

DYT CZAK Mirosław<sup>1</sup>  
GINDA Grzegorz<sup>2</sup>

## Użyteczność systemów „szarych” w transporcie i logistyce

### WSTĘP

Teoria systemów szarych Julong Denga [13,14,43] została opracowana z myślą o analizie współczesnych systemów, przy uwzględnieniu informacji o niepewnym i niepełnym charakterze. W szczególności teoria systemów szarych dostarcza narzędzia pozwalające analizować zagadnienia związane z dostępnością skąpej, w dodatku niedoskonałej, informacji. Dzięki zastosowaniu odpowiednich procedur pozwala na podstawie częściowo tylko znanej informacji generować, doszukiwać się, docierać i wyodrębniać dodatkową, dotychczas niejawną, użyteczną informację. Ułatwia to modelowanie i monitorowanie zachowania rzeczywistych systemów oraz opisywanie praw rządzących ich zmianami. Zauważmy przy tym, że rzeczywiste systemy charakteryzuje dostępność skąpej, niedoskonałej informacji. Dlatego też narzędzia teorii systemów szarych dostarczają środków umożliwiających modelowanie takich systemów.

Wewnętrznie złożony charakter systemów logistycznych i transportowych oraz uwarunkowania zewnętrzne, związane z wpływem procesów logistycznych i transportowych na otoczenie i wpływu otoczenia na nie sprawiają, że także w przypadku takich systemów występuje z koniecznością korzystania z informacji o ograniczonym, skąpym i niedoskonałym charakterze. W istocie systemy takie mają więc „szary” charakter, w sensie dostępnej informacji na ich temat i na temat oddziaływań otoczenia na nie i ich na otoczenie. Rozwiązanie zagadnień decyzyjnych związanych z takimi systemami można więc znacząco ułatwić dzięki zastosowaniu odpowiednich narzędzi teorii systemów szarych.

W artykule przedstawiono podstawy teorii systemów szarych i udostępniane przez nią użyteczne narzędzia. Zasygnalizowano również możliwości ich zastosowania do wspomagania rozwiązywania zagadnień decyzyjnych w logistyce i transporcie.

### 1. CHARAKTER SYSTEMÓW „SZARYCH”

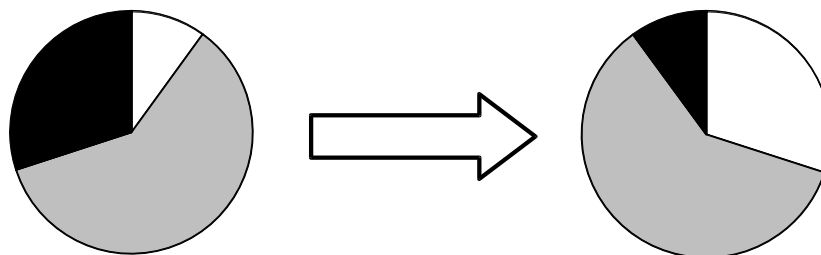
Teoria systemów szarych dzieli dostępną informację na: „białą” – pewną, „czarną” – niepewną oraz „szarą” – o pośrednim charakterze. To właśnie uwzględnienie informacji o tak zróżnicowanym charakterze ułatwia modelowanie dowolnych systemów. Zasadnicza idea zastosowania teorii polega na pozyskaniu z dostępnej, niepewnej i niepełnej informacji, dodatkowej informacji o „białym” i „szarym” charakterze, odpowiednio kosztem informacji „szarej” i „czarnej” (rys.1). Jest to równoznaczne z redukcją udziału informacji „czarnej” – niepewnej. Do odkrywania informacji służą operatory „wybielania” (ang. whitening).

Systemy „szare” są stosowane dla uwzględniania niedoskonałości dostępnej informacji. Zwróćmy przy tym uwagę na to, że w odróżnieniu od innych narzędzi służących podobnemu celowi, np. zbiorów rozmytych, niedoskonałość informacji jest uwzględniana w przypadku zbiorów rozmytych w zupełnie inny sposób. Zauważmy, że do zastosowania liczb rozmytych jest wymagane subiektywne określenie ich wewnętrznej (trapezowej, trójkątnej lub dzwonowej postaci). Założenia konkretnej postaci wewnętrznej nie wymaga się przy zastosowaniu systemów „szarych”. W ich przypadku wystarcza bowiem w zupełności określenie granic liczb. Ponieważ granice takie można bardziej precyzyjnie określić niż właściwą postać wewnętrzną liczb to zastosowanie liczb „szarych” wydaje się bardziej uzasadnione. Zauważmy, że brak konieczności określenia wewnętrznej postaci liczb

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Katedra Zarządzania w Energetyce, Pracownia Zastosowań Metod Wielokryterialnych; 30-067 Kraków; ul. Gramatyka 10. Tel: + 48 12 617-43-21, mdytczak@gmail.com, mdytczak@zarz.agh.edu.pl

<sup>2</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Katedra Zarządzania w Energetyce, Pracownia Zastosowań Metod Wielokryterialnych; 30-067 Kraków; ul. Gramatyka 10. Tel: + 48 12 617-43-21, gg.ginda@gmail.com, gginda@zarz.agh.edu.pl

„szarych” skutkuje jeszcze jedną ich unikalną cechą. Polega ona na przetwarzaniu niedoskonałej, skądinąd, informacji w prosty, dokładny i jednoznaczny sposób.



