



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMATIZACE INŽENÝRSKÝCH ÚLOH A
INFORMATIKY**

INSTITUTE OF COMPUTER AIDED ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE

SIMULACE DOPRAVY V INTRAVILÁNU MĚSTA

MICROSCOPIC TRAFFIC SIMULATION IN URBAN AREAS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Bátora

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Mgr. TOMÁŠ APELTAUER, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3656 Městské inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program
Studijní obor	3647R025 Městské inženýrství
Pracoviště	Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Filip Bátora
Název	Simulace dopravy v intravilánu města
Vedoucí práce	doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Barceló, J. (editor): Fundamentals of Trac Simulation. International Series in Operations Research & Management Science, Springer, 2010, 492 s.

Gipps, P.: A behavioural car-following model for computer simulation. Transportation Research Part B: Methodological, ročník 15, č. 2, April 1981: s. 105 - 111.

Ortúzar, J., G. Willumsen, L.: Modelling Transport, 4th Edition, 2011.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Aplikace mikroskopického modelu dopravy pro posouzení ekonomické efektivity instalace řadiče světelného signalizačního zařízení (SSZ).

Cílem práce je demonstrovat přínosy aplikace mikroskopického modelu již ve fázi projektu a posouzení ekonomické efektivity. Dojde k aplikaci mikroskopického modelu dopravy na logiku řízení světelně řízené křižovatky. Výsledky budou podrobeny analýze s důrazem na ekonomickou efektivitu navrhovaného řešení, včetně ocenění cestovního času řidičů.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá modelovaním dopravy z teoretického hľadiska ale aj praktickým aplikovaním na konkrétnu problematiku. V softvéri Aimsun bol vytvorený mikroskopický model križovatky v dvoch režimoch svetelnej signalizácie. Pomocou dostupných metodických pokynov bol ocenený cestovný čas a na základe toho boli tieto varianty porovnané.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Modelovanie dopravy, Mikrosimulácia, Hodnota cestovného času, Aimsun

ABSTRACT

The main goal of my bachelor's thesis is to provide a theoretical insight on the topic of traffic modelling, as well as finding a practical solution to a specified issue. I will use the Aimsun software to create a microscopic model of a traffic junction using two different modes of traffic light signals. With the help of various methodical directions, I will provide an economical evaluation and comparison of the overall junction travel time.

KEYWORDS

Traffic flow modelling, Microsimulation, Travel time cost, Aimsun

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Filip Bátora *Simulace dopravy v intraviláne mesta*. Brno, 2019. 52 s. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky. Vedoucí práce doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu s názvom *Simulácia dopravy v intraviláne mesta* spracoval(a) samostatne a že som uviedol(a) všetky použité informačné zdroje.

V Brne dňa 23. 5. 2019

Filip Bátora
autor práce

PROHLÁSENIE O ZHODE LISTINNEJ A ELEKTRONICKEJ FORMY ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Prehlasujem, že elektronická forma odovzdanej bakalárskej práce s názvom *Simulácia dopravy v intraviláne mesta* je zhodná s odovzdanou listinnou formou.

V Brne dňa 23. 5. 2019

Filip Batora
autor práce

POĎAKOVANIE

Chcel by som sa poďakovať vedúcemu mojej práce doc. Mgr. Tomášovi Apeltauerovi, Ph.D., za jeho odborné vedenie, metodickú pomoc a cenné rady. Ďalej by som sa chcel poďakovať Ing. Jiřímu Apeltauerovi, Ph.D., za poskytnutie podkladov a rád pri modelovaní. Za rady ohľadom hodnotenia cestovného času ďakujem aj Ing. Radke Matuszkovej.

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Modelovanie dopravy	13
3. Mikroskopické modelovanie dopravy	14
4. Modely CFM mikroskopického modelovania dopravy	16
4.1 Gippsov model	17
4.1.1 Popis modelu.....	17
4.2 Wiedemannov model	21
4.2.1 Popis modelu.....	21
4.2.2 Prahové hodnoty modelu	23
4.3 Model IDM.....	24
4.3.1 Popis modelu.....	24
5. Teória a prístup k tvorbe modelu	26
5.1 Prípravná fáza projektu	26
5.2 Inicializačná fáza projektu	28
5.2.1 Geometria modelu.....	28
5.2.2 Riadenie a organizácia dopravy	28
5.2.3 Dopravná vyťaženosť	28
5.3 Kalibrácia a validácia	29
5.3.1 Kalibračné dáta	29
5.4 Hodnotenie variantov a interpretácia výstupov.....	30
5.4.1 Hodnotenie.....	30
5.4.2 Interpretácia výstupov.....	30
6. Ekonomické hodnotenie riadenia dopravy	31
6.1 Hodnota úspory cestovného času	32
6.1.1 Pracovný čas cestujúceho	33
6.1.2 Nepracovný čas cestujúceho	33
6.1.3 Nákladná doprava	34

7.	Popis lokality a zber vstupných dát	35
7.1	Popis ulíc.....	36
7.1.1	Doprava.....	36
7.1.2	Členitosť ulice.....	36
7.2	Vstupné dáta.....	37
7.2.1	Mestská hromadná doprava	37
7.2.2	Individuálna automobilová doprava	40
7.2.3	Nákladná doprava	41
8.	Tvorba modelu v programe Aimsun.....	42
8.1	Mapový podklad.....	42
8.2	Geometria.....	43
8.3	Svetelná signalizácia	43
8.4	Dopravné zaťaženie.....	44
8.5	Simulácia.....	45
9.	Vyhodnotenie simulácie s ekonomickým porovnaním.....	46
9.1	Údaje zo simulácie v programe.....	46
9.2	Ekonomické porovnanie variant	46
9.2.1	IAD a MHD	47
9.2.2	Nákladná doprava	48
10.	Záver	50

Zoznam použitých skratiek

CFM	model nasledujúceho vozidla
VHD	verejná hromadná doprava
ITS	inteligentný dopravný systém
ND	nákladná doprava
SN	stredná nákladná doprava
MHD	mestská hromadná doprava
IAD	individuálna automobilová doprava

1 Úvod

Cieľom tejto práce je porovnanie dvoch typov radičov vo svetelno-signalizačnom zariadení na križovatke na základe výsledkov ekonomického posudku. Hlavným dôvodom pre realizáciu takéhoto porovnania je fakt, že mesto Brno už dlhšie uvažuje o zmene súčasných radičov vo svetelnej signalizácii na nový typ. Táto práca sa bude zaoberať najmä potenciálnym ekonomickým prínosom nasadenia nového typu týchto radičov. Porovnanie bude prevedené s využitím mikroskopického modelu dopravy za pomoci použitia reálnych dát a ich spracovania. Zber relevantných dát bude prevedený na reálnej križovatke v Brne.

2 Modelovanie dopravy

V dnešnej dobe, kedy sa ľudia potrebujú presúvať čoraz častejšie, narastá hustota dopravy a s ňou súvisiace problémy. Problémy sa vyskytujú hlavne vo výrazne urbanizovaných častiach miest a prilahlých cestných komunikáciách napojených na tieto mestské časti. Preto súčasná ekonomika čoraz častejšie rieši čas strávený vo vozidlách, ktorý s hustotou dopravy priamo súvisí. A práve pri tomto je modelovanie veľmi nápomocné. Samozrejme, má omnoho viac využití.

Samotné modelovanie dopravy nám slúži ako nástroj simulovanie reálnej situácie, ktorú treba určitým spôsobom vyhodnotiť podľa nastavených kritérií. Ide o selektívnu aproximáciu výberového priblíženia k realite [5]. Do modelu zasahujú iba podstatné vplyvy, ktoré ovplyvňujú vzťahy a závislosti. Tieto vzťahy sa následne transformujú do matematických vzťahov a algoritmov a vytvoria tak matematický model.

Z hľadiska rozsahu a podrobnosti modelov sa môžu rozdeliť na tri základné typy:

- Makroskopické

Využíva charakteristiky ako hustota dopravného prúdu, priemerná rýchlosť dopravy a intenzita dopravy, ktoré sa formulujú do tzv. fundamentálnych diagramov. Model sa nezaobrá členením dopravného prúdu na jednotlivé vozidlá.

- Mezoskopické

Pri týchto modeloch sa zohľadňujú vozidlá resp. skupiny vozidiel zaradené do logických celkov (napr. motocykle, autobusy, električky atď.). Základný princíp môžeme popísať ako analytickú kalkulačku s číselným výstupom v závislosti na čase [7].

- Mikroskopické

Mikroskopické modely sú považované za najpodrobnejšie z uvedených modelov. Ich základnou jednotkou je vozidlo. V simulácii sa zohľadňujú individuálne vlastnosti vozidiel a vodičov, ako aj interakcie medzi nimi. Vďaka detailnosti týchto modelov sú umožnené presnejšie prezentované výsledky a riešenia jednotlivých úloh.

3 Mikroskopické modelovanie dopravy

Pri mikroskopickom modelovaní sa venuje pozornosť jednotlivým vozidlám a ich správaniu v dopravnom prúde, ktorého parametre sa menia a to aj náhodným spôsobom [2]. Definovanie mikroskopického modelovania dopravy môže byť rozdielne, vo všeobecnosti sa dá ale opísať ako popis správania vodiča v dopravnom prúde pre následnú čo najrealistickejšiu simuláciu.

Medzi najrozšírenejšie teórie modelovania, ktoré sú založené na vzdialenosti medzi vozidlami sú (CFM – car following models), teda modely nasledujúceho vozidla. Na rozdiel od typu „lane changing“ (model striedania jazdných pruhov), patriaceho tiež do skupiny mikroskopických modelov, sa model nasledujúceho vozidla sa vyznačuje tým, že správanie vozidla popisuje na základe bezpečnej vzdialenosti medzi nimi. Druhý zmieňovaný typ vychádza zo správania pri rôznych podmienkach na ceste. Rozvoj CFM modelov sa započal ešte v minulom storočí s rozvojom masívneho nástupu automobilizmu najmä v USA. Vznikol tak dopyt po kvalitnom modeli, ktorý by umožňoval realistické simulácie. Tento typ modelu sa stal napríklad základom pre systém adaptívneho tempomatu v súčasných automobiloch. Avšak jeho najväčšie opodstatnenie z hľadiska prínosu a celkovej dopravy a jej plynulosti sú inteligentné dopravné systémy riadiace dopravu najmä v mestách.

Vývoj modelovania zaznamenal výrazný pokrok aj vďaka výpočtovej technike, s pomocou ktorej sa nadobudnuté teoretické poznatky sa mohli ďalej rozvíjať. Počítače umožnili použitie nových systémov („cell automation system“ a „multiagent system“), ktoré umožňujú a poskytujú realistickejšie správanie a interakciu s vodičmi vyplývajúcu z dopravných podmienok.

Podľa príručky pre tvorbu a hodnotenie mikroskopických simulácií dopravy [7] sa odporúča použiť tieto modely v týchto prípadoch:

- Predpoklad synergických efektov
Efekt nastáva pri situáciách, kde sa navzájom ovplyvňuje niekoľko križovatiek. Tieto situácie môžu nastať napr. pri kongescii, ktorá presahuje vzdialenosť medzi dvomi križovatkami.

