

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta dopravní
Czech Technical University in Prague
Faculty of Transportation Sciences**

Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

**Optimalizační přístupy k řešení úloh o plánování plošné evakuace
obyvatelstva**

**The Optimizing Approaches to Solving of the Area Evacuation
Planning Problems**

SUMMARY

In the past a lot of optimization methods and approaches were created and published for planning and management of evacuation processes.

The presented thesis has two main parts.

The first part deals with the description of the existing methods and approaches and their analysis. The analysis of the existing methods and approaches is realized from the viewpoints – the capability to find the optimal solution, the practical using, and the used optimization criterion.

We can classify the existing and published optimization methods and approaches into several groups. The capability of the method to find the optimal solution can be the first classification viewpoint. From this viewpoint we can classify the existing optimization methods and approaches into exact methods and heuristics. The optimization criterion can be the next classification viewpoint. In the presented thesis the existing methods and approaches are classified into seven groups.

The second part of the presented publication deals with an original approach proposed in this work. This approach can be used for planning of the preventive area evacuation. The proposed approach is exact and uses the multiple-criteria linear mathematical model. In the proposed mathematical model three optimization criteria are formulated. The proposed criteria are the maximal evacuation time, the vehicles used for the evacuation process and the sum of times among the first and last times of arrivals into the evacuation places.

The practical numerical experiments determined for the validation of the proposed model were realised in the conditions of the concrete zone. The solved zone is demarcated around the nuclear power plant Dukovany. The technological aspects of the evacuation process from the zone demarcated around the nuclear power plant enable to reduce the original model. The modified model for these situations is presented in the thesis.

The realised numerical experiments validated the functionality of the proposed models. During the realised experiments the calculation times were monitored. The experiments confirmed that the calculation times depends on the number of the evacuated places, the number of vehicles used for the evacuation process, the required level of the evacuation continuity and the interval among the departures of the transport means to the evacuated zone. This implies that the realised experiments formulated the basic parameters significantly influencing the solving of the proposed models.

SOUHRN

V minulosti bylo pro plánování a řízení evakuačních procesů vytvořeno a publikováno mnoho optimalizačních metod a přístupů.

Prezentovaná práce má dvě hlavní části.

První část se zabývá popisem existujících metod a jejich analýzou. Analýza existujících metod a přístupů je provedena z hlediska schopnosti dosáhnout optimálního řešení, aplikovatelnosti a z hlediska použitého optimalizačního kritéria.

Existující optimalizační metody a přístupy, publikované především v zahraniční literatuře, můžeme rozdělit do několika skupin. Klasifikační hlediska mohou být různá. Prvním klasifikačním hlediskem může být schopnost metody dosáhnout optimálního řešení. Z tohoto hlediska můžeme metody a přístupy klasifikovat na exaktní a heuristické. Dalším klasifikačním hlediskem může být např. formulované optimalizační kritérium.

Druhá část se zabývá novým přístupem navrženým v habilitační práci. Tento přístup je určen pro plánování preventivní plošné evakuace. Navržený přístup je exaktní a využívá multikriteriální lineární matematický model. V navrženém modelu jsou formulována tři optimalizační kritéria. Kritérii jsou maximální doba evakuace, využití vozidel a součet dob mezi příjezdy prvních a posledních dopravních prostředků do evakuovaných míst.

Výpočetní experimenty zaměřené na testování funkčnosti navrženého modelu byly realizovány v podmínkách konkrétního území. Řešené území je vymezeno kolem Jaderné elektrárny Dukovany. Technologické aspekty procesu evakuace ze zón vymezených okolo Jaderné elektrárny Dukovany umožňují původní obecný model zjednodušit. V prezentované práci je proto uveden také modifikovaný model pro tyto situace.

Realizované experimenty potvrdily funkčnost navržených modelů. Během experimentů byly sledovány také doby výpočtu. Experimenty potvrdily, že doby výpočtu závisí na počtu evakuovaných míst, počtu vozidel potřebných k evakuaci, požadované úrovni plynulosti a velikosti intervalu mezi odjezdy vozidel do zóny havarijního plánování. Podařilo se tedy formulovat parametry, které výrazně ovlivňují řešitelnost navržených modelů.

Klíčová slova: plánování evakuace, matematické programování,
lineární modely, optimalizace,

Keywords: evacuation planning, mathematical programming,
linear models, optimization

OBSAH

1	Přehled existujících poznatků a přístupů k plánování plošné evakuace obyvatelstva	6
1.1	Čistě analytické přístupy	8
1.2	Čistě heuristické přístupy	9
1.2.1	Přístupy na bázi prostých heuristik	9
1.2.2	Přístupy na bázi metaheuristik	10
1.3	Přístupy kombinující exaktní modely s heuristickými metodami	11
1.4	Přístupy kombinující exaktní modely s teorií hromadné obsluhy	11
1.5	Kombinované přístupy kooperující s geografickými informačními systémy	12
1.6	Shrnutí poznatků ze zahraničních zdrojů	12
2	Původní výsledky v oblasti návrhu modelů	14
2.1	Formulace problému	14
2.2	Návrh matematického modelu	15
3	Výpočetní experimenty s navrženými modely	19
3.1	Popis evakuačních specifík platných pro zónu havarijního plánování vymezenou v okolí jaderné elektrárny Dukovany....	19
3.2	Charakteristika výpočetních experimentů	22
3.3	Popis průběhu výpočetních experimentů a přehled dosažených výsledků	24
4	Závěry	31
	Seznam použité literatury	33
	Curriculum vitae	37

1 Přehled existujících poznatků a přístupů k plánování plošné evakuace obyvatelstva

Existující česká a slovenská literatura se problematice využívání exaktních přístupů při tvorbě evakuačních plánů věnuje sporadicky, zmínky lze najít např. v literatuře [Kyselák-Šmerek, 2009] a [Janáček-Sibila, 2009].

Publikace [Kyselák-Šmerek, 2009] se zabývá především problematikou definování optimalizačních kritérií uplatnitelných při plánování evakuace většího počtu obyvatel. Uvádí, že problém plánování evakuačního procesu je vhodné řešit jako problém multikriteriální a za tím účelem definuje optimalizační kritéria, jako jsou počet nutných dopravních prostředků pro zabezpečení evakuace, průchodnost (brodivost) dopravních prostředků terénem vyjádřená maximální přípustnou hloubkou zaplavené dopravní cesty, náklady na přepravu jedné osoby na kilometr, operativnost nasazení dopravních prostředků a úroveň komfortu přepravy, přičemž poslední dvě kritéria jsou kvalitativního charakteru. Uvedená kritéria potom aplikuje na různé typy dopravních prostředků (varianty dopravního zabezpečení evakuačního procesu), kterými jsou evakuace osobními automobily (varianta M1), autobusy (varianta M2), těžkými nákladními vozidly vhodnými pro přepravu osob (varianta M3) a vlakovými soupravami (varianta M4). Hlavní část publikace je věnována aplikaci teoretických postupů v podmínkách modelového příkladu. Postup řešení spočívá ve stanovení vah jednotlivých kritérií vybranými metodami, které pro tyto nejčastěji přicházejí v úvahu (Metoda preferenčního uspořádání, Metoda bodové stupnice, Metoda párového porovnávání a Saatyho metoda), následném ohodnocení jednotlivých variant evakuačního procesu (volba vhodného dopravního prostředku) a následné tvorbě pořadí výhodnosti jednotlivých dopravních prostředků k evakuaci obyvatelstva.

Publikace [Janáček-Sibila, 2009] již nad rámec předchozí publikace obsahuje optimalizační přístupy ve smyslu matematického programování. Na rozdíl od publikace [Teichmann, 2009], ve které je taktéž publikován podobný matematický model, však uvádí celkem tři varianty modelů s přibližně stejnou filozofií. Společnými rysy všech modelů v obou publikacích jsou totožná optimalizační kritéria vyjadřující, aby časový okamžik, ve kterém bude všechno obyvatelstvo evakuováno, nastal co nejdříve, dále znalost požadavků na evakuaci vyjádřených počty obyvatel shromážděných v evakuovaných místech a počtů vozidel připravených k evakuaci v jednotlivých výchozích stanovištích. Protože filozofie tvorby modelů v rámci obou přístupů je přibližně stejná, je žádoucí upozornit na rozdíly mezi oběma modely, které se vyskytují. Model publikovaný v [Teichmann, 2009] umožňuje, aby evakuační vozidla

vykonala v rámci procesu evakuace maximálně jednu jízdu, dále, že k evakuaci každého místa s definovaným požadavkem může být použito vozidlo z libovolného výchozího stanoviště, a také, že evakuované obyvatelstvo může být umístěno do kteréhokoliv evakuačního střediska. Dále model umožňuje pracovat s omezením zajišťujícím, že obyvatelstvo každého evakuovaného místa musí být umístěno do stejného evakuačního střediska. Pro realizaci optimalizačního výpočtu však vyžaduje také známé kapacity evakuačních středisek. Modely navržené v publikaci [Janáček-Sibila, 2009] umožňují, aby totéž vozidlo vykonalo v rámci procesu evakuace více jízd mezi obcí (klade tedy menší nároky na disponibilní vozidlový park), dále, nad rámec omezení uvedených v předchozím přístupu, vyžaduje, aby pro každé evakuované místo byla definována množina výchozích stanovišť a také množina evakuačních středisek (ve speciálním případě, kdy množiny výchozích stanovišť evakuačních vozidel pro každé evakuované místo obsahují všechna výchozí stanoviště a množiny evakuačních středisek pro každé evakuované místo obsahují všechna evakuační střediska, nastávají z hlediska možností přiřazení výchozích stanovišť a evakuačních středisek evakuovaným místům stejné podmínky jako v předchozím přístupu). Modely publikované v [Janáček-Sibila, 2009] však neumožňují zajistit, aby evakuované obyvatelstvo ze stejného evakuovaného místa bylo soustředěno v tomtéž evakuačním středisku, což jde v některých případech proti požadavkům na evakuační plány uplatňovaným v současné době. Na rozdíl od předchozího přístupu, který z hlediska přiřazení každého evakuovaného místa pouze jednomu evakuačnímu středisku takovému požadavek zachovává, však modely publikované v [Janáček-Sibila, 2009] umožňují pracovat s nižším počtem disponibilních vozidel a umožňují také kapacitu evakuačních středisek nastavit až na základě provedených výpočtů (nastavení kapacity evakuačních středisek až po provedení optimalizačního výpočtu však umožňuje i první přístup, ovšem do publikovaného modelu musí být proveden zásah spočívající v odstranění kapacitní podmínky vztahující se k evakuačním střediskům).

