

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Stavebná fakulta
Katedra cestného a environmentálneho inžinierstva

Autoreferát dizertačnej práce na získanie
akademického titulu „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

VÝSKUM VPLYVU SATURÁCIE DOPRAVNÉHO PRÚDU NA FUNKCIE ZDRŽANIA

Ing. Adam Kníž

Žilina jún 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v rámci denného doktorandského štúdia na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline.

Predkladateľ: Ing. Adam Kníž
Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta
Katedra cestného a environmentálneho inžinierstva
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Školiteľ: doc. Ing. Andrea Kociánová, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta
Katedra cestného a environmentálneho inžinierstva
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Oponenti: 1. prof. Ing. Ján Čelko, CSc.
Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta
Katedra cestného a environmentálneho inžinierstva
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

2. doc. Ing. Ján Petrů, Ph.D.
VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební
Katedra dopravního stavitelství
Ludvíka Poděštlě 1875/17, 708 00 Ostrava

3. Ing. Igor Ripka, PhD.
IR DATA
Pohraničníkov 51, 851 10 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa
Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o hod.
v zasadačke dekanátu AE 307 na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná
8215/1, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou spoločnou odborovou
komisiou dňa

študijný odbor: stavebníctvo
študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

S dizertačnou prácou sa možno oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

Predseda odborovej komisie
prof. Ing. Marián Drusa, PhD.

ÚVOD	4
1 SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY DOMA A V ZAHRANIČÍ....	4
1.1 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNATKOV NA SLOVENSKU	5
1.2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNATKOV V ZAHRANIČÍ.....	5
2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	6
3 METODIKA DIZERTAČNEJ PRÁCE	7
4 ANALÝZA A VÝSLEDKY	7
4.1 CHARAKTERISTICKÉ ÚSEKY DVOJPRUHOVÝCH CIEST V NEZASTAVANOM ÚZEMÍ....	7
4.2 POROVNANIE METÓD MERANIA ÚSEKOVEJ RÝCHLOSTI	9
4.3 POROVNANIE METÓD ODHADU KAPACITY	14
4.4 VÝBER VHODNÝCH TVAROV FUNKCIÍ ZDRŽANIA	15
4.5 KALIBRÁCIA HODNÔT PARAMETROV FUNKCIÍ ZDRŽANIA	18
4.6 VPLYV SATURÁCIE NA CESTOVNÝ ČAS	20
5 ZÁVER	22
5.1 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE	23
5.2 ODPORÚČANIA PRE ĎALŠÍ VÝSKUM.....	24
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	24
PUBLIKOVANÉ ČLÁNKY	26

ÚVOD

Dopravné inžinierstvo je neoddeliteľnou súčasťou modernej spoločnosti. Bez efektívnej fungujúcej dopravy nie je možný jej rast ani udržateľný rozvoj. Hlavným cieľom tohto odboru je zlepšovanie dopravy po kvantitatívnej aj kvalitatívnej stránke. Súčasné plánovanie čoraz viac využíva modelovanie a simuláciu na testovanie dopravných scenárov bez potreby ich fyzickej realizácie.

Kľúčovým nástrojom strategického plánovania sú makroskopické dopravné modely. Ich slabinou je však obmedzená schopnosť realisticky zachytiť kongescie. V reálnych podmienkach nárast intenzity dopravy vedie k zhoršeniu jej plynulosti, no v tradičných modeloch možno dopravnú sieť teoreticky zaťažovať bez hraníc, čo vedie k nepresnému výsledku a chýbajúcemu mechanizmu prirodzenej redistribúcie.

Na zlepšenie presnosti sa používajú tzv. funkcie zdržania, ktoré matematicky vyjadrujú vzťah medzi intenzitou, kapacitou a cestovným časom. Tieto funkcie znižujú atraktivitu preťažených úsekov a podporujú presmerovanie dopravy na menej zaťažené trasy.

Problémom však zostáva, že väčšina týchto funkcií vznikla v zahraničí a nezohľadňuje špecifiká slovenského prostredia – napríklad kvalitu ciest, zloženie vozidlového parku, či miestnu dopravnú kultúru.

Cieľom tejto dizertačnej práce je preto overiť možnosti adaptácie a kalibrácie existujúcich funkcií zdržania pre Slovensko. Výsledky prispejú k presnejšiemu modelovaniu a efektívnejšiemu plánovaniu udržateľnej dopravnej infraštruktúry.