- Dopravná situácia s kritickou saturáciou
Saturácia je príliš vysoká alebo presahuje stabilný stav dopravného prúdu. Tieto situácie môžu nastať pri zvláštnych príležitostiach, ktoré môžu byť príčinou nejakej udalosti v okolí.
- Prekročenie kapacity, stavy kongescie
Po prekročení kapacity určitých segmentov na dopravnej sieti.
- Testovanie kapacitných hraníc systému
Potreba vyčíslieť maximálne možné zaťaženie dopravného systému alebo určitej lokality. Využíva sa pri rozvoji miest a obcí.
- Neštandardné spôsoby riešení
Takéto riešenie nastane väčšinou pri neštandardnej situácii, kde riešenia opreté o normu nie sú možné.
- Technické riešenie bez preukázateľných skúseností
Ak je na dopravnej sieti navrhnutý netradičný prvok, s ktorým nie sú dostatočné skúsenosti v reálnych podmienkach.
- Dynamické riadenie, preferencie vozidiel VHD, ITS
Dynamické riadenie premávky signálnymi zariadeniami umožňuje preferenciu vozidiel VHD alebo ITS.
- Hodnotenie emisií a hluku v dopravnom prúde
Z nameraných hodnôt zrýchlenia a spomalenia je možné pre každé vozidlo určiť emisie a hluk pomocou presného výpočtu.

4 Modely CFM mikroskopického modelovania dopravy

V súčasnosti existuje niekoľko CFM modelov, ktoré sa zaoberajú mikroskopickým modelovaním dopravy. Mnohé z nich sa stali úspešnými vďaka komerčnej implementácii do rôznych softvérov na simulovanie dopravného prúdu.

Hlavnou pohnútkou pre rozvoj kvalitného modelu bola potreba analyzovať budúce očakávané zmeny na cestných sieťach [3]. Základom tohto typu modelov je rovnica

$$a_{n(t+\tau)} = l_n \frac{(v_{n-1}(t) - v_n(t))^k}{(x_{(n-1)}(t) - x_n(t))^m}, \quad (4.1)$$

kde $n-1$ je vozidlo nasledované vozidlom n , τ je reakčný čas, $x_n(t)$ je pozícia vozidla n v čase t , $v_n(t)$ je rýchlosť vozidla n v čase t , $a_n(t+\tau)$ je zrýchlenie vozidla n v čase $t+\tau$. Parametre l_n , k a m musia byť odhadnuté empirickým spôsobom, pretože nemajú zjavné prepojenie s identifikovateľnými charakteristikami vodiča alebo vozidla.

Modely tohto typu však so sebou nesú kritický problém. Ten vyplýva z obtiažnosti zavedenia parametrov, ktoré nepredstavujú iba matematické konštanty, ale majú viditeľnú spojitosť so skutočnými charakteristikami vodičov. [1]

Jedným zo základných princípov, na ktorých sú CFM modely postavené, je stanovenie zrýchlenia, resp. brzdenia vozidla vzhľadom na okolité podmienky.

Pri určovaní zrýchlenia vozidla modely vychádzajú z funkcie, kde v predstavuje rýchlosť vozidla, Δv relatívnu rýchlosť vzhľadom na predchádzajúce vozidlo a Δx odstup od predchádzajúceho vozidla.

$$a = f(v, \Delta v, \Delta x) \quad (4.2)$$

Pri vyšších rýchlostiach sa dá očakávať, že rozdiely vzdialenosti budú väčšie, preto výsledkom úpravy rovnice (4.1) bude vzťah

$$a = \frac{-\lambda v^m \Delta v}{\Delta x^l}, \quad (4.3)$$

kde λ, m a l sú koeficienty, ktoré treba kalibrovať podľa reálnych meraní. Táto rovnica však platí pre zápornú relatívnu rýchlosť Δv . Pre brzdenie platí lineárna závislosť na parametri Δv popísaná ako

$$a = -\mu\Delta v, \quad (4.4)$$

kde μ je opäť parameter, ktorý je nutné kalibrovať.

Všetky vyššie uvedené vzťahy majú svoje nedostatky a nedokážeme nimi popísať rôzne stavy dopravného prúdu, či už ide o vysokú alebo naopak nízku hustotu dopravy. Preto sa každý model snaží s týmto problémom poradiť inak.

V tejto práci sa budem snažiť bližšie opísať tri konkrétne modely:

- Gippsov model
- Wiedemannov model
- IDM (Intelligent Driver Model)

4.1 Gippsov model

V roku 1981 Angličan P.G. Gibbs vytvoril jeden z najúspešnejších dopravných modelov. Vďaka implementácii do softwaru Aimsun sa používa dodnes v poupravenej podobe. Základným predpokladom modelu je, že obmedzenia maximálneho zrýchlenia a brzdenia vozidla sú v celom rozsahu rýchlosti vozidla rovnaké. Taktiež pre vzdialenosti medzi vozidlami a ich relatívne rýchlosti [3].

Hlavnými podmienkami, na ktoré Gipps dával dôraz, boli:

- Napodobňovanie reálnej premávky
- Parametre by mali odpovedať vlastnostiam vodiča a vozidla
- Ak sa doba medzi prepočítavaním polohy a rýchlosti rovná reakčnému času vodiča, tak by sa model mal chovať korektne.

4.1.1 Popis modelu

Gippsov model je založený na nastavení obmedzení na vozidlo a schopnosti vodiča – použitím týchto limitov vypočítame bezpečnú rýchlosť s ohľadom na predchádzajúce vozidlo. Predpokladá sa, že vodič nasledujúceho vozidla zvolí rýchlosť

svojho vozidla tak, aby mu zaistila bezpečné dobrzdenie a zastavenie, ak vozidlo pred ním náhle zastaví.

Model používa nasledovné parametre:

a_n maximálne zrýchlenie, ktoré môže vozidlo n podstúpiť

b_n najkritickejšie brzdenie, ktoré môže vozidlo n podstúpiť ($b_n < 0$)

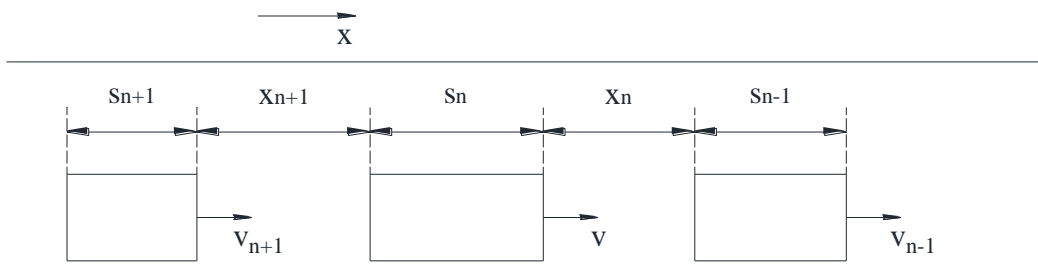
s_n efektívna veľkosť vozidla n , teda skutočná dĺžka vozidla vrátane odstupu od predchádzajúceho vozidla, ak budú stáť

v_n rýchlosť, ktorou sa pohybuje vozidlo n

$x_n(t)$ vzdialenosť od predchádzajúceho vozidla n v čase t

$v_n(t)$ rýchlosť vozidla n v čase t

τ zdanlivý reakčný čas, je konštantný pre každé vozidlo



Obrázok 4.1: Schéma parametrov modelu.

Prvé dve podmienky, ktoré musíme aplikovať na vozidlo n , súvisia s úpravou rýchlosti vozidla. Vozidlo n nesmie prekročiť požadovanú rýchlosť a akcelerácia by mala najskôr vzrásť rovnako ako výkon motora (jeho krútiaci moment) a následne klesať na nulu, keď sa rýchlosť vozidla približuje k požadovanej rýchlosti. Tieto dva limity sú kombinované v nerovnosti

$$v_n(t + \tau) \leq v_n(t) + 2,5a_n\tau \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n}\right) \cdot \sqrt{\left(\frac{0,025 + v_n(t)}{V_n}\right)}. \quad (4.5)$$

Táto nerovnosť bola stanovená na základe meraní okamžitej rýchlosti a zrýchlenia nadobudnutého z meracieho auta na dôležitej mestskej komunikácii

v priemernej premávke. Vyjadrenie je čisto opisné a platí len pre vozidlo n , ktoré sa pohybuje voľne, kým sa nepriblíži ku vozidlu $n-1$, potom sa táto podmienka zanedbáva.

Ďalšou z limitácií je uváženie brzdienia. Ak vozidlo $n-1$ začne núdzovo brzdiť v čase t , príde do bodu zastavenia x_{n-1} popísanému ako

$$x_{n-1}^* = \frac{x_{n-1}(t) - v_{n-1}(t)^2}{2b_{n-1}}, \quad (4.6)$$

pričom b_{n-1} je záporné a označuje najväčšie kritické brzdienie vozidla $n-1$.

Vozidlo n idúce hneď za týmto vozidlom nebude reagovať do až času $t+\tau$ a preto nezastaví pred dosiahnutím polohy x_n^* popísanej ako

$$x_n^* = x_n(t) + \frac{(v_n(t) + v_n(t + \tau))\tau}{2} - \frac{v_n(t + \tau)^2}{2b_n}. \quad (4.7)$$

Kvôli bezpečnosti musí vodič vozidla n zaistiť, že $x_{n-1} - s_{n-1}$ prevyšuje x_n^* . Keby táto podmienka nebola splnená, vodič vozidla n by nemal odstup na manévrovanie. Tým pádom model zavádza dodatočný bezpečný odstup θ . Vieme, že vodič vo vozidle n teda bude reagovať v čase $t + \tau$. Vo výpočte sa však ďalej vzťah objaví ako súčet reakčného času τ a bezpečného odstupu θ , teda ako bezpečný reakčný čas $\tau + \theta$. Limity na brzdienie vyžadujú, aby platil nasledovný vzťah

$$x_{n-1}(t) - \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b_{n-1}} - s_{n-1} \geq x_n(t) + \frac{[v_n(t) + v_n(t + \tau)]\tau}{2} + v_n(t + \tau)\theta - \frac{v_n(t + \tau)^2}{2b_n}. \quad (4.8)$$

Bez zavedenia parametru θ by vozidlo približujúce sa k stacionárnemu objektu alebo križovatke brzdilo až v nevyhnutnom čase – to znamená, že by dosiahlo maximálny brzdný účinok. Úlohou parametra θ je simulovať brzdienie vozidla skôr, plynule znižovať účinok brzdienia a postupne sa tak priblížiť k prekážke.

