedź systemu na zdarzenia nie mające miejsca w rzeczywistości historycznej. W pracy przedstawiono analizę próby losowej danych wejściowych prowadzącą do sformułowania rozkładów empirycznych oraz teoretycznych, opisujących różne atrybuty systemu. Szczegółowo opisano zarówno proces formułowania rozkładów losowych oraz ich algorytmizowania, jak również weryfikację przyjętych założeń w trakcie analizy zasadności modelu. Zaproponowano sposób wykorzystania algorytmu symulacji stochastycznej według rozkładów zmiennych losowych ze zmiennymi parametrami do opisu procesu intensywności strumienia napływania zgłoszeń do oddziałów mpd. Omówiono założenia kodów lokalizacyjnych i przedstawiono poszczególne etapy procesu przygotowania danych do pełnego opisu założeń lokalizacyjnych w modelu. Opracowano i przedstawiono model analityczny przemieszczania się karet wykorzystujący algorytm sieciowy Floyd'a.

W kolejnym etapie badania symulacyjnego (etap sformułowania modelu – por. roz. 4.5 i 4.6) zaprezentowano model konceptualny oraz formalny regionalnego systemu ratownictwa medycznego demonstrując oryginalny sposób opisu systemu mpd w postaci trzech modeli cząstkowych: struktury, zdarzeń i procesów.

W modelu konceptualnym wyróżniono:

- trzy klasy elementów tworzących strukturę systemu (*jednostki terytorialne, jednostki ratunkowe i miejsca leczenia szpitalnego*),
- cztery typy zdarzeń podstawowych (*powstanie stanu nagłego, nowe zgłoszenie, początek obsługi zgłoszenia, koniec obsługi zgłoszenia*) oraz cztery typy zdarzeń dodatkowych (*zgłoszenie stanu nagłego, koniec przyjmowania zgłoszenia, początek obsługi bezpośredniej zgłoszenia, koniec obsługi na miejscu i pacjent przewożony do szpitalnego oddziału ratunkowego*), które w sumie wyznaczają zbiór zdarzeń systemu mpd,
- cztery typy procesów jednostkowych (*powstawanie stanów nagłych, przyjmowanie nowych zgłoszeń, obsługa zgłoszeń, ponowny przydział zespołów do zgłoszeń*), które definiują proces główny rozwoju obiektu (zgłoszenia) od momentu pojawienia się do chwili jego zaniku.

W modelu formalnym zdefiniowano i opisano matematycznie:

- strukturę systemu w modelu struktury, wyróżniając wszystkie obiekty struktury oraz określając relacje zachodzące pomiędzy nimi,
- pojęcie stanu systemu w modelu stanów. Przedstawiono obiekty stanów, tj. obiekty, które określają stan systemu lub wpływają na zmianę stanu systemu. Zmiana wartości pewnych atrybutów obiektów stanu jest interpretowana jako zaistnienie zdarzenia, które inicjuje proces przejścia systemu z jednego stanu do drugiego,
- procesy jednostkowe zachodzące pomiędzy obiektami stanów i obiektami struktury systemu w modelu procesów. Procesy jednostkowe inicjowane są kolejnymi zdarzeniami, odpowiadającymi zmianom w wartości atrybutów obiektów stanu. Wynikiem zakończenia procesu jednostkowego jest przejście systemu do innego stanu.

Model matematyczny oprogramowano w języku Borland Delphi 4.0 (por. rozdz. 4.7 – etap budowy programu komputerowego) wykorzystując metodę programowania obiektowego.

Kluczowym etapem w procesie budowy modelu symulacyjnego jest przeprowadzenie analizy zasadności modelu, czyli udowodnienie, że model poprawnie opisuje badaną rzeczywistość. Jest to proces trudny i złożony w przypadku modeli systemów usług publicznych w ogóle, a systemów ratownictwa medycznego w szczególności, ze względu na takie cechy tej grupy systemów jak: wysoki udział czynników losowych, kwestionowana jakość dostępnych danych rzeczywistych, zmienność warunków działania, brak klarownych reguł decyzyjnych i algorytmów postępowania i inne. Wnioski z przeprowadzonych badań i sugestie odnośnie sposobu prowadzenia analizy zasadności modeli symulacyjnych systemów mpd zostały przedstawione w rozdziale 4.8 (etap walidacji i weryfikacji modelu). Zaproponowano i omówiono algorytmy eliminacji wpływu warunków początkowych oraz doboru liczby przebiegów symulacyjnych. Proces weryfikacji i walidacji modelu przeprowadzono zgodnie z proponowaną przez T. Naylora trójstopniową analizą zasadności koncentrując się na drugim i trzecim etapie wspomnianej analizy, tj. na empirycznym testowaniu założeń (walidacja konceptualna) oraz na ocenie poprawności danych wynikowych (walidacja operacyjna).

Walidację konceptualną przeprowadzono za pomocą procedur analizy poprawności dopasowania rozkładów (na przykładzie rozkładu intensywności napływania zgłoszeń do systemu) oraz za pomocą analizy wrażliwości. Wykorzystano graficzną analizę porównawczą wykresów histogramów oraz test zgodności χ^2 . Badanie przeprowadzono dla dwóch różnych

aspektów wspomnianego rozkładu. Sprawdzano czy rozkład liczby zgłoszeń w okresie $[0, T]$ odpowiada rozkładowi Poissona oraz czy czasy pojawiania się poszczególnych zgłoszeń w tym przedziale odpowiadają rozkładowi jednostajnemu opisanemu w przedziale $[0, T]$. Analiza wrażliwości została przeprowadzana wraz z zastosowaniem jednej z metod redukcji wariancji, tj. metody jednakowych ciągów liczb losowych.

Najbardziej definitywny test poprawności modelu symulacyjnego polega na sprawdzeniu czy wyniki procesu symulacji odpowiadają ściśle danym, które spodziewalibyśmy się zebrać w systemie rzeczywistym. Im większa spójność występuje pomiędzy danymi symulacyjnymi a rzeczywistymi, tym model uznany może być za bardziej wiarygodny. Zaproponowana procedura walidacyjna dla modeli systemów ratownictwa medycznego składa się z trzech metod: (1) analizy porównawczej średniej lub wariancji, (2) skorelowanej analizy porównawczej oraz (3) budowy przedziałów ufności.

Szczegółowo przedstawiona w kolejnych rozdziałach metodyka budowy modelu symulacyjnego systemu ratownictwa medycznego nie wyczerpuje na pewno wszystkich wątpliwości związanych z prowadzeniem procesu symulacji w tej grupie systemów. Stanowi jednak, zdaniem autorki, platformę do dalszej dyskusji, wymiany doświadczeń i dostarcza wielu wskazówek na polu promocji zastosowania symulacji w zarządzaniu systemami ratownictwa medycznego.

4.2. CHARAKTERYSTYKA BADANEGO SYSTEMU

Wojewódzki system ratownictwa medycznego¹ jest zbiorem podmiotów współtworzących w dowolny sposób i w dowolnym zakresie system pomocy medycznej w stanach nagłych na terenie województwa. System ten obejmuje w szczególności zakłady opieki zdrowotnej, placówki naukowe, stowarzyszenia i organizacje zobowiązane do realizowania zadań ratownictwa medycznego, oraz inne podmioty włączone doń decyzją wojewody.

¹ Zauważmy, że pojęcie wojewódzkiego systemu ratownictwa medycznego nie jest tożsame z określeniem Wojewódzka Stacja Pogotowia Ratunkowego (WSPR), które oznacza jedną z form organizacyjnych związku zakładów opieki zdrowotnej z dowolnego województwa.

Przyjmijmy, że pod pojęciem regionalnego systemu ratownictwa medycznego (zwanego dalej *Systemem*) będziemy rozumieli system będący ustalonym fragmentem wojewódzkiego systemu ratownictwa medycznego. Podstawowymi elementami Systemu są:

- (a) zakłady opieki zdrowotnej, *explicite* powołane do organizacji i świadczenia doraźnej pomocy medycznej ludziom w stanach nagłego zagrożenia zdrowia lub życia, na terenie rozpatrywanego regionu,
- (b) zakłady opieki zdrowotnej lub ich wydzielone fragmenty, które na podstawie obowiązujących ustaleń udzielają, stale lub okresowo, kwalifikowanej pomocy medycznej w zakresie leczenia szpitalnego, poprzez współdziałanie z podmiotami wymienionymi w (a),
- (c) pacjenci - wszyscy potencjalni pacjenci mogący znaleźć się w stanie nagłego zagrożenia zdrowia lub życia, a w szczególności - mieszkańcy rejonów działania zakładów opieki zdrowotnej wymienionych w (a),
- (d) obszar terytorialny, który zamieszkuje jest przez osoby wymienione w (c).

W niniejszej pracy wykorzystano dane o zgłoszeniach zebrane w trakcie badań przedmiotowych przeprowadzonych w Wojewódzkiej Stacji Pogotowia Ratunkowego we Wrocławiu w 1995 roku. Nie było jednak intencją autorki odzwierciedlenie w modelu symulacyjnym konkretnego systemu ratownictwa medycznego, stąd nie należy utożsamiać Systemu z rzeczywistym systemem pogotowia ratunkowego jaki funkcjonował, funkcjonuje bądź będzie funkcjonował we Wrocławiu.

4.3. OKREŚLENIE CELU BADAŃ

Punktem wyjścia do zastosowania metodyki analizy symulacyjnej jest sprecyzowanie problemów decyzyjnych, do rozwiązania których chcielibyśmy wykorzystać model. Przedstawiony w niniejszej pracy model symulacyjny RAMD (Ratownictwo MeDyczne) nie powstawał w celu analizy działalności merytorycznej wybranego, konkretnego systemu ratownictwa medycznego, aczkolwiek ogólność modelu sprawia, że może on być wykorzystany do badań nad dowolnym systemem pomocy doraźnej w Polsce. Za pomocą modelu symulacyjnego RAMD zostanie przeanalizowane zagadnienie doboru wejściowych rozkładów losowych opisujących momenty pojawiania się stanów nagłych. Model posłuży również do opracowania i przedstawienia metodologii procesu weryfikacji i walidacji modeli

symulacyjnych systemów ratownictwa medycznego. Jednym z celów budowy modelu była również prezentacja możliwych kierunków zastosowań symulacji w podejmowaniu decyzji nie-klinicznych sfery zarządzania i planowania systemu mpd.

4.4. ZEBRANIE I ANALIZA DANYCH WEJŚCIOWYCH

4.4.1. Dane źródłowe

Dane wejściowe wykorzystane w symulatorze RAMD zostały opracowane na podstawie danych źródłowych zebranych w trakcie wcześniejszych prac badawczych².

Podstawowym materiałem źródłowym były standardowe karty zleceń wyjazdu dla zespołów pogotowia ratunkowego Wojewódzkiej Stacji Pogotowia Ratunkowego we Wrocławiu, które wprowadzono do komputerowej bazy danych dla kilkunastu tygodni 1995 roku. Typowy zakres takich danych obejmuje:

- numer zlecenia wyjazdu (zawierający też numer podstacji i numer stanowiska dyspozytora),
- datę i czasy: przyjęcia zgłoszenia, wyjazdu, przybycia do pacjenta i powrotu zespołu,
- adres (lub charakterystykę miejsca) wyjazdu,
- wiek i płeć pacjenta,
- informację, od kogo pochodzi zgłoszenie,
- powód wezwania,
- liczbę kilometrów przejechanych w związku z usługą,
- numer zespołu wyjazdowego i jego skład,
- informacje o zebrane w wywiadzie i dane o aktualnym stanie pacjenta,
- diagnozę,
- informację o rodzaju udzielonej pomocy,
- informacje o przewozie pacjenta (skąd - dokąd).

Druga istotna grupa danych źródłowych dotyczyła charakterystyk terytorialnych, demograficznych i epidemiologicznych. W szczególności skorzystano z mapy administracyjnej miasta Wrocławia. Przyjęto, że podział na gminy jest zgodny z podziałem

² Dane źródłowe o wyjazdach zespołów pogotowia ratunkowego zgromadzono na potrzeby projektu badawczego „Systemy ekspertowe i modele symulacyjne w komputerowym wspomaganie decyzji w systemach ochrony zdrowia” za pomocą systemu mikrokomputerowego POPR [118].

administracyjnym, przy czym dla ujednolicenia rozważań przyjęto, że dzielnice miasta są w modelu traktowane jako dodatkowe gminy. Osiedlami są natomiast, zgodnie z nomenklaturą statystyczną i administracyjną, skupiska miejskie w obrębie miasta oraz wsie i przysiółki poza miastem.

Ostatnia grupa danych źródłowych dotyczyła struktury i zasobów systemu. Pozyskano informacje na temat podstacji (lokalizacja), zespołów (typy, liczby, harmonogramy pracy), szpitali (lokalizacja, rejonizacja) na terenie miasta Wrocławia.

4.4.2. Analiza danych – wskazania lokalizacyjne

Wskazania lokalizacyjne w danych źródłowych dotyczą trzech elementów: lokalizacji zgłoszenia (miejsca wypadku lub nagłego zachorowania), lokalizacji zespołu wyjazdowego (najczęściej jest to również lokalizacja oddziału) oraz lokalizacji jednostki leczącej (szpitalnego oddziału ratunkowego). W każdym przypadku, w dokumentach źródłowych określany jest 'adres', rozumiany jako informacja o miejscowości i ulicy w danej miejscowości. Rozwiązując problem lokalizacji terytorialnej zdarzeń, procesów i instytucji należy przyjąć jednolity sposób przedstawiania w modelu wskazań lokalizacyjnych ujętych w dokumentach źródłowych w postaci 'adresu'. Założono zatem, że najmniejszym, niepodzielnym "lokalizacyjnie" obszarem terytorialnym rozpatrywanym w modelu jest osiedle. Osiedle oznacza umownie dowolny, jednoznacznie określony obszar terytorialny wchodzący w skład gminy, na przykład ulicę, grupę ulic, grupę domów, osiedle miejskie, dzielnicę w mieście, wieś, część wsi lub grupę wsi. Konsekwentnie, wszystkie ustalenia lokalizacyjne modelu (lokalizacja zgłoszenia, rejonizacja zgłoszenia, miejsce pobytu karetki, lokalizacja stacji pogotowia, itd) odbywać się będą z dokładnością do osiedla.

Przyjęcie założenia o podziale rozpatrywanego obszaru terytorialnego na osiedla wymaga przygotowania danych źródłowych poprzez wykonanie następujących kroków³:

1. *Ustalenie kodów gmin.* W modelu wykorzystano istniejący w 1995 roku podział administracyjny miasta Wrocławia na pięć dzielnic, nadając każdej z nich pięciocyfrowy kod (por.tab.4.1).
2. *Ustalenie kodów osiedli.* Wykorzystano podział zgodny z jednostkami statystycznymi używanymi przez Główny Urząd Statystyczny (podział na rejony i obręby) i

³ Założenia systemu kodów lokalizacyjnych zostały opracowane w ramach projektu badawczego [118].

- wyodrębniono 69 osiedli, którym nadano kody numeryczne od 0 do 68, (por.tab.4.2) a następnie każde osiedle przyporządkowano dokładnie do jednej gminy.
3. *Przygotowanie spisu ulic.* Posługując się spisem ulic miasta Wrocławia, liczącym około 2 tysiące pozycji, określono przynależność każdej ulicy do konkretnego osiedla i gminy, (por.tab.4.3).
 4. *Przyporządkowanie każdemu zgłoszeniu w zbiorze danych wejściowych kodu właściwego osiedla oraz kodu gminy.* Każdy rekord z danymi opisującymi jedno zlecenie wyjazdowe poddano analizie, w trakcie której tekstowo zapisany adres zgłoszenia został zidentyfikowany i opisany za pomocą kodu osiedla (zdefiniowanego w bazie osiedli) oraz kodu gminy (zdefiniowanego w bazie gmin).
 5. *Ustalenie wzajemnych połączeń komunikacyjnych pomiędzy każdą parą osiedli.* Aby możliwe było określenie trasy przejazdu zespołu ratunkowego pomiędzy dowolnymi punktami (por.rozdz.4.6.6) należy przygotować macierz bezpośrednich połączeń pomiędzy każdą parą osiedli. Wymaga to przeprowadzenia analizy szlaków komunikacyjnych miasta Wrocławia, wyodrębnienia tych par osiedli, pomiędzy którymi pojazdy mogą się bezpośrednio przemieszczać, przeniesienia istniejących powiązań na sporządzony plan osiedli oraz oszacowania rzeczywistych odległości pomiędzy osiedlami. Tabela 4.4 przedstawia fragment macierzy bezpośrednich połączeń komunikacyjnych pomiędzy osiedlami, natomiast tabela 4.5 prezentuje fragment macierzy odległości (w kilometrach) pomiędzy sąsiadującymi ze sobą osiedlami.
 6. *Ustalenie lokalizacji podstacji, oddziałów oraz jednostek leczących.* Podstacje usytuowane są w gminach (por.tab.4.6), natomiast oddziały wchodzące w skład poszczególnych podstacji zlokalizowane są w osiedlach (por.tab.4.7). Położenie jednostek leczących określane jest również z dokładnością do osiedla (por.tab.4.8). W trakcie analizy danych źródłowych najwięcej problemów stwarzać może ujednolicenie terminologii stosowanej przy określaniu nazwy miejsca przewozu medycznego. Opisy umieszczane na kartach wyjazdowych są bardzo zróżnicowane, często niejednoznaczne i charakteryzują się różnym stopniem szczegółowości. Ponieważ w prezentowanym modelu symulowano jedynie *fakt* przewozu pacjenta do szpitalnego oddziału ratunkowego, nie uznano za konieczne przeprowadzania szczegółowej analizy miejsc docelowych odwozu medycznego. W przypadku jednakże inaczej sformułowanych celów badania symulacyjnego, analiza taka mogłaby okazać się niezbędna.

7. Wyznaczenie procentowych liczebności zgłoszeń z każdego osiedla. W celu umożliwienia ustalania w procesie symulacji adresu zgłoszenia należy wyznaczyć (por.tab.4.9) udział procentowy zgłoszeń pochodzących z poszczególnych osiedli w globalnej liczbie zgłoszeń z rozpatrywanego rejonu.

Tabela 4.1. Tabela kodów gmin.

Kod gminy	Nazwa gminy
93001	WROCLAW-FABRYCZNA
93003	WROCLAW-KRZYKI
93005	WROCLAW-PSIE POLE
93007	WROCLAW-STARE MIASTO
93009	WROCLAW-SRÓDMIEŚCIE

Tabela 4.2. Tabela kodów osiedli.

Kod osiedla	Nazwa osiedla	Kod Gminy	Kod osiedla	Nazwa osiedla	Kod gminy
0	Południe	93003	35	Sołtysowice	93005
1	Rakowiec	93003	36	Karłowice	93005
2	Bierdzany	93003	37	Kleczków	93005
3	Opatowice	93003	38	Różanka	93005
4	Świątniki	93003	39	Poświętne	93005
5	Książę Małe	93003	40	Polanowice	93005
6	Książę Wielkie	93003	41	Widawa	93005
7	Tarnogaj	93003	42	Lipa Piotrowska	93005
8	Brochów	93003	43	Osobowice	93005
9	Bieńkowice	93003	44	Świniary	93005
10	Jagodno	93003	45	Rądzin	93005
11	Wojszyce	93003	46	Pracze Odrzańskie	93001
12	Oftaszyn	93003	47	Marszowice	93001
13	Gaj	93003	48	Mokra	93001
14	Borek	93003	49	Leśnica	93001
15	Partynice	93003	50	Żar	93001
16	Krzyki	93003	51	Ratyń	93001
17	Klecina	93003	52	Jarnołów	93001
18	Stare Miasto	93007	53	Jerzmanowo	93001
19	Plac Grunwaldzki	93009	54	Złotniki	93001
20	Zacisze	93009	55	Stabłowice	93001
21	Zalesie	93009	56	Maślice	93001
22	Sępólno	93009	57	Pilczyce	93001
23	Dąbie	93009	58	Żerniki	93001
24	Biskupin	93009	59	Strachowice	93001
25	Bartoszewice	93009	60	Muchobór Wielki	93001
26	Strachocin	93005	61	Muchobór Mały	93001
27	Wojnów	93005	62	Oporów	93001
28	Swojczyce	93005	63	Grabiszyn	93001
29	Kowale	93005	64	Nowy Dwór	93001
30	Zgorzelisko	93005	65	Kuźniki	93001
31	Psie Pole	93005	66	Gądów Mały	93001
32	Zakrzów	93005	67	Popowice	93001
33	Pawłowice	93005	68	Kozanów	93001

Tabela 4.3. Fragment tabeli z nazwami ulic.

Nazwa ulicy	Kod osiedla	Kod gminy
Abrahama Romana gen.	12	93003
Abramowskiego Edwarda	24	93009
Adamczewskich Heleny i Ludwika	53	93001
Adamickiego Karola	62	93001
Admiralska	32	93005
Afgańska	8	93003
Agrestowa	15	93003
Akacyjowa aleja	14	93003
Aliancka	15	93003
Altanowa	63	93001
Ałunowa	40	93005
Amarantowa	55	93001
Ametystowa	12	93003
Ananasowa	55	93001

Tabela 4.4. Fragment macierzy połączeń komunikacyjnych pomiędzy osiedlami.

Osiedle „z”	Osiedla „do”: numery osiedli, z którymi istnieje bezpośrednie połączenie z osiedla „z”				
0	13	14	18	63	
1	2	5	18		
2	1	3			
3	2				
4	5				
5	1	4	6	7	18
6	5	8			
7	5	8	13		
8	6	7	9	10	
9	8				
10	8	11			

Tabela 4.5. Fragment macierzy odległości pomiędzy sąsiadującymi ze sobą osiedlami.

Kod osiedla „z”	Kod osiedla „do”	Odległość w km
0	13	1,95
0	14	2,05
0	18	3,40
0	63	2,93
1	2	1,66
1	5	1,92
1	18	5,12
2	3	2,56
4	5	2,96
5	6	1,31
5	7	2,14
5	18	6,93
6	8	2,32
7	8	3,04
7	13	0,78
8	9	1,05
8	10	0,93
10	11	1,94
11	12	0,99
11	13	2,73
11	15	3,11

Tabela 4.6. Dane lokalizacyjne podstacji.

Kod podstacji	Nazwa podstacji	Adres	Gmina
W-1	Centralny Oddział Pomocy Wyjazdowej	Traugutta 112	93003
W-3	Oddział Przewozowy	Traugutta 112	93003
W-4	Zespół Lotnictwa Sanitarnego	Skarżyńskiego 4	93001
W-5	Podstacja Wrocław - Śródmieście	Ukryta 10	93009
W-6	Podstacja Wrocław - Krzyki	Jantarowa 20	93003
W-7	Podstacja Wrocław - Stare Miasto	Inowrocławska 2	93007
W-8	Podstacja Wrocław - Fabryczna	Legnicka 67	93001
G	Podstacja Gniechowice	Kątecka 41	93543
S	Podstacja Sobótka	Strzelców 2	93118

Tabela 4.7. Dane lokalizacyjne oddziałów.

Kod oddziału	Typ oddziału	Osiedle	Kod podstacji
O1	C	0	W-1
O2	R	0	W-1
O3	Z	0	W-1
O4	D	0	W-1
O5	P	0	W-3
O6	L	59	W-4
O7	Z	19	W-5
O8	Z	0	W-6
O9	R	0	W-6
O10	Z	18	W-7
O11	D	18	W-7
O12	Z	67	W-8
O13	R	67	W-8

Symbole typów oddziałów oznaczają: „C”- stacja centralna, „R”- oddział R-kowy, „Z”- oddział ogólnowypadkowy, „D” – oddział pediatriczny, „P” – oddział przewozowy, „L” – oddział lotniczy.

Tabela 4.8. Fragment tabeli z danymi lokalizacyjnymi jednostek leczących.

Kod szpitala	Nazwa szpitala	Adres	Osiedle
J2190012	Szpital Spec. Oddział Psychiatryczny dla Dzieci i Młodzieży	Żmigrodzka 134	12
J210003	Szpital Onkologiczny Dolnośląskiego Centrum Onkologii	Hirszfelda 12	0
J2190011	Szpital Spec. Opieki nad Matką i Dzieckiem	Krakowska 28	0
J260002	Spec. Szpital Zespolony im. T.Marciniaka	Traugutta 116	0
J280001	Szpital Ginekologiczno-Położniczy Doln.Centrum Onkologii	Hirszfelda 12	0

Tabela 4.9. Liczba zgłoszeń pochodzących z poszczególnych osiedli. Fragment tabeli.

Kod gminy	Kod osiedla	Liczba zgłoszeń
93001	46	7
93001	47	6
93001	49	28
93001	51	4
93001	52	4
93001	53	4
93003	0	1518
93003	1	3
93003	10	7
93003	11	43
93003	12	13
93003	13	197
93003	14	76

4.4.3. Analiza danych – określenie intensywności zgłoszeń

Zebrane dane wejściowe mogą być wykorzystane do opisu procesu napływania zgłoszeń w każdy z następujących sposobów:

1. Dane są *bezpośrednio* wykorzystane w trakcie symulacji, co oznacza, że poszczególne wartości są pobierane (na przykład z zewnętrznej bazy danych) za każdym razem, kiedy w modelu symulacyjnym należy określić czas nadejścia kolejnego zgłoszenia.
2. Zebrane dane wykorzystuje się do sformułowania *rozkładu empirycznego*, z którego pobiera się wartości zawsze wtedy kiedy proces symulacji tego wymaga.
3. Za pomocą metod statystycznych dopasowuje się *teoretyczne rozkłady statystyczne* do zebranych danych a następnie testami statystycznymi sprawdza się poprawność postawionych hipotez.

Jeżeli rozkład teoretyczny dostatecznie dobrze opisuje zebrane dane, w procesie symulacji wykorzystuje się wartości naliczane za pomocą tych rozkładów. Jednym z powszechnie stosowanych w literaturze rozkładów teoretycznych do opisu strumienia napływania zgłoszeń jest rozkład Poissona, który można zastosować jeżeli zgłoszenia zawsze napływają do systemu pojedynczo oraz liczba zgłoszeń w dowolnym przedziale czasu nie zależy od liczby zgłoszeń, które nadeszły do systemu w okresie poprzednim i nie zależy od czasu nadejścia tych zgłoszeń.

Wadą podejścia pierwszego jest brak możliwości prognozowania zachowania się systemu, ponieważ odtwarzać można jedynie to, co miało już miejsce w przeszłości. Również ilość zebranych danych może okazać się niewystarczająca aby w pełni przeprowadzić proces symulacji. Stosując podejście drugie nie jesteśmy w stanie generować danych spoza zakresu rozkładu empirycznego a jest to znaczące utrudnienie, ponieważ modele symulacyjne budowane są często właśnie w celu badania zachowania się systemu w warunkach ekstremalnych. Wadą stosowania rozkładu empirycznego jest także konieczność korzystania z dużych zasobów pamięci, ponieważ jeżeli niezbędnych będzie nam n wartości w trakcie symulacji – musimy wprowadzić do pamięci $2n$ pozycji. Rozkład empiryczny może ponadto zawierać w sobie pewne nieregularności wynikające ze zbyt małej liczby zebranych danych. Podejście trzecie jest zdecydowanie najlepsze, ponieważ rozkład teoretyczny „wygładza” nierówności rozkładu empirycznego, pozwala na generowanie wartości ekstremalnych, wymaga minimum pamięci komputera i – co najważniejsze – umożliwia przeprowadzanie badań typu „co się stanie jeśli?” (ang. „what if studies”).

Sposób parametryzowania rozkładu Poissona jest dobrze opisany w literaturze przedmiotu. Problem pojawia się wtedy, kiedy chcemy zastosować przedstawioną w literaturze metodykę do opisu procesu powstawania (i zgłaszania) stanów nagłych. W systemie rzeczywistym parametr λ określający liczbę zgłoszeń przybywających do systemu w pewnym okresie czasu *nie jest stały* lecz zmienia się z godziny na godzinę w ciągu doby. Problem ten rozwiązywano w ten sposób, że przyjmowano średnią wartość parametru λ dla całego 24-ro godzinnego przedziału lub dla pewnego charakterystycznego okresu, na przykład dla jednej zmiany roboczej. Takie rozwiązania prowadziły jednak do znacznych niedokładności w wynikach symulacji. Jedno z rozwiązań tego problemu przedstawiono w pracy [171]. Autorzy podzielili 24-o godzinną dobę na kilka okresów o równej długości (badano odcinki cztero-, sześć- i ośmiogodzinne) a następnie wyznaczali parametr λ dla każdego okresu. Za pomocą testu χ^2 udowodnili następnie, że rozkład intensywności napływania zgłoszeń odpowiada rozkładowi Poissona o sześciu różnych parametrach λ wyznaczanych odrębnie dla każdego z czterogodzinnych okresów w ciągu doby.

Rozwiązanie przyjęte przez autorów [171] jest jednak poprawne *jedynie w ramach* każdego okresu, na który podzielona została 24-ro godzinna doba. Niedokładności pojawiają się na przełomie przyjętych odcinków czasowych. Planując bowiem czas nadejścia kolejnego zgłoszenia do systemu, stosuje się procedurę polegającą na sumowaniu aktualnego czasu symulacji i wygenerowanej (według rozkładu o przyjętym parametrze λ) wartości losowej. Jeżeli aktualny czas symulacji przypada na odcinek czasowy d_1 a wygenerowana wartość losowa spowoduje, że czas nadejścia kolejnego zgłoszenia przypadnie na odcinek d_2 , to wielkość czasu pomiędzy początkiem okresu d_2 a czasem nadejścia kolejnego zgłoszenia będzie wyznaczona według niewłaściwego parametru λ (czyli tego, który poprawny był dla odcinka d_1).

Jednym z celów niniejszej pracy jest przeanalizowane zagadnienia doboru wejściowych rozkładów losowych opisujących momenty pojawiania się stanów nagłych. Zaproponowane zostanie (por.rozdz.4.6.7) rozwiązanie problemu przy pomocy algorytmu opisanego przez Kleina i Robertsa w [97]. Zastosowanie tego algorytmu wymaga zebrania informacji o średniej liczbie zgłoszeń w każdej gminie w dni robocze, soboty i święta dla kolejnych jednogodzinnych okresów doby. Fragment tak przygotowanej bazy danych przedstawia tabela 4.10.

Tabela 4.10. Fragment tabeli ze średnią liczbą zgłoszeń napływających do systemu w ciągu doby – dane źródłowe.

KOD GMINY	DZIEŃ TYG.	LB_0_1	LB_1_2	LB_2_3	LB_3_4	LB_4_5	LB_5_6	LB_6_7	LB_7_8	LB_8_9	LB_9_10	LB_10_11	LB_11_12	LB_12_13	LB_13_14	LB_14_15	LB_15_16	LB_16_17
93009	DR	0,05	0,49	0,72	0,44	0,44	0,64	0,56	0,82	1,92	1,26	1,31	1,33	1,31	1,51	1,90	1,51	1,62
93009	WS	0,00	0,67	0,33	0,50	0,33	0,17	1,00	0,83	1,17	1,33	0,67	1,83	1,17	1,00	0,33	1,50	0,83
93009	DS	0,00	0,88	0,13	0,63	0,88	0,25	0,63	1,13	0,75	0,88	1,88	1,00	1,50	1,75	1,38	1,25	2,25
93007	DR	0,05	0,46	0,46	0,26	0,33	0,51	0,31	0,79	1,13	1,21	1,08	1,21	1,05	1,05	0,77	1,26	1,26
93007	WS	0,00	0,17	0,67	0,17	0,50	0,33	0,17	0,00	0,17	0,33	1,00	1,67	0,83	1,50	1,17	0,83	0,67
93007	DS	0,00	0,50	0,38	0,50	0,88	0,63	0,13	0,38	0,50	0,63	0,63	0,88	0,50	0,63	0,88	0,88	2,00
93003	DR	0,05	0,82	0,69	0,59	0,51	0,79	0,74	1,44	6,67	2,72	2,05	2,62	1,85	2,33	1,92	2,38	2,21
93003	WS	0,17	0,50	1,00	0,33	0,50	0,50	0,50	1,17	1,17	1,83	2,83	2,33	2,33	1,17	2,17	1,67	2,33
93003	DS	0,13	1,38	0,75	1,25	1,00	0,63	0,38	1,00	1,63	1,13	1,63	1,25	2,50	2,38	2,38	2,50	3,13
93001	DR	0,08	0,59	0,51	0,36	0,49	0,62	0,62	0,69	0,95	1,10	1,18	1,31	0,90	0,97	1,26	0,97	0,92
93001	WS	0,00	0,67	0,00	0,67	0,33	0,67	0,33	1,17	1,00	1,67	2,67	0,50	0,67	1,33	1,33	1,00	1,00
93001	DS	0,00	1,00	1,38	0,88	0,63	0,13	0,13	0,50	1,00	1,63	2,00	1,38	0,88	1,25	1,00	1,13	1,88
93005	DR	0,00	0,36	0,23	0,15	0,18	0,08	0,41	0,46	0,36	0,72	0,87	0,59	0,62	0,59	0,64	0,95	0,79
93005	WS	0,00	0,17	0,17	0,00	0,17	0,00	0,67	0,33	0,83	0,50	0,50	0,33	0,17	0,50	1,17	0,17	0,67
93005	DS	0,00	0,13	0,50	0,13	0,38	0,13	0,00	0,63	0,50	0,50	0,75	0,50	0,88	0,75	0,75	0,13	0,38

Symbol „LB_0_1” oznacza średnią liczbę zgłoszeń, które napłynęły z danej gminy, danego typu dnia pomiędzy godziną 0:01 a 1:00. Wartości w tabeli: DR – Dzień Roboczy, WS – Wolna Sobota, DS – Dzień Świąteczny.

4.4.4. Analiza danych – pozostałe parametry

Prowadzenie procesu symulacji systemu ratownictwa medycznego wymaga przeprowadzenia szczegółowej i rozległej analizy zbioru danych wejściowych w celu oszacowania wielu ciągłych i dyskretnych rozkładów losowych. Ponieważ celem niniejszej pracy nie jest odwzorowanie działania konkretnego systemu mpd lecz zaprezentowanie metodyki realizacji modelu symulacyjnego, techniki szacowania pozostałych parametrów nie zostaną omówione tak szczegółowo jak problemy lokalizacji i intensywności napływania zgłoszeń. Niemniej jednak należy zasygnalizować pewne szczególne aspekty związane z analizą i przygotowaniem pełnego zestawu danych wejściowych do modelu symulacyjnego systemu ratownictwa medycznego.

Analiza parametrów opisujących strukturę i zasoby systemu mpd

Struktura systemu mpd zdefiniowana jest poprzez omówione powyżej zestawy kodów lokalizacyjnych gmin, osiedli, podstacji, oddziałów oraz jednostek leczących. Analizowany rejon można terytorialnie podzielić na gminy, które z kolei dzielą się na osiedla (por.tab.4.1 i 4.2), a wszystkie wskazania lokalizacyjne odbywają się zawsze z dokładnością do osiedla.

W podobny sposób należy również przeprowadzić proces kodowania zasobów systemu. Analiza rozmieszczenia zespołów wyjazdowych w poszczególnych podstacjach i oddziałach pozwala na zdefiniowanie tabeli (patrz tab.4.11), w której umieszczono kody zespołów wyjazdowych, symbole typów zespołów, symbole oddziałów, w których stacjonują zespoły, symbole marki pojazdu (wykorzystywane do określenia średniej prędkości, z którą porusza się zespół) oraz harmonogram pracy każdego zespołu na dwóch zmianach roboczych.

Tabela 4.11. Rozmieszczenie zespołów wyjazdowych w podstacjach i harmonogram pracy. Fragment tabeli.

Kod zespołu	Typ zespołu	Kod oddziału	Pojazd	Dzień Roboczy				Wolna sobota				Dzień świąteczny			
				Początek zmiany I	Koniec zmiany I	Początek zmiany II	Koniec zmiany II	Początek zmiany I	Koniec zmiany I	Początek zmiany II	Koniec zmiany II	Początek zmiany I	Koniec zmiany I	Początek zmiany II	Koniec zmiany II
Z11	D	O4	M2	0	24	0	0	0	24	0	0	0	24	0	0
Z12	W	O3	M1	0	24	0	0	0	24	0	0	0	24	0	0
Z13	W	O3	M1	0	24	0	0	0	24	0	0	0	24	0	0
Z14	W	O3	M1	0	24	0	0	0	24	0	0	0	24	0	0
R-1	R	O2	M2	0	24	0	0	0	24	0	0	0	24	0	0
R-2	R	O2	M2	0	24	0	0	0	24	0	0	0	24	0	0
Z21	P	O5	M1	7	19	19	7	7	19	19	7	7	19	19	7

Znacznie więcej problemów metodologicznych stwarza zagadnienie ustalania jednostki leczącej, do której odwożony jest pacjent, ze względu na brak klarownych, jednoznacznych reguł decydujących o wyborze szpitala przez zespół pogotowia, dużą różnorodność szpitali specjalistycznych, do których mogą być przewożeni pacjenci oraz znaczną niejednorodność terminologii stosowanej w dokumentacji. Przyjęto zatem założenie, że dla każdego osiedla rejonu zdefiniowany jest szpital pełniący całodobowy dyżur i do tego właśnie szpitala transportowani są chorzy (por.tab.4.12).

Tabela 4.12. Specyfikacja jednostek leczących pełniących ostry dyżur dla każdego osiedla w dni robocze (DR), świąteczne (DS) i wolne soboty (WS). Fragment tabeli.

Kod osiedla	Typ dnia	Kod szpitala
0	DR	J210003
0	DS	J210003
0	WS	J210003
1	DR	J210003
1	DS	J210003
1	WS	J210003
2	DR	J210003
2	DS	J210003
2	WS	J210003
3	DR	J210003
3	DS	J210003
3	WS	J210003

Analiza kodów diagnostycznych

Analiza „medycznych skutków” zdarzenia sprowadza się do sformułowania trzech charakterystyk:

- charakteru zagrożenia, określającego typ zdarzenia powodujący zaistnienie stanu nagłego i wezwanie pomocy doraźnej, określanego dalej jako *zagrożenie*,
- powodu wezwania pomocy doraźnej podawanego przez osobę wzywającą pomocy doraźnej, określanego dalej jako *powód*,
- diagnozy postawionej przez lekarza na miejscu wezwania, określanej dalej jako *rozpoznanie*.

Dane dotyczące charakteru zagrożenia nie są w ogóle odnotowywane w dokumentacji źródłowej. Również analiza powodów wezwań stanowi poważne wyzwanie głównie ze względu na znaczną różnorodność opisów umieszczanych przez dyspozytora na karcie zlecenia wyjazdu. W bardzo krótkim czasie strona zgłaszająca próbuje określić przyczynę wezwania zespołu, natomiast dyspozytor wychwytuje najistotniejsze elementy wypowiedzi i wynotowuje je na karcie. Podzielono zatem wszystkie powody wezwań na cztery grupy (por.tab.4.13): wezwania pilne, zwykłe, do dzieci oraz przewozy, kierując się analizą ex-post, czyli typem zespołu przydzielonego do obsługi zgłoszenia. Przyjęcie powyższego algorytmu ustalania powodu wezwania jest pewnym przybliżeniem rzeczywistości, ponieważ fakt wysłania danego typu zespołu do zgłoszenia nie determinuje poprawności stopnia pilności przyznanego przez dyspozytora zgłoszeniu. Jednakże z braku innych danych, rozwiązanie takie wydaje się być dopuszczalne. W podobny sposób zdefiniowano charakter zagrożenia stanu nagłego (por.tab.4.14) ustalając cztery grupy zagrożeń, czyli zagrożenia pilne, zwykłe, pediatryczne i przewozowe. Przyjęto ponadto, że możliwe jest popełnienie błędu przez dyspozytora i zaklasyfikowanie zgłoszenia do niewłaściwej grupy. Zależność ta określana jest liczbą powodów poszczególnego typu, którą zanotowano dla każdego typu charakteru zagrożenia (por.tab.4.15). Zestaw danych przygotowanych do modelu RAMD zakłada (z braku możliwości weryfikacji tego założenia), że kod zagrożenia odpowiada kodowi powodu wezwania.

Tabela 4.13. Kody powodów wezwań.

Kod powodu	Nazwa
0	wezwanie pilne
1	wezwanie do dziecka
2	wezwanie zwykłe
3	przewóz

Tabela 4.14. Kody zagrożeń.

Kod zagrożenia	Nazwa
0	Wezwanie pilne
1	Wezwanie do dziecka
2	Wezwanie zwykłe
3	przewóz

Tabela 4.15. Zależność pomiędzy powodem wezwania a charakterem zagrożenia.

Kod zagrożenia	Kod powodu wezwania	Procent [%]
0	0	100
1	1	100
2	2	100
3	3	100

O wiele bardziej klarowna sytuacja dotyczy diagnoz formułowanych przez lekarza na miejscu zgłoszenia. I tutaj jednak dane źródłowe wymagały dodatkowej analizy, ponieważ w większości przypadków na kartach wyjazdowych nie umieszczano numeru statystycznego choroby (zgodnego z Międzynarodową Klasyfikacją Chorób; dla danych z 1995 roku była to rewizja 9), a jedynie werbalny opis rozpoznania. Po przyporządkowaniu numeru statystycznego choroby każdemu rekordowi z bazy danych źródłowych, opracowano tabelę zależności procentowych pomiędzy powodem wezwania a rozpoznaniem (por.tab.4.16).

Tabela 4.16. Fragment tabeli zależności pomiędzy powodem wezwania a rozpoznaniem.

Kod powodu	Kod rozpoznania	Procent
0	10	2,3
0	271	2,4
0	20	3,0
0	149	3,3
0	17	4,5
0	117	4,6
0	287	6,1
0	89	7,1
0	229	7,4
1	178	2,9
1	89	5,1
1	287	6,0
1	229	6,9
1	17	7,1
1	20	16,0

Analiza procesu zgłaszania

Analiza możliwych wariantów przebiegu procesu powiadamiania o stanach nagłych prowadzi do zdefiniowania kilku charakterystyk składających się na ogólny opis procedury zgłaszania:

- zgłaszalność do systemu ratownictwa medycznego. Zdefiniowane zostały parametry procentowe ilości stanów nagłych pojawiających się w poszczególnych gminach ale nie przekazanych do systemu, oraz zaistniałych ale przekazanych do innego systemu niż rozważany (por.tab.4.17),
- miejsce zgłaszania stanu nagłego. Ze względu na zlokalizowanie kilku podstacji na terenie regionu oraz możliwość wyboru przez mieszkańców nie tylko jednego centralnego

numeru telefonu ale również numerów poszczególnych podstacji, zgłoszenia z poszczególnych gmin mogą trafić zarówno do głównego centrum dyspozytorskiego jak i do konkretnego oddziału. Zdefiniowane zostały zatem wskaźniki procentowe określające procentowy udział zgłoszeń docierających do poszczególnych podstacji z każdej gminy (por.tab.4.18). W danych bazowych przygotowanych do modelu RAMD założono (ze względu na brak innych danych), że wszystkie zgłoszenia z poszczególnych gmin trafiają do centrum dyspozytorskiego, czyli podstacji W-1,

- podstacja obsługująca zgłoszenie. Wszystkie zgłoszenia trafiają do stacji centralnej, skąd następnie są przekazywane do odpowiedniej rejonowo podstacji (por.tab.4.19),

Tabela 4.17. Procent zgłoszeń z każdej gminy trafiający do systemu opieki zdrowotnej oraz do systemu mpd.

Kod gminy	% do systemu opieki zdrowotnej	% do systemu mpd
93001	100	100
93003	100	100
93005	100	100
93007	100	100
93009	100	100

Tabela 4.18. Procent zgłoszeń trafiających z poszczególnych gmin do podstacji.

Kod gminy	Kod podstacji	% zgłoszeń do podstacji spośród wszystkich zgłoszeń z danej gminy
93001	W-1	100
93003	W-1	100
93005	W-1	100
93007	W-1	100
93009	W-1	100

Tabela 4.19. Procent zgłoszeń przekazywanych z Centrum do poszczególnych podstacji.

Podstacja „z”	Podstacja „do”	Procent zgłoszeń przekazywanych z podstacji „z”
W-1	W-1	29
W-1	W-3	0
W-1	W-5	20
W-1	W-6	22
W-1	W-7	15
W-1	W-8	14

Analiza atrybutów zgłoszeń

Każde zgłoszenie opisane jest wieloma atrybutami, z których najistotniejsze to:

- rodzaj zgłoszenia definiujący trzy kategorie zgłoszeń: wypadek, zachorowanie, przewóz (por.tab.4.20),
- czas obsługi na miejscu wezwania zależny od rozpoznania postawionego przez lekarza. Czas ten definiowany jest jako rozkład ciągły, którego typ oraz parametry powinny być estymowane na podstawie próby losowej. W modelu RAMD przyjęto, że rozkład czasu obsługi na miejscu wezwania jest opisany rozkładem normalnym $N(\mu, \sigma^2)$, por.tab.4.21,
- hospitalizacja pacjenta. Pewna część pacjentów wymaga hospitalizacji, należy zatem oszacować procent zgłoszeń dla każdego wyróżnionego typu rozpoznania, który kończy się przewozem do jednostki leczącej, por.tab.4.22.

Tabela 4.20. Podział zgłoszeń na kategorie.

Podstacja	Procent wypadków	Procent zachorowań	Procent przewozów
W-1	8	64	27
W-3	0	50	50
W-4	0	0	0
W-5	12	87	1
W-6	12	87	1
W-7	13	87	0
W-8	12	87	1

Tabela 4.21. Fragment tabeli parametrów czasu obsługi na miejscu wezwania.

Kod rozpoznania	μ [min]	σ [min]
2	15	5
3	15	5
4	15	5
5	15	5

Tabela 4.22. Fragment tabeli procentowej wielkości przypadków hospitalizowanych.

Kod rozpoznania	Procent hospitalizowanych
2	30
3	30
4	30
5	30

4.5. MODEL KONCEPTUALNY¹

4.5.1. Uwagi wstępne

Model konceptualny regionalnego systemu ratownictwa medycznego jest modelem werbalno-graficznym, a jego celem jest ogólne opisanie struktury, obiektów i relacji między nimi, zdarzeń, procesów i zależności logicznych występujących w rozpatrywanym Systemie (por.pkt.4.3). Model nie odzwierciedla szczegółów strukturalno-organizacyjnych żadnej konkretnej instytucji, niemniej jednak model powstał w oparciu o badania przedmiotowe przeprowadzone w rzeczywistym systemie pogotowia ratunkowego w województwie wrocławskim, który można uznać za "typowy" dla polskiego systemu opieki zdrowotnej i może on stanowić podstawę do zdefiniowania uogólnień.

Wstępne analizy i badania przeprowadzone w systemie rzeczywistym wykazały, że proces budowy modelu będzie przebiegał przy równoczesnej szerokiej formalizacji reguł, zasad działania, wnioskowania i procedur podejmowania decyzji. Formalizacja będzie dotyczyła wszystkich istotnych, uwzględnionych w modelu aspektów rzeczywistości. Proces ten powinien przebiegać w ścisłej współpracy z pracownikami systemu rzeczywistego (kierownictwo, lekarze, dyspozytorzy, pracownicy obsługi), jednakże wszędzie tam, gdzie uzyskanie opisu formalnego nie będzie możliwe, zostanie zaproponowana własna interpretacja.

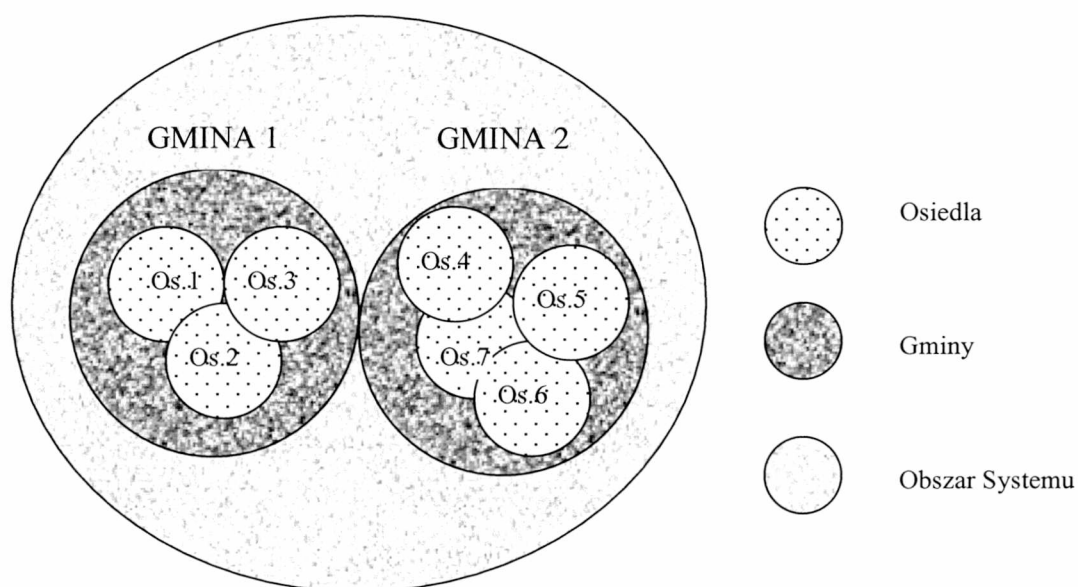
Strukturę modelu Systemu tworzą trzy podstawowe klasy elementów, przy czym z każdą z nich są związane, opisane poniżej, obiekty podstawowe:

- (1) **Jednostki Terytorialne**, czyli ustalone, możliwe do jednoznacznego zdefiniowania obszary terytorialne (np. ulica, osiedle, wieś) zamieszkałe przez populację mieszkańców,
- (2) **Jednostki Ratunkowe** czyli zakłady opieki zdrowotnej, których podstawowym celem jest reagowanie na stany nagłe (wymienione w (a) w podrozdz. 4.2),
- (3) **Miejsca Leczenia Szpitalnego**, czyli zakłady opieki zdrowotnej lub ich fragmenty, które przejmują na siebie dalszą opiekę nad pacjentem (szpitale lub oddziały szpitalne).