**Rys. 1** Ilustracja procesu „wybielania” informacji w teorii systemów „szarych”

## 2. RODZAJE NARZĘDZI SYSTEMÓW „SZARYCH”

Teoria systemów „szarych” dostarcza licznych narzędzi, służących różnym celom. Wykorzystywane są przy tym specyficzne obiekty: liczby „szare” (ang. Grey Number), stopień „szarości” (ang. Grey Degree), a także operatory: „wybielania” (ang. Whitening) i sekwencji (ang. Sequence Operator) oraz proces generowania sekwencji. Cele stosowania systemów „szarych” są osiągnięte dzięki zastosowaniu następujących koncepcji [46]:

- „Szarego” wpływu (ang. Grey Incidence) i oceny (ang. Grey Evaluation).
- „Szarego” modelowania systemów (ang. Grey Systems Modeling).
- Dyskretnych modeli „szarego” przewidywania (ang. Discrete Grey Prediction Models).

Kombinowanych modeli „szarych” (ang. Combined Grey Model), wykorzystujących elementy: modeli ekonometrycznych (ang. Grey Econometric Model), liniowej regresji (ang. Combined Grey Linear Regression Model) i Cobba-Douglasa (ang. Grey Cobb-Douglas Model), sztucznych sieci neuronowych (ang. Grey ANN Model), Markowa (ang. Grey Markov Model), liczb przybliżonych (ang. Combined Grey-Rough Model).

- „Szarych” modeli podejmowania decyzji (ang. Grey Model for Decision Making).
- Modeli „szarych” gier (ang. Grey Game Model).
- Systemów „szarego” sterowania.
- Teoria systemów „szarych” pozwala więc realizować zróżnicowane rodzaje zagadnień. Przykładowo, w [44] wyróżniono następujące grupy zastosowań:
- Analizę wpływu.
- Badanie skupień.
- Prognozowanie.
- Podejmowanie decyzji.
- Cybernetykę i inteligentne systemy.

W praktyce najczęściej znajduje zastosowanie „szara” analiza relacyjna (ang. Grey Relational Analysis, GRA). Wykorzystuje ona informację o podobieństwie i różnicach między seriami danych, opisujących rozważane obiekty. Dzięki temu obiekty te można rangować. Spośród innych zastosowań „szarego” modelowania można wyróżnić zastępowanie modeli regresyjnych modelami nieliniowymi a modeli stochastycznych procesami „szarymi”, modeli różniczkowych modelami „szarymi”, prognozowania na podstawie szeregów czasowych prognozowaniem „szarym”, a także „zwyczajnego” wspomaganie decyzji wspomaganie „szarym”. Rozwój teorii systemów szarych zaowocował również osiągnięciami w teorii mechanizmów, w dziedzinie sztucznej inteligencji – nad funkcjami wyrażającymi emocje i zmysły, a także uzupełnieniem aparatu matematyki o „szare” relacje, elementy i liczby.

Zalety i zróżnicowanie narzędzi systemów „szarych” powodują, że narzędzia te są coraz chętniej stosowane do rozwiązywania zróżnicowanych zagadnień decyzyjnych związanych z wyłącznym dostępem informacji o niedoskonałym charakterze. O dynamicznym charakterze upowszechniania tych narzędzi świadczy cykl publikacji poświęconych rozwojowi zastosowań [12,45,69].

Przypatrzmy się teraz baczniej współczesnym zastosowaniom teorii systemów „szarych” w logistyce i transporcie. Przegląd rozpoczniemy od tej drugiej dziedziny.

### 3. ZASTOSOWANIA W TRANSPORCIE

Po pierwsze mamy do czynienia z naturalnym przenoszeniem na grunt systemów szarych zagadnień badań operacyjnych np. znanego zagadnienia transportowego [1]. Po drugie, licznie są reprezentowane modele prognostyczne. Wiążą się one z szacowaniem przepustowości ładunkowej portu [16], krótkoterminowego prognozowania natężenia ruchu – przy użyciu analizy spektralnej i procedury analizy skupień  $k$  najbliższych sąsiadów [21] oraz specjalnego – „szarego” modelu opóźnień w ruchu [22], wielkości przewozów lotniczych przy użyciu „szaro”-neuronowego łańcucha Markowa [48] oraz rozwoju motoryzacji [74] przy zastosowaniu modelu „szarego”.