V reálnej premávke pri priamom pozorovaní je možné od vodiča vozidla n očakávať všetky hodnoty v nerovnici (4.8) s výnimkou b_{n-1} . Parameter b_{n-1} by malo nahradiť očakávanie \hat{b} popísané ako

$$-\frac{v_n(t+\tau)^2}{2b_n} + v_n(t+\tau) \left(\frac{\tau}{2} + \theta \right) - [x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] + \frac{v_n(t)}{2} + \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b} \leq 0. \quad (4.9)$$

Relatívny rozsah τ a θ sú dôležité parametre v určení správania vozidiel. Do rovnice môžeme dosadiť, že θ je rovné $\tau/2$, ak sú splnené všetky podmienky, t.j. vozidlo dodržiava bezpečnú vzdialenosť a rýchlosť. Potom nerovnicu (4.9) môžeme prepísať ako

$$-\frac{v_n(t+\tau)^2}{2b_n} + v_n(t+\tau)\tau - [x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] + \frac{v_n(t)\tau}{2} + \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b} \leq 0. \quad (4.10)$$

Po úprave dostaneme

$$v_n(t+\tau) \leq b_n\tau + \sqrt{\left\{ b_n^2\tau^2 - b_n \left\{ 2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}} \right\} \right\}}. \quad (4.11)$$

Nerovnosť v (4.10) naznačuje, že bezpečná rýchlosť v_n leží medzi dvomi koreňmi rovnice, ale pretože spodný koreň je záporný, môže sa zanedbať. Preto model uvažuje iba s kladnými hodnotami rýchlosti. Možnosť, že vodič vozidla n podcení prudké zabrzdzenie vodiča pred ním, môže spôsobiť jeho reakciu v podobe kritického brzdienia. Vyjadrené vzťahom $v_n(t+\tau)$ je menšie než $v_n(t) + b_n\tau$. Tento fakt vedie k záveru, že vozidlo n musí brzdiť prudšie, ako by si jeho vodič predstavoval.

Nerovnice (4.5) a (4.11) predstavujú dve podmienky pre rýchlosť vozidla n v čase $t+\tau$ a ak predpokladáme, že vodič cestuje takou rýchlosťou, ako mu limity a bezpečnosť dovoľujú, tak je nová rýchlosť daná nasledovne:

$$v_n(t + \tau) = \min\left\{v_n(t) + 2,5a_n\tau \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n}\right) \sqrt{\left(0,025 + \frac{v_n(t)^2}{\hat{b}}\right)}, \right. \\ \left. b_n\tau \sqrt{b_n^2\tau^2 - b_n \left[2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}}\right]}\right\}. \quad (4.12)$$

Keď je nerovnica (4.11) limitujúcou podmienkou pre takmer všetky vozidlá, hovoríme o spomalenom dopravnom prúde s malými odstupmi medzi vozidlami. Naopak, ak je nerovnica (4.5) limitujúcou podmienkou pre podstatnú časť vozidiel, doprava prúdi voľne.

4.2 Wiedemannov model

Tento model patrí taktiež do skupiny modelov, kde sa uplatňuje princíp nasledujúceho vozidla. Vznikol v roku 1974, kedy ho popísal Rainer Wiedemann vo svojej dizertačnej práci. Je základom simulačného softwaru VISSIM. Odlišnosť tohto modelu od ostatných spočíva v tom, že pracuje rôznych „režimoch“ – teda zohľadňuje rôzne jazdné stratégie vodičov v závislosti od situácie, podľa čoho Wiedemann navrhuje konkrétne algoritmy. Preto býva označovaný tiež ako „psycho-fyziologický model“ [1].

4.2.1 Popis modelu

Najlepšie popisujúcim nástrojom tohto modelu je graf, na ktorého osiach je vyneseny rozdiel rýchlosti vozidiel (os x) a taktiež vzdialenosť medzi vozidlami (os y). V tomto grafe sú vyznačené krivky, ktoré určujú prahové hodnoty popisujúce jazdné režimy. Tieto krivky v grafe tvoria 4 rôzne oblasti predstavujúce jazdné režimy [1]:

- Režim voľného pohybu

Vozidlo sa snaží dosiahnuť požadovanú rýchlosť čo najväčším zrýchlením. Kvôli nepresnostiam vodiča rýchlosť osciluje okolo tejto požadovanej hodnoty rýchlosti.

- Režim približovania

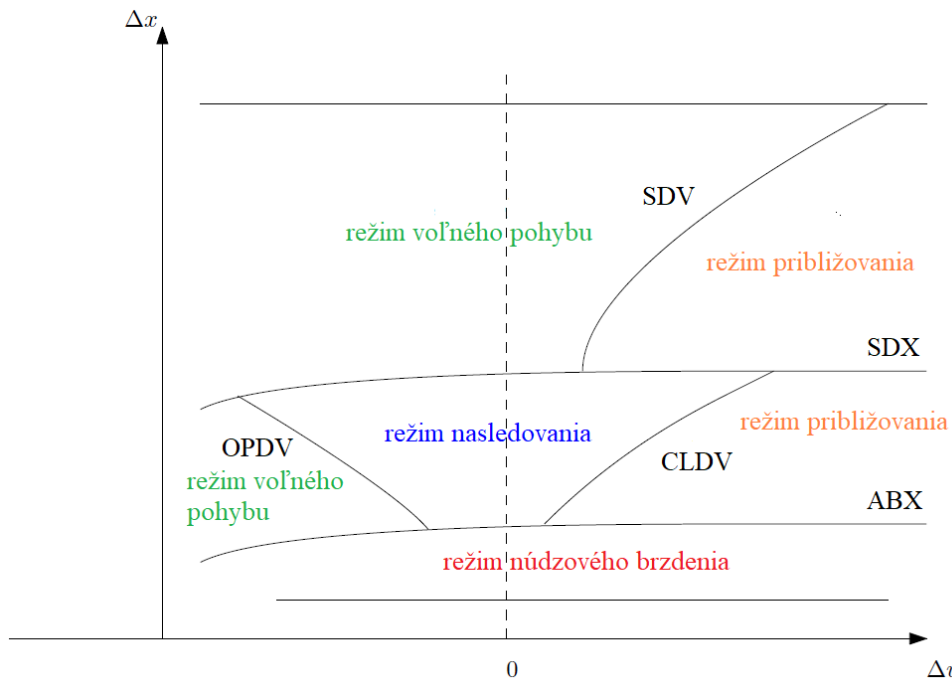
Ak vozidlo prekročí prahovú hodnotu SDV (vid' *obrázok 2*), vodič si uvedomí, že sa približuje k pomalšiemu vozidlu a v jeho prirodzenom reakčnom čase začne brzdiť a prispôbovať rýchlosť vozidlu pred ním. Zároveň sa snaží dodržať hodnotu ABX.

- Režim nasledovania

Krivky SDV, SDX, OPDV a ABX vymedzujú najmenšiu oblasť v grafe. Vodič sa snaží nasledovať vozidlo pred ním a udržiavať požadovanú rýchlosť bez vedomej reakcie na predchádzajúce vozidlo.

- Režim núdzového brzdienia

Nastáva, ak predchádzajúce vozidlo začne náhle brzdiť a zníži tým požadovanú hodnotu ABX.



Obrázok 4.2: Schéma Wiedemannovho modelu so zobrazením jednotlivých jazdných režimov [4].

4.2.2 Prahové hodnoty modelu

Tieto hodnoty popisujú jednotlivé krivky v grafe. Ich detailnému výpočtu a vzťahom, ktoré ich opisujú, sa v práci nebudem podrobnejšie venovať – len ich zjednodušene opíšem. Ide konkrétne o týchto 5 hodnôt:

- **ABX – Minimálna vzdialenosť**

Minimálna požadovaná vzdialenosť medzi vozidlami pri malých rozdieloch rýchlosti sa skladá z minimálnej vzdialenosti medzi vozidlami v pokojnom stave. Táto vzdialenosť je do značnej miery ovplyvnená vodičom a jeho vnímaním rýchlosti. Dĺžka vzdialenosti nemusí byť vždy závislá na rýchlosti.

- **SDV – Vnímanie relatívnej rýchlosti pri veľkej vzdialenosti**

Hranica vnímania rozdielu rýchlosti pri veľkých vzdialenostiach definuje bod, v ktorom vodič začne vedome riadiť reakciu na pomalšie vozidlo pred ním. Pri tomto manévri sa však snaží udržať vzdialenosť väčšiu než ABX. Táto vzdialenosť môže rásť s rýchlosťou približujúceho sa vozidla.

- **SDX – Vnímanie vzdialenosti**

Hranica vnímania v režime sledovania nastáva v situácii, kedy sa vozidlo snaží udržať rovnakú rýchlosť a konštantnú vzdialenosť vzhľadom na vozidlo pred ním. Väčšinou sa táto hodnota pohybuje v rozmedzí 1,5 až 2,5-násobku hodnoty ABX.

- **CLDV – Vnímanie relatívnej rýchlosti pri rastúcej vzdialenosti**

Hranica vnímania malých rozdielov pri malej a zmenšujúcej sa vzdialenosti vozidiel. Tento jav nastáva výhradne pri brzdení. V niektorých prípadoch je táto hodnota rovná hodnote SDV.

- **OPDV – Vnímanie relatívnej rýchlosti pri klesajúcej vzdialenosti**

Hranica vnímania malých rozdielov rýchlosti pri malej rastúcej vzdialenosti medzi vozidlami. Tieto hodnoty sa menia aj u rovnakého vodiča.

4.3 Model IDM

Tento model vznikol v roku 2000 a je teda najmladší zo všetkých spomínaných modelov. Bol vyvinutý v Nemecku M. Treiberom a D. Helbingom. Je to model, ktorý je založený na nasledujúcom vozidle, avšak funguje inak ako napr. Gippsov model, pretože používa deterministické limity, a teda ho nazývame deterministickým modelom. Na rozdiel od predošlých spomínaných modelov IDM nie je súčasťou žiadneho komerčného softvéru a používa sa skôr na experimentálnej úrovni [1].

4.3.1 Popis modelu

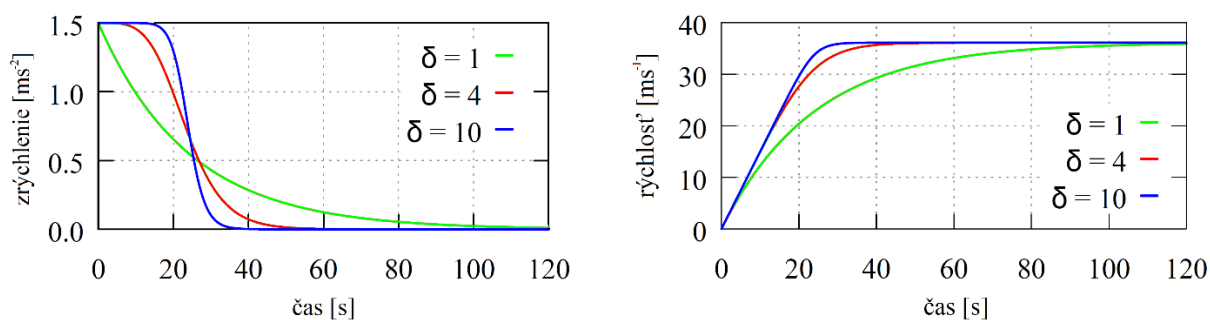
Ako každý model založený na princípe nasledujúceho vozidla, tak aj IDM popisuje zrýchlenie, odstup a rýchlosť vozidla. Jeho základom je stanovenie závislosti akcelerácie $a_n = dv_n/dt$ pre vozidlo n , kde vozidlo má svoju dĺžku l_n . Vzdialenosť medzi dvoma vozidlami vypočítame vzťahom

$$s_n = x_{n-1}(t) - x_n(t), \quad (4.13)$$

kde hodnota x_{n-1} značí polohu predchádzajúceho vozidla. Zrýchlenie vozidla je popísané dôležitým vzťahom:

$$a_n(s_n, v_n, \Delta v_n) = a_{i0} \left[1 - \left(\frac{v_i}{v_{i0}} \right)^\delta - \left(\frac{s_{opt}(v_i, \Delta v_i)}{s_i} \right)^2 \right], \quad (4.14)$$