¹ Przedstawiony model jest zmodyfikowaną wersją modelu konceptualnego wojewódzkiego systemu pomocy doraźnej opracowanego przez autorkę we współpracy z dr Markiem Lubiczem w ramach prowadzonych wspólnie prac badawczych, (por.[118]).

4.5.2. Obiekty związane z elementem struktury "Jednostki Terytorialne"

Przyjęto, że obszar objęty działaniem Systemu dzieli się (por.rys.4.2) na pierwszym poziomie agregacji na Gminy, a na drugim poziomie agregacji - na Osiedla.



Rys.4.1. Podział obszaru Systemu na Gminy i na Osiedla.

Zakłada się, że Gminy charakteryzują się porównywalnymi wskaźnikami częstotliwości powstawania stanów nagłych w każdym punkcie swojego obszaru. Podział na Gminy może być zgodny z rzeczywistym podziałem administracyjnym, ale może też się od niego różnić. W zależności od dostępności danych oraz wymagań dotyczących szczegółowości prowadzonych analiz można traktować dzielnice dużych miast jako odrębne Gminy, zdefiniować Gminę jako mniejszą jednostkę administracyjną będącą fragmentem gminy rzeczywistej lub połączyć kilka gmin w jedną większą jednostkę traktowaną w modelu jako Gmina. Podstawowym atrybutem Gminy jest (a) *wskaźnik intensywności powstawania stanów nagłych*. Atrybutami dodatkowymi są:

- b) położenie terytorialne, czyli lokalizacja Gminy w Systemie i położenie w stosunku do innych Gmin,
- c) liczebność populacji danej Gminy oraz struktura demograficzna (wiek, płeć),
- d) podział terytorialny, czyli podział Gminy na tzw. Osiedla oraz wzajemne ułożenie poszczególnych Osiedli w Gminie,

e) podział populacyjny, czyli liczebność każdego Osiedla wchodzącego w skład Gminy.

Pojęciem Osiedla oznaczono umownie dowolny, jednoznacznie określony obszar terytorialny wchodzący w skład Gminy (np. ulica, grupa ulic, grupa domów, osiedle miejskie, dzielnica w mieście, wieś, część wsi lub grupa wsi), odznaczający się podobnymi wskaźnikami lokalizacyjnymi. Każde Osiedle wchodzi w skład dokładnie jednej Gminy, natomiast każda Gmina zawiera co najmniej jedno Osiedle. W sytuacji szczególnej Gmina i Osiedle mogą być ze sobą tożsame. Osiedle jest najmniejszym, niepodzielnym "lokalizacyjnie" obszarem terytorialnym, rozpatrywanym w modelu. Konsekwentnie, wszystkie ustalenia lokalizacyjne modelu (lokalizacja zgłoszenia, rejonizacja zgłoszenia, miejsce pobytu karetki, lokalizacja stacji pogotowia, itd) odbywają się zawsze z dokładnością do Osiedla.

Zapotrzebowanie na usługi Systemu określane jest dla każdej Gminy i przejawia się w postaci Stanów Nagłych (nagłe zachorowanie, wypadek, katastrofa lub wypadek masowy), które wymagają pomocy ze strony Systemu. Zakłada się, że Stany Nagłe powstają niezależnie we wszystkich Gminach. Część Stanów Nagłych zamienia się w rzeczywiste Zgłoszenia trafiające (z pewnym opóźnieniem) do Systemu. Większość Zgłoszeń jest obsługiwana przez System, jednak możliwe są sytuacje (nie rozpatrywane w modelu), w których pacjent jest przewożony prywatnym środkiem transportu do najbliższego szpitala lub gdy obsługą stanu nagłego zajmują się inne podmioty nie uwzględniane w modelu (na przykład służby kolejowe lub wojskowe).

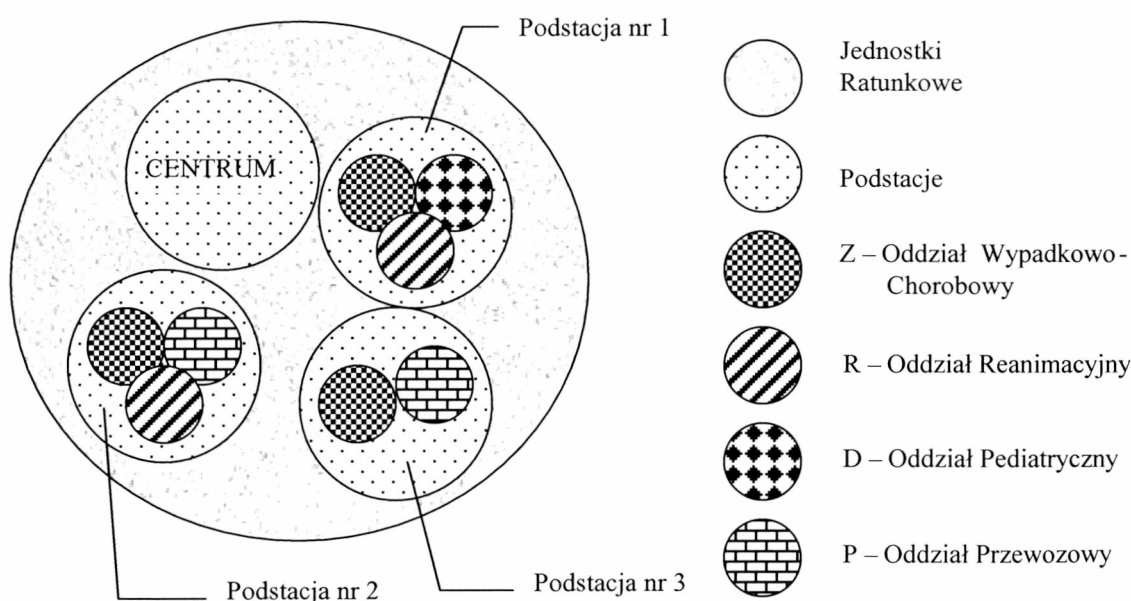
Przyjmuje się, że dla każdej Gminy znane są informacje dotyczące:

- procentu Stanów Nagłych zgłaszanych do systemu ratownictwa medycznego spośród wszystkich Stanów Nagłych, które pojawiają się w Gminie,
- procentu Stanów Nagłych, który trafia do Systemu,
- czasu jaki upływa pomiędzy zaistnieniem Stanu Nagłego a zgłoszeniem go do Systemu (czas zamiany Stanu Nagłego w Zgłoszenie).

4.5.3. Obiekty związane z elementem struktury "Jednostki Ratunkowe"

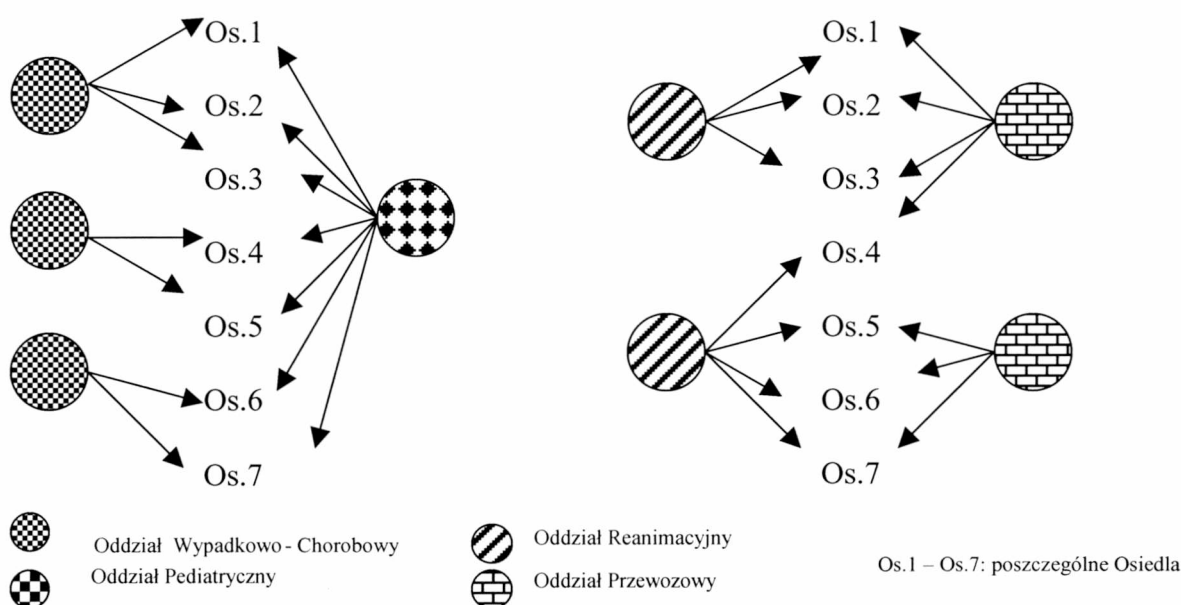
Jednostki Ratunkowe są zbiorem zakładów opieki zdrowotnej świadczących usługi pomocy doraźnej na rzecz ludności objętej opieką Systemu. W strukturze Jednostek Ratunkowych można wyróżnić następujące obiekty (por.rys.4.2):

- Centrum Jednostek Ratunkowych. Jest to centrum zarządzania, pełniące funkcje koordynacyjne i funkcje planowania strategicznego dla całego Systemu, a także funkcję powiadamiania ratunkowego, do którego spływa większość wezwań ratunkowych (zgłoszeń) z całego obszaru. Zgłoszenia przyjmowane w Centrum kierowane są do właściwej Podstacji, zgodnie z typem zgłoszeń oraz miejscem ich powstawania. Centrum nie pełni w sposób bezpośredni żadnych usługowych funkcji pomocy doraźnej,
- Podstacje będące podstawowymi jednostkami administracyjnymi Systemu. Podstacje bezpośrednio świadczą usługi pomocy doraźnej realizując zlecenia wyjazdów do pacjentów. Zakłada się, że wszystkie Podstacje mogą również bezpośrednio przyjmować telefoniczne zgłoszenia pacjentów. Ze względów formalnych Centrum określone jest w modelu jako Podstacja o numerze 0. Podstacje są podzielone logicznie w modelu na Oddziały. Zakłada się, że każda Podstacja (za wyjątkiem Podstacji numer zero) zawiera co najmniej jeden Oddział i obsługuje ściśle określoną liczbę Gmin (co najmniej jedną),



Rys.4.2. Podział Jednostek Ratunkowych na Podstacje i Oddziały.

- Oddziały są strukturą umowną. Oddział oznacza logicznie wyodrębniony fragment Podstacji, na który składają się sumy Zespołów wyjazdowych jednego typu. Wyróżnia się następujące typy Oddziałów: Reanimacyjne („R”), Pediatryczne („D”), Przewozowe („P”) i Zwykłe (wypadkowo-chorobowe; „Z”). Zakłada się, że typ Oddziału odpowiada rodzajowi obsługiwanych zgłoszeń. Kilka oddziałów może stanowić fizycznie jedną instytucję i być zlokalizowanych w obrębie jednego budynku. Każdy Oddział obsługuje co najmniej jedno Osiedle, a do każdego Osiedla jest przypisany dokładnie jeden Oddział każdego typu („R”, „Z”, „D” i „P”), por.rys.4.3. Zakłada się, że wszystkie Podstacje (w tym: Centrum) są zlokalizowane w konkretnych Osiedlach,



Rys.4.3. Obsługa Osiedli przez poszczególne typy Oddziałów.

- Zespoły. Zespół oznacza grupę pracowników (medycznych i nie-medycznych) Systemu, która ma do dyspozycji karetkę i bezpośrednio świadczy pomoc medyczną w stanach nagłych. Karetki poruszają się ze zmienną prędkością w zależności od typu pojazdu i pory doby. Wyróżnia się cztery rodzaje Zespołów: Reanimacyjny, Pediatryczny, Wypadkowo-Chorobowe i Przewozowe. W skład Zespołu wyjazdowego nie-Przewozowego wchodzi zawsze lekarz. Zakłada się, że Zespoły w sposób stały rozmieszczone są w Oddziałach, a godziny ich pracy określone są odpowiednimi harmonogramami. Konsekwentnie, w każdym momencie, dla każdego Oddziału znana jest liczba i rodzaj aktualnie pracujących Zespołów. Zespoły komunikują się z Oddziałem za pomocą radiotelefonu. Zakłada się, że

do zgłoszenia wysyłany jest najbliższy Zespół odpowiedniego typu z właściwego rejonowo Oddziału, przy czym w koniecznych sytuacjach Zespoły mogą być skierowane na teren działania sąsiednich oddziałów.

Ogólnie:

$$\text{Jednostki Ratunkowe} = [1 \text{ Centrum}] + [n \text{ Podstacji}]$$

$$\text{Podstacja} = [k1 \text{ Oddziałów „R”}] + [k2 \text{ Oddziałów „Z”}] + \\ [k3 \text{ Oddziałów „P”}] + [k4 \text{ Oddziałów „D”}]$$

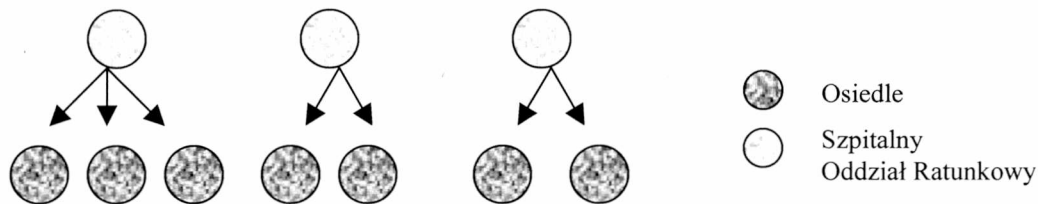
$$\text{gdzie } n + 1 = N, \quad k1, k2, k3, k4 \geq 0$$

Z elementem struktury Jednostki Ratunkowe związany jest również obiekt podstawowy Zgłoszenie. Większość informacji o zaistniałych Stanach Nagłych dociera do Systemu w postaci Zgłoszenia. Zakłada się, że Zgłoszenia mogą napływać niezależnie do Centrum oraz do innych Podstacji w postaci zgłoszenia telefonicznego na centralne numery pogotowia lub na numery poszczególnych podstacji. Zgłoszenia mogą dotyczyć przypadków zwykłych (informacja o jednym Stanie Nagłym) lub wypadków masowych. W każdym z tych przypadków rejestrowane są odmienne zestawy danych i stosowane odmienne reguły postępowania.

4.5.4. Obiekty związane z elementem struktury "Miejsca Leczenia Szpitalnego"

Miejsca Leczenia Szpitalnego to instytucje zapewniające wszystkim pacjentom w stanie nagłego zagrożenia zdrowia lub życia właściwą, kompleksową i natychmiastową pomoc szpitalną. Podstawowym obiektem tego elementu struktury jest Szpitalny Oddział Ratunkowy (SOR), który zabezpiecza wszystkie funkcje życiowe, przeprowadza pełną i szybką diagnostykę oraz rozpoczyna konieczne leczenie. Szpitalnym Oddziałem Ratunkowym może być specjalnie powołany oddział szpitalny, specjalistyczna izba przyjęć, ambulatorium zlokalizowane przy stacji pogotowia lub szpital, który jest w stanie zapewnić kompleksowe leczenie. Każdy Oddział Ratunkowy obsługuje wyznaczony rejon, na który składa się określona liczba Osiedli (por.rys.4.4). Rejon Oddziału Ratunkowego może być różny w różnych dniach tygodnia lub porach doby. Każdy Oddział Ratunkowy zlokalizowany jest w konkretnym Osiedlu oraz obejmuje swoim zasięgiem stałą liczbę Osiedli. W

szczegółności, dla każdego Osiedla o każdej porze doby znana jest lokalizacja (nr Osiedla) Oddziału Ratunkowego zapewniającego pomoc medyczną w stanach nagłych.



Rys.4.4. Przydział Osiedli do poszczególnych Szpitalnych Oddziałów Ratunkowych.

4.5.5. Opis zdarzeń

Wyróżniono cztery zdarzenia podstawowe inicjujące procesy główne oraz cztery zdarzenia dodatkowe, które zapoczątkowują poszczególne fazy procesów głównych.

Zdarzenia podstawowe to:

(a) zdarzenie PSN (Powstanie Stanu Nagłego). W Gminie pojawia się Stan Nagły, ale informacji o tym fakcie nie przekazano jeszcze do Systemu. Stan Nagły opisywany jest następującymi atrybutami:

- wskaźnik lokalizacyjny, czyli numer Gminy i Osiedla, z których pochodzi,
- adres, wiek i płeć pacjenta,
- typ Stanu Nagłego: czy jest to przypadek zwykły czy masowy,
- rodzaj Stanu Nagłego: wypadek, zachorowanie czy przewóz
- charakter zagrożenia, czyli przyczyna Stanu Nagłego,
- data i czas zaistnienia Stanu Nagłego.

(b) zdarzenie NZG (Nowe Zgłoszenie). Podjęta zostaje decyzja o konieczności zgłoszenia Stanu Nagłego do Systemu. Procedura zgłaszania odbywa się najczęściej poprzez Centrum Dyspozytorskie (Podstacja nr 0), jednak może się zdarzyć, że Stan Nagły zostanie zgłoszony bezpośrednio do Podstacji. Miejsce zgłaszania jest zatem atrybutem charakteryzującym Stan Nagły zgłaszany do Systemu. Informacja o Stanie Nagłym wpływa do Systemu w formie Zgłoszenia i rozpoczyna się procedura „przyjmowania

Zgłoszenia”. Kilka Zgłoszeń może wpłynąć dokładnie o tym samym czasie. Po zaistnieniu zdarzenia NZG każde Zgłoszenie klasyfikowane jest jako przypadek zwykły (zawiadomienie o jednym Stanie Nagłym) lub masowy (zawiadomienie o katastrofie), a następnie rejestrowane są następujące informacje:

- wskaźnik lokalizacyjny Zgłoszenia: numer Gminy i numer Osiedla,
- adres, wiek i płeć pacjenta,
- subiektywny opis charakteru zagrożenia,
- data i czas wpłynięcia zgłoszenia do systemu
- gdy jest to wypadek masowy podawane są dodatkowe dane, np. o przybliżonej liczbie ofiar.

Po zakończeniu procesu przyjmowania Zgłoszenia do Systemu, dyspozytor podejmuje decyzje dotyczące pozostałych atrybutów Zgłoszenia, do których zalicza się:

- sformułowanie powodu wezwania po interpretacji podawanego opisu, co jest równoznaczne z ustaleniem stopnia pilności obsługi,
- ustalenie typu zespołu, który powinien podjąć obsługę zgłoszenia,
- wyznaczenie konkretnego Zespołu.

W niektórych przypadkach występuje radiowe przekazanie Zgłoszenia do właściwej rejonowo Podstacji.

(c) zdarzenie **POZ** (Początek Obsługi Zgłoszenia). Rozpoczyna się proces obsługi Zgłoszenia. Zespół wyjeżdża z Oddziału do pacjenta lub informację o Zgłoszeniu przekazuje się drogą radiową do Zespołu znajdującego się w terenie. Zespół może obsługiwać wiele zgłoszeń, przy czym obsługa zgłoszeń zwykłych jest zawsze sekwencyjna. W przypadku zgłoszeń masowych obsługiwanych jest jednocześnie wiele zgłoszeń. Po dojeździe Zespołu na miejsce Zgłoszenia rozpoczynają się działania ratownicze. Podejmowane są decyzje określające:

- rozpoznanie,
- rodzaj udzielanej pomocy medycznej (leki, zabiegi/procedury medyczne, porada); wybór rodzaju czynności ratowniczych determinuje wartość parametru określającego ‘czas obsługi na miejscu zgłoszenia’,

- potrzebę dalszego leczenia. W ramach tej decyzji określa się czy czynności ratownicze zakończą się na miejscu zgłoszenia, czy też pacjent zostanie przewieziony do Oddziału Ratunkowego.

Po zakończeniu czynności ratowniczych na miejscu Zgłoszenia może rozpocząć się transport do Szpitalnego Oddziału Ratunkowego. W trakcie transportu kontynuowane są działania ratownicze.

- (d) zdarzenie KOZ (Koniec Obsługi Zgłoszenia). Zespół ratowniczy zostaje zwolniony (na miejscu Zgłoszenia lub w SOR) i wraca do bazy lub rozpoczyna obsługę kolejnego Zgłoszenia lub, jeżeli wynika tak z harmonogramu pracy Zespołu, zostaje zwolniony całkowicie (oznacza to, że dany Zespół kończy dyżur a na jego miejscu nie będzie pracował inny Zespół).

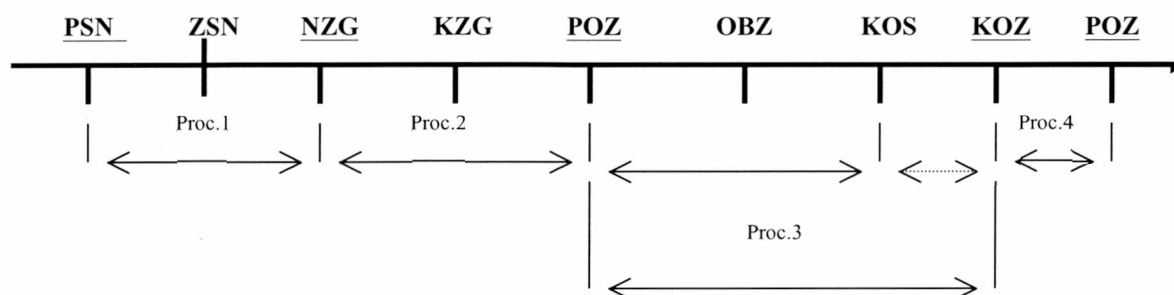
Zdarzenia dodatkowe to:

- a) zdarzenie ZSN (Zgłoszenie Stanu Nagłego). Podjęta zostaje decyzja o konieczności zgłoszenia Stanu Nagłego do Systemu, w wyniku której Stan Nagły zgłaszany jest, z pewnym opóźnieniem, do Centrum lub do Podstacji.
- b) zdarzenie KZG (Koniec przyjmowania ZGłoszenia). Zakończono proces przyjmowania Zgłoszenia do Systemu i podejmowane są pewne decyzje przez dyspozytora (dotyczące m.in. stopnia pilności obsługi i typu Zespołu, który powinien obsłużyć Zgłoszenie),
- c) zdarzenie OBZ (początek Obsługi Bezpośredniej Zgłoszenia). Rozpoczynają się działania ratownicze na miejscu Zgłoszenia,
- (e) zdarzenie KOS (Koniec Obsługi na miejscu, pacjent przewożony do SOR). Kończą się działania ratownicze na miejscu Zgłoszenia i rozpoczyna się transport do Szpitalnego Oddziału Ratunkowego.

4.5.6. Opis procesów jednostkowych

Wyróżniono cztery typy procesów jednostkowych (por.rys.4.5):

- proces 1 – powstawanie stanów nagłych,
proces 2 – przyjmowanie nowych zgłoszeń,
proces 3 – obsługa zgłoszeń,
proces 4 - ponowny przydział zespołów do zgłoszeń.



Rys.4.5. Powiązania pomiędzy zdarzeniami i procesami jednostkowymi. Zdarzenia główne wyróżniono. Linia kropkowaną zaznaczono opcjonalną część procesu 4 (przewóz do SOR).

PROCES 1 - POWSTAWANIE STANÓW NAGŁYCH

Początkiem procesu jest moment zaistnienia zdarzenia PSN (wystąpienie Stanu Nagłego w Gminie),

Koniec procesu ma miejsce w chwili wystąpienia zdarzenia NZG, tj. w chwili wpłynięcia Zgłoszenia do Systemu,

Wynikiem procesu jest lista faktów wystąpienia Stanów Nagłych w Gminach wraz z atrybutami tych stanów.

Omawiany proces obejmuje dwie fazy:

faza 1: od powstania Stanu Nagłego do podjęcia decyzji o zgłoszeniu w Systemie,

faza 2: od podjęcia decyzji o zgłoszeniu do momentu rozpoczęcia zgłaszania.

PROCES 2 - PRZYJMOWANIE NOWYCH ZGŁOSZEŃ

Początek procesu ma miejsce w chwili wpłynięcia Zgłoszenia do Systemu, czyli wystąpienia zdarzenia NZG,

Koniec procesu nastąpi w momencie wystąpienia zdarzenia POZ, czyli rozpoczęcia obsługi zgłoszenia,

Wynikiem procesu jest lista (zbiór) Zgłoszeń, które wpłynęły do Systemu wraz z ich atrybutami pierwotnymi (atrybuty Stanów Nagłych) oraz cechami wtórnymi (nadany przez dyspozytora).

Omawiany proces obejmuje dwie fazy:

faza 1: faktyczne przyjmowanie zgłoszenia przez dyspozytora; faza ta obejmuje czas od wpłynięcia Zgłoszenia do Systemu do zakończenia przyjmowania Zgłoszenia ,
faza 2: opóźnienie do chwili rozpoczęcia właściwego procesu obsługi; faza ta obejmuje okres od zakończenia przyjmowania Zgłoszenia w Systemie do faktycznego rozpoczęcia obsługi zgłoszenia.

PROCES 3 - OBSŁUGA ZGŁOSZEŃ

Początek procesu następuje w momencie wystąpienia zdarzenia POZ, czyli formalnego rozpoczęcia obsługi zgłoszenia (do zgłoszenia wyjeżdża Zespół),

Koniec procesu przypada na moment zaistnienia zdarzenia KOZ, czyli zakończenia obsługi pacjenta (na miejscu zgłoszenia lub w SOR).

Wynikiem procesu jest zbiór zgłoszeń, którym udzielono pomocy doraźnej w Systemie wraz z opisem przebiegu procedury obsługi.

Omawiany proces obejmuje trzy fazy, z których dwie pierwsze występują zawsze, natomiast faza trzecia ma miejsce tylko w przypadkach przewozu pacjenta do Szpitalnego Oddziału Ratunkowego:

faza 1: trwa od momentu rozpoczęcia obsługi do momentu przystąpienia do bezpośredniej obsługi pacjenta (zdarzenie OBZ),

faza 2: trwa od momentu rozpoczęcia bezpośredniej obsługi pacjenta do momentu zaistnienia zdarzenia KOS lub KOZ, tzn. zakończenia obsługi na miejscu zgłoszenia.

faza 3: trwa od momentu zakończenia obsługi na miejscu do momentu zwolnienia Zespołu w SOR. Faza ta występuje jedynie w przypadku zgłoszeń wymagających leczenia szpitalnego.

PROCES 4 - PONOWNY PRZYDZIAŁ ZESPOŁÓW DO ZGŁOSZEŃ

Początek procesu następuje w momencie wystąpienia zdarzenia KOZ, czyli w momencie zwolnienia Zespołu z obsługi Zgłoszenia (na miejscu lub w szpitalu).

Koniec procesu przypada na moment zaistnienia zdarzenia POZ, czyli rozpoczęcia obsługi następnego Zgłoszenia.

Wynikiem procesu jest opis zachowania Zespołów pomiędzy obsługą kolejnych zgłoszeń.

4.6. MODEL FORMALNY

4.6.1. Konwencja opisu modelu

Model formalny regionalnego systemu ratownictwa medycznego jest modelem:

- *dyskretnym w czasie*. Czas w modelu płynie skokowo, a aktualne wartości czasu są wielokrotnościami jednostki podstawowej, czyli minuty,
- *dyskretnym w stanie*. Zmienne opisowe modelu wyrażone są symbolicznie wartościami dyskretnymi,
- *stochastycznym*. Model zawiera zmienne losowe związane z czasem wystąpienia, typem, lokalizacją i ilością zgłoszeń,
- *nieautonomicznym*. Wpływ otoczenia jest uwzględniany za pomocą *zmiennych wejściowych*, których wartości nie są przez model kontrolowane, lecz na które musi on reagować.
- *niezmiennym w czasie*. Reguły interakcji są wyłącznie zależne od wartości, które mogą przyjmować zmienne opisowe.

Opis modelu symulacyjnego (zwanego dalej modelem RAMD, „Ratownictwo MeDyczne”) zawarty jest w trzech modelach cząstkowych: w modelu struktury, w modelu stanów oraz w modelu procesów. Modele cząstkowe są ze sobą ściśle związane i żadnego z nich nie można rozpatrywać w oderwaniu od pozostałych. W modelu struktury zdefiniowano strukturę Systemu: wyróżniono wszystkie obiekty struktury oraz określono relacje zachodzące pomiędzy nimi. W modelu stanów zdefiniowano pojęcie stanu systemu, a następnie przedstawiono obiekty stanów, tj. obiekty, które określają stan Systemu lub wpływają na zmianę stanu Systemu. Zmiana wartości pewnych atrybutów obiektów stanu jest interpretowana jako zaistnienie zdarzenia, które inicjuje proces przejścia Systemu z jednego stanu do drugiego. W modelu procesów zdefiniowano i opisano procesy jednostkowe zachodzące pomiędzy obiektami stanów i obiektami struktury Systemu. Procesy jednostkowe inicjowane są kolejnymi zdarzeniami, odpowiadającymi zmianom w wartości atrybutów obiektów stanu. Wynikiem zakończenia procesu jednostkowego jest przejście Systemu do innego stanu.

Model matematyczny Systemu opracowano z wykorzystaniem metody symulacji zdarzeń dyskretnych, w której zjawisko upływu czasu zrealizowano za pomocą koncepcji następnego zdarzenia.

4.6.2. Model struktury

Klasy elementów modelu struktury

W strukturze Systemu wyróżniono trzy podstawowe klasy elementów struktury:

- (1) Jednostki Terytorialne, czyli ustalone, możliwe do jednoznacznego zdefiniowania obszary terytorialne (np. ulica, osiedle, wieś) zamieszkałe przez populację mieszkańców,
- (2) Jednostki Ratunkowe czyli zakłady opieki zdrowotnej, których podstawowym celem jest reagowanie na stany nagłe,
- (3) Miejsca Leczenia Szpitalnego, czyli zakłady opieki zdrowotnej lub ich fragmenty, które przejmują na siebie dalszą opiekę nad pacjentem (szpitale lub oddziały szpitalne).

Obiekty struktury

Elementy struktury Systemu zostały zdefiniowane za pomocą **obiektów struktury**, czyli obiektów bezpośrednio kształtujących wewnętrzną strukturę Systemu. Wyróżniono sześć typów obiektów struktury. Są to: *Podstacja*, *Oddział*, *Gmina*, *Osiedle*, *Szpitalny Oddział Ratunkowy (SOR)* oraz *Zespół*. Na rys. 4.6. przedstawiono model struktury Systemu obrazujący przykładowe, wzajemne powiązania pomiędzy poszczególnymi typami obiektów struktury.

Każde Osiedle jest przyporządkowane w danej chwili dokładnie jednemu Oddziałowi każdego typu oraz dokładnie jednemu Szpitalnemu Oddziałowi Ratunkowemu, przy czym przydział do SOR może zmieniać się w zależności od pory doby i dnia tygodnia. Rejonizacja prowadzona jest z dokładnością do Osiedla (a nie z dokładnością do Gminy). Oznacza to, że na przykład pięć Osiedli Gminy nr 1 podlega pod Oddział Wypadkowo-Chorobowy Podstacji nr 1, a pozostała część pod Oddział W-Ch Podstacji nr 2. W każdym Oddziale pracuje pewna liczba Zespołów danego typu, przy czym liczba ta może zmieniać się w ciągu doby. Rejonizacja Osiedli nie wyklucza stosowania w modelu reguł (na przykład przydziału karetek), które nie uwzględniają rejonizacji, lub uwzględniają ją tylko w pewnych, ściśle określonych przypadkach.

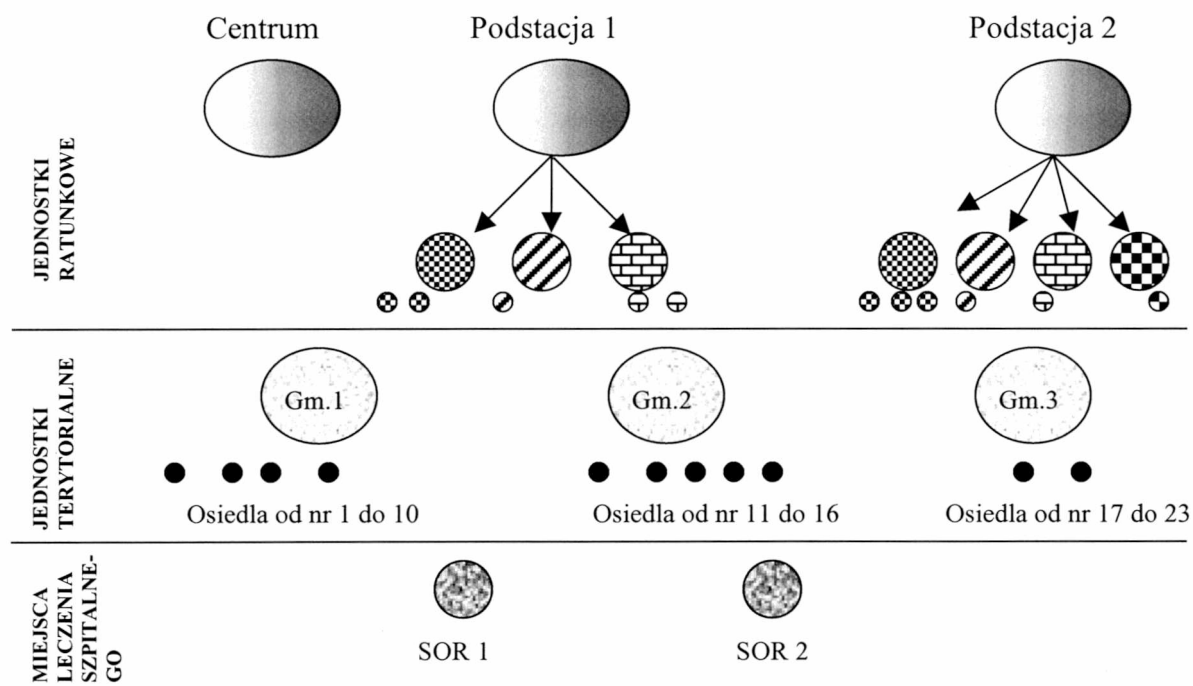
Obiekt struktury ZESPÓŁ

ZESPÓŁ jest elementarnym obiektem podsystemu Jednostek Ratunkowych. Z obiektów typu ZESPÓŁ składają się wszystkie obiekty typu ODDZIAŁ. Jak podano w rozdz. 4.4 pod pojęciem ZESPÓŁU rozumie się grupę pracowników (medycznych i nie-medycznych)

Systemu, mającą do dyspozycji karetkę i bezpośrednio świadczącą medyczną pomoc ratunkową w stanach nagłych. Wyróżnia się cztery rodzaje ZESPOŁÓW: Reanimacyjny, Pediatriczny, Zwykły (Wypadkowo-Chorobowy) i Przewozowy. Zakłada się, że nazwy typów ZESPOŁÓW określają podstawowy rodzaj zgłoszeń, które są obsługiwane przez ZESPOŁY poszczególnego typu. Każdy ZESPÓŁ posiada następujące atrybuty:

- numer ZESPOŁU
- typ ZESPOŁU: „R”, „Z”, „P”, „D”,
- harmonogram pracy ZESPOŁU, określający każdego dnia tygodnia godzinę początkową i końcową pracy na każdej z dwóch zmian.

Z obiektem ZESPÓŁ związana jest zmienna decyzyjna Liczba Zespołów = **LBZESP**, określająca całkowitą liczbę ZESPOŁÓW wchodzących w skład Systemu.



Rys. 4.6. Przykładowy model powiązań pomiędzy obiektami struktury Systemu.

Obiekt struktury ODDZIAŁ

ODDZIAŁ jest logicznie wyodrębnioną sumą ZESPOŁÓW jednego typu. Analogicznie jak w przypadku ZESPOŁÓW, wyróżnia się cztery typy ODDZIAŁÓW: Reanimacyjny („R”), Pediatriczny („D”), Zwykły (Wypadkowo-Chorobowy; „Z”) i Przewozowy („P”). Każdy

ODDZIAŁ ma ściśle zdefiniowany rejon działania wyrażony w postaci numerów podlegających OSIEDLI. ODDZIAŁ jest opisany następującymi atrybutami:

- numer ODDZIAŁU,
- typ ODDZIAŁU: „R”, „Z”, „P”, „D”,
- liczba OSIEDLI, które podlegają danemu ODDZIAŁOWI,
- numery OSIEDLI, które podlegają danemu ODDZIAŁOWI,
- liczba ZESPOŁÓW pracujących w danym ODDZIALE,
- numery ZESPOŁÓW pracujących w danym ODDZIALE,
- numer OSIEDLA, na terenie którego zlokalizowany jest ODDZIAŁ.

Z obiektem ODDZIAŁ związana jest zmienna decyzyjna Liczba Oddziałów = **LBODDZ**, określająca całkowitą liczbę ODDZIAŁÓW wchodzących w skład Systemu.

Obiekt struktury PODSTACJA

PODSTACJA jest sumą ODDZIAŁÓW dowolnych typów. Ze względów formalnych wyróżnia się dwa rodzaje PODSTACJI: CENTRUM, które nie zawiera ODDZIAŁÓW i PODSTACJE WYJAZDOWE, świadczące usługi pomocy doraźnej i składające się z co najmniej jednego ODDZIAŁU dowolnego typu. Każda PODSTACJA jest opisana następującymi atrybutami:

- numer PODSTACJI,
- typ PODSTACJI : Centrum, Podstacja Wyjazdowa,
- liczba ODDZIAŁÓW wchodzących w skład danej PODSTACJI,
- numery ODDZIAŁÓW wchodzących w skład danej PODSTACJI.

Z obiektem PODSTACJA związana jest zmienna decyzyjna Liczba Podstacji = **LBPOD**, określająca całkowitą liczbę Podstacji wchodzących w skład Systemu.

Obiekt struktury GMINA

GMINA jest najmniejszym populacyjnie fragmentem Systemu. Suma populacji poszczególnych GMIN odpowiada populacji całego Systemu. Każda GMINA charakteryzuje się pewnym wskaźnikiem intensywności pojawiania się stanów nagłych, który może zmieniać się w ciągu doby ale jest zawsze jednolity dla całego obszaru GMINY. Każda GMINA dzieli się na pewną liczbę mniejszych obszarów – OSIEDLI. Każda GMINA jest opisana następującymi atrybutami:

- numer GMINY,

- Liczebność - liczba mieszkańców GMINY,
- Liczba okresów o różnym wskaźniku intensywności powstawania stanów nagłych,
- Parametry intensywności powstawania stanów nagłych w każdym wyróżnionym okresie,
- Parametry wieku ludności,
- Parametry płci ludności,
- Liczba OSIEDLI, na które podzielona jest GMINA,
- Numery OSIEDLI, na które podzielona jest GMINA,
- Procent stanów nagłych trafiających do systemu opieki zdrowotnej,
- Procent spośród stanów nagłych trafiających do systemu opieki zdrowotnej, który trafił do Systemu,
- Miejsce zgłaszania: numer podstacji, do której zgłaszany jest stan nagły,
- Prawdopodobieństwa pojawienia się określonego rodzaju zgłoszenia, [0]=Wypadek, [1]=Zachorowanie, [2]=Przewóz.

Z obiektem GMINA związana jest zmienna decyzyjna Liczba Gmin = **LBGMIN**, określająca łączną liczbę GMIN wchodzących w skład Systemu.

Obiekt struktury OSIEDLE

Pojęcie OSIEDLA określa najmniejszy, rozpatrywany w modelu fragment terytorium Systemu. Każde OSIEDLE przyporządkowane jest dokładnie jednej GMINIE. Suma wszystkich OSIEDLI odpowiada całemu terytorium Systemu. Każde OSIEDLE jest opisane następującymi atrybutami:

- Numer OSIEDLA,
- Numer GMINY, do której należy OSIEDLE,
- Numer ODDZIAŁU każdego typu, którego rejon działania obejmuje dane OSIEDLE. Zakłada się, że każde OSIEDLE podlega dokładnie czterem ODDZIAŁOM: „R”, „Z”, „P” i „D”
- numer SOR, którego rejon działania obejmuje dane OSIEDLE w danej porze doby.

Z obiektem OSIEDLE związana jest zmienna decyzyjna Liczba Osiedli = **LBOSD**, określająca łączną liczbę OSIEDLI wchodzących w skład Systemu.

Obiekt struktury SZPITALNY ODDZIAŁ RATUNKOWY (SOR)

Szpitalny Oddział Ratunkowy to specjalnie powołany oddział szpitalny, specjalistyczna izba przyjęć, ambulatorium zlokalizowane przy stacji pogotowia lub szpital, który jest w stanie zapewnić kompleksowe leczenie. Każdy SOR obsługuje określoną liczbę OSIEDLI, przy czym rejon podlegający SOR może się zmieniać w zależności od pory doby i dnia tygodnia. Każdy SOR zlokalizowany jest w konkretnym Osiedlu. Każdy SOR posiada następujące atrybuty:

- Numer SOR,
- liczba okresów, w których ulega zmianie rejon OSIEDLI podlegający SOR,
- liczba OSIEDLI, które podlegają danemu SOR w każdym okresie,
- numery OSIEDLI, które podlegają danemu SOR w każdym okresie,
- numer OSIEDLA, na terenie którego zlokalizowany jest SOR.

Z obiektem SOR związana jest zmienna decyzyjna Liczba SOR = **LBSOR**, określająca całkowitą liczbę Szpitalnych Oddziałów Ratunkowych wchodzących w skład Systemu.

Relacje pomiędzy obiektami struktury można matematycznie zapisać jako:

$$\text{Jednostki Terytorial.} = \{GMINA_1\} + \{GMINA_2\} + \dots + \{GMINA_p\},$$

$$\text{gdzie } p \in \{1, LbGMIN\},$$

$$GMINA_p = \{OSIEDLE_{p1}\} + \{OSIEDLE_{p2}\} + \dots + \{OSIEDLE_{pt}\},$$

$$\text{gdzie } t \in \{1, LbOsd\} \text{ oraz "pt" oznacza t Osiedli w GMINIE p}$$

$$\text{Jednostki Ratunkowe} = \{CENTRUM\} + \{PODSTACJA_1\} + \dots + \{PODSTACJA_n\},$$

$$\text{gdzie } n \in \{1, LbPod\}$$

$$PODSTACJA_n = \{ODDZIAL_{n1}\} + \{ODDZIAL_{n2}\} + \dots + \{ODDZIAL_{nk}\},$$

$$\text{gdzie } k \in \{1, LbOddz\} \text{ oraz "nk" oznacza k Oddziałów w Podstacji n}$$

$$ODDZIAL_{nk} = \{ZESPOL_{nk1}\} + \{ZESPOL_{nk2}\} + \dots + \{ZESPOL_{nkr}\},$$

$$\text{gdzie } r \in \{1, LbZesp\} \text{ oraz "nkr" oznacza r Zespołów w Oddziale k w Podstacji n}$$

$$LbOsdOddz_{nk} - \text{liczba Osiedli podlegających Oddziałowi nk}$$

$$\text{Rejon_Oddz}_{nk} = OSIEDLE_{nk1} + OSIEDLE_{nk2} + \dots + OSIEDLE_{nkw},$$

$$\text{gdzie } w = LbOsdOddz_{nk}$$

$$\text{Miejsca Leczenia Szpitalnego} = \{SOR_1\} + \{SOR_2\} + \dots + \{SOR_s\},$$

gdzie $s \in \{1, LbSOR\}$

$LbOsdOSR_s$ – liczba Osiedli podlegających SOR – owi s

$$\text{Rejon_}SOR_s = OSIEDLE_{s1} + OSIEDLE_{s2} + \dots + OSIEDLE_{sz},$$

gdzie $z \in \{1, LbOsdSOR_s\}$

4.6.3. Model stanów

Obiekty stanu

Analiza systemu obejmuje badanie zmian jego stanów w czasie. Stan systemu określa się jako sumę wartości atrybutów poszczególnych obiektów systemu, [52], natomiast zmiana stanu systemu jest wynikiem zmian zachodzących w tych wartościach. W przypadku większości systemów, zmianę w stanie obiektów systemu indukuje bodziec zewnętrzny, wyrażony w modelu za pomocą zmiennej stanu a określony mianem zdarzenia. Zmiana ta może pojawić się albo po upływie pewnego czasu od odebrania bodźca albo w trakcie działania bodźca.

W modelu RAMD wyróżniono dwa podstawowe typy obiektów, które - poprzez zmianę w wartościach swoich atrybutów - wymuszają zmianę stanu Systemu. Obiekty te nazwano **obiektami stanu**. Są to obiekty: STAN_NAGŁY i ZGŁOSZENIE. Zmiany w wartościach atrybutów obiektów stanu wpływają bezpośrednio na zmianę wartości pewnych atrybutów obiektu struktury typu ZESPÓŁ, dlatego obiekt ten jest w modelu traktowany jednocześnie jako obiekt struktury i obiekt stanu. W pierwszym przypadku ZESPÓŁ reprezentuje obiekt statyczny i interpretowany jest jako zasób obiektu ODDZIAŁ. W drugim przypadku ZESPÓŁ jest obiektem dynamicznym i pozostaje w relacji do obsługiwanego obiektu ZGŁOSZENIE.

Obiekt stanu STAN_NAGŁY

Obiekt STAN_NAGŁY jest ściśle związany z obiektem ZGŁOSZENIE. Charakteryzowany jest następującymi atrybutami:

- Czas (dzień, godzina) zaistnienia STANU_NAGŁEGO,
- Numer kolejny STANU_NAGŁEGO,
- Numer GMINY $\in \{1, LbGmin\}$, na terenie której miał miejsce STAN_NAGŁY,
- Numer OSIEDLA $\in \{1, LbOsd\}$, na terenie którego miał miejsce STAN_NAGŁY

- Numer OSIEDLA $\in \{1, LbOsd\}$, z którego pochodzi STAN_NAGŁY
- Wiek,
- Płeć,
- Kod Zagrożenia $\in \{1, LbKodowZagr\}$ opisujący charakter zagrożenia,
- Typ STANU_NAGŁEGO $\in \{Zwykly, Masowy\}$,
- Miejsce Zgłaszania $\in \{0, LbPod\}$ czyli PODSTACJA, do której jest zgłaszany.

Liczba obiektów STAN_NAGŁY jest zmienna w czasie i zależy od parametrów rozkładu statystycznego określającego odstępy czasu upływającego pomiędzy pojawieniem się dwóch kolejnych stanów nagłych na terenie każdej Gminy. Liczba obiektów STAN_NAGŁY nie jest zmienną decyzyjną.

