

PODPORA ROZHODOVÁNÍ V OBLASTI BEZPEČNOSTNÍHO PLÁNOVÁNÍ

SUPPORT FOR DECISION MAKING IN THE FIELD OF SECURITY PLANNING

Josef VOLEK

Dostupné na http://www.population-protection.eu/attachments/042_vol4special_volek.pdf.

Abstract

Complexity of real world makes extensive demands to the process of decision making in all branches of human activities. Modern information technologies, telematics, logistics, new transportation systems and technologies enable in a potent way rationalize processes running in transportation systems and in systems close connected as well. Modern and effective operation of complex systems is not possible without use of applied mathematics and quantitative methods. That why is also very important to use methods and algorithms of applied mathematics and quantitative methods as a support enabling optimal decision making in the whole scale of problems related to the problems of safety planning and operational safety management. In this paper possibilities of use of some decision making methods in the area of safety planning will be described.

Keywords

Decision making support, quantitative methods, discrete optimization, location analysis.

Úvod

Hasičský záchranný sbor České republiky tvoří společně se Zdravotnickou záchrannou službou a Policií České republiky páteří systém integrovaného záchranného systému (IZS), který byl v České republice vytvořen ke koordinaci záchranných a likvidačních prací při vzniku mimořádných událostí. Nutnost integrace jednotlivých článků podílejících se na odstraňování a minimalizaci materiálních ztrát, snižování a zmírňování eventuálních ztrát na lidských životech je v dnešní době nasnadě. Moderní komunikační a informační prostředky způsobují často „nadbytek“ informací. Tento nadbytek informací se může projevit podobně jako jejich nedostatek, totiž ne-li přímo nemožností, přinejmenším silnou determinací možnosti kvalifikovaného a optimálního rozhodnutí o postupech při vzniku konkrétních mimořádných situací. Nadbytek informací nutí kompetentní pracovníky IZS odpovědně za „zároveň“ zjišťovat kvalitu a věrohodnost informací poskytovaných veřejností. Běžně se lze setkat se skutečností, že hodnocení těchto jevu (požár, dopravní nehoda, průmyslová havárie, apod.) různými lidmi se

výrazně liší i za předpokladu nezaujatosti přímého pozorovatele události. Obecně lze tvrdit, že neověřování informací o vzniku mimořádných situací vede k plýtvání materiálními a lidskými zdroji (zneužívání služeb nebo „síla zásahu“ neadekvátní rozsahu události); naopak přílišné ověřování a zjišťování vede k nárůstu negativních následků mimořádných situací, protože každé ověření vyžaduje jistý čas, který může být v případech ohrožení životů nebo velkých materiálních hodnot často rozhodující¹. Obecně je integrace složek IZS definována potřebou co neúčinnějšího a nejehospodárnějšího využití jednotlivých zdrojů k provedení záchrany nebo odstranění následků mimořádných situací. Složitost řešení rozhodovacích situací v rámci IZS v reálném čase je pochopitelná. Vyplyvá totiž ze stochastického charakteru vzniku mimořádných situací. U některých typů mimořádných událostí, které se koncentrují na omezená místa a území (dopravní nehody na silničních komunikacích) jsou vedeny statistiky a sledovány příčiny vzniku těchto událostí; zde lze s jistotou pravděpodobností předvídat vznik dalších událostí. U jiných, vzácněji se vyskytujících událostí (požáry lesů, povodně, apod.), se sice statistiky vedou taktéž, ale počet událostí, jejich rozložení v prostoru a čase je stochastické, takže není možné s reálně požadovanou mírou jistoty předvídat příští výskyt mimořádné události. V prvním případě hovoříme o rozhodování s rizikem, ve druhém o rozhodování za neurčitosti. Záměrem autora je obeznámit širší odbornou veřejnost o možnostech využití metod, algoritmů a obecných přístupů podpory rozhodování z oblasti aplikované matematiky a kvantitativních metod v oblasti budování a rozvoje IZS v ČR, dále v oblastech operativního řízení nasazování složek IZS, taktického a strategického rozhodování v bezpečnostním plánování.

Doprava - klíčová komponenta logistiky zásahu

Vznik mimořádné situace vyvolává reakci všech složek IZS formou zásadních rozhodnutí o formě a rozsahu zásahu. Za vyhodnocení dostupných informací, včasné a adekvátní rozhodnutí a vlastní průběh zásahu v souladu se zásadami IZS odpovídají podle rozsahu potřebného zásahu a podle úrovně řízení kompetentní orgány. Každá mimořádná událost představuje vznik **náhodného logistického problému**, který vyžaduje logistické zabezpečení adekvátní rozsahu a významu. Pod pojmem náhodný logistický problém se zde rozumí událost splňující parametry mimořádné události, vyžadující nasazení prostředků a sil integrovaného záchranného systému, která vznikla náhodně v prostoru a čase v ohraničeném geografickém prostoru (populační centrum, komunikace, extravilán, region, apod.). Rozhodujícími pro úspěšnost zásahu jsou zejména časová odezva složek IZS na informaci o vzniku mimořádné události, rozhodnutí zahrnující časový průběh zásahu příslušné složky IZS, počet a složení nasazeného záchranného personálu, rozsah nasazené techniky, apod. Uvedená rozhodnutí jsou podstatně ovlivněna kvalitou informací o vzniku mimořádné události.