Trzecia grupa tematyczna dotyczy wpływu transportu na środowisko. Reprezentują ją prace poświęcone wpływowi wprowadzanych regulacji prawnych na zanieczyszczanie środowiska [30], prognozowaniem jakości powietrza w tunelu drogowym dzięki zastosowaniu złożonego modelu prognostycznego [32], zmianom w jakości powietrza [50].

W ramach czwartej grupy są rozważane zagadnienia zarządzania ryzykiem w transporcie przy wykorzystaniu GRA i geograficznego systemu informacyjnego GIS [19], oceną ryzyka związanego z tranzytowym transportem niebezpiecznych ładunków przez obszar zurbanizowany [60], a także oceną hierarchicznego systemów portów rzecznych przeznaczonych do przeładunku niebezpiecznych surowców i produktów przemysłu petrochemicznego [71] dokonaną dzięki zastosowaniu teorii ekonomicznej katastrofy oraz „szarej” analizy skupień.

Piątą grupę prac poświęcono zagadnieniom: projektowania systemów zapewnienia bezpieczeństwa inteligentnemu transportowi [25], wyboru wariantu skrzyżowania drogowego [28] i planowania systemu połączeń między głównymi miastami a ich satelitami [55].

Część prac poświęcono także wszechstronnej ocenie efektywności krajowych i międzynarodowych linii lotniczych [38], jakości usług świadczonych przez miejski transport publiczny [61] oraz ocenie kolejowego transportu węgla [37] przy zastosowaniu „szarych” skupień.

### 4. ZASTOSOWANIA W LOGISTYCE

Pośród zastosowań teorii systemów „szarych” czołową rolę pełni tematyka wyboru dostawców i pokrewna. W pracach Bai i Sarkisa [2,3] oraz Li i innych [34,35] zintegrowano w tym celu system „szary” z metodyką zbiorów przybliżonych. Dou i inni [15] dokonali oceny programów rozwoju proekologicznych dostawców, wykorzystując do tego „szary” wariant analizy sieciowej procesów – ANP Saaty’ego. Sahu i inni [52] zaproponowali utworzenie platformy oceny takich dostawców. W artykule Golmohammadi i Mellat-Parast [20] zbudowano „szary” model wyboru dostawców. He i Chen [24] zaadaptowali systemy „szare” do modelowania sytuacji konfliktowych pojawiających się między wytwórcami a dostawcami. Artykuł Lina i innych [40] poświęcono określeniu kluczowych czynników powodzenia w wyborze importerów i eksporterów. Yuan i inni [68] poruszyli zagadnienie dynamicznego zarządzania ryzykiem związanym z dostawcami.

Znaczna liczba prac dotyczy zagadnień związanych z szacowaniem zapotrzebowania na usługi logistyczne i wielkości przepływów w łańcuchu dostaw. Bi i Xu [5] porównują poziom konsumpcji ludności na obszarach miejskich i wiejskich. W artykule Cao [6] i innych zastosowano analizę „szarą” do oszacowania wpływu lokalnych przedsiębiorstw na zapotrzebowanie na usługi logistyczne. Chen i Chang [8] oraz Huang i inni [26] prognozują ilość odpadów komunalnych. Publikację Danga i Songa [10] poświęcono zagadnieniu elastyczności przychodowej zapotrzebowania klientów zamieszkujących na obszarach wiejskich i jej prognozowaniu. Daxin i Xu [11] stosują system „szary” do przewidywania skali logistyki lokalnej. W artykule He i Changa [23] zaprognozowano zapotrzebowanie w lokalnej logistyce, wykorzystując w tym celu optymalizację algorytmem genetycznym. Zapotrzebowanie na usługi logistyczne jest również tematem pracy Liu i innych [47]. Jianwen i inni [29] oraz Li i inni [33] prognozują rozmiary rynku międzynarodowych przewozów lotniczych. Pracę Wanga i innych [59] poświęcono prognozowaniu wielkości wydobycia węgla przy

uwzględnieniu strategii ograniczania emisji zanieczyszczeń węglowych do środowiska. Podobną tematykę poruszyli Zhang i Ma [70]. Wykorzystali przy tym „szary” model Markowa, wzbogacony nieliniową regresją. Zheng [76] zajmuje się zapotrzebowaniem wykazywanym przez łańcuch dostaw niewielkiego przedsiębiorstwa. W pracy Li i innych [39] użyto „szarej” analizy do przewidywania wielkości plonów. Shan i Chen [54] dokonują wyboru właściwego modułu produktu przy zapewnieniu spełnienia wymagań klienta. W artykule Fana i Zhou [18] zastosowano „szarą” analizę w badaniach efektu „rozchwiania” (ang. bullwhip effect) zapasów.