Obiekt stanu ZGŁOSZENIE

ZGŁOSZENIE jest podstawowym obiektem stanu Systemu. Obiekt ten powstaje z obiektu STAN_NAGŁY w momencie przekazania informacji o zaistniałym stanie nagłym do Systemu. ZGŁOSZENIE opisywane jest następującymi atrybutami:

- Czas (dzień, godzina) Zgłoszenia, czyli pojawienia się ZGŁOSZENIA w Systemie,
- Numer kolejny ZGŁOSZENIA,
- Numer GMINY $\in \{1, LbGmin\}$, z terenu której pochodzi ZGŁOSZENIE,
- Numer OSIEDLA $\in \{1, LbOsd\}$, z terenu którego pochodzi ZGŁOSZENIE,
- Numer OSIEDLA $\in \{1, LbOsd\}$, z którego pochodzi ZGŁOSZENIE,
- Wiek pacjenta,
- Płeć pacjenta,
- Typ STANU_NAGŁEGO $\in \{Zwykly, Masowy\}$,
- Rodzaj ZGŁOSZENIA $\in \{Wypadek, Zachorowanie, Przewóz\}$,
- Numer PODSTACJI $\in \{0, LbPod\}$, która obsługuje ZGŁOSZENIE,
- Kod Zagrożenia $\in \{1, LbKodowZagr\}$, czyli charakter zagrożenia STANU_NAGŁEGO,
- Kod Powodu Wezwania $\in \{1, LbKodowWezw\}$, kod opisujący powód wezwania,
- Typ Zespołu do Obsługi $\in \{R, D, Z, P\}$,
- Numer Oddziału $\in \{1, LbOddz\}$ obsługującego ZGŁOSZENIE,
- Numer Zespołu Obsługującego $\in \{1, LbZesp\}$,

- Kod Rozpoznania $\in \{1, LbKodowRozp\}$, czyli rozpoznanie postawione przez lekarza,
- Czas Obsługi na Miejscu,
- Konieczność Leczenia Szpitalnego $\in \{TAK, NIE\}$,
- Numer Szpitalnego Oddziału Ratunkowego $\in \{1, LbSOR\}$,

Liczba obiektów ZGŁOSZENIE jest zmienna w czasie i zależy zarówno od liczby stanów nagłych zgłoszonych do Systemu, jak i od wartości całkowitego czasu obsługi, po upływie którego ZGŁOSZENIE opuszcza System. Liczba obiektów ZGŁOSZENIE nie jest zmienną decyzyjną.

Obiekt stanu ZESPÓŁ

Liczba obiektów stanu typu ZESPÓŁ jest zmienną decyzyjną i ulega zmianie na skutek jawnej zmiany wartości zmiennej decyzyjnej na wejściu systemu. Obiekt ten jest opisany następującymi atrybutami:

- Numer Zespołu $\in \{1, LbZesp\}$,
- Typ Zespołu $\in \{ "R", "D", "Z", "P" \}$,
- Numer Oddziału $\in \{1, LbOddz\}$, w którym stacjonuje ZESPÓŁ,
- Aktualna strefa pobytu $\in \{1, LbOsd\}$,
- Status ZESPOŁU $\in \{Wolny, Zajety\}$,
- Numer obsługiwanego zgłoszenia,
- Strefa docelowa $\in \{1, LbOsd\}$,
- Prędkość poruszania się ZESPOŁU,
- Czas Wyjazdu, czyli czas rozpoczęcia realizacji zlecenia,
- Czas Przyjazdu, czyli czas przyjazdu na miejsce zgłoszenia

Zmienne stanu i stany Systemu

W modelu RAMD wyróżnia się trzy **zmienne stanu**: Liczba Stanów Nagłych, Liczba Zgłoszeń, oraz Liczba Zgłoszeń Obsługiwanym, które wyznaczają pięć głównych stanów systemu:

Stan 0: W Systemie znajduje się pewna, stała liczba obiektów typu STAN_NAGŁY i ZGŁOSZENIE odnosząca się do a) nowo-zaistniałych obiektów typu STAN_NAGŁY, b) obiektów ZGŁOSZENIE znajdujących się w Systemie (będących

w trakcie obsługi lub oczekujących na obsługę) c) obiektów ZGŁOSZENIE, które są aktualnie obsługiwane.

Liczba obiektów typu ZESPÓŁ jest stała i każdy z nich ma ściśle określony status: a) jest wolny, b) jest zajęty obsługą ZGŁOSZENIA, c) jest zajęty przewozem pacjenta do szpitala.

Stan 1 W Systemie pojawia się nowy obiekt typu STAN_NAGŁY, w wyniku czego następuje zmiana wartości zmiennej stanu Liczba Stanów Nagłych. Atrybutom nowego obiektu nadawane są wartości (może jednak zdarzyć się sytuacja, kiedy nie wszystkie wartości atrybutów są znane): Czas, Numer Gminy, Numer Osiedla, Adres, Wiek, Płeć, Kod Zagrożenia, Typ. W przypadku podjęcia decyzji o zgłoszeniu w Systemie generowana jest wartość atrybutu Miejsce Zgłaszania.

Stan 2 Obiekt STAN_NAGŁY zgłaszany jest do Systemu, w wyniku czego następuje zmniejszenie wartości zmiennej stanu Liczba Stanów Nagłych i zwiększenie wartości zmiennej stanu Liczba Zgłoszeń. Pojawia się nowy obiekt typu ZGŁOSZENIE. Nadawane są wartości atrybutom: Czas Zgłoszenia, Rodzaj Zgłoszenia, Numer Podstacji Obsługującej, Kod Powodu Wezwania, Typ Zespołu Obsługującego. Ustalany jest również Numer Oddziału, który podejmie obsługę ZGŁOSZENIA.

Stan 3 Podejmowana jest decyzja dotycząca obsługi ZGŁOSZENIA poprzez wskazanie numeru ZESPOŁU, który podejmie czynności ratownicze. Zwiększeniu ulega wartość zmiennej stanu Liczba Zgłoszeń Obsługiwanych. Zmienia się również status ZESPOŁU wyznaczonego do obsługi z „wolny” na „zajęty obsługą zgłoszenia”. Konsekwencją tego jest zmiana wartości następujących atrybutów obiektu ZESPÓŁ: Czas Wyjazdu, Strefa Docelowa, Prędkość. W trakcie trwania procesu obsługi nadawane są wartości kolejnym atrybutom obiektu ZGŁOSZENIE.

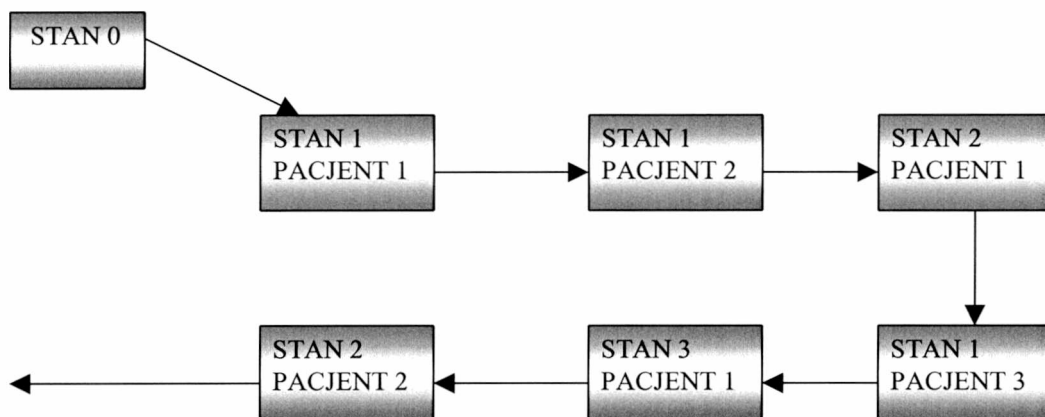
Stan 4 ZESPÓŁ kończy obsługę ZGŁOSZENIA i zmniejsza się wartość zmiennej stanu Liczba Zgłoszeń Obsługiwanych. Zmienia się również status Zespołu z „zajęty” na „wolny”. Obiekt ZGŁOSZENIE opuszcza System co powoduje zmniejszenie całkowitej liczby pacjentów w systemie, czyli zmianę zmiennej stanu Liczba Zgłoszeń.

Analizując dynamikę przejść Systemu z jednego stanu do drugiego, należy rozpatrywać to zagadnienie z dwóch perspektyw:

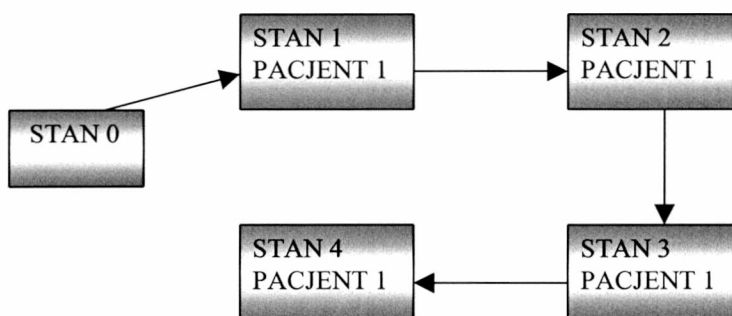
- (1) w odniesieniu do zmian stanu Systemu będących wynikiem zdarzeń dotyczących **wszystkich** obiektów typu STAN_NAGŁY i ZGŁOSZENIE aktualnie znajdujących się

w Systemie. W tym przypadku przejścia Systemu z jednego stanu do drugiego odbywają się w sposób ściśle wyznaczony sekwencją kolejnych, pojawiających się zdarzeń (por.rys. 4.7),

- (2) w odniesieniu do zmian stanu Systemu będących wynikiem zdarzeń dotyczących **jednej** pary obiektów typu STAN_NAGŁY – ZGŁOSZENIE, związanej z jednym pacjentem (lub z jedną grupą pacjentów przy wypadku masowym). Przy takim zawężeniu analizy można zauważyć, że przejścia Systemu z jednego stanu do drugiego odbywają się zawsze sekwencyjnie (por.rys. 4.8.).



Rys.4.7. Przykładowe zmiany stanu Systemu.



Rys.4.8. Zmiany stanu Systemu przy uwzględnieniu tylko jednej pary obiektów STAN_NAGŁY-ZGŁOSZENIE.

Opis zdarzeń

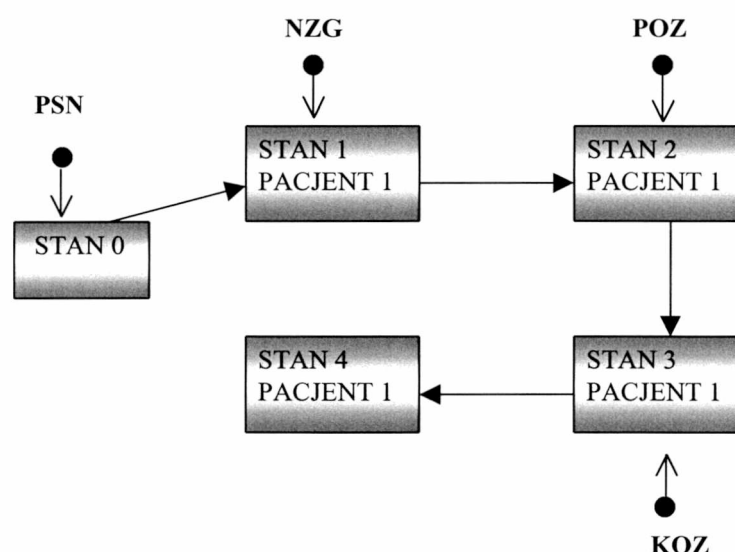
Zmiana w wartości atrybutów Systemu określana jest mianem **zdarzenia**. Zdarzenia, poprzez wywołanie zakłóceń w stanie systemu, inicjują proces zmian, które zmuszają system do przejścia z jednego stanu do drugiego. W modelu RAMD wyróżniono cztery zdarzenia podstawowe inicjujące procesy główne oraz cztery zdarzenia dodatkowe, które zapoczątkowują poszczególne fazy procesów głównych – por.rys.4.9.

Zdarzenie 1: zdarzenie **PSN** (Powstanie Stanu Nagłego) - system przechodzi do Stanu 1. W systemie pojawia się nowy obiekt STAN_NAGŁY. Zdarzenie dodatkowe **KSN** rozdziela dwie fazy powstawania Stanów Nagłych.

Zdarzenie 2: zdarzenie **NZG** (Nowe Zgłoszenie) - system przechodzi do Stanu 2. Obiekt STAN_NAGŁY zamienia się w obiekt ZGŁOSZENIE. Zdarzenie dodatkowe **KZG** rozdziela dwie fazy powstawania Zgłoszeń.

Zdarzenie 3: zdarzenie **POZ** (Początek Obsługi Zgłoszenia) - system przechodzi do Stanu 3. Przydzielany jest zespół obsługujący. Obiekt ZESPÓŁ zmienia status z „wolny” na „zajęty”. Zdarzenia dodatkowe **OBZ** i **KOS** rozdzielają trzy fazy obsługi Zgłoszeń.

Zdarzenie 4: zdarzenie **KOZ** (Koniec Obsługi Zgłoszenia) - system przechodzi do Stanu 4. Obiekt ZESPÓŁ zmienia status z „zajęty” na „wolny”. Obiekt ZGŁOSZENIE opuszcza system.



Rys. 4.9. Związek pomiędzy typami zdarzeń podstawowych a zmianą stanów Systemu.

4.6.4. Model procesów

Proces podstawowy

W modelu RAMD wyróżniono pojęcie procesu podstawowego (lub inaczej procesu symulacji) oraz procesów jednostkowych. **Proces podstawowy** to uporządkowany w czasie zbiór zdarzeń obejmujący wszystkie zdarzenia, które pojawiły się w trakcie symulacji. **Proces jednostkowy** to „działanie” będące zbiorem operacji przekształcających stan systemu. Model procesów Systemu obejmuje jeden proces podstawowy (por.rys. 4.10) oraz cztery procesy jednostkowe, inicjowane zdarzeniami głównymi. Procesy podstawowe składają się z pod-procesów opisujących poszczególne fazy procesów jednostkowych. Pod-procesy inicjowane są zdarzeniami dodatkowymi. Proces podstawowy zawiera wszystkie procesy jednostkowe (omówione poniżej) a ponadto - kilka operacji umożliwiających prowadzenie symulacji metodą planowania kolejnych zdarzeń.

Kolejno pojawiające się zdarzenia umieszczane są w Kalendarzu Zdarzeń (por.pkt.3.2) według czasów ich zaistnienia. Zdarzenia realizowane są sekwencyjnie, w kolejności zapisu do Kalendarza. Pobranie zdarzenia z Kalendarza powoduje przesunięcie zegara symulacji na godzinę odpowiadającą terminowi realizacji zdarzenia. W zależności od typu zdarzenia pobranego z Kalendarza Zdarzeń inicjowany jest odpowiedni proces jednostkowy (por. rys.4.10.) Proces symulacji trwa do momentu, w którym czas wskazywany przez zegar symulacji przekroczy wartość wskazywaną przez zmienną decyzyjną **czas symulacji**.

Algorytm procesu jednostkowego Powstawanie Stanów Nagłych

FAZA 1:

ZDARZENIE **PSN**



OKREŚLENIE ATRYBUTÓW STANU_NAGŁEGO:



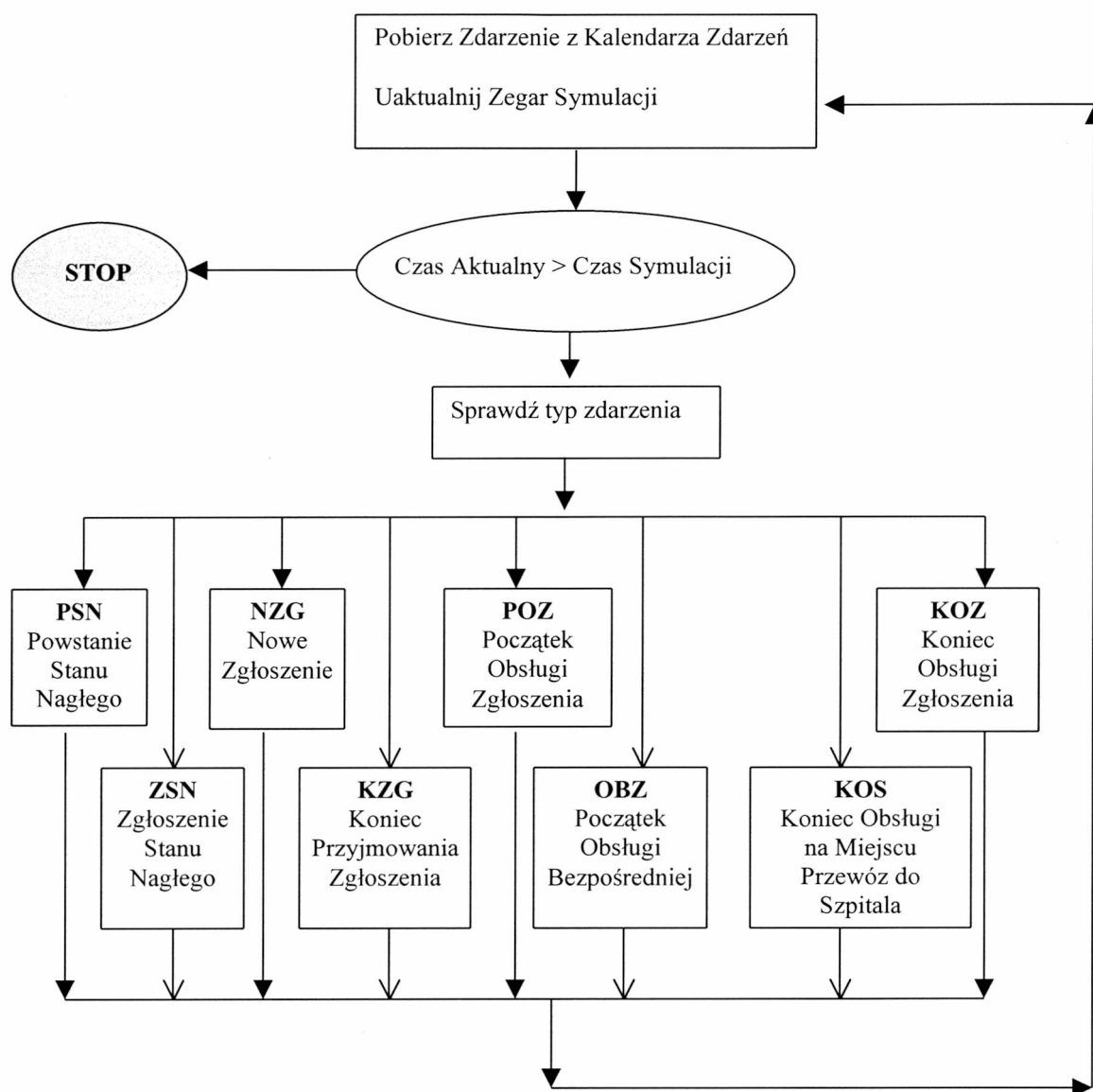
ZAPLANOWANIE ZDARZENIA **ZSN**:

$CZAS(ZSN) = CZAS(PSN) + OPÓŹNIENIE$



ZAPLANOWANIE NASTĘPNEGO ZDARZENIA **PSN**
(zgodnie z rozkładem statystycznym)

Opóźnienie związane jest z czasem jaki upływa od zaistnienia Stanu Nagłego do podjęcia decyzji o zgłoszeniu go w Systemie



Rys.4.10. Algorytm podstawowego procesu symulacji modelu RAMD.

FAZA 2:ZDARZENIE **ZSN**

ODRZUCENIE ZGŁOSZEŃ, KTÓRE NIE TRAFIĄ DO SYSTEMU



OKREŚLENIE ATRYBUTÓW „MIEJSCE ZGŁASZANIA”

ZAPLANOWANIE ZDARZENIA **NZG** $CZAS(NZG) = CZAS(ZSN) + OPÓŹNIENIE\ ZGŁASZANIA$

Opóźnienie związane jest z czasem jaki upływa od podjęcia decyzji o zgłoszeniu Stanu Nagłego do momentu rozpoczęcia procesu zgłaszania

*Algorytm procesu jednostkowego Przyjmowanie Nowych Zgłoszeń*FAZA 1:ZDARZENIE **NZG**

OKREŚLENIE ATRYBUTÓW ZGŁOSZENIA



PRZEKAZANIE ZGŁOSZENIA DO ODPOWIEDNIEJ PODSTACJI

ZAPLANOWANIE ZDARZENIA **KZG** $CZAS(KZG) = CZAS(NZG) + CZAS\ ZGŁASZANIA + OPÓŹNIENIE\ DYS$

Czas Zgłaszania to czas przyjmowania zgłoszenia przez dyspozytora

Opóźnienie od nadejścia zgłoszenia do rozpoczęcia procesu przyjmowania

FAZA 2:ZDARZENIE **KZG**

OKREŚLENIE TYPU ZESPOŁU DO OBSŁUGI



JEŻELI (MOŻLIWY JEST PRZYDZIAŁ ZESPOŁU)

TO

DOKONANIE PRZYDZIAŁU

ZAPLANOWANIE ZDARZENIA **POZ** $CZAS(POZ) = CZAS(KZG) + OPÓŹNIENIE\ PRZYDZIAŁU$

Opóźnienie związane jest z czasem jaki upływa od momentu przydziału zespołu do momentu rozpoczęcia obsługi

ELSE

UMIESZCZENIE ZGŁOSZENIA W KOLEJCE

*Algorytm procesu jednostkowego Obsługa Zgłoszeń*FAZA 1:ZDARZENIE **POZ**

WYZNACZENIE CZASU DOJAZDU NA MIEJSCE

ZAPLANOWANIE ZDARZENIA **OBZ** $\text{CZAS}(\mathbf{OBZ}) = \text{CZAS}(\mathbf{POZ}) + \text{CZAS DOJAZDU}$

Czas dojazdu Zespołu na miejsce Zgłoszenia

FAZA 2:ZDARZENIE **OBZ**

OKREŚLENIE ATRYBUTÓW DOT. CZYNNOŚCI RATOWNICZYCH



JEŻELI (WYMAGANE LECZENIE SZPITALNE)

TO

ZAPLANOWANIE ZDARZENIA **KOS** $\text{CZAS}(\mathbf{KOS}) = \text{CZAS}(\mathbf{OBZ}) + \text{CZAS OBSŁUGI}$ Czas trwania czynności ratowniczych na miejscu
Zgłoszenia

ELSE

ZAPLANOWANIE ZDARZENIA **KOZ** $\text{CZAS}(\mathbf{KOZ}) = \text{CZAS}(\mathbf{OBZ}) + \text{CZAS OBSŁUGI}$ Czas trwania czynności ratowniczych na miejscu
ZgłoszeniaFAZA 3:ZDARZENIE **KOS**

WYZNACZENIE SZPITALNEGO ODDZIAŁU RATUNKOWEGO

WYZNACZENIE CZASU DOJAZDU DO SOR

ZAPLANOWANIE ZDARZENIA **KOZ** $\text{CZAS}(\mathbf{KOZ}) = \text{CZAS}(\mathbf{KOS}) + \text{CZAS DOJAZDU DO SOR} + \text{OPÓŹNIENIE}$

Czas dojazdu Zespołu do SOR i opóźnienie

*Algorytm procesu jednostkowego Ponowny Przydział Zespołów do Zgłoszeń*ZDARZENIE **KOZ**

JEŻELI (ZESPÓŁ KOŃCZY PRACĘ)

TO

ZWOLNIENIE ZESPOŁU

ELSE

JEŻELI (NIE OCZEKUJE ZGŁOSZENIE W KOLEJCE)

TO

ZWOLNIENIE DO BAZY

ELSE

PONOWNY PRZYDZIAŁ ZESPOŁU

ZAPLANOWANIE ZDARZENIA **POZ** $CZAS(POZ) = CZAS(KOZ) + OPÓŹNIENIE PRZYDZIAŁU$

Opóźnienie związane jest z czasem jaki upływa od momentu przydziału zespołu do momentu rozpoczęcia obsługi

4.6.5. Generowanie zjawisk losowych

Model symulacyjny RAMD w znaczącym stopniu oparty jest o zależności stochastyczne, którymi opisane zostały rozmaite procesy losowe. Zjawiska losowości wymagają zastosowania odpowiedniego mechanizmu generującego ciągi zdarzeń charakteryzujących się określonym rozkładem prawdopodobieństwa. Mechanizm generowania zdarzeń losowych zastosowany w modelu RAMD zawiera cztery grupy algorytmów: (1) algorytm generujący liczby pseudolosowe, (2) algorytm generujący wartości zmiennej losowej o rozkładzie jednostajnym, (3) algorytmy umożliwiające generowanie realizacji zmiennych losowych o rozkładach ciągłych i dyskretnych (w szczególności są to trzy podstawowe rozkłady prawdopodobieństwa: normalny, wykładniczy i wielopunktowy), (4) mechanizmy generowania wartości parametrów modelu i atrybutów zdarzeń. Czwarta grupa algorytmów dotyczy ciągłych i dyskretnych rozkładów opisujących różnorodne zjawiska losowe występujące w Systemie. Są to

(a) w grupie rozkładów ciągłych:

- czas między pojawieniem się dwóch kolejnych stanów nagłych w ustalonej Gminie (w ustalonym dniu i porze doby),
- czas obsługi poszczególnych zgłoszeń na miejscu wezwania,

(b) w grupie rozkładów dyskretnych:

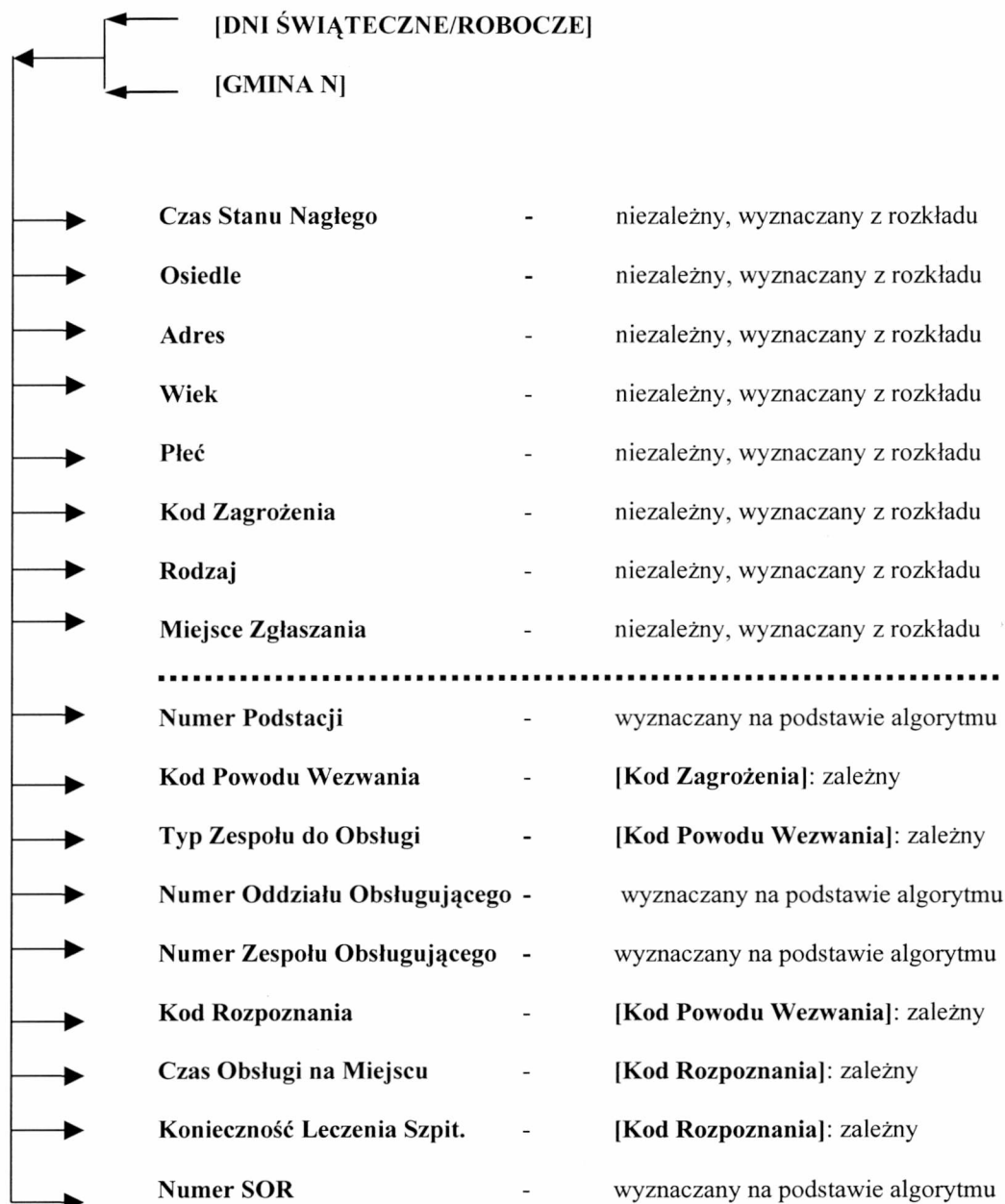
- płeć pacjenta i wiek pacjenta (odrębnie dla każdej Gminy),
- numer Osiedla odpowiadający miejscu zamieszkania pacjenta (odrębnie dla każdej Gminy),
- lokalizacja stanu nagłego - numer Osiedla odpowiadający miejscu powstania stanu nagłego (odrębnie dla każdej Gminy),
- charakter zagrożenia - numer choroby/zagrożenia w tablicy kodowej (odrębnie dla każdej Gminy),
- zgłoszenia trafiające do systemu opieki zdrowotnej,
- zgłoszenia trafiające do Systemu,
- miejsce zgłaszania - podstacja, do której zgłasza się pacjent (odrębnie dla każdej Gminy),
- powód wezwania - powód wezwania odebrany przez dyspozytora,
- rodzaj zgłoszenia - wypadek, zachorowanie, przewóz (odrębnie dla każdej Gminy),
- rozpoznanie (odrębnie dla każdego Powodu Wezwania),
- typ zespołu do obsługi (odrębnie dla każdego Rozpoznania),
- konieczność hospitalizacji (odrębnie dla każdego Rozpoznania)

(c) w grupie parametrów modelu:

- opóźnienie między zaistnieniem stanu nagłego a podjęciem decyzji o zgłoszenie do Systemu,
- opóźnienie od momentu podjęcia decyzji o zgłoszeniu stanu nagłego do momentu wpłynięcia zgłoszenia do systemu,
- czas trwania procesu zgłaszania,
- opóźnienie od momentu przyjęcia zgłoszenia do momentu wyjazdu karetki, odrębnie dla przypadków gdy zespół znajdował się w bazie oraz gdy obsługiwał inne zgłoszenie,
- opóźnienie przy przekazaniu pacjenta do szpitala,

Wszystkie generowane wartości zmiennych losowych oparte są na odrębnych łańcuchach liczb pseudolosowych, tworzonych i pamiętanych oddzielnie dla każdego rozkładu.

Rozkłady zmiennych losowych wykorzystuje się do określania atrybutów zgłoszenia, poprzez generowanie wartości w kilku fazach procesu symulacji. Na rys. 4.11. przedstawiono wzajemne zależności pomiędzy atrybutami zgłoszeń generowanymi w postaci rozkładów i ustalonymi na podstawie znanych wartości innych parametrów.



Rys. 4.11. Zależność i niezależność parametrów opisujących atrybuty zgłoszenia.

4.6.6. Model przemieszczania się karetek

Wszystkie ustalenia lokalizacyjne w modelu RAMD odbywają się z dokładnością do Osiedla. Stałe obiekty modelu, takie jak Podstacje, Oddziały i Szpitalne Oddziały Ratunkowe umiejscowione są w poszczególnych Osiedlach. Każdy Stan Nagły oraz każde Zgłoszenie pojawiają się w konkretnym Osiedlu. Można zatem przyjąć, że Zespoły wyjeżdżające do obsługi Zgłoszeń przemieszczają się po drogach komunikacyjnych łączących Osiedla. Znajac

(z analizy systemu rzeczywistego) odległości między dowolnymi Osiedlami można wyznaczyć czas przejazdu Zespołu z jednej strefy (odpowiadającej jednemu Osiedlu) do drugiej. Powyższe sformułowanie problemu lokalizacyjnego pozwala traktować strukturalną mapę Systemu jako sieć połączeń, w której każde Osiedle można uznać za węzeł sieci, natomiast odległości pomiędzy środkami Osiedli można przedstawić w postaci dwustronnych łuków sieci. Możliwe jest zatem zastosowanie w modelu znanych algorytmów sieciowych, na przykład do wyszukania najkrótszej drogi w sieci połączeń lub też do wyznaczenia najkrótszego połączenia między dowolnymi węzłami sieci.

Do wyznaczenia najkrótszego połączenia pomiędzy dwoma Osiedlami a także do określenia trasy przejazdu Zespołu pomiędzy Osiedlami wykorzystano algorytm Floyd'a (por. [106]). Algorytm umożliwia ustalenie najkrótszego połączenia pomiędzy dwoma dowolnie wybranymi węzłami w sieci połączeń. Położenie punktu w sieci połączeń określa się za pomocą trójelementowego wektora:

$A = [N_1, N_2, t]$, gdzie: N_1 i N_2 - odpowiednio: numer węzła początkowego i numer węzła końcowego;
 t - czas który upłynął od ostatniej aktualizacji położenia.

Do dokładnego ustalenia położenia punktu służą dwie macierze:

macierz odległości $TODL[N_i, N_j, D_{ij}]$, gdzie:

N_i - numer Osiedla i-tego,

N_j - numer Osiedla j-tego,

D_{ij} - odległość między Osiedlami N_i oraz N_j

macierz poprzedników $TPOP[N_i, N_j, N_k]$, gdzie:

N_i - numer Osiedla i-tego,

N_j - numer Osiedla j-tego,

N_k - numer Osiedla poprzedzającego Osiedle N_j na drodze od Osiedla N_i do N_j

Algorytm Floyd'a wykorzystywany jest w szczególności do:

- ustalania dokładnej trasy przejazdu Zespołu od strefy początkowej do strefy docelowej, wraz z czasem przejazdu przez poszczególne strefy oraz czasem przejazdu całej trasy
- wyszukiwania zgłoszenia położonego w najkrótszej odległości (spośród innych zgłoszeń) od danego Zespołu,
- okresowego aktualizowania położenia Zespołu w terenie. Wraz z upływem czasu symulacji, Zespoły przemieszczają się po Systemie i niezbędne jest aktualizowanie położenia Zespołów w określonych momentach czasowych.

4.6.7. Model intensywności napływania zgłoszeń

Do sformułowania postaci teoretycznego rozkładu zmiennej losowej opisującej intensywność napływania zgłoszeń do systemu ratownictwa medycznego wykorzystano dane o 4415 zgłoszeniach przyjętych w styczniu 1995 roku. Założono, że odstępy czasowe pomiędzy dwoma kolejnymi zgłoszeniami są opisane przez niestacjonarny rozkład Poissona, tzn. parametr λ określający średnią liczbę zgłoszeń na jednostkę czasu zmienia się w ciągu doby. Założono ponadto, że wartości funkcji $\lambda(t)$ zostaną zdefiniowane oddzielnie dla każdej gminy, dla każdego typu dnia (dzień roboczy, dzień świąteczny, wolna sobota) oraz dla każdej godziny w ciągu doby.

Estymację $\lambda(t)$ rozpoczęto od zdefiniowania dwudziestu czterech jedno-godzinnych okresów w ciągu doby oddzielnie dla każdej gminy i dla każdego typu dnia:

[0:00;1:00), [1:00;2:00),, [22:00;23:00), [23:00;24:00).

Następnie z próby losowej liczącej 4415 rekordów wyznaczono całkowitą liczbę zgłoszeń, które zostały odebrane w poszczególnych okresach z uwzględnieniem numeru gminy i typu dnia, por.tab.4.23. W kolejnym kroku wyliczono średnią liczbę zgłoszeń w przeliczeniu na 31 dni, których dotyczyła próba losowa (23 dni robocze, 5 dni świątecznych i 3 wolne soboty), por.tab.4.24. Uzyskane wartości są estymatorami oczekiwanej liczby zgłoszeń w ciągu wyróżnionych okresów. Na koniec, dla każdego zdefiniowanego okresu średnia liczba zgłoszeń została podzielona przez długość okresu w celu uzyskania estymatorów intensywności przybywania zgłoszeń (parametr λ). W przypadku posługiwania się długością przedziałów wyrażoną w godzinach, wartości parametrów λ pokrywają się z wartościami zamieszczonymi w tabeli 4.24.

Tabela 4.23. Liczba zgłoszeń zaobserwowanych w poszczególnych godzinach doby z podziałem na gminy i typ dnia, według 4415 zebranych w styczniu 1995 roku.

Gmina	Typ Dn.	0_1	1_2	2_3	3_4	4_5	5_6	6_7	7_8	8_9	9_10	10_11	11_12	12_13	13_14	14_15	15_16	16_17	17_18	18_19	19_20	20_21	21_22	22_23	23_24
93009	DR	21,0	15,0	18,0	10,0	11,0	16,0	13,0	19,0	45,0	34,0	28,0	31,0	36,0	39,0	47,0	42,0	40,0	39,0	28,0	26,0	31,0	37,0	22,0	16,0
93009	WS	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	5,0	5,0	1,0	5,0	3,0	2,0	0,0	7,0	2,0	6,0	2,0	5,0	8,0	3,0	5,0	4,0
93009	DS	5,0	5,0	1,0	4,0	5,0	1,0	0,0	8,0	3,0	3,0	8,0	6,0	6,0	8,0	7,0	4,0	13,0	11,0	9,0	7,0	12,0	11,0	7,0	9,0
93007	DR	16,0	8,0	11,0	6,0	9,0	11,0	5,0	14,0	25,0	31,0	25,0	23,0	26,0	27,0	16,0	27,0	33,0	26,0	26,0	25,0	25,0	18,0	16,0	22,0
93007	WS	0,0	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	2,0	4,0	4,0	4,0	1,0	3,0	2,0	6,0	3,0	7,0	1,0	2,0	3,0	2,0
93007	DS	6,0	3,0	2,0	4,0	5,0	3,0	0,0	2,0	1,0	5,0	4,0	2,0	1,0	2,0	5,0	4,0	10,0	5,0	5,0	5,0	8,0	15,0	4,0	5,0
93003	DR	30,0	18,0	16,0	9,0	12,0	22,0	22,0	33,0	171,0	61,0	50,0	67,0	37,0	58,0	41,0	49,0	49,0	60,0	69,0	54,0	50,0	48,0	60,0	33,0
93003	WS	2,0	2,0	0,0	2,0	2,0	2,0	0,0	5,0	3,0	7,0	6,0	5,0	6,0	3,0	6,0	7,0	7,0	7,0	4,0	8,0	7,0	6,0	6,0	7,0
93003	DS	6,0	9,0	5,0	8,0	4,0	3,0	2,0	4,0	8,0	5,0	9,0	4,0	13,0	13,0	10,0	13,0	17,0	8,0	9,0	6,0	19,0	13,0	14,0	9,0
93001	DR	21,0	13,0	14,0	10,0	13,0	16,0	11,0	20,0	27,0	23,0	35,0	37,0	16,0	23,0	29,0	19,0	26,0	27,0	35,0	15,0	30,0	36,0	37,0	15,0
93001	WS	2,0	1,0	0,0	2,0	1,0	3,0	1,0	3,0	3,0	7,0	11,0	2,0	3,0	7,0	6,0	2,0	3,0	5,0	4,0	5,0	9,0	6,0	4,0	4,0
93001	DS	10,0	8,0	10,0	5,0	4,0	0,0	0,0	2,0	5,0	8,0	13,0	4,0	2,0	8,0	4,0	6,0	9,0	10,0	5,0	8,0	3,0	9,0	4,0	2,0
93005	DR	8,0	6,0	6,0	4,0	5,0	1,0	7,0	12,0	8,0	16,0	24,0	16,0	16,0	10,0	14,0	16,0	24,0	8,0	17,0	8,0	10,0	10,0	13,0	10,0
93005	WS	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	2,0	0,0	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	1,0	0,0
93005	DS	5,0	1,0	3,0	1,0	3,0	1,0	0,0	2,0	3,0	3,0	4,0	2,0	5,0	2,0	4,0	1,0	2,0	5,0	4,0	7,0	4,0	7,0	1,0	3,0

Tabela 4.24. Średnia liczba zgłoszeń w każdym okresie w ciągu jednego dnia, z podziałem na gminy i typ dnia. Estymatory oczekiwanej liczby zgłoszeń w ciągu wyróżnionych okresów oraz wartości parametru λ , mierzonego w ilości zgłoszeń na godzinę.

Gmina	Typ Dn.	0_1	1_2	2_3	3_4	4_5	5_6	6_7	7_8	8_9	9_10	10_11	11_12	12_13	13_14	14_15	15_16	16_17	17_18	18_19	19_20	20_21	21_22	22_23	23_24
93009	DR	0,91	0,65	0,78	0,43	0,48	0,70	0,57	0,83	1,96	1,48	1,22	1,35	1,57	1,70	2,04	1,83	1,74	1,70	1,22	1,13	1,35	1,61	0,96	0,70
93009	WS	0,33	0,33	0,67	0,33	0,33	0,00	0,33	0,00	1,67	1,67	0,33	1,67	1,00	0,67	0,00	2,33	0,67	2,00	0,67	1,67	2,67	1,00	1,67	1,33
93009	DS	1,00	1,00	0,20	0,80	1,00	0,20	0,00	1,60	0,60	0,60	1,60	1,20	1,20	1,60	1,40	0,80	2,60	2,20	1,80	1,40	2,40	2,20	1,40	1,80
93007	DR	0,70	0,35	0,48	0,26	0,39	0,48	0,22	0,61	1,09	1,35	1,09	1,00	1,13	1,17	0,70	1,17	1,43	1,13	1,13	1,09	1,09	0,78	0,70	0,96
93007	WS	0,00	0,33	0,67	0,33	0,33	0,00	0,33	0,00	0,00	0,33	0,67	1,33	1,33	1,33	0,33	1,00	0,67	2,00	1,00	2,33	0,33	0,67	1,00	0,67
93007	DS	1,20	0,60	0,40	0,80	1,00	0,60	0,00	0,40	0,20	1,00	0,80	0,40	0,20	0,40	1,00	0,80	2,00	1,00	1,00	1,00	1,60	3,00	0,80	1,00
93003	DR	1,30	0,78	0,70	0,39	0,52	0,96	0,96	1,43	7,43	2,65	2,17	2,91	1,61	2,52	1,78	2,13	2,13	2,61	3,00	2,35	2,17	2,09	2,61	1,43
93003	WS	0,67	0,67	0,00	0,67	0,67	0,67	0,00	1,67	1,00	2,33	2,00	1,67	2,00	1,00	2,00	2,33	2,33	2,33	1,33	2,67	2,33	2,00	2,00	2,33
93003	DS	1,20	1,80	1,00	1,60	0,80	0,60	0,40	0,80	1,60	1,00	1,80	0,80	2,60	2,60	2,00	2,60	3,40	1,60	1,80	1,20	3,80	2,60	2,80	1,80
93001	DR	0,91	0,57	0,61	0,43	0,57	0,70	0,48	0,87	1,17	1,00	1,52	1,61	0,70	1,00	1,26	0,83	1,13	1,17	1,52	0,65	1,30	1,57	1,61	0,65
93001	WS	0,67	0,33	0,00	0,67	0,33	1,00	0,33	1,00	1,00	2,33	3,67	0,67	1,00	2,33	2,00	0,67	1,00	1,67	1,33	1,67	3,00	2,00	1,33	1,33
93001	DS	2,00	1,60	2,00	1,00	0,80	0,00	0,00	0,40	1,00	1,60	2,60	0,80	0,40	1,60	0,80	1,20	1,80	2,00	1,00	1,60	0,60	1,80	0,80	0,40
93005	DR	0,35	0,26	0,26	0,17	0,22	0,04	0,30	0,52	0,35	0,70	1,04	0,70	0,70	0,43	0,61	0,70	1,04	0,35	0,74	0,35	0,43	0,43	0,57	0,43
93005	WS	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33	0,67	0,00	0,33	0,67	0,33	0,33	0,00	0,00	0,00	1,00	0,33	0,33	0,00
93005	DS	1,00	0,20	0,60	0,20	0,60	0,20	0,00	0,40	0,60	0,60	0,80	0,40	1,00	0,40	0,80	0,20	0,40	1,00	0,80	1,40	0,80	1,40	0,20	0,60

Dyskretnemu rozkładowi Poissona odpowiada ciągły rozkład wykładniczy opisujący średni czas jaki upływa pomiędzy dwoma kolejnymi zgłoszeniami.

Czas nadejścia kolejnego zgłoszenia w modelu RAMD generowany jest zgodnie z algorytmem opisanym przez Klein'a i Roberts'a [97] (algorytm przedstawiony jest w Załączniku nr 3) według następujących kroków:

- Po wczytaniu wartości tabeli 4.23 wyznaczana jest średnia liczba zgłoszeń na minutę w poszczególnych klasach.
- Dla każdej klasy wyliczana jest wartość u_k (por. punkt 2 algorytmu).
- W każdym momencie symulacji, w którym należy wygenerować czas następnego zdarzenia, wykonywane są poniższe kroki:
 - wyznaczana jest klasa, dla której należy pobrać parametr $\lambda(t)$,
 - generowana jest liczba losowa według rozkładu równomiernego (por. punkt 4.6.5). Kolejne elementy ciągu liczb pseudolosowych wprowadzanych do rozkładu równomiernego są wyliczane oddzielnie dla każdego rozkładu losowego. Rozkład intensywności napływania zgłoszeń oparty jest zatem na odrębnym ciągu liczb pseudolosowych,
 - wykonywane są punkty 2-4 algorytmu opisanego w Załączniku 3 aż do momentu, w którym spełniony jest warunek 3 algorytmu.
 - Znaleziona wartość T pozwala wyznaczyć czas pojawienia się następnego zdarzenia.

4.6.8. Sterowanie upływem czasu

Sterowanie upływem czasu jest kluczowym elementem modelu symulacyjnego. Zgodnie z przyjętą metodą modelowania, czas biegnący w modelu symulacyjnym aktualizowany jest nie o stałą jednostkę czasową, ale o zmienne odcinki czasowe, zależne od terminów realizacji kolejnych zdarzeń, pobieranych z Kalendarza Zdarzeń. Przyszłe zdarzenia umieszczane są w Kalendarzu z zapisanym czasem pojawienia się, wyznaczanym na podstawie reguł przedstawionych poniżej. W momencie pobrania zdarzenia z Kalendarza dokonywany jest przeskok czasu i modyfikowana jest wartość zmiennej *CzasAktualny*. Przy każdym przesunięciu zegara symulacji porównywane są dwie zmienne *CzasAktualny* i *CzasSymulacji*. Jeżeli zegar symulacji osiągnął wartość zdefiniowaną na początku eksperymentu symulacyjnego (tzn. $CzasAktualny \geq CzasSymulacji$), to proces symulacji zostaje zatrzymany. W przeciwnym przypadku symulacja trwa nadal.