Kde parameter a_{n0} je komfortné zrýchlenie, v_{n0} je cieľová rýchlosť vozidla a δ je exponent zrýchlenia, ktorý sa snaží akceleráciu priblížiť realite. Jeho obor hodnôt naberá rozpätie od 1 až do nekonečna. V nasledujúcich grafoch je možné vidieť, aký vplyv má tento parameter na dynamiku vozidla:



Obrázok 4.3: Znáznornenie vplyvu parametru δ na priebeh rýchlosti a zrýchlenie vozidla v prípade, že nebude obmedzované žiadnymi vonkajšími vplyvmi. Zvolené parametre pre znázornenie:

$$a_0 = 1,4 \text{ ms}^{-2}, v_0 = 120 \text{ km.h}^{-1}.$$

Zo vzťahu (4.14) vyplýva, že ak vozidlo nie je ničím obmedzované, jeho zrýchlenie sa dá vyjadriť vzťahom:

$$a_{n \text{ acc}}(v) = a_{n0} \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_{n0}} \right)^\delta \right] \quad (4.15)$$

Brzdenie vozidla závisí hlavne na okamžitej vzdialenosti vozidla n od predchádzajúceho vozidla $n-1$. Tento parameter označujeme ako s_n .

$$a_{n \text{ dec}}(s_n, v_n, \Delta v_n) = -a_{n0} \left(\frac{s_{opt}}{s_i} \right)^2 \quad (4.16)$$

Ďalším parametrom, ktorý sa objavuje v rovnici (4.16), je optimálna efektívna vzdialenosť s_{opt} . Vypočítame ho vzťahom

$$s_{n,opt}(v_n, \Delta v_n) = s_{n0} + v_n T_n + \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_{n0} b_{n0}}}, \quad (4.17)$$

kde hodnota s_{n0} predstavuje minimálnu vzdialenosť medzi vozidlami pri doprave v pokoji, teda bez akéhokoľvek pohybu. Vodič sa v takejto situácii snaží udržiavať vzdialenosť od predchádzajúceho vozidla ako súčet minimálnych vzdialeností s_0 a bezpečných vzdialeností $v T$, kde T predstavuje zvolený časový odstup v nekolabujúcej doprave. Posledný parameter, ktorý sa objavuje vo vzťahu (4.17) je b_0 , ten predstavuje brzdenie vozidla. Jeho hodnota sa odvíja od toho, aké prudké je brzdenie, resp. či ide o brzdenie kritické alebo bežné. Pre bezkolízny model je tento parameter veľmi dôležitý. Taktiež je potrebné podotknúť, že hodnota komfortného zrýchlenia a_0 je spravidla menšia ako hodnota komfortného brzdenia b_0 [1].

Medzi veľké výhody IDM oproti konkurencii patrí nízky počet parametrov. V Tabuľka 4.1 nájdeme ich zoznam vrátane ich typických hodnôt.

Zoznam parametrov modelov IDM

Parameter modelu	Typická hodnota	Zmysluplné hodnoty
Maximálna rýchlosť v_0 [km.h ⁻¹]	120	50 - 200
Bezpečný časový odstup T [s]	1,5	0,9 – 3
Minimálna vzdialenosť s_0 [m]	2,0	1 – 5
Komfortné zrýchlenie a_0 [m.s ⁻²]	1,4	0,3 – 3
Komfortné spomaľovanie b_0 [m.s ⁻²]	2,0	0,5 - 3

Tabuľka 4.1: Prehľad jednotlivých parametrov modelu IDM spoločne s ich typickými a zmysluplnými hodnotami. Parameter $\delta=4$ [1].

5 Teória a prístup k tvorbe modelu

5.1 Prípravná fáza projektu

Hlavným predpokladom úspešného vytvorenia mikroskopického modelu je výber správneho nástroja. Samotná mikrosimulácia môže poskytnúť veľmi účinný nástroj ako získať potrebné informácie. Avšak nevhodným prístupom sa môže stať, že sa stane ekonomicky nevýhodným nástrojom. Preto je dôležitou úlohou v projekte vhodne zvoliť efektívne riešenie.

Na výber softvéru poslúžia nasledujúce faktory:

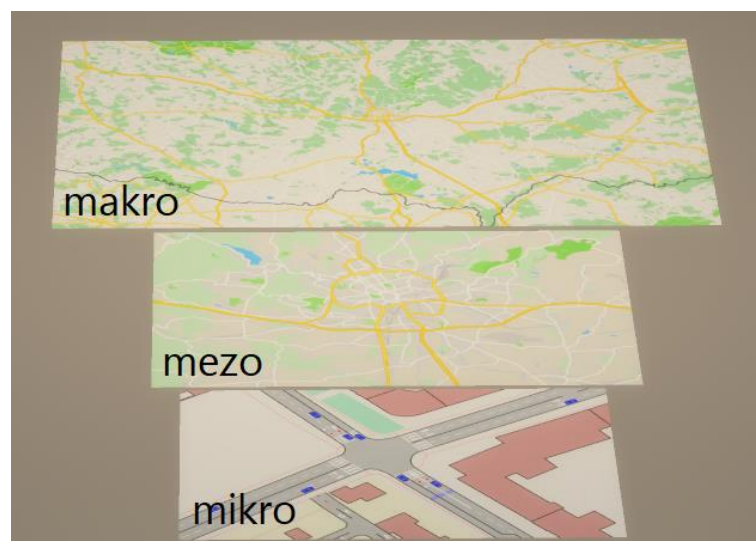
- Dostupnosť zdrojových informácií
- Definovanie časového rámca
- Dostupná paleta nástrojov
- Rozsah posudzovaného územia
- Požadovaná detailnosť projektu
- Ekonomická efektívnosť projektu

Za hlavné faktory sa dajú označiť miera detailu a rozsah územia, v ktorom sa daná analýza bude spracovávať. Pre ilustráciu – najefektívnejšou voľbou pre samostatnú

križovatku bude mikrosimulácia. Naopak, pre mesto je vhodné uvažovať o výbere medzi mezoskopickým a makroskopickým modelom.

Z hľadiska detailnosti sa dá uvažovať, či je pre projekt výhodný analytický alebo simulačný prístup. Efektivitu projektu môžeme doceliť aj zjednodušením prístupu niekoľkými spôsobmi:

- Využitie statických signálnych plánov namiesto dynamického riadenia
Pri dostatočne vysokej saturácii križovatiek sa dajú použiť statické signálne plány bez skreslenia výsledkov.
- Nahradenie komplikovaného spôsobu simulácie peších jednoduchším
Niektoré simulačné úlohy sa nezameriavajú priamo na pešiu dopravu a preto je možné ich pohyb zjednodušiť – či už ide o zastávky hromadnej dopravy alebo prechody pre chodcov.
- Zanedbanie niektorých komunikácií alebo manévrov
Ak pri simulácii dôjde k ojedinelému odbočeniu do nízko frekventovanej ulice a na celkový model to nebude mať vplyv, tento manéver je možné zanedbať.
- Zanedbávanie pozdĺžnych sklonov
Sklon, ktorý nijak neovplyvní pohyb vozidiel (predovšetkým ťažkých nákladných vozidiel) je takisto zanedbateľný.



Obrázok 5.1: Ilustrácia rozsiahlosti dopravných modelov.

5.2 Inicializačná fáza projektu

5.2.1 Geometria modelu

Základnú geometriu priestoru tvorí počet pruhov, ich šírka, dĺžka, pozdĺžny sklon, návrhová rýchlosť, uhly napojenia ciest a horizontálne zakrivenie. Tieto dáta môžu byť obsiahnuté v rôznych digitálnych súboroch, ktoré sa dajú získať napr. z GIS podkladov. Je tiež možné vytvoriť model podľa ortofotomapy, ktorá predstavuje obkreslenie súčasnej situácie.

5.2.2 Riadenie a organizácia dopravy

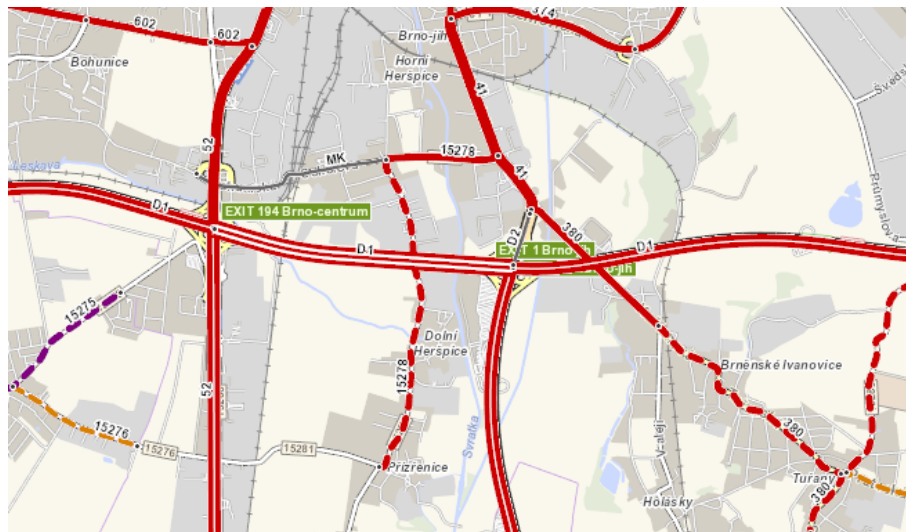
V prípade, že je predmetom modelu je križovatka, je nevyhnutné poznať dopravno-organizačné podmienky danej križovatky, ktoré upravujú zvislé alebo vodorovné dopravné značenia. Ak križovatka navyše disponuje svetelným zariadením, je vhodné požiadať jeho správcu o plán svetelnej signalizácie.

5.2.3 Dopravná vyťaženosť

Dopravná vyťaženosť sa dá zistiť jednoduchým sčítaním dopravy, a to pomocou automatického systému so senzorickou vrstvou alebo manuálne. Takto získané dáta sú zvyčajne zaznamenávané do kartogramov. Následne ich je možné transformovať do simulácie tromi spôsobmi [7]:

- Vo forme matíc
Softvéry na modelovanie dopravného prúdu majú vlastné nástroje, pomocou ktorých priradujú vozidlá na jednotlivé trasy
- Vo forme vstupných a intenzít a podielov na jednotlivých trasách
Informácie o intenzitách na jednotlivých trasách umožňujú priradenie počtu vozidiel na odpovedajúce komunikácie v modeli.

- Vo forme vstupných intenzít a intenzít na všetkých križovatkových smeroch
Na križovatkách model umožňuje smerové rozdelenie vozidiel. Vozidlo tak dostane informáciu o smere svojho pokračovania



Obrázok 5.2: Kartogram ciest zo sčítania dopravy 2016 [8].

5.3 Kalibrácia a validácia

5.3.1 Kalibračné dáta

V pokuse o dosiahnutie čo najpresnejšej simulácie je nevyhnutné získať kalibračné dáta, ktoré poslúžia pri kalibrácii modelu. Tieto dáta by mali byť zaznamenané spolu s intenzitami dopravy, a patria sem nasledovné dáta:

- Cestovné časy
- Bodová/ úseková rýchlosť
- Kapacita a saturovaný tok
- Zdržanie vozidla

Vzhľadom na to, že dnešné softvéry ponúkajú rôzne parametre a nastavenia, je dôležité aby boli kalibrované parametre boli správne zvolené.