Klíčovou úlohu, obdobně jako ve všech logistických systémech, plní doprava. Většina závažných mimořádných událostí zpravidla vyžaduje současně

nasazení všech tří základních složek IZS. Přestože každá z těchto tří složek IZS má své nezastupitelné místo v logistickém řetězci zásahu k mimořádné události a jako takové jsou na stejné rozhodovací úrovni, Hasičský záchranný sbor ČR plní navíc ze zákona funkci hlavního koordinátora všech záchranných složek a v případě mimořádné události nebo krizového stavu zabezpečuje koordinovaný postup při provádění záchranných a likvidačních prací [1]. Koordinace postupů je významná zejména při mimořádných událostech většího rozsahu, kdy „do hry“ vstupují i další složky IZS (armáda, obecní policie, občanská sdružení, dobrovolní hasiči, apod.). Poté, co byla ohlášena mimořádná událost, učiněna příslušná rozhodnutí a vydány povely k jejich realizaci v terénu, rozhodují o rychlosti odezvy a nasazení složek IZS na místě zásahu kromě technických parametrů výjezdových vozidel, techniky a technického stavu pozemních komunikací zejména následující faktory:

- hustota sítě pozemních komunikací v místě události,
- stav provozu na pozemních komunikacích,
- technický stav a kapacita (průjezdnost) pozemních komunikací,
- lokace středisek výjezdových skupin jednotlivých složek IZS.

Obecně řečeno je problematika zlepšování parametrů pozemních komunikací ve smyslu předchozích faktorů ovlivňujících rychlost nasazení složek IZS investičně náročnou záležitostí zejména pro rozpočty regionů. Je zřejmé, že v dohledné době nelze počítat se zvyšováním hustoty komunikací regionálního charakteru, ani s výrazným zlepšením technického stavu vozovek a s tím související kapacitou. Rovněž nelze předpokládat, že bude docházet ke snižování průměrné hustoty a intenzity dopravních proudů na jednotlivých komunikacích. Spíše se bude zřejmě jednat o dílčí přesuny z komunikací s poplatkem na komunikace bez zpoplatnění. Trendy vývoje silniční dopravy hovoří „jasnou řečí“ - neustálý nárůst. Posledně jmenovaný faktor – lokace/rozmístění středisek výjezdových skupin složek IZS v geografickém prostoru patří do oblasti organizační; zvyšování jejich počtu je finančně náročnou záležitostí a v současné ekonomické situaci státu nelze se zvyšováním počítat, spíše naopak.

Dopravní nehody vznikající na pozemních komunikacích jsou sdělovacími prostředky tradičně sledovány a prezentovány veřejnosti prostřednictvím tisku, televize a rozhlasu nejvíce. To je příčinou toho, že ačkoliv dopravní nehody představují relativně „zanedbatelné“ procento z celkových výkonů jednotlivých složek IZS, „přitahují“ nejvyšší zájem veřejnosti a v této souvislosti i zájem o rozmístění příslušných složek IZS. Problematika stanovení adekvátního počtu středisek výjezdových skupin složek IZS a jejich umístění na území ČR nejen z pohledu dopravních nehod, ale z pohledu celé škály mimořádných událostí, které se každodenně udávají, je složitým problémem, kde svoji roli sehrává řada faktorů, jako jsou početní stavy zdravotnického personálu, hasičů a příslušníků policie v ČR, nedostatek vhodných lokalit na umístění středisek, vysoké finanční náklady na zřízení střediska, apod. Obecně lze tvrdit, že stát bude snižovat zákonem garantovanou dobu odezvy zvyšováním počtu středisek výjezdových skupin IZS pouze pod tlakem zvenčí (EU), pokud tento tlak nepřichází, je možné naopak sledovat snahu vlády k úsporným opatřením zvyšováním času dostupnosti, jak

jsme zaznamenali i v poslední době, kdy byla zákonem stanovená doba dostupnosti 15 minut zvýšena na 20 minut, co přirozeně v konečném důsledku vede ke snižování celkového počtu operačních skupin jednotlivých složek IZS (počtu výjezdových skupin Zdravotnické záchranné služby, stanovišť Hasičského záchranného sboru, atd.). Z výše uvedených důvodů je nutné se zabývat problematikou snižování doby odezvy jinými, finančně méně náročnými postupy. V následujících kapitolách je uveden nástin možností, který si neklade nárok být zcela vyčerpávajícím.

