[84] SHEKHAR, S., KIM, S. Contraflow Transportation Network Reconfiguration for Evacuation Route Planning. Minnesota Department of Transportation. 2006.
[85] SYSWERDA, G. Uniform crossover in genetic algorithms. In SCHAFFER, J. D. (ed.) *Proceedings of the 3rd International Conference on Genetic Algorithms*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann, 1989. ISBN:1-55860-066-3, s. 2-9.
[86] TEICHMANN, D. Příspěvek k problematice evakuace obyvatelstva a možnosti využití matematického modelování při jejím plánování. In *Krízový manažment*. ISSN 1336-0019, 2009, roč. 8, č. 1, s. 91-94.
[87] TEODOROVIČ D., VUKADINOVIČ, K. *Traffic Control and Transport Planning: A Fuzzy Sets and Neural Networks Approach*. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1998. 387 s.
[88] TOMAN, Ľ. Exaktná metóda riešenia evakuačnej úlohy ako súčasť nástroja na podporu rozhodovania v krízovej situácii: Diplomová práca. Žilina : Žilinská univerzita, 2010. 102 s.
[89] TOMAN, Ľ. Informatické nástroje a riešenie úloh evakuácie: Písomná práca k dizertačnej skúške. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, 2011, 60 s.
[90] VUKADINOVIČ, K., TEODOROVIČ, D., PAVKOVIČ, G. An application of neurofuzzy modeling: The vehicle assignment problem. In *European Journal of Operational Research*. 1999, vol. 114, č. 3, s. 474-488.
[91] XPRESS-Mosel "User guide". Dash Associates, Blisworth, UK, 2005, 99 s.
[92] XPRESS-MP "Getting Started". Dash Associates, Blisworth, UK, 2005, 105 s.
[93] YUSOFF, M., ARIFFIN, J., MOHAMED, A. An Improved Discrete Particle Swarm Optimization in Evacuation Planning. In *International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition*. IEEE Computer Society, Malaysia. 2009. ISBN 978-0-7695-3879-2, s. 49-53.
[94] YUSOFF, M., ARIFFIN, J., MOHAMED, A. Optimization Approaches for Macroscopic Emergency Evacuation Planning: A Survey. In International Symposium on Information Technology. Vol. 3, IEEE Computer Society, Malaysia. 2008. ISBN 978-1-4244-2327-9, s. 1-7.
[95] YUSOFF, M., ARIFFIN, J., MOHAMED, A. Solving Vehicle Assignment Problem Using Evolutionary Computation. In *International Conference on Swarm Intelligence*. Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 9783642134944, s. 523–532.
[96] ZADEH, L. A. Fuzzy sets. In *Information and Control*. Elsevier, 1965, vol. 8, č. 3. s. 338-353.
[97] ZELINKA, I. *et al*. *Evoluční výpočetní techniky*. 1. vydanie. Praha: BEN – technická literatúra, 2009. 534 s. ISBN 978-80-7300-218-3.

Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta riadenia a informatiky

Ing. Ľubomír Toman

Autoreferát dizertačnej práce

Sofistikované nástroje na podporu rozhodovania v podmienkach neistoty pri návrhu verejných obslužných systémov evakuačného typu

na získanie akademického titulu **„philosophiae doctor" (v skratke PhD.)**
v študijnom programe doktorandského štúdia
aplikovaná informatika

v študijnom odbore:
9.2.9 aplikovaná informatika

Žilina, apríl 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia **na Katedre dopravných sietí, Fakulte riadenia a informatiky Žilinskej univerzity v Žiline**

Predkladateľ: Ing. Ľubomír Toman
Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta riadenia a informatiky
Katedra dopravných sietí

Školiteľ: prof. RNDr. Jaroslav Janáček, CSc.
Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta riadenia a informatiky
Katedra dopravných sietí

Oponenti:

Autoreferát bol rozoslaný dňa: ....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa .... o .... h. pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore **9.2.9 aplikovaná informatika**, **v študijnom programe aplikovaná informatika**, vymenovanou dekanom Fakulty riadenia a informatiky Žilinskej univerzity v Žiline dňa ....

prof. Ing. Martin Klimo, PhD.
predseda odborovej komisie
študijného programu **aplikovaná informatika**
v študijnom odbore **9.2.9 aplikovaná informatika**
Fakulta riadenia a informatiky
Žilinská univerzita
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

[63] KOHÁNI, M. Optimalizácia návrhu štruktúry komunikačného systému „od mnohých k mnohým" : Dizertačná práca. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, 2007, 93 s.
[64] KOKLES, M., ROMANOVÁ, A. *Informatika*. Bratislava: Sprint dva, 2009. 302 s. ISBN 978-80-89393-01-5.
[65] KONGSOMSAKSAKUL, S., STUDENT, G., CHAO, Y., ANTHONY, C. Shelter Location-Allocation Model for Flood Evacuation Planning. In *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 2005, Vol. 6, s. 4237-4252.
[66] KUHN, H. W. The Hungarian Method for the Assignment Problem. In *Naval Research Logistics Quarterly*. 1955, Vol. 2, s. 83-97.
[67] KVASNIČKA, V., POSPÍCHAL, J., TIŇO, P. *Evolučné algoritmy*. Bratislava : STU Bratislava, 2000. 215 s. ISBN 80-227-1377-5.
[68] LEVINE, D. GAs: A practitioner's view. In *Proceedings of INFORMS Journal on Computing*. 1997. s. 256-257.
[69] LIU, Y., LAI, X., CHANG, G. L., ASCE, M. Two-Level Integrated Optimization System for Planning of Emergency Evacuation. In *Journal of Transportation Engineering*. 2006, vol. 132, s. 800-807.
[70] LU, Q. Capacity Routing Algorithms for Evacuation Route Planning, PHD thesis, University of Minnesota, United States. 2006.
[71] LU, Q., GEORGE, B., SHEKHAR, S. Capacity Constrained Routing Algorithms for Evacuation Planning: A Summary of Results. In *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3633, Springer-Verlag Berlin, Heidelbeg. 2005. s. 291-307.
[72] LU, Q., HUANG, Y., SHEKHAR, S. Evacuation Planning: A Capacity Constrained Routing Approach. In *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2665, Springer-Verlag Berlin, Heidelbeg. 2003. s. 111-125.
[73] LUMBROSO, D. M., JOHNSTONE, W., DE BRUIJN, K., DI MAURO, M., LENCE, B., TAGG, A. Modelling Mass Evacuations To Improve The Emergency Planning For Floods In The Uk, The Netherlands And North America. In *International Conference on Emergency Preparedness (InterCEPt)*: the Challenges of Mass Evacuation. Birmingham, United Kingdom: University of Birmingham, 2010.
[74] MANIEZZO, V. *et al*. An Experimental Comparison of Eight Evolutionary Heuristics Applied to the Quadratic Assignment Problem. In *European Journal of Operational Research*. 1995, Vol. 81, č. 1, s 188-205.
[75] MILOSAVLJEVIČ, N., TEODOROVIČ, D., PAPIČ, V., PAVKOVIČ, G. A fuzzy approach to the vehicle assignment problem. In *Transportation Planning and Technology*. ISSN 0308-1060, 1996, Vol. 20, č. 1, s. 33-47.
[76] NASH, J. F. The Bargaining Problem. In *Econometrica*: Journal of the Econometric Society. The Econometric Society, 1950. Vol. 18, č. 2, s. 155-162.
[77] OGRYCZAK, W. On the lexicographic minimax approach to location problems. In *European Journal of Operational Research*: Theory and Methodology. Elsevier, 1997. Vol. 100, č. 3, s. 566-585.
[78] PALÚCH, S. *Algoritmická teória grafov*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2008. Kapitola 2, Algoritmy a ich zložitosť, s. 45-58. [to be published].
[79] RAMÍK, J., VLACH, M. *Generalized Concavity in Fuzzy Optimization and Decision analysis*. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2002. 312 s. ISBN 0-7923-7495-9.
[80] REEVES, C. R. A genetic algorithm for flowshop sequencing. In *Computers & Operations Research*. 1995. Vol. 22, č. 1, s. 5-13.
[81] REEVES, C. R. Genetic Algorithms. In GENDREAU, M., POTVIN, J.-Y. (eds.) *Handbook of Metaheuristics*. New York: Springer, 2010. s. 109-139.
[82] RUNGTA, M., LIM, G. J., BAHARNEMATI, M. R. Optimal egress time calculation and path generation for large evacuation networks. In *Annals of Operations Research*. Springer US, 2012. ISSN 0254-5330, Vol. 201, č. 1, s. 403-421.
[83] SAADATSERESHT, M., MANSOURIAN, A., TALEAI, M. Evacuation planning using multiobjective evolutionary optimization approach. In *European Journal of Operational Research*. 2009. Vol. 198, č. 1, s. 305-314.

[41] HAMACHER, H. W., HELLER, S., RUPP, B. Flow location (FlowLoc) problems: dynamic network flows and location models for evacuation planning. In *Annals of Operations Research*. Springer US, 2011. ISSN 0254-5330.
[42] HAMACHER, H. W., TJANDRA, S. A. Mathematical Modelling of Evacuation Problems: A State of Art. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Berlin: Springer, 2001. ISSN 1434-9973. s. 59–74.
[43] HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975. 211 s. ISBN-13: 9780262581110.
[44] HROMKOVIČ, J. *Design and Analysis of Randomized Algorithms*: Introduction to Design Paradigms. Berlin: Springer, 2005. 274 s. ISBN 3-540-23949-9.
[45] CHALMET, L. G., FRANCIS, R. L., SAUNDERS, P. B. Network model for building evacuation. In *Management Science*. U.S.A.: Informs, 1982. Vol. 28, č. 1, s. 86-105.
[46] CHEN, Y., XIAO, D. Emergency Evacuation Model and Algorithms. In *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 2008. Vol. 8, č. 6, s. 96-100.
[47] CHEN, Y. M., LIN, C.-T. Optimizing the Operation Sequence of a Multihead Surface Mounting Machine Using a Discrete Particle Swarm Optimization. In Journal of Artificial Evolution and Applications. 2008, Vol. 2008, s. 1-9.
[48] JANÁČEK, J. Handling of a non-linear model of the evacuation plan design by IP-solver. In *Proceedings of the 10th international Symposium on OPERATIONAL RESEARCH*. Nova Gorica, Slovenia: Slovenian Society Informatika, 2009. ISBN 978-961-6165-30-3, s. 279-287.
[49] JANÁČEK, J. Informatické nástroje pro podporu rozhodování v krizových situacích. In *Zborník príspevkov konferencie „Mladá Veda“* [CD ROM]. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta špeciálneho inžinierstva, Nov. 9.-10., 2010. ISBN 978-80-554-0272-7.
[50] JANÁČEK, J. *Matematické programování*. 2. opravené vydanie. Žilina: Žilinská univerzita, 2003. 225 s. ISBN 80-8070-054-0.
[51] JANÁČEK. J. *Optimalizace na dopravních sítích*. 2. prepracované vydanie. Žilina: Žilinská univerzita, 2006. 248 s. ISBN 80-8070-586-0.
[52] JANÁČEK, J. The Evacuation Plan Design under Uncertain Times of Transportation. In *Urban transport XVI: urban transport and the environment in the 21st century*. Southampton : WIT Press, 2010. ISBN 978-1-84564-456-7, s. 83-92.
[53] JANÁČEK, J. Tvorba evakuačních plánů pomocí na trhu dostupných IP-solverů. In *Úlohy diskrétní optimalizace v dopravní praxi*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2009. ISBN 978-80-7395-193-1, s. 50-60.
[54] JANÁČEK, J. Varianty úlohy přidělování evakuačních vozidel a jejich řešení IP-solverem. In *Infotrans : Mezinárodní konference „Informační technologie v dopravě“*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2011. ISBN 978-80-7395-397-3, s. 49-54.
[55] JANÁČEK, J. *et al. Navrhovanie územne rozľahlých obslužných systémov*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2010. 405 s. ISBN 978-80-554-0219-2.
[56] JANÁČEK, J., SIBILA, M. Optimal Evacuation Plan Design With IP-Solver. In *COMMUNICATIONS*. ISSN 1335-4205, 2009, Vol. 11, č. 3, s. 29-35.
[57] JANÁČEK, J., TOMAN, Ľ. Min-Max Nonlinear Vehicle Assignment Problem. Technická správa, Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta riadenia a informatiky, Katedra dopravných sietí, 2013.
[58] KAPSALIS, A., RAYWARD-SMITH, V. J., SMITH, G. D. Solving the Graphical Steiner Tree Problem Using Genetic Algorithms. In *The Journal of the Operational Research Society*. Great Britain: Operational Research Society, 1993. Vol. 44, č. 4, s. 397-406.
[59] KENNEDY, J., EBERHART, R. C. A Discrete Binary Version of the Particle Swarm Algorithm. In *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1997. 'Computational Cybernetics and Simulation', 1997*. Orlando, FL, USA, 1997. ISBN 0-7803-4053-1, s. 4104 – 4108.
[60] KIM, S. Contraflow Network Reconfiguration using Evacuation Route Planner, PHD Thesis, University of Minnesota. 2007.
[61] KIM, S., SHEKHAR, S. Contraflow network reconfiguration for evacuation planning: a summary of results. In *13th annual ACM international workshop on Geographic information systems*. 2005. s. 250-259.
[62] KIRKPATRICK, S., GELATT Jr., C. D., VECCHI, M. P. Optimization by Simulated Annealing. In *Science*. ISSN 0036-8075, 1983, Vol. 220, č. 4598, s. 671-680.