1 SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY DOMA A V ZAHRANIČÍ

Funkcie zdržania pozemných komunikácií sú súčasťou distribúcie ciest, modálneho rozdelenia a priradenia dopravy na sieť v štvorstupňovom makroskopickom modeli dopytu po cestovaní. Funkcie zdržania stavajú na teórii dopravného prúdu, a teda využívajú princíp fundamentálnej rovnice a popis správania dopravného prúdu fundamentálnym diagramom. Existujú rôzne spôsoby ich opisu a rôzna terminológia. Funkcie zdržania pozemných komunikácií sa tiež nazývajú ako: a) funkcie cestovného času [1], [2], [3], [4], b) funkcie kapacity [5], [6], c) funkcie výkonnosti [7], [8], [9] alebo d) nákladové funkcie [10].

Funkcie zdržania spájajú dva základné dopravné parametre pomocou nelineárnych matematických výrazov. Nezávislý parameter, intenzita, vyjadruje úroveň dopravného dopytu a závislý parameter, zdržanie, vyjadruje zhoršenie rýchlosti dopravy pri zvyšovaní dopytu. Skutočný trend medzi intenzitou a oneskorením je vlastnosťou pozemnej komunikácie a súvisí s faktormi, ako sú napr. obmedzenie rýchlosti, šírka, geometria a prítomnosť cestného mobiliáru a v prípade najnovších výskumov, ako prezentoval Knoop [9] a Pan a kol. [45] sa zavádza aj vplyv poveternostných podmienok.

Možno povedať, že funkcie zdržania boli vyvinuté na kvantifikáciu rozhodovacieho procesu vodiča pri výbere optimálnej trasy na základe dopravných podmienok a cestovných nákladov. Táto kvantifikácia sa uvádza pomocou cestovného času. Okrem toho je cestovný čas silne ovplyvnený priemernou rýchlosťou dopravného prúdu, takže rýchlosť možno použiť ako rovnocenný ukazovateľ kvality dopravy. Spiess [11] tvrdí, že v zásade každý vzorec funkcie zdržania vyjadruje cestovný čas ako súčin cestovného času voľného prúdu t_0 a normalizovanej

funkcie zdržania $f(x)$, kde $f(x)$ je funkcia daná pomerom intenzity ku kapacite (q/C), často nahradená x :

$$t(q) = t_0 * f(x); x = \frac{q}{C}. \quad (1)$$

1.1 Prehľad súčasného stavu poznatkov na Slovensku

Napriek aktívnej tvorbe modelov na Slovensku, neexistuje žiaden dokument, ktorý by sa zaoberal funkciami zdržania a ich kalibráciou. Slovenskí výskumníci venujú svoju pozornosť oblasti dopravného modelovania (napr. Čelko a kol. [12], [13] a Cingel a kol. [14]), avšak kalibrácií funkcií zdržania sa žiaden výskum nevenoval. V roku vzniku tejto práce (2025) existuje na Slovensku jediný dokumenty venujúci sa dopravnému modelovaniu, Metodická príručka k zostave dopravných modelov a dopravných prognóz V1.1 [15]. Metodická príručka vysvetľuje čitateľovi základnú podstatu funkcií zdržania. Zdôrazňuje potrebu stanovenia parametrov funkcií zdržania pre hrany a uzly cestnej siete, pričom ako najčastejšie používané uvádza funkcie zdržania vyvinuté v USA, BPR a BPR 2. Avšak, aj napriek tomu, že požaduje priradiť všetkým pozemným komunikáciám vhodnú funkciu zdržania, neuvádza žiadnu metódu, ktorá by sa podrobnejšie venovala ich voľbe a kalibrácii. Z tohto dôvodu si v praxi tvorcovia dopravných modelov často vyberajú vhodnú funkciu zdržania na základe svojich skúseností. Príkladom matematických formulácií využívajúcich sa v podmienkach SR, môže byť národný dopravný model SR (obrázok 1), kde sa využíva najmä funkcia BPR a Exponencionálna funkcia. Treba však podotknúť, že ani v prípade národného modelu nebola overená vhodnosť použitia týchto funkcií.