Zbývá ještě porovnat jednotlivé varianty modelů publikované v [Janáček-Sibila, 2009] mezi sebou. Základní rozdíl mezi první variantou a zbývajícími dvěma spočívá v tom, že první varianta modelu umožňuje přiřadit vozidla z určitého výchozího stanoviště pouze jednomu evakuovanému místu. Toto se již na první pohled jeví jako značně omezující faktor, proto druhá a třetí varianta od tohoto omezení upouští a umožňuje odjezdy vozidel z téhož výchozího stanoviště do více evakuovaných míst. Rozdíl mezi druhou a třetí variantou potom spočívá v tom, že zatímco ve druhé variantě je matematický model dané situace koncipován jako nelineární, ve třetí variantě je tato nelinearita odstraněna.

V zahraniční literatuře je problematika optimalizačních přístupů probírána daleko rozsáhleji a podrobněji, o čemž svědčí i následující přehled.

Klasifikační kritéria pro formulování skupin přístupů by mohla být různorodá. Pro potřeby předkládané práce byla zvolena klasifikace související s použitým optimalizačním přístupem. Podle uvedené klasifikace je možno optimalizační přístupy rozdělit do následujících pěti skupin:

1. čistě analytické přístupy,
2. čistě heuristické přístupy,
3. přístupy kombinující exaktní modely s heuristickými metodami,
4. přístupy kombinující exaktní modely s teorií hromadné obsluhy,
5. kombinované přístupy kooperující s geografickými informačními systémy.

S ohledem na doporučený rozsah habilitačního spisu budou v jednotlivých následujících podkapitolách detailně popsány maximálně 1 – 2 práce, další dohledané práce v jednotlivých kategoriích budou zmíněny taxativním výčtem.

1.1 Čistě analytické přístupy

První skupinu tvoří čistě analytické přístupy využívající především matematické programování a teorii grafů. Zde mohou být uvedeny např. práce [Daganzo, 1993] a [Bish, 2006].

[Daganzo, 1993] ve své práci popisuje přístup nazvaný jako dynamický síťový model založený na bázi dekompozice prvků sítě na dílčí části (buňky) a zabývá se predikcí toků elementů (vozidel) v čase, přičemž v textu práce jsou formulovány základní vztahy mezi predikovanými toky a možnostmi dopravní infrastruktury. V podmínkách dopravní sítě mohou být buňkami např. úseky pozemních komunikací, křižovatky apod. V závěru článku pak autor uvádí možné aplikace uvedeného přístupu, mezi kterými je uvedena i aplikace související s tvorbou evakuačních plánů. Význam této práce spočívá zejména v tom, že formuluje teoretická východiska pro některé další publikace uvedené dále v textu.

Celá řada přístupů založených na matematickém programování je popsána v disertační práci [Bish, 2006]. Práce je zaměřena na organizaci evakuace pobřežních oblastí před příchodem tropických bouří. Jde tedy o plánování evakuace při očekávaných mimořádných událostech. Matematické modely publikované v dané práci jsou členěny do dvou skupin označované jako REM (Regional Evacuation Models) a D-REM (Disaggregated Regional Evacuation Models). Základní rozdíl mezi oběma přístupy spočívá v tom, že v rovině REM modelů je řešena evakuace větších

skupin obyvatelstva, zatímco v případě D-REM modelů je evakuační proces plánován v úrovni menších přepravních elementů (rodin apod.). Proměnné v publikovaných modelech reprezentují počty přepravovaných elementů nacházejících se na jednotlivých úsecích v průběhu procesu evakuace (v diskrétních časových okamžicích), počty elementů vstupujících do jednotlivých úseků v těchto okamžicích a počty elementů vystupujících z jednotlivých úseků v těchto okamžicích. V práci je pro potřeby optimalizačního procesu formulováno několik typů optimalizačních kritérií, kterými jsou celková délka doby evakuace vyjádřená počtem definovaných časových intervalů, průměrná evakuační doba připadající na obyvatele, celkový cestovní čas na úsecích sítě nebo hodnota tzv. rizikové funkce, která vyjadřuje hodnotu definovaného rizika při naplánování odjezdu ze zdroje, kde se elementy nacházejí a při průjezdu úseky dopravní sítě. Hodnoty všech výše uvedených kritérií jsou v průběhu procesu optimalizace minimalizovány. Omezující podmínky v modelech pak zajišťují kontinuitu toků přepravních elementů na jednotlivých úsecích dopravních sítí v čase, dodržení kapacitních možností jednotlivých úseků.

K dalším pracím v této oblasti je možno zařadit publikace [Cova-Johnson, 2003], [Ng-Waller, 2010] a [Yao-Mandala-Chung, 2009].

1.2 Čistě heuristické přístupy

1.2.1 Přístupy na bázi prostých heuristik

Druhou skupinu tvoří čistě heuristické přístupy. Obecně platí, že heuristické přístupy jsou navrhovány pro situace, ve kterých exaktní metody selhávají, což je společné většině uvedených prací. V této souvislosti může být zmíněna např. práce [Lu-George-Shekhar, 2005], ve které autoři uvádějí heuristický přístup, jehož cílem je naplánovat pohyb evakuovaných osob tak, aby se minimalizovala maximální doba evakuace. Autoři za účelem řešení tohoto problému formulují ve své práci heuristický algoritmus označovaný jako CCRP (Capacity Constrained Route Planner). Navrhovaný algoritmus pracuje na bázi případné dekompozice skupin osob nacházejících se v jednotlivých zdrojových vrcholech a jejich postupného přesouvání v rámci sítě tak, aby byla dodržena kapacitní omezení jednotlivých vrcholů a hran. Heuristický algoritmus vychází z Dijkstrova algoritmu [Dijkstra, 1959], přičemž modifikace spočívá v zapracování více parametrů optimalizace, kterými jsou čas, kapacita úseků a zohlednění dob průchodů požadavků přes úseky.

K dalším pracím v této oblasti je možno zařadit publikace [Kim-George-Shekhar, 2007] nebo [Özdamar-Yi, 2008].

1.2.2 Přístupy na bázi metaheuristik

Z oblasti aplikací metaheuristik při řešení úlohy o plánování plošné evakuace obyvatelstva je možno zmínit např. publikaci [Kongsomsaksakul-Yang-Chen, 2005].

Uvedená publikace se zaměřuje na regulaci dopravních toků, výběr evakuačních tras a evakuačních středisek pro evakované obyvatelstvo v případě ohrožení povodněmi a využívá k řešení problému genetické algoritmy. Pomocí nich jsou řešeny nelineární modely, jejichž podstata vychází z klasických lokačních úloh, a které mají jako optimalizační kritérium zvolen celkový čas evakuace, jehož hodnota má být v průběhu optimalizačního výpočtu minimalizována. V navrženém genetickém algoritmu jsou aplikovány standardní genetické operátory (reprodukce, křížení a mutace), k omezení přechodů nepřijatelných řešení do dalších generací je využívána penalizační funkce, která penalizuje vypočítanou hodnotu optimalizačního kritéria (v podmínkách genetických algoritmů se používá pojem fitness funkce) v závislosti na nedodržení omezujících podmínek. Za tím účelem je původní optimalizační kritérium z navrženého modelu rozšířeno o další (penalizační) složky, přičemž každá ze složek se vztahuje k jedné skupině strukturálních podmínek v navrženém nelineárním modelu. Protože je hodnota optimalizačního kritéria minimalizována, obě penalizační složky se k této hodnotě přičítají. Každá z penalizačních složek fitness funkce obsahuje penalizační konstantu, jejíž hodnotu volí řešitel v závislosti na tom, jak problematické je nedodržení omezení reprezentovaných jednotlivými skupinami formulovaných strukturálních podmínek. Pro každou podmínku se kvantifikuje hodnota jejího případného nedodržení a tato hodnota je následně násobena výše zmiňovanou penalizační konstantou. Pokud je konkrétní strukturální podmínka splněna, je penalizační pravidlo nastaveno tak, aby se penalizační konstanta do hodnoty fitness funkce nezapočítala.

K dalším pracím v této oblasti je možno zařadit publikaci [Nasri-Bouziri, 2014] využívající metaheuristickou strategii tabu search.

1.3 Přístupy kombinující exaktní modely s heuristickými metodami nebo simulací

Přístupy založené na kombinaci exaktních a simulačních metod zastupuje např. práce [Kimms-Maassen, 2011]. V uvedené práci je možno najít matematický model, přičemž jím navržené řešení je následně prověřováno simulací. V navrženém matematickém modelu je navazováno na dynamický síťový model popsany v [Daganzo, 1993], je tedy využíváno buňkové dekompozice dopravní sítě, což umožňuje zohlednit měnící se počty vozidel na jednotlivých úsecích. Optimalizačním kritériem je opět tzv. riziková funkce, jejíž hodnota je minimalizována. Proměnné modelují proudy vozidel nacházejících se v jednotlivých sektorech v čase. Jak již bylo uvedeno výše, výsledky dosažené matematickým modelem jsou následně podrobeny simulačním experimentům. Základními stavebními prvky simulačního modelu jsou jízdní pruhy na jednotlivých komunikacích, zdroje a cíle proudů vozidel a prvky umožňující slučování a rozdělování proudů (křižovatky). Při modelování počtů odjíždějících vozidel ze zdrojů v čase je využíváno Gama rozdělení pravděpodobnosti. Hodnoty parametrů Gama rozdělení jsou voleny expertním odhadem v závislosti na očekávaném průběhu počtů odjezdů v čase.

K dalším pracím v této oblasti je možno zařadit práce [Baumann, 2007], [Bretschneider-Kimms, 2011], [Bretschneider-Kimms, 2012] a [Kimms-Maassen, 2012].

1.4 Přístupy kombinující exaktní modely s teorií hromadné obsluhy

Další, v pořadí čtvrtou, skupinu přístupů reprezentují přístupy kombinující matematické programování s teorií hromadné obsluhy. Reprezentantem této skupiny přístupů je práce [Stěpanov-Smith, 2009]. Evakuační plán je navržen prostřednictvím multikriteriálního matematického modelu obsahujícího agregované optimalizační kritérium zohledňující ujetou dráhu při evakuaci a dobu evakuace. Obě dílčí složky optimalizačního kritéria jsou násobeny vahami, které určuje řešitel (patrně při spolupráci s odborníkem na evakuační plány). Modelem vypočítané charakteristiky evakuačního procesu jsou následně testovány prostřednictvím adekvátních modelů teorie hromadné obsluhy. Jako adekvátní je zvolen systém hromadné obsluhy nepřipouštějící frontu, přičemž dílčí skupiny obslužných linek jsou tvořeny jednotlivými úseky dopravní sítě a počty linek v dílčích skupinách se odvíjejí od kapacit

komunikací odvozených na základě základní stavové veličiny dopravního proudu (maximálních hustotách dopravních proudů na jednotlivých komunikacích), délek komunikací a počtů jízdních pruhů, které se na nich vyskytují.

