

OPTIMALIZÁCIA DOPRAVNÉHO PLÁNOVANIA PLOŠNEJ EVAKUÁCIE MIKROREGIÓNU APLIKÁCIOU METÓD RIEŠENIA DOPRAVNÝCH ÚLOH

OPTIMIZATION OF MICROREGION AREA EVACUATION TRAFFIC PLANNING BY TRANSPORTATION PROBLEM SOLVING METHODS

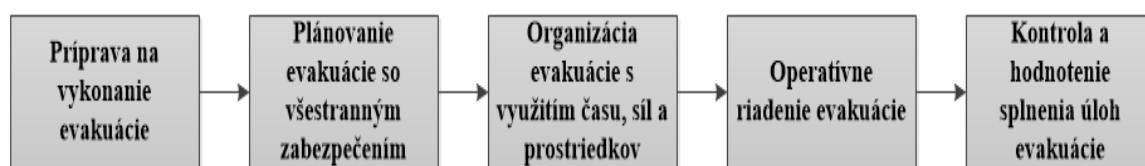
MICHAL BALLAY, ZUZANA GAŠPARÍKOVÁ, BOHUŠ LEITNER

ABSTRACT: *Distribution tasks represent a group of optimization problems, the goal of which is usually to minimize the total cost of transporting goods or people within various complex logistics processes. In the field of general evacuation, transport tasks appear to be a suitable tool for planning the optimal way of transporting evacuees from boarding points to evacuation centres. The aim of the paper is to demonstrate the possibilities of optimization procedures for distribution problems with a focus on planning and managing the transport planning in the area evacuation process, in which the HaZZ units can also be deployed as an assistance element, but rather the DHZ or DHZO units. The paper contains a proposal for the transportation of residents of a micro-region threatened by a flood during their evacuation to designated evacuation centres, supported by optimization calculations.*

KEYWORDS: *Area evacuation, Traffic plan, Optimization, Transportation problem, Delivery plan.*

ÚVOD

Evakuácia patrí medzi kľúčové opatrenia kolektívnej ochrany obyvateľstva a realizuje sa predovšetkým z dôvodu nevyhnutného časového obmedzenia pobytu osôb na ohrozenom území. Zjednodušene povedané: evakuácia je opatrenie v rámci systému ochrany obyvateľstva, pri ktorom sa znižuje počet osôb v priestore ohrozenom mimoriadnou udalosťou. Pod pojmom plošná evakuácia sa najčastejšie rozumie evakuácia osôb z väčších urbanistických priestorov, nie iba z jednotlivého objektu. Samotné riadenie evakuácie je pomerne zložitý a rozsiahly nadväzný proces, nakoľko konkrétny termín a rozsah evakuácie sa dá iba ťažko predvídať a presnejšie skalkulovať. Riadenie evakuácie zahŕňa priebežné riešenie viacerých úloh nielen počas jej priebehu, ale aj pred spustením procesu evakuácie a tiež po jej ukončení. Činnosti patriace do komplexného systému manažmentu plošnej evakuácie sa najčastejšie rozdeľujú do viacerých, navzájom nadväzných, fáz (Obr. 1).



Obrázok 1 Fázy evakuácie (podľa Seidl, 2014)

Plánovanie procesov evakuácie umožňuje určiť konkrétne úlohy jednotlivým zložkám verejnej správy, samosprávy, IZS a ďalších zainteresovaných subjektov, prioritizovať a časovo zladíť evakuáciu osôb, zvierat alebo majetku, spracovať dokumentáciu na riadenie evakuácie, informovať obyvateľstvo ešte pred vznikom mimoriadnej udalosti a kontrolovať plnenie úloh. Základom plánovania evakuácie je analýza situácie, kedy sa analyzuje aktuálna situácia, rozsah krízového javu, časové obmedzenia, možnosti a rozsah samoevakuácie, zhodnotenie použiteľných síl a prostriedkov pre evakuáciu, návrhy postupov na dosiahnutie cieľov opatrení a výber najvhodnejšieho variantu. V oblasti plošnej evakuácie sa ako vhodný nástroj pre plánovanie optimálneho spôsobu prepravy evakuovaných osôb z nástupných miest do evakuačných stredísk javí skupina metód operačnej analýzy nazývaná ako distribučné problémy. Jedným z nástrojov sú aj tzv. dopravné úlohy, pri aplikácii ktorých sa uvažuje a kalkuluje s veličinami ako prepravná vzdialenosť, počet prepravovaných osôb a jednotkové náklady, tj. celkové

náklady na prepravu jednej osoby, požiadavky nástupných miest, kapacity prijímajúcich miest, ale aj podmienky prepravného procesu, dostupné dopravné prostriedky a ich kapacity apod.

1. DISTRIBUČNÉ ÚLOHY AKO NÁSTROJ PRE PLÁNOVANIE DOPRAVNÉHO ZABEZPEČENIA PLOŠNEJ EVAKUÁCIE

Evakuácia predstavuje zložitý logistický proces, vyžadujúci dôkladnú pripravenosť najmä samosprávy, ako aj zložiek IZS, aby dôsledky mimoriadnej udalosti boli minimalizované. Pri plánovaní evakuácie zohrávajú hlavnú úlohu stratégie riadenia prepravného procesu a optimálneho rozmiestnenia zdrojov (nástupné miesta) a cieľov (evakuačné strediská).