Významné cesty na grafech

V této kapitole uvažujeme s matematickým modelem sítě pozemních komunikací ve formě souvislého, neorientovaného, hranově ohodnoceného, obyčejného grafu $G=(V,X)$, kde V je množina vrcholů grafu (uzlů sítě) a X je množina hran grafu (úseků sítě). Vrcholy grafu jsou modelem křižovatek pozemních komunikací, významných bodů sítě nebo populačních center. Hrany grafu vyjadřují jednotlivé úseky pozemních komunikací. Ohodnocení hran vyjadřuje například délku úseků v kilometrech, kapacitu nebo propustnost úseku v počtu vozidel za časovou jednotku, pravděpodobnost úspěšného/neúspěšného průchodu hranou, maximální hmotnost/délku/gabarit dopravních jednotek, apod. V takto definovaném grafu lze vyhledat mezi zadanou dvojicí uzlů sítě² některé významné cesty³. Mezi něž patří zejména:

- nejkratší/minimální cesta,
- nejspolehlivější cesta,
- cesta s maximální kapacitou.

Nejkratší/minimální cesta⁴

Je přirozené, že za srovnatelných podmínek technické kvality úseků pozemních komunikací, povolené rychlosti, směrových a výškových poměrů, zatížení provozem a spolehlivostí bezpečného průjezdu budou prostředky složek IZS využívat kilometricky nejkratší cesty. Proto nejdříve zmíníme úlohu sestrojení nejkratší nebo též minimální cesty mezi zadanou dvojicí vrcholů $u, v \in V$ grafu $G = (V, X)$. (Význam vrcholů $u, v \in V$ grafu G viz poznámka pod čarou číslo 4).

Množinu všech cest $m(u, v)$ mezi počátečním vrcholem cesty - u a koncovým vrcholem cesty - v označíme M .

Nejkratší/minimální cestou mezi vrcholy u a v je cesta $m^*(u, v) \in M$, pro kterou platí:

$$\sum_{h \in m^*(u,v)} o(h) = \min_{m(u,v) \in M} \left\{ \sum_{h \in m(u,v)} o(h) \right\}$$

Podle významu ohodnocení hran - $o(h)$ lze určit cestu kilometricky, časově nebo nákladově nejkratší, nebo též cestu minimální. Ve všech případech je možné použít metod Dijkstra, nebo Forda. Délka nejkratší cesty mezi vrcholy u a v grafu G , určuje jejich vzdálenost - $d(u,v)$.

Nespolehlivější cesta

V hustém provozu silniční dopravy je mnohdy významnější sledovat jiné kritérium, než je kilometrická délka nejkratší cesty. Zajímá nás pravděpodobnost úspěšného dosažení místa zásahu výjezdni skupinou IZS v požadovaném čase. Uvažujme proto obyčejný, souvislý, hranově ohodnocený, neorientovaný graf, který je modelem reálného systému silniční sítě. Vrcholy grafu představují křižovatky komunikací a hrany úseky komunikací. Ohodnocení hran - $p(h)$ vyjadřuje pravděpodobnost úspěšného průchodu danou hranou⁵ (může jít například o pravděpodobnost, že na úseku komunikace nedojde k havárii; z vojenského pohledu může ohodnocení např. vyjadřovat pravděpodobnost, že úsek nebude napaden protivníkem, apod.). Zajímavým problémem je vyhledání cesty⁶, která je z pravděpodobnostního hlediska "nejprůchodnější". Cestu nazýváme nejspolehlivější cesta.

Spolehlivost cesty $m(u, v) \in M$ mezi dvěma zadanými vrcholy $u, v \in V$ grafu $G = (V, X)$ je definována:

$$s(m(u, v)) = \prod_{h \in m(u, v)} p(h); \quad 0 \leq p(h) \leq 1$$

Cestu $m^*(u, v) \in M$ nazýváme **nejspolehlivější cestou** mezi vrcholy u a v , jestliže pro ni platí:

$$s(m^*(u, v)) = \max_{m(u, v) \in M} \{s(m(u, v))\}$$

Z pohledu programátora definice nejspolehlivější cesty nedává návod na sestavení efektivního algoritmu pro její vyhledání. Jedinou možností je použití metody „hrubé síly“, co znamená určit všechny existující cesty a pro každou vypočítat její spolehlivost. Následně určit cestu s maximální spolehlivostí. Tento způsob je možný pouze pro sítě malého rozsahu, neboť pro rozsáhlejší grafy je počet cest velký a vyřešení úlohy by nebylo možné dosáhnout v „rozumném“ čase. Proto je nutné tuto maximalizační úlohu transformovat do úlohy minimalizační s využitím modifikované Dijkstrové metody.

Cesta s maximální kapacitou

Obzvlášť významnou otázkou při volbě přístupové trasy k místu zásahu je problém možností nasazení moderních kapacitních mobilních prostředků hasební techniky. Zejména na sídlištních měst, v historických centrech měst a v obcích můžeme poměrně často pozorovat bezvýhodnou situaci hasících sborů IZS, kdy dílem nedisciplinovanost majitelů zaparkovaných vozidel, dílem nekoncepční řešení komunikací neumožňuje přístup výkonných hasících vozidel k místu požáru.

