

Optimálne umiestnenie staníc záchranej zdravotnej služby z hľadiska dopravnej dostupnosti

Doc. Ing. Ľudmila Jánošíková, CSc.¹

Abstrakt: V článku popisujeme metódu pre optimálne umiestnenie staníc záchranej zdravotnej služby z hľadiska dostupnosti služby pre pacienta. Návrh optimálneho umiestnenia je výsledkom riešenia matematického modelu záchranej zdravotnej služby. Kvalita návrhu je vyhodnotená pomocou simulácie. Matematický, ako aj simulačný model sú overené na území Slovenskej republiky.

Kľúčové slová: záchranná zdravotná služba, verejný obslužný systém, lokačná úloha, simulačný model

1 Úvod

Hlavným kritériom pre posúdenie kvality systému záchranej zdravotnej služby (ZZS) je rýchlosť zásahu, t.j. doba, ktorá uplynie od volania ZZS po príchod ambulancie k pacientovi. Táto doba závisí od vzdialenosti medzi najbližšou stanicou ZZS a miestom volania, od rýchlosti jazdy ambulancie a samozrejme od toho, či v okamihu volania je v stanici voľná ambulancia. Podľa doporučenia Ministerstva zdravotníctva SR by mala prísť ambulancia k pacientovi do 15 minút. Umiestnenie staníc ZZS na území Slovenskej republiky je dané vyhláškami č. 30/2006 a 365/2006. Podľa týchto vyhlášok je na území SR 264 staníc s jednou ambulanciou, ktoré sa nachádzajú v 223 mestách (vrátane mestských častí Bratislavy a Košíc). Obsluhujú spolu 2916 obcí s počtom 5 379 455 obyvateľov.

V príspevku popíšeme matematický model, ktorý navrhne optimálne umiestnenie staníc ZZS z hľadiska požadovanej dostupnosti. Pomocou simulačného modelu potom vyhodnotíme, koľko percent volaní je pri navrhnutom umiestnení obslužených do 15 minút a aká je priemerná a maximálna doba čakania na ambulanciu. Porovnáme navrhnuté umiestnenie so súčasným stavom a ďalej popíšeme úpravu matematického modelu, ktorou možno dosiahnuť lepšie ukazovatele kvality záchranného systému.

2 Matematický model

Záchranná zdravotná služba je verejným obslužným systémom. Pre tieto systémy je charakteristické, že dostupnosť služby pre všetkých zákazníkov (obyvateľov) by mala byť rovnaká. Pre optimálne umiestnenie zariadení poskytujúcich službu (stredísk) v takýchto systémoch existuje niekoľko matematických modelov [3]. Väčšina z nich je založená na koncepcii pokrytia. Vychádza sa z toho, že je dopredu stanovená maximálna vzdialenosť (v dĺžkových alebo časových jednotkách) medzi zákazníkom a strediskom. Ak je stredisko vzdialené od zákazníka v tomto limite, zákazník sa považuje za pokrytého a služba za prijateľnú.

¹ Žilinská univerzita, Fakulta riadenia a informatiky, Katedra dopravných sietí, Univerzitná 1, 010 26 Žilina
e-mail: Ludmila.Janosikova@fri.uniza.sk

Modely sa líšia kritériom: môžeme chcieť pokryť všetkých zákazníkov minimálnym počtom stredísk, alebo pri obmedzenom počte stredísk maximalizovať pokrytie zákazníkov. V prvom prípade sa model nazýva lokačno-pokryvacou úlohou (Location Set Covering Problem, LSCP), v druhom lokačnou úlohou s maximálnym pokrytím (Maximal Covering Location Problem, MCLP).