1.5 Kombinované přístupy kooperující s geografickými informačními systémy

Poslední skupinu přístupů sloužících k plánování procesu plošné evakuace tvoří kombinované přístupy kooperující s geografickými informačními systémy. Detailněji bude popsán přístup uvedený v práci [Liu-Hatayama-Okada, 2006], který je založen na dynamickém evakuačním algoritmu spolupracujícím s geografickými informačními systémy v případě povodní. Optimalizačním kritériem je celkový spotřebovaný čas při evakuaci. Popisovaný dynamický evakuační algoritmus je založen na pěti krocích. V prvním kroku jsou inicializovány vstupní veličiny, jako jsou parametry dopravní sítě nebo výpočetní čas. Ve druhém kroku jsou vypočítány vzdálenostní a časové hodnoty potřebné pro optimalizační výpočet podle vstupních parametrů dopravní sítě. V této souvislosti je dopravní síť rozdělena na dvě části, tzv. hlavní síť a subsítě. Hlavní sítě se rozumí evakuační cesty vytvořené krizovými orgány, subsítě se rozumí ostatní komunikace v řešené síti. Dále je ve druhém kroku plánován očekávaný pohyb evakuovaného obyvatelstva nacházejícího se v okamžiku vyhlášení evakuace v subsíti po hlavní síti. V závěrečných krocích algoritmu se vyhodnocují výstupní parametry evakuace a počítá se hodnota optimalizačního kritéria. Údaje o dopravní síti jsou získávány z geografického informačního systému DiMSIS (Disaster Management Spatial Information System).

K dalším pracím kombinujícím různé přístupy s geografickými informačními systémy je možno zařadit práce [Cova-Church, 1997], [Saadatseresht-Mansourian-Taleai, 2009], [Bretschneider-Kimms, 2012] a [Kimms-Maassen, 2012].

1.6 Shrnutí poznatků ze zahraničních zdrojů

Z hlediska dopravního zabezpečení plošné evakuace obyvatelstva ze zón havarijního plánování existuje celá řada možných přístupů k řešení problému. Klíčovým úkolem v této souvislosti je určit, které přístupy jsou

vhodné pro jednotlivé případy, které mohou z pohledu plošné evakuace nastat.

Základním kritériem, které, podle názoru autora předložené habilitační práce, rozhoduje o volbě vhodné metody, s pomocí které se bude efektivní plán evakuace navrhovat, je zejména fakt, o jaký typ evakuace se jedná. Z typu evakuace následně vyplyne poznatek, zda se jedná o případy, kdy mají krizové orgány k provedení evakuace dostatek času, či nikoliv.

Co se týče poznatků týkajících se dopravního zabezpečení při plánování plošné evakuace, které byly publikovány v odborné literatuře, je nutno konstatovat, že převážná část typových řešení pomocí operační analýzy uváděných v tuzemské i zahraniční literatuře je vhodná pro plánování dopravního zabezpečení v situacích, kdy jsou mimořádné události naturogenního charakteru, přičemž k provedení evakuace mají krizové orgány dostatek času.

Poznátky týkající se matematického modelování jsou obsaženy především v zahraniční literatuře. Existuje mnoho modelů a přístupů, které byly vytvořeny pro potřeby plošné evakuace. Uplatnění při tom nacházejí především metody matematického programování, teorie grafů, klasické heuristické přístupy a simulační metody, v menším počtu jsou potom zastoupeny evoluční a adaptivní algoritmy, metaheuristické přístupy, genetické algoritmy a teorie hromadné obsluhy. Jako nejčastější optimalizační kritérium se vyskytuje celkový čas potřebný k evakuaci vypočítaný pomocí délky tras a počtů vozidel jedoucích po jednotlivých trasách. V některých přístupech je použito více kritérií, zpravidla agregovaných do jedné účelové funkce.

Co se týče typologie řešených úloh, jedná se především o vytipování tras vhodných pro evakuaci, usměrňování dopravních proudů v hustých sítích typických pro města a městské aglomerace a odstraňování kritických míst na infrastruktuře, přičemž kritickými místy se rozumí místa, ve kterých dochází k interakci dopravních proudů, např. protisměrných dopravních proudů nebo dopravních proudů vyznačujících se vznikem různých typů kolizních situací.

2 Původní výsledky v oblasti návrhu modelů

Habilitační práce obsahuje celkem 6 matematických původních modelů, z nichž 3 jsou jednokriteriální a 3 multikriteriální, přičemž některé z nich mohou být pro potřebu výpočetní části ještě dále upraveny. Primárním kritériem ve všech navržených modelech je kritérium maximální doby preventivní plošné evakuace. Volba uvedeného kritéria umožňuje preferovat při evakuačním procesu rychlost, proto je možno toto kritérium považovat za klíčové.

Podpůrně přistupují k uvedenému kritériu i další kritéria reprezentující hospodárnost a plynulost evakuačního procesu. Hospodárnost procesu evakuace je zohledněna prostřednictvím kritéria využití vozidel, resp. počtu nevyužitých míst. Plynulost procesu evakuace je zohledněna prostřednictvím součtu rozdílů mezi prvními a posledními příjezdy vozidel do evakuovaných obcí. Z povahy obou zformulovaných podpůrných kritérií (počet nevyužitých míst, součet dob mezi prvními a posledními příjezdy vozidel do evakuovaných obcí) je zřejmé, že cílem optimalizace bude hodnoty těchto kritérií minimalizovat.

Společnými znaky všech modelů jsou výskyt optimalizačního kritéria – maximální doby evakuace a výskyt typových skupin omezujících podmínek zajišťujících, že kapacity zdrojů evakuačních vozidel nebudou překročeny, že do každé obce bude přistaven dostatečný počet evakuačních vozidel, že dojde k zachování kontinuit toků vozidel podle typů při příjezdech a odjezdech vozidel do/z evakuovaných obcí a skupinu podmínek, prostřednictvím které bude počítána maximální doba evakuace.

Odlišnosti jednotlivých modelů spočívají v zapracování podpůrných optimalizačních kritérií ať již v samostatné formě nebo v kombinaci s klíčovým optimalizačním kritériem a ve vytvoření vazebních podmínek, které umožňují zvolená podpůrná kritéria při řešení navržených modelů aktivně zapojit do procesu optimalizačních výpočtů.

V následujícím textu bude prezentován jeden z multikriteriálních modelů obsahujících všechna výše uvedená optimalizační kritéria agregovaná do jediné účelové funkce.

2.1 Formulace problému

Je dána zóna havarijního plánování, v níž je definována množina evakuovaných obcí K , přičemž u každé evakuované obce $k \in K$ je definován požadavek na počet míst v autobusech b_k , která jsou potřebná k přepravě evakuovaného obyvatelstva z dané obce. Dále je mimo zónu havarijního plánování definována množina evakuačních středisek L ,

přičemž pro každé evakuační středisko $l \in L$ je definována jeho kapacita v počtu přijímaných obyvatel označená symbolem q_l . Kromě toho je definována množina typů vozidel určených k evakuaci obyvatelstva I , pro každý typ vozidla $i \in I$ je definována jeho kapacita c_i a množina výchozích stanišť J těchto vozidel, přičemž pro každé stanoviště $j \in J$ je znám disponibilní počet vozidel typu $i \in I$, který označme např. a_{ij} . Dále jsou k dispozici matice dob jízd vozidel T_1 , ve které prvek t_{1jk} reprezentuje dobu potřebnou k jízdě mezi výchozím stanovištěm $j \in J$ a evakuovanou obcí $k \in K$ a matice dob jízd vozidel T_2 , ve které prvek t_{2kl} reprezentuje dobu potřebnou k jízdě mezi evakuovanou obcí $k \in K$ a evakuačním střediskem $l \in L$. Na základě řešení úlohy má být určeno přiřazení evakuovaných obcí evakuačním střediskům tak, aby maximální doba potřebná k realizaci evakuace (doba od vyhlášení evakuace do okamžiku příjezdu posledního vozidla do určeného evakuačního střediska) byla minimální. Stejně tak je vyžadováno, aby celkový počet nevyužitých míst ve vozidlech odjíždějících z evakuovaných obcí byl minimální a dále, aby se minimalizoval součet časů mezi příjezdy prvních a posledních vozidel do evakuovaných obcí.

2.2 Návrh matematického modelu

Za účelem modelování rozhodnutí zavedeme do úlohy osm skupin proměnných. První skupina proměnných bude tvořena proměnnými x_{ijk} s definičním oborem, kterým je množina celých nezáporných čísel, přičemž proměnná modeluje počet vozidel typu $i \in I$ jedoucích ze stanoviště $j \in J$ do evakuované obce $k \in K$. Druhá skupina proměnných bude tvořena proměnnými y_{ikl} s definičním oborem, kterým je opět množina celých nezáporných čísel, přičemž proměnná modeluje počet vozidel typu $i \in I$ jedoucích z evakuované obce $k \in K$ do evakuačního střediska $l \in L$. Třetí skupina proměnných bude tvořena pomocnými bivalentními proměnnými w_{jk} modelujícími rozhodnutí o jízdě vozidel ze stanoviště $j \in J$ do evakuované obce $k \in K$. Bude-li ve výsledném řešení proměnná $w_{jk} = 1$, dojde k ovlivnění hodnoty h hodnotou t_{1jk} , bude-li ve výsledném řešení proměnná $w_{jk} = 0$, bude to znamenat opak. Čtvrtou skupinu budou tvořit bivalentní proměnné z_{kl} modelující rozhodnutí o jízdě vozidel z evakuované obce $k \in K$ do evakuačního střediska $l \in L$. Bude-li

ve výsledném řešení platit $z_{kl}=1$, bude evakuovaná obec $k \in K$ přiřazena evakuačnímu středisku $l \in L$ a dojde k ovlivnění hodnoty h hodnotou t_{2kl} , bude-li ve výsledném řešení platit $z_{kl}=0$, bude to znamenat opak. Pátou skupinu proměnných opět bude tvořit pouze jediná proměnná h , jejímž definičním oborem bude množina nezáporných čísel. Hodnota nezáporné proměnné h bude po vyřešení modelu reprezentovat dobu, ve které bude možno evakuaci od jejího vyhlášení realizovat. Šestá skupina proměnných r_k pro $k \in K$ s definičním oborem množinou celých nezáporných čísel bude modelovat počet volných míst při odjezdu vozidel z evakuované obce. Poslední dvě skupiny s definičními obory – množinami nezáporných čísel budou modelovat první a poslední časy příjezdů vozidel do jednotlivých obcí. Proměnná D_k bude omezovat časy příjezdů vozidel do obce $k \in K$ zdola (půjde tedy o čas příjezdu prvního vozidla do dané obce), proměnná H_k bude omezovat časy příjezdů vozidel do obce $k \in K$ shora.