1. ÚVOD

Evakuácia patrí medzi základné druhy kolektívnej ochrany obyvateľstva. Formou efektívneho organizovaného odsunu ľudí z ohrozeného územia umožňuje záchranu ich životov a zdravia. V súčasnej dobe nadobúda čoraz dôležitejší význam, najmä v súvislosti s častejším výskytom prírodných katastrof, ktoré súvisia so zvyšujúcimi sa extrémnymi výkyvmi počasia. Aby mohla byť evakuácia vykonaná efektívne, musí byť odsun ľudí dobre naplánovaný a organizovaný.

Autor sa v práci zaoberal riešením úlohy návrhu evakuačného plánu pre evakuáciu ľudí z ohrozeného územia v podmienkach istoty, ako aj v podmienkach neistoty, nakoľko v praxi sa často vyskytujú situácie, kedy nie sú známe presné hodnoty údajov, na základe ktorých sú vykonávané rozhodnutia. Cieľom úlohy je vytvoriť evakuačný plán. Úloha sa skladá z viacerých častí. Prvá časť spočíva vo vypracovaní predbežných plánov, ktoré obsahujú pre rôzne prípady krízových situácií vytipované útočiská, dopravné parky obsahujúce vozidlá použiteľné na evakuáciu a ohrozené obce, z ktorých musia byť evakuovaní obyvatelia. Druhá časť úlohy, ktorou sa úspešne zaoberali autori napr. v [18] a [53], spočíva v rozdelení ohrozených obcí na počtom obyvateľov menšie celky – komunity a v ich následnom priradení k útočiskám.

Poslednú časť úlohy návrhu evakuačného plánu, ktorej riešením sa autor zoberal v dizertačnej práci, tvorí úloha prideľovania dopravných prostriedkov (*vehicle assignment problem* (VAP)). Jej cieľom je vhodne prideliť vozidlá z dopravných parkov na evakuáciu komunít tak, aby bolo možné vykonať evakuáciu za minimálny čas.

V práci sú popísané navrhnuté algoritmy, ktoré slúžia na riešenie úlohy prideľovania dopravných prostriedkov, a teda aj na riešenie úlohy návrhu evakuačného plánu v podmienkach istoty, ako aj v podmienkach neistoty. Autor vytvoril špecializovaný nástroj na riešenie tejto úlohy, ktorý umožnil preveriť efektivitu navrhnutých algoritmov.

2. SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

Metódy, ktoré sú v súčasnosti používané na riešenie VAP je možné rozdeliť do dvoch skupín, a to na exaktné a približné metódy.

2.1 Exaktné metódy

Exaktné metódy použité na riešenie VAP garantujú získanie optimálneho riešenia úlohy, avšak ich hlavnou nevýhodou je, že väčšinou nie sú schopné z časových dôvodov riešiť rozsiahle úlohy.

Jeden z možných prístupov spočíva vo vytvorení lineárneho matematického modelu pre VAP. Úlohu popísanú takýmto modelom je možné následne riešiť pomocou niektorého z dostupných IP-solverov. Autori v [56] navrhli dva prístupy na riešenie tejto úlohy. V prvom prístupe predpokladali nedeliteľnosť dopravných parkov, t.j. všetky vozidlá nachádzajúce sa v dopravnom parku musia byť použité na evakuáciu tej istej komunity. Avšak kvôli veľkým rozmerom modelu si hľadanie riešenia vyžadovalo značné množstvo výpočtového času. Druhý prístup bol, naopak, založený na deliteľnosti dopravných parkov, t.j. vozidlá z toho istého dopravného parku môžu byť použité na evakuáciu rôznych komunít. Tento prístup umožnil za ten istý výpočtový čas získať lepšie riešenia v porovnaní s prvým prístupom, avšak stále vyžadoval značné množstvo výpočtového času.

2.2 Približné metódy

Jedna z nevýhod exaktných metód spočíva v ich náročnosti na výpočtový čas pre úlohy väčších rozsahov. Preto sa na riešenie využívajú tiež približné metódy, ktoré hoci negarantujú nájdenie optimálneho riešenia, sú schopné získať dobré, pre praktické použitie postačujúce, riešenie v krátkom výpočtovom čase. Autor použil v prácach [48], [52] a [53] na riešenie VAP iteratívnu metódu, ktorá sa ukazuje ako vhodná metóda na riešenie tejto úlohy. Jej princíp spočíva v opakovanom riešení redukovanej úlohy prideľovania dopravných prostriedkov (RVAP), ktorá je bližšie popísaná v časti 4.1.

Ďalší zo spôsobov riešenia VAP spočíva vo využití heuristických resp. metaheuristických metód. Na riešenie tejto úlohy bola použitá napr. metaheuristika discrete particle swarm optimization v [93] alebo genetický algoritmus v [95].

2.3 Prístupy k riešeniu VAP

Na riešenie VAP resp. úlohy návrhu evakuačného plánu boli použité viaceré prístupy. Okrem základného prístupu, v ktorom sa uvažuje, okrem iného, so známymi údajmi vstupujúcimi do modelu úlohy, boli použité aj iné nasledujúce prístupy.

V [54] sa autor zameral na riešenie úlohy návrhu evakuačného plánu, pri ktorej berie do úvahy smer a rýchlosť šírenia nebezpečenstva, t.j. do úvahy je braný fakt, že kritický čas, ktorý majú jednotlivé oblasti ohrozeného územia k dispozícii na evakuáciu, nie je rovnaký. V tej istej práci sa autor zaoberal aj prístupom, pri ktorom je známy čas, za ktorý musí byť evakuácia vykonaná, avšak tento čas nie je postačujúci na evakuáciu všetkých obyvateľov. Autor využil systémový prístup, pri ktorom sa snažil minimalizovať celkový počet obyvateľov, ktorí nebudú evakuovaní.

Pri návrhu reálnych systémov sa často stretávame so skutočnosťou, že hodnoty vstupných údajov, na základe ktorých sa snažíme robiť rozhodnutia, nie je možné presne stanoviť. Autor sa v [52] zaoberal riešením VAP, pričom bral do úvahy neisté časy presunu v cestnej sieti.

Iný prístup k riešeniu VAP, ktorý je vhodný pri návrhu evakuačného plánu pre oblasť, ktorá bude rýchlo ohrozená nejakou mimoriadnou udalosťou (napr. havária jadrovej elektrárne), a ktorej výskyt neumožní opakovaný návrat vozidiel do tejto oblasti, použil autor v [86], kde predpokladal, že vozidlo môže vykonať počas evakuácie iba jednu jazdu.

V [22] bol použitý prístup, ktorý berie do úvahy interakciu bežnej dopravy a dopravy vykonávajúcej evakuáciu.

Úloha bola tiež riešená ako toková úloha v dynamickej dopravnej sieti [41], [42] a [82].

V [82] bol pri návrhu evakuačného plánu použitý nový koncept, v ktorom je okrem tradičnej minimalizácie času potrebného na evakuáciu minimalizovaný aj počet použitých evakuačných trás.

V [41] boli skombinované dva nástroje pri návrhu evakuačného plánu. Išlo o riešenie známej tokovej úlohy v sieti a o lokačnú analýzu, ktorú autori uvádzajú ako nový nástroj použitý v oblasti evakuácie. Hlavná myšlienka spočívala v umiestnení zložiek poskytujúcich určitú službu do evakuovaného objektu tak, aby bol vplyv na evakuačný proces minimálny.

V [94] sú uvedené ďalšie prístupy, ktorými bola riešená úloha návrhu evakuačného plánu. Ide o využitie heuristických metód a taktiež matematického modelovania, kde je úloha riešená pomocou lineárneho a nelineárneho programovania.

2.4 Nástroje používané na riešenie VAP

V súčasnosti sú na riešenie úlohy návrhu evakuačného plánu resp. úlohy VAP používané nástroje, ktoré je možné rozdeliť do dvoch skupín, a to na univerzálne a špecializované nástroje.

[22] BODEN, M., BUZNA, Ľ., WEGER, H. Simulation of evacuation scenarios in urban areas – developing tools for modeling and optimization of evacuation traffic flows. In TRANSCOM 2007: *7-th European conference of young research and science workers*. Žilina, June 25-27, 2007, Slovak Republic. Section 10: Security engineering. Forensic engineering. - Žilina: University of Žilina, 2007. ISBN 978-80-8070-698-2, s. 9-14.

[23] BRETSCHNEIDER, S., KIMMS, A. A basic mathematical model for evacuation problems in urban areas. In *Transportation Research Part A*: Policy and Practice. 2011. Vol. 45, č. 6, s. 523-539.

[24] BUI, L. T., SOLIMAN, O., ABBASS, H. A. A Modified Strategy for the Constriction Factor in Particle Swarm Optimization In. *Proceeding ACAL'07: Proceedings of the 3rd Australian conference on Progress in artificial life*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg. ISBN 3-540-76930-7, 2007, Vol. 4828/2007, s. 333-344.

[25] ČERNÝ, V. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. In *Journal of Optimization Theory and Applications*. 1985, Vol. 45, č. 1, s. 41-51.

[26] DAVIS, L. *Handbook of Genetic Algorithms*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. ISBN: 0442001738.

[27] De JONG, K. A. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems. PHD Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan. 1975.

[28] DRESSLER, D., GROß, M., KAPPMEIER, J.-P., KELTER, T., KULBATZKI, J., PLÜMPE, D., SCHLECHTER, G., SCHMIDT, M., SKUTELLA, M., TEMME, S. On the Use of Network Flow Techniques for Assigning Evacuees to Exits. In *Procedia Engineering: Proceedings of the International Conference on Evacuation Modeling and Management*. volume 3 of Procedia Engineering. Ut, Netherlands: Elsevier Ltd, 2010. s. 205-215.

[29] EBERHART, R. C., KENNEDY, J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory. In *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, *1995. MHS '95*, Nagoya, 1995, s. 39 - 43.

[30] EBERHART, R. C., SHI, Y. Comparing Inertia Weights and Constriction Factors in Particle Swarm Optimization. In *Proceedings Of The 2000 Congress On Evolutionary Computation*. La Jolla, CA, USA, 2000. ISBN 0-7803-6375-2, s. 84-88.