Kromě délky cesty z místa výjezdu skupiny do místa zásahu, její spolehlivosti úspěšného dosažení cíle je tedy nutné zohledňovat i „průchodnost“ cesty. Uvažujme neorientovaný, souvislý, hranově ohodnocený, obyčejný graf. Vrcholy grafu představují křižovatky komunikací, hrany úseky komunikací a ohodnocení hran - $o(h)$ kapacitu/propustnost⁷ úseků komunikací.

Nechť $m(u, v) \in M$ je libovolná cesta z množiny cest M mezi vrcholy u a v grafu $G=(V, X)$.

Kapacitu cesty $m(u, v) \in M$ definujeme:

$$K(m(u, v)) = \min_{h \in m(u, v)} \{o(h)\}.$$

Cestu $m^*(u, v) \in M$ nazveme **cestou s maximální kapacitou**, když pro ni platí:

$$K(m^*(u, v)) = \max_{m(u, v) \in M} \{K(m(u, v))\}$$

Pro cestu s maximální kapacitou se dá rovněž dokázat platnost následujícího vztahu:

$$K(m^*(u, v)) = \min_{X_R} \left\{ \max_{h \in X_R} \{o(h)\} \right\}, \quad X_R \in R(u, v),$$

kde $R(u, v)$ je konečná množina řezových množin mezi vrcholy u a v . Posledně uvedená definice cesty s maximální kapacitou umožnila vývoj efektivní metody na její vyhledání. Metoda je založená na tzv. principu „krácení“ hran.

Lokační analýza

Lokační analýza jako věda o lokacích, resp. rozmístování zařízení v (geografickém) prostoru patří v poslední době k nejvyhledávanějším disciplínám operačního výzkumu. Problematiku lokační analýzy je možné vymezit různými způsoby, podle konkrétního řešeného problému. Abstrakcí a zobecněním konkrétních úloh je možné sestavit obecný model lokační úlohy a formulovat cíle lokační analýzy na tomto obecném modelu. Před tím uvedeme několik praktických příkladů/oblastí možného využití lokační analýzy. Jedná se například o rozmístění:

1. výrobních podniků, firem, servisních středisek, opraven, apod.,
2. skladů materiálů a techniky pro mimořádné, krizové situace a katastrofické stavy,
3. škol, vzdělávacích center a zařízení, nemocnic, zdravotnických zařízení, stanic první pomoci,
4. administrativních budov, úřadů, peněžních ústavů a jejich poboček,
5. obchodních a nákupních středisek,
6. výjezdových středisek složek integrovaného záchranného systému (hasičských sborů, zdravotnických záchranných stanic, stanovišť policie, apod.),

7. bankomatů, platebních automatů,
8. středisek obsluhy typu: servisy, sběrné dvory tuhého domovního odpadu, skládky nerecyklovatelného odpadu, skládky materiálů pro zimní údržbu komunikací, veřejná logistická centra,
9. přestupních uzlů v komunikačních systémech městské hromadné dopravy,
10. čerpacích stanic pohonných hmot (benzín, nafta, LPG).

Obecný model lokační úlohy

Pro všechny výše jmenované konkrétní úlohy zavedeme některá společná označení. V čase a prostoru vznikají nahodile (stochasticky) nebo pravidelně (rovnoměrně) požadavky na obsluhu. Požadavkem na obsluhu je například potřeba údržby komunikace v zimním období, která zahrnuje odstranění sněhu/náledí a posyp komunikace chemickými prostředky, případně inertním posypovým materiálem. Požadavkem na obsluhu je též vzniklý požár, úraz vzniklý následkem dopravní nehody, srdeční, mozková událost, potřeba občana vyzdvihnutí peněžní hotovosti z peněžního ústavu u přepážky nebo z bankomatu, oprava elektrického spotřebiče nebo ekologická likvidace osobního automobilu s ukončenou dobou životnosti.

Uspokojení (odbavení) požadavků na obsluhu/klientů je realizováno ve střediscích obsluhy. Požadavky na obsluhu se přemísťují z místa vzniku do středisek obsluhy ve vlastní režii (nákup pohonných hmot u benzinových čerpacích stanic, chůze k nejbližšímu bankomatu) nebo je požadavek na obsluhu uspokojen výjezdem/chůzí servisního pracovníka ze střediska obsluhy do místa vzniku požadavku. V prvním i druhém případě je nutno vykonat jistou dopravní práci, kterou je možné měřit vhodnou metrikou.