Kolejna grupa tematyczna wiąże się z oceną systemów logistycznych i tematami pokrewnymi. Bai i inni [4] oceniają łańcuch dostaw w kontekście środowiskowym. W pracy Chena i innych [8] oceniono proekologiczny łańcuch dostaw dzięki połączeniu systemu „szarego” i metody entropii. Publikację Sahu i innych [53] poświęcono benchmarkingowi łańcucha dostaw i zastosowano w tym celu połączenie systemu „szarego” z wielokryterialną metodą oceny decyzji MOORA. Liu i inni [42] stosują drążenie danych do oceny procesu odchudzania w systemach logistycznych. W pracy Chena i Tinga [7] przedstawiono zastosowanie systemów „szarych” do oceny znaczenia czynników jakości świadczonych usług. Peng i Zhang [51] proponują metodę oceny stopnia koordynacji wytwarzania i logistyki. Zhen i inni [75] dokonują oceny wpływu temperatury i czasu zbiorów na możliwości przechowywania produktów rolniczych. W pracy Yanga i innych [66] oceniono modularność magazynową i transportową materiałów. Mierzwiak i inni [49] identyfikują i oceniają czynniki wpływające na bezpieczeństwo procesów logistycznych w kontekście sieciowym. Artykuł Ke i innych [31] poświęcono ustaleniu i ocenie wpływu czynników ułatwiających utrzymanie sprzętu.

W rozwiązywaniu problemów logistyki są również wykorzystywane „szare” modyfikacje metodyki badań operacyjnych. Przykładem jest praca Liu i innych [41], w której rozwiązano zagadnienie lokalizacji obiektów połączone z planowaniem tras środków transportowych. Wu i Chang [63] wykorzystują „szare” programowanie kompromisowe do optymalizacji produkcji przy uwzględnieniu zmienności jej środowiskowego kosztu oraz opracowują strategię optymalizowania procesów wytwórczych w przemyśle tekstylnym [64], używając w tym celu programowanie nieliniowe przy wykorzystaniu hybrydowego połączenia algorytmu genetycznego i systemu „szarego”. Ci sami autorzy dokonują alokacji kosztów środowiskowych, przeprowadzając analizę wejściowo-wyjściową [65]. Z analizy wejściowo-wyjściowej korzystają także Li i inni [36]. Yuan i Fang [67] dzielą zysk stosując zmodyfikowaną metodykę gry kooperacyjnej. W pracy Zhanga i Liu [72] zastosowano hybrydowy wariant meta heurystyki – optymalizację chmurą cząstek – do ustalania lokalizacji centrów dystrybucyjnych. Czterostopowej optymalizacji sieci dystrybucji poświęcono, natomiast, pracę Zhanga i innych [73]. Tzeng i Huang [57] zastosowali DEMATEL oraz inne metody wielokryterialnej analizy decyzji do wspomagania tworzenia inteligentnych globalnych systemów wytwórczo-logistycznych.

Część prac poświęcono również zagadnieniom prognozowania. Na przykład służy temu praca Zou i innych [77], dotycząca szacowania stanu zapasów. Huang [27] proponuje model do automatycznego prognozowania stanu zapasów i wyboru portfela dostaw. W pracy Wei i Tanga [62] zastosowano model „szary” do prognozowania społecznych kosztów logistyki. Tangkuman i Yang [56] prognozują stopień degradacji sprzętu.

Systemy „szare” są również wykorzystywane w rozwiązywaniu zagadnień dotyczących logistyki zdarzeń wyjątkowych (ang. emergency logistics) [78], a także zagadnień ogólnych, na przykład związanych z kształtowaniem powiązań między wytwarzaniem a logistyką [17] czy ewolucji w procesie wykorzystania wiedzy [58].

## PODSUMOWANIE

Przedstawiony przegląd zastosowań narzędzi systemów „szarych” świadczy o ich zaletach i wynikającym stąd aplikacyjnym potencjale w odniesieniu do rozwiązywania problemów logistyki i transportu. Zauważmy, że narzędzia te okazują się szczególnie przydatne przy rozwiązywaniu zagadnień o złożonym, wielowymiarowym charakterze, w warunkach dostępności jedynie niedoskonałej informacji. A taki charakter mają właśnie współczesne problemy logistyki i transportu.

Zauważmy, że metodyka systemów szarych ulega stałemu rozwojowi. Elastyczność systemów sprzyja ich łączeniu z innymi narzędziami. Pojawiają się również nowe pomysły, rozszerzające zakres sposób i zakres stosowania tradycyjnych postaci narzędzi.

Wydaje się, że potencjał narzędzi został jedynie częściowo wykorzystany. Istnieje więc jeszcze wiele innych możliwości zastosowania metodyki systemów „szarych” w transporcie i logistyce. Potwierdza to dynamiczny rozwój bibliografii. Dlatego też warto się nimi poważnie zainteresować w kontekście rozwiązywania problemów logistyki i transportu w Polsce.