[31] EBERHART, R. C., SHI, Y., KENNEDY, J. *Swarm Intelligence* (The Morgan Kaufmann Series in Evolutionary Computation). 1. vydanie. Morgan Kaufmann, 2001. 512 s. ISBN: 1558605959.

[32] FEMA. Evacuating yourself and your family. http://www.ready.gov/evacuating-yourself-and-your-family, 2012. [Online; navštívené 12.11.2012].

[33] FOGEL, D. B. An Overview of Evolutionary Programming. In DAVIS, L. D., De JONG, K. A., VOSE, M. D., WHITLEY, L. D. (eds.) *Evolutionary Algorithms*: The IMA Volumes in Mathematics and its Applications. New York: Springer, 1999. ISSN 0940-6573, Vol. 111, s. 89-109.

[34] GALDOVÁ, L. Particle Swarm algoritmus v prostředí Mathematica: Diplomová práca. Zlín: UTB, 2007. 84 s.

[35] GAO, F., CUI, G., ZHAO, Q., LIU, H. Application of Improved Discrete Particle Swarm Algorithm in Partner Selection of Virtual Enterprise. In IJCSNS International Journal of 208 Computer Science and Network Security. 2006, Vol. 6, No. 3A, s. 208-212.

[36] GEORGOUDAS, I. G., KOLTSIDAS, G., SIRAKOULIS, G. Ch., ANDREADIS, I. Th. A Cellular Automaton Model for Crowd Evacuation and Its Auto-Defined Obstacle Avoidance Attribute. In *Proceeding ACRI'10 Proceedings of the 9th international conference on Cellular automata for research and industry*. Berlin: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2010. ISBN: 3-642-15978-8 978-3-642-15978-7, s. 455-464.

[37] GLOVER, F., LAGUNA, M. *Tabu Search*. Spojené štáty americké: Springer, 1997. 389 s. ISBN 0-7923-8187-4.

[38] GLPK – GNU Linear Programming Kit. http://www.gnu.org/software/glpk, 2012. [Online; navštívené 17.12.2012].

[39] GONG, T., TUSON, A. L. Particle Swarm Optimization For Quadratic Assignment Problems-A Forma Analysis Approach. In *International Journal of Computational Intelligence Research*. 2008, Vol. 4, s. 177-185.

[40] Gurobi Optimizer. http://www.gurobi.com/products/gurobi-optimizer, 2012. [Online; navštívené 17.12.2012].

[3] TOMAN, Ľ. Design of the Evacuation Plan Using a Genetic Algorithm. In Mathematics in Science and Technologies 2013. Žilina: Žilinská univerzita, 2013, v tlači.
[4] TOMAN, Ľ. Heuristiky pracujúce na princípe first-fail: Súčasť metódy vetiev a hraníc pri riešení vybraných kombinatorických úloh. In *Úlohy diskrétní optimalizace v dopravní praxi 2012*: Využití telematiky v dopravních a logistických systémech. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera, Pardubice, 2012. ISBN 978-80-7395-554-0, s. 116-130.
[5] TOMAN, Ľ. Informatics decision support system for solving evacuation problem under conditions of uncertainty. In *Zborník príspevkov konferencie Winter school MICT*. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, 2011. ISBN 978-80-557-0252-0, s. 103-105.
[6] TOMAN, Ľ. Iteratívny prístup k návrhu verejného obslužného systému evakuačného typu. In *Zborník medzinárodného seminára Úlohy diskrétní optimalizace v dopravní praxi 2011- současný stav a perspektivy*. 2011. ISBN 978-80-7395-439-0, s. 57-70.
[7] TOMAN, Ľ. Min-Max Approach for Evacuation Problem Supported by BB-Search. In *Transcom*: 9-th European conference of young researches and science workers. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2011. ISBN 978-80-554-0369-4, s. 215-218.
[8] TOMAN, Ľ. Nástroj na podporu rozhodovania pri návrhu verejných obslužných systémov evakuačného typu. In *Zborník príspevkov konferencie „Mladá Veda"* [CD ROM]. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta špeciálneho inžinierstva, Nov. 9.-10., 2010. ISBN 978-80-554-0272-7.
[9] TOMAN, L. Near-optimal Solution of the Evacuation Plan Design with Using Genetic Algorithms. In *Journal of Information, Control and Management Systems*. Žilina: Žilinská univerzita, 2013. ISSN 1336-1716, podané.
[10] TOMAN, Ľ. Objektovo orientovaný návrh nástroja na podporu rozhodovania pre oblasť operačného výskumu. In *INFOTRANS 2011 : Sborník příspěvků konference*. 1. vydanie. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2011. ISBN 978-80-7395-397-3, s. 177-182.
[11] TOMAN, Ľ. The Impact of Fairness on the Efficiency of Genetic Algorithm. In *Technika, technologie, telematika a informatika v dopravních a logistických systémech*. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera, Pardubice, v tlači.
[12] TOMAN, Ľ. The Impact of Uncertain Data on a Quality of the Evacuation Plan Design. In *Optimalizace pokrytí území veřejnými obslužnými systémy*. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera, Pardubice, podané.
[13] TOMAN, Ľ. The Use of the Genetic Algorithm at the Evacuation Plan Design. In *Transcom*: 10th European conference of young researches and scientists. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2013, podané.
[14] TOMAN, Ľ. The use of the genetic algorithm for the upper bound calculation of the vehicle assignment problem. In *Mathematical methods in economics : proceedings of the 30th international conference*. Karvina, Czech Republic: Silesian University in Opava, School of Business Administration in Karvina, 2012. s. 903-908.

10. POUŽITÁ LITERATÚRA A ZDROJE

[15] AHUJA, R. K., ORLIN, J. B. Developing Fitter Genetic Algorithms. In *Proceedings of INFORMS Journal on Computing*. 1997. s. 251-253.
[16] ANDREAS, A. K. Mathematical Programming Algorithms for Reliable Route and Robust Evacuation. PHD Thesis, University of Arizona. 2006.
[17] APT., K. R. *Principles of Constraint Programming*. USA, New York: Cambridge University Press, 2003. 407 s. ISBN 0-521-82583-0.
[18] BARADLAI, E. Rozdelenie obyvateľov regiónov do evakuovaných skupín a ich prerozdelenie k útočiskám ako súčasť nástroja na podporu rozhodovania v krízovej situácii: Diplomová práca. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2010, 78 s.
[19] BEASLEY, D., Bull, D. R., Martin, R. R. An Overview of Genetic Algorithms: Part 1, Fundamentals. In *University Computing*. 1993. 15(2), s. 58-69.
[20] BECTOR, C. R., CHANDRA, S. *Fuzzy Mathematical Programming and Fuzzy Matrix Games*. Berlin: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2005. 236 s. ISBN 3-540-23729-1.
[21] BERTSIMAS, D., FARIAS, V. F., TRICHAKIS, N. The Price of Fairness. In *Operations Research*. 2011. Vol. 59, č. 1, s. 17-31.

Univerzálne nástroje sú určené na riešenie viacerých druhov úloh, ktoré sú popísané matematickými prevažne lineárnymi modelmi. Univerzálnosť týchto nástrojov im však neumožňuje využívať špecifické vlastnosti riešených úloh.

Špecializované nástroje sú určené na riešenie úlohy návrhu evakuačného plánu. Ich výhodou je, že vďaka svojej úzkej špecializácii môžu v maximálnej možnej miere využívať špecifické vlastnosti riešenej úlohy za účelom rýchlejšieho získania kvalitnejšieho riešenia. Medzi ich nevýhody patrí dlhý čas potrebný na ich vývoj.

Autor v [49] dospel k záveru, že je vhodnejšie použiť na riešenie úlohy návrhu evakuačného plánu špecializovaný nástroj, pretože rozhodnutia súvisiace s evakuáciou sú vytvárané pod časovým tlakom, a práve špecializovaný nástroj umožní skrátiť čas potrebný na vypracovanie efektívneho evakuačného plánu.

3. CIEĽ A METODIKA PRÁCE

Pri výskyte mimoriadnej situácie, ktorá si bude vyžadovať evakuáciu obyvateľstva, je potrebné rýchlo a efektívne reagovať. Jednou z možností ako zabezpečiť rýchly návrh efektívneho evakuačného plánu, je vytvorenie špecializovaného nástroja na podporu rozhodovania, ktorý bude slúžiť na riešenie úlohy návrhu evakuačného plánu v podmienkach istoty, ako aj v podmienkach neistoty. Takýto špecializovaný nástroj musí obsahovať sofistikované optimalizačné jadro určené na riešenie tejto úlohy.

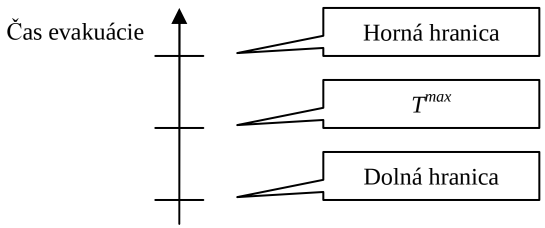
Dizertačná práca sa zaoberá výskumom v oblasti aplikovanej informatiky zameranom na vývoj a implementáciu algoritmov, ktoré umožnia efektívne riešiť úlohu prideľovania dopravných prostriedkov – VAP, a teda aj úlohu návrhu evakuačného plánu ako v podmienkach istoty, tak aj neistoty. Na základe prieskumu existujúcej literatúry autor zistil, že na riešenie tejto úlohy je vhodné použiť iteratívnu metódu, ktorej princíp spočíva v opakovanom riešení redukovanej úlohy prideľovania dopravných prostriedkov – RVAP.

Jedným z cieľom práce je navrhnúť a preskúmať iteratívnu metódu, ktorá bude slúžiť na riešenie VAP v podmienkach istoty, ako aj algoritmy, ktoré budú riešiť RVAP v každom kroku iteratívnej metódy. Autor sa vo výskume zameral na dve takého optimalizačné metódy, a to na metódu vetiev a hraníc a na genetický algoritmus (GA). Výskum týchto algoritmov bol zameraný na vhodné nastavenie ich riadiacich parametrov, ktoré ovplyvňujú ich efektívnosť.

Ďalší z cieľov práce je navrhnúť algoritmus, ktorý umožní riešiť VAP v podmienkach neistoty, a preskúmať jeho vlastnosti. Na popis neistých údajov budú použité prostriedky z teórie fuzzy množín a na zostavenie daného algoritmu bude použitý fuzzy prístup k optimalizácií, pričom kľúčovou súčasťou vytvoreného algoritmu riešiaceho VAP v podmienkach neistoty bude algoritmus riešiaci VAP v podmienkach istoty.

4. ITERATÍVNA METÓDA

Pri riešení úlohy prideľovania dopravných prostriedkov – VAP je cieľom prideliť vozidlá z dopravných parkov na evakuáciu komunít tak, aby bol celkový čas evakuácie minimálny. Iteratívna metóda na riešenie tejto úlohy je založená na transformácii VAP na redukovanú úlohu prideľovania dopravných prostriedkov – RVAP [1], ktorá je ľahšie riešiteľná, a na jej opakovanom riešení. Cieľom RVAP je prideliť vozidlá z dopravných parkov na evakuáciu komunít tak, aby bolo možné vykonať evakuáciu do vopred stanoveného maximálneho času, ktorý je označený symbolom T^{max}. RVAP je následne riešená pre viac takých časov T^{max} a výsledné riešenie VAP je také riešenie RVAP, ktoré bolo získané pre čo najnižší čas. Riešenie RVAP teda tvorí kľúčovú časť iteratívnej metódy. Čas T^{max}, pre ktorý je získané riešenie RVAP tvorí hornú hranicu času optimálneho riešenia VAP. Naopak, čas T^{max}, pre ktorý riešenie RVAP neexistuje, tvorí dolnú hranicu. Iteratívnym riešením RVAP pre rôzne časy T^{max} konverguje interval daný dolnou a hornou hranicou k času optimálneho riešenia VAP s nastaviteľnou presnosťou (viď Obr. 1). Autor v práci hľadal riešenie VAP s presnosťou na jednu minútu, ktorá je postačujúca pri návrhu evakuačného plánu.