Podle počtu požadavků na obsluhu, charakteru a místa vzniku, podle rozsáhlosti území je nutné budovat síť středisek obsluhy. Zpravidla však nejde o budování sítě středisek tzv. „na zelené louce“. Obecně mohou nastat dva případy budování sítě středisek obsluhy:

- budování sítě středisek obsluhy „od nuly“ v konkurenčním prostředí (například budování sítě čerpacích stanic pohonných hmot nadnárodní společností, která doposud nemá v ČR své zastoupení), nebo nekonkurenčním prostředí (zřízení filiálek specializovaných firem s monopolním postavením na trhu);
- již existující síť je potřebné rozšířit s ohledem na narůstající počet požadavků na obsluhu a narůstající počet míst výskytu požadavků o jedno/více středisek s přihlédnutím k aspektům konkurence.

Analogicky předchozímu je nutné použít lokační analýzu i v případech redukce sítě středisek obsluhy. Rozšiřování sítě i redukce může probíhat jednorázově nebo může být rozložena v čase.

Podle typu a charakteru konkrétní úlohy může být prostorem pro umístění středisek obsluhy libovolný bod (místo) na zemském povrchu příslušných územně správních celků, kterými jsou například populační centra (obce, města, průmyslové aglomerace), mikro-regiony, regiony, kraje, území

jednotlivých států, apod. nebo je počet míst možných lokací nějakým způsobem omezen. Omezení se zpravidla podle charakteru středisek obsluhy týká území, která jsou chráněna z hlediska ochrany povrchových a spodních vod, ochrany flory, resp. fauny a dalších hledisek, která označujeme souhrnným názvem ochrana životního prostředí.

Většina lokačních úloh počítá s umísťováním středisek obsluhy do míst populačních center, to znamená do obcí a měst. Část úloh umožňuje umísťovat střediska na existující komunikace a pouze malá část úloh uvažuje s umístěním středisek na „zelenou louku“, to znamená do míst s absencí dopravních, komunikačních a inženýrských sítí.

Matematický model

Podle povahy lokačních úloh hovoříme o spojitě a diskrétní lokaci. Větší význam pro praxi mají diskrétní lokace na sítích. Síť je tvořena konečným počtem populačních center nebo jiných významných bodů geografického prostoru (křižovatky komunikací) a konečným počtem úseků komunikací (úseků železničních tratí, silničních úseků, vodních toků, leteckých spojů, ale též například úseků potrubní pošty, pásové dopravy a další netradiční dopravní cesty). Matematickým modelem sítě je konečný neorientovaný graf $G = (V, X)$ sestávající z vrcholů/uzlů- V , představujících populační centra a konečné množiny neorientovaných hran- X , představujících úseky komunikací. Graf neobsahuje násobné (rovnoběžné) hrany a smyčky. Jde tedy o graf označovaný v terminologii teorie grafů jako obyčejný.

Řešení úloh diskrétní lokace spadá do oblasti optimalizačních úloh matematiky. Zpravidla jde o úlohy kombinatorického charakteru s velkým počtem řešení. Existuje celá řada metod, které je možné k řešení lokačních úloh využít. Všechny metody více či méně narážejí na problém počtu přípustných řešení lokačního problému. Uvažujeme-li síť prezentovanou grafem s počtem vrcholů $n = |V|$ a počtem středisek obsluhy $k = |D_k|$, kde $D_k \subset V$ je množina středisek,

je počet možných lokací dán kombinačním číslem $\binom{n}{k}$. K nejpoužívanějším

metodám patří kvantitativní metody diskrétní vícekriteriální optimalizace, zejména metody teorie grafů, matematického programování a využití metod a algoritmů genetického programování. Kromě možností využití exaktních metod, které v konkrétních podmínkách zpravidla pro velký rozsah selhávají, byly vyvinuty metody založené na principu jednoduchých ale i sofistikovaných heuristických metod.

Jako příklad modelu celočíselného lineárního programování uvedeme nekapacitní problém lokace středisek obsluhy (v anglofonní literatuře se pro označení této úlohy vžilo označení Uncapacitated Facility Location Problem, ve zkratce UFLP nebo též SPLP – Single Plant Location Problem). Model obsahuje kritérium, omezující podmínky a podmínky celočíselnosti. Poslední podmínka

souvisí s lokační úlohou při zohlednění kapacitních možností středisek obsluhy. CFLP (Capacitated Facility Location Problem) znamená lokační úlohu s respektováním kapacitních možností středisek obsluhy. Podmínka umožňuje výběr řešení, ve kterých bude dodržena kapacita jednotlivých středisek.

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^m f_i y_i \\ & x_{ij} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \\ & \sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \\ & x_{ij} \leq y_i \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \\ & y_i \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, m \\ & (\text{podmínka pro CFLP}) \\ & \sum_{j=1}^n d_j x_{ij} \leq s_i y_i \quad i = 1, \dots, m \end{aligned}$$

kde:

$J = \{1, 2, \dots, n\}$; $j = 1, \dots, n$ je množina požadavků na obsluhu,

d_j = velikost požadavku j . zákazníka ($d_j \geq 0$),

$I = \{1, 2, \dots, m\}$; $i = 1, \dots, m$ je množina lokací středisek obsluhy,

f_i : ($f_i \geq 0$) jsou fixní náklady na zřízení /instalaci střediska obsluhy v místě i ,

c_{ij} = jednotkové náklady na uspokojení požadavku klienta/požadavku j zařízením i ,

x_{ij} = podíl uspokojení klienta/požadavku na obsluhu $j - d_j$ střediskem i ,

s_i = kapacita zařízení/střediska obsluhy v i ,

y_i = binární proměnná vyjadřující vybudování/instalaci střediska obsluhy v místě i ($y_i = 1$), v opačném případě ($y_i = 0$).