W modelu RAMD wyróżniono osiem typów zdarzeń (por. rozdz.4.5.5.), które generowane są w ściśle określonych momentach procesu symulacyjnego:

1. zdarzenie **PSN** - Powstanie Stanu Nagłego
2. zdarzenie **ZSN** - Zgłoszenie Stanu Nagłego
3. zdarzenie **NZG** - Nowe Zgłoszenie
4. zdarzenie **KZG** - Koniec przyjmowania Zgłoszenia
5. zdarzenie **POZ** - Początek Obsługi Zgłoszenia
6. zdarzenie **OBZ** - początek Obsługi Bezpośredniej Zgłoszenia
7. zdarzenie **KOS** - Koniec Obsługi na miejscu, przewóz do Szpitala
8. zdarzenie **KOZ** - Koniec Obsługi Zgłoszenia

Czasy wystąpienia zdarzeń wyznaczane są według następujących reguł.:

Czas(PSN) : generowany z rozkładu

Czas(ZSN) = *czas(PSN)* + *opóźnienie*

Czas(NZG) = *czas(ZSN)* + *opóźnienie zgłaszania*

Czas(KZG) = *czas(NZG)* + *czas zgłaszania*

Czas(POZ) = *czas(KZG)* + *opóźnienie przydziału*

Czas(OBZ) = *czas(POZ)* + *czas dojazdu na miejsce*

Dla zgłoszeń nie przewożonych do SOR:

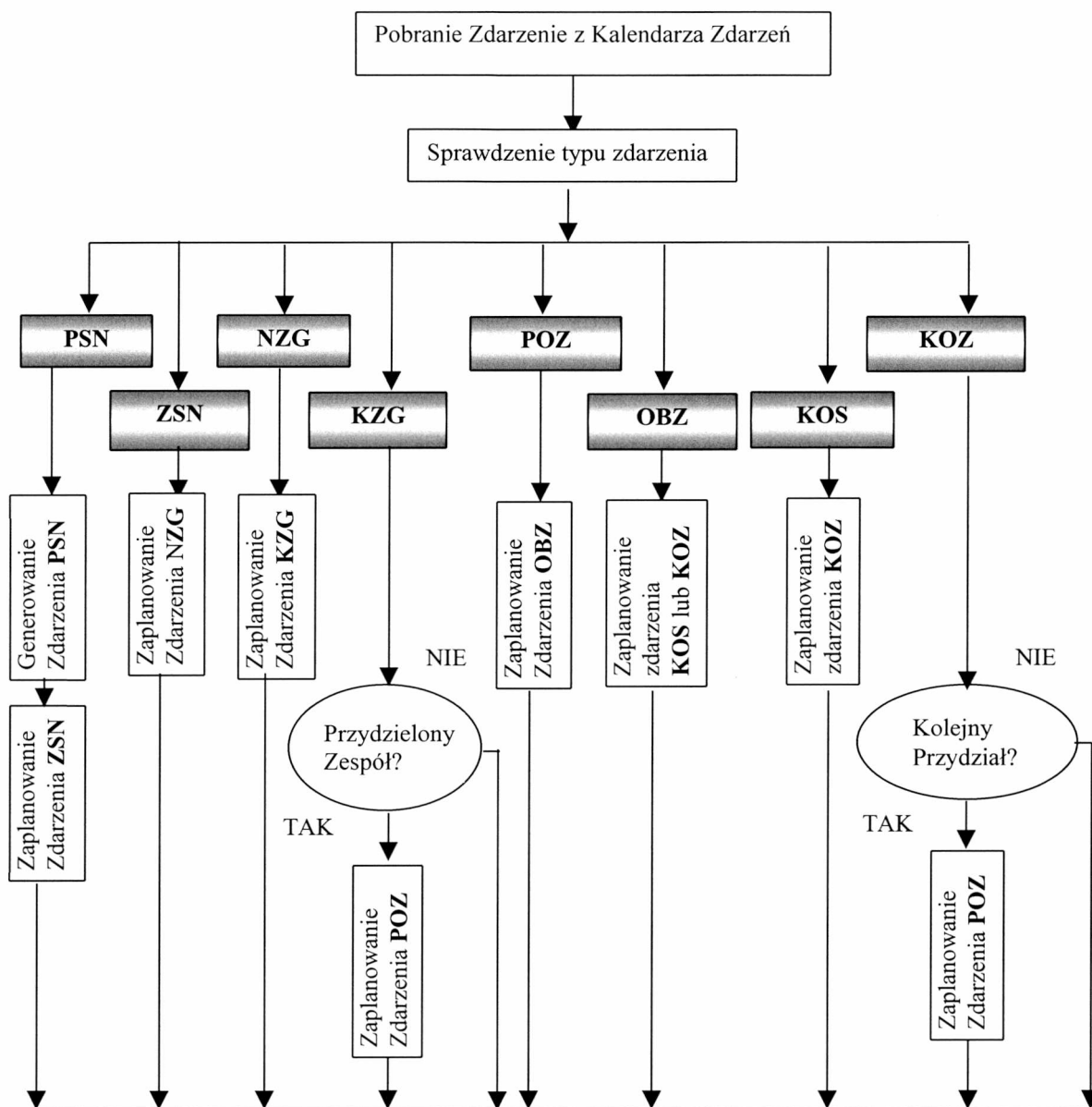
Czas(KOZ) = *czas(OBZ)* + *czas obsługi*

Dla zgłoszeń przewożonych do SOR:

Czas(KOS) = *czas(OBZ)* + *czas obsługi*

Czas(KOZ) = *czas(KOZ)* + *czas dojazdu do SOR* + *opóźnienie w SOR*

Na rys. 4.12. przedstawiono schemat ilustrujący momenty planowania kolejnych zdarzeń.



Rys. 4.12. Schemat momentów planowania kolejnych zdarzeń.

4.6.9. Formalizacja reguł werbalnych

Zasada rejonizacji Zgłoszeń

Numer *Osiedla* wskazuje na *Podstację*, do której zostanie przekazane *Zgłoszenie*. Z kolei na podstawie atrybutu *Kod Powodu Wezwania* wyznaczany jest *Typ Zespołu*, który powinien być przydzielony do obsługi *Zgłoszenia*. *Typ Zespołu* wskazuje na rodzaj *Oddziału* („R”, „Z”, „P” lub „D”), natomiast numer *Osiedla*, z którego pochodzi *Zgłoszenie* wyznacza numer *Oddziału* (ustalonego już typu), z którego przydzielony zostanie *Zespół*. *Zgłoszenie* obsługiwane jest przez *Oddział*, do rejonu którego należy wskazany *typ Zespołu* do obsługi. Rejon ten wyznacza się stosownie do numeru *Osiedla*, w którym zlokalizowane jest *Zgłoszenie*. Powyższą zasadę można dowolnie modyfikować, przystosowując ją do reguł obowiązujących w systemie rzeczywistym. Możliwe jest na przykład zdefiniowanie przypadków, w których wysłane zostaną Zespoły z sąsiednich Podstacji lub – zostanie przydzielony Zespół innego typu, niż wynika to z wcześniejszych ustaleń.

Reguła przydziału Zespołu

Przydział *Zespołu* odbywa się następująco:

A. Zgłoszenia zwykłe:

- jeżeli jest wolny *Zespół Wypadkowo-Chorobowy* to jest wysyłany,
- jeżeli nie ma wolnego *Zespołu W.-Ch.*, to zgłoszenie drogą radiową jest przydzielane najbliższemu *Zespołowi W.-Ch.* i oczekuje na jego zwolnienie.

B. Zgłoszenia pediatryczne w Podstacjach posiadających Zespoły pediatryczne:

- jeżeli jest wolny *Zespół Pediatryczny* to jest wysyłany,
- jeżeli nie ma wolnego *Zespołu Pediatrycznego* ale jest wolny *Zespół Wypadkowo-Chorobowy* to jest wysyłany,
- jeżeli nie ma wolnego *Zespołu W.-Ch.*, to zgłoszenie drogą radiową jest przydzielane najbliższemu *Zespołowi Pediatrycznemu* i oczekuje na jego zwolnienie.

C. Zgłoszenia pediatryczne w Podstacjach nie posiadających Zespołów pediatrycznych:

- jak w regule A.

D. Zgłoszenia Reanimacyjne

- jeżeli jest wolny *Zespół Reanimacyjny* to jest wysyłany,
- jeżeli nie ma wolnego *Zespołu Reanimacyjnego* ale jest wolny *Zespół Wypadkowo-Chorobowy* to jest wysyłany,

- w pozostałych przypadkach przerywana jest obsługa zgłoszenia zwykłego prowadzona przez *Zespół W.-Ch.* w odpowiedniej rejonowo *Podstacji*,
- jeśli żadna z powyższych decyzji nie jest możliwa, to zgłoszenie jest drogą radiową przydzielane najbliższemu *Zespołowi Reanimacyjnemu* i oczekuje na jego zwolnienie.

Przewóz do Szpitalnych Oddziałów Ratunkowych

Szpitalny Oddział Ratunkowy, do którego przewożony będzie pacjent wymagający leczenia szpitalnego, wyznaczany jest na podstawie numeru *Osiedla*, w którym zlokalizowane jest *Zgłoszenie*. Zakłada się, że SOR nie może odmówić przyjęcia pacjenta. Ewentualny przewóz pacjenta do innej jednostki leczącej odbywa się poza Systemem.

4.6.10. Zmienne i parametry modelu

Zmienne egzogeniczne - niekontrolowalne

Kalendarz	- kalendarz zdarzeń
Zdarzenie	- element kalendarza
Kolejka	- kolejka zgłoszeń
Element Kolejki	- element kolejki zgłoszeń

Zmienne egzogeniczne - kontrolowalne (zmienne decyzyjne)

liczba Gmin
 liczba Osiedli
 liczba i lokalizacja Podstacji
 liczba i lokalizacja Oddziałów, przydział do Podstacji
 liczba Zespołów i przydział do Oddziałów
 liczba, lokalizacja i rejonizacja Szpitalnych Oddziałów Ratunkowych
 liczba Kodów Zagrożeń
 liczba Powodów Wezwań
 liczba Rozpoznań
 parametry rozkładów statystycznych

parametry symulacji

czas Symulacji	- całkowity czas trwania jednego powtórzenia
liczba Powtórzeń	- liczba powtórzeń
start Dzień Tygodnia	- dzień tygodnia rozpoczynający proces symulacji

4.7. PROGRAM KOMPUTEROWY

4.7.1. Programowanie obiektowe – uwagi ogólne

Model symulacyjny RAMD oprogramowano zgodnie z *podejściem obiektowym* w języku programowania Object Pascal zaimplementowanym w środowisku Delphi 4. Analiza założeń metodyki obiektowej¹ inżynierii oprogramowania pozwala zauważyć, że model konceptualny RAMD został opracowany zgodnie z podstawowymi zasadami obiektowości, czego naturalną konsekwencją jest wybór obiektowo zorientowanej metody wytwarzania oprogramowania.

W dalszej części rozdziału zostaną omówione podstawowe założenia projektu informatycznego. Projektowanie oprogramowania odbywa się zazwyczaj w dwóch etapach. Podczas pierwszego podejmowane są strategiczne decyzje dotyczące struktury systemu. Etap ten nazywany jest *projektem systemu* lub *projektem strategicznym*. W drugim etapie definiowane są szczegółowe rozwiązania, prowadzące bezpośrednio do implementacji. Jest on nazywany *projektem szczegółowym* lub *projektem obiektów*.

4.7.2. Projekt systemu

Podsystemy

Projektowany system został podzielony na kilka podsystemów: moduł symulacji, biblioteki statystyczne, podsystem lokalizacyjny, podsystem wymiany i przetwarzania danych, interfejs użytkownika, system okien.

- (1) Moduł symulacji prowadzi proces symulacji dla wczytanego zestawu parametrów, warunków i danych wejściowych. Wyniki procesu symulacji są przekazywane do podsystemu wymiany i przetwarzania danych.
- (2) Biblioteki statystyczne zawierają generator liczb losowych oraz procedury i funkcje umożliwiające generowanie zadanej zmiennej losowej.

¹ *Podejście obiektowe* opisuje rzeczywistość z trzech perspektyw tworząc trzy spójne ze sobą modele składowe. Przyjmując perspektywę strukturalną buduje się *model obiektów*, który wyróżnia grupy obiektów i trwałe wiązania występujące między nimi. Z perspektywy behawioralnej opisuje się interakcje obiektów, przy czym kluczowym pojęciem projektowanego *modelu dynamicznego* jest *zdarzenie* generowane przez obiekt. Z perspektywy transformacyjnej tworzy się *model funkcjonalny*, który przedstawia przepływy danych i przekształcenia, którym są one poddawane [60].

- (3) Podsystem lokalizacyjny odpowiedzialny jest za przygotowanie danych lokalizacyjnych w celu ustalenia najkrótszych połączeń oraz określania tras przejazdu karet.
- (4) Podsystem wymiany i przetwarzania danych współpracuje z bazą danych w formacie Paradoxa, zawierającą informacje o strukturze i zasobach systemu ratownictwa medycznego oraz o parametrach zgłoszeń wykorzystywanych do symulowania procesu powstawania zapotrzebowania. Wyniki procesu symulacji są, za pośrednictwem tego podsystemu, przekazywane do innej bazy, gdzie następnie mogą być poddawane obróbce statystycznej.
- (5) Interfejs użytkownika służy aktywnej komunikacji użytkownika z aplikacją.
- (6) System okien odpowiedzialny jest za realizację zestawu usług graficznych.

Ze względu na ściśle określony cel budowy systemu informatycznego ograniczono do minimum oprogramowanie tych podsystemów, które nie były niezbędne do realizacji zamierzonych prac badawczych. Zaniechano prac informatycznych nad podsystemem interfejsu użytkownika oraz graficznym podsystemem okien. Skoncentrowano się natomiast na pełnym oprogramowaniu podsystemów: symulacji, bibliotek statystycznych, lokalizacyjnego oraz na częściowym oprogramowaniu podsystemu wymiany i przetwarzania danych. W przypadku tego ostatniego podsystemu zrealizowano w pełni moduł przepływu danych, natomiast analizy statystyczne zostaną wykonane za pomocą dostępnych, odrębnych narzędzi informatycznych.

Bazy danych

Dostęp do baz danych zapisanych w formacie Paradoxa zapewnia system zarządzania bazą danych Delphi 4. Dane zebrane w systemie rzeczywistym (por.pkt.4.3) muszą być przetworzone, właściwie przygotowane i umieszczone w zewnętrznej bazie, z której za pośrednictwem odpowiednich narzędzi dostępu są przekazywane programowi symulacyjnemu. Wyniki procesu symulacji są wyprowadzane do specjalnie zaprojektowanej bazy danych, również w formacie Paradoxa, skąd następnie można je pobierać celem dalszej obróbki statystycznej.

Wejściowa baza danych składa się z kilkunastu tabel umieszczonych w dwóch katalogach:

- katalog SYMULATO zawiera bazy definiujące parametry procesu symulacji oraz strukturę i zasoby systemu ratownictwa medycznego,

- katalog USLUGI zawiera bazy definiujące parametry rozkładów losowych wykorzystywanych do symulowania procesu napływania zgłoszeń.

Wyjściowa baza danych obejmuje kilka tabel umieszczonych w katalogu WYNIKI, w których umieszczane są raporty z przebiegu procesu symulacji.

Sterowanie

Sterowanie programem wyrażone jest w terminach sekwencji zdarzeń wymienianych między obiektami. Operacje obiektów wywoływane są przez moduł dystrybucji zdarzeń w reakcji na pojawiające się zdarzenia, po czym sterowanie wraca do modułu głównego. Oprócz operacji wykonywanych w ramach normalnej procedury symulacyjnej, uwzględnione są dwa przejściowe stany systemu: inicjacja oraz zakończenie. Inicjacja obejmuje procedury przejścia systemu ze stanu początkowego do stanu symulacji właściwej. W okresie inicjacji ustalane są stany początkowe parametrów, wartości stałych, zmiennych globalnych, hierarchii klas. Zakończenie obejmuje zwalnianie zasobów oraz likwidację obiektów nietrwałych.

4.7.3. Projekt obiektów

Klasy

Podstawowe klasy uwzględnione w programie odpowiadają typom obiektów opisanych w modelu koncepcyjnym. Każda klasa zdefiniowana jest przez atrybuty, które charakteryzują własności statyczne i dynamiczne klasy oraz przez operacje, które reprezentują elementy modelu funkcjonalnego. Każda operacja opisana jest w postaci algorytmu, który oddziałuje na atrybuty danej klasy. Poniżej przedstawiono najważniejsze klasy modelu wraz z krótką charakterystyką atrybutów i operacji.

TCzas – element opisu czasu

Atrybuty opisują wartości związane z czasem kalendarzowym: godzinę, minuty, dzień tygodnia, typ dnia (święteczny, roboczy, wolna sobota),

Operacje pozwalają ustalić dzień tygodnia oraz typ dnia, jak również uaktualniają czas o zadaną liczbę jednostek.

TElemKal – element kalendarza

Atrybuty opisują własności elementu kalendarza: czas wpisu do kalendarza, typ zdarzenia, łącznik do pacjenta, z którym związany jest element kalendarza.

Operacje wprowadzają nowy element do kalendarza i wypisują informacje o zadanym elemencie

TElemKol – element kolejki

Atrybuty opisują własności elementu kolejki: czas wpisu, numer zgłoszenia obsługującego, łącznik do pacjenta, z którym związany jest element kolejki.

Operacja wypisuje informacje o zadanym elemencie

TKalend - kalendarz

Operacje wyprowadzają żądany element z kalendarza

TKolejka – kolejka

Operacje dokonują odłączania i dołączania elementów według różnorodnych kluczy.

TParamSym – parametry symulacji

Atrybuty definiują takie parametry startowe jak czas trwania procesu symulacji, liczbę powtórzeń, dzień kalendarzowy rozpoczynający proces symulacji

Operacja ustala typ dnia od którego rozpoczyna się proces symulacji

TPacjent - pacjent

Atrybuty opisują wszystkie informacje związane z jednym pacjentem, takie jak czas powstania stanu nagłego, czas zgłoszenia do systemu, przyczyna wezwania, rozpoznanie wstępne, diagnoza, konieczność leczenia szpitalnego, dane osobowe o pacjencie, oddział i zespół obsługujący, czasy rozpoczęcia poszczególnych etapów obsługi i inne.

Operacje wyznaczają wartości atrybutów poszczególnych etapów obsługi oraz wyprowadzają do wyjściowej bazy danych informacje o pacjencie, który opuścił system.

TZespol - zespół

Atrybuty definiują zarówno cechy stałe zespołu takie jak numer i kod zespołu, numer oddziału, typ maszyny jak również cechy dotyczące obsługi poszczególnych zgłoszeń, np.: strefa obsługi, czas wyjazdu, czas przyjazdu na miejsce i inne.

Operacje wyznaczają atrybutów poszczególnych etapów obsługi oraz sterują pracą zespołu

TGmina – gmina

Atrybuty określają cechy gminy takie jak kod, numer, wielkość populacji, liczbę osiedli i inne

Operacje odnoszą się bezpośrednio do własności gminy ujmując je w kategoriach statystycznych

TStrefa – strefa

Atrybuty określają podstawowe cechy strefy takie jak numer i kod oraz określają przynależność strefy do poszczególnych typów oddziałów oraz do szpitala

TOddzial – oddział

Atrybuty określają podstawowe cechy oddziału takie jak numer, typ i kod oddziału, numer podstacji do której należy oddział, lokalizację oddziału, liczbę pracujących zespołów, jak również – kolejkę zgłoszeń oczekujących na zwolnienie poszczególnych zespołów

Operacje dotyczą zespołów pracujących w oddziale oraz kolejki oczekujących zgłoszeń

TPdstacja – podstacja

Atrybuty określają podstawowe własności podstacji takie jak kod i numer, oraz liczbę i numery oddziałów podległych danej podstacji

TSOR – szpitalny oddział ratunkowy

Atrybuty definiują podstawowe cechy oddziału szpitalnego

TDrogi – połączenia komunikacyjne

Atrybuty opisują liczbowo najkrótszych połączeń pomiędzy strefami

TZagr – zagrożenia

Atrybuty definiują zależność pomiędzy zagrożeniami a powodami wezwań

Operacje dokonują niezbędnych przeliczeń statystycznych

TPowod – powody

Atrybuty definiują zależność pomiędzy zagrożeniami a powodami wezwań

Operacje dokonują niezbędnych przeliczeń statystycznych

TRozp – rozpoznania

Atrybuty podają charakterystyki liczbowe związane z procesem obsługi oraz koniecznością leczenia szpitalnego

Operacje dokonują niezbędnych przeliczeń statystycznych

Klasy nadrzędne

Ponieważ model konceptualny prezentuje naturalną wizję modelowanego świata, na etapie programowania konieczne było przereorganizowanie typów klas i ich wzajemnych powiązań. Stworzono abstrakcyjną klasę nadrzędną, będącą nadklasą dla klas *TKolejka* i *TKalend*. Klasa nadrzędna *TLista* i ściśle związana z nią klasa *TElemListy* gromadzą cechy wspólne obu klas, które z nich dziedziczą, same natomiast nie mają własnych wcieleń.

Strumień danych wejściowych katalogu SYMULATO

Baza danych „Symul” zawiera informacje o podstawowych parametrach procesu symulacji: czasie symulacji, liczbie powtórzeń oraz dacie kalendarzowej dnia startowego.

Field Name	Field Type	
-----	-----	
Czas_sym	N	czas symulacji w dniach
Il_powt	N	liczba powtórzeń
Data	D	dzień startowy

Baza „**Pozycje**” zawiera informacje o podstawowych ograniczeniach struktury systemu ratownictwa medycznego. W kolejnych wierszach bazy w polu wartość zapisane są następujące wartości liczbowe:

wiersz 1: liczba gmin

wiersz 2: liczba stref

wiersz 3: liczba podstacji

wiersz 4: liczba oddziałów

wiersz 5:

wiersz 6: liczba szpitalnych oddziałów ratunkowych

wiersz 7: liczba rozpoznań

wiersz 8: liczba powodów

wiersz 9: liczba zagrożeń

Field Name	Field Type	
-----	-----	
Pole	A10	
Wartosc	N	

Baza danych „**DNIxx.DB**” zawiera informacje o dniach świątecznych oraz wolnych sobotach w danym roku kalendarzowym.

Field Name	Field Type	
-----	-----	
Data	D	data kalendarzowa
Rodzaj	A1	kod: S-dzień świąteczny, w-wolna sobota

Baza „**GMINY.DB**” charakteryzuje gminy, na które podzielony został rejon objęty działaniem systemu ratownictwa medycznego.

Field Name	Field Type	
-----	-----	
Kod_gm	A5	kod gminy
Nazwa	A48	nazwa gminy
Liczebn	N	liczebność
K_0_10	N	liczba kobiet w grupach wiekowych
.....		
M_0_10	N	liczba mężczyzn w grupach wiekowych
...		

Baza „**Harm_szp**” określa szpitalny oddział ratunkowy, któremu podlega każde osiedle w dzień roboczy (kod DR), w dzień świąteczny (kod DS) oraz w wolną sobotę (kod WS).

Field Name	Field Type	
Kod_os	A4	kod osiedla
Dz_tyg	A2	kod typu dnia tygodnia
Kod_szpl	A8	kod szpitala

Baza „**Oddzialy**” podaje informacjach o typach oddziałów (kod C-centrum, R-Rkowy, Z-zwykły, D-pediatryczny, P-przewozowy), ich lokalizacji i przyporządkowaniu podstacjom.

Field Name	Field Type	
Kod_oddz	A5	kod oddzialu
Typ_oddz	A1	kod typu oddzialu
Osied_lezy	A5	numer osiedla - lokalizacja oddziału
Kod_podsta	A3	kod podstacji

Baza „**Osiedla**” podaje informacje o lokalizacji osiedla (kod gminy, na terenie której leży osiedle), liczebności podległości poszczególnym typom oddziałów.

Field Name	Field Type	
Kod_os	A4	kod osiedla
Nazwa	A20	nazwa
Kod_gm	A5	kod gminy
Liczebn	N	liczebność
Kod_oddz_r	A3	obsługujący oddział „R”
Kod_oddz_p	A3	obsługujący oddział „P”
Kod_oddz_z	A3	obsługujący oddział „Z”
Kod_oddz_d	A3	obsługujący oddział „D”

Baza „**Podstac**” opisuje podstacje.

Field Name	Field Type	
Kod_podsta	A3	kod podstacji
Nazwa	A40	nazwa podstacji
Ulica	A20	ulica - adres
Gmina	N	kod gminy, na terenie której zlokalizowana jest podstacja

Baza „**Powody**” jest słownikiem kodów powodów uwzględnianych w modelu.

Field Name	Field Type	
Kod_powodu	A5	kod powodu
Nazwa	A35	nazwa

Baza „**Predkosc**” podaje przeciętną prędkość poruszania się zespołów.

Field Name	Field Type	
Maszyna	A5	kod maszyny
V	N	prędkość

Baza „**Rozpozna**” jest słownikiem kodów rozpoznań uwzględnianych w modelu.

Field Name	Field Type	
Kod_rozp	A5	kod rozpoznania
Nazwa	A35	nazwa

Baza „**Szpitala**” charakteryzuje szpitalne oddziały ratunkowe.

Field Name	Field Type	
Kod_szpit	A8	kod szpitala
Nazwa	A70	nazwa
Ulica	A35	ulica - adres
Osied_lezy	A4	kod osiedla - lokalizacja SOR-u

Baza „**Zagroz**” jest słownikiem kodów zagrożeń uwzględnianych w modelu.

Field Name	Field Type	
Kod_zagroz	A5	kod zagrożenia
Nazwa	A35	nazwa

Baza „**Zespoły**” podaje podstawowe informacje o poszczególnych zespołach: typie zespołu (kod „D”- pediatryczny, „W” – ogólnowoypadkowy, „R”-Rkowy, „P”-przewozowy), lokalizacji zespołu (kod oddziału), typie maszyny oraz o harmonogramie pracy.

Field Name	Field Type	
Kod_zesp	A3	kod zespołu
Typ_zesp	A1	typ zespołu
Kod_oddz	A3	kod oddziału - lokalizacja zespołu
Maszyna	A5	typ maszyny
Dr_g1	N	dzień roboczy, początek zmiany I
Dr_g2	N	dzień roboczy, koniec zmiany I
Dr_g3	N	dzień roboczy, początek zmiany II
Dr_g4	N	dzień roboczy, koniec zmiany II
Ws_g1	N	wolna sobota, początek zmiany I
Ws_g2	N	wolna sobota, koniec zmiany I
Ws_g3	N	wolna sobota, początek zmiany II
Ws_g4	N	wolna sobota, koniec zmiany II
Ds_g1	N	dzień świąteczny, początek zmiany I
Ds_g2	N	dzień świąteczny, koniec zmiany I
Ds_g3	N	dzień świąteczny, początek zmiany II
Ds_g4	N	dzień świąteczny, koniec zmiany II

Strumień danych wejściowych katalogu USLUGI

Baza „CzasObs” zawiera parametry rozkładu czasu obsługi na miejscu zgłoszenia. W modelu przyjęto, że jest to rozkład normalny o parametrach, którego mogą się różnić w zależności od rozpoznania.

Field Name	Field Type	
-----	-----	
Kod_rozp	A4	kod rozpoznania
Czas_obs	N	wartość średnia
Sigma	N	odchylenie

Baza „DoMPD” określa odsetek stanów nagłych pojawiających się w gminie i trafiających do systemu ratownictwa medycznego

Field Name	Field Type	
-----	-----	
Kod_gm	A5	kod gminy
Xdo_oz	N	odsetek stanów nagłych trafiających do Systemu opieki zdrowotnej
Xdo_mpd	N	odsetek stanów nagłych trafiających do Systemu ratownictwa medycznego

Baza „Intens” podaje parametry rozkładu intensywności napływania zgłoszeń (por.pkt.4.7) dla każdej gminy, dla każdego typu dnia tygodnia (dzień roboczy, świąteczny, wolna sobota) oraz dla każdego typu zgłoszenia (wypadek, zachorowanie, przewóz).

Field Name	Field Type	
-----	-----	
Kod_gm	A5	kod gminy
Dz_tyg	A12	typ dnia tygodnia
Lb_0_1	N	średnia liczba zgł/h w [0:00 a 1:00)
Lb_1_2	N	średnia liczba zgł/h w [1:00 a 2:00)
...		
Lb_23_24	N	średnia liczba zgł/h w [23:00 a 24:00)

Baza „LeczSzp” podaje odsetek zgłoszeń każdego rozpoznania poddanych leczeniu szpitalnemu.

Field Name	Field Type	
-----	-----	
Kod_rozp	A4	kod rozpoznania
Xlecz_szp	N	odsetek leczonych szpitalnie

Baza **Lokaliz**” podaje dla każdej gminy procent stanów nagłych, który pochodzi z każdego osiedla.

Field Name	Field Type	
-----	-----	-----
Kod_gm	A5*	kod gminy
Kod_os	A4*	kod osiedla
Xxzupow	N	procent stanów nagłych

Baza **„Opoz”** podaje wartości liczbowe poszczególnych opóźnień.

Field Name	Field Type	
-----	-----	-----
OpozSN	N	opóźnienie od powstania SN do podjęcia decyzji o zgłaszaniu
Opoz_tel	N	opóźnienie od podjęcia decyzji do rozpoczęcia zgłaszania
Opoz_dysp	N	opóźnienie dyspozytora
Opoz_obs	N	opóźnienie w rozpoczęciu obsługi
Opoz_szp	N	opóźnienie w szpitalu
OpozKol	N	opóźnienie przy rozpoczynaniu obsługi zgłoszeń zawieszonych

Baza **„PowDiag”** podaje zależności pomiędzy powodem wezwania a późniejszą diagnozą

Field Name	Field Type	
-----	-----	-----
Kod_powodu	A5	kod powodu wezwania
Kod_rozp	A5	kod rozpoznania
Liczba	N	liczba przypadków

Baza **„Reguly”** wybrać regułę przydziału karetek poszczególnych typów

Field Name	Field Type	
-----	-----	-----
Wybor_r	N	wybór zespołu R-kowego
Wybor_z	N	wybór zespołu wyp.-ch.
Wybor_p	N	wybór zespołu przewozowego
Wybor_d	N	wybór zespołu pediatrycznego

Baza **„StatZgl”** podaje jaki procent zgłoszeń z każdej gminy zgłaszany jest do każdej podstacji.

Field Name	Field Type	
-----	-----	-----
Kod_gm	A5	kod gminy
Kod_podsta	A3	kod podstacji
Xzgloszen	N	procent zgłoszeń

Baza „**TypZesp**” podaje liczbę zespołów każdego typu przydzielonych do każdego powodu wezwania w każdej podstacji.

Field Name	Field Type	
-----	-----	-----
Kod_podsta	A3	kod podstacji
Kod_powodu	A4	kod powodu
Lb_zesp	N	liczba zespołów
Typ_r	N	zespół R-kowy
Typ_z	N	zespół wyp.-ch.
Typ_ped	N	zespół pediatryczny
Typ_p	N	zespół przewozowy

Baza „**Zachor**” podaje jaki procent zachorowań każdego rodzaju odnotowano w każdej gminie

Field Name	Field Type	
-----	-----	-----
Kod_gm	A5	kod gminy
Kod_powodu	A5	kod powodu
Xzachorow	N	procent zachorowań

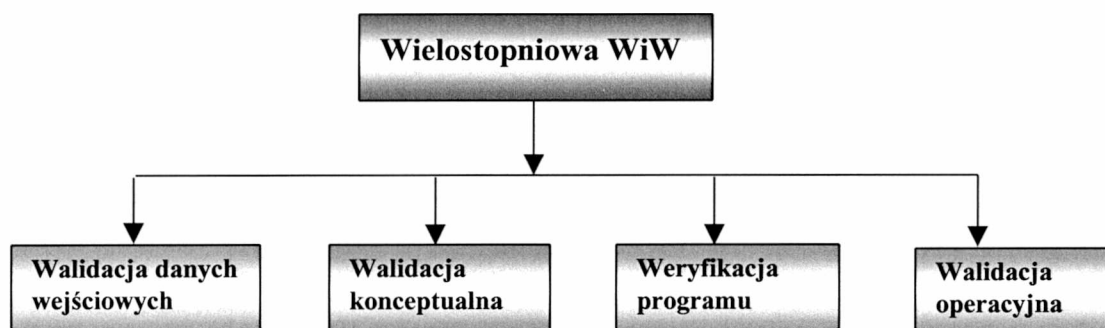
Baza „**ZagrPow**” podaje zależności pomiędzy rodzajem zagrożenia a późniejszym powodem wezwania.

Field Name	Field Type	
-----	-----	-----
Kod_zagr	A5	kod zagrożenia
Kod_pow	A5	kod powodu
Liczba	N	liczba przypadków

4.8. WERYFIKACJA I WALIDACJA MODELU

4.8.1. Weryfikacja i walidacja modeli symulacyjnych

Walidację i weryfikację (WiW) definiuje się ogólnie (por.roz.3.2) jako proces dowodzenia, że model symulacyjny poprawnie opisuje bądź przybliża system rzeczywisty w zakresie tych celów, dla których został opracowany. Przeznaczenie modelu symulacyjnego określa zatem aspekty, które powinny zostać poddane walidacji jak również ustala stopień szczegółowości przeprowadzanej analizy walidacyjnej. Ponieważ nie można za pomocą pojedynczego testu udowodnić poprawności modelu symulacyjnego, w literaturze przedmiotu (por.[142]) wprowadza się pojęcie *wielopłaszczyznowej walidacji i weryfikacji*, w której proponuje się przeprowadzanie procesu WiW na kilku płaszczyznach, z wykorzystaniem różnych technik i testów walidacyjnych. Ideę wielopłaszczyznowej walidacji i weryfikacji można zilustrować następująco (por.rys.4.13):



Rys.4.13. Schemat wielopłaszczyznowej walidacji i weryfikacji modeli symulacyjnych.

Walidacja danych wejściowych

Dane wejściowe są niezbędne do zrealizowania trzech podstawowych celów: budowy modelu koncepcyjnego, przeprowadzenia procesu weryfikacji i walidacji oraz wykonania eksperymentów na zweryfikowanym modelu. Na etapie koncepcualizacji dane wykorzystuje się do sformułowania poprawnych relacji matematycznych i logicznych, jak również do opracowania teorii leżących u podstaw modelu i do sprawdzania przyjętych założeń. W procesie weryfikacji i walidacji dane są natomiast potrzebne do porównania zachowania się systemu rzeczywistego i modelu. Proces zbierania danych wejściowych jest trudny, czasochłonny i niezwykle kosztowny. Najlepszym sposobem na uzyskanie wiarygodnych

danych wejściowych jest zgromadzenie ich za pomocą właściwych metod statystycznych np. za pomocą metody reprezentacyjnej (por.[65]).

Walidacja konceptualna

Walidacja konceptualna oznacza identyfikację i ewaluację założeń leżących u podstaw modelu oraz jakościową ocenę jego struktury i logiki. Założenia dotyczące liniowości, niezależności, stacjonarności czy poprawności dopasowania rozkładów teoretycznych testowane są za pomocą odpowiednich metod statystycznych. Ocenę poprawności struktury i logiki modelu dokonuje się natomiast poprzez tzw. *walidację zewnętrzną* (ang. face validity), czyli uzyskiwanie opinii osób nie związanych z projektem ale posiadających znaczną wiedzę o funkcjonowaniu systemu rzeczywistego i/lub poprzez *technikę śledzenia zdarzeń*, której ideą jest „śledzenie” wybranych obiektów dynamicznych w trakcie ich wędrówki przez model i analizowanie w ten sposób logiki modelu i precyzji w opisie zdarzeń.

Weryfikacja programu

Weryfikacja programu ma na celu upewnienie się, że kod został opracowany w sposób właściwy oraz, że model konceptualny został poprawnie przetłumaczony na język programowania. Zapewnieniem wysokiej jakości programu komputerowego zajmuje się Inżynieria Oprogramowania, (por.[60]), która szczegółowo prezentuje wiele metod, technik i narzędzi służących do budowy odpowiedniego poziomu zaufania do produktu informatycznego. Najczęściej stosowane techniki weryfikacyjne programu komputerowego to m.in.: *inspekcje*, czyli techniki analizy wzrokowej produktów poszczególnych faz cyklu, *testowanie funkcjonalne*, czyli techniki eksperymentowania z kodem programu, traktowanym jak „czarna skrzynka” w celu sprawdzenia czy dany moduł posiada przypisane mu cechy, *testowanie strukturalne*, czyli techniki eksperymentowania z kodem traktowanym jak „przezroczysta skrzynka” w celu sprawdzenia czy dany moduł wykonuje zaplanowane działania, *testowanie regresywne*, czyli powtórzenie uprzednio przeprowadzonych testów po dokonaniu w programie zmian, *pomiary osiągnięć*, czyli techniki eksperymentowania w celu pomiaru konkretnych parametrów fizycznych związanych z wykonywaniem programu i wiele innych. Ponieważ jednak nawet najbardziej starannie wykonane testy nie gwarantują wykrycia wszystkich błędów w programie, zaleca się zastosowanie kilku uzupełniających się strategii.

Walidacja operacyjna

Walidacja operacyjna odnosi się do możliwości dokonania przez model predykcji zachowania systemu rzeczywistego. Najbardziej definitywnym testem walidacji operacyjnej jest udowodnienie, że dane wynikowe modelu są w wysokim stopniu zbieżne z wynikami, których oczekivalibyśmy w systemie rzeczywistym przy założeniu wystąpienia identycznych parametrów wejściowych, dla dwóch różnych zestawów danych eksperymentalnych [109, 152].

Trzy najczęściej stosowane metody walidacji operacyjnej to: (1) analiza porównawcza danych dostarczonych przez model i zaobserwowanych w systemie rzeczywistym, (2) badanie przedziałów ufności i (3) testowanie hipotez.

Metoda pierwsza polega na wyborze wskaźników operacyjnych, ważnych z punktu widzenia celu budowy modelu, a następnie na przedstawieniu wartości tych wskaźników i/lub związków pomiędzy nimi w postaci numerycznej i/lub graficznej jednocześnie dla zbioru danych wynikowych modelu jak i systemu.

Budowanie przedziałów ufności umożliwia porównanie modelu z istniejącym systemem wtedy, gdy możliwe jest uzyskanie dużych ilości danych zarówno z modelu jak i z systemu. Załóżmy, że zebraliśmy m niezależnych zbiorów danych z systemu i n niezależnych zbiorów danych z modelu. Dla każdego zebranego zbioru danych możemy określić średnią oraz wartość oczekiwaną analizowanego wskaźnika. Załóżmy, że $\mu_x = E(X_j)$ to wartość oczekiwana wskaźnika z j -ego zestawu danych systemu, natomiast $\mu_y = E(Y_j)$ to wartość oczekiwana z j -ego zestawu danych modelu. Chcemy porównać model z systemem budując przedział ufności dla $\zeta = \mu_x - \mu_y$. Budowanie takiego przedziału ufności wydaje się być lepsze niż testowanie hipotezy $H_0 : \mu_x = \mu_y$, ponieważ:

- model jest tylko przybliżeniem rzeczywistości, a zatem hipoteza H_0 będzie fałszywa w większości przypadków,
- Budowany przedział ufności dostarczy więcej informacji niż testowanie hipotezy H_0 .
Jeżeli $\mu_x \neq \mu_y$, to przedział ufności dostarczy również informacji o wielkości zaobserwowanego odchylenia.

W przeprowadzaniu walidacji operacyjnej mogą być również pomocne takie techniki jak: analiza wrażliwości, analiza wariancji, analiza regresji, analiza spektralna, analiza serii czasowych i inne.

Metoda trzecia wykorzystywana jest do porównywania parametrów, rozkładów i serii czasowych dla danych z modelu i z systemu rzeczywistego, w celu zbadania czy dany model generuje wyniki z wystarczającą dokładnością.

4.8.2. Proponowany przebieg procesu WiW modelu symulacyjnego RAMD

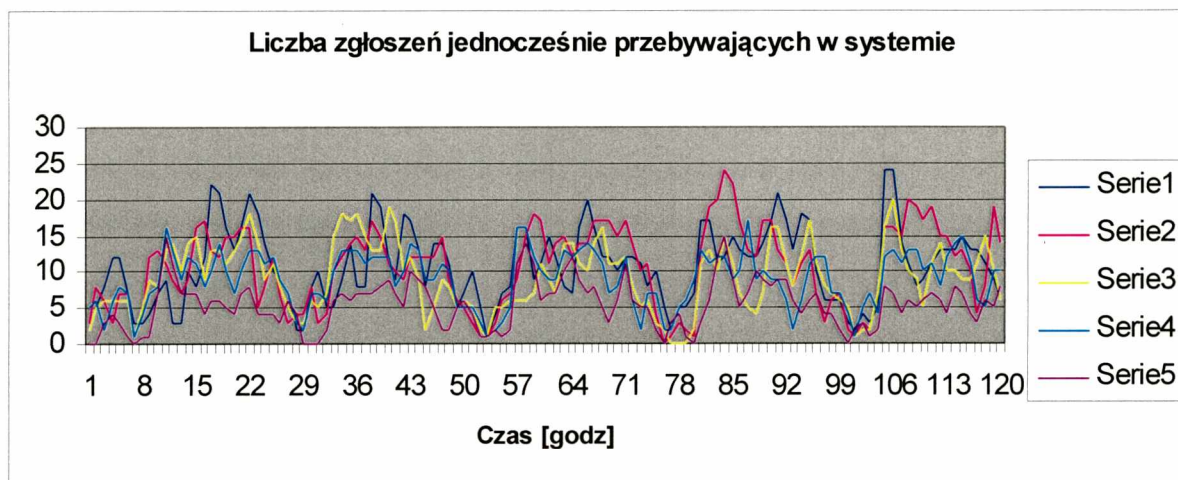
W niniejszej pracy, przebieg procesu weryfikacji i walidacji modelu RAMD zostanie omówiony w odniesieniu do płaszczyzny walidacji operacyjnej i, częściowo – walidacji konceptualnej. Pozostałe sfery procesu WiW, tj. walidacja danych wejściowych, pełna walidacja konceptualna i weryfikacja programu są dziedzinami uniwersalnymi i bez względu na przeznaczenie i typ powstającego modelu symulacyjnego, metodologia ich przeprowadzania jest identyczna. Oznacza to, że proces zbierania danych, analiza kodu programu czy etap sprawdzania założeń konceptualnych modelu przebiegają tak samo, niezależnie od tego czy dotyczą symulacyjnego modelu przemysłowego, ekonomicznego, systemu zarządzania czy ochrony zdrowia.

Przed przystąpieniem do realizacji procesu WiW, którego integralną częścią będą eksperymenty symulacyjne oraz analiza danych uzyskanych w wyniku tych eksperymentów, należy rozwiązać problem eliminacji wpływu warunków początkowych oraz doboru liczby przebiegów symulacyjnych. Zagadnienia te zostaną omówione w punktach 4.8.3 i 4.8.4.

Przebieg procesu WiW modelu RAMD zostanie przeprowadzony zgodnie z proponowaną przez T. Naylora trójstopniową analizą zasadności (por. rozdz. 3.2), z pominięciem jednak etapu 1. Etap ten polega bowiem na sformułowaniu zbioru postulatów dotyczących hipotez opisujących zachowanie się systemu i poddaniu ich akceptacji przez osoby związane z badanym systemem. Jak wspomniano wcześniej, techniki służące temu celowi są uniwersalne i nie wymagają szczególnego traktowania w przypadku stosowania ich do weryfikacji modeli ratownictwa medycznego.

W rozdziale 4.8.5 zostanie omówiony przebieg drugiego etapu analizy zasadności, tj. empiryczne testowanie założeń, natomiast w rozdziale 4.8.6. podjęte zostanie zagadnienie oceny możliwości dokonywania predykcji przez model.

Pierwszym krokiem procesu WiW jest wybór mierników skuteczności działania systemu. Ponieważ model RAMD nie symuluje stanów fizjologicznych pacjentów, nie można zastosować wskaźników odnoszących się bezpośrednio do stanu zdrowia chorego lecz jedynie tzw. mierniki funkcjonowania systemu. *Kryterium podstawowym będzie średni czas jaki*



Rys.4.14. Analiza wpływu warunków początkowych – liczba zgłoszeń jednocześnie przebywających w systemie w poszczególnych godzinach. Wyniki 5 powtórzeń 5-cio dniowych



Rys.4.15. Analiza wpływu warunków początkowych – średnia liczba zgłoszeń jednocześnie przebywających w systemie w poszczególnych godzinach. Wyniki uśrednione dla 5 powtórzeń.

Ponieważ uzyskany wykres jest ciągle nieczytelny i nie pozwala na zdefiniowanie długości odrzucanego przebiegu, zastosowano technikę Welcha opisaną w [109]. Technika ta oparta jest na realizacji następujących kroków:

1. Wykonanie n powtórzeń ($n \geq 5$), każdy o długości m , przy czym m powinno być dosyć duże.
2. Wyznaczenie wartości średnich z n powtórzeń
3. Wygładzenie oscylacji wartości średnich poprzez wyznaczenie tzw. średnich ruchomych wg wzoru:

$$\bar{Y}_i(w) = \begin{cases} \frac{\sum_{s=-w}^w \bar{Y}_{i+s}}{2w+1}, & \text{dla } i = w+1, \dots, m-w \\ \frac{\sum_{s=-(i-1)}^{i-1} \bar{Y}_{i+s}}{2i-1}, & \text{dla } i = 1, \dots, w \end{cases}$$

gdzie:

w – to tzw. *okno*, czyli liczba całkowita dodatnia, wyszukana metodą eksperymentalną

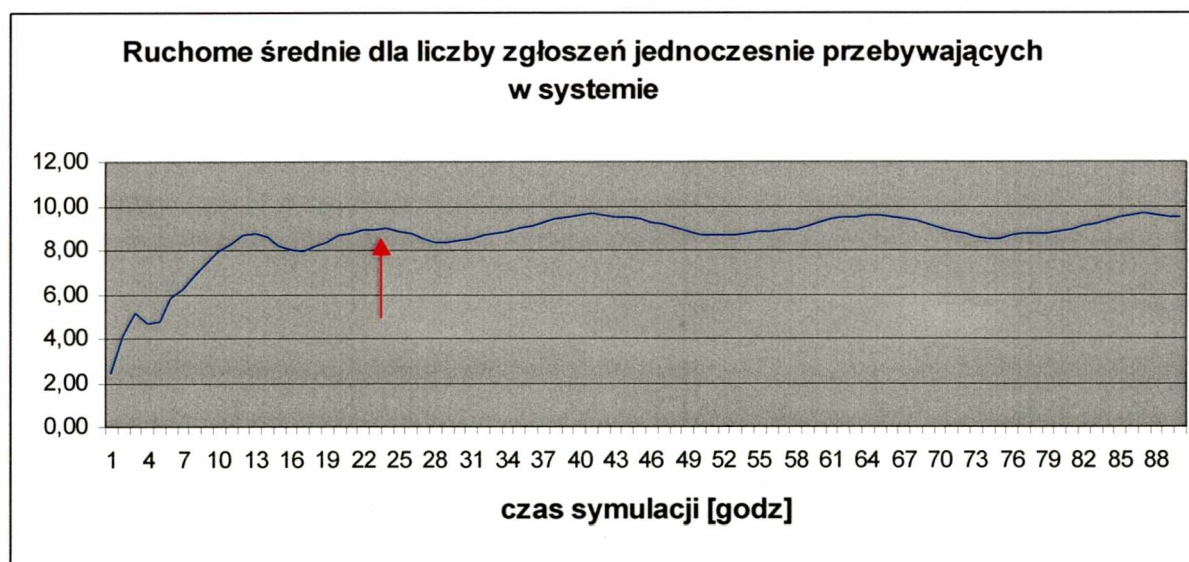
$$w \leq \lfloor m/2 \rfloor$$

m – liczba przebiegów

i – numer obserwacji

$\bar{Y}_i$ – Średnia wartości i -tej obserwacji z m przebiegów

Idea algorytmu jest prosta: polega na wygładzeniu silnych oscylacji i jednoczesnym pozostawieniu niewielkich wahań lokalnych oraz tych oscylacji, które dają się zaobserwować w długim okresie czasu. Przyjęto, że $w=20$ i wyznaczono wartości krzywej wygładzonej korzystając ze wzoru Welcha. Wyniki przedstawia rys.4.16. Na podstawie wykresu ustalono, że odrzucany okres początkowy powinien mieć długość 24 godzin.



Rys.4.16. Średnie ruchome dla liczby zgłoszeń jednocześnie przebywających w systemie.

4.8.4. Dobór liczby powtórzeń

Liczba wykonanych przebiegów symulacyjnych znacząco wpływa na precyzję oszacowania statystyk eksperymentu symulacyjnego. Istotny jest zatem dobór właściwej liczby powtórzeń, na podstawie których możliwa będzie estymacja parametrów na przyjętym poziomie ufności. Ponieważ najczęściej szacowanym parametrem w systemach ratownictwa medycznego są średnie (np. średni czas oczekiwania na przyjazd karetki, średni czas oczekiwania na przewiezienie do szpitala, itd.), poniżej przedstawiono metodę wyznaczania liczby przebiegów symulacyjnych w celu estymacji średniej $\mu = E(X)$ z próby, przy zachowaniu narzuconego z góry poziomu precyzji oszacowania.

Założmy, że chcemy estymować średni czas oczekiwania na przyjazd karetki z błędem względnym $\gamma = 0.1$ i z 90% ufnością. (Błąd względny definiujemy jako $\gamma = |\bar{X} - \mu|/|\mu|$ i mówimy, że procent błędu w $|\bar{X}|$ wynosi $100\gamma\%$).

Algorytm wyznaczania liczby powtórzeń jest następujący:

1. Wybieramy początkową liczbę powtórzeń jako n i wyliczamy $\bar{X}(n)$ oraz $\delta(n, \alpha)$, według poniższych wzorów:

$$\bar{X}(n) = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad \text{gdzie } \bar{X}(n) \text{ jest estymatorem średniej z próby}$$

$$\delta(n, \alpha) = t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(n)}{n}}, \quad \text{gdzie } \delta(n, \alpha) \text{ jest długością połowy przedziału ufności}$$

$$S^2(n) = \frac{\sum_{i=1}^n [X_i - \bar{X}(n)]^2}{n-1}, \quad \text{gdzie } S^2(n) \text{ jest estymatorem wariancji}$$

2. Jeżeli $\delta(n, \alpha)/|\bar{X}(n)| \leq \gamma$, wykorzystujemy $\bar{X}(n)$ jako punktowy estymator średniej i kończymy algorytm. W przeciwnym przypadku zwiększamy liczbę powtórzeń o jeden, czyli $n = n + 1$ i wracamy do kroku 1.

Wyznaczanie liczby powtórzeń potrzebnych do oszacowania średniego czasu oczekiwania na przyjazd karetki rozpoczęto od dwóch przebiegów. Obliczenia wykazały (por. tab.4.25), że należy zwiększyć liczbę przebiegów do trzech lub nawet do czterech. Dopiero bowiem przy

czterech powtórzeniach można bezpiecznie wykazać, że $\delta(n, \alpha) / |\bar{X}(n)| \leq \gamma$. Pamiętać należy oczywiście o pominięciu wyznaczonego wcześniej okresu „rozgrzewania” się systemu.