Najprv ukážeme matematickú formuláciu modelu LSCP. Predpokladáme, že predchádzajúcou analýzou boli vytipované možné miesta pre umiestnenie staníc. Označme symbolom J množinu týchto kandidátov na umiestnenie. Prvky tejto množiny budeme indexovať symbolom j . Ďalej nech I označuje množinu všetkých obcí daného regiónu a i jednotlivú obec. Obidve množiny I aj J zodpovedajú uzlom cestnej siete. $N_i \subset J$ je množina možných umiestnení, ktoré pokrývajú obec i (t.j. sú vzdialené od obce i nanajvýš 15 minút). Bivalentné premenné $x_j \in \{0, 1\}$ modelujú rozhodnutie, či stanica bude umiestnená v uzle j ($x_j = 1$) alebo nebude ($x_j = 0$). Nasleduje zápis modelu:

$$\text{minimalizujte} \quad Z = \sum_{j \in J} x_j \quad (1)$$

$$\text{za podmienok} \quad \sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (3)$$

Účelová funkcia (1) minimalizuje počet staníc. Podmienky (2) vyžadujú, aby každá obec bola pokrytá aspoň jednou stanicou.

Pri výpočte časovej vzdialenosti medzi obcami sme vychádzali zo vzdialenosti po cestnej sieti a z priemernej rýchlosti ambulancie v závislosti od triedy cesty (tab. 1). Za kandidáta na umiestnenie stanice sme považovali každú obec, ktorá má aspoň 300 obyvateľov. Riešením modelu LSCP sme zistili, že na pokrytie celého územia Slovenska stačí 150 staníc, pričom nepokrytou zostane jedna obec (Runina s 91 obyvateľmi), ktorá nie je dostupná do 15 minút zo žiadneho kandidáta.

Tab. 1

Priemerná rýchlosť ambulancie

Trieda cesty	Priemerná rýchlosť [km/h]
diaľnica	105
1	95
2	75
3	60
ostatné	50

Analýza súčasného umiestnenia staníc ZZS ukázala, že napriek takmer dvojnásobnému počtu staníc oproti minimálnemu nutnému počtu nie sú všetky obce dostupné do 15 minút. Nepokrytých je 95 obcí s 36 281 obyvateľmi, čo predstavuje 0,67 % obyvateľstva. Pomocou druhého spomenutého matematického modelu (MCLP) navrhujeme také umiestnenie staníc, aby boli pokryté všetky obce (s výnimkou Runiny, lebo kvôli urýchleniu výpočtu nebudeme ďalej rozširovať množinu kandidátov). Budeme vychádzať zo súčasného stavu a počet staníc nastavíme na 264. Vieme však, že na pokrytie všetkých obcí jednou stanicou stačí 150 staníc. Zvyšných 114 staníc umiestnime tak, aby čo najviac obyvateľov bolo pokrytých aspoň dvakrát.

Dôvodom pre takéto „záložné“ pokrytie je fakt, ktorý model LSCP neberie do úvahy, a síce, že v okamihu volania nemusí byť v stanici, ktorej obec prislúcha, voľná sanitka. Modelom LSCP vypočítané 100% pokrytie teda neznamená, že všetky volania budú skutočne obslužené do 15 minút. Ak však v okruhu 15 minút od obce budú umiestnené dve alebo viac staníc, zvýšime pravdepodobnosť, že sanitka bude v okamihu volania k dispozícii a príde k pacientovi včas.

Myšlienku záložného pokrytia prvýkrát publikovali autori Hogan a ReVelle [2] pod názvom Maximal Backup Coverage Problem (BACOP) ako modifikáciu problému MCLP. Skôr než pristúpime k formulácii problému, zavedme ďalšie označenie: nech a_i je počet obyvateľov obce i a p je dopredu určený počet staníc, ktoré treba rozmiestniť. Premenná x_j určuje počet staníc umiestnených v mieste j . Záložné pokrytie obce i závisí od toho, či v jej množine N_i sú aspoň dve stanice. Toto je modelované premennou $y_i \in \{0, 1\}$. Premenná y_i nadobúda hodnotu 1, ak obec i je pokrytá aspoň dvoma stanicami, v opačnom prípade má hodnotu 0. Matematický model problému maximálneho záložného pokrytia môžeme zapísať nasledovne:

$$\text{maximalizujte} \quad Z = \sum_{i \in I} a_i y_i \quad (4)$$

$$\text{za podmienok} \quad \sum_{j \in N_i} x_j - y_i \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (6)$$

$$x_j \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad (8)$$

Problém maximálneho záložného pokrytia síce do istej miery kompenzuje možnú nedostupnosť sanitky v okamihu volania, skutočný čas obsadenia sanitky však nerespektuje. Na dobu obsadenia sanitky má podstatný vplyv jednak veľkosť obvodu, ktorý stanica obsluhuje, jednak jej vzdialenosť od nemocnice. Treba si uvedomiť, že práca sanitky nekončí jej príchodom na miesto nehody. Po príchode sanitky na miesto volania nasleduje druhá fáza obsluhy. Zdravotníci musia pacientovi poskytnúť prvú pomoc na mieste nehody, musia ho previesť do nemocnice, odovzdať personálu v nemocnici a potom sa sanitka musí vrátiť na stanicu. Celý tento čas je sanitka obsadená a nemôže obsluhovať prípadné ďalšie volanie. Obidva predchádzajúce modely považujú všetkých kandidátov na umiestnenie stanice za rovnocenných, bez ohľadu na ich počet obyvateľov či vzdialenosť od nemocnice. V dôsledku takéhto zjednodušenia model BACOP umiestni napr. priamo v Bratislave len 2 stanice a v Žiline žiadnu. Už na prvý pohľad to nie je rozumné riešenie, ako napokon ukázala aj simulácia (uvidíme v ďalšej kapitole). Model preto môžeme upraviť tak, že pre niektoré mestá predpíšeme pomocou podmienky $x_j \geq 1$, aby v nich bola umiestnená aspoň jedna stanica. Dôsledok podmienky na výsledné riešenie môžeme opäť vyhodnotiť pomocou simulácie. V našich experimentoch sme požadovali, aby stanice boli umiestnené v mestách, v ktorých je nemocnica.

3 Simulačný model

Úlohou simulačného modelu navrhovaného systému je poskytnúť predstavu o tom, ako sa bude systém správať v reálnom živote. V našom prípade sme simulačný model ZZS použili na vyhodnotenie takých ukazovateľov kvality záchranného systému, ktoré nie sú zachytené v matematickom modeli. Ide najmä o tieto ukazovatele:

- pomer volaní neobslužených do 15 minút;
- priemerná doba čakania na príchod sanitky;
- maximálna doba čakania na príchod sanitky.

Záchranný systém možno považovať sa systém hromadnej obsluhy s Poissonovským vstupným tokom. Vstupný tok predstavujú volania, ktoré vznikajú náhodne v jednotlivých obciach, pričom každá obec má vlastnú intenzitu volaní. Presná štatistika počtu pacientov ZZS pre jednotlivé obce nie je publikovaná, ale v prezentácii [4] je uvedený celkový počet pacientov ZZS za rok 2001, z čoho môžeme vypočítať intenzitu volaní na jedného obyvateľa λ . Intenzitu volaní pre obec i potom odhadneme ako $\lambda_i = \lambda a_i$, kde a_i je počet obyvateľov obce i .

Za predpokladu, že v každej stanici je jedna ambulancia, má systém ZZS toľko liniek obsluhy, koľko je staníc. Ako sme uviedli v predchádzajúcej kapitole, obsluha pozostáva z niekoľkých činností. Jazdu sanitky môžeme považovať za činnosť deterministickú. Doba jazdy je určená vzdialenosťou a rýchlosťou. Pre jazdu sanitky k pacientovi a z miesta nehody do nemocnice sme použili priemerné rýchlosti podľa tab. 1, pre jazdu z nemocnice naspäť do stanice rýchlosti o 20 km/h nižšie. Náhodnou činnosťou v rámci obsluhy je ošetrovanie pacienta. Podľa [1] je doba ošetrovania pacienta náhodnou veličinou s exponenciálnym rozdelením pravdepodobnosti so strednou hodnotou 10 minút. Doba odovzdania pacienta v nemocnici je v našom simulačnom modeli konštantná (10 minút).