5.4 Hodnotenie variantov a interpretácia výstupov

5.4.1 Hodnotenie

Hodnotenie jednotlivých variantov projektu pozostáva z týchto krokov [7]:

1. Vytvorenie prognózy dopytu
2. Vytvorenie variantov projektu pre následnú analýzu
3. Výber spôsobu hodnotenia rôznych variantov
4. Aplikácia modelu na dané varianty
5. Spracovanie výsledkov
6. Vyhodnotenie variantov

5.4.2 Interpretácia výstupov

Nevyhnutným prostriedkom pre prezentovanie výstupu je záverečná dokumentácia. Je dôležité, aby mala čo najväčšiu výpovednú hodnotu a poukazovala na jednotlivé parametre vhodným spôsobom.

- Popisná interpretácia

Popis jednotlivých variantov s dôrazom na sledované veličiny. Výstupom je slovný popis.

- Tabuľková interpretácia

Komparatívna metóda jednotlivých variantov, kde výstupom môže byť napr. tabuľka s absolútnymi a relatívnymi hodnotami.

- Grafická interpretácia

Parametre jednotlivých variantov spracované do prehľadných grafov, obrázkov, schém alebo diagramov v rozličných podobách.

- Dynamická interpretácia

Ak je dôležité poukázať na nejaký jav alebo časť simulácie, je vhodné použiť videozáznam, na ktorom je zachytený pohyb vozidiel, chodcov, cyklistov atď. Taktiež sem patria rôzne animované grafy alebo obrázky.

6 Ekonomické hodnotenie riadenia dopravy

Pre vytvorenie akejkoľvek ekonomickej analýzy nie je postačujúce zobrať do úvahy iba nákupnú cenu celého systému. Je potrebné uvážiť aj rôzne iné prvky ako sú napr. režijné náklady a hlavne cestovný čas. Pre vhodné ekonomické hodnotenie som si za vzor zobral habilitačnú prácu doc. Apeltauera, ktorá sa venuje práve tejto téme. Táto metóda sa zoberá ocenením cestovného času a jeho porovnaním rôznych variantov s následným dopočítaním finančných úspor c_T , ktoré potom porovnáam s celkovými nákladmi na systém. Aby bol zachovaný ekonomický prínos, musí platiť podmienka

$$c_T > c_S \quad (6.1)$$

Hodnotu c_S predstavuje obstarávacia cena a režijné náklady, ktoré sa dajú presne vycísliť, avšak cestovný čas účastníkov sa hodnotí veľmi zložito a je zaťažený neistotou [1]. Jeho presné určenie pre našu situáciu by bolo veľmi komplikované. V Českej republike ale existuje metodika [5], ktorú vydalo Ministerstvo dopravy ČR. Táto metodika určuje, ako sa má posudzovať ekonomická efektívnosť projektu. Taktiež sa v nej nachádza aj určenie hodnoty cestovného času (viď Tabuľka 6.1).

Osobná doprava			EUR/oshod (CÚ 2002)	Kč/oshod (CÚ 2017)
Pracovný čas		BUS	11,45	481,70
		IAD	14,27	600,34
Nepracovný čas	Krátky dojazd	BUS	4,13	168,01
		IAD	5,75	233,92
	Dlhý dojazd	BUS	5,31	216,02
		IAD	7,38	300,23
	Ostatné – krátka vzdialenosť	BUS	3,46	140,76
		IAD	4,82	196,08
	Ostatné – dlhá vzdialenosť	BUS	4,45	181,03
		IAD	6,18	251,41
Nákladná doprava			EUR/thod (CÚ 2002)	Kč/thod (CÚ 2017)
Cestná preprava			2,06	86,66

Tabuľka 6.1: Hodnoty (CÚ 2002 a 2017) [5].

6.1 Hodnota úspory cestovného času

Vo svete existuje mnoho pohľadov na oceňovanie cestovného času. Jedným z najrozšírenejších spôsobov je členenie časov na pracovný, nepracovný a čas pre náklad, resp. nákladnú dopravu. Toto členenie sa používa aj v Českej republike, pretože vychádza z materiálu HEATCO, ktorý bol vytvorený na základe prieskumu zadanom Európskou komisiou. Pre každý z týchto časov sa používa iný mechanizmus na jeho vyčíslenie. Zatiaľ čo cesty realizované v pracovnom čase súvisia s okrajovým produktom práce, nepracovný čas je založený na osobných preferenciách cestujúcich. Taktiež je vhodné rozlišovať rozdiely medzi nákladnou a osobnou dopravou. Pri nákladnej doprave ide predovšetkým o určitý druh tovaru, ktorý sa prepravuje medzi dvomi miestami.

6.1.1 Pracovný čas cestujúceho

Pre účely vyčíslenia pracovného času sa používa metóda tzv. minimálnych nákladov. Táto metóda je založená na teoretickom predpoklade, že pracovník alebo zamestnanec môže zužitkovať ušetrený čas na pozitívnu produkciu. V roku 1977 bol vytvorený aj sofistikovanejší model, ktorý už uvažuje s tým, že nie všetok čas strávený cestovaním je neproduktívny a ušetrený čas sa zákonite neprevádza na produktívny.

V publikácii HEATCO je doporučená metóda vyčíslenia nákladov, ktorú opíšem v nasledovnej stati. Jedným z faktorov potrebných vziať do úvahy pri vyčíslení je platová trieda cestujúceho, ktorá zohľadňuje typ jeho práce. Základom sú tiež poplatky za diaľnice, mýtna, prémiové tarify, skupinové a cestovne účely. Vyčíslenie výnosu je však možné len v prípade, že modelovanie dopravy je dostatočne podrobné. Vzhľadom na to, že rôzne druhy dopravy ponúkajú odlišné úrovne komfortu, rýchlosti atď. za rôzne ceny, je potrebné nájsť takých reprezentantov, ktorí budú spĺňať najtypickejšie podmienky najviac typické pre konkrétny prípad modelovej situácie. Ak sú teda pracujúci cestujúci zástupcovia určitej platovej triedy, potom zistíme, že priemer príjmov sa bude líšiť prípad od prípadu. Toto členenie je teda presnejšie ako uvažovanie iba jednej konkrétnej hodnoty pre všetkých cestujúcich; na druhej strane však nie je tak presné ako rozdelenie podľa príjmov [6].

6.1.2 Nepracovný čas cestujúceho

Ekonomická teória dokazuje, že nepracovný čas cestujúceho môže závisieť od nasledovných faktorov [6]:

- Účel cesty (nakupovanie, voľno časové záujmy atď.)
- Príjem cestujúceho
- Socioekonomický status (dieta, študent, senior atď.)
- Dĺžka cesty (dlhá alebo krátka cesta)
- Druh dopravy (líši sa podľa podmienok dopravy)

Sofistikované metódy hodnotenia by mali rozdeliť hodnoty cestovného času nad rámec minimálneho štandardu na zohľadnenie tohto rozdelenia. Podobné podmienky ako u pracovného času platia aj tu. V ideálnom prípade by bolo výhodné rozdeliť hodnoty cestovného času na viaceré parametre ako napr. účel cesty, príjem, vzdialenosť, komfort

atď. Ak však modelová situácia nedovolí takýto stupeň členenia, mali by byť použité priemerné hodnoty podľa konkrétneho prípadu. V takýchto situáciách bude hodnota času reflektovať zjednotenie priemerného príjmu a dĺžky cesty cestujúcich v kombinácii s komfortom.

Typicky, cesty realizované najmä vo verejnej doprave zahŕňajúce dochádzkovú vzdialenosť, čakanie a následný výstup a nástup sú vnímané odlišne z pohľadu komfortu a pohodlia. Následne cena cestovného času je vyčíslená odlišne ako čas strávený iba vo vozidle. Modely vo verejnej doprave sú často rozlišované na základe týchto elementov a je teda dobré rozlíšiť nepracovný cestovný čas aj týmto spôsobom.

Deti a seniori vykazujú nižšiu hodnotu nepracovného času než dospelí ľudia. Toto je dôsledkom miešania nižších príjmov a nižších zdrojových hodnôt času (vyplývajúcich z menšieho počtu časových obmedzení). Hodnota cestovného času by sa mala nachádzať medzi hodnotami špecifickými pre deti, seniorov a dospelých. Avšak získavanie potrebných cestovných dát v rámci modelovanej situácie, ktoré sa rozdeľujú medzi tieto skupiny cestujúcich naznačuje, že takáto miera členenia nie je praktická v rámci hodnotenia. Tým pádom sa naskytá otázka vhodného výstupu z prieskumov, ktoré môžu byť zaujaté voči ekonomicky aktívnej časti populácie [6].

Doterajší text sa venoval len hodnote času cestujúceho. Pri modelovaní dopravy sa však často stretávame s tým, že v dátach, ktoré sú k dispozícii, je úspora prepočítavaná vzhľadom na jedno vozidlo. V takýchto prípadoch je nevyhnutné použiť v konečnej evalvácii práve túto hodnotu. Tieto hodnoty by mali reflektovať priemernú obsadenosť vozidla. Dodatočné hodnoty sa môžu odlišovať podľa obsadenosti vozidla (vodič, pasažier, dieťa, senior). Priemerné hodnoty na vozidlo by mali počítať s ich kombináciou (ak sú k dispozícii všetky potrebné dáta). Ak nie sú k dispozícii, môže byť použitá rovnaká hodnota pre všetkých cestujúcich.

6.1.3 Nákladná doprava

Ocenenie cestovného času nákladnej dopravy závisí na zohľadnení nákladov, ktoré sú ušetrené na cestovnom čase a môžu byť prínosom pre firmu. Vzhľadom na skutočnosť, že vodiči a posádky rôznych typov dopravy majú rôzne platové ohodnotenie (napr. na tonu nákladu), líšia sa tieto hodnoty podľa času súvisiaceho s nákladom na

vozidlo a tiež podľa typu vozidla. Ušetrené náklady v závislosti na časových úsporách môžu byť vyjadrené funkciou typu tovaru, ktorý je prepravovaný (napr. tovary podliehajúce skaze). Avšak len najpodrobnejšie štúdie a prieskumy by priniesli takto podrobné informácie a preto sa rozdelenie podľa druhu tovaru v praxi väčšinou nepoužíva. Praktickejšie je teda tovar rozdeľovať podľa toho, v čom je prevázaný a akou formou.

7 Popis lokality a zber vstupných dát

Pre spracovanie tejto bakalárskej práce bola vybraná križovatka v Brne mestskej časti Brno – Stred za účelom využitia poznatkov z mikrosimulácie. Na tejto križovatke sa v budúcnosti uvažuje o zmene radičov vo svetelnej signalizácii, ktoré majú rozdielne signalizačné plány. Križovatku tvoria dve frekventované ulice Kounicova a Kotlářská.



Obrázok 7.1: Satelitná snímka riešenej križovatky [12].