Využitím podobných prístupov sa vo svojich prácach zaoberali viacerí autori. Napríklad v práci (Murray-Tuite, 2013) autori objasňujú špecifiká procesu modelovania evakuačnej dopravy, so zameraním na prehľad výskumu, vývoja a praxe v oblasti dopravného zabezpečenia evakuácie. V práci (Abdelgawad, 2009) autor pojednáva o probléme NDP (The network design problem), zahŕňajúci analýzu a výkonnosť dopravnej siete a jej optimálnosť. Cieľom NDP je optimalizovať meranie výkonu systému, aby sa minimalizovali celkové cestovné náklady a zároveň sa pri voľbe trasy zohľadnili obmedzenia na teritóriu a správanie používateľov komunikácie. Dopravným zabezpečením, resp. návrhom a optimalizáciou primárnych a sekundárnych evakuačných ciest sa zaoberali autori z univerzity Coimbra (Coutinho-Rodrigues, 2015). Kým pri primárnej ceste uvažovali dĺžku trasy, jej riziko, pričom miesto ohrozenia aj evakuačné zariadenie sú známe, pri hľadaní sekundárnej evakuačnej trasy boli známe iba miesto ohrozenia a na základe najkratšej trasy sa určí miesto, kam prídu evakuanti.

V práci (Liu, 2016) bol navrhnutý adaptívny evakuačný algoritmus (The Adaptive Evacuation Route Algorithm - AERA), v ktorom boli za hlavné optimalizačné kritériá zvolené celkový čas evakuácie a bezpečnosť evakuačných trás. Autori práce (Janáček, 2009) sa zaoberali počítačovo podporovanými prístupmi k návrhu plánu evakuácie, kedy priradujú dostupné dopravné prostriedky k nástupným miestam v ohrozených územiach tak, aby bol celkový čas potrebný na evakuáciu čo najkratší.

V práci (Bretschneider, 2011) autori prezentujú základný matematický model pre problémy evakuácie v mestských oblastiach a na praktickej prípadovej štúdií preukazujú význam a využitie optimalizácie v procesoch krízového plánovania. Optimalizáciou núdzového systému s minimálnymi úpravami siete v oblasti rozmiestnenia stredísk záchranej zdravotnej služby a pokrytia územia sa zaoberajú autori prác (Kvet, 2021), (Kvet, 2022). Autori prezentujú realizovanú prípadovú štúdiu zameranú na optimalizáciu špecifickej skupiny systémov verejných služieb v zdravotníctve založenú na scenároch.

1.1 Typy distribučných úloh a ich využitie

Dopravné úlohy ako jedna zo špecifických oblastí lineárneho programovania predstavujú skupinu optimalizačných problémov, ktorých cieľom je obvykle minimalizácia celkových nákladov na prepravu osôb alebo tovaru v rámci rozličných zložitých logistických procesov (Distribučné problémy, 2022).

Vo všeobecnosti je každé riešenie problému distribúcie založené na niekoľkých predpokladoch:

- výrobca dodáva tovar n -odberateľom a má k dispozícii konečný počet m -miest pre postavenie distribučných centier,
- pre každé miesto sú vyčíslené fixné náklady f_i spojené so zriadením distribučného centra a prepravné náklady c_{ij} vynaložené na prepravu komodity od i -teho distribučného centra k j -temu odberateľovi,
- cieľom riešenia je určenie optimálneho plánu rozvozu z pohľadu celkových nákladov alebo určenie optimálneho miesta umiestnenia distribučných centier pri zaistení minimálnych celkových prepravných nákladov.

Uvedené predpoklady sú využiteľné aj pre oblasť evakuácie, kde namiesto distribučných centier možno uvažovať nástupné miesta, resp. odberateľov môžu reprezentovať evakuačné strediská. Okrem všeobecne známej formulácie - klasickú dopravnej úlohy, sú známe aj ďalšie typy modelov distribučných problémov. Napríklad, všeobecný distribučný problém (VDP) sa líši od klasického zadania dopravnej úlohy v tom, že kapacity zdrojov a požiadavky odberateľov nie sú uvedené v rovnakých

jednotkách. Pre ich vzájomnú porovnateľnosť je do modelu potrebné doplniť „prevodné koeficienty“. Napríklad, kapacita výrobnjej linky (hod), požiadavka odberateľa (k_s) – ako vhodný prevodný koeficient bude napr. koeficient výkonu (k_s / hod) (Jablonský, 2007). Kontajnerový dopravný problém (KDP) predstavuje modifikáciu základnej formulácie dopravnej úlohy, pri ktorej je preprava medzi dodávateľmi a odberateľmi realizovaná výlučne prostredníctvom kontajnerov, ktoré majú zadanú kapacitu K jednotiek. Náklady na prepravu nie sú teda vzťahované na jednu jednotku prepravovaného tovaru, ale sú uvažované ako jeden kontajner. S prepravou jedného kontajnera sú spojené náklady, ktoré sú však rovnaké, bez ohľadu na to, či je kontajner plný alebo poloprázdny. Optimálne riešenie KDP by malo viesť k tomu, aby jednotlivé kontajnery, ktoré budú prepravované, boli využité čo najefektívnejšie.