Obecný tvar matematického modelu bude následující:

$$\min f(x, y, w, z, h, r, H, D) = v_1 h + v_2 \sum_{k \in K} r_k + v_3 \sum_{k \in K} (H_k - D_k) \quad (1)$$

za podmínek:

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} \leq a_{ij} \quad \text{pro } i \in I \text{ a } j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_i x_{ijk} = b_k + r_k \quad \text{pro } k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijk} = \sum_{l \in L} y_{ikl} \quad \text{pro } i \in I \text{ a } k \in K \quad (4)$$

$$x_{ijk} \leq T w_{jk} \quad \text{pro } i \in I, j \in J \text{ a } k \in K \quad (5)$$

$$y_{ikl} \leq T z_{kl} \quad \text{pro } i \in I, k \in K \text{ a } l \in L \quad (6)$$

$$\sum_{l \in L} z_{kl} = 1 \quad \text{pro } k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} (b_k + d_k) z_{kl} \leq q_l \quad \text{pro } l \in L \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
t_{1jk}w_{jk} + t_{2kl}z_{kl} &\leq h && \text{pro } j \in J, k \in K \text{ a } l \in L && (9) \\
D_k - T(1 - w_{jk}) &\leq t_{1jk}w_{jk} && \text{pro } j \in J \text{ a } k \in K && (10) \\
t_{1jk}w_{jk} &\leq H_k && \text{pro } j \in J \text{ a } k \in K && (11) \\
x_{ijk} &\in Z_0^+ && \text{pro } i \in I, j \in J \text{ a } k \in K && (12) \\
y_{ikl} &\in Z_0^+ && \text{pro } i \in I, k \in K \text{ a } l \in L && (13) \\
w_{jk} &\in \{0;1\} && \text{pro } j \in J \text{ a } k \in K && (14) \\
z_{kl} &\in \{0;1\} && \text{pro } k \in K \text{ a } l \in L && (15) \\
h &\geq 0 && && (16) \\
r_k &\geq 0 && \text{pro } k \in K && (17) \\
H_k &\geq 0 && \text{pro } k \in K && (18) \\
D_k &\geq 0 && \text{pro } k \in K && (19)
\end{aligned}$$

Symbole v_1, \dots, v_3 reprezentují váhy jednotlivých složek globálního optimalizačního kritéria, symbol Z_0^+ reprezentuje množinu nezáporných celých čísel.

Funkce (1) reprezentuje globální optimalizační kritérium, jehož hodnota je minimalizována. Optimalizační kritérium je složeno ze tří složek. První složka reprezentuje maximální dobu evakuace, druhá složka celkový počet nevyužitých míst ve vozidlech odjíždějících z evakuovaných obcí a třetí složka celkovou dobu, která uplyne mezi příjezdy prvních a posledních vozidel z evakuovaných obcí. Vynásobením jednotlivých složek optimalizačního kritéria váhami dosáhneme variabilní podobu účelové funkce, která umožňuje řešit jak jednokriteriální úlohy (v těchto případech vždy jedna z vah bude rovna 1, zbývající hodnoty vah budou nulové) tak i multikriteriální formy. Pokud se v úloze vyskytuje homogenní vozidlový park z hlediska kapacity, pozbývá druhá složka optimalizačního kritéria významu, neboť celkový počet nevyužitých míst ve vozidlech je stále stejný. Skupina omezujících podmínek (2) zajistí, že kapacity zdrojových míst podle jednotlivých typů vozidel nebudou překročeny, skupina omezujících podmínek (3) zajišťuje, že k evakuaci bude použit dostatečný počet vozidel a současně vytváří vazbu na druhou složku optimalizačního kritéria. Skupina omezujících podmínek (4) zajišťuje kontinuitu toků vozidel v evakuovaných obcích podle jednotlivých typů. Skupiny vazebních podmínek (5) a (6) inicializují hodnoty proměnných sloužících ke kvantifikaci dob evakuace obyvatelstva z jednotlivých obcí včetně maximální doby evakuace. Skupina omezujících podmínek (7)

zajišťuje, že obyvatelstvo každé obce bude přiřazeno právě jednomu evakuačnímu středisku, skupina omezujících podmínek (8) dále zajišťuje, že kapacity evakuačních středisek nebudou překročeny. Skupina omezujících podmínek (9) zajišťuje kvantifikaci dob evakuace (včetně maximální doby evakuace), skupiny omezujících podmínek (10) a (11) pak vytvářejí vazby na poslední složku optimalizačního kritéria. Skupiny omezujících podmínek (12) – (19) vymezují definiční obory proměnných použitých v matematickém modelu.

3 Výpočetní experimenty s navrženými modely

Výpočetní experimenty s navrženými modely byly provedeny v podmínkách konkrétní zóny havarijního plánování vymezené v okolí Jaderné elektrárny Dukovany.

V uvedeném typu zón však při realizaci evakuačního procesu platí určitá technologická specifika, která mají zásadní vliv na tvorbu evakuačních plánů, ať již je použito přístupů na bázi matematické optimalizace či nikoliv. V první řadě je zapotřebí v rámci technologie obsluhy území zmínit všechny důležité milníky evakuačního procesu, které je nutno v rámci plánování akceptovat.

3.1 Popis evakuačních specifík platných pro zónu havarijního plánování vymezenou v okolí Jaderné elektrárny Dukovany

Ze zásad uvedených v aktuálně platném vnějším havarijním plánu vyplývá, že před odjezdem hromadného dopravního prostředku do místa na území zóny havarijního plánování, jehož evakuace má být provedena, je nutno řidiče vybavit ochrannými prostředky, dozimetrem, kartou s uvedením evakuovaného místa a popisem evakuační trasy. Dále musí být každý řidič poučen a musí podepsat formulář *„Poučení a souhlas příslušníka nebo fyzické osoby s provedením zásahu při mimořádné události na Jaderné elektrárně Dukovany spojené s únikem radiačních látek“*. Za tím účelem musí být každým hromadným dopravním prostředkem před odjezdem na území zóny havarijního plánování nejdříve provedena jízda do určeného místa (zpravidla garáže nebo stanice integrovaného záchranného systému), kde k vybavení řidiče všemi potřebnými pomůckami a jeho poučení dojde.

V dalším postupu je nutno realizovat jízdu do evakuovaného místa, zabezpečit nástup evakuovaného obyvatelstva a realizovat jízdu z evakuované obce vně ohroženého území. Aby nedocházelo ke vzniku nežádoucích interakcí mezi dopravními proudy směřujícími dovnitř a vně zónu havarijního plánování nebo aby k nim docházelo pouze v nezbytně nutné míře, definují se v těchto zónách oddělené trasy.

Z pohledu modelování sledovaných procesů jsou důležité zejména skutečnosti týkající se koncentrace hromadných dopravních prostředků před odjezdem na území zóny havarijního plánování v několika místech (provoznách dopravců) a následná regulace jejich pohybu po území zóny. Protože je do jisté míry pohyb dopravních prostředků regulován, je nutno výše sestavené obecné modely vhodně modifikovat.

Proces evakuace obyvatelstva po nástupu do přistavených vozidel prochází několika dílčími etapami. První etapou je přeprava z evakuované obce po evakuační trase do bodu umístěného na hranici evakuovaného sektoru (výstupní místa) a druhou etapou je přeprava z těchto výstupních míst do evakuačních středisek. Protože etapa přepravy z evakuované obce až do výstupních míst je determinována, je z pohledu rozhodování a tedy i modelování důležitá až druhá etapa, a to etapa přepravy z výstupních míst do evakuačních středisek. Uvedená úloha je však od úlohy, v níž se rozhoduje o jízdě vozidel mezi výchozími stanovišti a evakuovanými obcemi, zcela separována, proto není zapotřebí řešit modely v původních rozsazích, např. model uvedený v předchozí kapitole.

Model z předchozí kapitoly je tedy možno nahradit dvojicí nových (izolovaných) modelů, pro první fázi evakuace (fáze jízdy vozidel do evakuovaných obcí) a pro druhou fázi evakuace (z hranice evakuovaného území do evakuačních středisek).

Model (1) – (19) přejde pro první fázi evakuace do tvaru:

$$\min f(x, y, w, z, h, r, H, D) = v_1 h + v_2 \sum_{k \in K} r_k + v_3 \sum_{k \in K} (H_k - D_k) \quad (20)$$

za podmíněk:

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} \leq a_{ij} \quad \text{pro } i \in I \text{ a } j \in J \quad (21)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_i x_{ijk} = b_k + r_k \quad \text{pro } k \in K \quad (22)$$

$$x_{ijk} \leq T w_{jk} \quad \text{pro } i \in I, j \in J \text{ a } k \in K \quad (23)$$

$$t_{1jk} w_{jk} + t_{2k} \leq h \quad \text{pro } j \in J, k \in K \text{ a } l \in L \quad (24)$$

$$D_k - T(1 - w_{jk}) \leq t_{1jk} w_{jk} \quad \text{pro } j \in J \text{ a } k \in K \quad (25)$$

$$t_{1jk} w_{jk} \leq H_k \quad \text{pro } j \in J \text{ a } k \in K \quad (26)$$

$$x_{ijk} \in Z_0^+ \quad \text{pro } i \in I, j \in J \text{ a } k \in K \quad (27)$$

$$w_{jk} \in \{0, 1\} \quad \text{pro } j \in J \text{ a } k \in K \quad (28)$$

$$h \geq 0 \quad (29)$$

$$r_k \geq 0 \quad \text{pro } k \in K \quad (30)$$

$$H_k \geq 0 \quad \text{pro } k \in K \quad (31)$$

$$D_k \geq 0 \quad \text{pro } k \in K \quad (32)$$

Význam funkce (20) věcně koresponduje s významem funkce (1). Skupina omezujících podmínek (21) věcně koresponduje se skupinou (2), skupina omezujících podmínek (22) se skupinou (3), skupina omezujících podmínek (23) se skupinou (5) a skupina omezujících podmínek (24) se skupinou (9). Ve skupině omezujících podmínek (24) se na levé straně ve druhém sčítanci objevuje pouze výraz t_{2k} , který reprezentuje dobu jízdy z obce $k \in K$ po nařízené trase do místa na dopravní síti, ve kterém končí evakuovaná zóna. Skupiny omezujících podmínek (25) a (26) věcně korespondují se skupinami (10) a (11) a skupiny omezujících podmínek (27) – (32) se skupinami (12) – (19).

V následujícím textu bude zformulováno obecné zadání pro druhou fázi evakuace, tedy část evakuačního procesu mezi zvolenými výstupními místy a evakuačními středisky. Je dána množina výstupních míst MSO a množina evakuačních středisek L . Pro každé výstupní místo $i \in MSO$ je znám počet obyvatel e_i , kteří prostřednictvím něj opouštějí zónu havarijního plánování. Pro každé evakuační středisko $l \in L$ je známa jeho kapacita q_l (předpokládá se, že kapacity jednotlivých evakuačních středisek jsou dostatečné). Pro každou relaci z výstupního místa $i \in MSO$ do evakuačního střediska $l \in L$ jsou známy náklady n_{il} na přejezd všech vozidel realizujících evakuaci s dopravním zabezpečením. Úkolem je přiřadit jednotlivá výstupní místa evakuačním střediskům tak, aby celkové náklady na přejezdy nasazených vozidel byly minimální.