7.1 Popis ulíc

7.1.1 Doprava

- Kotlářská

Táto ulica spája niekoľko frekventovaných ulíc tým, že je na ne ortogonálne napojená. Taktiež spája niekoľko záujmových bodov v rámci Brna. Medzi tie najdôležitejšie patria mestský park Lužánky a Konečného náměstí, ktoré slúži ako prestupný uzol spájajúci trolejbusovú, ale aj električkovú trať (linky č. 3, 11, 12). Ďalším dôležitým uzlom je ulica Pionýrská, do ktorej ulica Kotlářská vyúsťuje. Po tejto ulici jazdi dôležitá linka č.1 spolu s linkou č. 6 po samostatnom dráhovom telese.

- Kounicova

Mestská radiála napojená priamo na historické centrum mesta (konkrétne pri Moravskom náměstí) a pokračuje smerom na severozápad do mestskej časti Ponava, kde ju pretína a ukončuje ulica Tábor. Táto ulica nespája z hľadiska mestskej hromadnej dopravy tak významné uzly ako ulica Kotlářská, ale aj napriek tomu nájdeme na jej koncoch napojenie na mestskú koľajovú dopravu. V prípade Moravského námestia sa jedná o linky č. 1 a 6; na druhom konci sa nachádza zástavka Klusáčkova, kde jazdi linka č. 12..

7.1.2 Členitosť ulice

- Kotlářská

Pozdĺž ulice sú vybudované obytné domy, ktoré lemujú buď malé záhradky spolu s chodníkmi, alebo samostatné chodníky. V bezprostrednej blízkosti sa nenachádzajú žiadne pozdĺžne, šikmé alebo kolmé parkovacie plochy. Jedinou prekážkou by mohol byť výjazd, resp. vjazd z Prírodovedeckej fakulty Masarykovej univerzity. Intenzity jeho vyťaženia však dosahujú zanedbateľné hodnoty, preto ho nebudem pri simulácii brať do úvahy.

- Kounicova

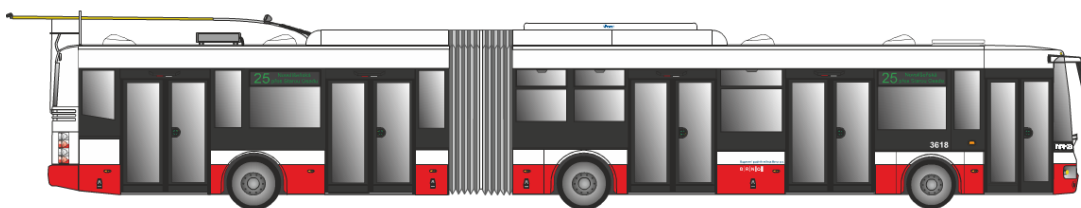
Ulica má z hľadiska šírkovej usporiadanosti podobnú koncepciu ako ulica Kotlářská. V bezprostrednej blízkosti križovatky sa na ulici nenachádza žiaden vjazd ani výjazd pre vozidlá, ktorý by ovplyvňoval kontinuitu dopravného prúdu. Jediným obmedzením je pozdĺžne parkovanie nachádzajúce sa pozdĺž pruhu smerujúceho do centra mesta za križovatkou. Tieto parkovacie miesta však slúžia ako dlhodobé parkovanie¹, preto ho budem pri modelovaní zanedbávať.

7.2 Vstupné dáta

Ako vstupné dáta budú použité údaje zo sčítania dopravy, ktoré obstarala spoločnosť Brněnské komunikace a.s. v roku 2015. Zber týchto dát prebiehal v rannej dopravnej špičke tj. od 7:30 do 8:30. V tomto čase je taktiež kapacitne najviac vyťažená mestská hromadná doprava.

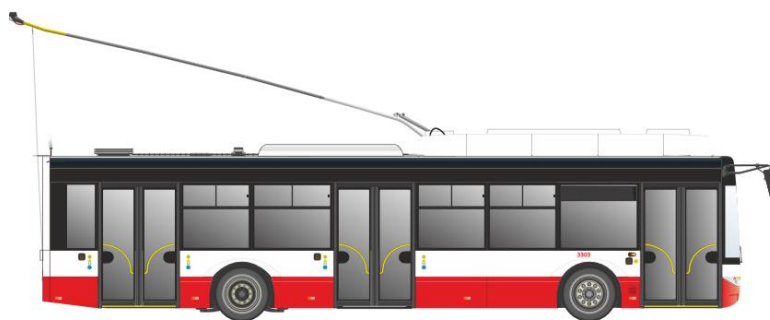
7.2.1 Mestská hromadná doprava

Cez túto križovatku jazdia linky 25 a 26 po ulici Kotlářská a po ulici Kounicova premávajú linky 32,34 a 36. Všetky tieto linky sú trolejbusové. Presná obsadenosť v trolejbuse by sa sčítavala veľmi obtiažne, preto ju budem len odhadovať na základe pozorovaní. Ako referenčné vozidlo MHD na linke 25 a 26 bude zvolený trolejbus Škoda 31Tr SOR, ktorý dokáže prepraviť až 166 cestujúcich. Na linke 32,34 a 36, jazdiacich po ulici Kounicova, bude referenčným vozidlom Škoda 26Tr s kapacitou 102 cestujúcich.



Obrázok 7.2: Trolejbus Škoda 31Tr [9].

¹ parkovanie dlhšie ako jednu hodinu



Obrázok 7.3: Trolejbus Škoda 26Tr [9].

- Stanovenie vyťaženia spoja

Na základe pozorovaní bola určená priemerná vyťaženosť spojov vo všetkých smeroch. V nasledujúcej tabuľke je vidieť, v akom smere jednotlivé spoje premávajú:

Označenie smeru	Číslo linky	Zo zástavky – do zástavky	Priemerná vyťaženosť [%]
Smer 1	25	Pionýrská – Konečného náměstí	90
	26	Pionýrská – Konečného náměstí	75
	32	Zahradníková - Sušilova	30
	34	Klusáčkova - Sušilova	25
	36	Klusáčkova - Sušilova	30
Smer 2	25	Konečného náměstí – Pionýrská	40
	26	Konečného náměstí – Pionýrská	30
	32	Sušilova – Zahradníková	15
	34	Sušilova – Klusáčkova	15
	36	Sušilova – Klusáčkova	20

Tabuľka 7.1: Spoje prechádzajúce križovatkou s priemernou obsadenosťou počas dopravnej špičky.

- Stanovenie celkového počtu cestujúcich

Na získanie údajov o počte cestujúcich bude potrebné použiť nasledovný vzťah

$$k_s \cdot v_s, \quad (7.1)$$

kde k_s predstavuje celkovú kapacitu vozidla používaného na konkrétnej linke a v_s je priemerná vyťaženosť spojov v hodnotenom časovom úseku. Tieto hodnoty sa zaokrúhľia na celé čísla.

Označenie smeru	Číslo linky	Celková kapacita	Priemerná vyťaženosť [%]	Priemerný počet cestujúcich
1	25	166	90	149
1	26	166	75	125
1	32	102	30	31
1	34	102	25	26
1	36	102	30	31
2	25	166	40	66
2	26	166	30	50
2	32	102	15	15
2	34	102	15	15
2	36	102	20	20

Tabuľka 7.2: Vychýšenie priemernej obsadenosti jednotlivých spojov počas dopravnej špičky.

- Celkový počet cestujúcich

Celkový počet cestujúcich prepravených danou križovatkou v čase medzi 7:30 a 8:30 sa stanoví podľa počtu spojov, ktoré ňou prejdú. Tento údaj následne vynásobím s priemerným počtom cestujúcich jednotlivých spojov a nakoniec spočítam.

Označenie smeru	Číslo linky	Celková kapacita	Počet spojov	Celkový počet cestujúcich
1	25	149	12	1788
1	26	125	6	750
1	32	31	7	217
1	34	26	9	234
1	36	31	9	279
2	25	66	6	396
2	26	50	11	550
2	32	15	7	105
2	34	15	9	135
2	36	21	10	210
Spolu				5130

Tabuľka 7.3: Celkový počet cestujúcich prepravených v MHD počas dopravnej špičky.

7.2.2 Individuálna automobilová doprava

- Rozdelenie pracovných a nepracovných ciest

Vzhľadom na to, že nedisponujem presným údajom, na základe odporúčaní metodiky ministerstva dopravy [5] budem uvažovať, že pomer pracovných a nepracovných ciest bude v pomere 1:9. Ďalšie delenie nepracovného času sa bude opäť opierať o metodiku, podľa ktorej je pomer medzi dojazdovými a ostatnými trasami 1:1.

- Počet cestujúcich

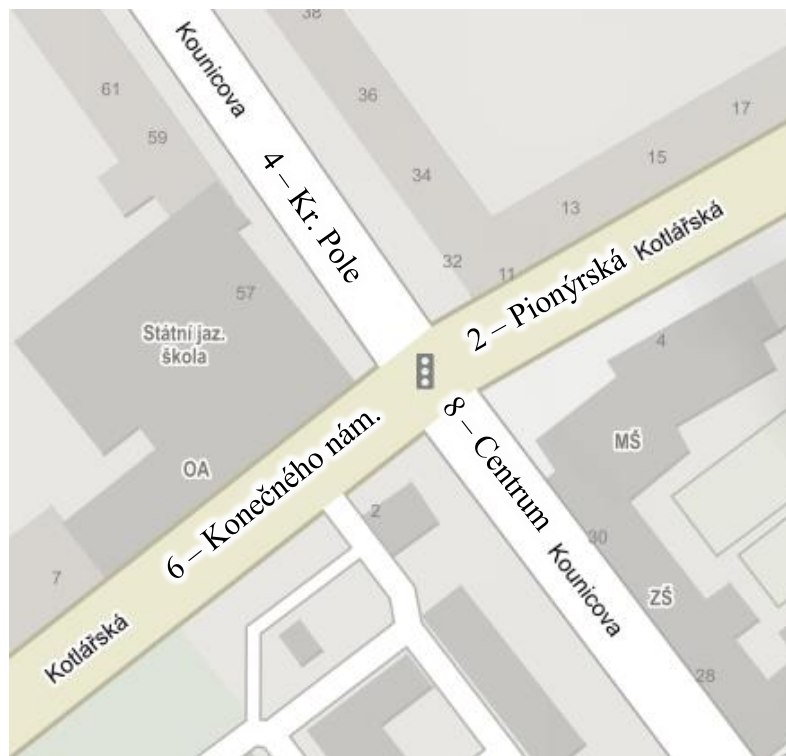
Počet cestujúcich sa stanoví pomocou jednoduchého vzťahu podobnému ako v prípade MHD

$$p_v \cdot o_v, \quad (7.2)$$

kde p_v predstavuje počet vozidiel zistených z kartogramov sčítania dopravy a parameter o_v predstavuje priemernú obsadenosť vozidiel stanovenú podľa metodiky ministerstva dopravy [5]. Táto hodnota predstavuje 1,9 cestujúceho na vozidlo.

Smer vozidiel	Počet vozidiel	Počet cestujúcich
2	543	1032
4	437	830
6	699	1328
8	361	686
Spolu		3876

Tabuľka 7.4: Celkový počet cestujúcich prepravených IAD počas dopravnej špičky.



Obrázok 7.4: Pracovné označenie smerov v riešenej križovatke [11].

7.2.3 Nákladná doprava

Keďže sa križovatka nachádza v užšom intraviláne a asi 1 km od historického centra mesta, tak nenájdeme tu vozidlá ťažkej nákladnej dopravy². Z pozorovaní bolo zistené, že po danej trase jazdia iba vozidlá ľahkej nákladnej dopravy³ a strednej nákladnej dopravy⁴. Počty vozidiel som zistil z kartogramov sčítania dopravy. Bez

² Vozidlá s hmotnosťou nad 10t s prívesom či bez prívesu.