Number: 100	No	GType	Name	Strict	Rank	TSysSet	NumLanes	CapPrT	VOPrT	VMePrT	VdRto
1	0	0 D-4			1	R,08,LG,VB,INV	2	37000	120km/h	80km/h	
2	1	0 D-4			1	R,08,LG,VB,INV	3	55000	120km/h	80km/h	
3	2	0 neobazano			21	F,LP	0	0	0km/h	0km/h	
4	3	0 D-4-T			1	R,08,LG,VB,INV	2	37000	80km/h	50km/h	
5	4	0 Transhment De			1	FR	3	55000	80km/h	50km/h	
6	5	0 Transhment Inl			21	FR	0	0	0km/h	0km/h	
7	6	0 Transhment Ra			21	FR	0	0	0km/h	0km/h	
8	7	0 Transhment Ra			21	FR	0	0	0km/h	0km/h	
9	8	0 ram-D-pr			1	R,08,LG,VB,INV	1	25000	70km/h	10km/h	
10	9	0 ram-D-npr			1	R,08,LG,VB,INV	1	25000	50km/h	10km/h	
11	10	1 R-4			2	R,08,LG,VB,INV	2	37000	120km/h	80km/h	
12	11	1 R-6			2	R,08,LG,VB,INV	3	55000	120km/h	80km/h	
13	12	1 R-2			2	R,08,LG,VB,INV	1	13000	80km/h	80km/h	
14	13	1 R-4-T			2	R,08,LG,VB,INV	2	37000	80km/h	50km/h	
15	14	1 R-6-T			2	R,08,LG,VB,INV	3	55000	80km/h	50km/h	
16	15	1 R-2-T			2	R,08,LG,VB,INV	1	13000	80km/h	50km/h	
17	16	1 neobazano			21	F,LP	0	0	0km/h	0km/h	
18	17	1 nachsamm			21	F,LP	0	0	0km/h	0km/h	

VD Functions	No	Name	Description
1	1	constant	
2	2	BPR (2.00 3.00 1.00)	
3	3	EXPONENTIAL (5.00 5.00 1.00 20)	
4	4	BPR (1.00 5.00 1.30)	
5	5	BPR (1.05 5.00 1.20)	
6	6	BPR (1.10 5.00 1.10)	
7	7	BPR (1.15 5.00 1.05)	
8	8	BPR (1.20 2.00 1.20)	
9	9	BPR (1.25 2.00 1.20)	
10	10	BPR (0.40 0.90 10.00)	
11	11	BPR (1.20 3.00 10.00)	
12	12	BPR (1.20 1.00 10.00)	

Obrázok 1. Matematické formulácie funkcií zdržania použité v národnom dopravnom modeli SR, zdroj: MINDOP.

1.2 Prehľad súčasného stavu poznatkov v zahraničí

Vo všeobecnosti možno povedať, že nové VDF sa v súčasnosti objavujú zriedkavo. Výskum VDF sa začal koncom 50. rokov a odvtedy je aktívnou oblasťou výskumu, pričom Pan a kol. [16] tento výskum rozdelil do troch hlavných fáz: (1) aktívny vývoj modelov pre rôzne formy

VDF pred rokom 1995, (2) súvisiaci vývoj algoritmov pre obsiahnutie kapacitných obmedzení pri statickom prideľovaní dopravy v rokoch 1995 až 2010 a (3) plánovacie aplikácie a kalibrácia VDF po roku 2010. Za najdôležitejší výskum prvého obdobia možno považovať návrh funkcií zdržania: BRP (1964), Davidson a jej modifikácie [17], [18], [19], Kónická [11] a Akcelik [20]. Druhé obdobie bolo dôležité z hľadiska porovnávacej analýzy. Možno spomenúť napríklad výskum Kalaceho [21], ktorý porovnal odhady cestovného času vypočítané funkciami BPR, Kónická a Akcelik. Mtoi a Moses [22] vykonali komparatívnu analýzu medzi funkciami BPR, Kónická, Akcelik a modifikovaná Davidsonova v rámci komparatívnej analýzy rýchlosti a saturácie na zachytenie funkčných charakteristík funkcií zdržania. Skúmaná bola aj citlivosť rýchlosti vzhľadom na úroveň preťaženia pre vybrané typy ciest s cieľom vyhodnotiť špecifickú výkonnosť jednotlivých matematických formulácií funkcií zdržania. Z tretieho obdobia možno spomenúť najnovší výskum, ktorý sa zameriava na revíziu bežne používaných funkcií zdržania pre konkrétne dopravné podmienky autorov Šarić a Lovrić [23]. Okrem toho sa výskumníci snažia lepšie špecifikovať vstupné údaje alebo zvýšiť presnosť funkcií pre ich implementáciu v systémoch IDS [24]. Za týmto účelom, sa snažia vedci navrhnúť nové reprezentácie pomerov objemu a kapacity vo funkciách BPR ([25], [26]). Okrem toho prebieha výskum funkcií založených na oblasti namiesto hrán [27], ako aj výskum na tému zmiešanej dopravy s autonómnymi vozidlami a využívanie nových zdrojov dopravných údajov [28], [29]. V najnovších výskumných trendoch je bežné zamerať sa na špecifické podmienky, ako je vplyv geometrie cesty [27] alebo vplyv dažďa [30] na kalibráciu týchto funkcií alebo parametrizáciu VDF pre konkrétne úseky infraštruktúry [23], okresné oblasti [31], mestá alebo regióny [24].