Ďalšie typy distribučných úloh môžu vzniknúť rôznymi kombináciami už uvedených úloh, ako sú napr. alokačné problémy, slúžiace na riešenie optimálneho združovania miest odberu tovaru do rajónov obsluhovaných z jednotlivých zdrojov (Jablonský, 2007). Medzi najznámejšie úlohy patrí tzv. úloha o pokrytí. Ide o optimalizáciu rozhodnutia, kde postaviť K obslužných staníc (stanice rýchlej pomoci, požiarne stanice, ale aj nástupné miesta, evakuačné strediská a pod.) do n obvodov (okresy, mestské časti a pod.), pričom $n < K$. Súčasne je však potrebné im priradiť aj ich územnú pôsobnosť, t.j. určiť obvody, ktoré budú týmito centrami obsluhované a ďalšie modifikácie pokrývacích úloh (Kvet, 2021).

1.2 Klasická dopravná úloha v plánovaní dopravného zabezpečenia evakuácie

Dopravné úlohy patria k najstarším úlohám lineárneho programovania a okrem nich sa medzi distribučné problémy zaraďujú aj tzv. priradovacie úlohy, lokačné a alokačné úlohy a ich rôzne kombinácie (Gašpariková, 2019). Účelom riešenia takéhoto druhu úloh je určenie prepravovaného množstva x_{ij} od všetkých dodávateľov ku všetkým odberateľom, ktoré musia spĺňať nasledovné podmienky (Máca, 2002):

1. nezápornosť riešenia - podmienka nezápornosti vyplýva z prirodzenej požiadavky vyjadrenej v zmysle, že nie je možné prepraviť záporné množstvo materiálu,
2. vybilancovanosť úlohy - ponuka je adekvátna požiadavkám všetkých odberateľov (v opačnom prípade sa jedná o nevybilancovanú úlohu, kde je nutné zapracovať tzv. fiktívneho dodávateľa, resp. odberateľa, ktorý však uspokojený v skutočnosti nebude),
3. kapacitné ohraničenia - nie je možné zo zdroja rozvieť viac materiálu ako je jeho kapacita; naopak spotrebiteľ neodoberie väčšie množstvo materiálu ako v skutočnosti potrebuje,
4. celkové náklady spojené s rozvozom dosiahnu extremalizovanú hodnotu (MIN / MAX).

Východiská riešenia klasickej dopravnej úlohy:

- definovaných je m -zdrojov s obmedzenou kapacitou a n -odberateľov s určenými požiadavkami,
- vzťahy medzi dodávateľmi a odberateľmi sú ocenené (obvykle cenou prepravy jedného kusu výrobku) a sú usporiadané do tabuľkovej formy v ktorej sa realizuje samotný výpočet,
- po aplikácii vhodného algoritmu je možné dospieť k optimálnemu riešeniu (nájdenie maxima alebo minima), alebo riešeniu prípustnému (spĺňa podmienky, ale nie je najlepším možným riešením rozhodovacieho problému).

Cieľom rozhodovania v rámci riešenia dopravných úloh je vo všeobecnosti rozvrhnutie rozvozu tovaru, osôb alebo iného materiálu zo zdroja (dodávateľ) k cieľovým miestam (odberateľ) tak, aby boli celkové náklady minimalizované. Vo všeobecnosti je uvažovaných celkovo m dodávateľov (D_1, D_2, \dots, D_m) s množstvom produkovaného tovaru a_1, a_2, \dots, a_m a n odberateľov (O_1, O_2, \dots, O_n) s požiadavkami v množstvách b_1, b_2, \dots, b_n . Vzťah medzi dodávateľom a odberateľom je obvykle ohodnotený tzv. sadzbou c_{ij} ($i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$), určenou na základe vyčíslenia celkových nákladov na prepravu príp. iba zjednodušene na základe kilometrickej vzdialenosti zdroja a cieľa. Úlohou je stanoviť objem prepravy x_{ij} medzi i - tým zdrojom a j - tým cieľovým miestom tak, aby neboli presiahnuté kapacity zdrojov, ale tiež aby boli uspokojené požiadavky odberateľov (Máca, 2002).

Podľa konkrétneho prípadu uvažovaných požiadaviek odberateľov a kapacít dodávateľov rozlišujeme dopravné úlohy vyrovnané alebo nevyrovnané (tab. 1). Dopravný problém je vyrovnaný práve vtedy, ak spĺňa podmienku, že suma požiadaviek od odberateľov a suma kapacít zdrojov sú rovnaké. V takomto prípade sú všetky kapacity dodávateľov vyčerpané a dopyt odberateľov uspokojený. Naopak, dopravný

problém je nevyrovnaný, ak ide o nesúlad medzi požiadavkami a kapacitami. Riešenie úlohy je potom možné až po jej transformácii na úlohu vyrovnanú. Transformácia sa obvykle rieši pridaním tzv. fiktívneho dodávateľa alebo odberateľa podľa toho, či ide o deficit spotreby alebo deficit zdrojov. Prepravné náklady sú v takomto prípade nulové tzn. $c_{ij} = 0$ (fiktívny dodávateľ ani odberateľ neexistujú).