Rada lokačních úloh spadá do kategorie, kterou nazýváme lokační úlohou s „věrným zákazníkem“, co vyjadřuje skutečnost, že požadavky na obsluhu/klienti z vlastního přesvědčení nebo s ohledem na jiné aspekty a okolnosti služeb využívají výhradně jednoho střediska obsluhy. Potom platí, že vektor $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ obsahuje jedničku a ostatní složky jsou rovny 0. Jestliže $x_{ij} = 0$, potom j . požadavek na obsluhu uplatňuje svůj celkový požadavek $-d_j$ výhradně ve středisku obsluhy umístěném v místě i .

Přiřazovací problémy a distribuční úlohy

K praktickému a účelnému využití v oblasti bezpečnostního plánování je možné též využít exaktní metody aplikované matematiky, které byly vyvinuty pro efektivní řešení distribučních úloh a přiřazovacích problémů. Principy a metody řešení distribučních úloh je možné využít zejména při sestavě plánů zásobování obyvatelstva potravinami, léky a hygienickými potřebami v případech krizových stavů (povodně a průmyslové havárie spojené s částečnou nebo úplnou evakuací obyvatelstva). Metody řešení přiřazovacích problémů mohou být využity jak v oblasti operativního řízení při nasazování techniky a personálu složek IZS, tak v oblasti taktického a strategického plánování. Pro názornou představu uvedeme několik praktických úloh náležejících do této skupiny problémů.

Praktické příklady přiřazovacích a distribučních úloh

Při formulaci obecného přiřazovacího problému vyjdeme z úloh praktického charakteru, které vedou na využití metod aplikované matematiky vyvinutých pro jejich řešení. Pochopení principů a cílů řešení umožní využít analogie v oblastech bezpečnostního plánování.

Úloha o přiřazení pracovníků

Výrobní podnik disponuje m pracovníky, které je nutné přiřadit na m pracovišť/prací. Efektivnost „nasazení“ i . pracovníka na j . práci je možné kvantifikovat koeficientem c_{ij} , který vyjadřuje průměrnou úsporu materiálu na jednotku produkce nebo průměrnou ztrátu na jednotku produkce (vadné výrobky, zmetky, apod.). V dalším budeme uvažovat, že koeficienty vyjadřují ztrátu. V případě, že i . pracovníka není možné na j . práci nasadit, položíme $c_{ij} = \infty$. Koeficienty je možné sestavit do čtvercové matice $C=(c_{ij})$, $i=1, \dots, m$; $j=1, \dots, m$, kterou nazýváme maticí sazeb. Úkolem je rozhodnout, o přiřazení pracovníků na jednotlivá pracoviště tak, aby bylo dosaženo minimálních ztrát materiálu na jednotku produkce nebo maximálních úspor. Úlohu formulujeme jako minimalizační nebo maximalizační podle charakteru koeficientů c_{ij} .

Úloha o výběrovém řízení

Na obsazení m volných míst jisté organizace bylo vypsáno výběrové řízení. Celkem se výběrového řízení zúčastnilo n uchazečů. S přijetím i . uchazeče na j . místo jsou spojeny náklady c_{ij} (resp. zisk). Na každé místo je potřeba přijmout jednoho uchazeče tak, aby celkové náklady byly minimální, resp. celkový zisk maximální.

Speciální případ dopravní úlohy

Uvažujme dopravní úlohu s m dodavateli a n odběrateli, přičemž zásoby každého dodavatele a požadavky každého odběratele jsou jednotkové. Dále známe přepravní sazby c_{ij} přemístění zásob od každého dodavatele každému odběrateli.

Úlohou je určit, od kterého dodavatele bude dodána zásoba kterému odběrateli tak, aby celkové přepravní náklady byly minimální.

Úlohy o nasazování obslužných čt a dopravních prostředků

Uvažujme oblast železniční sítě, která tvoří atrakční obvod jistého lokomotivního depa, tzn. že k uceleným soupravám vozů (vlakům), které jsou sestavovány v různých vlakotvorných železničních stanicích této oblasti, jsou přistavovány lokomotivy z tohoto depa. Jsou známá místa, kde se lokomotivy aktuálně nacházejí (v depu, na vlakové soupravě na trati nebo v některé železniční stanici oblasti). Z aktuální polohy lze určit, kolik kilometrů „prázdného běhu“ musí překonat i. dopravní prostředek k obsluze j. vlaku - c_{ij} . Úlohou je určit, kterou lokomotivu je potřebné přistavit ke kterému vlaku tak, aby celkový počet ujetých kilometrů prázdného běhu byl minimální. Úlohy tohoto typu jsou též nazývány sestavou plánů vlakových náležitostí nebo oběhů lokomotiv. Do této skupiny úloh patří celá škála analogických úloh z různých druhů dopravy. Čtenář působící v oblasti bezpečnostního plánování jistě snadno najde analogii problému v oboru.