Tabela 4.25. Określanie minimalnej liczby powtórzeń do wyznaczenia średniego czasu oczekiwania zgłoszenia na karetkę.

Liczba Przebiegów (n)	Średnia z n przebiegów $\bar{X}(n)$	Wariancja dla n Przebiegów $S^2(n)$	$\delta(n, \alpha)$	$\delta(n, \alpha) / \bar{X}(n) $	90% przedział ufności
2	21,97	0,15	3,43	0,16	[18,54;25,4]
3	22,43	0,71	2,09	0,09	[20,33;24,52]
4	22,69	0,75	1,38	0,06	[21,31;24,07]

4.8.5. Empiryczne testowanie założeń

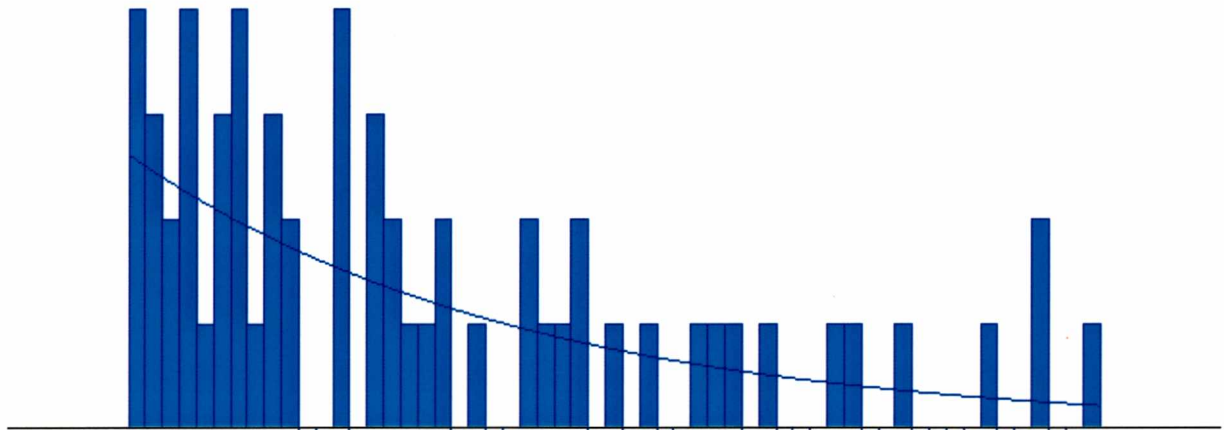
Jeżeli teoretyczne rozkłady losowe zostały dopasowane do danych zebranych w systemie rzeczywistym i następnie wykorzystane w postaci parametrów wejściowych modelu, należy sprawdzić poprawność dopasowania metodą graficzną lub za pomocą testów statystycznych. Klasyczne metody, dokładnie opisane w literaturze (por.[109, 65]) to między innymi: *wykresy graficzne histogramów* i *histogramów skumulowanych* pozwalające na wizualne porównanie danych z próby i danych z rozkładu teoretycznego, *wykresy prawdopodobieństw (P-P)* i *kwantyli (Q-Q)*, *test zgodności χ^2* pozwalający na sprawdzenie, że populacja ma określony typ rozkładu, *test Kołmogorowa-Smirnowa* oparty na statystyce λ , służący zweryfikowaniu hipotezy, że dwie próby pochodzą z tej samej populacji, tzn. że dwie populacje mają ten sam rozkład oraz *analiza wrażliwości* badająca „wrażliwość” modelu na niewielkie zmiany w wartościach parametrów wejściowych.

Rozkłady losowe zdefiniowane w modelu RAMD są w większości rozkładami empirycznymi dyskretnymi za wyjątkiem rozkładu intensywności napływania zgłoszeń oraz rozkładu czasu obsługi zgłoszenia przez zespół ratunkowy w miejscu wezwania. Rozkład czasu obsługi, ze względu na całkowity brak informacji na ten temat w danych źródłowych, został arbitralnie przyjęty jako rozkład normalny o ustalonych parametrach. Procedury analizy poprawności dopasowania rozkładów zostaną zatem zademonstrowane na przykładzie rozkładu intensywności napływania zgłoszeń w jednej z wyróżnionych klas, tj. dla gminy 93003 w godzinach od 17:00 do 18:00 w dni robocze. Okres ten został wybrany ze względu na znaczną licznosc zaobserwowanych zdarzeń. Testowanie poprawności dopasowania rozkładów w pozostałych wyróżnionych klasach przebiegać będzie identycznie.

W modelu RAMD przyjęto, że liczba zgłoszeń pojawiających się w poszczególnych godzinnych okresach doby opisana jest za pomocą rozkładu Poissona. Założenie to równoważne jest przyjęciu rozkładu wykładniczego do opisu czasu pomiędzy dwoma kolejnymi zgłoszeniami. Na rysunku 4.17 przedstawiono histogram zaobserwowanych długości czasów pomiędzy dwoma kolejnymi zgłoszeniami oraz (niebieska, ciągła linia) przebieg funkcji gęstości rozkładu wykładniczego (o parametrze $1/\lambda = 22.9 \text{ min}$, por.tab.4.24 w rozdz.4.6.7.). Analiza porównawcza obu wykresów wskazuje na znaczne podobieństwo, co może świadczyć o zgodności pomiędzy rozkładem empirycznym i teoretycznym.

W celu zweryfikowania, na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, hipotezy że rozkład czasów pomiędzy zgłoszeniami w gminie 93003 pomiędzy godzina 17:00 a 18:00 w dni robocze jest rozkładem wykładniczym, zastosowano test zgodności χ^2 . Wyniki testu (por.tab.4.26) wskazują na to, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 , że rozkład czasów pomiędzy zgłoszeniami w zadanej klasie jest wykładniczy:

$$\chi^2 = 4,46 < 12,592 = \chi^2_{\alpha}$$



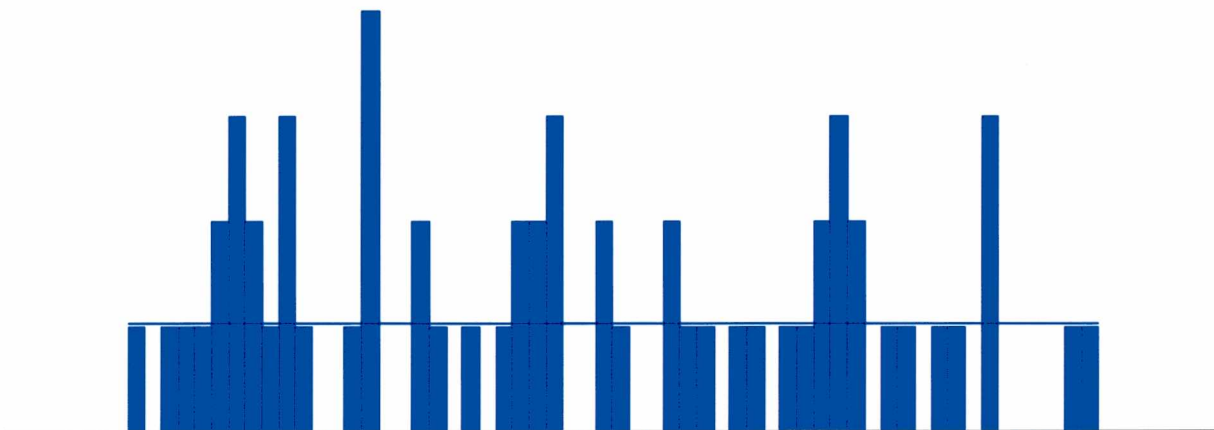
Rys.4.17. Graficzne porównanie histogramu czasów pomiędzy kolejnymi zgłoszeniami w gminie 93003 w okresie od 17:00 do 18:00 w dni robocze z wykresem funkcji gęstości rozkładu wykładniczego o parametrze $1/\lambda = 22.9 \text{ min}$

Wartości osi X odpowiadają kolejno wzrastającym odstępom czasu pomiędzy zgłoszeniami, czyli odcinkom $[b_0, b_1), [b_1, b_2), \dots, [b_{k-1}, b_k)$ natomiast wartości osi Y przedstawiają obserwowaną (histogram) i oczekiwaną (wykres) proporcję liczby wartości X_i przypadającą na odcinek $[b_{i-1}, b_i)$.

Tabela 4.26. Wyniki testu χ^2 dla hipotezy, że rozkład czasów pomiędzy zgłoszeniami w gminie 93003 w godz. 17:00-18:00 w dni robocze jest rozkładem wykładniczym.

Pozycja	Wartość
Liczba klas	8
Liczba stopni swobody	6
Wartość statystyki χ^2	4,46
Wartość krytyczna odczytana z tablicy rozkładu χ^2 dla 6 stopni swobody i poziomu istotności $\alpha = 0,05$	12,592
Odpowiadająca wartość p	0,617

Do zweryfikowania hipotezy, że rozkład liczby zgłoszeń w danej klasie jest rozkładem Poissona, możemy również posłużyć się inną metodą, wynikającą z własności tego rozkładu, (por.[109]). Zamiast sprawdzać, czy rozkład liczby zgłoszeń w okresie $[0, T]$ odpowiada rozkładowi Poissona możemy sprawdzić, czy czasy pojawiania się poszczególnych zgłoszeń w tym przedziale odpowiadają rozkładowi jednostajnemu opisanemu w przedziale $[0, T]$. Wyniki analizy graficznej dla omawianej klasy zgłoszeń przedstawia rysunek 4.18, natomiast zestawienie wartości wynikowych testu χ^2 przedstawia tabela 4.27. Wyniki testu wskazują na to, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 , że rozkład liczby zgłoszeń w zadanej klasie jest rozkładem Poissona: $\chi^2 = 5,39 < 15,507 = \chi^2_\alpha$



Rys.4.18. Graficzne porównanie histogramu liczby zgłoszeń w gminie 93003 w okresie od 17:00 do 18:00 w dni robocze z wykresem funkcji prawdopodobieństwa rozkładu jednostajnego w przedziale (0.5, 58.5).

Wartości osi X odpowiadają kolejno wzrastającym momentom czasowym pojawiania się zgłoszeń, czyli odcinkom $[b_0, b_1), [b_1, b_2), \dots, [b_{k-1}, b_k)$ natomiast wartości osi Y przedstawiają obserwowaną (histogram) i oczekiwaną (wykres) proporcję wartości liczby zgłoszeń przypadających na odcinek $[b_{i-1}, b_i)$.

Tabela 4.27. Wyniki testu χ^2 dla hipotezy, że rozkład liczby zgłoszeń w gminie 93003 w godz. 17:00-18:00 w dni robocze jest rozkładem Poissona

Pozycja	Wartość
Liczba klas	9
Liczba stopni swobody	8
Wartość statystyki χ^2	5,39
Wartość krytyczna odczytana z tablicy rozkładu χ^2 dla 6 stopni swobody i poziomu istotności $\alpha = 0,05$	15,507
Odpowiadająca wartość p	0,715

Jednym z najbardziej użytecznych narzędzi procesu walidacji na etapie empirycznego testowania założeń jest *analiza wrażliwości*. Metoda ta umożliwia sprawdzenie, czy wyniki procesu symulacji zmieniają się znacząco w przypadku niewielkiej zmiany wartości parametrów wejściowych, zmiany teoretycznych rozkładów losowych lub w przypadku zmiany stopnia szczegółowości pewnych fragmentów modelu. Jeżeli wyniki symulacji są znacząco zależne od jakichkolwiek z wymienionych powyżej aspektów modelu, aspekty te powinny być przeanalizowane i uwzględnione w modelu ze szczególną starannością.

W modelu RAMD zastosowano analizę wrażliwości badając jaki wpływ na wybrane wskaźniki działania systemu: ONW (wskaźnik średniego czasu *Odpowiedzi Na Wezwanie*, tj. czasu jaki upływa pomiędzy odebraniem przez dyspozytora zgłoszenia a dojazdem karetki na miejsce urazu) oraz SRS (wskaźnik *Szybkości Reagowania Systemu*, tj. procentu zgłoszeń, dla których czas reakcji przekroczył 30 minut) mają wartości niektórych parametrów wejściowych oraz teoretycznych rozkładów losowych. Wyniki analizy wrażliwości przedstawia tabela 4.28. Eksperyment bazowy, z którym porównywano wyniki poszczególnych eksperymentów, charakteryzował się następującymi wartościami analizowanych wskaźników: **ONW = 23,2 minuty**, **SRS = 9,3%**. Każdy przeprowadzony eksperyment symulacyjny obejmował 5 przebiegów; długość każdego przebiegu wynosiła 31 dni; w obliczeniach pomijano okres rozgrzewania się systemu równy jednej dobie.

Wyniki uzyskane w trakcie przeprowadzonej, fragmentarycznej analizy wrażliwości nie sugerują „wrażliwości” modelu na badane parametry. Nie oznacza to oczywiście, że wątpliwości nie pojawią się w trakcie badania innych parametrów, bądź w trakcie dalszego różnicowania parametrów wymienionych w tabeli 4.28. Przeprowadzając analizę wrażliwości modelu należy poddać badaniu jak największą liczbę elementów, pamiętając jednak o tym, aby badane środowisko eksperymentalne dotyczyło tego samego systemu. Zmiana, na

przykład, liczby oddziałów jest zmianą strukturalną i należy wręcz oczekiwać znaczących zmian w wartościach badanych wskaźników.

Analiza wrażliwości powinna być przeprowadzana wraz z zastosowaniem jednej z metod redukcji wariancji, na przykład metody jednakowych ciągów liczb losowych (ang. *CRN – common random numbers*). Celem stosowania CRN jest upewnienie się, że badamy alternatywne konfiguracje systemu w *podobnych warunkach eksperymentalnych*. W przypadku zaobserwowania istotnych różnic w wartościach wskaźników powinniśmy bowiem mieć pewność, że zmiany te wynikają z różnic w konfiguracji systemu, nie są natomiast rezultatem fluktuacji w „warunkach eksperymentu”. Metoda CRN oznacza stosowanie tych samych ciągów liczb losowych do generowania tych samych wielkości w różnych eksperymentach.

Tabela 4.28. Wyniki analizy wrażliwości dla dwóch wskaźników działania systemu: ONW (średniego czasu odpowiedzi na wezwanie) oraz SRS (szybkości reagowania systemu, tj procentu zgłoszeń dla których czas reakcji przekroczył 30 minut).

Zmieniany parametr	Wartość bazowa	Wartość po zmianie	ONW po zmianie [min]	SRS po zmianie [%]
Dzień początkowy symulacji	01.01.95	15.01.95	22,2	6,1
Dzień początkowy symulacji	01.01.95	01.02.95	22,6	7,6
Opóźnienie podjęcia decyzji przez dyspozytora	5 minut	3 minuty	21,2	6,7
Opóźnienie podjęcia decyzji przez dyspozytora	5 minut	4 minuty	22,2	8,0
Parametr μ w rozkładzie czasu obsługi na miejscu wezwania	15 minut	13 minut	22,9	8,7
Parametr μ w rozkładzie czasu obsługi na miejscu wezwania	15 minut	16 minut	22,9	8,9

4.8.6. Ocena poprawności danych wyjściowych

Najbardziej definitywny test poprawności modelu symulacyjnego polega na sprawdzeniu czy wyniki procesu symulacji odpowiadają ściśle danym, które spodziewalibyśmy się zebrać w systemie rzeczywistym, (zob.[109 s.311]). Im większa spójność występuje pomiędzy danymi symulacyjnymi a rzeczywistymi, tym model uznany może być za bardziej wiarygodny. W teorii symulacji nie istnieje jednak pojęcie „dobrze zdefiniowanego podejścia do walidacji modeli”. W niniejszej pracy zostanie zatem

zaproponowana procedura walidacyjna dla modeli systemów ratownictwa medycznego, składająca się z kilku metod.

1. *Analiza porównawcza średniej lub wariancji.* Analiza porównawcza służy do testowania hipotezy, że średnia (lub wariancja) szeregów generowanych w procesie symulacji jest równa średniej (lub wariancji) szeregów obserwowanych.
2. *Skorelowana analiza porównawcza.* Metoda ta polega na przeprowadzeniu procesu symulacji nie na danych uzyskanych z generatorów zmiennych losowych ale na danych historycznych wprowadzonych do modelu jako dane wejściowe (w szczególności dotyczy to czasów pojawiania się kolejnych zgłoszeń oraz czasów obsługi pacjentów). Dla obu prób losowych przeprowadza się następnie analizę jak w punkcie 1. Metoda ta ma tę przewagę nad zwykłą analizą wariancji, że zarówno system jak i model opierają się na tych samych obserwacjach wejściowych, co powinno doprowadzić do bardziej precyzyjnego, w sensie statystycznym, porównania.
3. *Przedziały ufności.* Przedziały ufności budowane dla liczebnych zbiorów obserwacji z systemu rzeczywistego i modelu wskazują nie tylko na ewentualny fakt występowania różnic pomiędzy dwoma zestawami danych ale również dają pogląd na wielkość obserwowanych rozbieżności.

Analiza porównawcza średniej lub wariancji

Analizie poddane powinny być wskaźniki odnoszące się do czasu reakcji systemu, na przykład wybrany wcześniej wskaźnik ONW, czyli wskaźnik średniego czasu *Odpowiedzi Na Wezwanie*, tj. czasu jaki upływa pomiędzy odebraniem przez dyspozytora zgłoszenia a dojazdem karetki na miejsce urazu lub wskaźnik średniego czasu *Oczekiwania na Dowóz do Szpitala* dla zgłoszeń, które wymagają leczenia szpitalnego. Wskazany byłby również podział zgłoszeń na poszczególne typy pilności lub na poszczególne rejony (na przykład gminy) i odrębna analiza tak utworzonych zbiorów.

Analizę porównawczą można przeprowadzić wykorzystując *test dla dwóch średnich*. Spośród opisanych w literaturze modeli (por.[65]) charakterystycznych dla tego testu wybrano model, w którym zakłada się, że dwie badane populacje generalne mają rozkłady normalne lub inne, skończone ale nieznane wariancje σ_1^2 i σ_2^2 oraz obie próby są dostatecznie liczne. Procedura walidacyjna przeprowadzona na modelu RAMD przebiegała według następujących kroków:

Krok 1. Przyjęto poziom istotności jako $\alpha = 0,01$.

Krok 2. Postawiono hipotezę $H_0 : m_1 = m_2$, gdzie m_1 i m_2 oznaczają wartości średnie odpowiednio pierwszej (dane rzeczywiste) i drugiej (dane z symulacji) populacji. Sprawdzana jest zatem hipoteza, że ONW mierzone w systemie i ONW wyliczone z modelu symulacyjnego są takie same. Hipotezą alternatywną jest $H_1 : m_1 \neq m_2$, że obie średnie są różne.

Krok 3. Przeprowadzono 5 przebiegów symulacyjnych, każdy o długości 31 dni i wyliczono średnią z 5 przebiegów.

Krok 4. Wyliczono średnią z próby losowej danych rzeczywistych

Krok 5. Przeprowadzono test dla dwóch średnich i wyliczono wartość statystyki u

korzystając ze wzoru:

$$u = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}},$$

Gdzie: $\bar{x}_1$ i $\bar{x}_2$ to wartości średnich z obu populacji,

s_1 i s_2 to estymatory wariancji uzyskane z dużych prób

n_1 i n_2 to liczebności obu populacji

Krok 6. Porównano wyliczoną wartość statystyki u z wartością u_α odczytaną z tablicy rozkładu normalnego $N(0,1)$.

Wyniki analizy porównawczej dla wskaźnika średniego czasu oczekiwania na zespół w poszczególnych gminach przedstawia tabela 4.29.

Tabela 4.29. Test dwóch średnich dla wskaźnika średniego czasu oczekiwania na zespół.

Gmina	Średnia z danych historycznych	Średnia z symulacji	Wartość statystyki u
93001	11,3	12,0	-2,31
93003	11,5	10,9	1,8
93005	15,4	12,7	15,2
93007	9,8	9,0	2,25
93009	11,6	10,2	1,5

Wartość krytyczna odczytana z tablic dla lewostronnego obszaru krytycznego wynosi $u_\alpha = -2,33$ a dla obszaru prawostronnego $u_\alpha = 2,33$. W przypadku czterech gmin nie ma zatem podstaw do odrzucenia hipotezy H_o , że wskaźniki średniego czasu odpowiedzi na wezwanie są takie same dla populacji danych historycznych i uzyskanych w trakcie symulacji.

Skorelowana analiza porównawcza

Model symulacyjny należy zmodyfikować w taki sposób aby możliwe było ustalanie czasu nadejścia kolejnego zgłoszenia poprzez odczytanie odpowiedniej wartości z zewnętrznej bazy danych historycznych zamiast z generatorów rozkładów zmiennych losowych zdefiniowanych w modelu. Zostaną w ten sposób zapewnione identyczne warunki obserwacji (w tym przypadku rozkładu intensywności napływania zgłoszeń) dla dwóch prób losowych: jednej pochodzącej ze zbioru danych historycznych i drugiej - z eksperymentów symulacyjnych. Dla obu grup danych należy następnie przeprowadzić analizę porównawczą wskaźnika średniego czasu oczekiwania na przyjazd zespołu za pomocą testu dla dwóch średnich według procedury opisanej powyżej.

Skorelowana analiza porównawcza jest metodą łatwą w stosowaniu i dostarcza wnikliwych informacji na temat zgodności modelu symulacyjnego z systemem rzeczywistym. Zalecane jest wykorzystanie tej procedury do sprawdzenia wszystkich pozostałych wskaźników działania systemu, a więc również średniego czasu oczekiwania pacjenta na dojazd do szpitala i średniego całkowitego czasu obsługi.

Przedziały ufności

Posiadanie obszernych baz z danymi historycznymi umożliwia zbudowanie przedziałów ufności dla $\zeta = \mu_x - \mu_y$, gdzie $\mu_x = E(X_j)$ to wartość oczekiwana badanego wskaźnika dla j -ego zestawu danych pobranych z systemu, natomiast $\mu_y = E(Y_j)$ to wartość oczekiwana badanego wskaźnika dla j -ego zestawu danych uzyskanych z modelu. Jedynym warunkiem ograniczającym stosowanie tej procedury jest wymóg dużej liczebności i niezależności obu zestawów danych.

Przedział ufności dla ζ buduje się wykorzystując dwa podejścia: technikę testu t dla dwóch średnich oraz technikę Welch'a (por.[109, s.320]). W podejściu pierwszym obie próby (dane historyczne i dane symulacyjne) muszą być jednakowo liczne. Dopuszczalna jest

natomiast korelacja pomiędzy nimi, co może być istotne w przypadku zastosowania zestawu danych historycznych do prowadzenia procesu symulacji w fazie walidacji. Technika Welch'a może być natomiast stosowana dla dowolnych, różnych wielkości obu prób ale obserwacje muszą być wzajemnie niezależne.

Przedział ufności dla dwóch średnich

1. Ustala się licznosc obu obserwacji na n ($n_1 = n_2 = n$), przy czym n oznacza jedno cale powtorzenie (w przypadku symulacji) lub jeden zestaw danych (w przypadku danych historycznych) a nie, odpowiednio, liczbe zgloszen zaobserwowanych w trakcie trwania jednego przebiegu symulacyjnego czy zgromadzonych w jednym zestawie danych rzeczywistych.
2. Dla kazdego $j = 1, 2, 3, \dots, n$ wylicza sie wartosci srednie X_{1j} oraz X_{2j} odpowiednio dla danych z systemu rzeczywistego i z symulacji. Nalezy zauwazyc, ze X_{ij} oznacza wartosc srednia wyliczona dla calego powtorzenia.
3. Wartosci srednie X_{ij} laczy sie ze soba, definiujac $Z_j = X_{1j} - X_{2j}$. Wszystkie wartosci Z_j sa zmiennymi losowymi i $E(Z_j) = \zeta$.
4. Dla ζ konstruowany jest przedzial ufności w nastepujacy sposob:

$$\bar{Z}(n) = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n}$$

$$\text{Var}[\bar{Z}(n)] = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}(n)]^2}{n(n-1)}$$

i z ufnością $100(1-\alpha)\% : \bar{Z}(n) \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\text{Var}[\bar{Z}(n)]}$.

Jeżeli wartości Z_j mają rozkład normalny, to zbudowany przedział ufności jest dokładny, tzn. pokrywa ζ z prawdopodobieństwem $1-\alpha$. W przeciwnym przypadku opieramy się na centralnym twierdzeniu granicznym, które mówi, że dla dużych n prawdopodobieństwo pokrycia będzie bliskie $1-\alpha$.

Przedział ufności budowany techniką Welch'a

1. Ustala się licznosc obserwacji na n_1 dla systemu rzeczywistego i n_2 dla symulacji.
2. Wylicza się

$$\bar{X}_i(n_i) = \frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}}{n_i} \quad \text{oraz}$$

$$S_i^2(n_i) = \frac{\sum [X_{ij} - \bar{X}_i(n_i)]^2}{n_i - 1}; \quad \text{gdzie } i = 1, 2.$$

3. Wyznacza się szacowaną liczbę stopni swobody

$$\hat{f} = \frac{[S_1^2(n_1)/n_1 + S_2^2(n_2)/n_2]^2}{[S_1^2(n_1)/n_1]^2/(n_1 - 1) + [S_2^2(n_2)/n_2]^2/(n_2 - 1)}$$

4. Konstruuje się przedział ufności z $100(1 - \alpha)$ procentową ufnością.

$$\bar{X}_1(n_1) - \bar{X}_2(n_2) \pm t_{\hat{f}, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S_1^2(n_1)}{n_1} + \frac{S_2^2(n_2)}{n_2}}$$

Założmy, że skonstruowano przedział ufności, ze $100(1 - \alpha)$ procentową ufnością, dla wskaźnika średniego czasu oczekiwania pacjenta na przyjazd zespołu. Do budowy przedziału ufności wykorzystano technikę dwóch średnich lub technikę Welch'a. Niech $l(\alpha)$ i $u(\alpha)$ oznaczają krańce przedziału ufności. Jeżeli $0 \notin [l(\alpha), u(\alpha)]$, wtedy obserwowana różnica pomiędzy μ_x i μ_y , $\bar{X}(m) - \bar{Y}(n)$, jest *statystycznie znacząca* na poziomie α . Stwierdzenie takie jest równoważne odrzuceniu hipotezy $H_0 : \mu_x = \mu_y$, a mianowicie, że średni czas oczekiwania na zespół w systemie i modelu jest sobie równy. Jeżeli natomiast $0 \in [l(\alpha), u(\alpha)]$ to obserwowana różnica pomiędzy μ_x i μ_y nie jest statystycznie znacząca na poziomie α i można przyjąć, że obie średnie są sobie równe. Nawet jednak, jeżeli obserwowana różnica pomiędzy μ_x i μ_y jest statystycznie znacząca, nie oznacza to jeszcze, że model, zbudowany dla określonych celów, nie jest zasadny. Możemy bowiem powiedzieć (por.[109, s.320]), że różnica występująca pomiędzy systemem i modelem jest *praktycznie znacząca*, jeżeli spowoduje wysunięcie błędnych wniosków dotyczących systemu na

podstawie modelu. Decyzja o zaakceptowaniu bądź nie modelu jest więc decyzją subiektywną i zależy w dużej mierze od przyszłego przeznaczenia modelu i sposobu jego wykorzystania. Można ponadto, w sytuacji wystąpienia praktycznie znaczącej różnicy między systemem a modelem, próbować zmniejszyć przedział ufności poprzez zwiększenie (jeśli jest to możliwe) liczby replikacji.

5. PROPONOWANE KIERUNKI ZASTOSOWAŃ MODELU SYMULACYJNEGO W ZARZĄDZANIU SYSTEMEM RATOWNICTWA MEDYCZNEGO

5.1. PRZESŁANKI STOSOWANIA SYMULACJI JAKO NARZĘDZIA WSPOMAGANIA DECYZJI

Symulacja komputerowa może być efektywnym narzędziem wspomagania decyzji w systemach ochrony zdrowia, w tym również – w systemach ratownictwa medycznego. Szereg zalet tej metody wydaje się być poważnym argumentem przemawiającym za jej stosowaniem w rozwiązywaniu problemów operacyjnych, taktycznych czy strategicznych w systemach usług medycznych. Do najistotniejszych, uznanych zalet symulacji można zaliczyć:

- możliwość opisu złożonych systemów rzeczywistych, a zatem również systemów ratownictwa medycznego,
- możliwość eksperymentowania na systemie hipotetycznym bez konieczności ingerencji w rzeczywisty obiekcie, co wydaje się być poważną zaletą w przypadku tak specyficznych systemów jak systemy usług medycznych (zastosowanie modelu symulacyjnego nie wymaga eksperymentowania w czasie rzeczywistym z żywymi ludźmi),
- możliwość kondensowania czasu, czyli symulowania kilku lat działalności systemu w krótkim czasie,
- możliwość rozszerzania czasu działania systemu, co pozwala na zbadanie szczegółowej struktury zmian, której nie można zaobserwować w czasie rzeczywistym,
- możliwość szybkiego powtarzania obliczeń, doskonalenia struktury modelu i wielokrotnego testowania,
- możliwość zapisu kompletnej, dokładnej i szczegółowej historii oraz szybkiej analizy wyników,
- możliwość uwzględniania losowości zjawisk, których nasilenie w systemach usług medycznych jest szczególnie wysokie,
- brak jednolitej teorii symulacji – możliwe jest zbudowanie modelu charakteryzującego się znaczną liczbą dynamicznych współzależności i skorelowanymi zjawiskami losowymi. Ta cecha w sposób szczególny predestynuje symulację do opisu systemów ratownictwa medycznego,
- możliwość identyfikacji i kontroli źródeł zmienności systemu,

- zdolność do odtwarzania stanu systemu – możliwe jest uruchomienie symulacji dla rozszerzonego zestawu danych wejściowych przy zachowaniu identycznych warunków początkowych,
- możliwość powtórzenia eksperymentu symulacyjnego po dokonaniu pewnych zmian w parametrach lub warunkach działania systemu.

Symulacja ma oczywiście również swoje wady, takie jak między innymi:

- brak szczegółowych reguł tworzenia modeli symulacyjnych,
- brak jednolitej teorii symulacji – im bardziej złożony jest model, tym bardziej jesteśmy zależni od słabo rozwiniętej teorii statystyki, zajmującej się analizą i generowaniem danych,
- brak zamkniętej formy rozwiązania: każda zmiana warunków wejściowych powoduje konieczność wykonania pełnych przebiegów symulacyjnych,
- kosztowność i czasochłonność budowy modeli,
- brak uniwersalnych metod rozstrzygnięcia o poprawności budowanych modeli,
- konieczność traktowania uzyskanych wyników jako obciążonych błędem statystycznym,
- wysoki stopień skomplikowania modelu, co utrudnia ocenę jego jakości i stosowalności.

Wymienione powyżej cechy symulacji sprawiają, że jest to narzędzie traktowane często jako „*metoda ostatecznego ratunku*”, którą zaleca się stosować, gdy spełniony jest chociaż jeden z poniższych warunków:

- (1) założenia, które należy poczynić przy budowie modelu analitycznego są nie do przyjęcia w systemie rzeczywistym,
- (2) poprawny model analityczny jest nierozwiązywalny.

W przypadku systemów ratownictwa medycznego oba warunki są spełnione, natomiast celem niniejszej pracy była próba pokonania niektórych wad symulacji poprzez opracowanie metodologii konstrukcji modeli symulacyjnych systemów ratownictwa medycznego. Poniżej, w kolejnych punktach zostaną zatem przedstawione możliwe, przykładowe zastosowania modelu symulacyjnego w zarządzaniu systemem mpd.

5.2. PROPONOWANE ZASTOSOWANIE MODELU SYMULACYJNEGO

Problemy lokalizacyjne - rozdziału/rozmieszczenia zasobów

Modele symulacyjne są zwykle tak zaprojektowane, aby umożliwiać testowanie dowolnej konfiguracji systemu rzeczywistego w odniesieniu zarówno do zasobów stacjonarnych jak i ruchomych. Można je zatem wykorzystać do oceny różnych wariantów lokalizacyjnych, a w szczególności do:

- analizy przestrzennego rozmieszczenia posiadanych zasobów stacjonarnych (por.Eksp.0, Eksp.5, Eksp.6.). Taka analiza jest przydatna w przypadku przeprowadzania reorganizacji istniejącego systemu ratownictwa medycznego i konieczności alokacji przestrzennej oddziałów, połączenia kilku oddziałów w jeden, rozbicia istniejącego oddziału na mniejsze lub wskazania najlepszej lokalizacji dla nowo tworzonego oddziału. Badania można prowadzić na przykład pod kątem oceny średniego czasu oczekiwania pacjenta na przyjazd karetki przy założeniu różnych, dopuszczalnych (zalecanych) rozwiązań lokalizacyjnych,
- analizy alokacji zasobów ruchomych (por.Eksp.1). Przy niezmiennym stanie w odniesieniu do liczby i rodzaju zespołów wyjazdowych można przeprowadzić analizę alternatywnego rozmieszczenia zespołów w oddziałach, koncentrując się na znalezieniu takiego rozwiązania, które zapewni najszybszy średni czas reakcji systemu na odebrane wezwania i/lub zrównoważenie obciążenia poszczególnych oddziałów,
- analizy reorganizacji podziału regionu na strefy obsługi (por.Eksp.2). Zagadnienie to dotyczy zarówno podziału regionu pomiędzy strefy obsługi poszczególnych oddziałów jak również wyznaczania jednostek leczących do obsługi pacjentów z poszczególnych dzielnic. O ile jednak w przypadku analizy skuteczności działania systemu w różnych konfiguracjach rejonizacji oddziałów można kierować się kryterium czasu reakcji na wezwanie, o tyle w przypadku wyboru jednostki leczącej należy wprowadzić do modelu również symulację stanu fizjologicznego pacjenta.

Problemy określania optymalnej wielkości zasobów

Dla zadanej konfiguracji systemu (liczba podstacji, oddziałów, podział na strefy obsługi) można wyznaczyć optymalną wielkość zasobów ruchomych poprzez obliczanie wartości wybranych wskaźników działania, które mogą być przedstawione w postaci:

- prawdopodobieństwa, że w chwili nadejścia zgłoszenia pilnego mniejsza od dopuszczalnej liczba karetek będzie osiągalna,
- średniego czasu oczekiwania na obsługę,
- średniego czasu oczekiwania zgłoszenia pilnego na hospitalizację,
- prawdopodobieństwa, że zgłoszenie będzie oczekiwać na obsługę dłużej niż T min,
- rozkładu prawdopodobieństwa czasu dojazdu karetki na miejsce wezwania,
- obciążenia zespołów.

Powyższą analizę można rozszerzyć o zagadnienie alokacji zasobów poprzez poszukiwanie optymalnej liczby zespołów rozmieszczonych w oddziałach tak, aby wskaźnik średniego czasu odpowiedzi systemu na wezwanie nie przekraczał pewnego, ustalonego poziomu, przy zachowaniu równomiernego obciążenia zespołów (por.Eksp.3).

Planowanie pracy zespołów

Planowanie pracy zespołów jest zagadnieniem pokrewnym do zagadnienia alokacji zasobów ruchomych. Tutaj jednak, dysponując pewną określoną konfiguracją systemu (w odniesieniu zarówno do zasobów stałych jak i ruchomych) analizie poddana zostaje intensywność napływania zgłoszeń i tak dobierany jest harmonogram pracy zespołów wyjazdowych (por.Eksp.9), aby system mógł odpowiednio reagować na okresy nasilonego strumienia wezwań w określonych porach doby jak również w poszczególnych dniach tygodnia. Spełniony oczywiście musi być wymóg stałej dostępności zespołów dla wszystkich stref obsługi.

Problemy wyboru reguł przydziału karetek

Problem wyboru reguł przydziału karetek, istotny z punktu widzenia budowy modelu, nie istnieje właściwie w systemie rzeczywistym, gdzie fakt wysłania karetki do chorego i wybór zespołu leczącego jest wyłącznie wynikiem doświadczenia dyspozytora kierującego się własną oceną sytuacji. Niemniej jednak przesłanki, którymi kieruje się dyspozytor podejmując decyzje istotne z punktu widzenia zdrowia i życia chorego, mogą i powinny zostać poddane analizie i być uwzględnione w testowanych regułach. Najczęściej występujące w modelach, sformalizowane reguły przydziału karetek to:

- (1) przydział zawsze najbliższej karetki z oddziału wyznaczonego do obsługi danej strefy, z uwzględnieniem typu karetki odpowiadającego kategorii zgłoszenia (zgłoszenia

- „R”-kowe, pediatryczne, zwykłe, przewozowe). W przypadku chwilowej niedostępności karetki (obsługuje inne wezwanie), zgłoszenie oczekuje na zwolnienie zespołu,
- (2) przydział zawsze najbliższej karetki z oddziału wyznaczonego do obsługi danej strefy, z uwzględnieniem typu karetki odpowiadającego kategorii zgłoszenia. Dopuszcza się możliwość przerwania obsługi zgłoszenia mniej pilnego (na przykład zgłoszenia zwykłego na korzyść „R”-kowego lub pediatrycznego) jeżeli w momencie odebrania zgłoszenia pilnego wszystkie karetki są zajęte,
- (3) przydział zawsze najbliższej karetki z oddziału wyznaczonego do obsługi danej strefy, z uwzględnieniem typu karetki odpowiadającego kategorii zgłoszenia. Dopuszcza się możliwość wysłania karetki z innego oddziału jeżeli w przypadku odebrania pilnego wezwania wszystkie karetki „R”-kowe są zajęte.

Reguły określające docelowe miejsce hospitalizacji pacjenta są również nieprecyzyjne i trudne do sformalizowania. W ministerialnym programie „Zintegrowane Ratownictwo Medyczne” przyjęto, że do miejsca zdarzenia udaje się zawsze najbliższy zespół a ofiara wypadku jest transportowana do najbliższego szpitalnego oddziału ratunkowego.

Analiza kosztów

Zagadnienie analizy kosztów świadczenia usług przez system mpd mogłoby być prowadzone nie tylko w odniesieniu do globalnych kosztów funkcjonowania systemu ale również w odniesieniu do rzeczywistych kosztów ponoszonych na obsługę różnych kategorii zgłoszeń przez różne typy zespołów wyjazdowych. Badanie symulacyjne byłoby pomocne w oszacowaniu rzeczywistego poziomu zapotrzebowania na usługi mpd i określeniu sposobu zaspokajania tych potrzeb przy zachowaniu pożądanej jakości usług w ramach posiadanych środków finansowych. Analiza różnych przewidywanych zmian w stopniu nasilenia strumienia zapotrzebowania pomogłaby w zdefiniowaniu regionów potencjalnie „zagrożonych” wydłużonym czasem obsługi i tych, w których nakłady finansowe (sprzęt, personel, karetki) będą niewspółmiernie wysokie w stosunku do spodziewanych potrzeb. Efektem takich badań byłyby dane dotyczące wysokości nakładów niezbędnych do pokrycia spodziewanego zapotrzebowania w przeliczeniu na poszczególne kategorie usług (różne stany / jednostki chorobowe / grupy wiekowo-płciowe, itd.), co mogłoby stanowić narzędzie racjonalnego planowania wielkości i struktury budżetu.

Optymalizacja zarządzania

Model symulacyjny regionalnego systemu ratownictwa medycznego byłby pomocny w optymalizacji zarządzania zasobami na różnych poziomach podejmowania decyzji, począwszy od szczebla regionalnego (wojewódzkiego), poprzez szczebel lokalny (poszczególne podstacje) aż po indywidualny proces leczniczy w odniesieniu do poszczególnych grup pacjentów.

Kryteria segregacji pacjentów

Rozbudowa modelu o symulację stanów fizjologicznych pacjentów pozwoliłaby na prowadzenie badań związanych z zagadnieniem wyboru jednostki leczącej przez zespół ratunkowy. Do realizacji tego celu niezbędna byłaby dokładniejsza analiza (i symulacja) formułowanych diagnoz lekarskich wraz ze stopniem pilności urazu czy zachorowania. Taka analiza byłaby możliwa do przeprowadzenia na podstawie danych źródłowych odnoszących się do oceny stanu chorego, rodzaju pomocy udzielonej przez zespół, zastosowanych środków farmakologicznych oraz przesłanek decydujących o wyborze miejsc przekazania i dalszego leczenia pacjentów.

Analiza skutków podjęcia określonych decyzji organizacyjnych

Ta grupa badań symulacyjnych obejmowałaby analizę skutków podjęcia różnorodnych decyzji operacyjnych i strategicznych typu, na przykład: likwidacja oddziału, likwidacja ostrych dyżurów, utworzenie nowej podstacji, utworzenie regionalnego centrum urazowego, integracja istniejących podstacji ze szpitalami w celu utworzenia szpitalnych oddziałów ratunkowych, przekazanie części zadań jednostkom podstawowej opieki zdrowotnej, zrezygnowanie z części usług przewozowych, zmiana zasad kategoryzacji zgłoszeń, zmiana rodzaju i wyposażenia karet i inne, w odniesieniu zarówno do jakości (mierzonej czasem dotarcia do chorego, czasem dowozu do szpitala, ilością zgonów) jak i do kosztów świadczonych usług.

Badania typu what-if („co się stanie, jeśli?”)

Badania symulacyjne mogłyby pomóc w analizie skutków wystąpienia rzadkich ale prawdopodobnych zdarzeń typu „katastrofa z dużą liczbą ofiar w różnych stanach zagrożenia” (por. Eksp.4) czy „sporadyczne zjawisko o charakterze masowym, w których uczestniczy znaczna liczba osób, na przykład koncert, zgromadzenie w celach religijnych, mecz,

manifestacja, itp". Symulacja pozwoliłaby ocenić przygotowanie służb ratownictwa medycznego do takich zdarzeń jak również wypracować strategię postępowania w przypadku wystąpienia tych zjawisk w rzeczywistości.

Odrębna grupa badań może dotyczyć skutków wystąpienia spodziewanych trendów, na przykład zmiany struktury wiekowej ludności zamieszkującej dane osiedla (starzenie się populacji lub wzrost liczby młodych małżeństw z dziećmi), które to zjawiska mogą wpłynąć zarówno na częstotliwość wezwań jak i na różnicowanie najczęściej występujących typów urazów i zachorowań. Przewidywane zmiany w natężeniu strumienia zgłoszeń (por. Eksp.7 i Eksp.8) wprowadzane są do modelu w postaci parametrów wejściowych (zadanych) i obserwowane są wartości wskaźników działania co pozwala ocenić skuteczność działania systemu mpd w warunkach hipotetycznych ale prawdopodobnych.

Istotna, szczególnie w świetle postulowanej obecnie potrzeby tworzenia szpitalnych oddziałów ratunkowych, mogłaby być analiza wpływu ciągłości pomiędzy leczeniem przedszpitalnym a szpitalnym na skuteczność udzielanej pomocy (mierzona na przykład liczbą zgonów).

Problemy ustalania dogodnych połączeń komunikacyjnych

Przyjmujący zgłoszenia dyspozytor musi bezustannie rozwiązywać problem wyboru trasy dla wszystkich wolnych karetek rozmieszczonych w regionie, ewentualnie także i tych które obsługują zgłoszenia o najniższym priorytecie. Spośród wszystkich alternatywnych możliwości powinien wybrać ten zespół, którego aktualne położenie zapewni minimalny czas dojazdu na miejsce zgłoszenia. Badania symulacyjne mogłyby być pomocne w takim określeniu alokacji zasobów systemu, które zapewniłoby najkrótszy średni czas przejazdu karetek, przy czym analizie poddawana byłaby *nie* odległość pomiędzy poszczególnymi strefami (punktami na mapie) ale rzeczywisty czas przejazdu zespołów poruszających się po trasach o różnym stopniu intensywności nasilenia ruchu drogowego.

Inne kierunki zastosowań

Symulacja może również stanowić pomoc w procesach podejmowania decyzji wypełniając funkcję formułowania, precyzowania i dokumentowania założeń, rozpoznawania i uszczegóławiania procesu decyzyjnego, identyfikowania potencjalnych problemów decyzyjnych. Budowa modelu symulacyjnego wymusza przeprowadzanie rozległych i dokładnych badań w systemie rzeczywistym, co prowadzi często do nieoczekiwanego

identyfikowania problemów, których rozwiązanie jest możliwe niekoniecznie z udziałem symulacji.

5.3. DANE WYNIKOWE GENEROWANE PRZEZ MODEL RAMD

Jedną z zalet symulacji jest możliwość zapisu kompletnej, dokładnej i szczegółowej historii procesu symulacji. Jako wyniki eksperymentów uzyskujemy obszerne bazy danych, w których zawarty jest komplet informacji dokładnie opisujących stan systemu w kolejnych symulowanych momentach czasu. Na podstawie uzyskanych danych można wyznaczać wartości dowolnych wskaźników, rozkładów czy parametrów przyjętych jako kluczowe w ocenie funkcjonowania systemu.

Model RAMD generuje dwie bazy danych, zawierające kompletny zapis o wszystkich istotnych zdarzeniach mających miejsce w trakcie symulacji. Są to: baza PACJENT, w której przechowywane są informacje o pacjentach, usługobiorcach systemu mpd oraz baza ZESPÓŁ będąca odbiciem kart wyjazdowych zespołów ratunkowych rzeczywistych systemów pogotowia.

Tabela 5.1. prezentuje jeden przykładowy rekord bazy wynikowej PACJENT generowany przez model RAMD w procesie symulacji. Każdy rekord bazy PACJENT przechowuje informacje o jednym pacjencie i zawiera:

- dane osobowe pacjenta: wiek, płeć, adres,
- dane lokalizacyjne zgłoszenia (lokalizacja zgłoszenia nie musi pokrywać się z adresem zamieszkania pacjenta),
- dane czasowe: czas zaistnienia stanu nagłego, czas odebrania zgłoszenia, czas wyjazdu karetki, czas przyjazdu na miejsce, czas przekazania pacjenta jednostce leczącej, czas powrotu do bazy,
- dane diagnostyczne: kod zagrożenia, kod powodu wezwania, kod rozpoznania, konieczność hospitalizacji, stopień pilności przyznany zgłoszeniu,
- dane jednostki obsługującej: kod podstacji, kod oddziału, typ zespołu,
- dane o miejscu hospitalizacji: typ jednostki leczącej.

Tabela 5.1. Przykładowy rekord danych wynikowych bazy PACJENT – atrybuty jednego Zgłoszenia.

Powtórzenie	1	Numer powtórzenia
Numer	1	Kolejny numer zgłoszenia
Dzień SN	1	Dzień pojawienia się Stanu Nagłego
Typ dnia	DS	Dzień roboczy / świąteczny / wolna sobota
Godzina SN	2	Godzina pojawienia się stanu nagłego (w minutach)
Gmina	1	Numer gminy, w której pojawił się Stan Nagły
Kod gminy	93001	
Osiedle	59	Numer osiedla, w którym pojawił się Stan Nagły
Kod osiedla	58	
Adres	69	Adres pacjenta (numer osiedla)
Wiek	39	
Płeć	M	
Zagrożenie	1	Numer zagrożenia
Typ SN	Zwykły	Typ Stanu nagłego
Dzień ZG	1	Dzień pojawienia się Zgłoszenia
Godzina ZG	22	Godzina pojawienia się zgłoszenia (w minutach)
Podstacja ZG	1	Numer podstacji, do której zgłaszane jest wezwanie
Powód	1	Numer powodu wezwania
Rodzaj ZG	Wyp	Rodzaj zgłoszenia
Typ Zespołu	RKA	Typ obsługującego zespołu
Pilność	Rkowe	Stopień pilności obsługi
Oddział	9	Numer obsługującego oddziału
Kod Oddziału	O9	Kod obsługującego oddziału
Zespół	36	Numer obsługującego zespołu
Kod zespołu	R-4	Kod obsługującego zespołu
Dzień Wyj	1	Numer dnia, w którym nastąpił wyjazd
Godzina Wyj	37	Godzina, w której nastąpił wyjazd (w minutach)
Dzień Przy	1	Dzień przyjazdu na miejsce zgłoszenia
Godzina Przy	45	Godzina przyjazdu na miejsce zgłoszenia (w minutach)
Diagnoza	4	Numer postawionej diagnozy
Czas obsługi	17	Czas obsługi na miejscu
Szpital	T	Czy leczenie szpitalne?
Numer szpitala	2	
Kod szpitala	J210003	
Dzień Szp Wyj	1	Dzień wyjazdu do szpitala
Godzina Szp. Wyj.	62	Godzina wyjazdu do szpitala (w minutach)
Dzień Szp Przy	1	Dzień przyjazdu do szpitala
Godzina Szp Przy	75	Godzina przyjazdu do szpitala (w minutach)
Dzień Koniec	1	Dzień powrotu do oddziału
Godzina Przy	75	Godzina powrotu do oddziału (w minutach)

Każdy rekord bazy ZESPÓŁ zawiera historię jednego wyjazdu zespołu ratunkowego, a w szczególności:

- charakterystykę zespołu: kod zespołu, typ, oddział stacjonowania, typ maszyny,

- przebieg obsługi zlecenia: czas wyjazdu, przyjazdu do pacjenta, wyjazdu do szpitala, przekazania pacjenta jednostce leczącej,
- numer obsługiwanego pacjenta.