2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Z analýzy domácich a zahraničných zdrojov vyplýva, že funkcie zdržania predstavujú kľúčový prvok v procese dopravného modelovania. Napriek množstvu matematických formulácií a ich vývoju však neexistuje všeobecne akceptovaný postup, ako zvoliť najvhodnejší typ funkcie zdržania, obzvlášť pre dvojpruhové cesty v nezastavanom území. Rovnako absentujú odporúčané hodnoty ich parametrov. V praxi tak vzniká neistota, ktorá môže negatívne ovplyvniť presnosť a použiteľnosť dopravných modelov. Moderné technológie však zároveň otvárajú nové možnosti pre zber dát a kalibráciu funkcií zdržania. Zvlášť atraktívne sú crowdsourcované dáta získavané od užívateľov mobilných zariadení, ktoré umožňujú zber dát v reálnom čase a vo veľkom rozsahu.

V rámci obhajoby projektu dizertačnej práce boli schválené nasledovné ciele dizertačnej práce:

1. Kritická analýza prístupov k výpočtu kapacity a identifikácia vplyvu saturácie na cestovný čas.
2. Výber vhodných typov funkcií zdržania pre vybrané charakteristické úseky dvojpruhových ciest na základe výsledkov experimentálnych meraní.
3. Určenie hodnôt parametrov vybraných typov funkcií zdržania zohľadňujúcich stupeň saturácie dopravného prúdu.
4. Posúdenie využitia získaných dát z rôznych zdrojov dopravných dát pre určenie funkcií zdržania.

Očakávaným prínosom práce je návrh spresnených funkcií zdržania kalibrovaných pre slovenské podmienky, ktoré budú odrážať reálne dopravné správanie na dvojpruhových

cestách v nezastavanom území. Takto navrhnuté funkcie nájdu uplatnenie pri tvorbe a aktualizácii makroskopických dopravných modelov, čím sa zvýši ich predikčná schopnosť a praktická použiteľnosť pri plánovaní dopravnej infraštruktúry.

3 METODIKA DIZERTAČNEJ PRÁCE

Metodický postup spracovania dizertačnej práce pozostáva z nasledujúcich fáz a úloh:

Fáza I - Prípravná fáza

1. Stanovenie charakteristických úsekov ciest potrebných pre komplexný výskum funkcií zdržania.
2. Identifikácia vhodných charakteristických úsekov v realite.
3. Analýza identifikovaných úsekov a stanovenie ich detailných charakteristík z hľadiska geometrie a dopravného zaťaženia.
4. Zhodnotenie úplnosti vzorky identifikovaných úsekov a rozhodnutie o nutnosti simulovania chýbajúcich charakteristických úsekov.

Fáza II - Experimentálna fáza

5. Stanovenie metód vykonania dopravných prieskumov.
6. Vykonanie dopravných prieskumov na identifikovaných úsekoch.
7. Vyhodnotenie dopravných prieskumov, analýza kvality získaných dát a zhodnotenie využiteľnosti jednotlivých metód zberu dát.

Fáza III - Aplikačná fáza

8. Preskúmanie a kritická analýza existujúcich prístupov k výpočtu kapacity ciest.
9. Stanovenie kapacity úsekov a rýchlosti voľného dopravného prúdu na základe experimentálnych meraní a teoretických prístupov.
10. Kalibrácia mikroskopického simulačného softvéru PTV Vissim pre vybrané charakteristické úseky.
11. Voľba vhodných typov funkcií zdržania na základe experimentálnych dát.
12. Stanovenie kapacity simulovaných úsekov a rýchlosti voľného dopravného prúdu.
13. Kalibrácia parametrov vybraných funkcií zdržania na základe mikrosimulácie.
14. Tvorba súboru parametrov funkcií zdržania pre charakteristické úseky ciest použiteľného v makroskopických dopravných modeloch v podmienkach Slovenskej republiky.