### Streszczenie

*W pracy przedstawiono współczesne zastosowania narzędzi teorii systemów „szarych” w logistyce i transporcie. Przedstawiony przegląd świadczy o różnicowaniu i potencjale aplikacyjnym narzędzi. Dostarczają bowiem środków umożliwiających modelowanie złożonych systemów, prognozowanie, ocenę stosowanych rozwiązań, wspomaganie decyzji oraz sterowanie systemami, przy jednoczesnym uwzględnieniu niedoskonałości dostępnej informacji. W przypadku transportu są obecnie wykorzystywane do rozwiązywania zagadnień transportowych, prognozowania, szacowania niekorzystnego wpływu na środowisko, modelowania zagrożeń i ryzyka, planowania, oceny efektywności i jakości systemów transportowych. W logistyce dominuje zastosowanie systemów „szarych” w zagadnieniach wyboru dostawców i pokrewnych, określania zapotrzebowania na usługi logistyczne, ocenie systemów logistycznych i ich elementów oraz w rozwiązywaniu zagadnień badań operacyjnych. Ponadto systemy „szare” są wykorzystywane do prognozowania oraz w specyficznych badaniach dotyczących na przykład kształtowania systemów logistyki zdarzeń wyjątkowych. Zauważmy, że przedstawione zastosowania wynikają głównie z doświadczeń badawczych w krajach silnie rozwiniętych. Warto więc rozpatrzyć ich szersze zastosowanie w badaniach krajowych. Tym bardziej, że systemy „szare” są jeszcze tu jeszcze bardzo rzadko stosowane.*

## The usability of Grey System Theory tools in logistics and transportation

### Abstract

*A survey of contemporary application of grey system tools in logistics and transportation is presented in a paper. The survey confirms diversity of applications and applicational potential of the tools. They enable us to model complex problems, forecast, evaluate applied solutions, support decision making and control the systems, while including influence of imperfect nature of available information. Grey systems are applied in transportation for solving the transportation problem, forecasting, estimation of unfavourable influence on natural environment, modelling hazards and risks, as well as, planning of transportation systems and evaluating their effectiveness and quality. Logistical applications of grey systems are mainly devoted to the choice of suppliers and other business partners, the estimation of the demand for logistic services, the evaluation logistic systems and their components, and solving operational research optimization tasks. Grey systems are also applied for the forecasting and some other specific activities e.g. preparing the emergency logistics systems. Note, that experience in grey systems tools comes mainly from more developed countries. The grey system tools are only rarely applied for solving logistics and transportation problems in Poland. Their merits make their application worth considering while making decisions in home logistics and transportation.*

### BIBLIOGRAFIA

1. Bai G., Mao J., Lu G.: *Grey transportation problem*, Kybernetes, vol.33(2)/2004, s.219-224
2. Bai C., Sarkis J.: *Evaluating supplier development programs with a grey based rough set methodology*, Expert Systems with Applications, vol.38(11)/2011, s.13505-13517
3. Bai C., Sarkis J.: *Integrating sustainability into supplier selection with grey system and rough set methodologies*, International Journal of Production Economics, vol.124(1)/2010, s.252-264
4. Bai C., Sarkis J., Wei X., Koh L.: *Evaluating ecological sustainable performance measures for supply chain management*, Supply Chain Management: An International Journal, vol.17(1)/2012, s.78-92
5. Bi X.: Xu J.: *Analysis of Urban and Rural Residents' Consumption in Shanghai Based on Grey System Theory*, w: Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 26-28 July 2011, IEEE 2011, vol.4, s.1535-1539