Obr. 1 Princíp iteratívnej metódy

4.1 Redukovaná úloha prideľovania dopravných prostriedkov

Na území, ktoré je ohrozené nejakou mimoriadnou udalosťou, sa v cestnej sieti nachádza množina komunít J, kde každá komunita $j \in J$, ktorá je charakterizovaná počtom b_j obyvateľov, ktorých treba evakuovať, je priradená práve jednému útočisku, do ktorého budú evakuovaní jej obyvatelia. V cestnej sieti sa ďalej nachádza množina dopravných parkov I, kde park $i \in I$ má k dispozícii N_i vozidiel s kapacitou K_i. Symbol t_{ij} označuje čas potrebný na presun vozidla z parku i do komunity j a symbol s_j označuje čas potrebný na presun vozidla medzi komunitou j a útočiskom, ku ktorému je táto komunita pridelená. Na skompletizovanie evakuačného plánu je potrebné rozhodnúť o trase každého vozidla, ktoré bude použité na evakuáciu. Za predpokladu, že vozidlo môže byť priradené na evakuáciu najviac jednej komunity, je trasa vozidla po jeho pridelení komunite jednoznačne daná. Táto trasa začína v dopravnom parku i odkiaľ sa vozidlo presunie do komunity j, kde vyzdvihne určitý počet evakuovaných obyvateľov, ktorých následne dopraví do útočiska. Vozidlo môže navštíviť komunitu aj viackrát a evakuovať tak z komunity väčší počet obyvateľov.

Ak symbol p_{ij} reprezentuje počet návštev vozidla z dopravného parku i v komunite j, potom je celkový čas, ktorý strávi vozidlo na cestách, daný výrazom $t_{ij} - s_j + 2s_jp_{ij}$. Ak vezmeme do úvahy maximálny čas evakuácie T^{max}, ktorý nemôže byť prekročený, môžeme pomocou (1) vyjadriť hodnotu celočíselných koeficientov $P_{ij}(T^{max})$ pre $i \in I$ a $j \in J$, ktoré udávajú maximálny počet návštev vozidla z parku i v komunite j do času T^{max}.

$$P_{ij}\left(T^{\max}\right) = \left\lfloor \frac{T^{\max} - t_{ij} + s_j}{2s_j} \right\rfloor \text{ ak } t_{ij} + s_j \le T^{max}, \text{ inak } P_{ij}(T^{max}) = 0. \qquad (1)$$

Ak je hodnota $P_{ij}(T^{max})$ menšia ako 1, potom vozidlo z parku i nemôže byť použité na evakuáciu komunity j, pretože by nestihlo do času T^{max} dopraviť evakuovaných ľudí z komunity j do príslušného útočiska ani jedenkrát. Symbol $J(i)$ označuje množinu komunít $j \in J$, pre ktoré platí nerovnosť $P_{ij}(T^{max}) > 0$, a symbol $I(j)$ označuje množinu parkov $i \in I$, pre ktoré platí nerovnosť $P_{ij}(T^{max}) > 0$. Cieľom RVAP je prideliť vhodné množstvo vozidiel z dopravných parkov $i \in I$ na evakuáciu komunít $j \in J$ tak, aby bolo možné vykonať evakuáciu do vopred stanoveného maximálneho času T^{max}. Nech premenné $q_{ij} \in Z_0^+$ pre $i \in I$, $j \in J(i)$ označujú počet vozidiel pridelených z parku i na evakuáciu komunity j. Potom je matematický model RVAP daný výrazmi (2)-(4), kde koeficienty a_{ij} nadobúdajú hodnotu $P_{ij}(T^{max}) \cdot K_i$.

ako aj v podmienkach neistoty, a ktorý umožnil preveriť použiteľnosť a efektivitu navrhnutých algoritmov.

8. ZÁVER

Evakuácia je prostriedok, ktorý slúži na ochranu životov a zdravia obyvateľstva. Jej efektívny priebeh je podmienený existenciou kvalitného evakuačného plánu, ktorý je výstupom riešenia úlohy návrhu evakuačného plánu. Na vytvorenie takého plánu je však nevyhnute potrebné využitie informatických prostriedkov, pretože bez ich použitia by bola tvorba takého plánu veľmi ťažko realizovateľná.

Autor sa v práci venoval riešeniu NP-ťažkej úlohy prideľovania dopravných prostriedkov – VAP, ktorá je súčasťou úlohy návrhu evakuačného plánu. V práci je uvedený výskum v oblasti aplikovanej informatiky zameraný na návrh a výskum vlastností algoritmov, ktoré slúžia na riešenie VAP v podmienkach istoty, ako aj v podmienkach neistoty.

Práca obsahuje niektoré súčasné prístupy, ktoré boli použité na riešenie tejto úlohy. V práci je ďalej uvedený výskum vlastností algoritmov, na základe ktorého bola vytvorená iteratívna metóda slúžiaca na riešenie VAP v podmienkach istoty. Jej súčasťou sú aj algoritmy určené na riešenie redukovanej úlohy prideľovania dopravných prostriedkov. V práci sú uvedené dva takého algoritmy, a to algoritmus metódy vetiev a hraníc a genetický algoritmus. Výskum týkajúci sa týchto algoritmov bol zameraný na vhodné nastavenie ich riadiacich parametrov.

Na základe výsledkov uvedeného výskumu bol vytvorený iteratívny algoritmus, ktorý efektívne rieši VAP v podmienkach istoty. Tento algoritmus tvorí kľúčovú súčasť algoritmu, ktorý bol následne navrhnutý na riešenie VAP v podmienkach neistoty. Pri tvorbe tohto algoritmu boli použité prostriedky teórie fuzzy množín a bol použitý fuzzy prístup k optimalizácii. Autor v práci uvádza heuristickú iteratívnu metódu, ktorá rieši VAP v podmienkach neistoty v akceptovateľnom výpočtovom čase, ktorý je v súlade s požiadavkou na operatívne riešenie úlohy návrhu evakuačného plánu.

Autor vytvoril, ako súčasť práce, špecializovaný informatický nástroj na podporu rozhodovania, ktorý slúži na riešenie úlohy návrhu evakuačného plánu v podmienkach istoty, ako aj neistoty. V nástroji je integrované optimalizačné jadro, ktoré obsahuje navrhnuté algoritmy.

Vedecký prínos tejto práce spočíva vo vykonanom výskume v oblasti aplikovanej informatiky, v ktorom sa autor zameral na návrh algoritmov riešiacich úlohu prideľovania dopravných prostriedkov a na výskum vlastností týchto algoritmov. Na základe vykonaného výskumu skompletizoval heuristickú iteratívnu metódu, ktorá rieši danú úlohu v podmienkach istoty v akceptovateľnom výpočtovom čase, ktorý je v súlade s požiadavkou na operatívne riešenie úlohy návrhu evakuačného plánu. Danú iteratívnu metódu použil pri vytvorení algoritmu, ktorý rieši úlohu aj v podmienkach neistoty.

9. ZOZNAM PRÁC AUTORA Z OBLASTI SKÚMANEJ PROBLEMATIKY

[1] TOMAN, Ľ. Acceleration of evacuation problem solving by branch and bound method with assistance of rapid excluding of branches. In *Mathematical methods in economics 2011: proceedings of the 29th international conference*. Praha: Professional Publishing, 2011. ISBN 978-80-7431-059-1, s. 715-720.

[2] TOMAN, Ľ. Data Precedence Analysis – Method for Evaluating of the Optimization Methods Parameters Settings. In *MICT 2012 - Mathematics for Information and Communication Technologies*: Proceedings of the 7th Winter School of Mathematics for ICT Students. Žilina: Žilinská univerzita, 2012. ISBN 978-80-554-0594-0.

evakuačného plánu (zvýšením kapacity vozidiel) je možné docieliť zníženie celkového času potrebného na evakuáciu. Kapacita vozidla nachádzajúceho sa v dopravnom parku i bola popísaná trojuholníkovým fuzzy číslom $\boldsymbol{K}_i$, kde hlavná hodnota K_i^2 reprezentuje kapacitu vozidla udanú výrobcom (t.j. hodnotu K_i v prístupe s istými údajmi) a pravá hodnota K_i^3 reprezentuje maximálny počet osôb, ktoré môžu byť prepravované vo vozidle pri prekročení jeho kapacity s prihliadnutím na závažnosť krízovej situácie.

Počas experimentov bola kapacita vozidla prekročená postupne o 5, 10, 15 atď. percent. Výsledná hladina dôveryhodnosti h klesala so stúpajúcou kapacitou vozidla a ustálila sa nad hodnotou 0,5 (pričom väčšina hodnôt patrila do intervalu ⟨0,55; 0,65⟩). So stúpajúcou kapacitou vozidla prirodzene klesal výsledný čas evakuácie, čím bol dosiahnutý želaný efekt. Pri prekročení kapacity vozidla o 10 % malo priemerné zníženie času evakuácie hodnotu približne 5,4 %.

6.4 Neisté časy presunu

V ďalšom prístupe sa autor zameral na neisté časy presunu v cestnej sieti, nakoľko je zrejmé, že čas, ktorý je potrebný na presun z jedného miesta cestnej siete na iné, závisí na viacerých faktoroch (hustota cestnej premávky, poveternostné podmienky apod.). Bolo teda vhodné modelovať tento čas inak ako pomocou jednej hodnoty. Neisté časy t_{ij} a s_j presunu v cestnej sieti boli popísané trojuholníkovými fuzzy číslami $\boldsymbol{t}_{ij}$ a $\boldsymbol{s}_j$, ktoré sú zadané trojicami hodnôt $\langle t_{ij}^1, t_{ij}^2, t_{ij}^3\rangle$ a $\langle s_j^1, s_j^2, s_j^3\rangle$. Hodnoty t_{ij}^1 a s_j^1 reprezentujú čas presunu za priaznivých podmienok (optimistický prípad), naopak hodnoty t_{ij}^3 a s_j^3 reprezentujú čas presunu za nepriaznivých podmienok (pesimistický prípad). Hlavné hodnoty t_{ij}^2 a s_j^2 odpovedajú hodnotám t_{ij} a s_j v prístupe s istými údajmi. Počas experimentov boli hodnoty t_{ij}^2 a s_j^2 znižované resp. zvyšované o p percent, čím boli získané hodnoty t_{ij}^1 a s_j^1 resp. t_{ij}^3 a s_j^3. S rastúcou hodnotou parametra p teda rástla aj neistota, nakoľko sa hodnoty t_{ij}^1 a t_{ij}^3 resp. s_j^1 a s_j^3 vzďaľovali od hodnoty t_{ij}^2 resp. s_j^2.

Počas experimentov bol parameter p postupne nastavovaný na hodnoty 5, 10, 15 atď. percent. Výsledná hladina dôveryhodnosti h so stúpajúcou hodnotou parametra p mierne klesala a ustálila sa okolo hodnoty 0,7 (pričom prevažná väčšina hodnôt patrila do intervalu ⟨0,65; 0,75⟩). So stúpajúcou hodnotou parametra p taktiež klesal výsledný čas evakuácie. Pre hodnotu parametra p = 10 % malo priemerné zníženie času evakuácie hodnotu približne 2,8 %.