Matematický model pro úlohu řešenou ve druhé fázi evakuace, tj. organizaci přepravy mezi výstupními místy a evakuačními středisky má tvar:

$$\min f(u) = \sum_{i \in MSO} \sum_{l \in L} n_{il} u_{il} \quad (33)$$

za podmínek:

$$\sum_{l \in L} u_{il} = 1 \quad \text{pro } i \in MSO \quad (34)$$

$$\sum_{i \in MSO} e_i u_{il} \leq q_l \quad \text{pro } l \in L \quad (35)$$

$$u_{il} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in MSO \text{ a } l \in L \quad (36)$$

Funkce (33) reprezentuje optimalizační kritérium pro druhou fázi plánování, skupina omezujících podmínek (34) zajistí přiřazení každého

výstupního místa právě jednomu evakuačnímu středisku, skupina omezujících podmínek (35) zajistí, že kapacita žádného z evakuačních středisek nebude překročena. Skupina omezujících podmínek (36) je tvořena obligatorními podmínkami proměnných použitých v modelu.

Počty obyvatel evakuujících se samoevakuací i evakuovaných s dopravním zajištěním jsou známy, zbývá uvést způsob výpočtu nákladů plynoucích z přiřazení výstupních míst evakuačnímu středisku, jejichž znalost vyžaduje navržená účelová funkce. V první řadě je nutno zdůraznit, že za náklady plynoucí z přiřazení jsou považovány náklady vzniklé součtem dopravních nákladů za všechna vozidla použítá pouze pro evakuaci s dopravním zajištěním. Uvedené náklady jsou hrazeny z veřejných rozpočtů, nezapočítávají se tedy do nich náklady na samoevakuaci, které vznikají fyzickým osobám.

V případě homogenity vozidlového parku získáme po vyřešení první fáze úlohy počty vozidel, které do jednotlivých obcí za účelem evakuace přijedou, čímž jsme následně, při znalosti tras mezi výstupními místy a evakuačními středisky, schopni vypočítat i dopravní náklady plynoucí z jejich jízdy v daných relacích. V případě heterogenity vozidlového parku je postup analogický, s tím rozdílem, že vyřešením první fáze úlohy nejsou pouze počty vozidel, které je nutno do evakuovaných obcí přistavit, ale paralelně z výsledků řešeného modelu jsou k dispozici také informace o skladbě vozidlového parku včetně kvantifikace vozidel ve skupinách vozidel podle jednotlivých typů. Je-li k dispozici skladba vozidlového parku a jsou-li známy počty vozidel podle jednotlivých typů, opět není problematické vypočítat kumulativní dopravní náklady (náklady plynoucí z přiřazení) pro jednotlivé trasy vedoucí mezi výstupními místy a evakuačními středisky.

3.2 Charakteristika výpočetních experimentů

Evakuační plán obyvatelstva z řešené zóny havarijního plánování je součástí tzv. Vnějšího havarijního plánu zóny havarijního plánování Jaderné elektrárny Dukovany. Plánuje se evakuace jak v tzv. předúnikové fázi radiační havárie, tzn. před průchodem radiačního oblaku, nebo v poučkové fázi radiační havárie, tzn. po průchodu radiačního oblaku. Preventivní plošnou evakuaci se bude rozumět evakuace prováděná v předúnikové fázi radiační havárie.

Z hlediska plánování evakuace v zóně havarijního plánování Jaderné elektrárny Dukovany je důležitá informace o zřízení tří ochranných pásem v okolí elektrárny – středového, vnitřního a vnějšího evakuačního pásma. Podle [Výpis] je evakuace obyvatelstva podrobně plánována a připravována pro středové a vnitřní pásmo, přesněji řečeno, v případě preventivní plošné

evakuace je uvažováno s evakuací obyvatelstva ze všech obcí ležících ve středovém pásnu; z vnitřního pásma se obyvatelstvo z obcí evakuuje vždy v případě pěti ze šestnácti segmentů, které leží ve směru aktuálního směru větru za objektem jaderné elektrárny.

Experimenty byly provedeny pro situaci znázorněnou na obr. č. 1.



Obr. č. 1: Schéma evakuovaného území s vyznačením evakuačních a zásahových tras Zdroj: [Příručka]

Z obrázku jsou zřejmá jednotlivá pásma a jedna z variant evakuační situace při západno-severozápadním směru větru (evakuované území je znázorněno bílou barvou). Kromě toho jsou z obrázku zřejmé také zásahové trasy (znázorněné zvýrazněnými hranami) a evakuační trasy (znázorněné méně výrazněnými hranami).

Protože se území zóny havarijního plánování nachází na území dvou krajů, probíhá případná evakuace samostatně odděleně v rámci jednotlivých krajů. Podle evakuačního plánu Jihomoravského kraje se v případě zvoleného území evakuují obce Horní Dubňany, Rešice a jejich místní část Kordula. Podle evakuačního plánu Kraje Vysočina se ze středového pásma budou evakuovat obce Dukovany, Mohelno, Slavětice a Rouchovany včetně místní části Šemíkovice a z vnitřního pásma se budou evakuovat obce Bačice, Dalešice, Hrotovice, Kramolín, Krhov, Litovany, Popůvky, Přešovice, Račice, Sedlec a Stropěšín. Matematické modely byly aplikovány na podmínky evakuačního plánu Kraje Vysočina, protože počet evakuovaných míst je vyšší a lze tedy očekávat větší výpočetní komplikace při procesu řešení navržených modelů. Předmětem realizovaných

experimentů byl pouze matematický model (20) – (32), neboť v případě modelu platného pro druhou fázi evakuace, tj. modelu (33) – (36) se výpočetní komplikace neočekávají.

V rámci všech výpočetních experimentů je uvažováno, že evakuující vozidla vždy projíždějí lokalitou Třebíč, kde je umístěno provozní zázemí pro autobusy příměstské dopravy zajišťující evakuaci, a kde probíhá předání všech potřebných pomůcek řidičům a jejich poučení před odjezdem na území zóny.

Pro evakuaci obyvatelstva byl k dispozici 1 typ autobusů s kapacitou $c = 45$ míst, což umožňuje další redukci matematického modelu (20) – (32) v tom smyslu, že se druhá složka optimalizačního kritéria stává nadbytečnou a zároveň lze z modelu eliminovat množinu typů vozidel $i \in I$ a tedy i snížit počet indexů u proměnných reprezentujících toky vozidel mezi výchozími stanovišti a evakuovanými obcemi. Pro potřeby výpočetních experimentů bude předpokládána největší územní rozptýlenost vozidel, jak je zcela běžné např. pro dopravce zajišťující příměstskou autobusovou dopravu. Počet výchozích stanovišť odpovídal počtu vozidel, která byla k provedení evakuace zapotřebí, tzn., v každém výchozím stanovišti bylo k dispozici pouze jedno vozidlo. I tento modelový předpoklad umožní dobře testovat řešitelnost navržených modelů, neboť zvolená forma územní rozptýlenosti vozidel umožňuje zavést do úlohy maximální počet proměnných.

V každé evakuované obci bylo pro zjednodušení plánováno 1 místo – shromaždiště nacházející se v centru obce (pokud by existovalo v některé z obcí více shromaždišť, je možno je považovat za samostatná evakuační místa). Pokud se v obci nachází jedno nebo více školních zařízení s různou lokalizací, či jiné objekty (ústavy sociální péče apod.) je uvažováno, že uvedená zařízení jsou také samostatnými shromaždišti. Pro každou evakuovanou obec na území zóny je známa trasa, po které evakuace po nástupu obyvatelstva do autobusů (ale též samoevakuace) probíhá.

3.3 Popis průběhu výpočetních experimentů a přehled dosažených výsledků

Výpočetní experimenty byly zahájeny s modelem obsahujícím agregovanou účelovou funkci (20) s vynechanou druhou složkou. Průběh úvodních experimentů však ukázal, že největší komplikace při řešení modelu způsobuje požadavek na plynulost evakuace, vyjádřený v modelu prostřednictvím proměnných H_k a D_k , resp. součtu rozdílů těchto hodnot. Komplikace nastávaly především z hlediska nároků na dobu výpočtu. K eliminaci uvedených komplikací nedošlo ani v situaci, kdy byl model

řešení jako jednokriteriální s účelovou funkcí obsahující pouze třetí složku. Z uvedeného důvodu bylo částečně upuštěno od testování modelů obsahujících složku charakterizující plynulost procesu s tím, že požadavek na plynulost evakuace bude zajištěn především formou omezujících podmínek a to tak, že časový interval mezi příjezdy prvního a posledního vozidla nesmí přesáhnout předem definovanou hodnotu označenou výše v textu symbolem VPI . V rámci realizovaných výpočtů bylo provedeno šest skupin výpočetních experimentů. Uvedené skupiny experimentů v habilitační práci nesou pracovní označení 17/120/1, 17/120/2, 17/120/3, 25/146/1, 25/146/2 a 25/146/3. První číslice reprezentuje počet evakuovaných obcí, druhá číslice počet vozidel nasazených k zabezpečení evakuačního procesu (počet výchozích míst vozidel) a poslední číslice reprezentují časové intervaly vyjádřené v minutách, ve kterých vozidla odjíždějí na evakuované území po provedení nezbytných úkonů před odjezdem. Maximální doba optimalizačního výpočtu byla nastavena na hodnotě 1 800 s. Realizované výpočetní experimenty prokázaly logickou správnost matematických modelů navržených v habilitační práci. Byla-li v matematických modelech optimalizována pouze hodnota maximální doby evakuace, která je nejdůležitějším kritériem z pohledu evakuačního procesu, a nepřihlíželo-li se k požadavku na plynulost evakuace (požadavek na maximalizaci plynulosti evakuace byl v hierarchii optimalizačních kritérií zařazen až na třetí - poslední místo), potom při řešení modelů nevznikaly zásadnější komplikace z pohledu doby výpočtu.

Optimalizace plynulosti procesu evakuace prostřednictvím neomezování hodnot intervalů mezi příjezdy prvních a posledních autobusů do daných obcí a současným požadavkem na minimalizaci hodnoty součtu těchto hodnot v účelové funkci se ukázala jako neefektivní, protože nejenže se žádný optimalizační výpočet realizovaný na PC s procesorem INTEL PENTIUM 4 CPU 3,20 GHz a 1 GB RAM při uplatnění daného požadavku nepodařilo v době 1 800 s úspěšně ukončit, ale v této době nebylo nalezeno ani jedno přípustné řešení. Z uvedeného důvodu nebylo možno při výpočetních experimentech využít ani přístup založený na postupné optimalizaci podle jednotlivých kritérií a ani přístup na bázi metody STEM.