6. Cao W., Zhu H., Li B.: *Impact of Regional Industries on Logistics Demand with Improved Grey Analysis*, w: Li D., Chen Y. (Eds.) CCTA 2011, Part I, IFIP AICT 368, IFIP International Federation for Information Processing 2012, s.1-7
7. Chen C.-N., Ting S.-C.: *A study using the grey system theory to evaluate the importance of various service quality factors*, International Journal of Quality and Reliability Management, vol.19(7)/2002, s.838-861
8. Chen H.W., Chang N.-B.: *Prediction analysis of solid waste generation based on grey fuzzy dynamic modelling*, Resources, Conservation and Recycling, vol.29(1-2)/2000, s.1-18
9. Chen J., Weng Y., Zhao S. (2009): *Performance evaluation of green supply chain based on entropy weight grey system model*, w: 6<sup>th</sup> International Conference on Service Systems and Service Management, IEEE, s.474-478
10. Dang L., Song B.: *Analysis of income elasticity of the consumer demand of Chinese rural residents and prediction of its trend*, Kybernetes, vol.41(5/6), s.655-663
11. Daxin T., Xu S.: *The Prediction of Regional Logistics Scale Based on Grey System Theory*, w: 2010 International Conference of Information Science and Management Engineering, IEEE 2010, s.123-126
12. Deng J.: *Application of Grey System Theory in China*, First International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis, 1990. Proceedings, IEEE 1990, s.285-291
13. Deng J.-L.: *Control Problems of Grey Systems*, Systems and Control Letters, vol.5/1982, s.288-294
14. Deng J.-L.: *Introduction to Grey System Theory*, The Journal of Grey System, vol.1/1989, s.1-24
15. Dou Y., Zhu Q., Sarkis J.: *Evaluating green supplier development programs with a grey-analytical network process-based methodology*, European Journal of Operational Research, vol.233(2)/2014, s.420-431
16. Du Y.: *A Prediction of the Container Throughput of Jiujiang Port Based on Grey System Theory*, w: The 19th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Springer 2013, s.51-59
17. Fan J., Lin L.-S., Gu C.-M.: *Research on Manufacturing and Logistics Linkage Development Based on the Grey Correlation Model – Case Study of Zhejiang Province*, Zeng D. (Ed.) Advances in Electrical Engineering & Electrical Machines, LNEE 134, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, s.631-637
18. Fan L., Zhou Y.: *Relational Analysis of Causes of Bullwhip Effects in a Multi-Layer Model*, w: IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics SOLI'06, IEEE 2006, s.482-487
19. Fan T., Jiang Y.: *A WebGIS and GRA Based Transportation Risk Management System for Oversea Oil Exploitation*, w: Wang F.L. et al. (Eds.) WISM 2010, LNCS 6318, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010, s.138-145
20. Golmohammadi D., Mellat-Parast M.: *Developing a grey-based decision-making model for supplier selection*, International Journal of Production Economics, vol.137(2)/2012, s.191-200
21. Guo F., Krushnan R., Polak J.W.: *Short-term traffic prediction under normal and incydent conditions using singular spectrum analysis and k-nearest neighbour method*, w: IET and ITS Conference on Road Transformation and Control RTIC 2012, IEEE/2012, s.1-6
22. Guo H., Xiao X., Tang Y.: *Short-Term Traffic Flow Forecasting Based on Grey Delay Model*, Lei J. et al. (Eds.) AICI 2012, LNAI 7530, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, s.357-364
23. He F.-B., Chang J. (2013): *Combined forecasting of regional logistics demand optimized by a Genetic Algorithm*, w: IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services 2013, IEEE, s.454-458
24. He L., Chen H.: *Coordination of incentive conflict based on Grey-Stackelberg model under the main manufacturers-suppliers model*, Grey Systems: Theory and Applications, vol.2(2)/2012, s.240-248
25. Hu Y.-C., Chiu U.-J., Chen C.-M., Tzeng G.-H.: *Competence Set Expansion for Obtaining Scheduling Plans in Intelligent Transportation Security Systems*, w: Tanino T. et al. (Eds.) Multi-