Obecná matematická formulace přiřazovacího problému

Přiřazovací problém je možné na základě analýzy konkrétních problémů obecně formulovat následovně:

Je dána čtvercová matice sazeb $C=(c_{ij})$, $i=1, \dots, m$; $j=1, \dots, m$. Je potřebné vybrat m prvků matice tak, aby žádné dva z těchto prvků neležely v jednom řádku nebo sloupci a aby součet těchto prvků byl minimální/maximální. To znamená, že každý řádek a každý sloupec matice sazeb obsahuje právě jeden vybraný prvek. Předpoklad, že matice sazeb je čtvercová, není omezující, protože úlohy, kde počet řádků matice m se liší od počtu sloupců n ($m < n$ nebo $m > n$), můžeme snadno převést na typ $m=n$.

Poznámka č. 1:

Jak vyplývá z výše uvedeného, je možné úlohy optimálního přiřazení řešit jako úlohy minimalizační nebo maximalizační podle významu prvků matice koeficientů; vyjadřují-li koeficienty ztrátu (zmetky) nebo náklady přiřazení, půjde o úlohu minimalizační; v opačném případě, vyjadřují-li koeficienty zisk či úsporu, půjde o úlohu maximalizační. V dalším předpokládáme řešení minimalizačních úloh, protože každý maximalizační problém s maticí sazeb $A=(a_{ij})$ lze snadno převést na minimalizační problém s maticí sazeb $C=(c_{ij})$, přičemž $c_{ij} = M - a_{ij}$, kde M je libovolné číslo, pro které platí $M \geq \max \{a_{ij}\}$, $i=1, \dots, m$; $j=1, \dots, n$.

Poznámka č. 2:

Vycházíme-li z maticové formulace problému, lze přiřazovací problém zařadit do kategorie úloh diskretní optimalizace. Každý výběr m (n) prvků dané matice, právě po jednom z každého řádku a sloupce, nazveme přípustným řešením úlohy. Každé přípustné řešení je možné jednoznačně vyjádřit jako permutaci

$$P(i_1, i_2, \dots, i_n) = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix}.$$

Přípustné řešení potom obsahuje prvky $C_{1i_1}, C_{2i_2}, \dots, C_{ni_n}$. Cenu přípustného řešení definujeme jako součet prvků tvořících toto řešení. Optimálním řešením je potom přípustné řešení s minimální cenou. Permutaci příslušející optimálnímu řešení nazýváme optimální permutací.

Obecná matematická formulace distribučního problému

Uvažujme m distributorů/výrobců/dodavatelů jisté komodity (potravin, náhradní díly, stavebniny, apod.), kteří jsou rozmístěni v jistém ohraničeném geografickém prostoru. Ve stejném prostoru se nachází n spotřebitelů této komodity. Kapacitu i . dodavatele označíme a_i , požadavek j . spotřebitele b_j .

Porovnáním součtu kapacit dodavatelů $\sum_{i=1}^m a_i$ s celkovým požadavkem

uplatňovaným spotřebiteli $\sum_{j=1}^n b_j$ obdržíme tzv. vybilancovanou (v případě

rovnosti) nebo nevybilancovanou dopravní úlohu. Pro každou dvojici (i, j) – i . dodavatel – j . spotřebitel, je známá přepravní sazba c_{ij} ⁸. Úlohou řešení distribučního problému je určit, kolik jednotek příslušné komodity bude dodáno j . spotřebiteli od i . dodavatele tak, aby celkové přepravní náklady byly minimální.

Obecně formulovanou distribuční úlohu je možné poměrně snadno popsat analytickým modelem náležejícím do skupiny úloh lineárního programování.

Model zahrnuje tři obligátní náležitosti:

1. kritérium,
2. soustavu omezujících podmínek,
3. soustavu podmínek nezápornosti.

$$1. \quad (\min) z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij}$$

$$2. \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, i = 1, \dots, m$$

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

$$3. \quad x_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$$

G. B. Dantzig vyvinul několik efektivních exaktních metod na řešení distribučních problémů a jejich analogií. Jejich zevrubnější popis a vysvětlení principů vyžadují více prostoru, než činí limitovaný prostor příspěvku.