Autor sa venoval dvom rôznym prístupom k spracovaniu neistých údajov, ktoré sa vyskytujú pri riešení úlohy VAP (neisté kapacity vozidiel a časy presunov v cestnej sieti). V oboch prístupoch bolo dosiahnuté zníženie celkového času potrebného na evakuáciu. Hoci, následkom zníženia tohto času bolo určité zníženie hladiny dôveryhodnosti návrhu evakuačného plánu, táto dôveryhodnosť sa však pohybovala okolo hodnoty 0,6 v prístupe s neistými kapacitami vozidiel a okolo hodnoty 0,7 v prístupe s neistými dobami presunu v cestnej sieti. Výsledky experimentov teda ukázali, že prípustným znížením dôveryhodnosti návrhu evakuačného plánu je možné znížiť celkový čas potrebný na evakuáciu.

7. NÁSTROJ NA PODPORU ROZHODOVANIA

Autor sa v práci venoval návrhu a výskumu vlastností algoritmov, ktoré umožnia efektívne riešiť úlohu prideľovania dopravných prostriedkov – VAP v podmienkach istoty, ako aj v podmienkach neistoty. Postupnou implementáciou navrhnutých algoritmov vytvoril optimalizačné jadro, ktoré integroval do komplexného špecializovaného nástroja na podporu rozhodovania, ktorý slúži na riešenie úlohy návrhu evakuačného plánu v istých podmienkach,

$$\sum_{j\in J(i)} q_{ij} \le N_i \qquad pre\ i\in I \tag{2}$$

$$\sum_{i\in I(j)} a_{ij} q_{ij} \ge b_j \qquad pre\ j\in J \tag{3}$$

$$q_{ij} \in Z_0^+ \qquad pre\ i\in I,\ j\in J(i) \tag{4}$$

Podmienky (2) zabezpečujú, aby nebolo zo žiadneho dopravného parku vyslaných viac vozidiel, než má park k dispozícii. Podmienky (3) zabezpečia, že priradenie vozidiel z parkov ku komunitám bude také, aby boli evakuovaní všetci obyvatelia zo všetkých komunít. Nájsť riešenie RVAP znamená nájsť riešenie vyhovujúce podmienkam (2)-(4). Tento model je model rozhodovacej úlohy.

4.2 Minimalizačná RVAP

Rozhodovaciu úlohu RVAP (2)-(4) transformoval autor na minimalizačnú úlohu $RVAP_m$ (5)-(10) spôsobom uvedeným v [7]. Zaviedol fiktívnu komunitu r a umelý dopravný park s. Počet vozidiel, ktoré sú vyslané z dopravných parkov $i\in I$ na evakuáciu komunity r, je označený symbolom q_{ir} pre $i\in I$ a počet vozidiel, ktoré sú vyslané z umelého parku s na evakuáciu komunít $j\in J$, symbolom q_{sj} pre $j\in J$.

$$\min \sum_{j\in J} q_{sj} \tag{5}$$

$$\text{zp} \quad \sum_{j\in J(i)} q_{ij} + q_{ir} = N_i \qquad pre\ i\in I \tag{6}$$

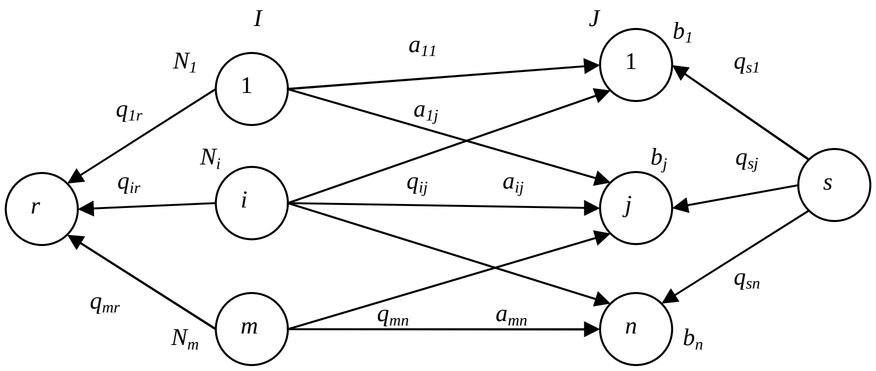
$$\sum_{i\in I(j)} a_{ij} q_{ij} + q_{sj} \ge b_j \qquad pre\ j\in J \tag{7}$$

$$q_{ij} \in Z_0^+ \qquad pre\ i\in I,\ j\in J(i) \tag{8}$$

$$q_{sj} \ge 0 \qquad pre\ j\in J \tag{9}$$

$$q_{ir} \ge 0 \qquad pre\ i\in I \tag{10}$$

Podmienky (6) vyžadujú použiť na evakuáciu všetky vozidlá nachádzajúce sa v dopravných parkoch aj za cenu ich vyslania do fiktívnej komunity r. Podmienky (7) zabezpečia, že budú evakuovaní všetci obyvatelia všetkých komunít aj za cenu ich evakuácie nereálnymi vozidlami vyslanými z umelého dopravného parku s. Grafický model minimalizačnej úlohy je na Obr. 2. Najskôr je snaha evakuovať komunity $j\in J$ pomocou vozidiel z reálnych parkov $i\in I$ (toto je zabezpečené minimalizáciou hodnoty účelovej funkcie). Ak treba, sú na evakuáciu použité aj nereálne vozidlá z umelého parku s.



Obr. 2 Grafický model RVAP$_m$

Je zrejmé, že prípustné riešenie rozhodovacej úlohy RVAP (2)-(4) existuje len vtedy, ak má optimálne riešenie minimalizačnej úlohy RVAP$_\mathrm{m}$ (5)-(10) hodnotu účelovej funkcie (5) rovnú nule, t.j. ak sú na evakuáciu komunít $j\in J$ použité iba vozidlá z existujúcich dopravných parkov $i\in I$. Hľadanie riešenia RVAP je teda ekvivalentné hľadaniu riešenia RVAP$_\mathrm{m}$ s hodnotou účelovej funkcie rovnej nule.

4.3 Heuristická iteratívna metóda

Pomocou iteratívnej metódy je možné získať optimálne riešenie VAP len vtedy, ak pre akýkoľvek čas T^{max} možno rozhodnúť, či riešenie vyhovujúce podmienkam (2)-(4) existuje alebo nie. Problém je, že pre niektoré časy môže trvať hľadanie tejto odpovede príliš dlho. Autor vyriešil tento problém rozšírením množiny možných odpovedí na túto otázku o možnosť NEVIEM, teda *StatusRiešenia*(RVAP) = {EXISTUJE, NEEXISTUJE, NEVIEM}. Týmto urobil z algoritmu, ktorý rieši RVAP, algoritmus, ktorý vráti odpoveď NEVIEM, ak pomocou vopred pridelených výpočtových prostriedkov (napr. pri metóde vetiev a hraníc to môže byť maximálny pridelený výpočtový čas, pri GA to môže byť maximálny počet generačných výmen apod.) nezistí, či riešenie vyhovujúce podmienkam (2)-(4) existuje alebo nie. Pozitívny dôsledok tejto úpravy je, že algoritmus riešiaci VAP môže pre niektoré časy T^{max} dostať odpoveď *StatusRiešenia*(RVAP) = NEVIEM, čím sa vyhne neprípustne dlhému čakaniu na odpoveď EXISTUJE alebo NEEXISTUJE, a získa tak výsledné suboptimálne riešenie VAP v akceptovateľnom výpočtovom čase.

Autor v práci navrhol algoritmus (ide o implementáciu iteratívnej metódy) riešiaci VAP v podmienkach istoty. Význam jednotlivých symbolov je nasledovný:

- T^{max} – čas v minútach, pre ktorý je riešená RVAP
- T^{HH} – horná hranica času optimálneho riešenia VAP [minúta]
- T^{DH} – dolná hranica času optimálneho riešenia VAP [minúta]
- T^{DI} – pomocná premenná zdola ohraničujúca interval, z ktorého je vyberaný čas T^{max} [minúta]. Reprezentuje čas, pre ktorý riešenie RVAP buď neexistuje, alebo sa ho nepodarilo nájsť pomocou použitého algoritmu. Je inicializovaná na hodnotu o jednotku menšiu (presnosť s akou je hľadané riešenie VAP je stanovená na 1 minútu) než dolná hranica (dolná hranica je najnižší čas, pre ktorý existuje alebo môže existovať riešenie VAP).

v optimistickom a pesimistickom prípade. Tieto optimistické a pesimistické varianty úlohy boli vyriešené, čím boli získané hodnoty T^1 a T^2. Zostávalo vyriešiť úlohu popísanú nasledovným modelom, kde hladina *h* ovplyvňuje hodnotu fuzzy koeficientov modelu (2), (4) a (15).

$$\max \quad h \tag{16}$$

$$\text{zp} \quad T^{\max} \le \lfloor hT^1 + (1-h)T^2 \rfloor \tag{17}$$

$$Rie\check{s}\left(RVAP\left(T^{\max}\right)\right) = EXISTUJE \tag{18}$$

$$T^{\max} \in Z_0^+ \tag{19}$$

Na jej riešenie autor použil Tanaka-Asai-ovu metódu [87], ktorej princíp spočíva vo fixovaní hladiny dôveryhodnosti *h* na pevne zvolenú hodnotu a v riešení (17)-(19). Úloha je riešená pre viac hodnôt *h* a výsledné riešenie je to, ktoré bolo nájdené pre najvyššiu hladinu dôveryhodnosti *h*. Aby mohli byť na riešenie (17)-(19) použité navrhnuté algoritmy, bol použitý prístup z [52], v ktorom je pre danú hladinu dôveryhodnosti *h* nastavená hodnota času T^{max} na hodnotu danú pravou stranou výrazu (17) a následne je riešená iba úloha (18)-(19).

Autor v práci navrhol nasledovný algoritmus riešiaci VAP v podmienkach neistoty. Význam jednotlivých symbolov je nasledovný:

- T^1 – čas evakuácie v optimistickom prípade
- T^2 – čas evakuácie v pesimistickom prípade
- *h* – zvolená hladina dôveryhodnosti
- h^{max} – horná hranica pre výslednú hladinu dôveryhodnosti
- h^{min} – dolná hranica pre výslednú hladinu dôveryhodnosti
- ε – požadovaná presnosť pre hľadanú hladinu dôveryhodnosti
- T^{max} – čas v minútach, pre ktorý je riešená RVAP a ktorý patrí do fuzzy množiny dostatočne nízkych hodnôt účelovej funkcie na danej hladine dôveryhodnosti *h*

Algoritmus 2 Algoritmus na riešenie VAP s neistými údajmi

Urči časy T^1 a T^2 *// Čas evakuácie v optimistickom a pesimistickom prípade*
$h^{min} \leftarrow 0$; $h^{max} \leftarrow 1$
while ($h^{max} - h^{min} > \varepsilon$) **do**
  $h \leftarrow (h^{max} + h^{min}) / 2$
  $T^{max} \leftarrow hT^1 + (1 - h)T^2$
  StatusRiešenia ← *Rieš*(RVAP(T^{max}))
  if *StatusRiešenia* = EXISTUJE **then**
    $h^{min} \leftarrow h$
  else
    $h^{max} \leftarrow h$
end while

Autor vykonal s navrhnutým algoritmom experimenty zamerané na vplyv neistých údajov na kvalitu návrhu evakuačného plánu.

6.3 Kapacita vozidla

V prvom prístupe sa zameral na kapacitu vozidiel použitých na evakuáciu. Každé vozidlo má výrobcom stanovenú kapacitu, ktorá udáva, koľko osôb je v ňom možné prepravovať. Kapacita vozidla však môže byť do určitej miery prekročená, zvlášť, ak ide o krízovú situáciu. Hlavná myšlienka tohto prístupu spočívala v tom, že znížením dôveryhodnosti návrhu v podmienkach istoty. V tejto časti sú porovnané navrhnuté algoritmy určené na riešenie VAP v podmienkach istoty z hľadiska kvality získaných riešení a časovej náročnosti výpočtu za účelom výberu algoritmu, ktorý poskytne kvalitné riešenie VAP v krátkom čase.