- Objective Programming and Goal Programming, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003, s.347-352
26. Huang G.H., Baetz B.W., Patry G.G., Terluk V.: Capacity planning for an integrated waste management system under uncertainty: a North American case study, *Waste Management & Research*, vol.15(5)/1997, s.523-546
  27. Huang K.Y.: Application of VPRS model with enhanced threshold parameter selection mechanism to automatic stock market forecasting and portfolio selection, *Expert Systems With Applications*, vol.36(9)/2009, s.11652-11661
  28. Hui L.: *Choice of Interchange Scheme Based on Grey Target Theory*, w: Cao B., Li T.-F., Zhang C.-Y. (Eds.) *Fuzzy Info. and Eng.*, vol.2, AISC 62, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009, s.1441-1447
  29. Jianwen X., Zhang Y., Weigang J.: *An Improved Grey-Markov Chain Method with an Application to Predict the Number of Chinese International Airlines*, w: International Symposium on Information Science and Engineering ISISE'08, vol.2, 2008, s.716-720
  30. Jin T., Gao J., Fu L., Ai Y., Xu X.: An evaluation of improvements in the air quality of Beijing arising from the use of new vehicle emission standards, *Environmental Monitoring and Assessment*, vol.184/2012, s.2151–2159
  31. Ke H.-F., Du H.-M., He K., Yu X.-H.: Equipment maintainability and its influencing factors analysis based on grey system theory, *Grey systems: Theory and Applications*, s.427-436
  32. Lee C.-C., Wan T.-J., Kuo C.-Y., Chung C.-Y.: *Estimating air quality in a traffic tunnel using a forecasting combination model*, *Environmental Monitoring and Assessment*, vol.112/2006, s.327-345
  33. Li G.-D., Yamaguchi D., Nagai M.: A GM(1,1)–Markov chain combined model with an application to predict the number of Chinese international airlines, *Technological Forecasting and Social Change*, vol.74(8)/2007, s.1465-1481
  34. Li G.-D., Yamaguchi D., Nagai M.: *A grey-based rough decision-making approach to supplier selection*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.36(9-10)/2008, s.1032 – 1040
  35. Li G.-D., Yamaguchi D., Nagai M.: *Application of grey-based rough decision-making approach to suppliers selection*, *Journal of Modelling in Management*, vol.2(2)/2007, s.131-142
  36. Li Q.-X., Liu S.-F., Lin Y.: *Grey enterprise input–output analysis*, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol.236(7)/2012, s.1862-1875
  37. Li S., Zhong Z., He R., Ai B.: Application of grey clustering evaluations in coal railway transportation, *Kybernetes* vol.41(5/6), s.714-724
  38. Li X.J., Si Q., Deng J.: *Gray Comprehensive Evaluation on Domestic and Overseas Airlines Operation Performance*, w: Qu X., Yang Y. (Eds.) IBI 2011, Part II, CCIS 268, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, s.390-396
  39. Li Y.-Y., Feng Z., Zhao L.-Y., Mo Z.-H., Zhang B.: *The Grey Analysis, Kriging and Selection Index of Flower Yield in Rugosa Rose*, *Agricultural Sciences in China*, vol.6(12)/2007, s.1420-1425
  40. Lin P.-Y., Lee T.-R. (J.-S.), Dadura A.M.: *Using grey relational analysis and TRIZ to identify KSFs and strategies for choosing importers and exporters*, *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol.22(4)/2011, s.474-488
  41. Liu H., Zhang Q., Wang W.: Research on location-routing problem of reverse logistics with grey recycling demands based on PSO, *Grey Systems: Theory and Applications*, vol.1(1)/2011, s.97-104
  42. Liu M.-T., Mei A.K.-C., Pan W.-T.: *Using data mining technique to perform the performance assessment of lean service*, *Neural Computing & Applications*, vol.22/2013, s.1433-1445
  43. Liu S.-F., Forrest J.: *A brief introduction to grey systems theory*, *Grey Systems: Theory and Applications*, vol.2(2)/2012, s.89-104
  44. Liu S.-F., Forrest J.: *Advances in Grey Systems Research*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 2010
  45. Liu S.-F., Forrest J.: *The mysteries for continual growth of grey system theory*, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2007, 7-10 Oct. 2007, IEEE 2007, s.2155-2159

46. Liu S.-F., Lin Y.: *Grey Systems. Theory and Applications*, SpringerVerlag, Berlin-Heidelberg 2010
47. Liu X.-F., Wu J., Li Q.-Z., Yang H.-J.: *Prediction of logistics volume based on grey model and Markov chain*, w: World Automation Congress WAC 2012, IEEE 2012, s.1-4
48. Ma J., Chen Z., Tse K. (2013): *Forecast of civil aviation freight volume using unbiased grey-fuzzy-Markov chain method*, w: 6<sup>th</sup> International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering ICIII, IEEE, s.528-531
49. Mierzwiak R., Werner K., and Pawlewski P.: Identification and Estimation of Factors Influencing Logistic Process Safety in a Network Context with the Use of Grey System Theory, w: Pan J.-S., Chen S.-M., Nguyen N.T. (Eds.) ACIIDS 2012, Part I, LNAI 7196, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, s.469-477
50. Pai T.-Y., Hanaki K., Ho H.-H., Hsieh C.-M.: *Using grey system theory to evaluate transportation effects on air quality trends in Japan*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol.12(3)/2007, s.158-166
51. Peng J.-L., Zhang K.-J.: *The Measurement of Coordination Degree between Manufacturing and Logistics—Based on Gray Correlation System Model*, w: Dai M. et al. (Eds.) ICCIC 2011, Part II, CCIS 232, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, s.136-142
52. Sahu N.K., Datta S., Mahapatra S.S.: *Establishing green supplier appraisalment platform using grey concepts*, Grey Systems: Theory and Applications, vol.2(3)/2012, s.395-418
53. Sahu N.K., Datta S., Mahapatra S.S.: *Supply chain performance benchmarking using grey-MOORA approach: An empirical research*, Grey Systems: Theory and Applications, vol.4(1), s.24-55
54. Shan Q., Chen Y.: Product Module Identification Based on Assured Customer Requirements, Procedia Engineering, vol.15/2011, s.5313-5317
55. Shen H., Ma C., Ren Z., Zeng J.: *Passenger transportation system of central city-satellite city*, w: 6<sup>th</sup> Advanced Forum on Transportation of China AFTC 2010, IEEE 2010, s.36-39
56. Tangkuman S., Yang B.-S.: *Application of grey model for machine degradation prognostics*, Journal of Mechanical Science and Technology, vol.25(12)/2011, s.2979-2985
57. Tzeng G.-H., Huang C.-Y.: Combined DEMATEL technique with hybrid MCDM methods for creating the aspired intelligent global manufacturing & logistics systems, Annals of Operations Research, vol.197/2012, s.159-190
58. Wang D.-P., Yang C.: *Research on the evolutionary stage of knowledge service network in supply chain*, w: International Conference on Management Science and Engineering ICMSE 2013, IEEE 2013, s.579-584
59. Wang J., Dong Y., Wu J., Mu R., Jiang H.: *Coal production forecast and low carbon policies in China*, Energy Policy, vol.39(10)/2011, s.5970-5979
60. Wang Y., Li M., Yang B., Yang C.: *An Urban Rail Transit Hazard Evaluation Methodology Based on Grey System Theory*, Procedia - Social and Behavioral Sciences, vol.43/2012, s.764-772
61. Wang Z., Yang J., Wang Fei: *Service Quality Assessment of Urban Public Transport via Grey System Theory*, w: Third International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining WKDD'10, 9-10 Jan., IEEE 2010, s.581-584
62. Wei W., Tang B.: *Prediction of China's Total Social Logistics Costs Based on Grey Model*, w: Hu (Ed.) Advances in Electric and Electronics, LNEE 155, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, s.505-511
63. Wu C.-C., Chang N.-B.: Corporate optimal production planning with varying environmental costs: A grey compromise programming approach, European Journal of Operational Research, vol.155(1)/2004, s.68-95
64. Wu C.C., Chang N.B.: Global strategy for optimizing textile dyeing manufacturing process via GA-based grey nonlinear integer programming, Computers and Chemical Engineering, vol.27(6)/2003, s.833-854
65. Wu C.-C., Chang N.-B.: *Grey input-output analysis and its application for environmental cost allocation*, European Journal of Operational Research, vol.145(1)/2003, s.175-201