Tab. 1: Základné členenie dopravných úloh podľa ich vyrovnanosti

Vyrovnaný dopravný problém	Nevyrovnaný dopravný problém	
$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j$	$\sum_{i=1}^m a_i \neq \sum_{j=1}^n b_j$	
	Deficit spotreby $\sum_{i=1}^m a_i > \sum_{j=1}^n b_j$	Deficit zdrojov $\sum_{i=1}^m a_i < \sum_{j=1}^n b_j$

Výsledný matematický model vyrovnanej dopravnej úlohy v sumačnom tvare je možné vyjadriť ako

minimalizácia

$$z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \text{MIN}$$

za podmienok

(1)

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \quad \text{pre } i = 1 \dots m$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad \text{pre } j = 1 \dots n$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad \text{pre } i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n.$$

Určenie východiskového riešenia a jeho kvalita je v riešení dopravných úloh jedným z kľúčových priebežných výsledkov. Pre zaistenie kvality východiskového riešenia klasického dopravného problému sa najčastejšie využívajú indexová metóda alebo Vogelova aproximačná metóda (Máca, 2002), Známych metód je samozrejme viac, bližšie informácie je možné nájsť napr. v (Jablonský, 2007).

Na testovanie optimality východiskového riešenia sa v rámci najznámejšej metódy potenciálov využíva tzv. matica diferencií **D**. Určenie prvkov matice **D** je založené na postupnom určovaní tzv. riadkových a stĺpcových čísiel (Gašparíková, 2022). Kritérium optimality je splnené, ak sú všetky prvky matice diferencií kladné, resp. rovné nule. V prípade, že niektorý prvok matice diferencií je záporný, riešenie optimálne ešte nie je a je nutné prvok matice, v ktorom je optimálnosť narušená najviac pozmeniť, tzv. presunom v cykle. Je dôležité, aby sa pri presune v cykle neporušili obmedzujúce podmienky (t.j. riadkové a stĺpcové súčty) a zároveň aby sa nenarušila bázickosť riešenia (t.j. jedna premenná vznikne, druhá musí zaniknúť). Riešenie získané presunom v cykle je opätovne podrobené testu optimality. Vo všeobecnosti platí, že uvedený iteračný postup je nutné opakovať až do naplnenia kritéria optimality.

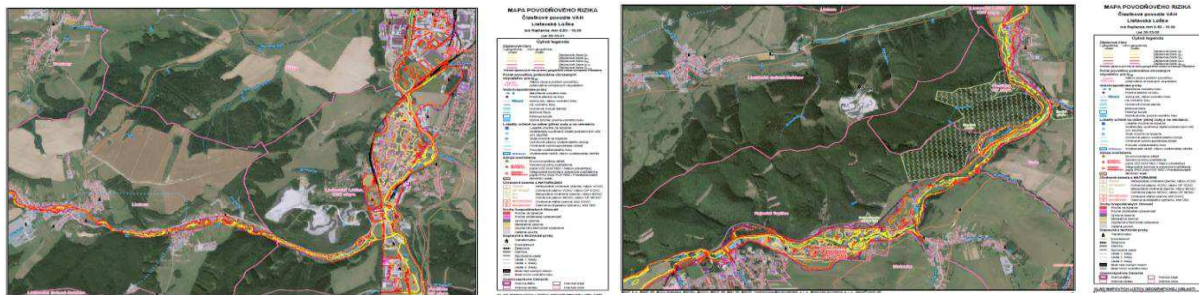
Pri hľadaní optimálneho riešenia je možné využiť napríklad aj ďalšiu metódu, známu ako metóda MODI (Modifikovaná distribučná metóda), ktorá sa opiera o vzťah v tvare

$$H_{ij} = r_i + s_j - c_{ij} \quad (2)$$

kde c_{ij} predstavuje hodnotu sadzby a hodnoty r_i a s_j predstavujú určené riadkové a stĺpcové čísla. Ak žiadna hodnota H_{ij} nie je kladná, získané riešenie je považované za optimálne.

2. PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA – OPTIMALIZÁCIA PLÁNU ROZVOZU EVAKUANTOV PRI DOPRAVNOM ZABEZPEČENÍ PLOŠNEJ EVAKUÁCIE

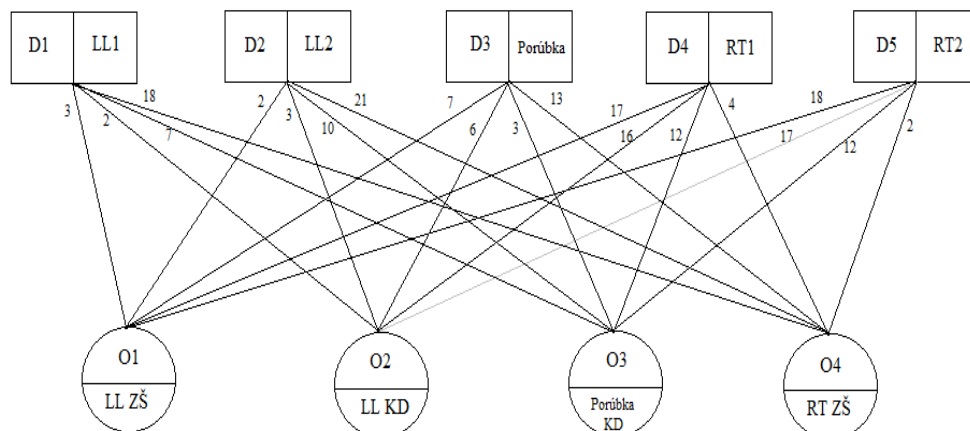
Podmienky riešeného rozhodovacieho problému: pri mimoriadnej udalosti spôsobenej 100-ročnou vodou na vodnom toku Rajčanka je počet potenciálne ohrozených 606 obyvateľov v Rajeckých Tepliciach, 1227 obyvateľov z Lietavskej Lúčky a 127 obyvateľov obce Porúbka. Počet obyvateľov vyžadujúci evakuáciu z jednotlivých miest je predpokladaný (neuvažuje sa s procesom samoevakuácie) a bol kalkulovaný na základe informácií z máp povodňového rizika (Obrázok 2) (Slovenský vodohospodársky podnik, 2022). Veľkosť kapacít evakuačných stredísk vychádza z kapacít vytipovaných objektov, vhodných pre dočasné umiestnenie evakuovaných.