Výpočty experimentující s hodnotou VPI byly zahájeny tím, že v soustavě omezujících podmínek byly hodnoty VPI nastaveny na minimálních možných hodnotách. Uvedené hodnoty jsou snadno zjištělné, protože k jejich výpočtu postačuje znát pouze počet vozidel, která mají evakuaci z daného místa zabezpečit a hodnotu intervalu, ve kterém vozidla odjíždějí z místa převzetí ochranných pomůcek a poučení řidičů. Jak se však ukázalo, ani tento přístup neumožňoval optimalizační výpočty v čase 1 800 s úspěšně ukončit. Z uvedeného důvodu byla tedy

zvolena cesta prostřednictvím nastavení stejné hodnoty VPI na akceptovatelné úrovni pro všechna evakuovaná místa, byť se tato hodnota z pohledu obcí s výraznějšími rozdíly v počtech evakuovaných obyvatel nemusí na první pohled jevit jako „spravedlivá“.

Výsledky výpočetních experimentů z hlediska maximálních hodnot dob evakuace jsou shrnuty v tab. č. 1–3. Výsledky výpočetních experimentů z hlediska plynulosti vyjádřené výrazem $\sum_{k \in K} (H_k - D_k)$ jsou potom shrnuty

v tab. č. 4–6. Doby výpočtů v závislosti na počtech evakuovaných míst, zvolených hodnotách m a VPI jsou shrnuty v tab. č. 7–9.

Zkratka Nf (No feasible) v uvedených tabulkách znamená, že množina přípustných řešení je prázdná. Je-li v poli tabulky uvedeno číslo 1 800, znamená to, že běh optimalizačního výpočtu byl zastaven po překročení hranice 1 800 s, přičemž samotný optimalizační výpočet do této doby ještě nebyl ukončen. Vyskytuje-li se v tabulce symbol 1 800 v kombinaci se symbolem Ns, znamená to, že v průběhu doby výpočtu, která byla ukončena krátce po uplynutí 1 800 s, nebylo nalezeno žádné přípustné řešení.

Sloupce v uvedených tabulkách s označením Min obsahují výsledky výpočetních experimentů v situacích, kdy je pro každé evakuované místo vyžadována maximální plynulost, tzn., vozidla do jednotlivých obcí odjíždějí s časovými odstupy ve výši m (tzn., že vozidla odjíždějí do jednotlivých obcí ve skupinách s časovým rozestupem m).

Sloupce s označením ∞ obsahují výsledky výpočetních experimentů, ve kterých byla minimalizována maximální doba evakuace a do soustavy omezujících podmínek modelu nebyly zahrnuty omezující podmínky týkající se VPI . Sloupce v uvedených tabulkách s označením ∞/Min obsahují výsledky výpočetních experimentů, ve kterých byla minimalizována agregovaná účelová funkce minimalizující maximální dobu evakuace a současně maximalizující plynulost tohoto procesu.

Tabulka č. 1 – Hodnoty maximálních dob evakuace v [min] v závislosti na počtu evakuovaných míst a hodnotách VPI při $m = 1$

Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	25	30	35	45	60
17	184	184	184	184	184
25	204	204	204	204	204
Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	75	90	Min	∞	∞ /Min
17	184	184	1800/Ns	184	186
25	204	204	1800/Ns	204	208

Tabulka č. 2 – Hodnoty maximálních dob evakuace v [min] v závislosti na počtu evakuovaných míst a hodnotách VPI při $m = 2$

Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	25	30	35	45	60
17	Nf	Nf	Nf	Nf	301
25	Nf	Nf	Nf	Nf	348
Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	75	90	Min	∞	∞ /Min
17	301	301	1800/Ns	301	303
25	348	348	1800/Ns	348	350

Tabulka č. 3 – Hodnoty maximálních dob evakuace v [min] v závislosti na počtu evakuovaných míst a hodnotách VPI při $m = 3$

Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	25	30	35	45	60
17	Nf	Nf	Nf	Nf	Nf
25	Nf	Nf	Nf	Nf	Nf
Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	75	90	Min	∞	∞ /Min
17	418	418	1800/Ns	418	421
25	492	492	1800/Ns	492	495

Tabulka č. 4 – Plynulost procesu evakuace v [min] v závislosti na počtu evakuovaných míst a hodnotách VPI při $m = 1$

Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	25	30	35	45	60
17	425	510	595	765	1020
25	625	750	875	1125	1500
Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	75	90	Min	∞	∞/Min
17	1275	1530	1800/Ns	2618	1006
25	1875	2250	1800/Ns	4550	1488

Tabulka č. 5 – Plynulost procesu evakuace v [min] v závislosti na počtu evakuovaných míst a hodnotách VPI při $m = 2$

Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	25	30	35	45	60
17	Nf	Nf	Nf	Nf	1020
25	Nf	Nf	Nf	Nf	1500
Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	75	90	Min	∞	∞/Min
17	1275	1530	1800/Ns	4540	2144
25	1875	2250	1800/Ns	7412	3692

Tabulka č. 6 – Plynulost procesu evakuace v [min] v závislosti na počtu evakuovaných míst a hodnotách VPI při $m = 3$

Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	25	30	35	45	60
17	Nf	Nf	Nf	Nf	Nf
25	Nf	Nf	Nf	Nf	Nf
Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	75	90	Min	∞	∞/Min
17	1275	1530	1800/Ns	6212	3119
25	1875	2250	1800/Ns	10546	5844

Tabulka č. 7 – Doby výpočtů v [s] v závislosti na počtu evakuovaných míst a hodnotách VPI při $m=1$

Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	25	30	35	45	60
17	98	56,7	53,5	34,6	25
25	702,5	157,8	142,2	110,1	63,7
Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	75	90	Min	∞	∞ /Min
17	17	14,1	1 800/Ns	17,9	1800
25	46,4	35,6	1 800/Ns	46,2	1800

Tabulka č. 8 – Doby výpočtů v [s] v závislosti na počtu evakuovaných míst a hodnotách VPI při $m=2$

Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	25	30	35	45	60
17	Nf	Nf	Nf	Nf	65,1
25	Nf	Nf	Nf	Nf	249,2
Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	75	90	Min	∞	∞ /Min
17	58,4	53,4	1800/Ns	1,3	1800
25	491,6	148,9	1800/Ns	10,7	1800

Tabulka č. 9 – Doby výpočtů v [s] v závislosti na počtu evakuovaných míst a hodnotách VPI při $m=3$

Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	25	30	35	45	60
17	Nf	Nf	Nf	Nf	Nf
25	Nf	Nf	Nf	Nf	Nf
Hodnoty VPI [min] Počet evakuovaných míst	75	90	Min	∞	∞ /Min
17	123,6	79,1	1 800/Ns	2,2	1 800
25	2091,7	391,6	1 800/Ns	12,7	1 800

Jak je z tab. č. 7–9 patrné, potvrdila se očekávaná skutečnost, že výpočty se stávají náročnějšími na výpočetní čas s rostoucím počtem evakuovaných míst a rostoucím počtem vozidel potřebných k provedení evakuace, jejichž logickými příčinami jsou zvýšení počtů proměnných modelujících klíčová rozhodnutí, logických vazeb mezi proměnnými a počtů omezujících podmínek v navržených modelech.

Jak je však z dosažených výsledků dále patrné, experimentování s hodnotami m a VPI (tzn. hodnotami intervalů mezi odjezdy autobusů do zóny havarijního plánování z místa převzetí ochranných pomůcek a poučení řidičů a hodnotami požadované úrovně plynulosti procesu evakuace) prokázalo citlivost dob výpočtů i na těchto hodnotách. Dosažené výsledky ukazují, že doby výpočtů narůstaly s rostoucími hodnotami m a VPI .

4 Závěry

Věcnou náplní předložené publikace bylo poukázat na optimalizační přístupy využitelné k plánování preventivní plošné evakuace obyvatelstva. Požadavek na evakuaci vyvstává v situacích, když dochází ke krizové události ve zdroji nebezpečí (průmyslový podnik, jaderná elektrárna), kolem kterého je zóna vymezena. Plošná evakuace probíhá individuální automobilovou dopravou a hromadnými dopravními prostředky (zpravidla autobusy). Publikace se věnuje modelům, které vytvářejí efektivní evakuační plán pro hromadné dopravní prostředky. Dosažené výsledky definují postup evakuace – plánují trasy konkrétních autobusů na území zóny. Navržené matematické modely umožňují, aby plošná evakuace probíhala rychle, hospodárně a při předepsané kvantifikované hodnotě plynulosti. Při existenci odhadu doby, která je k provedení evakuace k dispozici, také výsledky existujících modelů umožňují zjistit, zda je preventivní evakuace realizovatelná či nikoliv. Pokud se v důsledku porovnání doby potřebné k provedení evakuace a doby, která je pro provedení evakuačního procesu k dispozici, zjistí, že preventivní evakuace není realizovatelná, je obyvatelstvu nařízeno ukrytí a evakuace proběhne až po odeznění nepříznivých účinků mimořádné události, které realizaci evakuace vylučují.

Na rozdíl od všech existujících publikací prezentovaných v této práci jsou optimalizační kritéria formulována odlišným způsobem. Rychlost evakuace není hodnocena podle součtu dob přepravy (jako ve většině publikačních zdrojů), ale s využitím maximální doby evakuace, která je minimalizována. V práci jsou rovněž zavedeny nové způsoby formulací i dalších kritérií. Hospodárnost je posuzována podle počtu míst, která jsou nevyužita v hromadných dopravních prostředcích. V matematických modelech je také kvantifikována plynulost evakuačního procesu. Plynulost je posuzována vždy v konkrétním evakuovaném místě a je reprezentována jako celková doba, která uplyne mezi příjezdem prvního a posledního autobusu do tohoto evakuovaného místa.

Navržené modely mohou být použity pro homogenní vozidlový park i pro nehomogenní vozidlový park.

Funkčnost a praktická uplatnitelnost vybraných typů navržených matematických modelů byla v publikaci dokumentována prostřednictvím výpočetních experimentů na úloze reálného rozsahu. Pro výpočetní experimenty byla vybrána zóna havarijního plánování definovaná kolem Jaderné elektrárny Dukovany.

Výsledky výpočetních experimentů potvrzují dobrou řešitelnost matematických modelů, ve kterých je minimalizována maximální doba evakuace a akceptovatelná plynulost evakuace je zajištěna prostřednictvím

omezujících podmínek. Když je požadavek na plynulost plošné evakuace zahrnut do účelové funkce, vznikají komplikace při řešení matematických modelů. Výpočetní doba potřebná pro dosažení optimálního řešení významně narůstá. Když byla v modelu maximalizována pouze plynulost evakuace, nepodařilo se v čase 1 800 s najít ani jedno přípustné řešení.

V rámci realizovaných výpočetních experimentů byla pozornost věnována nejen schopnosti optimalizačního software dořešit navržené modely do úspěšného konce (nalezení a potvrzení optimálního řešení), ale také otázkám výpočetní náročnosti úlohy měřené dobou výpočtu.

Ukázalo se, že doba výpočtu závisí na počtu evakuovaných míst, počtu vozidel potřebných k evakuaci, požadované úrovni plynulosti a velikosti intervalu mezi odjezdy vozidel do zóny havarijního plánování. Podařilo se tedy zjistit parametry, které výrazně ovlivňují řešitelnost navržených modelů.