Porovnanie navrhnutých algoritmov ukázalo, že na riešenie VAP v podmienkach istoty je jednoznačne vhodnejšie použiť iteratívnu metódu, kde je RVAP riešená pomocou genetického algoritmu, než pomocou metódy vetiev a hraníc. Nielenže sú pomocou GA získané lepšie riešenia, naviac jeho použitím je ušetrené značné množstvo výpočtového času, čo potvrdili už experimenty v [9]. Rýchlosť, akou zvolený algoritmus získa riešenie VAP, je v súlade s požiadavkou na operatívne riešenie VAP, a teda aj úlohy návrhu evakuačného plánu. Daný algoritmus bol použitý v nasledujúcom výskume pri riešení VAP s neistými údajmi.

6. NEISTÉ ÚDAJE PRI RIEŠENÍ VAP

Doposiaľ boli pri riešení VAP uvažované iba presne zadané údaje. Či už išlo o doby presunu v cestnej sieti t_{ij} a s_j, o počet obyvateľov b_j, ktorých treba evakuovať, alebo o kapacitu K_i vozidla použitého na evakuáciu, vždy sa predpokladalo, že hodnoty týchto vstupných údajov sú známe a presne stanovené. Je zrejmé, že v reálnom svete takáto situácia mnohokrát neplatí. Veľakrát sú známe iba intervaly, v ktorých ležia hodnoty koeficientov. Pri riešení VAP sa môžeme stretnúť s neistými hodnotami nasledovných koeficientov: t_{ij}, s_j, b_j a K_i.

6.1 Popis neistých údajov

Autor využil na popis neistých údajov trojuholníkové fuzzy čísla, kde napr. neistú dobu presunu v cestnej sieti t_{ij} popísal trojuholníkovým fuzzy číslom $\boldsymbol{t}_{ij}$, ktoré je definované trojicou hodnôt t_{ij}^1, t_{ij}^2 a t_{ij}^3 (ľavá, hlavná a pravá hodnota), pričom hlavná hodnota t_{ij}^2 vyjadruje čas, o ktorom si myslíme, že najlepšie vystihuje skutočný čas potrebný na presun. Ľavá hodnota t_{ij}^1 udáva čas, ktorý je potrebný na presun v prípade priaznivých podmienok (optimistický prípad), a pravá hodnota t_{ij}^3 vyjadruje čas potrebný v prípade nepriaznivých podmienok (pesimistický prípad). Analogickým spôsobom môžu byť popísané aj neisté hodnoty koeficientov s_j, b_j a K_i. Matematický model RVAP (2)-(4) môže teda obsahovať namiesto podmienok (3) podmienky (15) obsahujúce uvedené fuzzy koeficienty.

$$\sum_{i \in I(j)} \mathbf{P}_{ij}\left(T^{\max}\right)\mathbf{K}_i q_{ij} \geq \mathbf{b}_j \qquad pre\ j \in J \tag{15}$$

6.2 Fuzzy prístup k optimalizácii

Na riešenie VAP s neistými údajmi využil autor fuzzy prístup k optimalizácii uvedený v [87]. Podstatou tohto fuzzy prístupu je nájsť takú najvyššiu hladinu dôveryhodnosti $h \in (0; 1\rangle$, pre ktorú sú splnené príslušné obmedzujúce podmienky na hladine h, pričom hodnota účelovej funkcie (čas evakuácie) patrí do fuzzy množiny dostatočne nízkych hodnôt účelovej funkcie na danej hladine dôveryhodnosti h. Fuzzy množinu $\boldsymbol{T}$ dostatočne nízkych hodnôt účelovej funkcie je možné určiť pomocou hodnôt T^1 a T^2, kde T^1 je čas evakuácie získaný pre optimistický variant úlohy (krátke doby presunu v cestnej sieti, zvýšená kapacita dopravných prostriedkov apod.) a T^2 je čas evakuácie získaný pre pesimistický variant úlohy, prípadne pre variant, v ktorom sú do úvahy brané hlavné hodnoty fuzzy čísel popisujúcich neisté údaje.

Na vyhodnocovanie fuzzy nerovností bol použitý min-max princíp z [79]. Podľa tohto princípu patrí čas evakuácie T do fuzzy množiny $\boldsymbol{T}$ dostatočne nízkych hodnôt účelovej funkcie na hladine dôveryhodnosti h, ak platí $T \leq \lfloor hT^1 + (1-h)T^2 \rfloor$. Na riešenie úlohy VAP s neistými údajmi bol použitý nasledovný postup. Podľa zvoleného prístupu k neistote, ktorý ovplyvňuje to, aké koeficienty modelu úlohy budú považované za neisté a akým spôsobom budú spracovávané, boli určené hodnoty príslušných fuzzy koeficientov modelu (2), (4) a (15)

Algoritmus 1 Iteratívny algoritmus

Inicializuj T^{DH}, T^{HH}
$T^{DI} \leftarrow T^{DH} - 1$ *// Pre čas T^{DH} môže existovať riešenie RVAP, pre čas $T^{DH} - 1$ určite nie.*
while $(T^{HH} - T^{DI} > 1)$ **do** *// Riešenie VAP je hľadané s presnosťou na 1 minútu.*
    $T^{max} \leftarrow (T^{HH} + T^{DI})$ **div** 2
    StatusRiešenia ← *Rieš*(RVAP(T^{max}))
    case StatusRiešenia **of**
        EXISTUJE: $T^{HH} \leftarrow T^{max}$
        NEEXISTUJE: $T^{DI} \leftarrow T^{max}$; $T^{DH} \leftarrow T^{max} + 1$
        NEVIEM: $T^{DI} \leftarrow T^{max}$
    end case
end while

Po vykonaní algoritmu bude T^{HH} obsahovať výsledný čas riešenia VAP a T^{DH} dolnú hranicu času optimálneho riešenia VAP. Hodnota T^{DH} je inicializovaná na najvyšší čas $T \in Z_0^+$ taký, kde pre čas $T - 1$ neexistuje optimálne riešenie LP relaxovanej $RVAP_m$ s hodnotou účelovej funkcie rovnej nule (t.j. neexistuje riešenie LP relaxovanej RVAP). Hodnota T^{HH} je inicializovaná autorom navrhnutou metódou, ktorá je popísaná v nasledujúcej časti.

Počiatočná horná hranica VAP

Na inicializáciu hodnoty T^{HH} v algoritme „Algoritmus 1“ autor navrhol tri metódy, ktorých detailný popis je uvedený v [57]. Princíp prvej metódy spočíva vo využití iteratívnej metódy (Algoritmus 1), kde je počas jednotlivých iterácií riešená RVAP pomocou metódy vetiev a hraníc, pričom, ak nie je do vopred stanoveného maximálneho výpočtového času zistené, či riešenie RVAP existuje alebo neexistuje, metóda vráti odpoveď NEVIEM. Maximálny výpočtový čas bol stanovený na nízku hodnotu (cca 0,3 sekundy), čím bola z iteratívnej metódy vytvorená metóda, ktorá získa v krátkom výpočtovom čase (niekoľko sekúnd) relatívne dobré riešenie VAP. Čas T^{max}, pre ktorý bolo nájdené toto riešenie, tvorí počiatočnú hornú hranicu. Algoritmus 1 sám vyžaduje inicializáciu hornej hranice. Tá bola v tomto prípade nastavená na dostatočne vysokú hodnotu, ktorú je jednoduché určiť pre každý prípad úlohy.

Druhá metóda sa skladá z troch krokov. V prvom kroku je nájdené riešenie $\mathbf{q}$ LP relaxovanej úlohy (2)-(4) pre čo najnižší čas T. Toto riešenie je nejakým spôsobom zaokrúhlené, čím je získané celočíselné riešenie $\underline{\mathbf{q}} = round(\mathbf{q})$. Zaokrúhľovanie je vykonané tak, aby boli dodržané podmienky (2). Zaokrúhľovaním tokov sú ušetrené niektoré vozidlá, ale môže sa stať, že budú porušené podmienky (3), a teda niektoré komunity nebudú evakuované celé (ich požiadavka nebude uspokojená). Ak také komunity existujú, v druhom kroku sú im proporcionálne pridelené doposiaľ nepoužité (ušetrené) vozidlá z dopravných parkov. Proporcionálny spôsob pridelenia vozidiel znamená, že čím viac je komunita neuspokojená (čím viac obyvateľov z nej nebolo evakuovaných), tým je jej pridelených viac vozidiel. Ak po tomto pridelení stále existujú neuspokojené komunity, v poslednej fáze metódy je postupne zvyšovaný čas T o hodnotu 1 (tým rastie hodnota koeficientov a_{ij}), až pokým nie je získané prípustné riešenie pre (2)-(4). Naviac, keďže zvyšovanie času T spôsobuje zvyšovanie hodnôt koeficientov a_{ij}, niektorej komunite môže byť po zvýšení času poskytnutá dostatočná evakuačná kapacita daná ľavou stranou podmienky (3) a táto komunita zostane uspokojená, aj keď jej budú odobraté niektoré pridelené vozidlá. V takom prípade je takejto komunite odobratý príslušný počet vozidiel a tie sú pridelené iným doposiaľ neuspokojeným komunitám. Po ukončení tejto metódy reprezentuje čas T hornú hranicu času optimálneho riešenia VAP.

Každá z metód ponúka niektoré výhody. Pri použití prvej metódy môže dôjsť k zlepšeniu dolnej hranice času optimálneho riešenia VAP. Druhá metóda zasa potrebuje na svoje vykonanie kratší výpočtový čas. Autor vytvoril tretiu metódu, ktorá je použitá na inicializáciu hodnoty T^{HH} v algoritme „Algoritmus 1“. Metóda spája dobré vlastnosti predchádzajúcich dvoch. Jej princíp je nasledovný. Najskôr je určená horná hranica pomocou druhej metódy, potom pomocou prvej metódy (tu mohlo dôjsť k zlepšeniu dolnej hranice) a nižšia zo získaných horných hraníc bude počiatočná horná hranica VAP. Nakoľko výpočtové časy oboch použitých metód sú krátke, pomocou tejto metódy je získaná dobrá počiatočná horná hranica v krátkom výpočtovom čase niekoľko sekúnd [57].

5. METÓDY RIEŠIACE RVAP

Súčasťou iteratívnej metódy sú algoritmy, ktoré slúžia na riešenie redukovanej úlohy prideľovania dopravných prostriedkov – RVAP. Autor sa v práci zameral na výskum vlastností metódy vetiev a hraníc a genetického algoritmu.