Obrázok 2 Mapy povodňového rizika

V rámci prípadovej štúdie sa jedná o problém nevyrovnaný, t.j. počet požiadaviek na evakuáciu určeného počtu obyvateľov dotknutých obcí nie je totožný s kapacitami zvolených evakuačných stredísk. Kapacity stredísk preyšujú počet evakuantov, z toho dôvodu bolo potrebné zaviesť fiktívne nástupné miesto. Jednotlivé zvolené sadzby predstavujú priemerné náklady vynaložené na prepravu jednej osoby. V sadzbe je uvažovaná predovšetkým prepravná vzdialenosť, cena pohonných hmôt, náklady spojené s aktiváciou a zabezpečením fungovania jednotlivých evakuačných stredísk so službami a preprava späť po ukončení evakuácie. Všetky vlastné obmedzenia boli vyjadrené rovnicami. Jednotlivé neznáme a pravé strany všetkých obmedzujúcich podmienok sú vyjadrené v tej istej mernej jednotke.

V prípade evakuácie sú stanovené 4 evakuačné strediská (odberatelia) - Lietavská Lúčka ZŠ, Lietavská Lúčka KD, Porúbka KD a Rajecké Teplice ZŠ. V uvedených ohrozených oblastiach bolo určených 5 nástupných miest (dodávateľia) - Lietavská Lúčka 1 (LL1), Lietavská Lúčka 2 (LL2), Porúbka (POR), Rajecké Teplice 1 (RT1) a Rajecké Teplice 2 (RT2), ku ktorým budú pristené prostriedky na prepravu obyvateľov do evakuačných stredísk. Jednotlivé sadzby reprezentujú celkové náklady (Eur / os) na prepravu jednej osoby. V riešenom modelovom scenári (Obr.3) sa neráta so samoevakuáciou obyvateľov, tj. všetci obyvatelia z ohrozenej oblasti budú prepravení do evakuačných stredísk.



Obrázok 3 Schéma riešeného dopravného problému

2.1 Východiskové riešenie

Najjednoduchšou metódou určovania východiskového riešenia je metóda severozápadného rohu (SZR), ktorá umožňuje pomerne rýchlo získať východiskové riešenie, ktoré je prípustné, avšak zvyčajne nie je optimálne. Metóda totiž neberie do úvahy výšku sadzieb. Účelová funkcia z aplikácie tohto riešenia dosiahla hodnotu 6 855 Eur. Indexová metóda (MI) už zohľadňuje aj sadzby a ich veľkosť a pri rovnakých sadzbách sa uprednostňuje políčko s väčším množstvom a najnižším cenovým koeficientom. Pri aplikácii indexovej metódy transformujeme pôvodnú tabuľku, pričom sa berú do úvahy aj veľkosti sadzieb c_{ij} a určuje sa pomer požiadaviek na evakuáciu ku kapacite evakuačného strediska. Hodnoty v tabuľke zoradíme vzostupne podľa veľkosti sadzieb c_{ij} , pričom pri rovnakej hodnote c_{ij} berieme do úvahy podiel požiadaviek a kapacity strediska a zoradené hodnoty postupne dopĺňame do tabuľky (tabuľka 2).

Tabuľka 2 Východiskové riešenie - Indexová metóda

	LL ZŠ	LL KD	Porúbka KD	RT ZŠ	Požiadavky nást miesta
Lietavská Lúčka 1	3	2	7	18	708
Lietavská Lúčka 2	2	3	10	21	519
Porúbka	7	6	3	13	137
Rajecké Teplice 1	17	16	12	4	300
Rajecké Teplice 2	18	17	12	2	306
F_{nm}	0	0	0	0	20
Kapacity stredísk	670	450	220	650	1990

$$\text{Min } z = 131.3 + 450.2 + 83.7 + 44.18 + 519.2 + 137.3 + 300.4 + 306.2 + 20.0 = 5\,927\text{€}$$

Vogelova aproximačná metóda (VAM) je založená na určení a využití tzv. diferencie R_i resp. R_j , predstavujúcej rozdiel medzi najnižšími sadzbami v riadku, príp. stĺpci. V riadku (resp. stĺpci) s najvyššou diferenciou sa obsadí políčko s najnižšou sadzbou, diferencie sa opäť prepočítajú a postup sa zopakuje. V prípade výskytu dvoch rovnakých najmenších sadzieb sa R_{ij} rovná 0. Tabuľku so zadaním rozšírime o jeden riadok a jeden stĺpec, v ktorom priebežne dopĺňame hodnoty určených diferencií (tab. 3).