Tabela 5.2. prezentuje jeden przykładowy rekord bazy wynikowej ZESPÓŁ generowany przez model RAMD w procesie symulacji.

Tabela 5.2. Przykładowy rekord danych wynikowych bazy ZESPÓŁ– atrybuty jednego wyjazdu Zespołu do Zgłoszenia.

Powtórzenie	1	
Oddział	9	Oddział stacjonowania zespołu
Zespół	36	Numer zespołu
Kod zespołu	R-4	
Typ zespołu	RKA	
Typ maszyny	M2	Kod typu pojazdu
Strefa Obsługi	59	Strefa, do której wyjeżdża zespół
Strefa Szpitala	1	Strefa, w której zlokalizowany jest szpital gdzie przewożony jest pacjent
Strefa Kon	1	Strefa, w której kończy się obsługa pacjenta
Dzień Wyj	1	Dzień, w którym nastąpił wyjazd zespołu
Godzina Wyj	37	Godzina (w minutach), w której nastąpił wyjazd
Dzień Przy	1	Dzień, w którym nastąpił przyjazd na miejsce wezwania
Godzina Przy	45	Godzina (w minutach), w której nastąpił przyjazd na miejsce wezwania
Dzień Wyj Szp	1	Dzień, w którym nastąpił wyjazd do szpitala
Min Wyj Szp	62	Godzina (w minutach), w której nastąpił wyjazd do szpitala
Dzień Przy Szp	1	Dzień, w którym nastąpił przyjazd do szpitala
Min Przy Szp	75	Godzina (w minutach), w której nastąpił przyjazd do szpitala
Prędkość	1	Prędkość (kod), z jaką poruszała się karetka
Pacjent	1	Numer obsługiwanego pacjenta

Dane zawarte w bazach wynikowych PACJENT i ZESPÓŁ, uzyskane w kolejnych eksperymentach symulacyjnych, zostały poddane analizie za pomocą specjalnie do tego celu opracowanych skryptów – programów napisanych w języku relacyjnej bazy danych PARADOX 4.0. Działanie skryptów polegało na sekwencyjnym przeglądaniu rekordów w bazach PACJENT i ZESPÓŁ i przepisywaniu odpowiednich wartości (na przykład czasu oczekiwania pacjenta na przyjazd zespołu) do roboczych baz wynikowych. Bazy robocze były następnie eksportowane do EXCELA i tam poddawane dalszej analizie, której efektem jest graficzna prezentacja wyników przedstawiona w kolejnym rozdziale.

5.4. WYNIKI PRZYKŁADOWYCH EKSPERYMENTÓW SYMULACYJNYCH

Eksperymenty symulacyjne przeprowadzono dla kilku proponowanych zastosowań modelu symulacyjnego RAMD. Każdy eksperyment obejmował 5 powtórzeń o długości 31 dni, natomiast długość okresu rozgrzewania się systemu wynosiła jedną dobę. Należy zauważyć, że przedstawione wyniki mogą być traktowane jedynie jako ilustracja potencjalnych możliwości wykorzystania modelu symulacyjnego w zarządzaniu systemem ratownictwa medycznego. Dane uzyskane w wyniku przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych powinny być poddane odpowiedniej analizie statystycznej (zob.np. [109]) w celu uzyskania precyzyjnych oszacowań rzeczywistych charakterystyk systemu.

Eksperyment numer 0

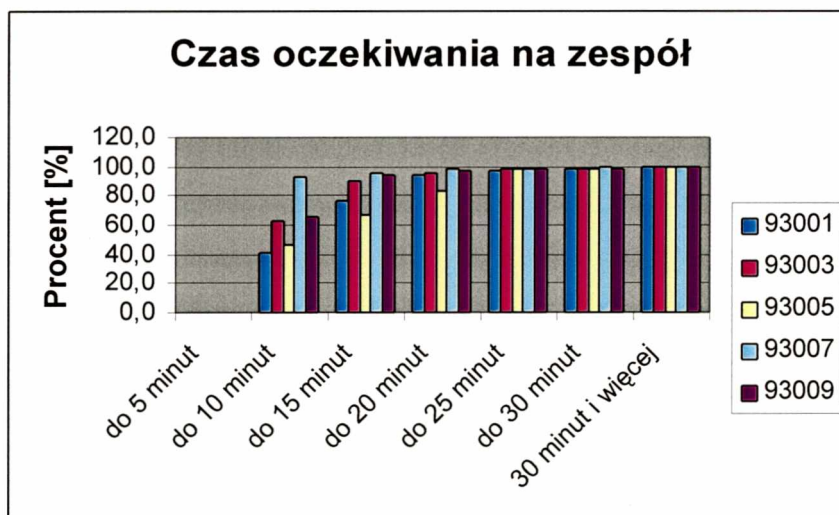
Eksperyment bazowy przeprowadzono dla podstawowego zestawu danych wejściowych. Wyznaczono średni czas oczekiwania pacjenta na przyjazd zespołu w poszczególnych gminach (por.tab.5.3), rozkład procentowy liczby zgłoszeń dla których czas oczekiwania mieścił się w zaznaczonych przedziałach minutowych (por.rys.5.1), obciążenie poszczególnych oddziałów i zespołów (por.rys.5.3 i 5.4), a także czas reakcji systemu dla zgłoszeń najpilniejszych (por.rys.5.5). Analiza wyników wskazuje, że najgorsze wartości wskaźników średniego czasu oczekiwania obserwuje się dla gmin 93001 i 93005 natomiast najlepsze dla gminy 93007 – por.tab.5.3. W gminie 93005 największy procent zgłoszeń (14,3%) oczekuje na przyjazd karetki od 20 do 25 minut (por.rys.5.1). Wykres dystrybuanty skumulowanej (por.rys.5.2) wskazuje z kolei na to, że w gminie tej najmniejszy procent zgłoszeń (66,8%) oczekuje na przyjazd zespołu do 15 minut.

Tabela 5.3. Eksperyment bazowy. Czas oczekiwania na przyjazd zespołu w gminach.

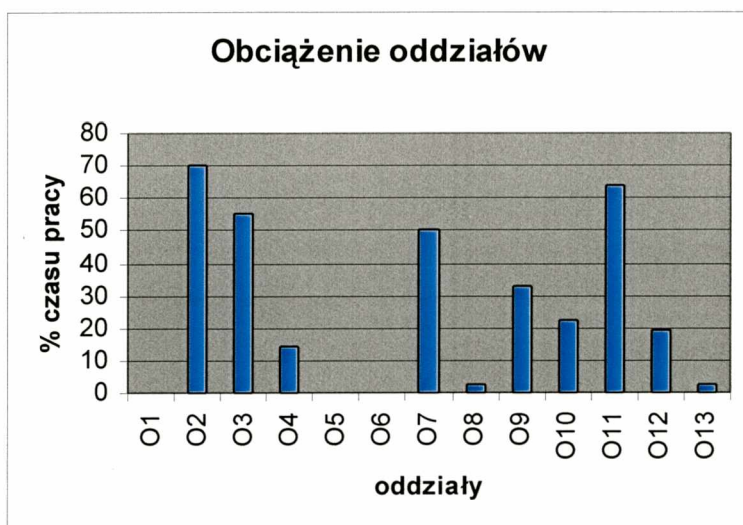
Gmina	Całkowita liczba zgłoszeń	Średni czas oczekiwania	Procent zgłoszeń czekających od...do....[min]:						
			0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	Powyżej 30
93001	738	12,0	0,0	41,2	35,8	17,1	3,2	0,8	1,8
93003	1195	10,9	0,0	63,1	27,0	6,0	1,5	0,8	1,7
93005	277	12,9	0,1	46,9	19,8	16,5	14,3	0,7	1,7
93007	501	9,0	0,0	92,3	3,7	2,3	0,4	0,4	0,9
93009	787	10,2	0,0	65,7	28,0	2,6	1,4	0,8	1,3



Rys.5.1. Eksperyment bazowy. Rozkład procentowy liczby zgłoszeń oczekujących na zespół w poszczególnych przedziałach minutowych.



Rys.5.2. Eksperyment bazowy. Dystrybuanta skumulowana – procent zgłoszeń z każdej gminy, do których zespół dotarł w ciągu X minut.

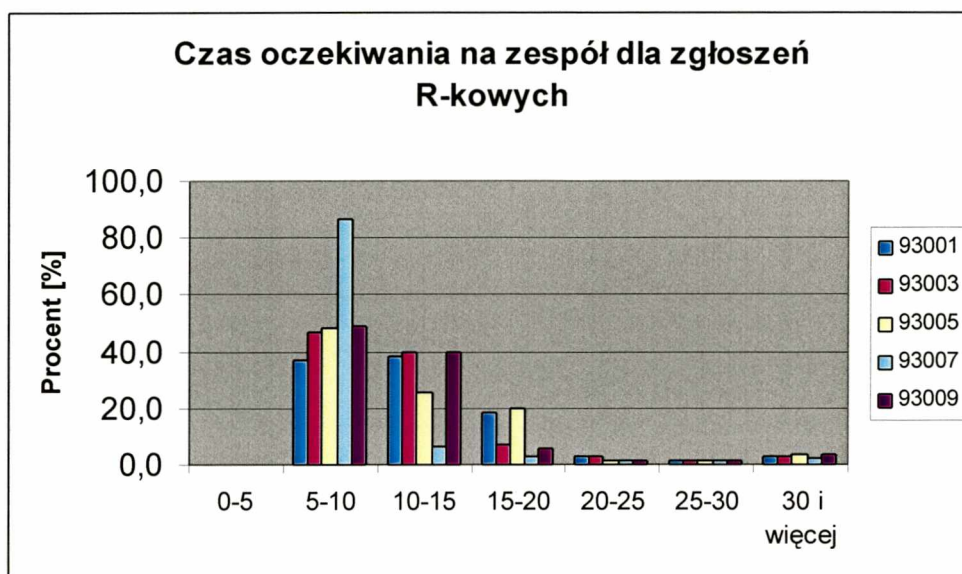


Rys.5.3. Eksperyment bazowy. Procentowe obciążenie poszczególnych oddziałów.

Analiza obciążenia poszczególnych oddziałów (por.rys.5.3) wskazuje na znaczne zróżnicowanie sumarycznego czasu pracy zespołów w poszczególnych jednostkach. Największe obciążenie wykazuje oddział O2 (oddział R-kowy z 2 zespołami), oddział O7 (oddział wypadkowo-chorobowy z 4 zespołami) oraz oddział O11 (oddział pediatryczny z 2 zespołami), natomiast najmniejsze obciążenie występuje w oddziale O8 (oddział wypadkowo-chorobowy z 4 zespołami), O4 (oddział pediatryczny z 1 zespołem) oraz O13 (oddział R-kowy z jednym zespołem). Analiza obciążenia zespołów (por.rys.5.4) również wykazuje znaczne zróżnicowanie czasu pracy zarówno wśród zespołów R-kowych jak wypadkowo-chorobowych.

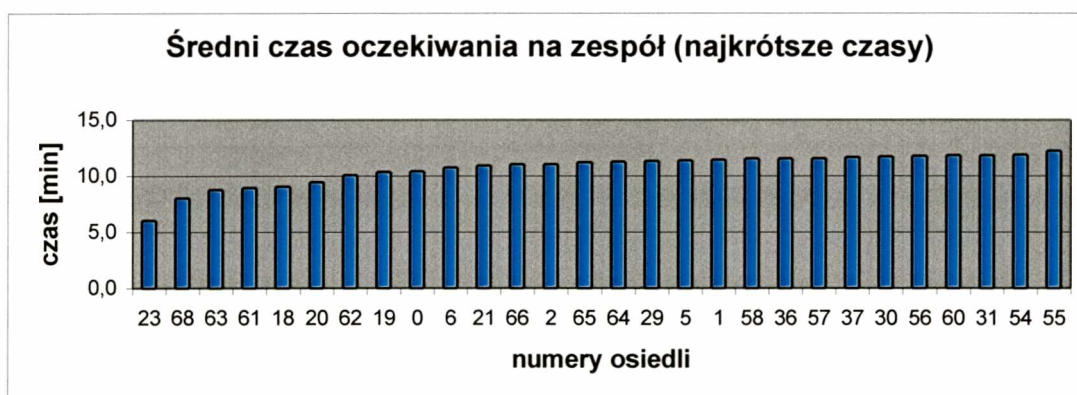


Rys.5.4. Eksperyment bazowy. Procentowe obciążenie poszczególnych zespołów.

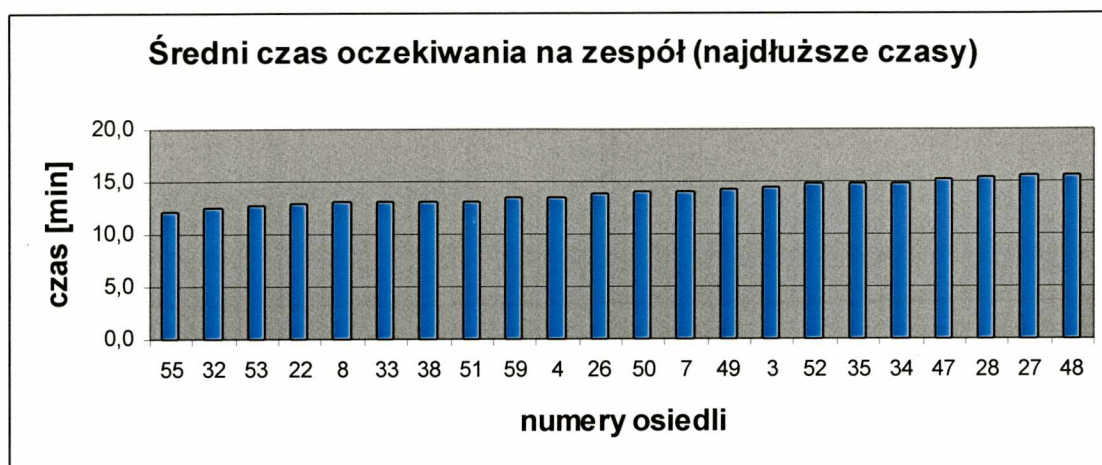


Rys.5.5. Eksperyment bazowy. Czas oczekiwania na zespół dla zgłoszeń R-kowych.

Czas oczekiwania wyliczony oddzielnie dla zgłoszeń R-kowych (por.rys.5.5) wykazuje, że pewna liczba zgłoszeń pilnych oczekiwała nawet 30 minut na przyjazd zespołu (około 3% dla wszystkich gmin). Najbardziej niekorzystne wskaźniki zanotowano dla gmin 93005 i 93001, w których około 20% zgłoszeń czekało na przyjazd karetki 15 do 20 minut.



Rys.5.6. Eksperyment bazowy. Średni czas oczekiwania na zespół w poszczególnych osiedlach. Zestawienie najkrótszych średnich czasów.



Rys.5.7. Eksperyment bazowy. Średni czas oczekiwania na zespół w poszczególnych osiedlach. Zestawienie najdłuższych średnich czasów.

Analiza średniego czasu oczekiwania na zespół w poszczególnych osiedlach (por.rys.5.6 i rys. 5.7) wykazuje, że najdłużej na przyjazd zespołu oczekują mieszkańcy osiedla numer 48 (15,6 min) a najkrócej mieszkańcy osiedla numer 23 (6 min). Osiedla, w których największy procent zgłoszeń oczekiwał na przyjazd zespołu od 20 do 25 minut to z kolei osiedla numer 34, 31 i 35 (por.tab.5.4).

Tabela 5.4. Eksperyment bazowy. Czas oczekiwania na przyjazd zespołu w osiedlach.

Osiedle	Całkowita liczba zgłoszeń	Średni czas oczekiwania	Procent zgłoszeń czekających od...do.....[min]:						
			0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	Powyżej 30
32	39	12,6	0,0	60,4	5,1	12,7	18,8	0,0	3,0
30	41	11,7	0,0	61,8	2,9	14,7	19,1	0,5	1,0
33	11	13,0	0,0	56,0	11,0	11,0	20,2	0,0	1,8
34	15	14,9	0,0	41,3	16,0	18,7	22,7	0,0	1,3
31	48	11,8	0,4	56,8	8,7	8,3	23,2	0,8	1,7
35	11	14,8	0,0	25,0	36,5	3,8	30,8	1,9	1,9

Osiedla o największej liczbie zgłoszeń (por.tab.5.5) to osiedla numer: 0, 19, 18, 1, 20.

Tabela 5.5. Eksperyment bazowy. Osiedla o największej zaobserwowanej liczbie zgłoszeń.

Osiedle	Całkowita liczba zgłoszeń	Średni czas oczekiwania	Procent zgłoszeń czekających od...do.....[min]:						
			0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	Powyżej 30
0	892,0	10,4	0,0	77,1	16,1	3,8	1,0	0,7	1,4
19	704,2	10,4	0,0	67,7	26,7	2,1	1,4	0,8	1,4
18	523,6	9,0	0,0	92,3	3,7	2,3	0,4	0,4	0,9
1	325,8	11,4	0,0	42,4	47,7	4,3	2,1	0,9	2,6
20	119,6	9,4	0,0	57,9	35,8	3,3	1,5	0,5	1,0

Eksperyment numer 1

Eksperyment 1 miał na celu znalezienie takiej alokacji zasobów, która poprawiłaby wskaźniki obsługi pacjentów w gminie 93005. Przeniesiono zatem jeden zespół ogólnowoypadkowy z oddziału O7 (obsługującego gminę 93007) do oddziału O8 (obsługującego gminę 93001 i 93005). Dotychczas zarówno w oddziale O7 jak i O8 stacjonowało po cztery zespoły ogólnowoypadkowe. Uzyskane wyniki (por.tab.5.6 i rys.5.8) wskazują na nieznaczną poprawę wskaźnika w gminie 93005 (liczba pacjentów czekających dłużej niż 15 minut na zespół spada z 33,2% do 31,6%), ale kosztem gminy 93007 (wskaźnik rośnie z 4,0% do 6,7% utrzymując się jednak ciągle na niskim poziomie). Poszukiwanie właściwego rozwiązania wymagałoby dalszych eksperymentów.

Tabela 5.6. Eksperyment nr 1. Czas oczekiwania na przyjazd zespołu po przeniesieniu jednego zespołu z oddziału O7, obsługującego gminę 93007 do oddziału O8, obsługującego gminę 93001 i 93005.

Gmina	Całkowita liczba zgłoszeń	Średni czas oczekiwania	Procent zgłoszeń czekających od...do.....[min]:						
			0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	Powyżej 30
93001	820	12,0	0,0	41,0	35,9	17,2	3,3	0,9	1,7
93003	1408	10,9	0,0	62,6	26,9	6,3	1,8	0,7	1,8
93005	279	12,6	0,1	47,9	19,7	15,6	14,2	0,7	1,8
93007	524	9,6	0,0	88,3	4,9	3,1	1,1	0,6	1,9
93009	846	11,1	0,1	61,4	29,0	2,9	2,7	1,2	2,7

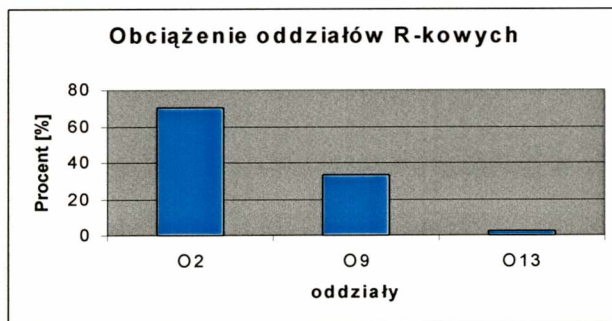


Rys.5.8. Rozkład procentowy liczby zgłoszeń oczekujących na zespół w poszczególnych przedziałach minutowych w eksperymencie nr 1.

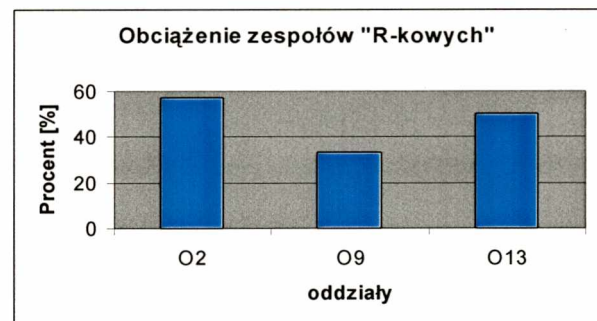
Eksperyment numer 2

Poszczególne oddziały i zespoły są bardzo nierównomiernie obciążone (por. rys. 5.3 i 5.4). Największe obciążenie wykazuje oddział O2 (oddział R-kowy z zespołami „R-1” i „R-2”) i O11 (oddział pediatryczny z zespołami „Z72” i „Z74”) a najmniejsze oddział O8 (zespoły „Z61”, „Z62”, „Z63” i „Z64”) i O13 (oddział R-kowy z zespołem „R-3”). Najbardziej obciążone zespoły to „R-1” z oddziału O2 i „Z72” z oddziału O11 a najslabiej - „Z62” z oddziału O8.

Celem kolejnego eksperymentu była reorganizacja przydziału stref obsługi poszczególnym oddziałom. Pod uwagę wzięto oddziały „R-kowe” (por. rys. 5.9) i przydzielono część stref (należących do gminy 93001) z dotychczasowego regionu oddziału O2 oddziałowi O13. Na rysunku 5.10 przedstawiono wykres przewidywanego obciążenia oddziałów po dokonaniu reorganizacji. Z wykresu wynika, że zmiana spowodowała wzrost obciążenia oddziału O13 przy jednoczesnym spadku obciążenia oddziału O2. Średni czas oczekiwania zgłoszeń pilnych na przyjazd zespołu nie pogorszył się (por. wykresy uśrednionych czasów oczekiwania dla wszystkich gmin – rys. 5.11 i 5.12 oraz dane w tabeli 5.7, w której zestawiono rozkład czasów oczekiwania zgłoszeń pilnych dla gminy 93001).



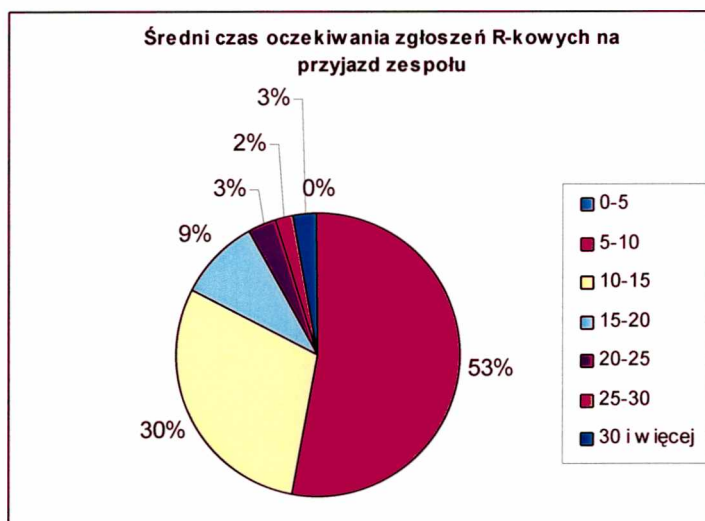
Rys.5.9. Procentowe obciążenie oddziałów „R-kowych” przed reorganizacją.



Rys.5.10. Procentowe obciążenie oddziałów „R-kowych” po reorganizacji podziału regionu stref obsługi.



Rys.5.11. Średni czas oczekiwania zgłoszeń R-kowych na przyjazd zespołu przed reorganizacją stref. Dane uśrednione dla wszystkich gmin.



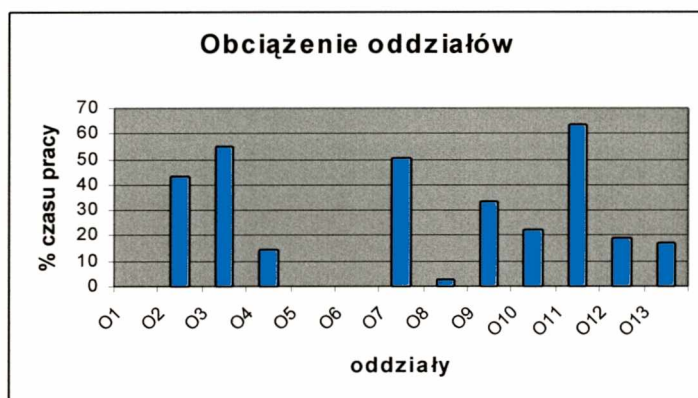
Rys.5.12. Średni czas oczekiwania zgłoszeń R-kowych na przyjazd zespołu po reorganizacji stref. Dane uśrednione dla wszystkich gmin.

Tabela 5.7. Eksperyment nr 2. Czas oczekiwania zgłoszeń „R-kowych” na przyjazd zespołu po reorganizacji stref polegającej na zwiększeniu regionu obsługiwanego przez oddział O13 o kilka stref gminy 93001 będących dotychczas pod opieką oddziału O2.

Gmina	Całkowita liczba zgłoszeń	Średni czas oczekiwania	Procent zgłoszeń czekających od...do.....[min]:							
			0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	Powyżej 30	
93001- przed reorganizacją	214	12,6	0,0	36,6	37,9	18,3	2,9	1,3	2,9	
93001 – po reorganizacji	214	13,4	0,0	34,1	33,9	19,9	6,0	2,8	3,3	

Eksperyment numer 3

Analiza obciążenia zespołów wskazuje na znaczne przeciążenie zespołów R-kowych stacjonujących w oddziale O2. Eksperyment symulacyjny pozwolił zbadać jak zmieni się obciążenie w przypadku zwiększenia liczby zespołów R-kowych w tym oddziale z dwóch do trzech – por.rys.5.13 i 5.14. Uzyskane wyniki wskazują, że nawet po zwiększeniu liczby zespołów w oddziale O2 obciążenie będzie tam nadal wysokie, natomiast średni czas oczekiwania zgłoszenia pilnego na przyjazd zespołu poprawił się (por.rys.5.15) z 10,0 min na 11,3 min (liczony dla wszystkich gmin). Analiza rozkładu procentowego liczby zgłoszeń oczekujących na zespół, podanych w poszczególnych przedziałach minutowych, również wskazuje na wzrost liczby zgłoszeń, do których karetka przyjechała szybko. W przedziale minutowym od 5 do 10 min nastąpił wzrost z 51,4% do 61,5 (por.rys.5.15), natomiast w przedziałach od 20-25 min, od 25-30 min oraz w przedziale powyżej 30 minut nastąpił spadek odpowiednio: z 2,0% do 1,1%, z 1,4% do 0,5% oraz z 2,9% do 1,1% (por.tab.5.8).



Rys.5.13. Procentowe obciążenie poszczególnych oddziałów po zwiększeniu liczby zespołów w oddziale O2 z dwóch do trzech.



Rys.5.14. Procentowe obciążenie poszczególnych zespołów po zwiększeniu liczby karetek w oddziale O2 z dwóch do trzech.



Rys.5.15. Rozkład procentowy liczby zgłoszeń oczekujących na zespół w poszczególnych przedziałach minutowych w eksperymencie nr 3. Dane dla zgłoszeń pilnych, uśrednione dla wszystkich gmin.

Tabela 5.8. Eksperyment nr 3. Czas oczekiwania zgłoszeń „R-kowych” na przyjazd zespołu po zwiększeniu liczby zespołów w oddziale „R-kowym” O2. Dane dla zgłoszeń pilnych, uśrednione dla wszystkich gmin.

	Całkowita liczba zgłoszeń	Średni czas oczekiwania	Procent zgłoszeń czekających od...do.....[min]:							
			0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	Powyżej 30	
Przed zmianą liczby zespołów w O2	950	11,3	0,1	51,4	32,8	9,6	2,0	1,4	2,9	
Po zmianie liczby zespołów w O2	950	10,0	0,0	61,5	28,7	7,1	1,1	0,5	1,1	

Eksperyment numer 4

Rozważono hipotetyczną sytuację nagłego wzrostu intensywności zgłoszeń w jednej ze stref w centrum miasta, spowodowaną na przykład wypadkiem tramwajowym, pożarem budynku czy inną katastrofą masową. Analizie poddano wskaźnik średniego czasu oczekiwania na przyjazd karetki, wskaźnik ilości zgłoszeń, które musiałyby czekać na zespół dłużej niż 10 minut oraz rozkład czasu oczekiwania na przyjazd zespołu. Wyniki przedstawia tabela 5.9 oraz rys. 5.16. Uzyskane wartości wskaźników wskazują na znaczne pogorszenie czasu reakcji systemu i zbyt długi czas dotarcia kwalifikowanej pomocy lekarskiej do chorego (z 10,2 min do 55,6 min). Procent zgłoszeń czekających na przyjazd zespołu wzrósł z 24,3% do 67%.

Tabela 5.9. Średni czas oczekiwania na zespół i procent zgłoszeń czekających na przyjazd karetki dłużej niż 10 minut.

Gmina 93009, dzień roboczy w godzinach 14:00-15:00.

Sytuacja bazowa		Zwiększona intensywność z 2 zgł/godz do 20 zgł/godz	
Średni czas oczekiwania [min]	10,2	Średni czas oczekiwania [min]	55,6
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 10 minut [%]	24,3	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 10 minut [%]	67



Rys.5.16. Rozkład procentowy czasu oczekiwania na przyjazd zespołu w przypadku zwiększonej intensywności zgłoszeń. Gmina 93009, dzień roboczy w godzinach 14:00 do 15:00.

Eksperyment numer 5

Wyodrębniono numery osiedli o najwyższej liczbie zgłoszeń (są to, por.tab.5.10, osiedla numer: 0, 19, 18, 1, 20, 2, 57 i 58) i porównano je z numerami osiedli, w których zlokalizowane są oddziały mpd. W większości przypadków oddziały usytuowane są na obszarach o zwiększonej intensywności wezwań (osiedla 0, 18, 19 i 67). Wyjątkiem są osiedla 57 i 58. Zbadano zatem hipotetyczną sytuację, w której powstają dwa nowe oddziały O14 i O15 zlokalizowane w strefie 57 i obsługujące osiedla 55 do 58. Średnie czasy obsługi zgłoszeń w poszczególnych gminach, w sytuacji kiedy dodatkowo funkcjonują dwa nowe oddziały, przedstawia tabela 5.11. Porównanie danych liczbowych z sytuacją bazową (por.tab.5.3) wskazuje na nieznaczną poprawę wskaźników dla gminy 93005, charakteryzującej się najgorszym poziomem usług. Średni czas oczekiwania w tej gminie spadł z 12,9 min do 12,5 min, natomiast procent zgłoszeń oczekujących na przyjazd karetki od 20 do 25 minut spadł z 14,3% do 12,6%.

Tabela 5.10. Osiedla o największej zaobserwowanej liczbie zgłoszeń.

Osiedle	Całkowita liczba zgłoszeń	Średni czas oczekiwania	Procent zgłoszeń czekających od...do.....[min]:						
			0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	Powyżej 30
0	892,0	10,4	0,0	77,1	16,1	3,8	1,0	0,7	1,4
19	704,2	10,4	0,0	67,7	26,7	2,1	1,4	0,8	1,4
18	523,6	9,0	0,0	92,3	3,7	2,3	0,4	0,4	0,9
1	325,8	11,4	0,0	42,4	47,7	4,3	2,1	0,9	2,6
20	119,6	9,4	0,0	57,9	35,8	3,3	1,5	0,5	1,0
2	116,6	11,0	0,0	39,1	52,7	3,9	1,5	1,2	1,5
57	93,8	11,5	0,0	31,1	62,3	2,8	1,3	0,6	1,9
58	85,2	11,5	0,0	32,9	52,1	12,4	0,2	1,4	0,9

Tabela 5.11. Czas oczekiwania na przyjazd zespołu w gminach po dodaniu dwóch nowych oddziałów....

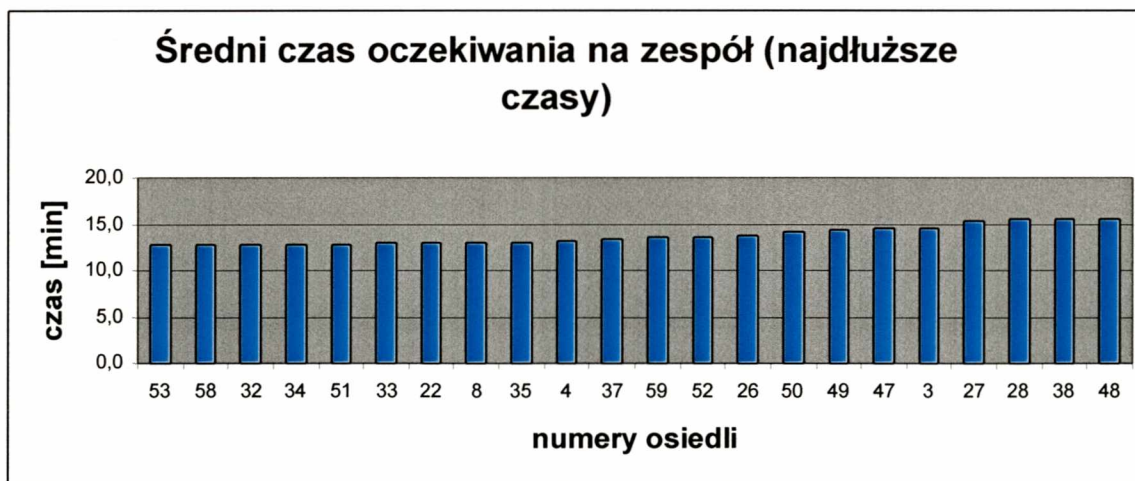
Gmina	Całkowita liczba zgłoszeń	Średni czas oczekiwania	Procent zgłoszeń czekających od...do.....[min]:						
			0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	Powyżej 30
93001	820	12,1	0,0	42,8	34,8	15,2	3,9	1,0	2,3
93003	1408	10,9	0,0	63,1	26,8	5,8	1,7	0,8	1,7
93005	279	12,5	0,1	48,6	19,9	16,5	12,6	0,6	1,8
93007	524	9,1	0,0	92,5	3,5	2,1	0,4	0,4	1,1
93009	846	10,2	0,0	65,4	28,3	2,6	1,5	0,8	1,3

Eksperyment numer 6

Założenia eksperymentu numer 6 są podobne do założeń eksperymentu numer 5, z tym że nowy oddział utworzono nie w strefie o najwyższej intensywności zgłoszeń ale w strefie, dla której zanotowano najwyższy procent zgłoszeń oczekujących na obsługę od 20 do 25 minut (osiedla od 31 do 35, por.tab.5.4). Wyniki eksperymentu przedstawia tabela 5.12 oraz rys.5.17. Analiza uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, że szybkość obsługi w wymienionych strefach ulega poprawie, chociaż wartości badanych wskaźników są jeszcze dalekie od idealnych.

Tabela 5.12. Czas oczekiwania na przyjazd zespołu w osiedlach po utworzeniu oddziału w strefie 31.

Osiedle	Całkowita liczba zgłoszeń	Średni czas oczekiwania	Procent zgłoszeń czekających od...do.....[min]:						
			0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	Powyżej 30
32	39,4	12,7	0,0	59,4	5,1	12,7	19,8	0,0	3,0
30	40,8	11,6	0,0	62,7	2,9	14,7	18,1	0,5	1,0
33	21,8	12,9	0,0	56,0	11,0	11,9	19,3	0,0	1,8
34	15	12,7	0,0	52,0	17,3	21,3	8,0	0,0	1,3
31	48,2	11,8	0,4	57,7	8,3	8,3	22,8	0,4	2,1
35	10,4	13,0	0,0	28,8	53,8	3,8	9,6	1,9	1,9



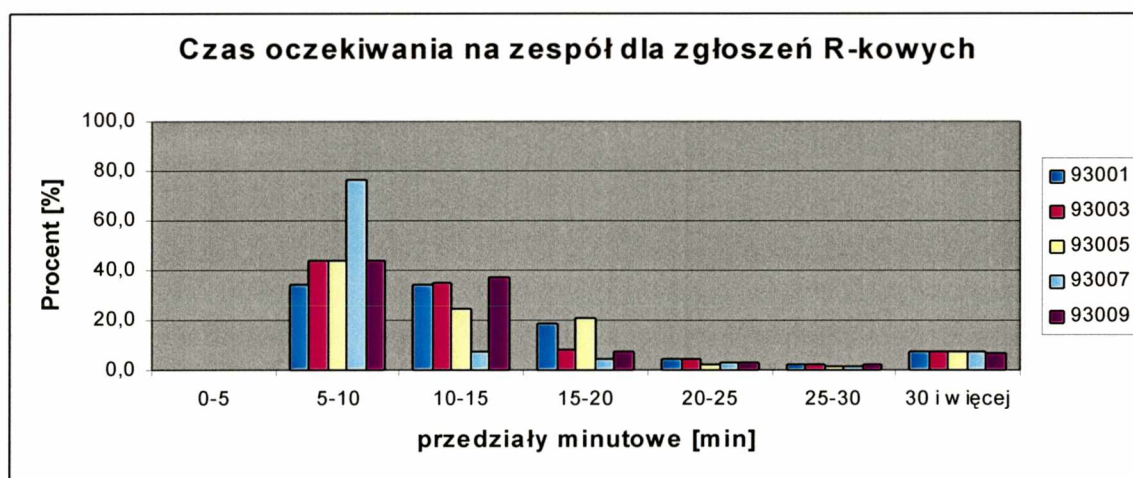
Rys.5.17. Średni czas oczekiwania na zespół w poszczególnych osiedlach po utworzeniu oddziału w strefie 31. Zestawienie najdłuższych średnich czasów.

Eksperyment numer 7

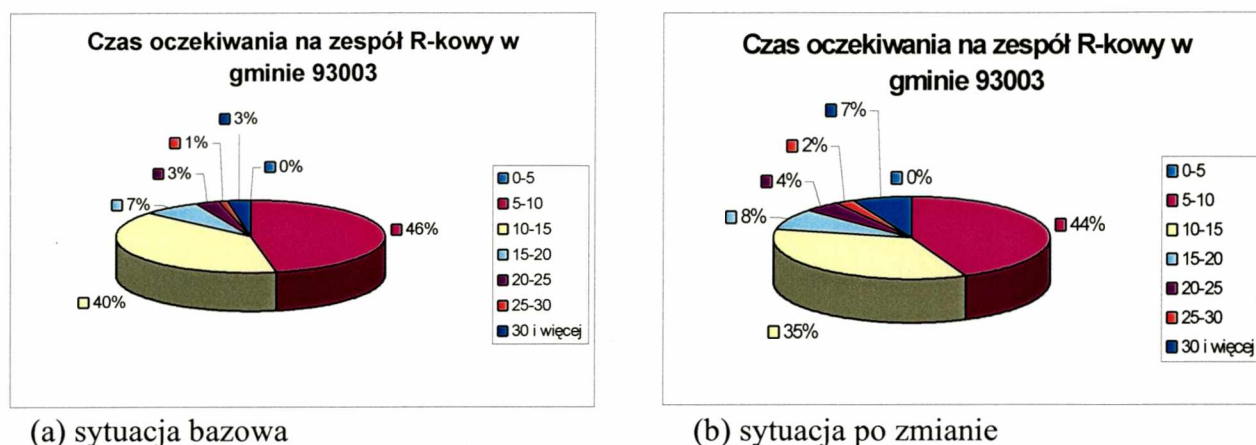
W kolejnym eksperymencie zbadano czas reakcji systemu w przypadku zwiększenia o około 30% udziału zgłoszeń rzeczywiście pilnych (tzw. „R”-kowych) w globalnej strukturze wezwań. Intensywność napływania zgłoszeń do systemu nie uległa zmianie. Uzyskane wyniki pokazują, że średni czas reakcji systemu pogorszył się w każdej gminie, por.tab.5.13. Powodem jest niska liczba zespołów „R-kowych”, które w przypadku wzrostu liczby przypadków nagłych stają się bardziej obciążone. Czas reakcji systemu liczony oddzielnie dla grupy zgłoszeń pilnych (por.rys.5.18) wykazuje znaczne pogorszenie jakości usług. Przykładowo procent zgłoszeń pilnych oczekujących na przyjazd karetki od 20 do 25 minut zwiększył się dla gminy 93001 z 2,9% do 4,1%, dla gminy 93003 z 2,6% do 4,4%, dla gminy 93005 z 1,2% do 2,3%, dla gminy 93007 z 1,2% do 3,2% i dla gminy 93009 z 1,3% do 2,9%.

Tabela 5.13. Czas oczekiwania na przyjazd zespołu w gminach po zwiększeniu udziału zgłoszeń „R”-kowych w globalnej liczbie zgłoszeń z danej gminy. Intensywność napływania zgłoszeń nie uległa zmianie.

Gmina	Całkowita liczba zgłoszeń	Średni czas oczekiwania – przed zmianą	Średni czas oczekiwania	Procent zgłoszeń czekających od...do.....[min]:						
				0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	Powyżej 30
93001	820	12,0	13,0	0,0	39,5	35,0	17,4	3,2	1,2	3,8
93003	1408	10,9	11,6	0,0	59,3	28,5	6,2	2,1	0,9	3,1
93005	279	12,9	13,1	0,1	45,6	21,5	17,9	10,3	0,9	3,5
93007	524	9,0	10,4	0,0	87,5	4,2	3,0	1,4	0,7	3,1
93009	846	10,2	11,4	0,1	60,4	29,1	3,8	2,1	1,1	3,4



Rys.5.18. Czas oczekiwania na zespół dla zgłoszeń R-kowych po zwiększeniu udziału zgłoszeń pilnych w globalnej liczbie zgłoszeń z danej gminy. Intensywność napływania zgłoszeń nie uległa zmianie.



Rys.5.19. Czas oczekiwania na zespół „R” w gminie 93003 przed (a) i po (b) zwiększeniu udziału zgłoszeń pilnych w globalnej strukturze wezwań.

Wykres 5.19 część (a) i (b) wskazuje na wyraźne zwiększenie czasu oczekiwania zgłoszeń pilnych na przyjazd karetki. O ile w sytuacji bazowej 86,4% zgłoszeń pilnych oczekiwało do 15 minut na przyjazd karetki, o tyle po zwiększeniu liczby przypadków R-kowych wspomniany wskaźnik spada do 78,4%.

Eksperyment numer 8

Zbadano hipotetyczną sytuację wzrostu całkowitej liczby zgłoszeń napływających do systemu. Wartości parametrów strumienia intensywności zgłoszeń zwiększono o 10 % (por.tab.5.15) oraz o 100% (por.tab.5.14). Uzyskane wyniki potwierdzają zasadność modelu. Średnie czasy oczekiwania wydłużają się oraz wzrasta procent zgłoszeń czekających na przyjazd zespołu dłużej niż 15 minut. Analiza danych pokazuje, że największe problemy ze zwiększoną intensywnością zgłoszeń miałyby gminy 93003. Hipotetyczny wzrost liczby zgłoszeń o 100% spowodowałby w tej gminie zwiększenie procentu zgłoszeń czekających na przyjazd karetki dłużej niż 15 minut z 10,0% do 20,1% i wydłużenie średniego czasu oczekiwania z 10,9 min do 14,9 min (wzrost o 37%). Dane uzyskane przy niewielkim, 10-cio procentowym wzroście intensywności napływania zgłoszeń także wskazują na szczególnie niekorzystną sytuację w gminie 93003. Procent zgłoszeń czekających na przyjazd karetki dłużej niż 15 minut wzrósł z 10,0% do 10,4% a średni czas oczekiwania wydłużył się z 10,9 min do 11,2 min (wzrost o 2,7%).

Tabela 5.14. Średni czas oczekiwania na zespół i procent zgłoszeń czekających na przyjazd karetki dłużej niż 15 minut. Intensywność zwiększona o 100%.

Sytuacja bazowa, gmina 93001		Zwiększona intensywność	
Średni czas oczekiwania [min]	12,0	Średni czas oczekiwania [min]	14,3
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	27,0	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	30,0
Sytuacja bazowa, gmina 93003		Zwiększona intensywność	
Średni czas oczekiwania [min]	10,9	Średni czas oczekiwania [min]	14,9
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	10,0	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	20,1
Sytuacja bazowa, gmina 93005		Zwiększona intensywność	
Średni czas oczekiwania [min]	12,7	Średni czas oczekiwania [min]	13,8
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	33,2	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	36,4
Sytuacja bazowa, gmina 93007		Zwiększona intensywność	
Średni czas oczekiwania [min]	9,0	Średni czas oczekiwania [min]	11,4
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	4,0	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	12,0
Sytuacja bazowa, gmina 93009		Zwiększona intensywność	
Średni czas oczekiwania [min]	10,2	Średni czas oczekiwania [min]	12,7
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	6,2	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	13,8

Tabela 5.15. Średni czas oczekiwania na zespół i procent zgłoszeń czekających na przyjazd karetki dłużej niż 15 minut. Intensywność zwiększona o 10%.

Sytuacja bazowa, gmina 93001		Zwiększona intensywność	
Średni czas oczekiwania [min]	12,0	Średni czas oczekiwania [min]	11,9
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	23,0	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	22,9
Sytuacja bazowa, gmina 93003		Zwiększona intensywność	
Średni czas oczekiwania [min]	10,9	Średni czas oczekiwania [min]	11,2
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	10,0	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	10,4
Sytuacja bazowa, gmina 93005		Zwiększona intensywność	
Średni czas oczekiwania [min]	12,7	Średni czas oczekiwania [min]	12,8
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	33,2	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	32,7
Sytuacja bazowa, gmina 93007		Zwiększona intensywność	
Średni czas oczekiwania [min]	9,0	Średni czas oczekiwania [min]	9,0
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	4,0	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	4,4
Sytuacja bazowa, gmina 93009		Zwiększona intensywność	
Średni czas oczekiwania [min]	10,2	Średni czas oczekiwania [min]	10,1
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	6,2	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	6,0

Eksperyment numer 9

Kolejny eksperyment miał na celu taką modyfikację harmonogramu pracy zespołów wyjazdowych, aby uwzględnić fluktuacje w poziomie intensywności napływania zgłoszeń do oddziałów. Do analizy wybrano dwa oddziały o największym obciążeniu (por.rys.5.3), tj. oddział „R”-kowy O2 z dwoma zespołami oraz oddział wypadkowo-chorobowy O3 z trzema zespołami. Wyznaczono średnie natężenie zgłoszeń obsługiwanych przez wymienione oddziały w poszczególnych godzinach doby (por.rys.5.20 i 5.21). W obu przypadkach można wyraźnie wskazać dwa różniące się okresy: od godziny 24:00 do 8:00 (okres o niższym średnim poziomie intensywności napływania zgłoszeń) oraz od godziny 8:00 do 24:00 (okres o wyższej średniej liczbie zgłoszeń).



Rys.5.20. Średnia liczba zgłoszeń obsługiwanych w oddziale O2 w poszczególnych godzinach doby.

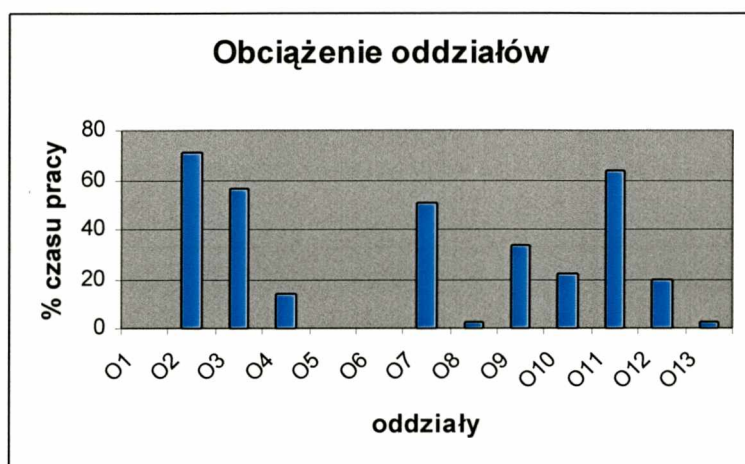


Rys.5.21. Średnia liczba zgłoszeń obsługiwanych w oddziale O3 w poszczególnych godzinach doby.