³ Vozidlá s hmotnosťou v rozpätí do 3,5t s prívesom alebo bez prívesu.

⁴ Vozidlá s užitočnou hmotnosťou v rozpätí medzi 3,5 – 10t bez prívesu alebo s prívesom.

špeciálneho zariadenia je určenie hmotnosti nákladu nemožné, preto budem hmotnosť len odhadovať. Tento údaj bude mať aj tak pravdepodobne veľmi malú váhu v konečnom zhodnotení kvôli nízkym intenzitám týchto vozidiel.

V rezortnej metodike [5] sa nachádza tabuľka, ktorá určuje priemernú hmotnosť nákladu na jednotlivé druhy nákladnej dopravy. Pre vozidlá SN je udávaná hmotnosť 2,1 t.voz⁻¹. V nasledujúcej je vypočítaná hmotnosť celkového nákladu, ktorý sa v danom čase cez križovatku prepraví.

Smer vozidiel	Počet vozidiel	Celková hmotnosť nákladu [t]
2	27	56,7
4	28	58,8
6	54	113,4
8	26	54,6
Spolu		283,5

Tabuľka 7.5: Celková hmotnosť prepraveného nákladu v križovatke počas dopravnej špičky.

8 Tvorba modelu v programe Aimsun

Aimsun je softvérový nástroj, ktorý je veľmi úspešný na poli dopravnoinžinierskych softvérov pre simulovanie dopravného prúdu. Bol vyvinutý ako nástroj na mikroskopické modelovanie s využitím Gippsovho modelu opísanom v podkapitole 4.1. Jeho vývoj, ktorý v súčasnosti naďalej pokračuje, bol započatý v Barcelone a základný softvér bol rozšírený o množstvo nástrojov. O tento vývoj sa stará firma TSS (Transport Simulation System). Program momentálne umožňuje spracovať mikroskopický, mezoskopický a takisto aj makroskopický model dopravy. Jeho veľkou výhodou je, že tieto modely sa dajú prepojiť aj bez nutnosti použitia dodatočných nástrojov.

8.1 Mapový podklad

Ako mapový podklad pre tvorbu dopravného modelu boli použité mapy z portálu www.openstreetmap.org, ktorý umožňuje stiahnutie geometrie pomocou vymedzenia súradnicami X a Y. Ďalším mapovým podkladom bola ortofotomapa, ktorá sa vkladá

pomocou referenčných bodov. Týmto podkladom je možné spresniť geometriu modelu a pridať okolité budovy a ostatné objekty, ktoré sa nachádzajú v blízkosti.

8.2 Geometria

Zjednodušenú geometriu, ktorú je možno stiahnuť z vyššie uvedeného odkazu, nemožno použiť, pretože obsahuje množstvo nepresností, a to hlavne čo sa týka smerových a šírkových pomerov. Je preto nutné, aby bola upravená tak, že bude realite zodpovedať čo najviac a model tak bude čo najpresnejší. V programe nájdeme intuitívne rozhranie na tvorbu geometrie. Základným prvkom pre model je cesta – tú vytvoríme pomocou príkazu *Section* (Úsek); po vytvorení úseku je možné upravovať parametre danej cesty. Tie sa upravujú kliknutím pravého tlačidla na úsek, kde sa dá vybrať v kontextovom okne konkrétny parameter. V mojom prípade som volil šírku cesty, počet pruhov a rýchlosť. Po vytvorení všetkých ramien križovatky je nutné vytvoriť samotnú križovatku pomocou nástroja *Node* (Uzol), nasledovalo určenie jednotlivých odbočovacích smerov a nastavenie prednosti vozidiel. Dôležitým prvkom sú aj prechody pre chodcov, na ktoré je pripravený nástroj *Pedestrian Crossing* (Prechod pre chodcov).

8.3 Svetelná signalizácia

Nastavenie plánov svetelnej signalizácie pre oba porovnávané radiče sa realizuje pomocou nástroja *Control plan* (Signalizačný plán), pomocou ktorého sa následne vytvoria jednotlivé svetelné plány podľa smerov a odbočování. Veľmi dôležitým parametrom pri nastavovaní svetelného plánu je dĺžka jeho cyklu (*Cycle*) a doba oranžových svetiel (*Yellow Time*). Výhodou tohto nástroja je vytvorenie signálnych skupín (*Signal Groups*), čiže nie je nutné, aby sa jednotlivé parametre pre každé signalizačné zariadenie zadávali samostatne. Následne sa signalizačný plán pomocou nástroja *Master Control Plans* (Hlavné signalizačné plány) prevedie na jeden hlavný, ktorý sa použije do modelovej situácie.

8.4 Dopravné zaťaženie

Program ponúka dva spôsoby ako zadať dopravné zaťaženie do modelu. Jedným z nich je nástroj *Traffic State* (Dopravný stav), tento typ je vhodný v situáciach, v ktorých je známe presné smerové rozdelenie vozidiel na križovatkách a dopravné intenzity na jednotlivých úsekoch. Ďalšou možnosťou je *OD Matrices* (Matice), kde nie je nutné poznať jednotlivé smerové rozdelenia a zaťaženia sú vytvorené na základe matíc. Tento spôsob rozdeľuje osobnú a nákladnú dopravu na percentuálnom princípe a vytvára tzv. *Centroids* (dopravné ťažiská) v jednotlivých častiach modelu. Vzhľadom na detailnú znalosť dopravnej situácie je výhodnejšie použiť metódu *Traffic State*. Ponúka oveľa detailnejšie spracovanie situácie ako spomínané „matice“. Nástroj nájdeme cestou *Project / New / Demand Data / Traffic State*, následne sa otvorí kontextové okno, kde je k dispozícii široká škála nastavení. V prvom rade je potrebné nastaviť typ vozidiel, pre ktorý sa parametre nastavujú (*Vehicle Type*). Z ponuky je možné voliť medzi osobnými osobnými vozidlami (*car*), nákladnými vozidlami (*truck*), autobusmi (*bus*), taxíkmi (*taxi*), bicyklami (*bicycle*) a chodcami (*pedestrian*). Konkrétne smery odbočovania vozidiel sa pridávajú pomocou funkcie *Turn Info*, kde sa zadávajú jednotlivé počty vozidiel (*Input Flow*); následne sa automaticky prepočítajú aj percentuálne smerové rozdelenia. Dôležitým parametrom je aj počiatkový čas simulácie (*Initial Time*) a doba jej trvania (*Duration*).

Čas simulácie je stanovený od 7:30 do 8:30, čo predstavuje hlavnú dopravnú špičku v priebehu pracovného dňa.

- IAD a nákladná doprava

Údaje o dopravnom zaťažení individuálnou automobilovou dopravou a nákladnou dopravou pochádzajú z kartogramov, ktoré vyhotovila spoločnosť Brněnské komunikace a.s. v roku 2015. Toto zaťaženie sa do programu vloží pomocou vyššie spomínanej funkcie *Traffic State*, avšak pre IAD a nákladnú dopravu sa údaje zadajú separátne zvolením možnosti *car* resp. *truck*.

- Mestská hromadná doprava

Zaťaženie mestskou hromadnou dopravou bolo zistené pomocou aktuálnych cestovných poriadkov planých ku dňu 14.5.2019. Tieto dáta boli získané z webovej

stránky <http://www.jrbrno.cz> [10]. Postup vloženia údajov do modelu je odlišný ako v predchádzajúcom prípade. Na vloženie sa využíva nástroj *Public Transport Line* (Trasy verejnej dopravy), kde je možné pre rôzne smery vytvoriť trasy jednotlivých liniek s ich časovým rozvrhom prejazdu cez križovatku. Ak by boli v území aj zastávky, je možné ich vymodelovanie s následnou dobou zdržania na konkrétnej zastávke. Po vytvorení trás liniek s ich časovými rozvrhmi je možné pomocou nástroja *Public Transport Plan* (plán verejnej dopravy) vytvoriť kompletný plán hromadnej dopravy pre následnú simuláciu.

8.5 Simulácia

Po vytvorení všetkých vstupných dát a ich transformovaní do programu Aimsun je možné pristúpiť k samotnej simulácii. Na spustenie simulácie je nutné vytvoriť scenáre pomocou nástroja *Dynamic Scenario* (dynamický scenár). V tomto prípade pôjde o dva separátne scenáre znázorňujúce statický a dynamický plán svetelnej signalizácie na križovatke. Všetky ostatné dáta budú v oboch prípadoch totožné. Pre zaistenie čo najreálnejšej simulácie ihneď od nulového času jej spustenia je nutné pomocou funkcie *Warm Up* (zahrievanie) nastaviť čas, do ktorého sa dostane simulácia na pozadí. V čase spustenia simulácie tak už bude situácia odpovedať plynulo prúdiacej premávke. Pre každý scenár prebehlo 10 replikácií a zo získaných hodnôt bol spočítaný priemer, ktorý bol zahrnutý do úvahy pri záverečnom vyhodnocovaní.

9 Vyhodnotenie simulácie s ekonomickým porovnaním

9.1 Údaje zo simulácie v programe

Program Aimsun ponúka ako výstup zo simulácie niekoľko nameraných parametrov. Medzi tie najrelevantnejšie pre ekonomické zhodnotenie patrí čas zdržania, cestovný čas a čas státia jednotlivých vozidiel. Údaje v Tabuľka 9.1 a Tabuľka 9.2 sú uvedené ako priemerná hodnota na jedno vozidlo.

Variant	Typ dopravy	Zdržanie [s.km ⁻¹]	Cestovný čas [s.km ⁻¹]	Čas státia [s.km ⁻¹]
Statický plán	IAD, ND	99	165	87
	MHD	93	164	74
Dynamický plán	IAD, ND	87	157	74
	MHD	63	136	47

Tabuľka 9.1: Hodnoty výsledných parametrov získaných z programu Aimsun.

Rozdiel	Typ dopravy	Zdržanie [s.km ⁻¹]	Cestovný čas [s.km ⁻¹]	Čas státia [s.km ⁻¹]
Rozdiel	IAD, ND	12	8	13
	MHD	30	28	27

Tabuľka 9.2: Rozdiely medzi porovnávanými variantmi.

Namerané hodnoty ukazujú, že najväčší rozdiel je v mestskej hromadnej doprave, ktorá je uprednostňovaná pred ostatnými druhmi dopravy. Táto skutočnosť je zapríčinená tým, že dynamický svetelný plán pomocou detektorov identifikuje príchod vozidla MHD do križovatky a tak upraví interval podľa potreby tak, aby mohlo vozidlo križovatku čo najrýchlejšie opustiť.