Pre pridelenie sanitky volaniu existuje niekoľko stratégií. Operačné stredisko vyšle na miesto volania vždy sanitku z najbližšej stanice, pokiaľ je v okamihu volania k dispozícii. Stratégie sa líšia v tom, ako spracujú situáciu, kedy je najbližšia sanitka obsadená. V tom prípade môže volanie čakať na návrat sanitky do stanice, alebo mu môže byť pridelená sanitka, ktorá bude najskôr voľná. Simulačný model dovoľuje experimentovať s rôznymi stratégiami. V našich experimentoch sme použili stratégiu „najskôr voľná“.

4 Experimenty s modelmi

V tab. 2 sú zhrnuté ukazovatele kvality pre súčasné umiestnenie staníc ZZS, umiestnenie navrhnuté modelom BACOP a umiestnenie, ktoré je výsledkom riešenia modelu BACOP s povinným umiestnením stanice v sídle nemocnice. Vo všetkých troch prípadoch je umiestnených 264 staníc.

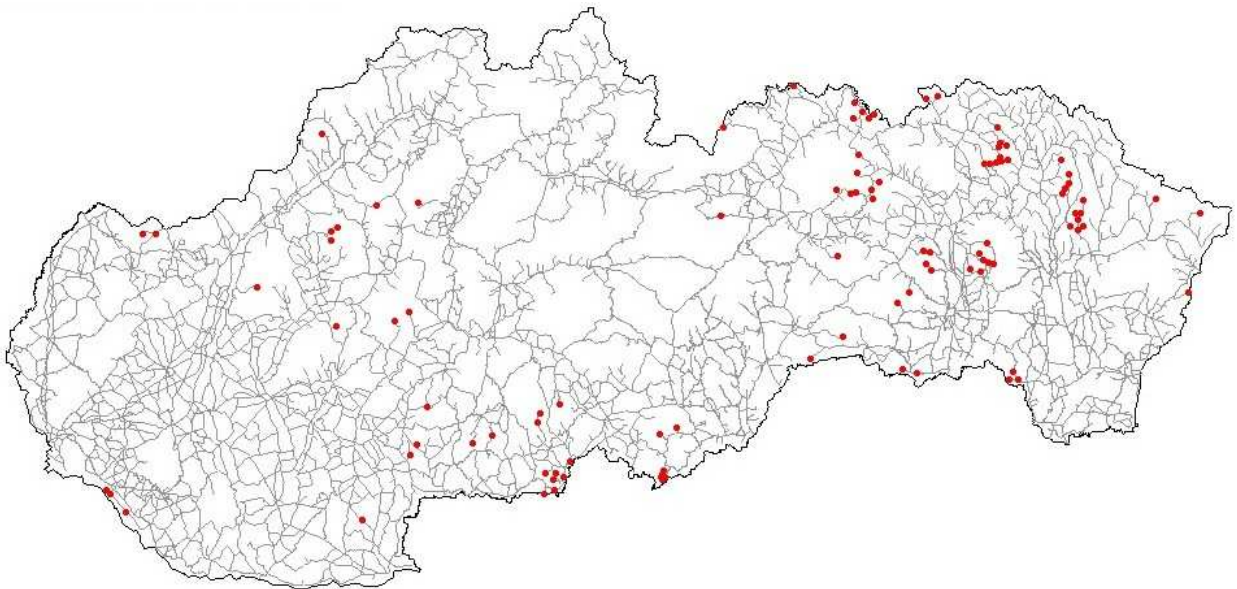
Zo súhrnnej štatistiky v tab. 2 vidíme, že umiestnením staníc pomocou matematických modelov sa zvýši pomer viacnásobne pokrytých obyvateľov z 91,9 % na takmer 100 %. Ako sme už uviedli, pomer pokrytých obyvateľov nie je totožný s pomerom volaní obslužených do 15 minút. Lepší obraz o fungovaní reálneho systému nám dajú ukazovatele, ktoré získame pomocou simulácie.