I přes narůstající doby výpočtů výsledky zřetelně ukazují, že optimální hodnoty klíčového optimalizačního kritéria (maximální doby evakuace) je možno v podmínkách největšího počtu evakuovaných míst v zóně havarijního plánování vymezené kolem Jaderné elektrárny Dukovany a při akceptovatelných hodnotách plynulosti procesu evakuace dosáhnout v relativně krátkém čase.

Navržené modely byly testovány na případě části území vykazující „nejnepříznivější parametry“ z hlediska očekávaného rozsahu potřebných výpočtů. Protože výsledky výpočetních experimentů prokázaly úspěšnost optimalizačních výpočtů, je možno konstatovat, že navržené modely a tedy i matematické programování obecně mohou významně napomoci pracovníkům zabývajícím se plánováním plošné preventivní evakuace při navrhování časově efektivních evakuačních plánů v podmínkách zóny havarijního plánování Jaderné elektrárny Dukovany.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[Baumann, 2007] Baumann, N.. Evacuation by Earliest Arrival Flows. Dissertation Thesis. Dortmund Technical University, 2007. 130 s.

[Baumann-Skutella, 2006] Baumann, N.; Skutella, M.. Solving Evacuation Problems Efficiently – Earliest Arrival Flows with Multiple Sources. In 47th Annual IEEE Symposium of Foundations of Computer Science. Berkeley, 21. - 24.10.2006, s. 399 – 408. ISBN 0-7695-2720-5

[Bish, 2006] Bish, D., R.. Demand Management in Evacuation Planning: Models, Algorithms, and Applications. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006. 105 s.

[Bretschneider-Kimms, 2011] Bretschneider, S.; Kimms, A.. A Basic Mathematical Model for Evacuation Problems in Urban Areas. Transportation Research, Part A – Policy and Practise, 2011, roč. 45, č. 6, s. 523 – 539. ISSN 0965-8564

[Bretschneider-Kimms, 2012] Bretschneider, S.; Kimms, A.. Pattern-based Evacuation Planning for Urban Areas. European Journal of Operational Research, 2012, sv. 216, č. 1, s. 57 – 69. ISSN 0377-2217

[Cova-Church, 1997] Cova, T., J.; Church, P., L.. Modelling Community Evacuation Vulnerability Using GIS. International Journal of Geographical Information Science, 1997, roč. 11, č. 8, s. 763 – 784. ISSN 1365-8816

[Cova-Johnson, 2003] Cova, T., J.; Johnson, J., P.. A network flow model for lane-based evacuation routing. Transportation Research, Part A – Policy and Practise, 2003, roč. 37, č. 7, s. 579 – 604. ISSN 0965-8564

[Daganzo, 1993] Daganzo, C., F.. The Cell Transmission Model, Part II: Network Traffic. Transportation Research Part B: Methodological, roč. 29, Issue 2, 1995, s. 79-93. ISSN 0191-2615

[Dijkstra, 1959] Dijkstra, E., W.. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. Numerische Mathematic, 1959, Issue 1, s. 269-271.

[El-Sbayti, 2008] El-Sbayti, H., H.. Optimal Scheduling of Evacuation Operations with Contraflow. Dissertation. University of Maryland, 2008. 210 s.

[Hamacher-Tjandra, 2001] Hamacher, H., W.; Tjandra, S., A.. Mathematical Modelling of Evacuation Problems: A State of Art. In International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics. Duisburg: Gerhard Mercator University, 4. - 6.4.2001, s. 227 – 266. ISBN 3-540-42690-6

[Chen-Zhan, 2008] Chen, X.; Zhan, F., B.. Agent-based modelling and simulation of urban evacuation: relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies. Journal of the Operational Research Society, 2008, roč. 59, č. 1, s. 25-33. ISSN 0160-5682

[Janáček-Sibila, 2009] Janáček, J.; Sibila, M.. Optimal Evacuation Plan Design with IP Solver. Communications, 2009, sv. 11, č. 3, s. 29-35. ISSN 1335-4205.

[Kamiyama-Katoh-Takizawa, 2006] Kamiyama, N.; Katoh, N.; Takizawa, A.. An Efficient Algorithm for the Evacuation Problem in a Certain Class of Networks with Uniform Path-lengths. Discrete Applied Mathematics, 2009, sv. 157, č. 17, s. 3665 – 3677. ISSN 0166-218X

[Kim-Shekhar, 2005] Kim, S.; Shekhar, S.. Contraflow Network Reconfiguration for Evacuation Planning: A Summary of Results. In 13th ACM International Symposium on Geographic Information Systems 2005: sborník z konference. Bremen, 4.11.2005. ISBN 1-59593-146-5

[Kim-George-Shekhar, 2007] Kim, S.; George, B.; Shekhar, S.. Evacuation Route Planning: Scalable Heuristics. In 15th ACM International Symposium on Geographic Information Systems 2007: sborník z konference. Seattle, 7. - 9.11.2007. ISBN 978-1-59593-914-2

[Kimms-Maassen, 2011] Kimms, A.; Maassen, K., Ch.. Optimization and Simulation of Traffic Flows in the Case of Evacuating Urban Areas. OR Spectrum, 2011, sv. 33, č. 3, s. 571 – 593. ISSN 0171-6468

[Kimms-Maassen, 2012] Kimms, A.; Maassen, K., Ch.. A fast heuristic approach for large-scale cell-transmission-based evacuation route planning. Networks, 2012, sv. 60, č. 3, s. 179 – 193. ISSN 0028-3045

[Kongsomsaksakul-Yang-Chen, 2005] Kongsomsaksakul, S.; Yang, Ch.; Chen, A.. Shelter Location-allocation Model for Flood Evacuation Planning. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies., 2005, sv. 6, s. 4237 – 4252. ISSN 1881-1124

[Kyselák-Šmerek, 2010] Kyselák, J., Šmerek, M.. Využití vícekritériální metody v rámci rozhodovacího procesu v relaci k evakuaci obyvatelstva. SPBI Spektrum, 2010, sv. 9, č. 2, s. 57-63. ISSN 1211-6920.

[Liu-Hatayama-Okada, 2006] Liu, Y.; Hatayama, M.; Okada, N.. Development of an Adaptive Evacuation Route Algorithm under Flood Disaster. Annals Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2006, sv. 49.

[Lu-George-Shekhar, 2005] Lu, Q.; George, B.; Shekhar, S.. Capacity Constrained Routing Algorithms for Evacuation Planning: A Summary of Result. In Advances in Spatial and Temporal Databases Lecture Notes in Computer Science, 2005, Volume 3633/2005, s. 291-307

[Mamada-Uno-Makino-Fujishige, 2005] Mamada, S.; Uno, T.; Makino, K.; Fujishige, S.. A tree partitioning problem arising from an evacuation problem in tree dynamic networks. Journal of the Operations Research Society of Japan, 2005, roč. 48, č. 3, s. 196-206. ISSN 0453-4514

[Madireddy-Medeiros-Kumara, 2011] Madireddy, M.; Medeiros, D., J.; Kumara, S.. An Agent Based Model for Evacuation Traffic Management. In Proceedings of the 2011 Winter Simulation conference, s. 222 – 233. ISBN 978-1-4577-2109-0, ISSN 0891-7736.

[Murray-Tuite-Wolshon, 2013] Murray-Tuite, P.; Wolshon, B.. Evacuation Transportation Modeling: An Overview of Research, Development, and Practice. Transportation Research, Part C – Emerging Technologies, 2013, roč. 27, Special Issue. s. 25 – 45. ISSN 0968-090X

[Nasri-Bouziri, 2014] Nasri, S.; Bouziri, H.. Tabu Search to Draw Evacuation Plans in Emergency Situations. International Journal of Social, Education, Economics and Management Engineering, 2014, roč. 8, č. 9. s. 2930 – 2938.

[Ng-Waller, 2010] Ng, M.; Waller, T.. The evacuation optimal network design problem: model formulation and comparisons. Transportation Letters – The International Journal of Transportation Research, 2009, sv. 1, č. 2, s. 111 – 119. ISSN 1942-7867

[Özdamar-Yi, 2008] ÖZDAMAR, L.; Yi, W.. Greedy Neighborhood Search for Disaster Relief and Evacuation Logistics. IEEE Intelligent Systems, roč. 23, č. 1, s. 14 – 23. ISSN 1541-1672

[Příručka] Příručka pro ochranu obyvatel při radiační havárii Jaderné elektrárny Dukovany. 11 s.

[Saadatesresht-Mansourian-Taleai, 2009] Saadatesresht, M.; Mansourian, A.; Taleai, M.. Evacuation Planning Using Multiobjective Evolutionary Optimization Approach. European Journal of Operational Research, sv. 198, č. 1, s. 305-314. ISSN 0377-2217

[Sheffi-Mahmassani-Powell, 1982] Sheffi, Y.; Mahmassani, H.; Powell, W., B.. A Transportation Network Evacuation Model. Transportation Research, Part A – Policy and Practice, 1982, roč. 16, č. 3, s. 209 – 218. ISSN 0965-8564

[Southworth, 1991] Southworth, F.. Regional Evacuation Modeling: A State of the Art Review. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1991, 65 s.

[Stěpanov-Smith, 2009] Stěpanov, A.; Smith, J., M.. Multi-objective evacuation routing in transportation networks. European Journal of Operational Research, 2009, sv. 198, č. 2, s. 435 – 446. ISSN 0377-2217

[Teichmann, 2009] Teichmann, D.. Příspěvek k problematice evakuace obyvatelstva a možnosti využití matematického modelování při jejím plánování. Krizový manažment, 2009, roč. 8, č. 1, s. 91-94. ISSN 1336-0019

[Výpis] Výpis z vnějšího havarijního plánu pro zónu havarijního plánování JE Dukovany

[Yao-Mandala-Chung, 2009] Yao, T.; Mandala, S., R.; Chung, B., D.. Evacuation Transportation Planning Under Uncertainty: A Robust Optimization Approach. Networks & Spatial Economics, 2009, roč. 9, č. 2, s. 171 – 189. ISSN 1566-113X

[Yazici-Ozbay, 2007] Yazici, M., A.; Ozbay, K.. Impact of Probabilistic Road Capacity Constraints on the Spatial Distribution of Hurricane Evacuation Shelter Capacities. Transportation Research Record, 2007, sv. 2022, s. 55 – 62. ISSN 0361-1981

Ing. Dušan TEICHMANN, Ph.D.

Datum narození: 12. 5. 1972

Vzdělání

- 1996 Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, obor Dopravní marketing, management a logistika (Ing.)
- 2006 VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, obor Dopravní technika a technologie (Ph.D.)