Tabuľka 3 Dopravná úloha s hodnotami zistených diferencií R_i

	LL ZŠ	LL KD	Porúbka KD	RT ZŠ	Požiadavky na evakuáciu	R_i
LL 1	3	2	7	18	708	1
LL 2	2	3	10	21	519	1
Porúbka	7	6	3	13	137	3
RT 1	17	16	12	4	300	8
RT 2	18	17	12	2	306	10
F_{nm}	0	0	0	0	20	0
Kapacity stredísk	670	450	220	650	1990	
R_j	2	2	3	2		

Riešenie začíname riadkom, resp. stĺpcom s najvyššou hodnotou diferencie, pričom sa snažíme naplniť kapacitu evakuačného strediska a zároveň rozmiestniť čo najviac obyvateľov. Potom sa už použitý riadok, resp. stĺpec neberie do úvahy, opäť sa prepočítajú diferencie pre zvyšné riadky a stĺpce a postup sa opakuje až kým sa neprerozdelí požadovaný počet osôb a nenaplní kapacita evakuačných stredísk (tab. 4).

Porovnaním riešení získaných aplikáciou vybraných metód pre východiskové riešenie dopravnej úlohy (SZR, IM, VAM) bolo zistené, že najlepšie východiskové riešenie poskytla aplikácia Vogelovej aproximačnej metódy. Východiskové riešenie získané prostredníctvom VAM bolo v ďalšom kroku testované kritériom optimality, či predstavuje už hľadané optimum.

Tabuľka 4 Východiskové riešenie dopravnej úlohy – Vogelova aproximačná metóda

	LL ZŠ	LL KD	Porúbka KD	RT ZŠ	Požiadavky na evakuáciu
Lietavská Lúčka 1	3	2	7	18	708
Lietavská Lúčka 2	2	3	10	21	519
Porúbka	7	6	3	13	137
Rajecké Teplice 1	17	16	12	4	300
Rajecké Teplice 2	18	17	12	2	306
F_{nm}	0	0	0	0	20
Kapacity stredísk	670	450	220	650	1990

$$\min z = 151.3 + 450.2 + 107.7 + 519.2 + 113.3 + 24.13 + 300.4 + 306.2 + 20.0 = 5\ 603\text{€}$$

2.2 Kritérium optimality východiskového riešenia

Na overenie toho, či konkrétne východiskové riešenie (v tomto prípade získané prostredníctvom Vogelovej aproximačnej metódy) je už riešením optimálnym, je nutné podľa algoritmu metódy potenciálov získať tzv. maticu diferencií **D**, ktorá sa považuje za kritérium optimality riešenia. Pre určenie prvkov matice **D** platí vzťah v tvare

$$\mathbf{C} - \mathbf{C}^* = \mathbf{D} \quad (3)$$

kde **C** je matica sadzieb a **C*** reprezentuje tzv. maticu nepriamych sadzieb. Na určenie hodnôt matice nepriamych sadzieb **C*** je potrebné určiť riadkové a stĺpcové čísla, vychádzajúce z podmienky, že súčet riadkového a stĺpcového čísla sa musí rovnať príslušnej sadzbe ($r_i + s_j = c_{ij}$). Výsledná matica diferencií **D** získaná prostredníctvom vzťahu (3) má tvar

$$\begin{pmatrix} 3 & 2 & 7 & 18 \\ 2 & 3 & 10 & 21 \\ 7 & 6 & 3 & 13 \\ 17 & 16 & 12 & 4 \\ 18 & 17 & 12 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3 & 2 & 7 & 17 \\ 2 & 1 & 6 & 16 \\ -1 & -2 & 3 & 13 \\ -10 & -11 & -6 & 4 \\ -12 & -13 & -8 & 2 \\ -14 & -15 & -10 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 4 & 5 \\ 8 & 8 & 0 & 0 \\ 27 & 27 & 18 & 0 \\ 30 & 30 & 20 & 0 \\ 14 & 15 & 10 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Získaná matica diferencií, ako optimalizačné kritérium, je bez záporných čísel. Znamená to, že kritérium optimality je splnené a zvolené východiskové riešenie (VAM) je možné uvažovať ako riešenie optimálne.

2.3 Softvérové riešenie

Na overenie získaných výpočtov a preukázanie možností využitia voľne dostupných softvérových riešení určených na analýzu klasických dopravných problémov bol využitý voľne dostupný online nástroj na www.easycalculation.com. Zvolený webový nástroj ponúka riešenie klasických dopravných úloh (transportation problems) a zároveň východiskové riešenie posudzuje prostredníctvom Optimal solution MODI method. Aplikáciou nástroja sa potvrdil predpoklad, že východiskové riešenie získané VAM je zároveň aj riešením optimálnym (obr. 4). Ďalším možným, voľne dostupným, analytickým nástrojom pre riešenie klasických dopravných úloh sú napríklad (Transportation Problem Calculator, 2022) alebo nástroj využívajúci zápis dopravnej úlohy vo forme matematického modelu úlohy lineárneho programovania (Linear Programming Transportation Problem Calculator, 2023).