Biorąc pod uwagę fakt występowania dwóch różniących się okresów intensywności strumienia zgłoszeń, zaproponowano inny harmonogram pracy zespołów w oddziałach O2 i O3. W sytuacji bazowej, wszystkie zespoły w obu oddziałach były zawsze dostępne przez całą dobę. W nowym harmonogramie pracy skrócono czas pracy jednego zespołu zarówno w oddziale O2 jak i O3 do godzin od 8:00 do 24:00. Czas pracy pozostałych zespołów nie zmienił się i obejmował całą dobę. Wyniki eksperymentu przedstawia tabela 5.16. Porównano wartości dwóch wskaźników: średniego czasu oczekiwania na zespół i procentu zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut w sytuacji przed i po zmianie harmonogramu pracy zespołów. Wprowadzona zmiana nie spowodowała pogorszenia się jakości obsługi w żadnej gminie. Również obciążenie oddziałów nie zmieniło się w sposób istotny (por. rys. 5.3 i 5.22). W oddziale O2 przed zmianą obciążenie wynosiło 70% a w oddziale O3 55%, natomiast po zmianie wartość tego wskaźnika wynosiła odpowiednio dla oddziału O2 - 71% a dla O3 - 56%. Uzyskane wyniki świadczą o tym, że zmiana w harmonogramie pracy zespołów nie pogorszyła jakości usług (mierzonej czasem reakcji systemu).

Tabela 5.16. Średni czas oczekiwania na zespół i procent zgłoszeń czekających na przyjazd karetki dłużej niż 15 minut.

Sytuacja bazowa, gmina 93001		Zmiana godzin pracy w O2 i O3	
Średni czas oczekiwania [min]	12,0	Średni czas oczekiwania [min]	12,1
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	23,0	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	23,8
Sytuacja bazowa, gmina 93003		Zmiana godzin pracy w O2 i O3	
Średni czas oczekiwania [min]	10,9	Średni czas oczekiwania [min]	11,0
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	10,0	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	10,8
Sytuacja bazowa, gmina 93005		Zmiana godzin pracy w O2 i O3	
Średni czas oczekiwania [min]	12,7	Średni czas oczekiwania [min]	12,6
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	33,2	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	32,7
Sytuacja bazowa, gmina 93007		Zmiana godzin pracy w O2 i O3	
Średni czas oczekiwania [min]	9,0	Średni czas oczekiwania [min]	9,1
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	4,0	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	4,1
Sytuacja bazowa, gmina 93009		Zmiana godzin pracy w O2 i O3	
Średni czas oczekiwania [min]	10,2	Średni czas oczekiwania [min]	10,4
Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	6,2	Procent zgłoszeń czekających na karetkę dłużej niż 15 minut [%]	7,0



Rys.5.22. Obciążenie poszczególnych oddziałów po wprowadzeniu zmian do harmonogramu pracy zespołów w O2 i O3.

Przeprowadzone eksperymenty ilustrują tylko niektóre z możliwych kierunków zastosowań symulacji komputerowej do wspomagania procesów decyzyjnych w systemie ratownictwa medycznego. Rozbudowa modelu o, na przykład, bardziej szczegółowe moduły symulacji typów zachorowań, diagnoz, przyczyn hospitalizacji i miejsc odwozu medycznego pozwoliłaby rozszerzyć badania również na aspekty związane z kryteriami segregacji pacjentów i wyboru szpitalnego oddziału ratunkowego. Kolejnym etapem powinna być również próba wprowadzenia do modelu danych kosztowych, co pozwoliłoby na prowadzenie symulacyjnych analiz finansowych. Warunkiem koniecznym wprowadzenia dalszych założeń jest jednak budowa zasadnego modelu symulacyjnego struktury, zdarzeń i procesów systemu ratownictwa medycznego o czym traktuje niniejsza praca.

PODSUMOWANIE

W zaprezentowanej pracy omówiono metodykę budowy symulacyjnych modeli komputerowych przeznaczonych do wspomagania procesów decyzyjnych w systemach ratownictwa medycznego. Zreferowano, na podstawie przeglądu literatury przedmiotu, zakres i sposób modelowania systemów mpd szczególną uwagę zwracając na modele wykorzystujące techniki symulacyjne. Wyróżniono podstawowy kontekst modelowania, opisano rodzaje mierników oceny skuteczności działania systemów, wskazano najważniejsze problemy decyzyjne z zakresu zarządzania będące przedmiotem analizy w prowadzonych pracach badawczych. Analizie porównawczej poddano modele symulacyjne systemów ratownictwa medycznego: zidentyfikowano systemy rzeczywiste, wyróżniono główne problemy decyzyjne, omówiono założenia leżące u podstaw budowanych modeli, opisano główne grupy danych wejściowych i sposób definiowania rozkładów prawdopodobieństw, przedstawiono najczęściej stosowane kryteria oceny skuteczności działania systemów, scharakteryzowano wykorzystywane modele przemieszczania się karettek oraz zreferowano przebieg procesów weryfikacji i walidacji modeli symulacyjnych.

W głównej części pracy zaprezentowano metodykę budowy modelu symulacyjnego systemu ratownictwa medycznego na przykładzie opisu procesu opracowywania modelu symulacyjnego RAMD regionalnego systemu mpd. Przedstawiono procedurę definiowania atrybutów systemu, zaproponowano sposób wykorzystania algorytmu symulacji stochastycznej według rozkładów zmiennych losowych ze zmiennymi parametrami do modelowania procesu intensywności strumienia napływania zgłoszeń do oddziałów mpd, opracowano i przedstawiono własny model analityczny przemieszczania się karettek wykorzystując algorytm sieciowy Floyd'a. W kolejnych rozdziałach zaprezentowano model konceptualny oraz formalny regionalnego systemu mpd oraz omówiono założenia programu symulacyjnego napisanego w języku Borland Delphi 4.0.

Dużo uwagi poświęcono analizie zasadności modelu symulacyjnego. Zaproponowano i omówiono algorytmy eliminacji wpływu warunków początkowych oraz doboru liczby przebiegów symulacyjnych. Proces weryfikacji i walidacji modelu przeprowadzono zgodnie z proponowaną przez T. Naylora trójstopniową analizą zasadności koncentrując się na drugim i trzecim etapie wspomnianej analizy, tj. na empirycznym testowaniu założeń oraz na ocenie poprawności danych wyjściowych modelu. Zaprezentowano przebieg wykonania kilku algorytmów walidacyjnych.

W końcowym rozdziale pracy omówiono potencjalne kierunki zastosowań modelu symulacyjnego w zarządzaniu systemem ratownictwa medycznego. Przedstawiono wyniki dziesięciu przykładowych eksperymentów symulacyjnych wraz z interpretacją graficzną.

Wyniki uzyskane w trakcie przeprowadzonych badań pozwalają na stwierdzenie, że zaprezentowana w rozprawie metodyka budowy modeli symulacyjnych systemów ratownictwa medycznego może być wykorzystana do budowy użytecznych narzędzi ułatwiających podejmowanie decyzji nie-klinicznych na różnych szczeblach zarządzania systemem mpd. Opracowana metodyka pozwala na rozwiązanie niektórych istotnych zagadnień związanych z zastosowaniem symulacji stochastycznej do budowy modeli systemów ratownictwa medycznego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Abdel-Malek L.L., Optimum Positioning of Moving Service Facility, *Comput.&Ops. Res.* Vol.12, No.5, pp.437-444, 1985
- [2] Achabal D.D., The Development of a Spatial Delivery System for Emergency Medical Services, *Geographical Analysis*, Vol.10, No.1, 1978
- [3] Ahituv N., Berman O, Devising a Cooperation Policy for Emergency Networks, *J.Opl. Res. Soc.* Vol.38, No.11, pp.1015-1029, 1987
- [4] Alloway James A. Jr ., Haddock J., Simulation Addresses the Special Needs of Rural Emergency Service Systems, *Dep.of Dec.Sc.and Eng.Systems*, Technical Report No 37-87-111, May 1987
- [5] Alloway James A. Jr ., Haddock J., Simulation, Skill Retention and Rural Emergency Medical Service Systems, *Simulation V*, 1988
- [6] Alvarez A.M., Centeno M.A., Enhancing Simulation Models for Emergency Rooms Using VBA, w: *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, ed. P.A.Farrington, H.B.Nembhard, D.T.Sturrock, D.W.Evans, pp.1685-1693,1999
- [7] Arthur J.D., Verification, Validation & Accreditation: Disciplines in Dialogue or Can we Learn from the Experiences of Others?, in: *Proceedings of 1997 Winter Simulation Conference* ed. S.Andradottir, K.J. Healy, D.H.Winters, B.L.Nelson, pp.489-496, 1997
- [8] Arthur J.D., Nance R.E., Independent Verification and Validation: a Missing Link in Simulation Methodology?, in: *Proceedings of 1996 Winter Simulation Conference*, ed. J.M. Charnes, D.J. Morrice, D.T. Brunner and J.J.Swain, pp. 230-236, 1996
- [9] Baker J.R., Fitzpatrick K.E., Determination of an Optimal Forecast Model for Ambulance Demand Using Goal Programming, *J.Opl.Res.Soc.*, Vol.37, No.11, pp.1047-1059, 1986
- [10] Balci O., Principles and Techniques of Simulation Validation, Verification and Testing, in: *Proceedings of 1995 Winter Simulation Conference*, 1992, pp. ed. C. Alexopoulos, K.Kang, W.R. Lilegdon, D.Goldsman, IEEE Piscataway, New Jersey, pp. 147-154,1995
- [11] Balci O., Validation, Verification and Testing Techniques throughout the Life Cycle of Simulation Study, in: *Proceedings of 1994 Winter Simulation Conference*, ed. J.D. Tew, S. Manivannan, D.A. Sadowski, A.F. Seila, Baltimore: Association of Computing Machinery, pp. 215-220, 1994

- [12] Balci O., Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models, , in: Proceedings of 1997 Winter Simulation Conference ed. S.Andradottir, K.J. Healy, D.H.Winters, B.L.Nelson, pp.135-141, 1997
- [13] Balci O., Verification, Validation and Accreditation, in: Proceedings of 1998 Winter Simulation Conference ed. D.J.Medeiros, E.F. Watson, J.S.Carson, M.S.Manivannan, pp.41-48,1998
- [14] Ball M.O., Feng L.L, A Reliability Model Applied to Emergency Service Vehicle Location, Operations Research, Vol.41, No.1, 1993
- [15] Baker J.R.,Clayton E.R., Taylor B.W., A Non-linear Multi-criteria Programming Approach for Determining County Emergency Medical Service Ambulance Allocations ,J.Opl.Res.Soc. Vol.40, No. 5, pp.423-432, 1989
- [16] Baker D.W., Byrd J. , Jr, A Lesson in Timing: a Nonemergency Solution to an Emergency Service Decision, Interfaces, Vol.10, No.3, 1980
- [17] Barnes C.D., Benson C., Quiason J.L., McGuinness D., Success Stories in Simulation in Health Care, in: Proceedings of 1997 Winter Simulation Conference ed. S.Andradottir, K.J. Healy, D.H.Winters, B.L.Nelson, pp. 1280-1285, 1997
- [18] Batta R., Mannur N.R., Covering-location Models for Emergency Situations that Require Multiple Response Units, Management Science, Vol. 36, No.1, 1990
- [19] Bazzoli G.J., Meerrsman J., Chan Ch., Factors That Enhance Continued Trauma Centre Participation in Trauma Systems, Journal of Trauma, Vol.41, No.5, 1996
- [20] Bell C.E., Allen D., Optimal Planning of an Emergency Ambulance Service, Socio-Econ. Plan. Sci, Vol.3, pp.95-101, 1969
- [21] Benveniste R., Solving the Combined Zoning and Location Problem for Several Emergency Units, J.Opl.Res.Soc., vol.36, No.5, pp.433-450, 1985
- [22] Berlin G.N., Liebman J.C., Mathematical Analysis of Emergency Ambulance Location, Socio-Econ.Plan.Sci, Vol.8., pp.323-328, 1974
- [23] Berman O., Locating a Facility on a Congested Network with Random Lengths, Networks, Vol. 15, pp.275-293, 1985
- [24] Berman O., Dispatching Service Units on Networks Using Perfect Real Time Location Information, Infor, Vol.20, no.4, 1982
- [25] Berman O., Larson R., Odoni A.R., Developments in Network Location with Mobile and Congested Facilities, EJOR, Vol.6, pp.104-116, 1981
- [26] Berman O., Larson R.C., The Median Problem with Congestion, Comput. & Ops.Res., Vol.9, No.2, pp.119-126, 1982

- [27] Berman O., Rahnema M.R., A Procedure for Dispatching Moving Mobile Servers, *Networks* Vol.13, pp.121-141, 1983
- [28] Bouillon B., Lefering R., Vorweg M., Tiling T., Neugebauer E., Troidl H., Trauma Score System: Cologne Validation Study, *Journal of Trauma*, Vol.42, No.4, 1997
- [29] Brown G.G., Vassiliou A.L., Optimizing Disaster Relief: Real-Time Operational and Tactical Decision Support, *Naval Research Logistics*, Vol.40, pp.1-23, 1993
- [30] Cantwell B., Lenehan B., O'Farrel J., Improving the Performance of Local Authority Ambulance Service, *Health*, Vol.43, pp.443-453, 1973
- [31] Carter G.M., Ignall E.J., A Simulation Model of Fire Department Operations: Design and Preliminary Results, in: *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, Vol., SSC-6, No.4, October 1970
- [32] Carter G.M., Chaiken J.M., Ignall E., Response Areas for Two Emergency Units, *OR*, Vol.20, No.3, pp.571-593, 1972
- [33] Chaiken J.M., Transfer of Emergency Service Deployment Models to Operating Agencies, *Management Science*, Vol.24, No.7, pp.719-731, 1978
- [34] Chaiken J.M., Larson R.C., Methods for Allocating Urban Emergency Units: a Survey, *Management Science*, Vol.19, No.4, pp.110-130, 1972
- [35] Chelst K.R., Barlach Z., Multiple Unit Dispatches in Emergency Services: Models to Estimate System Performance, *Management Science*, Vol.27, No.12, pp.1390-1409, 1981
- [36] Church R., ReVelle C., The Maximal Covering Location Model, *Pap.Reg.Sci.Assoc.*, 32:101 Fall, 1974
- [37] Conway R.W., Some Tactical Problems in Digital Simulations, *Management Science*, Vol.10, No.1, pp.47-61, 1963
- [38] Corea G.A., Kulkarni V.G., Shortest Paths in Stochastic Networks with ARC Lengths Having Discrete Distributions, *Networks*, Vol.23, pp. 175-183, 1993
- [39] Cunningham P., Rutledge R., Baker Ch., Clancy T.V., Ambulance Transport with Outcome of Injury in Trauma Patients Transported from the Scene, *Journal of Trauma*, Vol.43, No. 6, 1997
- [40] Daberkow S.G., Location and Cost of Ambulances Serving a Rural Area, *Health Services Research*, V.12, No.3, 1977
- [41] Daskin M.S., A Maximum Expected Covering Location Model: Formulation, Properties and Heuristic Solution, *Tra.Sci.*, Vol.17, No. 1, pp.48-70, 1983

- [42] Daskin M.S., Stern E.H., A Hierarchical Objective Set Covering Model for Emergency Medical Service Vehicle Deployment, *Tra.Sci.*, Vol.15, No.2, 1981
- [43] Davis S.G., Analysis of Deployment of Emergency Medical Services, *Omega*, Vol.9, No.6, pp.655-657, 1981
- [44] Draeger M.A., An Emergency Simulation Model Used to Evaluate alternative Nurse Staffing and Patient Population Scenarios, w: in: *Proceedings of 1992 Winter Simulation Conference*, ed. J.J. Swain, D. Goldsman, R.C. Crain, J.R. Wilson, Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronic Engineers, pp. 1057-1064, 1992
- [45] Drury C.E., Laughery K.R., Fundamentals of Using Micro Saint in Manufacturing, Health Care, Human Factors and Business Process Reengineering, w: *Proceedings of 1995 Winter Simulation Conference*, ed. C. Alexopoulos, K.Kang, W.R. Lilegdon, D.Goldsman, pp.420-426, 1995
- [46] Eaton D.J., Ricateau M., Fitzgerald H., Coll W., Nelson T., Stockton W., Development and applications of a Decision Support System for Emergency Medical Services, *Workin Papers Series*, Lyndon B. Johnson School of Public Affairs, The University of Texas at Austin, 1988
- [47] Eaton D.J., Coll W., Nelson T., Stockton W., Applications of a Decision Support System for Improving Emergency Medical Services in Austin, *Workin Papers Series*, Lyndon B. Johnson School of Public Affairs, The University of Texas at Austin, 1988
- [48] Eaton D.J., Daskin M.S., Simmons D., Bulloch B., Jansma G., Determining Emergency Medical Service Vehicle Deployment in Austin, Texas, *Interfaces*, Vol.15, pp.96-108, 1985
- [49] Evans G.W., Gor T.B., Unger E., A Simulation Model for Evaluating Personnel Schedules in a Hospital Emergency Department, in: *Proceedings of 1996 Winter Simulation Conference*, ed. J.M. Charnos, D.J. Morrice, D.T. Brunner, J.J. Swain, pp. 1205-1209, 1996
- [50] Fern K.T., Smith J.T., Zee B., Lee A., Rorscneck D., Pichora D.R., Trauma Patients with Multiple Extremity Injuries: Resource Utilisation and Long-Term Outcome in Relation to Injury Severity Scores, *Journal of Trauma*, Vol.45, No.3, 1998
- [51] Finlay P.N., Wilson J.M., The Paucity of Model Validation in Operational Research Projects, *J.Opl.Res.Soc.*, Vol.38, No.4, pp.303-308, 1987
- [52] Fishman G.S., *Symulacja komputerowa. Pojęcia i metody*, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1981
- [53] Fitsimmons J.A., A Methodology for Emergency Ambulance Deployment, *Management Science*, Vol.19, No.6, pp.627-636, 1973

- [54] Fujiwara O., Kachenchai K., Makjamroen T., Gupta K.K., An Efficient Scheme for Deployment of Ambulances in Metropolitan Bangkok, *EJOR*, Vol.31, 1987, pp.9-18
- [55] Fujiwara O., Makjamroen T., Gupta K.K., Ambulance deployment analysis: A case study of Bangkok, *European Journal of Operational Research* Vol.31., pp.9-18, 1987
- [56] Franci A., Il Dimensionamento Di Un Servizio Di Emergenza: L'Ambulanza, *Sanita Pubblica*, No.5, pp.540, 1983
- [57] Gibson G., Evaluative Criteria for Emergency Ambulance Systems, *Soc.Sci. & Med.*, Vol.7, pp.425-454, 1973
- [58] Goldberg J. Dietrich R., Chen J.M., Mitwasi M., Valenzuela T., Criss E., A Simulation Model for Evaluating a Set of Emergency Vehicle Base Locations: Development, Validation, and Usage, *Socio.-Econ. Plann. Sci.* Vol.24, No. 2, pp.125-141, 1990
- [59] Gordon G., *Symulacja systemów*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1974
- [60] Górski J. i inni, *Inżynieria oprogramowania w projekcie informatycznym*, Zakład Nauczania Informatyki MIKOM, Warszawa 1999
- [61] Green L., A Queuing System with Auxiliary Servers, *Management Science*, Vol.30, No.10, 1984
- [62] Green L., A Multiple Dispatch Queueing Model of Police Patrol Operations, *Management Science*, Vol.30, No.6, 1984
- [63] Green L., Kolesar P., The Feasibility of One-Officer Patrol in New York City, *Management Science*, Vol.30, No. 8, 1984
- [64] Green L., Kolesar P., A Comparison of the Multiple Dispatch and M/M/C Priority Queueing Models of Police Patrol, *Management Science*, Vol.30, No.6, 1984
- [65] Greń Jerzy, *Statystyka matematyczna. Modele i zadania*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1982
- [66] Groom K.,N. Planning Emergency Ambulance Services, *Opl.Res.Q*, Vol.28, pp.641-651, 1977
- [67] Groom K.N., Holloway K.E., Mann W.R., Planning Emergency Cover in West Glamorgan, in: *Solving Local Government Problems*, ed.Ch.E.Pink, A.Dixson, G.Allen, E.Unin, London 1981
- [68] Grossman D.C., Kim A., Macdonald S.C., Klein P., Copass M.K., Maier R.V., Urban-Rural Differences in Prehospital Care of Major Trauma, *Jornal of Trauma*, Vol.42, No.4, 1997

- [69] Gupta A., Malik S., Ashar P., Toward Formalising a Validation Methodology Using Simulation Coverage, Design Automation Conference, Anaheim, CA, USA, 1997
- [70] Hakimi S.L., Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph, Operations Research, Vol.12, 1964
- [71] Hall W.K., Management Science Approaches to the Determination of Urban Ambulance Requirements, Socio.-Econ. Plan.Sci., Vol.5, pp.491-499, 1971
- [72] Hall W.K., The Application of Multifunction Stochastic Service Systems in Allocating Ambulances to an Urban Area, OR, V.20, no.3, 1972, pp.558-569
- [73] Halseth G., Rosenberg M.W., Locating Emergency Medical Services in Small Town and Rural Settings, Socio-Econ. Plann. Sci. Vol.25, No.4, pp.295-304, 1991
- [74] Hamilton F.H., System Analysis in Emergency Care Planning, Medical Care, Vol.12, No.2, pp.152-162, 1974
- [75] Hawke A., Marlin Ch., Expert System in Crisis Management : Ambulance Dispatch, Dep.of Comp.Sc., The University of Adelaide, 1986
- [76] Heath D., Sanchez P., On the Adequacy of Pseudo-Random Number Generators (Or:How Big a Period did We Need?) Operations Research Society of America, Vol.5, No.1, pp.3-6, 1986
- [77] Hermans M.D., Sluijs J.M., Aartsen H., Reducing Inter-organisational Barriers in the Medical Sector with Simulation, w: Proceedings of 1998 Winter Simulation Conference ed. D.J.Medeiros, E.F. Watson, J.S.Carson, M.S.Manivannan, pp. 1441-1448, 1998
- [78] Holzman T.C., Computer-Human Interface Solutions for Emergency Medical Care, Interactions, pp.13-24, May+June 1999
- [79] Hoover S.V., Perry R.F., Simulation. A Problem-Solving Approach, Addison-Wesley Publishing Company, 1989
- [80] Hopkinson W.C., Sepulveda J.A., Real Time Validation of Man-in-the-loop Simulations, w: Proceedings of 1995 Winter Simulation Conference, ed. C. Alexopoulos, K.Kang, W.R. Lilegdon, D.Goldsman, pp.1250-1256, 1995
- [81] Hopkinson E., BS 5750, Quality System in Ambulance Services: Part 1, International Journal of Health Care Quality Assurance, Vol,4, No.6, 1991, pp.22-29
- [82] Hopkinson E., BS 5750, Quality System in Ambulance Services: Part 2, International Journal of Health Care Quality Assurance, Vol,5, No.2, 1992, pp.27-36

- [83] Hsin V.J.K., Wang P.T.R. Modeling Concepts for Intelligent Vehicle Highway Systems (IVHS), w: Proceedings of 1992 Winter Simulation Conference, ed. J.J. Swain, D. Goldsman, R.C. Crain, J.R. Wilson, Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronic Engineers, pp. 1201-1209, 1992
- [84] Hupert Z., Kuszewski K., Jakość opieki medycznej w pomocy doraźnej – pogotowiu ratunkowym. Propozycja metody oceny, *Zdrowie Publiczne*, t.103, nr 12, 1992
- [85] Ignall E.J., Kolesar P., Walker W.E., Using Simulation to Develop and Validate Analytic Models: Some Case Studies, *Operations Research*, Vol.26, No.2, pp.237-253, 1978
- [86] Jacobson S.H., Morrice D.J., Analyzing the Temporal Association Between Health Disorders and Medical Treatments Using Probability Models and Monte Carlo Simulation, w: Proceedings of 1996 Winter Simulation Conference, ed. J.M. Charnos, D.J. Morrice, D.T. Brunner, J.J. Swain, pp. 1176-1182, 1996
- [87] Jakubaszko J., Medycyna ratunkowa – zarys struktury i funkcji, <http://www.nil.org.pl/gazeta/gl96/7-8-96-3.htm> {06.11.1998}
- [88] Jankowski R.F., Sundhiya M., Comparison of Attendance and Emergency Admission Patterns at Accident and Emergency Departments in and out of London, *BMJ*, Vol.306, pp.1241-1243, 1993
- [89] Jarvis J., Stevenson K., Willemain T., A Simple Procedure for the Ambulance Allocation in areas of Low Demand, Inc., USA, 1989
- [90] Jenkins R., Deshpande Y., Davison G., Verification and Validation and Complex Environments: a Study in Service Sector, in: Proceedings of 1998 Winter Simulation Conference ed. D.J.Medeiros, E.F. Watson, J.S.Carson, M.S.Manivannan, pp. 1433-1440, 1998
- [91] Karski J.B. Wypadki, urazy i zatrucia w Polsce, *Biuletyn Informacyjny* nr 14 Centrum Organizacji i Ekonomiki Ochrony Zdrowia, Warszawa, 1996
- [92] Katehakis M.N., Levine A., Allocation of Distinguishable Servers, *Comput and Ops.Res.*, Vol.13, No. 1, pp.85-93, 1986
- [93] Kelton W.D., Statistical Issues in Simulation, w: Proceedings of 1996 Winter Simulation Conference, ed. J.M. Charnes, D.T. Brunner, J.J.Swian, pp.47-54, 1996
- [94] Kelton W.D., Sadowski R.P., Sadowski D.A., *Simulation with Arena*, McGraw-Hill, 1998
- [95] Kirtland A. et al, Simulating an Emergency Department „Is as much fun as..”, in: Proceedings of 1995 Winter Simulation Conference, ed. C. Alexopoulos, K.Kang, W.R. Lilegdon, D.Goldsman, pp.1039-1042, 1995

- [96] Kleijnen J.P.C., Bettonvil B., Van Groenendahl W., Validation of Trace-Driven Simulation Models: Regression Analysis Revisited, w: Proceedings of 1996 Winter Simulation Conference, ed. J.M. Charnes, D.T. Brunner, JJ.Swian, pp. 352-359, 1996
- [97] Klein R.W., Roberts S.D., A Time-varying Poisson Arrival Process Generator, Simulation, pp.193-195, 1984
- [98] Kleindorfer G.B., Ganeshan R., The Philosophy of Science and Validation in Simulation, w: Proceedings of 1993 Winter Simulation conference, ed. G.W.Evans, M.Mollaghasemi, E.C. Russel, W.E. Biles, pp. 50-56, 1993
- [99] Kolesar P., Walker W.E., An Algorithm for the Dynamic Relocation of Fire Companies, OR, V.22, pp.249-274, 1974
- [100] Koronkiewicz A., Murkowski M., Nowacki W., Systemy Organizacji i Finansowania Pomocy Doraźnej i Transportu Sanitarnego w Wybranych Krajach Europy na tle Sytuacji w Polsce, Centrum Organizacji i Ekonomiki Ochrony Zdrowia, Warszawa, 1994
- [101] Komunikat po posiedzeniu Komitetu Ekonomicznego Rady Ministrów, <http://www.kprm.gov.pl/archiwum/komunikaty2000/ksorm0110.htm> (27.04.2000)
- [102] Lange V.E., The Benefits of Simulation Modelling in Medical Planning and Medical Design, w: Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, ed. P.A.Farrington, H.B.Nembhard, D.T.Sturrock, D.W.Evans, pp.1564-1567, 1999
- [103] Larson R.C., Decision-Aiding Tools in Urban Public Safety Systems, Sloan Management Review, Vol.14, pp.55-74, 1972
- [104] Larson R.C., Approximating the Performance of Urban Emergency Service Systems, OR, Vol.23, No.5, 1975, pp.845-868
- [105] Larson R.C., A Hypercube Queueing Model for Facility Location and Redistricting in Urban Emergency Services, Comput. & Ops. Vol. 1, pp.67-95, 1974
- [106] Larson R.C., Odoni A.O. Urban Operations Research, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1979
- [107] Larson R.C., Structural System Models for Locational Decisions: an Example Using the Hypercube Queueing Model, K. B. Haley, ed. , OR'78 North-Holland Publishing Company. 1979, pp.1054-1091
- [108] Larson R.C., Stevenson K.A., On Insensitivities in Urban Redistricting and Facility Location, OR, Vol.20, No.3, pp.595-611, 1972
- [109] Law A.M., Kelton W.D., Simulation modeling and analysis, Second edition, McGraw-Hill, Inc, 1991
- [110] Lowery J.C., Getting Started in Simulation in Healthcare, w: Proceedings of 1998

- Winter Simulation Conference ed. D.J.Medeiros, E.F. Watson, J.S.Carson, M.S.Manivannan, pp. 31-35, 1998
- [111] Lowery J.C., Introduction to Simulation in Health Care , w: Proceedings of 1996 Winter Simulation Conference, ed. J.M. Charnes, D.T. Brunner, J.J. Swain, pp.78-84, 1996
- [112] Lowery J.C., (Chair) Barriers to Implementing Simulation in Health Care , w: Proceedings of 1994 Winter Simulation Conference, ed. J.D. Tew, S. Manivannan, D.A. Sadowski, A.F. Seila, Baltimore: Association of Computing Machinery, pp.868-875, 1994
- [113] Lowery J.C., Multi-Hospital Validation of Critical Care Simulation Model, w: Proceedings of 1993 Winter Simulation conference, ed. G.W.Evans, M.Mollaghasemi, E.C. Russel, W.E. Biles, pp.1207-1215, 1993
- [114] Lowery J.C., Simulation of a Hospital's Surgical Suite and Critical Care Area, w: Proceedings of 1992 Winter Simulation Conference, ed.J.J.Swain, D.Goldsmann, R.C. Crain, J.R.Wilson, pp.1071-1087, 1992
- [115] Love R.F., Morris J.G., Mathematical Models of Road Travel Distances, Management Science, vol.25, No.2, 1979
- [116] Lubicz M., Mielczarek B., Simulation modelling of emergency medical services, Eur. J. Oper. Res. 1987 vol. 29, no. 2, pp 178-185
- [117] Lubicz M., Mielczarek B., Computer simulation with MSP-2: experiences with models of emergency medical services, Systems Science, vol. 13 1987 no 3/4 pp. 133-145
- [118] Lubicz M., Mielczarek B., Janus J., Mazurek P., Systemy ekspertowe i modele symulacyjne w komputerowym wspomaganii decyzji w systemach ochrony zdrowia, Projekt badawczy KBN nr 8-8620-91-02, Raport Inst.Org. i Zarz. PWR, seria SPR, nr 3, 1995
- [119] Lubicz M., Mielczarek B., Symulacja w systemach usług publicznych – medycyna i ochrona zdrowia, w : Symulacja Systemów Gospodarczych, Prace Szkoły Antałówka 97, Wyższa Szkoła Przedsiębiorczości i Zarządzania, PWroc. Instytut Organizacji i Zarządzania. [Zakopane, 23-27 września 1997]. Warszawa 1997, s.143-162
- [120] McGuire F., Using Simulation to Reduce Length of Stay in Emergency Departments, , w: Proceedings of 1994 Winter Simulation Conference, ed. J.D. Tew, S. Manivannan, D.A. Sadowski, A.F. Seila, Baltimore: Association of Computing Machinery, 1994, pp. 861-867
- [121] McKnew M.a., Saydam C., Fitzpatrick K.E., A Simple Model for Predicting the Number of Servers Necessary to Cover a Region, Socio-Econ. Plann. Sci. Vol.23, No.6, pp.345-353, 1989
- [122] Mielczarek Bożena, Lubicz Marek, Computer Educational Game for Simulation

- Modelling of Emergency Medical Services, w: Proceedings of the 4th International Conference on Systems Science in Health Care, Lyon, 4-8. 07 1988, vol.2. Health care systems and actors, Masson, Paris, pp. 813 - 816
- [123] Mielczarek B., Lubicz M., EMS - mikrokomputerowy system wspomaganie decyzji z zakresu analizy i optymalizacji systemów medycznej pomocy doraźnej. Zastosowania w dydaktyce medycznej, w: Materiały II Kraj. Konf. Komputery w Medycynie, 1991, t.1, s.47-52
- [124] Mielczarek Bożena, Lubicz Marek: MSP-5: uogólniony model symulacyjny wojewódzkiego systemu medycznej pomocy doraźnej. W: Advanced simulation of systems. Proceedings of the workshop. Ed. Jan Stefan. {Krnov, Czech Republic, September 16-18, 1997}. Ostrava: MARQ 1997, s.411-416, 2 rys. bibliogr. 13 poz. (Acta MOSIS; nr 67)
- [125] Mielczarek B., Lubicz M., Nauczanie zarządzania systemem medycznej pomocy doraźnej z wykorzystaniem symulacji komputerowej i systemów wspomaganie decyzji, w: Modelowanie symulacyjne w dydaktyce ekonomii (praca zbiorowa pod redakcją E.Radośńskiego), 1998, s.119-147
- [126] Mielczarek B., Lubicz M., Wybrane aspekty modelowania symulacyjnego systemów ratownictwa medycznego, w : Symulacja Systemów Gospodarczych, Prace Szkoły Antałówka 99, Wyższa Szkoła Przedsiębiorczości i Zarządzania, Politechnika Wrocławska - Instytut Organizacji i Zarządzania, Warszawa 1999, s.159-171
- [127] Mirchandini P.B., Locational Decisions on Stochastic Networks, Geographical Analysis, Vpl.12, No.2, 1980
- [128] Mirchandini P.B., Odoni A.R., Locations of Medians on Stochastic Networks, Tra.Sci., V.13, pp.85-97, 1979
- [129] Mlekoć S., Piasecki Z., Olakowski T, Wpływ następstw wypadków na kształtowanie się sytuacji zdrowotnej społeczeństwa polskiego, Polski Przegląd Chirurgiczny, 67, 3, 267-275, 1995
- [130] Mock Ch.N., Jurkovich G.J., David nii-Amon-Kotei, Arreola-Risa Carlos, Maier R.V., Trauma Mortality Patterns in Three Nations at Different Economic Levels: Implications for Global Trauma System Development, Vol.44, No.5, 1997
- [131] Naylor T.H., Modelowanie cyfrowe systemów ekonomicznych, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1975
- [132] Narodowy Program Zdrowia 1996-2005, <http://www.mohealth.gov.pl/npz-cele.htm> (20.06.1999)
- [133] Norton R., Wortman E., Eastes L., Daya M., Hedges J., Hoyt J., Appropriate Helicopter Transport of Urban Trauma Patients, Journal of Trauma, Vol.41, No.5, 1996
- [134] Olsson M., Edhag O., Rosenqvist U., Emergency Care. Identification of Psychosocial

- Problems, Scand.J.Soc.Med., V.14, pp.87-91, 1986
- [135] Osler T., Baker S.P., Long W., A Modification of the Injury Severity Score That both Improves Accuracy and Simplifies Scoring, Journal of Trauma, Vol.43, No. 6, 1997
 - [136] Parkan C., Berman O., Simulation of Urban Service Operations for Locational Decisions, Simulation, V.46, No.2, pp.61-65, 1986
 - [137] Paul R.J., Chew S.T., Simulation Modelling Using an Interactive Simulation Program Generator, J.Opl.Res.Soc., Vol.38, No.8, pp.735-752, 1987
 - [138] Pirkul H., Schilling D.A., The Siting of Emergency Service Facilities with Workload Capacities and Backup Service, Management Science, Vol.34, No.7, 1988
 - [139] Pitt M., A Generalised Simulation System to Support Strategic Resource Planning in Healthcare, w: Proceedings of 1997 Winter Simulation Conference ed. S.Andradottir, K.J. Healy, D.H.Winters, B.L.Nelson, 1997, pp 1155-1162
 - [140] Projekt Ustawy „O ratowaniu zdrowia i życia osób w stanach nagłego zagrożenia (o ratownictwie medycznym)”, opracowany przez Komisję ds. Ratownictwa Medycznego przy Ministrze Zdrowia i Opieki Społecznej, 1998, praca niepublikowana
 - [141] Prolux V.K., Hospital Emergency Room Simulation: Object Oriented Design Issues for CS2, ACM SIGCSE Bulletin, 3/99, 1999, pp.92-94
 - [142] Rao L., Goldsman D., Development and Application of a Validation Framework for Traffic Simulation Models, in: Proceedings of 1998 Winter Simulation Conference, ed. D.J.Medeiros, E.F. Watson, J.S.Carson, M.S.Manivannan, 1998, pp. 1079-1086
 - [143] ReVelle Ch., Review, Extension and Prediction in Emergency Service Siting Models, European Journal of Operational Research, Vol40, 1989
 - [144] ReVelle Ch., Facility Siting and Integer-Friendly Programming, European Journal of Operational Research 65, pp.147-158, 1993
 - [145] ReVelle Ch., Bigman D., Schilling D., Cohon J., Church R., Facility Location: A Review of Context-free and EMS Models, Health Services Research, Vol.12., No.2, pp.129-146, 1977
 - [146] ReVelle Ch, Marks D., Liebman J.C., An Analysis of Private and Public Sector Location Models, Management Science, Vol.16, No.11, pp.692-707, 1970
 - [147] Robinson S., Simulation Model Verification and Validation: Increasing the Users' Confidence, in: Proceedings of 1997 Winter Simulation Conference ed. S.Andradottir, K.J. Healy, D.H.Winters, B.L.Nelson, 1997, pp.53-59
 - [148] Rocznik statystyczny GUS, Warszawa, 1998

- [149] Rutledge R., Osler T., Emery S., Kromhout-Schiro S., The End of the Injury Severity Score (ISS) and the Trauma and Injury Severity Score (TRISS): ICISS, an International Classification of Diseases, Ninth Revision-Based Prediction Tool, Outperforms Both ISS and TRISS as Predictors of Trauma Patient Survival, Hospital Charges, and Hospital Length of Stay, Vol.44, No.1, 1998
- [150] Sargent R.G., Verification and Validation of Simulation Models, in: Proceedings of 1998 Winter Simulation Conference ed. D.J.Medeiros, E.F. Watson, J.S.Carson, M.S.Manivannan, 1998, pp.121-130
- [151] Sargent R.G., Verification and Validation of Simulation Models, w: Proceedings of 1994 Winter Simulation Conference, ed. J.D. Tew, S. Manivannan, D.A. Sadowski, A.F. Seila, Baltimore: Association of Computing Machinery, 1994, pp.77-87
- [152] Sargent.R.G., A tutorial on validation and verification of simulation models, in: Proceedings of 1988 Winter Simulation Conference, ed. M.Abrams, P.Haigh, J.Comfort, 1988, pp.33-38
- [153] Savas E.S. Simulation and Cost-Effectiveness Analysis of New York's Emergency Ambulance Service, Management Science, Vol.15, No.12, 1969
- [154] Schreuder J.A.M., Application of a Location Model to Fire Stations in Rotterdam, European Journal of Operational Research, Vol.6, pp.212-219, 1981
- [155] Scott D.W., Factor L.E., Gorry G.A., Predicting the Response Time of an Urban Ambulance System, Health Services Research, Vol.13, No.4, 1978
- [156] Siler K.F., Level-load Retrieval Time: A New Criterion for EMS Facility Sites, Health Services Research, Vol.12, No.4, 1977
- [157] Stene J.K., Grande Ch.M., Giesecke A., A Shock Resuscitation, editors: Trauma anasthesia, Baltimoer, Williams & Wilkins, 1991
- [158] Swider C.L., Bauer K.W., Schuppe T.F., The Effective Use of Animation in Simulation Model Validation., w: Proceedings of 1994 Winter Simulation Conference, ed. J.D. Tew, S. Manivannan, D.A. Sadowski, A.F. Seila, Baltimore: Association of Computing Machinery, 1994, pp. 633-640
- [159] Swoveland C., Uyeno D., Vertinsky I., Vickson R., Ambulance Location: a Probabilistic Enumeration Approach, Management Science, Vol.20, No.4, 1973
- [160] Tansel B.C., Francis R.L., Lowe T.J., Location on Networks: a Survey. Part I: the p-Center and p-Median Problems, Management Science, Vol.29, No.4, 1983
- [161] Taylor I.D.S., Templeton J.G.C., Waiting Time in a Multi-Server Cutoff-Priority Queue, and its Application to an Urban Ambulance Service, OR, V.28, no.5, 1980, pp.1168-1188
- [162] Toregas C., ReVelle Ch., Binary Logic Solutions to a Class of Location Problem, Geo. Ana., V.5, 1973

- [163] Toregas C., Swain R., Bergman L., The Location of Emergency Service Facilities, OR, Vol.19, No.6, pp.1363-1373, 1971
- [164] Wagner H.M., Badania operacyjne, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 1980
- [165] Weaver J.R., Church R.L., Computational Procedures for Location Problems on Stochastic Networks, Transportation Science, Vol.17, No.2, 1983
- [166] Wears R.L., Winton Ch.N, Simulation Modelling of Prehospital Trauma Care, w: Proceedings of 1993 Winter Simulation Conference, ed. G.W.Evans, M.Mollaghasemi, E.C. Russel, W.E. Biles, 1993, pp.1216-1224
- [167] WHO Report „Steering committee on out-of-hospital emergency medical services”, 1999, <http://www.who.dk> (18.04.2000)
- [168] Vassilacopoulos G., Allocating Doctors to Shifts in an Accident and Emergency Department, Journal of the Operational Research Society, vol.36, no.6, pp.517-523, 1985
- [169] Volz R.A., Optimum Ambulance Location in Semi-Rural Areas, Tra.Sci, V.15, no3, pp.193-203, 1981
- [170] Younge P.A., Coats T.J., Gurney D., Kirk C.J.C., Interpretation of the Ws Statistic: Application to an Integrated Trauma System, The Journal of Trauma, Vol.43, No.3, 1997
- [171] Zhu Z., McKnew M.A., Lee J. Effects of Time-varied Arrival Rates: Investigation in Emergency Ambulance Service System, in: Proceedings of 1992 Winter Simulation Conference, ed.J.J. Swain, D. Goldsman, R.C. Crain, J.R. Wilson, 1992, pp.1180-1186
- [172] <http://ie.senat.gov.pl/K4/DOK/DIAR/37/3708a.htm>, Diariusz Senatu RP nr 37 (02.05.2000), odpowiedź Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej na oświadczenie senatora Mariana Żenkiewicza

ZAŁĄCZNIK 1 - ETAPY MODELOWANIA SYMULACYJNEGO

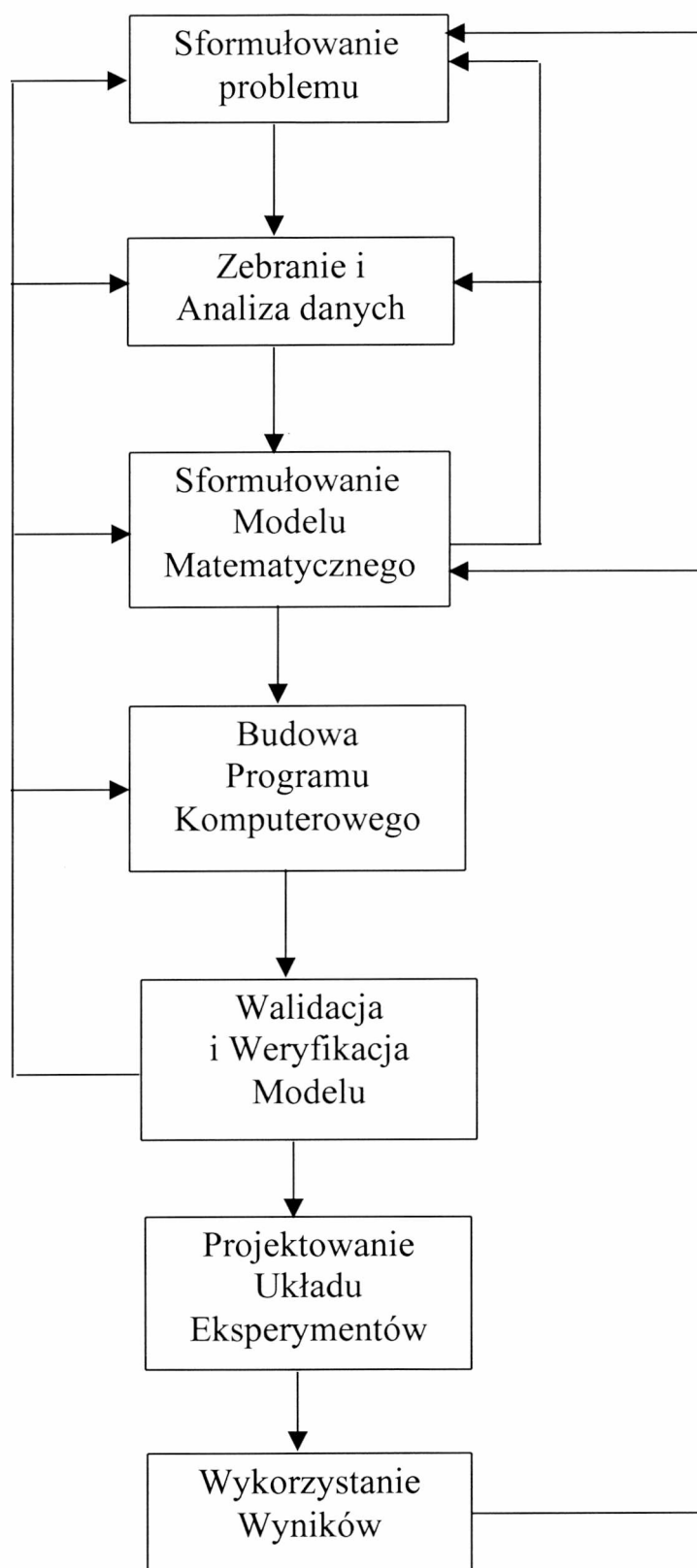
Do etapów badania symulacyjnego zalicza się następujące elementy (por.rys.Z-1):

1. *Sformułowanie Problemu*
2. *Zebranie i Analiza Danych*
3. *Sformułowanie Modelu Matematycznego*
4. *Budowa Programu Komputerowego*
5. *Walidacja i Weryfikacja Modelu*
6. *Projektowanie Układu Eksperymentów*
7. *Analiza i Wykorzystanie Wyników Symulacji*

W etapie Sformułowania Problemu należy postawić pytania, sprecyzować cele, wskazać zmienne i wskaźniki działania. Etap Zbierania i Analizy Danych związany jest z poszukiwaniem informacji i danych niezbędnych do dalszego uściślenia i zrozumienia problemu. Budowa Modelu ma na celu skonstruowanie i przetestowanie modelu systemu rzeczywistego a w następnym etapie - oprogramowanie go. Etap Walidacji i Weryfikacji Modelu dąży do ustalenia czy model poprawnie reprezentuje modelowaną rzeczywistość. Projektowanie Układu Eksperymentów podejmuje problem prowadzenia badań symulacyjnych w celu uzyskania wyników o satysfakcjonującej dokładności. Ostatni etap – Analizy i Wykorzystania Wyników Symulacji rozpoczyna się na samym początku badania symulacyjnego a jego celem jest doprowadzenie do zaakceptowania i wykorzystania wyników uzyskanych w trakcie analizy symulacyjnej.

1. Sformułowanie Problemu

Jest to najistotniejszy krok analizy symulacyjnej. Nie jest bowiem możliwe uzyskanie poprawnego rozwiązania przy niepoprawnie sformułowanym problemie. Aby model rzeczywiście okazał się użyteczny należy odszukać i sformułować *problem*, który rodzi potrzebę uzyskania dodatkowej wiedzy i lepszego zrozumienia systemu rzeczywistego, biorąc przy tym pod uwagę przyszłych odbiorców i użytkowników modelu. Analiza symulacyjna powinna zatem rozpocząć się albo od sformułowania problemu, albo od jasnego sprecyzowania celów eksperymentu. Cele te przyjmują zazwyczaj postać: (1) pytań, na które udziela się odpowiedzi, (2) hipotez, które poddaje się testom sprawdzającym oraz (3) skutków będących przedmiotem estymacji.



Rys. Z-1. Etapy modelowania symulacyjnego.

2. Zebranie i Analiza Danych Wejściowych

Metody gromadzenia danych są bardzo różne, poczynając od technik manualnych po bardzo zaawansowane technicznie. Przy wyborze metody należy kierować się: możliwością szybkiego wprowadzenia danych do komputera, możliwością zebrania danych z pożądaną dokładnością, wpływem procesu zbierania danych na zachowanie się atrybutów systemu, które właśnie podlegają pomiarom. Najefektywniej jest korzystać z już istniejących zbiorów danych jednakże zawsze bazy te należy obdarzać ograniczonym zaufaniem. Oprócz problemu *jak* zbierać, pozostaje jeszcze problem *ile* zbierać. Im większy jest zbiór zgromadzonych danych, tym rośnie dokładność wyznaczanych na ich podstawie charakterystyk. Jednocześnie jednak rośnie czas (koszt) zbierania danych oraz czas (koszt) ich analizy.