5.1 Metóda vetiev a hraníc

Metóda vetiev a hraníc (*Branch and Bound Method*) je exaktná metóda používaná na riešenie úloh úplného a zmiešaného celočíselného lineárneho programovania. Na získanie konkrétneho algoritmu tejto metódy je potrebné určiť nasledovné kroky:

1. schéma prehľadávania stromu riešení
2. spôsob vetvenia
3. výpočet dolnej hranice spracovávanej vetvy
4. metóda nájdenia celočíselného prípustného riešenia v spracovávanej vetve

5.1.1 Dolná hranica minimalizačnej RVAP

Vetvenie je v metóde vetiev a hraníc zabezpečené dodaním horného S_{ij} a dolného R_{ij} obmedzenia hodnôt q_{ij}, t.j. podmienok (11) a (12) do modelu RVAP_m (5)-(10).

$$q_{ij} \leq S_{ij} \quad pre\ i \in I,\ j \in J(i) \tag{11}$$

$$q_{ij} \geq R_{ij} \quad pre\ i \in I,\ j \in J(i) \tag{12}$$

Dolná hranica hodnôt účelovej funkcie všetkých celočíselných riešení v spracovávanej vetve je hľadaná riešením LP relaxovanej RVAP_m, ktorej model (5)-(10) je transformovaný odstránením dolného obmedzenia R_{ij} hodnôt q_{ij} pre $i \in I$, $j \in J(i)$. Kompletná transformácia je uvedená v [88]. Nech je táto transformácia označená symbolom F. Transformovanú úlohu je možné reprezentovať grafom uvedeným na Obr. 2, pričom úlohu je možné riešiť ako tokovú úlohu v danom grafe. Na riešenie LP relaxovanej RVAP_m bol na Katedre dopravných sietí Fakulty riadenia a informatiky Žilinskej univerzity v Žiline vyvinutý špeciálny algoritmus, ktorého autormi sú prof. RNDr. Jaroslav Janáček, CSc. a autor tejto práce. Algoritmus je principiálne podobný algoritmu, ktorý slúži na hľadanie zlepšujúcich polociest pri riešení dopravných úloh maďarskou metódou. Tento však hľadá okrem zlepšujúcich polociest aj polocykly a poloťahy (poloťahy môžu byť dvoch druhov). Po nájdení takejto zlepšujúcej „pološtruktúry“ a následnej reorganizácií tokov (premenných q_{ij}) dôjde k zníženiu tokov vychádzajúcich z umelého parku s, t.j. je znížená hodnota účelovej funkcie (5). V [57] je uvedený dôkaz, že ak ani jedna takáto zlepšujúca „pološtruktúra“ neexistuje, súčasné riešenie je optimálne. Existencia zlepšujúcich polociest, polocyklov a poloťahov je možná na základe nerovnakých zosilňujúcich koeficientov a_{ij}, ktoré pôsobia na hranách grafu a umožňujú vhodným presmerovaním tokov lepšie využiť potenciál dopravných parkov. Pri hľadaní zlepšujúcich polociest, polocyklov a poloťahov môžu nastať 4 prípady:

komunity j pridelené buď všetky zvyšné vozidlá z parku i, alebo taký počet vozidiel, ktorý plne uspokojí zostatkovú požiadavku komunity j. Je zrejmé, že dopravný park nachádzajúci sa na začiatku parkovej časti genotypu (viď Obr. 3 (a), park 1) rýchlo pridelí všetky svoje vozidlá, a preto komunita, ktorá je spracovávaná ako posledná (nachádza sa na konci komunitnej časti genotypu), pravdepodobne nebude môcť získať z tohto parku žiadne vozidlo. Toto môže považovať daná komunita za neférové, pretože nemá rovnaký prístup k vozidlám ako komunity nachádzajúce sa na začiatku komunitnej časti genotypu.

Aby boli komunity do určitej miery zrovnoprávnené v prístupe k vozidlám z jednotlivých dopravných parkov, navrhol autor nasledujúce opatrenie. Hodnotu, ktorá udáva koľko najviac vozidiel z parku i môže byť jednorazovo pridelených komunite j pri nastavovaní premennej q_{ij}, obmedzil horným obmedzením označeným symbolom U. Pre malé hodnoty parametra U pridelí park komunite iba malý počet vozidiel, a preto možno predpokladať, že dokonca aj komunita, ktorá je spracovávaná ako posledná, má dobrú šancu na získanie určitého počtu vozidiel z dopravného parku, ktorý je spracovávaný ako prvý. Týmto spôsobom bola do určitej miery zapracovaná férovosť do procesu prideľovania dopravných prostriedkov.

Výsledky experimentov ukázali, že nie je vhodné obmedzovať hodnotu počtu vozidiel priraďovaných vozidiel, t.j. nie je vhodné zapracovávať férovosť do GA. Existuje predpoklad, že ak majú komunity k vozidlám neférový prístup, potom dva rozličné jedince (genotypy) reprezentujú dve rozličné riešenia (fenotypy), a teda je preskúmaný väčší priestor riešení. Ale ak je zavedená férovosť v prístupe komunít k vozidlám, potom má každá komunita väčšiu šancu získať vozidlá z hociktorého dopravného parku. V takom prípade, pri aplikácii genotyp–fenotyp mapovania na dva rôzne jedince (genotypy), sú pravdepodobne získané dve podobné riešenia (fenotypy) (možno povedať, že je získané „priemerné“ riešenie dvakrát). To znamená, že bude preskúmaný menší priestor riešení. Dobrá vlastnosť GA je, že diverzita genotypu by mala zabezpečiť diverzitu fenotypu. Pri zrovnoprávnení komunít v prístupe k vozidlám je zrejme táto vlastnosť GA potlačená.

5.2.4 GA ako súčasť metódy vetiev a hraníc

Genetický algoritmus je efektívny a populárny algoritmus, ktorý bol s úspechom použitý v reálnych aplikáciách. Autor použil v [14] GA ako metódu na získavanie hornej hranice pri spracovávaní vrcholov stromu riešení v metóde vetiev a hraníc. Na genotyp–fenotyp mapovanie bola použitá zaokrúhľovacia heuristika uvedená v časti 5.1.3 „Metódy na získanie celočíselného riešenia“ ako „Prvá heuristika“. Nakoľko táto heuristika zaokrúhľuje toky q_{ij} v určitom poradí dvojíc ij, význam genotypu zostáva nezmenený.

Experimenty boli zamerané na vhodné nastavenie parametrov počet generačných výmen a počet jedincov v populácií. Výsledky experimentov ukázali, že čím bola hodnota týchto parametrov nižšia, tým boli získané lepšie riešenia. Na základe experimentov je zrejmé, že nie je vhodné použiť GA ako súčasť metódy vetiev a hraníc. GA je efektívny algoritmus, ktorého sila spočíva v evolučnom procese, počas ktorého sú vyšľachtení dobrí jedinci reprezentujúci dobré riešenia. Tento evolučný proces si však vyžaduje dostatočné množstvo výpočtového času. Avšak metódy, ktoré sú použité ako súčasti metódy vetiev a hraníc, musia pracovať rýchlo, nakoľko strom riešení obsahuje veľké množstvo vrcholov, ktoré je potrebné spracovať. Tieto dve kritériá sú teda protichodné. Pre nízke hodnoty uvedených parametrov nie je GA schopný získať kvalitné riešenia, a teda iba spomaľuje výpočet úlohy realizovaný pomocou metódy vetiev a hraníc.

5.2.5 Porovnanie algoritmov

Jedným z cieľov tejto práce je návrh algoritmu, ktorý bude riešiť úlohu prideľovania dopravných prostriedkov (resp. úlohu návrhu evakuačného plánu) v podmienkach neistoty. Na jeho vytvorenie bolo potrebné zostaviť algoritmus, ktorý bude riešiť danú úlohu efektívne

5.2.1 Elitizmus a opakovaný beh GA

Jedným zo spôsobov, ako zlepšiť efektivitu GA, sa autor zaoberal v [3]. Išlo o použitie konceptov elitizmu (*élitism*) a populačného prekrývania (*population overlaps*) [81] a taktiež opakovaného spúšťania GA z rôznych náhodne zvolených počiatočných populácií (podľa odporúčania v [97]), nakoľko GA patrí medzi stochastické algoritmy, a teda dva behy GA s tým istým nastavením parametrov môžu poskytnúť dve rôzne riešenia tej istej úlohy. Preto má zmysel spustiť GA viackrát a vybrať najlepšie riešenie. Dané koncepty boli aplikované pri výbere jedincov do novej populácie medzi jednotlivými generáciami v rámci jedného behu GA, ako aj medzi jednotlivými behmi GA pri jeho opakovanom spúšťaní. Pri použití elitizmu bol do novej populácie automaticky umiestnený najlepší jedinec zo starej populácie. Pri populačnom prekrývaní boli do novej populácie umiestnení viacerí jedinci, ktorí patrili medzi najlepších.

Prvá séria experimentov bola zameraná na aplikáciu elitizmu a populačného prekrývania medzi jednotlivými generáciami v rámci jedného behu GA. Experimenty ukázali, že so stúpajúcou hodnotou parametra, ktorý udáva počet jedincov, ktorí sú automaticky umiestnený do novej populácie, klesala kvalita riešení, a teda nebolo vhodné použiť ani koncept elitizmu ani populačného prekrývania. Takýto výsledok je prekvapujúci, nakoľko v literatúre sa väčšinou uvádza pozitívny vplyv elitizmu. Koncept elitizmu bolo vhodné použiť len pre najnižšiu skúmanú hodnotu (50) parametrov počet generačných výmen a počet jedincov. Pre vyššie hodnoty týchto parametrov (100, 150 a 200) to vhodné nebolo. Existuje predpoklad, že je výhodnejšie radšej preskúmať väčší priestor riešení, než udržiavať, hoci dobré, ale už preskúmané riešenie.

Počas ďalších experimentov skúmal autor vplyv opakovaného spúšťania GA na kvalitu riešení. Podľa očakávania, s počtom opakovaných spustení GA bola zvyšovaná aj kvalita získaných riešení, avšak prirodzene narastal aj výpočtový čas. Vhodné nastavenie počtu opakovaných spustení závisí na aktuálnych požiadavkách. Je potrebné urobiť vhodný kompromis podľa toho, či je dôležitejšia o niečo lepšia kvalita výsledkov alebo rýchlosť ich získania.

V poslednej sérii experimentov autor skúmal vplyv konceptov elitizmu a populačného prekrývania aplikovaných medzi jednotlivými behmi GA na kvalitu získaných riešení. Podobne ako v prvej sérií experimentov, aj tu výsledky ukázali, že je najvýhodnejšie nepoužiť ani koncept elitizmu, ani populačného prekrývania medzi jednotlivými behmi GA.

5.2.2 Selekcia a kríženie

Ďalšiemu spôsobu, ako zefektívniť GA s minimálnym predĺžením výpočtového času, sa autor venoval v [13], kde sa zameral na použitie vybraných operátorov kríženia a selekcie. Cieľom bolo určiť kombináciu operátorov, ktorá vedie k zvýšeniu efektivity GA. Boli skúmané dva operátory selekcie: ruletový výber spojený s rankingom [14] a turnajový výber, v ktorom sa náhodne zvolených τ jedincov zúčastní turnaja a najlepší účastník sa stáva víťazom (je vybraný). Taktiež boli skúmané dva operátory kríženia: partially mapped crossover a upravený uniform crossover. V partially mapped crossover je možné zvoliť počet bodov kríženia, ktoré budú definovať čiastočné mapovanie. Na základe výsledkov experimentov a odporúčaní v [81] bola stanovená najlepšia kombinácia operátorov selekcie a kríženia v GA na riešenie RVAP_m. V tejto kombinácií je použitý turnajový výber s počtom účastníkov turnaja dva a upravený uniform crossover.

5.2.3 Férovosť v GA

Pažravá prideľovacia heuristika použitá v GA na genotyp–fenotyp mapovanie sa pri nastavovaní hodnoty premennej q_{ij} snaží čo najrýchlejšie uspokojiť komunitu j, t.j. evakuovať z nej všetkých obyvateľov. Následkom toho je, že z dopravného parku i sú na evakuáciu

1. nájdenie zlepšujúcej polocesty, ktorá začína v umelom parku s a končí vo fiktívnej komunite r
2. nájdenie zlepšujúceho polocyklu, ktorý začína a končí v umelom parku s
3. nájdenie zlepšujúceho poloťahu, ktorý začína v umelom parku s a končí v niektorom parku $i \in I$
4. nájdenie zlepšujúceho poloťahu, ktorý začína v umelom parku s a končí v niektorej komunite $j \in J$

Inverznou transformáciou F^{-1} k transformácií F je získané z neceločíselného riešenia LP relaxovanej transformovanej RVAP_m neceločíselné riešenie LP relaxovanej RVAP_m (5)-(10) a (11)-(12).

5.1.2 Vetvenie

S problematikou vetvenia sú spojené nasledovné stratégie, ktoré ovplyvňujú poradie spracovávania vrcholov v strome riešení, a teda aj efektívnosť metódy vetiev a hraníc pri riešení RVAP:

1. *stratégia výberu premennej na vetvenie* (SVVP) – podľa tejto stratégie je vybraná premenná, podľa ktorej bude vykonané vetvenie.
2. *stratégia primárneho vetvenia* (SPV) – táto stratégia hovorí, či je pri vetvení vo vrchole stromu riešení obmedzená hodnota zvolenej premennej primárne zhora alebo zdola.