3. INTERPRETÁCIA VÝSLEDKOV PRÍPADOVEJ ŠTÚDIE

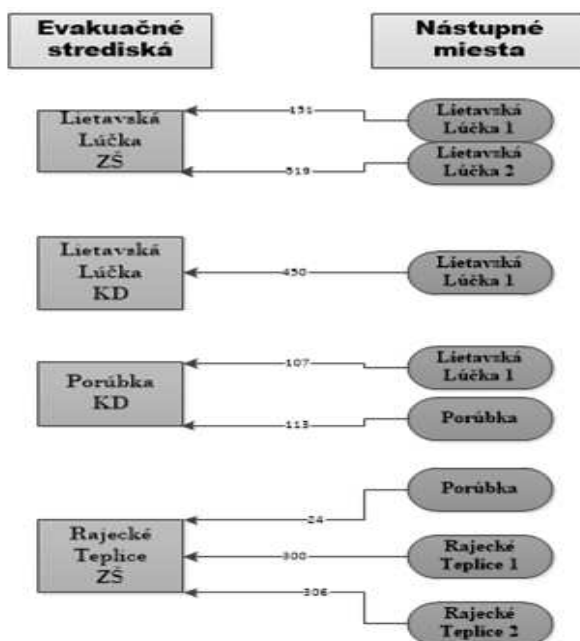
Zo zadania rozhodovacieho problému v rámci prípadovej štúdie bolo úlohou určiť optimálny plán prepravy obyvateľov postihnutých povodňou zo zasiahnutých lokalít v obciach Lietavská Lúčka, Porúbka a Rajecké Teplice do evakuačných stredísk situovaných v iných lokalitách týchto obcí. Testom optimality bolo zistené, že riešenie získané prostredníctvom metódy VAM je priamo aj riešením optimálnym, a obsahuje optimálny plán prepravy evakuantov do jednotlivých evakuačných stredísk (Obr.4).

Iteration 9						
	D1	D2	D3	D4	Supply	
S1	151	3	2	7	18	151
S2	519	2	3	10	21	519
S3	7	6	113	3	13	113
S4	17	16	12	300	4	300
S5	18	17	12	306	2	306
S6	0	0	0	20	0	20
Demand	519	450	107	24		

Total Minimum Cost
 $(3 \times 151 + 2 \times 450 + 7 \times 107 + 2 \times 519 + 3 \times 113 + 13 \times 24 + 4 \times 300 + 2 \times 306 + 0 \times 20)$
5603

Obrázok 4 Softvérové riešenie dopravnej úlohy pomocou www.easycalculation.com

Zo získaných výsledkov z realizovaného procesu optimalizácie dopravného problému pre prípad plošnej evakuácie mikroregiónu vyplýva, že do evakuačného strediska Lietavská Lúčka ZŠ by malo byť prepravených celkom 670 obyvateľov z Lietavskej Lúčky (151 z nástupného miesta LL1 a všetkých požiadaviek t.j. 519 obyvateľov z nástupného miesta LL2). Evakuačné stredisko Lietavská Lúčka KD naplníme 450 obyvateľmi z miesta nástupu LL1. Obec Porúbka má evakuačné stredisko s kapacitou 220 ľudí, ktoré bude naplnené 113 obyvateľmi Porúbky a 107 obyvateľmi Lietavskej Lúčky. Obyvatelia z dvoch nástupných miest v Rajeckých Tepliciach (RT1 a RT2) a 24 obyvateľov Porúbky (POR) bude prevezených do evakuačného strediska Rajecké Teplice ZŠ s celkovou kapacitou 650 osôb.



Obrázok 5 Optimálny plán rozvozu evakuantov v prípadovej štúdií

ZÁVER

Operačná analýza a jej súčasti využívajú matematiku ako nástroj, vďaka ktorému riešia problémy, ktoré môžu nastať v riadení. Výsledky získané matematickými výpočtami určujú rozhodnutia, vyhodnocujú ich uplatnenie, čím výrazne ovplyvňujú život obyvateľov pri ich prípadnej ochrane pred prírodnými vplyvmi či priemyselnými haváriami, ktoré môžu vyvolať krízovú situáciu s potrebou evakuácie.

Samozrejme, aj ďalšie oblasti a metódy operačnej analýzy tvoria základ pre podporu rozhodovania s cieľom nájsť optimálne riešenie daného problému. Hľadanie optimálnej cesty v grafoch sa v oblasti plošnej evakuácie využíva pri hľadaní a plánovaní evakuačných trás, kde spadá preprava evakuovaných ľudí alebo rozvoz a dovoz základných potravín a výrobkov. Aplikáciou sieťovej analýzy je možné napríklad určiť následnosť jednotlivých činností evakuácie, predpokladaný čas trvania jednotlivých činností, na ktoré je evakuácia rozdelená a tým aj jej celkový čas, identifikovať kritické činnosti z hľadiska časového, nákladového alebo zdrojov. Pri lokačných a dopravných úlohách ide o optimalizovanie presunu evakuantov z jednotlivých nástupných miest do evakuačných stredísk na základe kapacity dopravných prostriedkov, ale aj voľných miest v evakuačných strediskách. Využitím modelov hromadnej obsluhy je možné analyzovať obslužný systém, zistiť jeho parametre na strane vstupov, ako aj obsluhy, predikovať pravdepodobné správanie a navrhnúť optimálne riešenie obslužného systému. Viackriteriálne rozhodovanie resp. jeho podmnožina - multikriteriálne hodnotenie variantov má uplatnenie pri riadení evakuácie alebo núdzovom zásobovaní obyvateľstva pre určovanie najlepších kompromisných riešení rôznych rozhodovacích problémov praxe.