Tab. 2

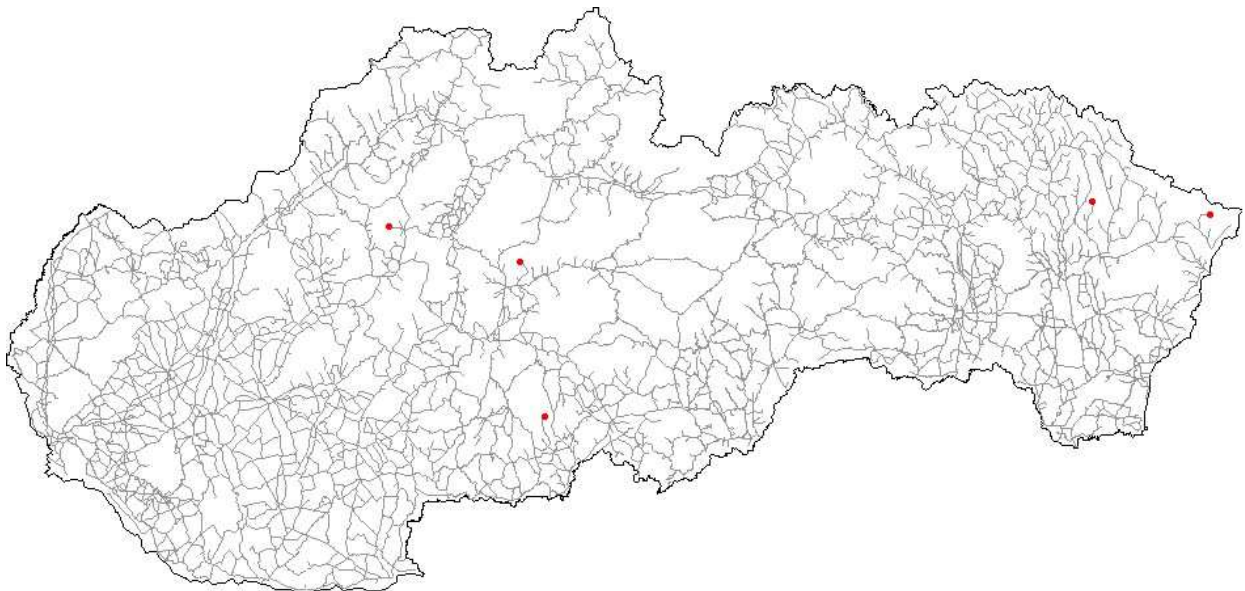
Porovnanie matematických modelov so súčasným stavom pre Slovensko

	Súčasný stav	BACOP	BACOP so stanicou v sídle nemocnice
Počet miest, kde je stanica ZZS	223	217	245
Pomer viacnásobne pokrytých obyvateľov [%]	91,90	99,77	99,49
Pomer volaní neobslužených do 15 minút [%]	1,22	1,25	0,25
Priemerná doba čakania [min]	3,4	5,4	3,9
Maximálna doba čakania [min]	43,5	30,0	28,4

Pomer volaní, ku ktorým nepríde sanitka do 15 minút, zostáva pri riešení modelu BACOP oproti súčasnému stavu prakticky rovnaký (zhruba 1,2 %). Zhorší sa priemerná doba čakania na príchod sanitky (o 59 %), zlepši sa maximálna doba čakania (o 31 %). Porovnaním riešenia upraveného modelu BACOP (s povinným umiestnením stanice v sídle nemocnice) so súčasným stavom však vidíme výrazné zlepšenie v dvoch ukazovateľoch: pomer volaní neobslúžených do 15 minút klesol na jednu pätinu a maximálna doba čakania sa skrátila o tretinu. Priemerná doba čakania zostala na približne rovnakej úrovni, avšak na obr. 1 a 2 vidíme, že výrazne klesol počet obcí, kde táto doba presiahla 15 minút.