Autor navrhol osem stratégií výberu premennej na vetvenie. Všetky tieto stratégie vychádzajú zo špecifických vlastností úlohy a pracujú na princípe *first-fail* [17]. To znamená, že sú založené na „poškodzovaní“ resp. znižovaní možnosti na nájdenie požadovaného riešenia. Tento princíp sa však ukazuje ako sľubná cesta pri návrhu takýchto stratégií. Autor tiež navrhol osem stratégií primárneho vetvenia a v [4] skúmal efektívnosť jednotlivých kombinácií stratégií.

5.1.3 Metódy na získanie celočíselného riešenia

Jeden z krokov pri spracovávaní vrcholu v strome riešení spočíva v nájdení celočíselného riešenia, ktoré vyhovuje modelu úlohy prislúchajúcemu k danému vrcholu. Autor v práci skúmal efektívnosť dvoch heuristík, ktoré slúžia na získanie celočíselného riešenia. Obe heuristiky využívajú riešenie LP relaxovanej RVAP_m.

Prvá heuristika pracuje v dvoch fázach. V prvej fáze je každý tok q_{ij}, pre $i \in I$, $j \in J(i)$ určitým spôsobom zaokrúhlený (buď nadol, alebo nahor). Zaokrúhľovaním tokov nadol sa šetria vozidlá v parkoch, ale znižuje sa počet evakuovaných obyvateľov a naopak. V druhej fáze, sa heuristika pokúsi z ušetrených vozidiel v parkoch doplniť chýbajúcu evakuačnú kapacitu komunitám, ktoré zostali z dôvodu zaokrúhľovania tokov neuspokojené. Riešenie RVAP_m s hodnotou účelovej funkcie rovnej nule je nájdené, ak je po aplikácií tejto heuristiky uspokojená každá komunita $j \in J$.

Druhá heuristika obsahuje sedem metód, ktoré určitým spôsobom upravujú neceločíselné riešenie RVAP_m a snažia sa získať celočíselné. Metódy sú volané v niekoľkých cykloch, pokým nastáva úprava aktuálneho riešenia. Po ich vykonaní heuristika skontroluje, či bolo nájdené celočíselné riešenie s hodnotou účelovej funkcie rovnej nule.

Experimenty ukázali, že efektivita oboch heuristík je približne rovnaká.

5.1.4 Dedenie neceločíselného riešenia

Výskum časovej náročnosti jednotlivých krokov pri spracovávaní vrcholu stromu riešení ukázal, že najviac výpočtového času si vyžaduje hľadanie riešenia LP relaxovanej RVAP_m. Na základe týchto výsledkov sa autor v [7] zaoberal spôsobom ako „dediť“ neceločíselné riešenia $RVAP_m$ pri postupe v strome riešení smerom nadol.

Nakoľko sa model úlohy v potomkovi líši len o málo (o jednu dodatočnú štrukturálnu podmienku) od modelu úlohy v jeho priamom predkovi, existuje predpoklad, že výsledné neceločíselné riešenie získané v predkovi sa bude líšiť tiež len o málo od riešenia získaného v potomkovi, a teda malou úpravou optimálneho riešenia získaného v predkovi je možné získať riešenie vyhovujúce úlohe riešenej v potomkovi. LP relaxovanú úlohu v potomkovi potom nie je potrebné riešiť „celú“, čím je možné dosiahnuť úsporu výpočtového času.

Navrhnutý spôsob šetrí výpočtový čas potrebný na nájdenie neceločíselného riešenia LP relaxovanej $RVAP_m$, pričom úspora výpočtového času sa pohybovala okolo hodnoty 60 %. Napriek tomu, tento spôsob nie vždy viedol k nájdeniu lepšieho riešenia VAP. V niektorých prípadoch bol čas výsledného riešenia VAP horší ako v prípade, keď nebolo dedenie neceločíselného riešenia použité. Existuje predpoklad, že dedenie neceločíselného riešenia spôsobilo vznik inej štruktúry výsledného riešenia LP relaxovanej $RVAP_m$. To následne viedlo k výberu iných premenných, podľa ktorých bolo vykonané vetvenie. Poradie spracovávania vrcholov stromu riešení bolo teda odlišné a prehľadávanie sa v strome riešení presunulo do oblasti, v ktorej nebola metóda použitá na hľadanie celočíselného prípustného riešenia úspešná.

5.1.5 Rýchle vylúčenie vetiev z koreňa stromu riešení

Ďalší výskum v [1] autor zameral na vylučovanie vetiev z koreňa stromu riešení, čím by bola urýchlená konvergencia metódy vetiev a hraníc k optimálnemu riešeniu. V pôvodnom prístupe sú hodnoty dolného (R_{ij}) a horného (S_{ij}) obmedzenia tokov q_{ij} nastavené podľa (13) a (14). Tieto hodnoty reprezentujú počiatočné rozumné obmedzenia tokov.

$$R_{ij} = 0 \tag{13}$$

$$S_{ij} = \min\left\{N_i; \left\lceil b_j / a_{ij} \right\rceil\right\} \tag{14}$$

Po nastavení horného a dolného obmedzenia uvedeným spôsobom pre všetky toky, popisuje model (5)-(10) a (11)-(12) koreň stromu riešení. Autor navrhol spôsob, ktorý je možné spresniť dolné a horné obmedzenie pre každý tok, čím by bolo vylúčených z koreňa stromu riešení značné množstvo vetiev. Princíp je vysvetlený pre konkrétny tok q_{vw}, ku ktorému prislúchajú koeficienty R_{vw} a S_{vw}.

Ak bude postupne znižovaná hodnota S_{vw} o jedna smerom k hodnote R_{vw} (vrátane), môže nastať situácia, že pre niektorú hodnotu $S`_{vw}$ už neexistuje riešenie LP relaxovanej RVAP. Ak nie je povolené vyslať z parku $v$ do komunity $w$ viac vozidiel ako $S`_{vw}$, potom neexistuje riešenie LP relaxovanej RVAP, a teda ani pôvodnej RVAP. Aby mohlo existovať riešenie RVAP, musí byť teda vyslaných viac ako $S`_{vw}$ vozidiel, a preto dolné obmedzenie $R_{vw}$ nadobudne novú a presnejšiu hodnotu $S`_{vw} + 1$.

Analogicky, ak bude postupne zvyšovaná hodnota R_{vw} o jedna smerom k hodnote S_{vw} (vrátane), môže nastať situácia, že pre niektorú hodnotu $R`_{vw}$ už neexistuje riešenie LP relaxovanej RVAP. Ak nie je nepovolené vyslať z parku $v$ do komunity $w$ menej vozidiel ako $R`_{vw}$, potom neexistuje riešenie LP relaxovanej RVAP, a teda ani pôvodnej RVAP. Aby mohlo existovať riešenie RVAP, musí byť teda vyslaných menej ako $R`_{vw}$ vozidiel, a preto horné obmedzenie $S_{vw}$ nadobudne novú a presnejšiu hodnotu $R`_{vw} - 1$.

Použitím tohto prístupu je možné presnejšie nastaviť obmedzenia R_{ij} a S_{ij} všetkých tokov q_{ij} pre $i \in I$, $j \in J(i)$, a vylúčiť tak z koreňa stromu riešení čo najviac vetiev, ktoré neobsahujú riešenie RVAP. Existuje predpoklad, že proces prehľadávania stromu riešení bude efektívnejší.

Výsledky experimentov ukazujú, že navrhovaný spôsob vylučovania vetiev z koreňa stromu riešení je účinný najmä pre časy T^{max}, ktoré sú nižšie ako čas optimálneho resp. najlepšieho známeho riešenia. Účinnosť bola meraná počtom obmedzení tokov, ktoré boli

nastavené presnejšie. Na základe uvedenej skutočnosti možno predpokladať, že tento počet je „nízky“ pre čas optimálneho riešenia. Uvedený spôsob teda môže byť použitý na odhad dolnej hranice.

5.1.6 Závislosť kvality riešenia od výpočtového času

Nakoľko metóda vetiev a hraníc použitá na riešenie $RVAP_m$ je ukončovaná po uplynutí vopred stanoveného výpočtového času, autor skúmal závislosť medzi kvalitou získaných riešení a dĺžkou výpočtového času. So stúpajúcou hodnotou parametra, ktorý reprezentuje dĺžku výpočtového času použitého na riešenie, čas evakuácie prirodzene klesal, ale len do určitej hodnoty tohto parametra. Potom už nedochádzalo k zlepšovaniu riešení.

5.2 Genetický algoritmus

Genetický algoritmus – GA patrí medzi evolučné výpočtové techniky. V GA je riešenie úlohy určitým spôsobom reprezentované jedincom, pričom viac jedincov tvorí populáciu. Princíp GA spočíva v postupnom „šľachtení“ jedincov, ktorí tak reprezentujú čoraz lepšie riešenia. Z populácie jedincov sú zvolení dvaja jedinci (rodičia) a pomocou rekombinačných operátorov kríženia a mutácie sú z nich vytvorení noví jedinci (potomkovia). Po vytvorení dostatočného počtu potomkov – novej generácie, táto nahradí starú generáciu.

Výskum vlastností GA, ktorý bol použitý na riešenie RVAP, zameral autor na vhodné nastavenie vybraných riadiacich parametrov, ktoré ovplyvňujú efektivitu algoritmu. Charakteristickou črtou GA je, že umožňuje rozlišovať medzi genotypom a fenotypom [81]. Fenotyp reprezentuje konkrétne riešenie, ktoré v $RVAP_m$ tvoria premenné q_{ij} pre $i \in I$, $j \in J(i)$. Genotyp, ktorý bol použitý v GA (viď Obr. 3), reprezentuje poradie, v ktorom sú nastavované hodnoty q_{ij} pomocou pažravej prideľovacej heuristiky, ktorá slúži na genotyp–fenotyp mapovanie (*genotype–phenotype mapping*). Na základe genotypu z Obr. 3 by pažravá heuristika spracovávala dvojice (i, j) v nasledovnom poradí: (1, 4), (3, 4), (2, 4), (1, 2), (3, 2), (2, 2), … , (1, 3), (3, 3) a (2, 3), t.j. pre konkrétne j vyskúša všetky hodnoty $i \in I$ a potom spracováva obdobným spôsobom nasledujúcu hodnotu j'.

1	3	2	4	2	1	3
(a)			(b)			

Obr. 3 Genotyp: (a) parková časť, (b) komunitná časť

GA, ako každá iná metaheuristika, poskytuje iba všeobecný rámec na riešenie úlohy. Autor zvolil konkrétne operácie GA v závislosti na špecifických vlastnostiach riešenej úlohy, čím zostavil základnú verziu algoritmu.

V [9] sa autor zameral na nastavenie nasledovných riadiacich parametrov GA: počet generačných výmen (parameter slúži ako ukončovacie kritérium), počet jedincov v populácií, miera kríženia a miera mutácie, ktoré udávajú pravdepodobnosti, s akými bude na jedincoch vykonané kríženie resp. mutácia. Výsledky experimentov ukázali, že nie je vhodné nastavovať parametre počet generácií a počet jedincov v populácií na hodnoty väčšie ako 300, nakoľko priemerné zlepšenie riešenia, ktoré bolo dosiahnuté pri vyšších hodnotách týchto parametrov, bolo nízke (menej než jedno percento), pričom zbytočne narastal výpočtový čas. Naopak, analýza výsledkov ukázala, že je výhodné nastaviť tieto parametre na hodnoty nižšie než 300 (pre tieto hodnotu bude dosiahnutá úspora výpočtového času) a pokúsiť sa zlepšiť efektivitu GA inými spôsobmi.