POĎAKOVANIE

Tento článok bol podporený Grantovým systémom UNIZA č. 17332 a projektu VEGA 1/0628/22 Výskum bezpečnosti v obciach s ohľadom na kvalitu života obyvateľov.

LITERATÚRA

- ABDELGAWAD, H. a B. ABDULAHAI, 2009. Emergency evacuation planning as a network design problem: A critical review. In: Transportation Letters: The International Journal of Transportation Research, 2009. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/247898894_Emergency_evacuation_planning_as_a_network_design_problem_A_critical_review
- BRETSCHNEIDER, S., KIMMS, A. A basic mathematical model for evacuation problems in urban areas, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 45, Issue 6, 2011, Pages 523-539, ISSN 0965-8564, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.03.008>.
- COUTINHO-RODRIGUES, J., N. SOUSA, a E. NATIVIDADE-JESUS, 2015. Design of evacuation plans for densely urbanised city centres. In: Municipal Engineer. Institution of Civil Engineers, 2015.
- Distribučné problémy - príklady [online] [cit. 29.11.2022] Dostupné z: http://www.fsi.uniza.sk/ktvi/leitner/2_predmety/OA/Semester/EX05_Distribucne%20problemy%20upr.pdf
- GAŠPARÍKOVÁ, Z., LEITNER, B. Transportation problems and their application in planning transport provision of area evacuation. In: TRANSBALTICA 12 [print, electronic] : transportation science and technology : proceedings of the international conference. 1. vyd. Cham: Springer Nature, 2022. ISBN 978-3-030-94773-6.- s. 477-489 [print, online]. Spôsob prístupu: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-94774-3_47
- GAŠPARÍKOVÁ, Z., SVENTEKOVÁ, E. Matematická a softvérová podpora dopravného riadenia procesu evakuácie. In: Krízové řízení a řešení krizových situací 2019 [electronic] 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019. 56-67. Spôsob prístupu: https://criscon.cz/doc/Sbornik_CrisCon_2019.pdf
- JABLONSKÝ, J. Operační výzkum. Praha: Professional publishing, 2007. ISBN 978-80-86946-44-3
- JANÁČEK, J., SIBILA, M. Optimal Evacuation Plan Design with IP-Solver. In: Communications – Scientific Letters of the University of Žilina, roč. 3, č. 11, s. 29-35. 2009. ISSN 1335-4205 Dostupné z: <http://komunikacie.uniza.sk/index.php/communications/article/view/1003/967>
- KVET, M. Emergency system optimization with minimal network modifications. In: 21th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics [electronic]: proceedings. 1. vyd. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. ISSN 2380-8586. 149-154.
- KVET, M., KVET, M. Scenario-based optimization of specific group of public service systems in health sector [electronic] In: Operations research and enterprise systems [print, electronic] : revised selected papers. 1. vyd. Cham: Springer Nature, 2022. ISBN 978-3-031-10724-5. s. 128-151 [print, online].
- Linear Programming Transportation Problem Calculator. [online] [cit. 17.1.2023] Dostupné z: http://reshmat.ru/transportation_problem_lp.html

- LIU, X., a S. LIM, 2016. Integration of spatial analysis and an agent-based model into evacuation management for shelter assignment and routing. In: Journal of Spatial Science, issue 2, 2016. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14498596.2016.1147393>
- MÁČA, J., LEITNER, B. Operačná analýza pre bezpečnostný manažment. Žilina: FŠI ŽU, 2002. ISBN 80- 88829-39-9
- MURRAY-TUITE, P., WOLSHON, B. Evacuation transportation modeling: An overview of research, development, and practice, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 27, 2013, Pages 25-45, ISSN 0968-090X, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.11.005>.
- PEKARČÍKOVÁ, M., FILO, M., TREBUŇA, P. Metódy riešenia distribučných úloh: zborník z XIII. Medzinárodnej vedeckej konferencie Manažérstvo životného prostredia. Bratislava 18.-19. apríl 2013. ISBN 978-80-89281-90-9
- SEIDL, M., M. TOMEK, a D. VIČAR, 2014. Evakuácia osôb, zvierat a vecí. Žilina: EDIS – vydavateľstvo ŽU, 2014. ISBN 978-80-554-0939-9
- Slovenský vodohospodársky podnik, š.p. Mapy povodňového ohrozenia a mapy povodňového rizika vodných tokov Slovenska. [online] [cit. 14.12.2022] Dostupné z: <http://mpompr.svp.sk/okres.php?id=42>
- Transportation Problem Calculator. Transportation problem using vogel's approximation method. [online] [cit. 17.12.2022] Dostupné z: <https://cbom.atozmath.com/CBOM/transportation.aspx>
- Vogels Approximation Method Calculator. Minimum Transportation Cost Calculator/VAM Calculator [online] [cit. 16.11.2022] Dostupné z: <https://www.easycalculation.com/operations-research/minimum-transportation-vogel-approximation-method.php>

Michal Ballay - 1, Ing., PhD., LL.M.

Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika
e-mail: michal.ballay@uniza.sk

Zuzana Gašparíková - 2, Mgr.

externý doktorand, Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika
e-mail: zgasparikova1@gmail.com

Bohuš Leitner - 3, doc., Ing., PhD.

Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika
e-mail: bohus.leitner@uniza.sk