Svozné a rozvozné úlohy

Principy a metody optimalizace svozových a rozvozných úloh patří k nezbytným pracovním nástrojům pracovníků odpovědných za plánování v mimořádných situacích a krizových stavech. Principy řešení těchto úloh jsou založeny na teorii hamiltonovských kružnic a eulerovských tahů v grafu. Různými autory byla vyvinuta celá řada účinných metod a algoritmů na vyhledávání optimálních způsobů obsluhy požadavků rozptýlených v geografickém prostoru z jednoho nebo z více obsluhovacích míst. Namátkou vzpomeneme Littla, který vyvinul exaktní metodu na vyhledání minimální/maximální hamiltonovské kružnice a vyřešil tak po dlouhé době v roce 1966 problém tzv. obchodního cestujícího. Pro případ kapacitního omezení dopravních prostředků byly vyvinuty metody na sestavu tzv. okružních jízd. Vzpomeňme alespoň průkopníky v této oblasti - autory Dantzig, Clarka a Wrighta.

Závěr

Přestože problematika racionalizace a optimalizace rozhodování je široká, pokusil se autor článku přiblížit čtenáři některé možnosti využití metod souhrnně též označovaných jako metody operačního výzkumu, či metody aplikované matematiky v oblastech bezpečnostního a krizového plánování. Dlužno připomenout, že samotná znalost těchto metod a jejich principů situaci nijak neulehčuje a nezjednodušuje. Bez aktivního využití nejnovějších prostředků výpočetní techniky, poznatků relativně nových vědních oborů, jako telematika, logistika, informatika, krizový management, apod., nelze v současné době úspěšně řešit žádný konkrétní problém reálného světa.

POZNÁMKY:

- ¹ Zde je vhodné též připomenout nekonečné diskuse o přednostech a nedostacích tísňového volání na číslo 112.
- ² V našem případě je počátečním vrcholem cesty - **u** místo lokace výjezdové skupiny IZS a koncovým vrcholem cesty - **v** místo zásahu, čili místo vzniku mimořádné události.
- ³ Cesta v grafu je definována jako střídavá posloupnost vrcholů a hran (začínající v počátečním vrcholu cesty a končící v koncovém vrcholu cesty), které se neopakují.
- ⁴ Minimální cestou je cesta obsahující minimální počet hran. Minimální cestu hledáme zpravidla v grafu, který není hranově ohodnocen. Pokud je graf hranově ohodnocený, považujeme pro účel nalezení minimální cesty délku každé hrany rovnou jedné.
- ⁵ Ohodnocení grafu – $p(h)$ může někdy vyjadřovat i pravděpodobnost neúspěšného průchodu hranou; v tom případě je nutné nahradit toto ohodnocení ohodnocením novým $p'(h) = 1 - p(h)$.
- ⁶ Resp. cest, mezi dvěma vrcholy grafu totiž může existovat více cest s požadovanou vlastností.

- ⁷ Kapacita hran sítě může být vyjádřena různými ukazateli, například: maximální délka vozidla, maximální hmotnost vozidla, maximální výška/šířka vozidla, apod.
- ⁸ Přepravní sazba c_{ij} vyjadřuje náklady na přemístění jednotkového množství přepravované komodity od i . dodavatele j. spotřebiteli.

Literatura

- [1] http://www.mvsr.cz/hasici/faq/izs_hasici.html.
- [2] <http://www.mvsr.cz/hasici/index.html>.
- [3] <http://www.mvsr.cz/statistiky/2005/pozary/rok2005.html>.
- [4] VOLEK, J. *Operační výzkum I*. Pardubice: Univerzita Pardubice, DFJP, 2005.
- [5] DUDORKIN, J. *Operační výzkum*. Praha: ČVUT, 1994.
- [6] KOLÁŘ, J., ŠTĚPÁNKOVÁ, O., CHYTIL, M. *Logika, algebra a grafy*. Praha: SNTL, 1989.
- [7] DANTZIG, G.B. *Linear Programming and Extensions*. 11. vyd. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1998.
- [8] LABBÉ, M., LOUVEAUX, F.V. Location problems, Institut de statistique, Université libre de Bruxelles, Serie: Mathématiques de la gestion, 1996.
- [9] HURTER, A.P., MARTINICH, J.S. *Facility Location and the Theory of Production*. Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [10] MIRCHANDANI, P.B., FRANCIS, L.F. *Discrete Location Theory*. Wiley Interscience, 1990.
- [11] LOVE, R.F., MORRIS, J.G., WESOŁOWSKY, G.O. *Facility Location. Models and Methods*. North Holland, 1988.
- [12] MOCKOVÁ, D. Allocation and location of transport logistics centres. *Acta Polytechnica*, 2010, vol. 50, no 1. ISSN 1210-2709.
- [13] MOCKOVÁ, D. Methods for solving discrete optimisation problems. *Journal Transactions on Transport Sciences*, 2011, Praha, Ministry of Transport. ISSN 1802-971X.
- [14] VOLEK, J., LINDA, B. *Teorie grafů. Aplikace v dopravě a veřejné správě*. [Učebnice]. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2012. ISBN 978-80-7395-225-9.

Kontaktní údaje:

Doc. Ing. Josef Volek, CSc.,

Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra informatiky v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika,
e-mail: Josef.Volek@upce.cz, tel.: +420 466 222 222.