Průběh dosavadní praxe

- 1994 – 1998 České dráhy, železniční stanice Ostrava hlavní nádraží, provozní funkce v útvaru náměstka pro nákladní přepravu
- 1998 – 2005 České dráhy, Obchodně-provozní ředitelství v Ostravě, systémový specialista, vedoucí skupiny
- 1998 – 2002 VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, externí vyučující
- 2002 – 2005 VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, odborný asistent (vedlejší pracovní poměr)
- 2005 dosud VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, odborný asistent (hlavní pracovní poměr), v letech 2008 – 2010 vedoucí Ústavu modelování a simulací v dopravě, od 2010 dosud vedoucí Ústavu dopravních technologií

Vědecko-výzkumné aktivity (v posledních 5-ti letech)

Výzkumný projekt aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje TA04031296 Simulace a optimalizace interakce dopravních proudů v software Witness – člen řešitelského týmu (období řešení 2014 – 2016)

Veřejná zakázka Posouzení psychické zátěže zaměstnanců na pozicích výpravčí a traťový dispečer (řešitelé Univerzita Palackého, CDV Brno) - zpracovatel studie ergonomických parametrů pracoviště (2014)

Seznam řešených interních výzkumných grantů na FS VŠB-TU Ostrava:

SP2011/129 Výzkum v oblasti modelování pro podporu řízení dopravy ve městech

SP2012/113 Vývoj nových metod pro podporu plánování a řízení dopravních procesů

SP2013/55 Výzkum v oblasti klasických i nekonvenčních modelovacích a optimalizačních přístupů pro potřeby zvýšení efektivity dopravních a logistických obslužných systémů

SP2015/77 Vývoj matematických a simulačních modelů pro podporu rozhodování v oblasti dopravy

2010 – dosud Technologická agentura České republiky – Program Alfa, člen Rady podprogramu č. 3 „Udržitelný rozvoj dopravy“ - Posudková činnost (zpravodaj) na projekty aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje pro Technologickou agenturu ČR – celkem vypracováno 69 posudků (z toho 39 pro zasedání Rady podprogramu a na průběžné a závěrečné zprávy financovaných projektů)

2015 – člen Vědeckého výboru mezinárodní konference TRANSCOM Žilina

Pedagogické aktivity na VŠB – TU Ostrava

Kvantitativní metody organizace a řízení I – III, Optimalizace dopravních procesů I – II, Heuristické a nekonvenční metody optimalizace I – II, Technologie a řízení dopravy I, Technologie a řízení železniční dopravy, Dopravní inženýrství, Ekonomika v dopravě

Pedagogické aktivity mimo VŠB – TU Ostrava

2010/11 – 2011/12 (zimní semestr) Vysoká škola logistiky Přerov, o. p. s. – výuka předmětu Operační analýza II

2013/14 (zimní semestr) – ČVUT Praha, Fakulta dopravní – realizace vybraných přednášek na dohodnuté téma z předmětu Ekonomika dopravy - 2x

2013/14 (letní semestr) – ČVUT Praha, Fakulta dopravní – realizace vybraných přednášek z předmětu Transport Theory (program Atlantis + zahraniční studenti studující v rámci programu ERASMUS) – 7x

2014/15 (zimní semestr) – ČVUT Praha, Fakulta dopravní – výuka předmětu Teorie grafů s aplikacemi v dopravě (pracoviště Děčín)

2014/15 (letní semestr) – ČVUT Praha, Fakulta dopravní – výuka předmětu Optimalizace na dopravních sítích (pracoviště Děčín)

2014/15 (letní semestr) – ČVUT Praha, Fakulta dopravní – realizace vybraných přednášek z předmětu Transport Theory (program Atlantis + zahraniční studenti studující v rámci programu ERASMUS) – 7x

Publikační činnost

Celkem 46 publikací v letech 2010 – 2015, z toho nejvýznamnější:

5x spoluautorství článků publikovaných v časopise s IF (2x první autor)

DANĚK, Jan; PLEVNÝ, Miroslav; **TEICHMANN, Dušan**. The Rational Operation of the Urban Transport Line Network by Minimisation of the Need Vehicles. E+M, 2010, roč. 13, č. 2, s. 53 - 61. ISSN 1212-3609.

DORDA, Michal; **TEICHMANN, Dušan**. Modelling of Freight Trains Classification Using Queueing System Subject to Breakdowns. Mathematical Problems in Engineering, 2013, article number 307652. ISSN 1212-3609.

TEICHMANN, Dušan; DORDA, Michal; GOLC, Karel; Bínová, Helena. Locomotive Assignment Problem with Heterogeneous Vehicle Fleet and Hiring External Locomotives. Mathematical Problems in Engineering, 2015, article number 583909. ISSN 1024-123X.

TEICHMANN, Dušan; DORDA, Michal; BÍNOVÁ, Helena; LUDVÍK, Martin. Optimization of Parking Public Transport Vehicles in Ostrava. Promet – Traffic&Transportation, 2015, roč. 27, č. 1, s. 69 – 75. ISSN 0353-5320.

DORDA, Michal; **TEICHMANN, Dušan**. On Two Modifications of Er/Es/1/m Queueing System Subject to Disasters. Acta Polytechnica Hungarica, 2015, roč. 12, č. 2, s. 141 – 158. ISSN 1785-8860.

3x spoluautorství v časopise evidovaném v databázi Scopus (1x první autor)

JÁNOŠÍKOVÁ, Ludmila; KOHÁNI, Michal; BLATONĚ, Martin; **TEICHMANN, Dušan**. Optimization of the Urban Line Network Using a Mathematical Programming Approach. International Journal of Sustainable Development and Planning, 2012, roč. 7, č. 3, s. 288 – 301. ISSN 1743-7601.

TEICHMANN, Dušan; DORDA, Michal; OLIVKOVÁ, Ivana. Optimal Assignment of Vehicles to Urban Transport Routes. Communications (Komunikácie), 2013, roč. 15, č. 1, s. 34 – 38. ISSN 1335-4205.

GRAF, Vojtěch; **TEICHMANN, Dušan**; DORDA, Michal. An Experimental Study on Dependence of Time Intervals for Connections on Optimization Computations for Task of Aircraft Scheduling. Communications (Komunikácie), 2015, roč. 17, č. 2, s. 35 – 41. ISSN 1335-4205.

13x spoluautorství článku ve sbornících konferencí evidovaných v databázích Web of Science a Scopus (z toho 6x první autor)

JÁNOŠÍKOVÁ, Ludmila; BLATONĚ, Martin; **TEICHMANN, Dušan**. Design of Urban Public Transport Lines as a Multiple Criteria Optimization Problem. In Urban Transport XVI – Urban Transport and Environment in the 21st Century: sborník z mezinárodní konference. Limassol, 5. – 7. květen 2010, s. 137 – 146. ISBN 978-1-84564-456-7, ISSN (print) 1746-4498, ISSN (on-line) 1743-3509.

TEICHMANN, Dušan; DORDA, Michal; FRIČ, Jindřich. An Extended Model for the Design of City Mass Transport Network. In Mathematical Methods in Economics: sborník z mezinárodní konference. Jánská dolina (Slovensko): Slovenská spoločnosť pro operační výzkum, 6. - 9. září 2011, s. 704 – 708. ISBN 978-80-7431-060-7.

DORDA, Michal; **TEICHMANN, Dušan**. Cost Analysis of Finite Multi-server Markov Queueing System Subject to Breakdowns. In Mathematical Methods in Economics: sborník z mezinárodní konference. Jánská dolina (Slovensko): Slovenská spoločnosť pro operační výzkum, 6. - 9. září 2011, s. 134 – 139. ISBN 978-80-7431-060-7.

DORDA, Michal; **TEICHMANN, Dušan**. About a Modification of Er/Es/1/m Queueing System Subject to Breakdowns. In Mathematical

Methods in Economics: sborník z mezinárodní konference. Karviná (Česká republika): Česká společnost pro operační výzkum, 11. - 13. září 2012, s. 117 - 122. ISBN 978-80-7431-060-7.

DORDA, Michal; **TEICHMANN, Dušan**. On Finite Single-server Queue Subject to Non-preemptive Breakdowns. In Proceedings of 31th International Conference Mathematical Methods in Economics 2013, Jihlava, 11. - 13. září, 2013, s. 141 - 146. ISBN 978-80-87035-76-4.

LORENZ, Filip; **TEICHMANN, Dušan**; DORDA, Michal. Periodic Timetable of Routes with Closed Scheduling Vehicles and Time Coordination in One Point Optimization Model. In Proceedings of 31th International Conference Mathematical Methods in Economics 2013, Jihlava, 11. - 13. září, 2013, s. 541 - 545. ISBN 978-80-87035-76-4.

TEICHMANN, Dušan; DORDA, Michal; FRIČ, Jindřich; LORENZ, Filip. Optimal Localization of Investment Means for Increasing Networks Capacity in Indeterminate Financial Conditions. In Proceedings of 31th International Conference Mathematical Methods in Economics 2013, Jihlava, 11. - 13. září, 2013, s. 933 - 938. ISBN 978-80-87035-76-4.

TEICHMANN, Dušan; DORDA, Michal; VÍTEK, Jakub; SMRŽ, Vladimír; MICHALÍK, Vladimír. Unmanned Aerial Vehicles Routing Problem. In Proceedings of 15th International Carpathian Control Conference (ICCC 2014), Velké Karlovice, 28. - 30. květen, 2014, s. 602 - 607. ISBN 978-1-4799-3527-7.

TEICHMANN, Dušan; DORDA, Michal; IVAN, Martin. Multi-Criteria Optimization of Distribution System Structure - Comparison of Selected Methods and their Effectiveness. In Proceedings of XVIIth International Conference Quantitative Methods in Economics (Multiple Criteria Decision Making), Virt, 28. - 30. květen, 2014, s. 280 - 286. ISBN 978-80-225-3868-8.

DORDA, Michal; **TEICHMANN, Dušan**. M/En/1/m queuing system subject to catastrophes. In Proceedings of 32nd International Conference Mathematical Methods in Economics, Olomouc, 10. - 12. září, 2014, s. 168 - 173. ISBN 978-80-244-4209-9.

TEICHMANN, Dušan; DORDA, Michal; SMRŽ, Vladimír; VÍTEK, Jakub. Modelling of Destination Portfolio for International Regional Airport. In Proceedings of 32nd International Conference Mathematical

Methods in Economics, Olomouc, 10. – 12. září, 2014, s. 1033 – 1038. ISBN 978-80-244-4209-9.

GRAF, Vojtěch; **TEICHMANN, Dušan**; DORDA, Michal. Timetable Optimization for Charter Air Transport Company. In Proceedings of 11th International Conference Strategic management and Its Support by Information Systems, Uherské Hradiště, 21. – 22. květen, 2015, s. 200 – 207. ISBN 978-802483741-3.

TEICHMANN, Dušan; DORDA, Michal. Optimization of Railway Traffic Performance in Cross-border Sections. In Proceedings of 11th International Conference Strategic management and Its Support by Information Systems, Uherské Hradiště, 21. – 22. květen, 2015, s. 200 – 207. ISBN 978-802483741-3.