Obr. 1. Obce s priemernou dobou čakania viac ako 15 minút, súčasný stav



Obr. 2. Obce s priemernou dobou čakania viac ako 15 minút, upravený BACOP

Môžeme sa pozrieť, ako sa matematický model prejaví na úrovni veľkých miest. Treba pripomenúť, že časy v mestách nezodpovedajú presne skutočnosti, lebo systém ZZS je modelovaný na makroskopickú úroveň, kde sa mesto (v Bratislave a Košiciach mestská časť) považuje za jeden uzol dopravnej siete. Ak je v meste stanica ZZS a zároveň je tu miesto

volania, tak vzdialenosť medzi nimi je nulová. Údaje v tab. 3 pre Bratislavu preto treba chápať len ako porovnávacie charakteristiky matematických modelov so súčasným stavom, a nie ako reálne vyhodnotenie súčasného, prípadne navrhovaného umiestnenia staníc v meste.

Z tab. 3 vyplýva, že model BACOP je pre veľké mestá nepoužiteľný a treba ho upraviť spomínanou sériou podmienok, ktoré prinúti riešiaci algoritmus, aby stanice umiestnil do zadaných miest. V Bratislave sú v súčasnosti 4 všeobecné nemocnice, ktoré prijímajú pacientov ZZS. Umiestnením staníc do týchto mestských častí sa oproti súčasnému stavu so 17 stanicami 3-krát predĺži priemerná doba čakania a 2-krát maximálna doba čakania, avšak stále sú to hodnoty pod slovenským priemerom a takmer všetky volania sú obslužené do 15 minút.

Tab. 3

Porovnanie matematických modelov so súčasným stavom pre Bratislavu

	Súčasný stav	BACOP	BACOP so stanicou v sídle nemocnice
Počet staníc ZZS	17	2	4
Pomer volaní neobslužených do 15 minút [%]	0	10,11	0,09
Priemerná doba čakania [min]	0,7	6,9	2,5
Maximálna doba čakania [min]	10,8	28,9	22,0

5 Záver

V článku popisujeme využitie matematického a simulačného modelovania pri návrhu optimálneho umiestnenia staníc záchranej zdravotnej služby z hľadiska dostupnosti služby pre pacientov. Na území Slovenska sme ukázali, že pomocou matematického modelu možno súčasné stanice rozmiestniť lepšie (pomer volaní neobslužených do 15 minút klesol na jednu pätinu, maximálna doba čakania na príchod sanitky sa skrátila o tretinu a počet obcí s priemernou dobou čakania viac ako 15 minút klesol zo 102 na 5). Simulačný nástroj, ktorý sme vyvinuli, umožňuje vyhodnotiť a navzájom porovnať súčasný stav, riešenie matematických modelov, prípadne iné rozmiestnenie staníc navrhnuté expertom.

Tento príspevok vznikol s podporou výskumných projektov VEGA 1/3775/06 a MVTS6 Metódy návrhu optimálnej štruktúry verejných obslužných systémov.

Literatúra

- [1] BUDGE, S., ERKUT, E., INGOLFSSON, A. Optimal Ambulance Location with Random Delays and Travel Times. Working paper, University of Alberta School of Business, 2005.
- [2] HOGAN, K., REVELLE, C. Concepts and applications of backup coverage. In *Management Science*. ISSN 0025-1909, November 1986, vol. 32, no. 11, p. 1434-1444.
- [3] MARIANOV, V., SERRA, D. Location problems in the public sector. In DREZNER, Z., HAMACHER, H.W. (editors) *Facility Location : Applications and Theory*. 1st ed. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2004. ISBN 3-540-21345-7.
- [4] *Prezentácia ZZS SR* [online]. Záchraná služba Košice, Nov. 2006 [cit. 2006-11-30]. Dostupné na internete: <<http://www.kezachranka.sk>>.