Zebrane dane można wykorzystać w modelu w dwojaki sposób: (1) wykorzystać zebraną próbkę do odtworzenia rozkładu statystycznego lub (2) na podstawie próbki określić rozkład statystyczny (por. Załącznik 2)

3. Sformułowanie Modelu Matematycznego

Budowa modelu matematycznego jest bardziej sztuką niż nauką. Wśród twórców modeli symulacyjnych panuje jednak zgodne przekonanie, że dobrze jest zaczynać od modelu o wysokim stopniu ogólności, w którym ujęte byłyby wszystkie najważniejsze relacje i dopiero w fazie następnej należy uszczegółowić model. Na proces budowy modelu składają się następujące etapy:

- a) identyfikacja zmiennych decyzyjnych i zmiennych kontrolowanych, określenie ograniczeń dla zmiennych decyzyjnych.

Wyróżniamy *zmienne egzogeniczne*, czyli zmienne zewnętrzne, występujące niezależnie od modelu, oraz *zmienne endogeniczne* czyli zmienne wewnętrzne, będące funkcją zmiennych egzogenicznych. Zmienne egzogeniczne mogą być dalej klasyfikowane jako *zmienne kontrolowalne* lub *niekontrolowalne*. Zmienne kontrolowalne to takie zmienne, na które decydent może wpływać, natomiast zmienne niekontrolowalne są niezależne od woli (i życzeń) decydenta. Zmienne kontrolowalne określa się często jako *zmienne decyzyjne*, natomiast zmienne niekontrolowalne jako *parametry* modelu,

- b) zdefiniowanie mierników działania systemu i funkcji celu.

Aby ocenić jakość uzyskanego rozwiązania należy najpierw zdefiniować mierniki (miary), którymi będziemy się w tej ocenie posługiwać. Mierniki działania systemu

wybijerane są spośród zmiennych endogenicznych (wewnętrznych). Te mierniki, które wybierzemy do minimalizacji lub maksymalizacji charakterystyk systemu będziemy traktować jako funkcję celu,

- c) określenie wstępnej struktury modelu w celu ustalenia wzajemnych powiązań pomiędzy zmiennymi.

Podstawowym problemem jest ustalenie stopnia złożoności modelu. Idealny model powinien dostatecznie ściśle prognozować zachowanie się systemu a zarazem minimalizować czas przeznaczony na obliczenia i programowanie. Budując model należy ściśle określić jego granice. Wybierając elementy, które zostaną umieszczone w modelu należy uwzględnić trzy przesłanki:

- *Wszystkie elementy muszą być niezbędne.* Wszystko, co zostało wykluczone z modelu nie może okazać się niezbędne do opisu zachowania się modelu zgodnie z postawionym celem. Również, wszystko co zostało ujęte w modelu musi być niezbędne do takiego opisu.
- *Elementy powinny być zagregowane.* Poszczególne elementy powinny być zagregowane tak dalece jak tylko jest to możliwe bez szkody dla zmiany natury rozważanego problemu.
- *Elementy powinny być ukierunkowane.* Jeżeli elementy dotyczą pewnych zmian, muszą jednoznacznie te zmiany opisywać.

Po ustaleniu wstępnej struktury modelu należy odpowiedzieć, między innymi, na następujące pytania:

- Czy nie włączyliśmy żadnych niewłaściwych zmiennych, to znaczy takich, które mało przyczyniają się do możliwości prawidłowego przewidywania zachowania się zmiennych endogenicznych systemu?
- Czy nie określiliśmy w sposób nieściśły jednej lub większej liczby funkcjonalnych zależności między zmiennymi wyjściowymi a wejściowymi modelu?
- Czy oceny parametrów dotyczących cech charakterystycznych modelu lub równań obrazujących zachowanie się systemu zostały prawidłowo estymowane?
- Czy estymacje parametrów użytych w modelu są istotne pod względem statystycznym?

4. Sformułowanie programu komputerowego

Najistotniejsze kroki, które należy wykonać to:

- a) budowa schematu blokowego głównego szkieletu programu,
- b) wybór języka programowania. Języki symulacyjne mają tę przewagę, że posiadają już wbudowane specjalne procedury „symulacyjne” (sterowanie upływem czasu, generatory liczb losowych, narzędzia statystyczne służące do analizy wyników), które znacznie przyspieszają i ułatwiają prace na budową modelu symulacyjnego. Odbywa się to niestety kosztem objętości programu i pewnej „sztywności” opisu systemu,
- c) wybór i oprogramowanie generatorów liczb losowych i zmiennych losowych. W każdym stochastycznym modelu symulacyjnym rzeczą ogromnej wagi jest właściwy dobór generatorów liczb i zmiennych losowych, tak aby liczby uzyskane za pomocą generatora, czyniły zadość warunkom niezależności i równomierności w stopniu zadowalającym dla rozważanego zagadnienia,
- d) napisanie i sprawdzenie programu.

5. Weryfikacja i Walidacja Modelu

Proces weryfikacji i walidacji związany jest z trzema modelami: modelem konceptualnym, modelem logicznym i modelem komputerowym. *Weryfikacja* dotyczy wewnętrznej spójności modelu natomiast *walidacja* odnosi się do związków pomiędzy modelem a rzeczywistością. Nie ma pełnej i klarownej zgodności co to znaczy, że model jest wiarygodny. Najogólniej można powiedzieć, że wiarygodny model potrafi z dużą dokładnością przewidzieć przyszłe wydarzenia w systemie rzeczywistym. Wydaje się, że można zastosować dwa kryteria ustalania zasadności modeli symulacyjnych. Kryterium pierwsze dotyczy problemu, jak w sposób należyty porównać symulowane wartości zmiennych endogenicznych lub zmiennych na wyjściu ze znanymi danymi historycznymi? Kryterium drugie dotyczy pytania: w jakim stopniu są ściśle prognozy zachowania się rzeczywistego systemu oparte na modelu symulacyjnym, w odniesieniu do przyszłych okresów czasu?

6. Projektowanie Układu Eksperymentów

Celem prowadzenia badań symulacyjnych jest „dostarczenie informacji o zachowaniu się systemu, które byłyby użyteczne w procesach podejmowania decyzji”(por. [79, s16]). Wyniki procesu symulacji nie dostarczają wprost odpowiedzi na pytania odnoszące się do charakterystyk systemu. Wynikiem symulacji są zbiory danych, z których należy wyznaczyć

szukane charakterystyki. Zatem – wyniki symulacji muszą spełniać warunki prób losowych: muszą być reprezentatywne dla typowego zachowania systemu i muszą być odpowiednio liczne. Wyróżniamy dwa typy analiz symulacyjnych: „terminating analysis” i „steady state analysis”. Ta pierwsza odnosi się do sytuacji, kiedy koniec procesu symulacji jest zdefiniowany określonym zdarzeniem. Drugi typ analiz dotyczy systemów, dla których nie można wskazać zdarzenia kończącego proces symulacji. W obu typach analiz nacisk należy położyć na:

- d) dobór warunków początkowych (moment przybycia pierwszego klienta, długość kolejki),
- e) określenie okresu „rozgrzewania się” modelu,
- f) warunki końcowe: czas trwania eksperymentu, wyznaczenie wielkości próby,
- g) momenty gromadzenia danych,
- h) określenie liczby powtórzeń symulacyjnych.

Dwa pojęcia są ściśle związane z projektowaniem układu eksperymentów: *czynnik* oraz *reakcja*. Oba te pojęcia odnoszą się do zmiennych. To, czy dana zmienna występująca w konkretnym eksperymencie jest czynnikiem czy reakcją zależy od roli, którą zmienna ta spełnia w danym eksperymencie. Reakcją jest zwykle zmienna endogeniczna (obserwowana na wyjściu), natomiast czynnikiem jest zmienna egzogeniczna lub decyzyjna (obserwowana na wejściu).

Cztery główne problemy występujące w projektowaniu eksperymentów to:

(1) problem zbieżności stochastycznej.

Celem większości eksperymentów symulacyjnych jest uzyskanie informacji o wielkości populacji lub o jej wielkości przeciętnej. Przeciętne wartości z próby obliczone na podstawie eksperymentu symulacyjnego i traktowane jako estymacje przeciętnych wartości populacji, stają się przedmiotem losowych fluktuacji i nie będą się dokładnie równać przeciętnym wartościom populacji. Niemniej jednak, im większa jest próba, tym większe jest prawdopodobieństwo tego, że przeciętne wartości z próby będą bardziej dokładnie odpowiadać przeciętnym wartościom populacji. Zbieżność wartości przeciętnych z próby ze wzrostem wielkości próby zwana jest *zbieżnością stochastyczną*. Problem polega na tym, że zbieżność stochastyczna przebiega bardzo powoli. Jeżeli σ jest odchyleniem standardowym pojedynczej obserwacji, to odchyleniem standardowym przeciętnej wartości n obserwacji jest $\sigma / \sqrt{n}$. Stąd w celu zmniejszenia o połowę błędu losowego należy czterokrotnie zwiększyć

wielkość próby n . Istnieją jednak inne metody zmniejszenia błędu. Noszą one nazwę metod Monte Carlo.

(2) problem rozmiaru badania

Problem ten można nazwać „problemem zbyt wielu czynników”. Przy projektowaniu układu powiązań w przypadku występowania kilku czynników liczba wymaganych kombinacji określa iloczyn liczby poziomów wartości określonych dla każdego czynnika użytego w eksperymencie. Stąd, gdy wymagamy pełnego układu czynników, to rozwiązanie problemu nie istnieje. Jeżeli jednak zdecydujemy się na układ mniej kompletny, wtedy można opracować takie metody projektowania układu, które umożliwią realizację naszych celów i będą wymagać mniejszej liczby kombinacji niż tego wymaga metoda projektowania pełnego układu. W ramach *analizy wariancji* jedną z takich metod jest *metoda projektowania frakcji układu powiązań czynników*. W ramach *analizy regresji* możemy zastosować *metodę najmniejszych kwadratów*.

(3) problem motywu

Eksperymentator powinien określić swe cele tak ściśle jak to jest tylko możliwe, aby ułatwić wybór takiego układu, który by najlepiej te cele realizował. Ze statystycznego punktu widzenia istnieją dwa główne cele symulacji: *porównanie* wyników powiązanych z alternatywnymi warunkami działania oraz *wykrywanie i estymacja* funkcjonalnych powiązań, jakie istnieją między wejściowymi czynnikami ilościowymi a wynikami.

(4) problem reakcji wielokrotnej

Ten problem pojawia się wtedy, gdy chcemy obserwować wiele różnych zmiennych będących reakcjami w danym eksperymencie. Często problem reakcji wielokrotnych można ominąć, traktując eksperyment o wielu reakcjach jako wiele eksperymentów, w których w każdym z nich występuje reakcja pojedyncza. Można też dokonać kombinacji kilku reakcji i uważać ją za reakcję pojedynczą. Niemniej jednak ominięcie problemu reakcji wielokrotnych nie zawsze jest możliwe.

Ogólnie, w teorii planowania układu eksperymentów wyróżniają się dwa podejścia:

- a) *łączenie informacji a priori o systemie z danymi, które gromadzone są w trakcie trwania symulacji*. Podejście to polega na tym, że wyróżnia się czynniki, które (domyślamy się lub wiemy) mają wpływ na miary końcowe i przeprowadza się eksperymenty nadając tym

czynnikom różne (zbiory) wartości. Następnie stosuje się metodę redukcji wariancji, aby wybrać czynniki dla których ten wpływ można potwierdzić. Wadą tego podejścia jest fakt, że nie pozwala na znalezienie *najlepszego* rozwiązania ani nawet nie gwarantuje, że znalezione rozwiązanie jest optymalne lokalnie,

- b) *metody szukania rozwiązania optymalnego*. Podejście to najogólniej polega na tym, że przeprowadza się dużą liczbę badań symulacyjnych zmieniając zmienną decyzyjną i obserwuje się zmiany mierników działania systemu, aż do momentu kiedy zmiany ponownie następują w przeciwnym kierunku. Oznacza to, że znalezione zostało optimum lokalne.

7. Analiza wyników

W dobrze zaprojektowanym eksperymencie należy uwzględnić metody analizy danych. Większość klasycznych prac wyróżnia dwie metody: *analizę wariancji*, którą stosuje się gdy mamy do czynienia z czynnikami jakościowymi oraz *analizę regresji*, w której korzysta się z własności numerycznych występujących w wartościach przyjmowanych przez czynniki ilościowe.

ZAŁĄCZNIK 2 – GENEROWANIE LICZB PSEUDOLOSOWYCH I ZMIENNYCH LOSOWYCH

Liczby losowe

Symulacja dowolnego systemu lub procesu zawierającego elementy losowości, wymaga mechanizmu generowania lub uzyskiwania liczb losowych. Liczby losowe są ilościowym odbiciem losowości. Zasadniczą cechą liczb losowych jest to, że znajomość liczb występujących w przeszłości nie wpływa na skuteczność przewidywania liczb przyszłych, a szansa uzyskania kolejnej liczby przy kolejnej próbie nie ulega zmianie.

Ciąg liczb można uznać za ciąg liczb losowych jeśli spełnia on m.in. następujące warunki:

- częstotliwości pojawiania się w tym ciągu liczb z przedziałów jednakowej długości są jednakowe. Własność ta nosi nazwę *równomierności rozkładu*,
- elementy dowolnego podciągu złożonego z tych liczb są łącznie *niezależne* a każdy z nich ma rozkład jednostajny w przedziale $(0,N)$. Poszczególne liczby nie pojawiają się zatem w sposób okresowy.

Tablice liczb losowych

Jedną z metod generowania liczb losowych polega na przygotowaniu tablic liczb losowych, które można następnie przechowywać w komputerowej bazie danych. Przyjmując, że liczby te przeszczono przez różne testy, których zadaniem jest wykrycie odchyłeń od zjawisk niezależności i równomierności, należy oczekiwać, iż metoda ta pomoże w uzyskaniu właściwych pod względem statystycznym liczb losowych.

Publikowane tablice liczb losowych, spełniających wszystkie wymienione warunki, zawierają liczby cztero i pięciocyfrowe. Odczytywanie liczb z tablic liczb losowych można rozpocząć od dowolnego miejsca w tablicach, a kolejne liczby mogą być odczytywane po kolei wierszami lub kolumnami. W przypadku jednoczesnego symulowania kilku zjawisk losowych w ramach jednego zaleca się stosowanie odrębnych ciągów liczb losowych.

Słabą stroną tablicy liczb losowych jest to, że przechowywanie bazy liczb losowych konsumuje w znacznym stopniu zasoby pamięciowe komputera oraz, że może ona się wyczerpać zanim zakończy się proces generowania.

Generowanie liczb pseudolosowych

W praktyce nie da się pogodzić wymogów postawionych dla liczb losowych i w większości aktualnie stosowanych algorytmów generujących liczby losowe tworzy się nielosowe ciągi liczb nazywane *liczbami pseudolosowymi*. Generatory liczb pseudolosowych dostarczają ciągów liczb, które spełniają statystyczne własności jednakże są całkowicie deterministyczne (każda z liczb jest zdeterminowana przez poprzednią, zaś wszystkie te liczby są uzależnione od liczby początkowej). Znając konstrukcję generatora oraz jego parametry możemy bezbłędnie przewidzieć cały ciąg liczb. Takie podejście ma jednak swoje zalety, bowiem własności statystyczne uzyskanych ciągów liczb są zadowalające, a ponadto takie rozwiązanie pozwala na powtarzanie eksperymentu symulacyjnego w dokładnie takich samych warunkach wielokrotnie, co nie byłoby możliwe przy rezygnacji z determinizmu liczb produkowanych przez generatory.

Komputerowe generatory liczb losowych muszą posiadać następujące cechy:

- muszą mieć długi okres (musi minąć długi ciąg liczb, zanim ich kolejność zacznie się powtarzać),
- źródło powinno być efektywne,
- źródło powinno być odpowiednio gęste,
- powinna istnieć możliwość dokładnego powtórzenia ciągu liczb,
- generator musi być szybki i wymagać mało pamięci,
- generator musi produkować liczby pseudolosowe, które przejdą wszystkie testy losowości.

Komputerowe generatory liczb losowych wykorzystują ustalone wzory matematyczne i obliczają kolejne liczby na podstawie wartości liczb poprzednio wygenerowanych. Pierwsza liczba, zwana wartością początkową, jest zadawana przez programistę.

Generatory liczb pseudolosowych

Najczęściej używanymi obecnie generatorami liczb pseudolosowych są *generatory liniowe* oparte na kongruencji liczb (generatory LCG - *Linear congruential generators*; [52, 109]). Są to metody całkowicie zdeterminowane, gdyż procesy arytmetyczne stosowane w obliczeniach jednoznacznie determinują każdy wyraz w ciągu liczb. W istocie, znane są wzory obliczenia dokładnej wartości *i-tej* liczby występującej w ciągu liczb, zanim ciąg ten zostanie wygenerowany. Chociaż takie procesy nie są na ogół procesami losowymi, to jednak traktujemy je jak gdyby były one wynikiem logicznego stosowania pewnej liczby testów

statystycznych użytych do testowania różnych własności zmiennych losowych. Na przykład, jeżeli możemy wykazać, że liczby występujące w ciągu wydają się mieć rozkład równomierny i być w sensie statystycznym niezależnymi, to wtedy można założyć, że proces jest losowy, jeśli nawet byłby procesem zdeterminowanym. Można wykazać, że metody oparte na kongruencji liczb spełniają oba te wymagania w zadowalającym stopniu.

Matematyczną podstawą tych metod jest koncepcja *kongruencji*. Dwie liczby całkowite a i b są w *kongruencji z modulem* m , jeżeli ich różnica jest liczbą całkowitą, stanowiącą wielokrotność m . Relację kongruencji liczb zapisujemy jako $a \equiv b \pmod{m}$, co odczytuje się że „ a jest kongruentne z b modulo m ”. Oznacza to, że $a-b$ jest podzielone przez m i że a oraz b dają identyczne reszty, gdy dzieli się je przez $|m|$.

Ciągi liczb generowane metodą LCG są definiowane przez wzór rekurencyjny:

$$Z_i = (aZ_{i-1} + c) \pmod{m} \quad (i)$$

gdzie m (moduł), a (mnożnik), c (przyrost) a Z_0 (ziarno lub liczba startowa) są nieujemnymi liczbami całkowitymi.

Gdy a , c i m zostaną wybrane zgodnie z charakterystykami maszyny cyfrowej wówczas generatory LCG mogą być bardzo efektywne. Ich zaletą jest fakt, że bardzo łatwo można reprodukować wygenerowane ciągi. Wystarczy bowiem zapamiętać liczbę startową by odtworzyć cały strumień liczb. Kolejną zaletą jest to, że można w każdej chwili przerwać lub ponownie uruchomić proces generowania liczb bez obawy utraty kolejności - wystarczy zapamiętać ostatnio wygenerowaną liczbę. Własność ta jest szczególnie użyteczna gdy pragniemy kilkakrotnie powtórzyć eksperyment symulacyjny.

Gdy $c = 0$ generatory te nazywamy *multiplikatywnymi*, w przeciwnym przypadku *mieszanymi*. Generatory *multiplikatywne* wykazują bardzo dobre własności statystyczne. Oznacza to, że przy odpowiednim wyborze mnożnika a i wartości początkowej Z_0 , można generować takie ciągi liczb, które nie są ze sobą skorelowane i mają rozkład równomierny. Ponadto, przy zapewnieniu pewnych warunków dla a i Z_0 możemy zapewnić maksymalny okres ciągów generowanych tą metodą.

Korzyść ze stosowania generatora *mieszanego* polega na tym, że przy właściwym doborze a i c można otrzymać ciąg o takim okresie, który obejmuje pełny zbiór m różnych liczb. Drugą korzyścią jest to, że przy właściwym wyborze c możliwe jest zminimalizowanie korelacji serii. Jednak empiryczne wyniki stosowania metody mieszanej nie wykazały jej przewagi nad metodą multiplikatywną.

Generowanie liczb losowych o rozkładzie równomiernym

Zmienna losowa o rozkładzie równomiernym odgrywa centralną rolę w eksperymentach symulacyjnych. Za pomocą generatora liczb pseudolosowych generujemy liczbę x , która z takim samym prawdopodobieństwem przyjmuje każdą wartość z przedziału $(0, N)$. Zatem liczba x/N przyjmuje każdą wartość z przedziału $(0, 1)$ z takim samym prawdopodobieństwem. Oznacza to, że ma ona rozkład jednostajny określony na przedziale $(0, 1)$.

Generowanie zmiennych losowych

Kolejnym problemem jaki stoi przed twórcą modelu symulacyjnego jest konieczność generowania realizacji zmiennych losowych (a w dalszej kolejności generowanie ciągów odpowiadających procesom stochastycznym) o parametrach, które zostały wyestymowane poprzez badanie rzeczywistych zjawisk.

W praktyce stosuje się cztery sposoby generowania zmiennych losowych:

- metoda transformacji odwrotnej,
- metoda eliminacji,
- metoda kompozycji,
- metoda skrętu.

Metoda transformacji odwrotnej

Metoda transformacji odwrotnej jest najczęściej wykorzystywaną metodą generowania zmiennych losowych.

Biorąc pod uwagę procesy stochastyczne zawierające w sobie ciągłe lub dyskretne zmienne losowe, można określić $F(x)$, zwaną *dystrybuantą* x , która oznacza prawdopodobieństwo tego, że zmienna losowa X przyjmuje wartość mniejszą lub równą x . Jeśli zmienna losowa jest dyskretna, to x przyjmuje określone wartości, a $F(x)$ jest funkcją skokową. Jeśli $F(x)$ jest funkcją ciągłą w obszarze zmienności x , można tę funkcję różniczkować i określić funkcję $f(x)$ jako $dF(x)/dx$. Pochodną $f(x)$ nazywamy funkcją gęstości prawdopodobieństwa. W efekcie, dystrybuantę można określić jako:

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt,$$

gdzie $F(x)$ jest określona w przedziale $0 \leq F(x) \leq 1$, a $f(t)$ oznacza wartość funkcji gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej X , gdy $X = t$.

Jeżeli chcemy generować zmienne losowe x_i w ramach pewnej szczególnej populacji statystycznej, której funkcję rozkładu prawdopodobieństwa określamy przez $f(x)$, musimy najpierw otrzymać dystrybuantę rozkładu, czyli funkcję $F(x)$. Jeżeli funkcja $F(x)$ jest określona w przedziale od 0 do 1, możemy generować liczby o rozkładzie równomiernym (r) oraz ustalić, że $F(x) = r$. Jest oczywiste, że x jest określone jedynie przez $r = F(x)$. Wynika stąd, że dla każdej szczególnej wartości r , powiedzmy dla r_0 , którą generujemy, jest możliwe obliczenie wartości x , w tym przypadku x_0 , odpowiadającej r_0 , przez funkcję odwrotną do F , jeśli wiadome jest, że $x_0 = F^{-1}(r_0)$, gdzie $F^{-1}(r)$ jest *odwrotną transformacją* r na przedział jednostkowy w obszarze zmienności x . Możemy ująć tę metodę numerycznie stwierdzając, że jeśli generujemy liczby losowe o rozkładzie równomiernym, odpowiadające danej $F(x)$, to:

$$r = F(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt \text{ wówczas } P(X \leq x) = F(x) = P[r \leq F(x)] = p[F^{-1}(r) \leq x]$$

co w konsekwencji prowadzi do tego, że $F^{-1}(r)$ jest zmienną o rozkładzie gęstości prawdopodobieństwa określonym przez $f(x)$.

Generowanie rozkładów dyskretnych - rozkład niejednostajny

Przy danym prawdopodobieństwie pojawiania się określonych zdarzeń (por.tab.Z-1), wyznacza się wartości dystrybuanty empirycznej. Następnie generowana jest liczba losowa u i jej wartość porównywana jest z y . Jeżeli mieści się ona w przedziale $y_i < u \leq y_{i+1}$, $i = 0, 1, \dots, 4$, to za wynik bierze się wartość x_{i+1} .

Tabela Z-1. Przykładowe wartości funkcji prawdopodobieństwa i wyliczonej dystrybuanty empirycznej.

Liczba zdarzeń	Prawdopodobieństwo	Dystrybuanta empiryczna
x	$P(x)$	y
0	0	0
1	0.10	0.10
2	0.51	0.61
3	0.19	0.80
4	0.15	0.95
5	0.05	1.0

Rozkład Poissona

Można wykazać, że przy wykładniczym rozkładzie interwałów, prawdopodobieństwo nadejścia n zgłoszeń w przedziale o długości t dane jest wzorem:

$$P(n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Rozkład Poissona ma wielkie znaczenie praktyczne, gdyż opisuje on strumienie w wielu rodzajach systemów. Znajduje on również zastosowanie w teorii masowej obsługi, ponieważ założenie, że chwila nadejścia zgłoszenia nie zależy od poprzednich zgłoszeń pozwala w szeregu przypadków uzyskać rozwiązanie analityczne. Rozkład Poissona stosowany jest również do opisu procesu obsługi. Jeżeli czas obsługi jest traktowany jako całkowicie przypadkowy, to można go przedstawić za pomocą rozkładu wykładniczego. Związany z nim rozkład Poissona określa liczbę zgłoszeń obsłużonych w danym przedziale czasu.

Algorytm generowania kolejnych momentów przybycia zgłoszenia jest bardzo prosty.

Zalóżmy, że znamy wartość procesu w chwili t_{i-1} , wtedy wartość w chwili t_i uzyskujemy w następujący sposób :

1. Wygenerować $U \sim U(0,1)$ niezależną od poprzednich wartości zmiennej.
2. $t_i = t_{i-1} - \frac{\ln U}{\lambda}$, gdzie λ jest intensywnością.

Rozkład jednostajny

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{dla } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{dla } b \leq x \end{cases}$$

$$U = F(x), \text{ czyli } U = \frac{X - a}{b - a} \text{ czyli, } X = a + (b - a)U$$

W celu obliczenia X najpierw generujemy U , a następnie wykorzystujemy powyższy wzór.

Rozkład wykładniczy

Strumienie zgłoszeń są zazwyczaj opisywane za pomocą odstępu czasu między kolejnymi zgłoszeniami zwanego *interwałem*. Jeśli strumień zgłoszeń nie wykazuje zmienności, to interwał jest oczywiście stały. W przypadku gdy zgłoszenia są losowe, to interwał jest również zmienną losową i należy określić jego funkcję prawdopodobieństwa. Dwa zgłoszenia

(lub więcej) mogą się pojawiać jednocześnie. Jeżeli n zgłoszeń jest jednoczesnych, to $n-1$ zgłoszeń ma interwał równy zero.

Zgłoszenia bywają najczęściej całkowicie przypadkowe. Ogólnie mówiąc znaczy to, że mogą nastąpić w dowolnej chwili, z jedynym ograniczeniem, że musi być zachowane średnie natężenie zgłoszeń. Ścisłej mówiąc, oznacza to przyjęcie założenia, że czas nadejścia zgłoszenia jest niezależny od poprzednich zgłoszeń, a prawdopodobieństwo zgłoszenia w przedziale dt jest proporcjonalne do długości tego przedziału. Przy tych założeniach można wykazać, że rozkład interwałów jest wykładniczy. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa interwału dana jest wzorem:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0$$

Dystrybuanta rozkładu wykładniczego ma postać

$$F(t) = y = 1 - e^{-\lambda t}$$

Jej funkcja odwrotna jest:

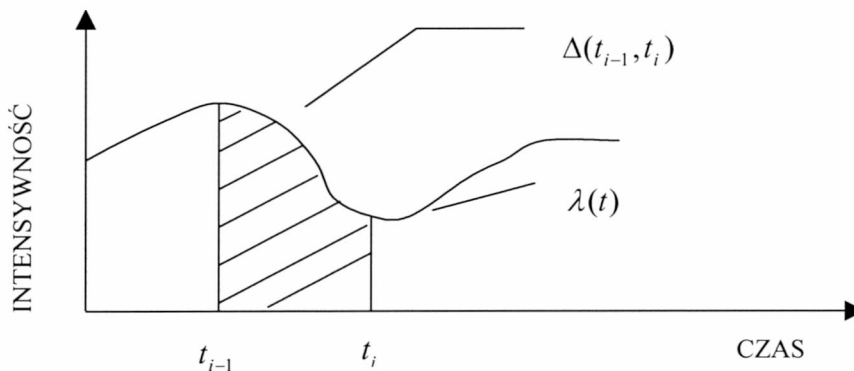
$$\lambda t = -\ln(1 - y)$$

Podstawiając pod y ciąg liczb losowych o rozkładzie jednostajnym przedziału 0-1 otrzymujemy ciąg liczb losowych o rozkładzie wykładniczym. Jeżeli liczby y mają rozkład jednostajny, to taki sam rozkład mają liczby $1-y$. Tak więc można użyć prostszego wzoru:

$$\lambda t = -\ln(y)$$

ZAŁĄCZNIK 3 - MODELOWANIE STRUMIENIA INTENSYWNOŚCI NAPŁYWANIA ZGŁOSZEŃ

Podstawy teoretyczne algorytmu symulacji stochastycznej według rozkładu wykładniczego ze zmiennymi parametrami zostały przedstawione w [97]. Oznaczmy $\lambda(t)$ jako chwilową wartość intensywności napływania zgłoszeń w chwili t . Oczekiwana liczba zgłoszeń w okresie (t_{i-1}, t_i) wynosi $\Delta(t_{i-1}, t_i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \lambda(t) dt$, por. rys.Z-2. (1)



Rys.Z-2. Intensywność napływania zgłoszeń jako rozkład zmiennej losowej o zmiennych parametrach.

Jeżeli założymy, że t_{i-1} to czas przybycia aktualnie rozpatrywanego zgłoszenia, to celem naszym jest obliczenie czasu przybycia następnego zgłoszenia, czyli T_i . Symulowana dystrybuanta warunkowa dla T_i zależnego od t_{i-1} wynosi:

$$F_{T_i/t_{i-1}}(t_i) = P(T_i \leq t_i / T_i > t_{i-1}) = 1 - P(T_i > t_i / T_i > t_{i-1})$$

Wyrażenie $P(T_i > t_i / T_i > t_{i-1})$ oznacza prawdopodobieństwo tego, że w okresie (t_{i-1}, t_i) do systemu nie przybędzie żadne zgłoszenie. Ponieważ momenty przybywania zgłoszeń przybliżamy rozkładem Poissona, zatem $F_{T_i/t_{i-1}}(t_i) = 1 - \exp(-\Delta(t_{i-1}, t_i))$ (2)

$$\text{Podstawiając } F_{T_i/t_{i-1}}(t_i) = u, \quad (3)$$

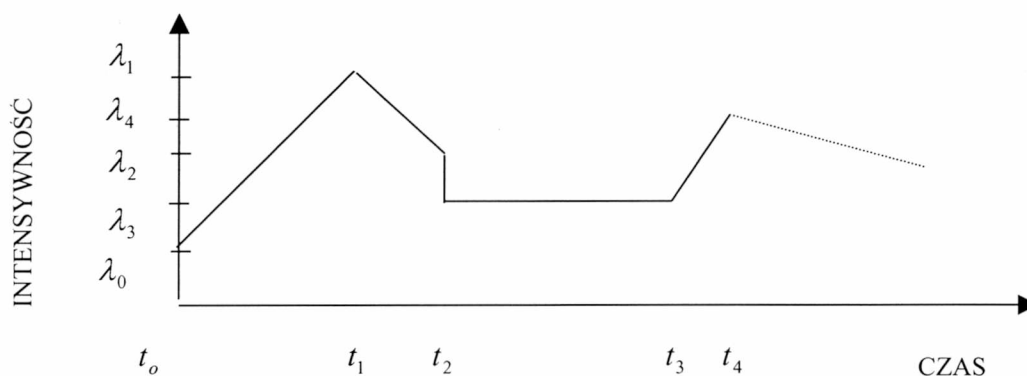
$$\text{uzyskujemy } -\ln(1 - u) = \Delta(t_{i-1}, t_i). \quad (4)$$

Równanie to ukazuje zależność szukanego rozwiązania od wartości $\lambda(t)$.

Rozważmy dalej następującą funkcję liniową (rys.Z-3). Funkcja ta jest opisana przez następujące współrzędne punktów brzegowych odcinków $(t_0, \lambda_0), (t_1, \lambda_1), \dots$. Każdy z

t_j odcinków funkcji ma postać $a_j t + b_j$. Na dowolnym odcinku k funkcji mamy, na podstawie równania (1):

$$\Delta(t_{i-1}, t_i) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} (a_k t + b_k) dt, \text{ lub } \Delta(t_{i-1}, t_i) = (a_k / 2)(t_i^2 - t_{i-1}^2) + b_k(t_i - t_{i-1})$$



Rys.Z-3. Liniowa funkcja intensywności zgłoszeń.

Zakładając, że T_i przypadnie wewnątrz rozważanego okresu mamy na podstawie równania

(3): $u = 1 - \exp[-(a_k / 2)(T_i^2 - t_{i-1}^2) - b_k(T_i - t_{i-1})]$, czyli

$$T_i = (-b_k + \sqrt{b_k^2 + a_k^2 t_{i-1}^2 + 2a_k b_k t_{i-1} - 2a_k \ln(1-u)}) / a_k, \text{ gdy } a_k \neq 0.$$

Gdy $a_k = 0$ wtedy $T_i = t_{i-1} - \ln(1-u) / b_k$.

Jeżeli T_i przekroczy rozważany interwał czasowy, to spełnione będzie równanie:

$$\Delta(t_{i-1}, t_i) = \Delta(t_{i-1}, t_k) + \Delta(t_k, t_i)$$

A zatem, na podstawie równania (4): $-\ln(1-u) = -\ln(1-u_k) - \ln(1-u')$.

u_k uzyskamy podstawiając $T_i = t_k$.

Przekształcając powyższą równość uzyskujemy $u' = (u - u_k) / (1 - u_k)$, a zatem:

$$T_i = (-b_{k+1} + \sqrt{b_{k+1}^2 + a_{k+1}^2 t_k^2 + 2a_{k+1} b_{k+1} t_k - 2a_{k+1} \ln(1-u')}) / a_{k+1}, \text{ dla } a_k \neq 0.$$

Gdy $a_k = 0$, wyrażenie redukuje się do stałej.

Algorytm symulacji stochastycznej według rozkładu wykładniczego ze zmiennymi parametrami jest następujący:

(1) Odczytaj wartość liczby losowej u na podstawie rozkładu równomiernego w przedziale

$(0,1)$,

(2) Zakładając, że t_{i-1} przypada na odcinek k , oblicz

$$u_k = 1 - \exp[-(a_k / 2)(t_k^2 - t_{i-1}^2) - b_k(t_k - t_{i-1})]$$

(3) Jeżeli $u \leq u_k$ to zakończ po obliczeniu T_i :

$$T_i = (-b_k + \sqrt{b_k^2 + a_k^2 t_{i-1}^2 + 2a_k b_k t_{i-1} - 2a_k \ln(1-u)}) / a_k, \quad \text{gdy } a_k \neq 0$$

$$T_i = t_{i-1} - \ln(1-u) / b_k, \quad \text{gdy } a_k = 0.$$

(4) Jeżeli $u > u_k$ to

$$u = (u - u_k) / (1 - u_k)$$

$$t_{i-1} = t_k$$

$$k = k + 1$$

i wróć do kroku (3) podstawiając pod u_k wartość policzoną dla całego odcinka k .

SPIS TABEL

Tabela 1.1	Zgony z powodu urazów i zatruc w wybranych krajach Europy. Wskaźniki na 100 tys. ludności danej płci. Dane wg [91] z 1990-1991 roku; Polska i Czechy z 1992
Tabela 1.2	Zgony na 10 tys. ludności w wyniku urazów i zatruc w latach 1970-1994 (wg [148])
Tabela 1.3	Pomoc doraźna cywilnej służby zdrowia, wg [148]
Tabela 1.4	Wyjazdy do zachorowań i wypadków, wg [148]
Tabela 4.1	Tabela kodów gmin
Tabela 4.2.	Tabela kodów osiedli
Tabela 4.3	Fragment tabeli z nazwami ulic
Tabela 4.4.	Fragment macierzy połączeń komunikacyjnych pomiędzy osiedlami
Tabela 4.5	Fragment macierzy odległości pomiędzy sąsiadującymi ze sobą osiedlami
Tabela 4.6	Dane lokalizacyjne podstacji
Tabela 4.7	Dane lokalizacyjne oddziałów
Tabela 4.8	Fragment tabeli z danymi lokalizacyjnymi jednostek leczących
Tabela 4.9.	Liczba zgłoszeń pochodzących z poszczególnych osiedli. Fragment tabeli
Tabela 4.10	Fragment tabeli ze średnią liczbą zgłoszeń napływających do systemu w ciągu doby – dane źródłowe
Tabela 4.11	Rozmieszczenie zespołów wyjazdowych w podstacjach i harmonogram pracy. Fragment tabeli
Tabela 4.12	Specyfikacja jednostek leczących pełniących ostry dyżur dla każdego osiedla w dni robocze (DR), świąteczne (DS) i wolne soboty (WS). Fragment tabeli
Tabela 4.13	Kody powodów wezwań
Tabela 4.14	Kody zagrożeń
Tabela 4.15	Zależność pomiędzy powodem wezwania a charakterem zagrożenia
Tabela 4.16	Fragment tabeli zależności pomiędzy powodem wezwania a rozpoznaniem

Tabela 4.17	Procent zgłoszeń z każdej gminy trafiający do systemu opieki zdrowotnej oraz do systemu mpd
Tabela 4.18	Procent zgłoszeń trafiających z poszczególnych gmin do podstacji
Tabela 4.19	Procent zgłoszeń przekazywanych z Centrum do poszczególnych podstacji
Tabela 4.20	Podział zgłoszeń na kategorie
Tabela 4.21	Fragment tabeli parametrów czasu obsługi na miejscu wezwania
Tabela 4.22	Fragment tabeli procentowej wielkości przypadków hospitalizowanych
Tabela 4.23	Liczba zgłoszeń zaobserwowanych w poszczególnych godzinach doby z podziałem na gminy i typ dnia, według 4415 zebranych w styczniu 1995 roku
Tabela 4.24	Średnia liczba zgłoszeń w każdym okresie w ciągu jednego dnia, z podziałem na gminy i typ dnia. Estymatory oczekiwanej liczby zgłoszeń w ciągu wyróżnionych okresów oraz wartości parametru λ , mierzonego w ilości zgłoszeń na godzinę.
Tabela 4.25	Określanie minimalnej liczby powtórzeń do wyznaczenia średniego czasu oczekiwania zgłoszenia na karetkę
Tabela 4.26	Wyniki testu χ^2 dla hipotezy, że rozkład czasów pomiędzy zgłoszeniami w gminie 93003 w godz. 17:00-18:00 w dni robocze jest rozkładem wykładniczym.
Tabela 4.27	Wyniki testu χ^2 dla hipotezy, że rozkład liczby zgłoszeń w gminie 93003 w godz. 17:00-18:00 w dni robocze jest rozkładem Poissona
Tabela 4.28	Wyniki analizy wrażliwości dla dwóch wskaźników działania systemu: ONW (średniego czasu odpowiedzi na wezwanie) oraz SRS (szybkości reagowania systemu, tj procentu zgłoszeń dla których czas reakcji przekroczył 30 minut)
Tabela 4.29	Test dwóch średnich dla wskaźnika średniego czasu oczekiwania na zespół
Tabela 5.1	Przykładowy rekord danych wynikowych bazy PACJENT – atrybuty jednego Zgłoszenia
Tabela 5.2	Przykładowy rekord danych wynikowych bazy ZESPÓŁ– atrybuty jednego wyjazdu Zespołu do Zgłoszenia
Tabela 5.3	Eksperyment bazowy. Czas oczekiwania na przyjazd zespołu w gminach
Tabela 5.4	Eksperyment bazowy. Czas oczekiwania na przyjazd zespołu w osiedlach
Tabela 5.5	Eksperyment bazowy. Osiedla o największej zaobserwowanej liczbie zgłoszeń

Tabela 5.6	Eksperyment nr 1. Czas oczekiwania na przyjazd zespołu po przeniesieniu jednego zespołu z oddziału O7, obsługującego gminę 93007 do oddziału O8, obsługującego gminę 93001 i 93005
Tabela 5.7	Eksperyment nr 2. Czas oczekiwania zgłoszeń „R-kowych” na przyjazd zespołu po reorganizacji stref polegającej na zwiększeniu regionu obsługiwanego przez oddział O13 o kilka stref gminy 93001 będących dotychczas pod opieką oddziału O2
Tabela 5.8	Eksperyment nr 3. Czas oczekiwania zgłoszeń „R-kowych” na przyjazd zespołu po zwiększeniu liczby zespołów w oddziale „R-kowym” O2. Dane dla zgłoszeń pilnych, uśrednione dla wszystkich gmin
Tabela 5.9	Średni czas oczekiwania na zespół i procent zgłoszeń czekających na przyjazd karetki dłużej niż 10 minut. Gmina 93009, dzień roboczy w godzinach 14:00-15:00.
Tabela 5.10	Osiedla o największej zaobserwowanej liczbie zgłoszeń
Tabela 5.11	Czas oczekiwania na przyjazd zespołu w gminach po dodaniu dwóch nowych oddziałów....
Tabela 5.12	Czas oczekiwania na przyjazd zespołu w osiedlach po utworzeniu oddziału w strefie 31
Tabela 5.13	Czas oczekiwania na przyjazd zespołu w gminach po zwiększeniu udziału zgłoszeń „R”-kowych w globalnej liczbie zgłoszeń z danej gminy. Intensywność napływania zgłoszeń nie uległa zmianie
Tabela 5.14	Średni czas oczekiwania na zespół i procent zgłoszeń czekających na przyjazd karetki dłużej niż 15 minut. Intensywność zwiększona o 100%
Tabela 5.15	Średni czas oczekiwania na zespół i procent zgłoszeń czekających na przyjazd karetki dłużej niż 15 minut. Intensywność zwiększona o 10%
Tabela 5.16	Średni czas oczekiwania na zespół i procent zgłoszeń czekających na przyjazd karetki dłużej niż 15 minut
Tabela Z-1	Przykładowe wartości funkcji prawdopodobieństwa i wyliczonej dystrybuanty empirycznej

SPIS RYSUNKÓW

- Rys.2.1 Przeżywalność chorych z urazami mnogimi w zależności od czasu rozpoczęcia leczenia kwalifikowanego – „złota godzina”, wg [157]
- Rys.2.2 Czasowa struktura zdarzeń w systemie ratownictwa medycznego
- Rys. 3.1 Relacja System- Model- Symulacja
- Rys. 3.2 Zdarzenia, procesy jednostkowe, proces symulacji
- Rys.4.1 Podział obszaru Systemu na Gminy i na Osiedla
- Rys.4.2 Podział Jednostek Ratunkowych na Podstacje i Oddziały
- Rys.4.3 Obsługa Osiedli przez poszczególne typy Oddziałów
- Rys.4.4 Przydział Osiedli do poszczególnych Szpitalnych Oddziałów Ratunkowych
- Rys.4.5 Powiązania pomiędzy zdarzeniami i procesami jednostkowymi. Zdarzenia główne wyróżniono. Linia kropkowaną zaznaczono opcjonalną część procesu 4 (przewóz do SOR)
- Rys. 4.6 Przykładowy model powiązań pomiędzy obiektami struktury Systemu
- Rys.4.7 Przykładowe zmiany stanu Systemu
- Rys.4.8 Zmiany stanu Systemu przy uwzględnieniu tylko jednej pary obiektów STAN_NAGŁY-ZGŁOSZENIE
- Rys. 4.9 Związek pomiędzy typami zdarzeń podstawowych a zmianą stanów Systemu
- Rys.4.10 Algorytm podstawowego procesu symulacji modelu RAMD
- Rys. 4.11 Zależność i niezależność parametrów opisujących atrybuty zgłoszenia
- Rys. 4.12 Schemat momentów planowania kolejnych zdarzeń
- Rys.4.13 Schemat wielopłaszczyznowej walidacji i weryfikacji modeli symulacyjnych
- Rys.4.14 Analiza wpływu warunków początkowych – liczba zgłoszeń jednocześnie przebywających w systemie w poszczególnych godzinach. Wyniki 5 powtórzeń 5-cio dniowych
- Rys.4.15 Analiza wpływu warunków początkowych – średnia liczba zgłoszeń jednocześnie przebywających w systemie w poszczególnych godzinach. Wyniki uśrednione dla 5 powtórzeń

- Rys.4.16 Średnie ruchome dla liczby zgłoszeń jednocześnie przebywających w systemie
- Rys.4.17 Graficzne porównanie histogramu czasów pomiędzy kolejnymi zgłoszeniami w gminie 93003 w okresie od 17:00 do 18:00 w dni robocze z wykresem funkcji gęstości rozkładu wykładniczego o parametrze $1/\lambda = 22.9$ min
- Rys.4.18 Graficzne porównanie histogramu liczby zgłoszeń w gminie 93003 w okresie od 17:00 do 18:00 w dni robocze z wykresem funkcji prawdopodobieństwa rozkładu jednostajnego w przedziale (0.5, 58.5)
- Rys.5.1 Eksperyment bazowy. Rozkład procentowy liczby zgłoszeń oczekujących na zespół w poszczególnych przedziałach minutowych
- Rys.5.2 Eksperyment bazowy. Dystrybuanta skumulowana – procent zgłoszeń z każdej gminy, do których zespół dotarł w ciągu X minut
- Rys.5.3 Eksperyment bazowy. Procentowe obciążenie poszczególnych oddziałów
- Rys.5.4 Eksperyment bazowy. Procentowe obciążenie poszczególnych zespołów
- Rys.5.5 Eksperyment bazowy. Czas oczekiwania na zespół dla zgłoszeń R-kowych
- Rys.5.6 Eksperyment bazowy. Średni czas oczekiwania na zespół w poszczególnych osiedlach. Zestawienie najkrótszych średnich czasów
- Rys.5.7 Eksperyment bazowy. Średni czas oczekiwania na zespół w poszczególnych osiedlach. Zestawienie najdłuższych średnich czasów
- Rys.5.8 Rozkład procentowy liczby zgłoszeń oczekujących na zespół w poszczególnych przedziałach minutowych w eksperymencie nr 1
- Rys.5.9 Procentowe obciążenie poszczególnych oddziałów „R-kowych” przed reorganizacją
- Rys.5.10 Procentowe obciążenie poszczególnych oddziałów po reorganizacji podziału regionu na strefy obsługi
- Rys.5.11 Średni czas oczekiwania zgłoszeń R-kowych na przyjazd zespołu przed reorganizacją stref. Dane uśrednione dla wszystkich gmin
- Rys.5.12 Średni czas oczekiwania zgłoszeń R-kowych na przyjazd zespołu po reorganizacji stref. Dane uśrednione dla wszystkich gmin
- Rys.5.13 Procentowe obciążenie poszczególnych oddziałów po zwiększeniu liczby zespołów w oddziale O2 z dwóch do trzech

- Rys.5.14 Procentowe obciążenie poszczególnych zespołów po zwiększeniu liczby karetek w oddziale O2 z dwóch do trzech
- Rys.5.15 Rozkład procentowy liczby zgłoszeń oczekujących na zespół w poszczególnych przedziałach minutowych w eksperymencie nr 3. Dane dla zgłoszeń pilnych, uśrednione dla wszystkich gmin
- Rys.5.16 Rozkład procentowy czasu oczekiwania na przyjazd zespołu w przypadku zwiększonej intensywności zgłoszeń. Gmina 93009, dzień roboczy w godzinach 14:00 do 15:00.
- Rys.5.17 Średni czas oczekiwania na zespół w poszczególnych osiedlach po utworzeniu oddziału w strefie 31. Zestawienie najdłuższych średnich czasów
- Rys.5.18 Czas oczekiwania na zespół dla zgłoszeń R-kowych po zwiększeniu udziału zgłoszeń pilnych w globalnej liczbie zgłoszeń z danej gminy. Intensywność napływania zgłoszeń nie uległa zmianie
- Rys.5.19 Czas oczekiwania na zespół „R” w gminie 93003 przed (a) i po (b) zwiększeniu udziału zgłoszeń pilnych w globalnej strukturze wezwań
- Rys.5.20 Średnia liczba zgłoszeń obsługiwanych w oddziale O2 w poszczególnych godzinach doby
- Rys.5.21 Średnia liczba zgłoszeń obsługiwanych w oddziale O3 w poszczególnych godzinach doby
- Rys.5.22 Obciążenie poszczególnych oddziałów po wprowadzeniu zmian do harmonogramu pracy zespołów w O2 i O3
- Rys.Z-1 Etapy modelowania symulacyjnego
- Rys.Z-2 Intensywność napływania zgłoszeń jako rozkład zmiennej losowej o zmiennych parametrach
- Rys.Z-3 Liniowa funkcja intensywności zgłoszeń