9.2 Ekonomické porovnanie variant

Simulované varianty svetelných plánov budú porovnané na základe informácií a dát, ktoré boli popísané v kapitole 6 a 7. Vzhľadom na to, že program Aimsun uvádza cestovný čas t_t v s.km⁻¹ pre jedno vozidlo, je nutné previesť túto hodnotu na údaj, ktorý nebude závislý na vzdialenosti a bude odpovedať iba riešenej križovatke. Na získanie

takejto hodnoty je nutné prenásobiť hodnotu cestovného času dĺžkou d_n , ktorá predstavuje dĺžku ramena simulovanej križovatky. Pretože jednotlivé ramená v modeli boli vytvorené až po úroveň ďalšej križovatky, vydeli sa táto dĺžka dvomi. Výsledkom bude teda čistý cestovný čas t_c pre konkrétnu križovatku

$$t_c = \frac{d_1 + d_2 \dots + d_n}{2} \cdot t_t. \quad (9.1)$$

9.2.1 IAD a MHD

Tieto dva druhy dopravy majú rovnaký parameter pre vyhodnotenie celkového cestovného času, pretože používajú prepočet na cestujúcich. Na to, aby bolo možné vyčíslieť konkrétnu sumu za usporovaný čas v českých korunách, je nutné počet cestujúcich prenásobiť čistým cestovným časom a hodnotou času podľa rezortnej metodiky [5]. Takýmto spôsobom je možné vyčíslieť celkovú hodnotu cestovného času za dobu skúmania, t. j. ranná dopravná špička v pracovnom dni.

				Statický plán	Dynam. plán		
Typ cestovného času		Typ dopravy	Počet cestu- júcich	Hodnota cest. času [Kč.hod ⁻¹]	Hodnota cest. času [Kč.hod ⁻¹]	Rozdiel [%]	
Pracovný čas		MHD	513	3 349,06	2 777,27	17,1	
		IAD	388	3 172,85	3 019,01	4,9	
Nepra- covný čas	Krátka dochádzka	MHD	1616	3 679,52	3 051,31	17,1	
		IAD	1221	3 894,31	3 705,49	4,9	
	Dlhá dochádzka	MHD	693	2 027,56	1 681,39	17,1	
		IAD	523	2 142,10	2 038,24	4,9	
	Ostatné – krátka vzdialenosť	MHD	1616	3 082,73	2 556,41	17,1	
		IAD	1221	3 264,34	3 106,07	4,9	
	Ostatné – dlhá vzdialenosť	MHD	693	1 699,14	1 409,05	17,1	
		IAD	523	1 793,78	1 706,81	4,9	
	Spolu			9006	28 105,39	25 051,05	10,9

Tabuľka 9.3: Celkové hodnoty cestovného času porovnávaných variantov pre MHD a IAD v čase dopravnej špičky.

Z relatívneho rozdielu medzi variantmi vyplýva, že v čase dopravnej špičky má najväčší podiel na úspore práve MHD vďaka množstvu prepravených pasažierov. Pre čo najpresnejšie výsledky by bolo vhodné previesť simuláciu trvajúcu 24 hodín. Avšak dá sa očakávať, že počet ľudí prepravených v MHD bude mierne klesať.

Aby bolo možné stanoviť celkovú hodnotu uspareného času za obdobie celého roka, je potrebné previesť extrapoláciu výsledkov. Tú som realizoval pomocou hodnôt zo sčítania dopravy za 24 hodín s odhadom počtu cestujúcich s ohľadom na vyťaženosť MHD v danom čase. V prípade IAD však obsadenosť vozidla ostáva rovnaká.

Časové obdobie	Počet cestujúcich	Hodnota uspareného času [Kč]
Ranná špička	3 876	691,75
Pracovný deň	48 726	8 696,07
Rok	15 251 082	2 721 868,36

Tabuľka 9.4: Hodnoty uspareného času pre IAD za jednotlivé časové obdobia.

Časové obdobie	Počet cestujúcich	Hodnota uspareného času [Kč]
Ranná špička	5 130	2 362,59
Pracovný deň	25 948	11 950,29
Rok	7 177 217	3 305 459,38

Tabuľka 9.5: Hodnoty uspareného času pre MHD za jednotlivé časové obdobia.

9.2.2 Nákladná doprava

Na získanie finančného výsledku z porovnávaných variantov pre ND sa použije rovnaký princíp ako pre IAD a MHD. Jediný rozdiel predstavuje odlišný parameter v podobe hmotnosti prepravovaného nákladu.

	Statický plán	Dynamický plán	
Hmotnosť prepravovaného nákladu [t]	Celková hodnota cestovného času [Kč.hod ⁻¹]	Celková hodnota cestovného času [kč.hod ⁻¹]	Rozdiel [%]
283,5	334,99	318,75	4,9

Tabuľka 9.6: Celkové hodnoty cestovného času porovnávaných variantov pre ND v čase dopravnej špičky.

Z tabuľky 9.6 sa dá vyčítať, že rozdiel v nákladnej doprave nepredstavuje veľkú finančnú zmenu. Spôsobuje to fakt, že križovatkou prechádza malé množstvo vozidiel s nízkou hmotnosťou nákladu.

Stanovenie hodnoty uspareného času pre nákladnú dopravu sa taktiež vyčíslí extrapoláciou. Postup je rovnaký ako pre IAD, pretože sa neočakávajú výrazné výkyvy hmotnosti prepraveného tovaru v závislosti na čase.

Časové obdobie	Hmotnosť nákladu	Hodnota uspareného času [Kč]
Ranná špička	283,5	16,24
Pracovný deň	4 143,3	237,34
Rok	1 081 401,3	61 946,94

Tabuľka 9.7: Hodnoty uspareného času pre ND za jednotlivé časové obdobia.

10 Záver

Simulovanie dopravy na mikroskopickej úrovni potvrdilo svoju kľúčovú úlohu pri dopravno-organizačných zmenách dopravy, pretože ponúka dôležité informácie pre ekonomické porovnanie dvoch typov radičov vo svetelno-signalizačnom zariadení. V jednotlivých kapitolách som sa snažil priblížiť pomery na skúmanej križovatke v podobe dopravných pomerov z hľadiska mesta Brna, ale aj z hľadiska členitosti a pomerov v križovatke.

Cieľom tejto práce bolo podrobiť výsledky zo simulácie analýze s dôrazom na ekonomickú efektivitu zmeny radičov.

Na základe údajov získaných z nasimulovaných variantov a hodnôt cestovného času uvedených v Rezortnej metodike Ministerstva dopravy ČR sa mi podarilo vyčíslit' konkrétnu časovú úsporu pre skúmané časové obdobie jedného roku – tá činí 6 089 275 Kč. Moje porovnanie preukázalo, že variant s dynamickým svetelným plánom je ekonomicky výhodnejší a prinesie celkové zrýchlenie dopravy v križovatke.

Zdroje

- [1] APELTAUER T. *Generické vlastnosti modelů dopravního proudu*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky, 2010. 133 s., 26 s. příloh. Doktorská práce. Vedoucím práce byl doc. RNDr. Jiří Macur, CSc.
- [2] BARCELÓ, J., ed. *Fundamentals of Trac Simulation. International Series in Operations Research & Management Science*. Springer, 2010.
- [3] GIPPS, P. *A behavioural car-following model for computer simulation. Transportation Research Part B: Methodological*. 1981.
- [4] HIGGS, Bryan, Montasir M. ABBAS a Alejandra MEDINA. Analysis of the Wiedemann Car Following Model over Different Speeds using Naturalistic Data [online]. 2011 [cit. 2019-04-10] Dostupné z: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/conferences/2011/RSS/3/Higgs.B.pdf>
- [5] KOLEKTIV AUTORŮ. Rezortní metodika pro hodnocení ekonomické efektivity projektů dopravních staveb. 1. vyd. Praha: Státní fond dopravní infrastruktury, 2018, 158 s., 254 s. příl. ISBN 978-80-907177-6-3.
- [6] ODGAARD, T., et al. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment – Deliverable 5 Proposal for Harmonised Guidelines [online]. Denmark, 2006. 193 s. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z <http://heatco.ier.unistuttgart.de/hd1final.pdf>
- [7] AF-CITYPLAN spol. s r. o.; Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. *Příručka pro tvorbu a hodnocení mikroskopických simulací dopravy*, 2013.
- [8] *Interaktivna mapa sčítania dopravy* [online]. ©2017 [cit. 2019-05-10] Dostupné z: <http://scitani2016.rsd.cz/pages/map/default.aspx>
- [9] Obrázky trolejbusov [online] ©2019 [cit. 2019-05-14] Dostupné z <https://www.bmhd.cz/vehicle-overview/category?category=trolejbusy>
- [10] Cestovné poriadky [online] ©2019 [cit. 2019-05-14] Dostupné z <http://www.jrbrno.cz>
- [11] *Dopravná mapa* [online]. ©2019 [cit. 2018-05-20] Dostupné z: <https://www.mapy.cz/dopravni>
- [12] *Letecké snímky* [online]. ©2019 [cit. 2018-05-20] Dostupné z: <https://www.mapy.cz/letecka>

Zoznam obrázkov

Obrázok 4.1: Schéma parametrov modelu.	18
Obrázok 4.2: Schéma Wiedemannovho modelu so zobrazením jednotlivých jazdných režimov [4].....	22
Obrázok 4.3: Znázornenie vplyvu parametru δ na priebeh rýchlosti a zrýchlenie vozidla v prípade, že nebude obmedzované žiadnymi vonkajšími vplyvmi. Zvolené parametre pre znázornenie: $a_0=1,4 \text{ ms}^{-2}$, $v_0=120\text{km.h}^{-1}$	25
Obrázok 5.1: Ilustrácia rozsiahlosti dopravných modelov.	27
Obrázok 5.2: Kartogram ciest zo sčítania dopravy 2016 [8].....	29
Obrázok 7.1: Satelitná snímka riešenej križovatky [12].	35
Obrázok 7.2: Trolejbus Škoda 31Tr [9].	37
Obrázok 7.3: Trolejbus Škoda 26Tr [9].	38
Obrázok 7.4: Pracovné označenie smerov v riešenej križovatke [11].	41

Zoznam tabuliek

Tabuľka 4.1: Prehľad jednotlivých parametrov modelu IDM spoločne s ich typickými a zmysluplnými hodnotami. Parameter $\delta=4$ [1].....	26
Tabuľka 6.1: Hodnoty (CÚ 2002 a 2017) [5].	32
Tabuľka 7.1: Spoje prechádzajúce križovatkou s priemernou obsadenosťou počas dopravnej špičky.	38
Tabuľka 7.2: Vyčíslenie priemernej obsadenosti jednotlivých spojov počas dopravnej špičky.	39
Tabuľka 7.3: Celkový počet cestujúcich prepravených v MHD počas dopravnej špičky.	40
Tabuľka 7.4: Celkový počet cestujúcich prepravených IAD počas dopravnej špičky.	41
Tabuľka 7.5: Celková hmotnosť prepraveného nákladu v križovatke počas dopravnej špičky.	42
Tabuľka 9.1: Hodnoty výsledných parametrov získaných z programu Aimsun.	46
Tabuľka 9.2: Rozdiely medzi porovnávanými variantmi.	46
Tabuľka 9.3: Celkové hodnoty cestovného času porovnávaných variantov pre MHD a IAD v čase dopravnej špičky.	47
Tabuľka 9.4: Hodnoty uspokojeného času pre IAD za jednotlivé časové obdobia.....	48
Tabuľka 9.5: Hodnoty uspokojeného času pre MHD za jednotlivé časové obdobia.....	48
Tabuľka 9.6: Celkové hodnoty cestovného času porovnávaných variantov pre ND v čase dopravnej špičky.	49
Tabuľka 9.7: Hodnoty uspokojeného času pre ND za jednotlivé časové obdobia.	49