66. Yang H.J., Meng J., Liu Y.X.: *Effectiveness Evaluation on Material Modularity Storage and Transportation by Grey-Analytical Hierarchy Process*, w: Jin D., Lin S. (Eds.) *Advances in MSEC*, vol.2, AISC 129, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, s.9-15
67. Yuan L., Fang Z.: *Grey Shapley model and its Raiffa solution for benefit allocation in cooperative game*, w: IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services GSIS, IEEE 2011, s.705-709
68. Yuan W., Liu S., Yuan C.: *Dynamic suppliers' risk management of large-scale and complex equipment development*, *Kybernetes*, vol.41(7/8)/2012, s.839-850
69. Yue H.J., Liu S.: *Grey system theory in China: A bibliometrics analysis*, w: IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services, 2009. GSIS 2009, 10-12 Nov. 2009, IEEE 2009, s.564-569
70. Zhang B., Ma J.: *Prediction of Coal Output in Wuhai Using Grey-Markvo Model Improved by Nonlinear Regression*, *Procedia Engineering*, vol.15/2011, s.5020-5024
71. Zhang P., Mao J., Yuan Z.: *Research on Yangtze River Dangerous Articles Logistics Port Hierarchical Layout Evaluation of Jiangsu Province Based on Disaster Theory*, w: Zeng D. (Ed.) *ICAIC 2011, Part II, CCIS 225*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, s.50-58
72. Zhang Q., Liu H.: *Location of Logistics Distribution Centers with Grey Production Capacity Based on Hybrid PSO*, w: Liu S., Forrest J.Y.-L. (Eds.): *Advances in Grey Systems Research*, s.95-102
73. Zhang Q., Wang H., Liu H.: *4-stage distribution network optimization of supply chain with grey demands*, *Kybernetes* vol.41(5/6), s.633-642
74. Zhang Y.: *The Forecast of Our Private Car Ownership with GM(1,1) Model*, Deng H. et al. (Eds.) *AICI 2011, CCIS 237*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, s.108-112
75. Zhen G., Bi S., Liu L.: *Studies on the Effect of Temperature and Pick-Time in Storing Dangshan Pear*, *Chinese Science Abstracts Series B*, vol.14(4), Part B/1995, s.48
76. Zheng J.: *On prediction application of small enterprise supply chain demand based on Grey System theory*, w: The 2<sup>nd</sup> IEEE International Conference on Information Management and Engineering ICIME, IEEE 2010, s.356-360
77. Zou K.-Q., Li B.-Y., Zhou X.-M.: *Application of Grey System Model in Stock Prediction*, w: *Fuzzy Information and Engineering*, vol.2, *Advances in Intelligent and Soft Computing* vol.62/2009, s.1561-1567
78. Zuo X., Ran W., Gu W.: *Research on Situations and Development Trends of Emergency Logistics at Home and Abroad*, w: Liu S., Lin Y. (Eds.) *Advances in Grey Systems Research*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s.581-587