4 ANALÝZA A VÝSLEDKY

4.1 Charakteristické úseky dvojpruhových ciest v nezastavanom území

Intenzita dopravy bola zvolená ako primárna hodnotiaca veličina pri výbere vhodných cestných úsekov. Preskúmaných bolo viac ako 30 úsekov, pričom ako najvhodnejší bol identifikovaný úsek cesty I/18 medzi mestom Žilina a obcou Kral'ovany. Na úseku cesty I/18 bolo spolu identifikovaných 6 čiastkových úsekov: (1) Žilina, (2) Lúčka, (3) Jánošíkovo, (4) Kral'ovany, (5) Ratkovo a (6) Strečno. Každý čiastkový úsek bol analyzovaný v oboch smeroch (AB a BA) samostatne. Všetkých šesť vybraných úsekov má totožné usporiadanie v priečnom reze s celkovou šírkou 11,5 metra, dvoma jazdnými pruhmi šírky 3,5 metra a 1,5 metra širokými krajinicami. Dĺžka úsekov v rozmedzí 820 až 1 530 m je v súlade s TP 102. Geometrické charakteristiky úsekov sú uvedené v tabuľke 2.

Tabuľka 1. Geometrické charakteristiky čiastkových úsekov cesty I/18.

Čiastkový úsek	Kategóriová šírka [m]	Dĺžka [km]	Maximálny pozdĺžny sklon[%]	Trieda stupania [-]	Krivolakosť [gon/km]	Trieda krivolakosti [-]
Žilina	11.5	1.38	-0.8 (+0.8)	1 (1)	35	1
Lúčka	11.5	1.53	-0.9 (+0.9)	1 (1)	150	3
Jánošíkovo	11.5	1.36	+2.7 (-2.7)	1 (1)	149	3
Kraľovany	11.5	1.22	+0.7 (-0.7)	1 (1)	204	4
Ratkovo	11.5	0.85	-5.5 (+5.5)	1 (2)	38	1
Strečno	11.5	0.82	-4.2 (+4.2)	1 (2)	67	2

Ak sa hodnoty v smere AB a BA líšia, tabuľka najprv uvádza údaj pre smer AB, pričom údaj pre smer BA je doplnený v zátvorke.

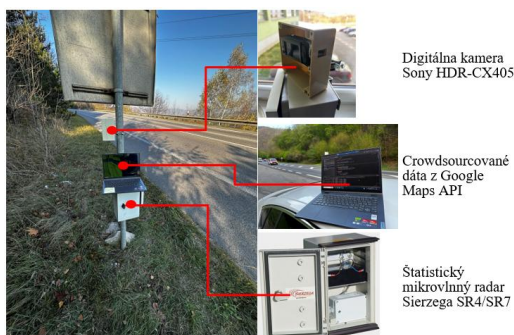
Tabuľka 3 obsahuje prehľad základných údajov o intenzite DP, podiely ťažkých vozidiel a rýchlostných charakteristikách. Hodnota RPDI bola prevzatá od Slovenskej Správy Ciest z Celoštátneho sčítania dopravy v roku 2022 a 2023. Priemerná denná intenzita bola vypočítaná len z pracovných dní a zahŕňa iba tie dni, pre ktoré bol k dispozícii kompletný 24-hodinový záznam. Maximálna hodinová intenzita sa vypočítala z údajov za všetky dni v týždni. Rýchlostné ukazovatele boli odvodené z radarových meraní a v tejto časti slúžia iba ako orientačný prehľad.

Tabuľka 2. Základné dopravné charakteristiky čiastkových úsekov cesty I/18.

Čiastkový úsek	Žilina		Lúčka		Jánošíkovo		Kraľovany		Ratkovo		Strečno	
Smer	AB	BA	AB	BA	AB	BA	AB	BA	AB	BA	AB	BA
Intenzita												
RPDI [voz/24 h]	22106		22106		22106		16933		16933		22106	
Priemerná denná [voz/24 h]	1717 4	1580 4	1317 2	1356 8	128001	13461	11501	9604	9440	9365	13760	13445
Max. hodinová [voz/h]	1263	1222	1204	1034	1006	1063	950	1113	1148	864	1089	1084
Zloženie dopravného prúdu												
%TV [%]	24	26	23	23	23	26	21	25	22	25	23	24
Rýchlosť												
Max. dovolená [km/h]	90		80		80		60		90		70	
Priemerná [km/h]	78	65	69	85	78	83	68	63	79	79	66	60
85. [km/h]	73.7	68.8	67.8	64.8	75.5	76	71.8	71.8	84.9	81.8	80.1	69.2
15. [km/h]	57.4	47.3	64	61.2	72.2	67	67	67	76.2	72.1	49.6	58.6

Zber údajov bol realizovaný prostredníctvom dvoch základných typov prieskumov, profilového a líniového dopravného prieskumu. Profilový dopravný prieskum bol realizovaný primárne za účelom zistenia intenzity a zloženia DP, pričom bol použitá technológia štatistického mikrovlnného radaru Sierzega SR4 alebo SR7. Líniový dopravný prieskum bol

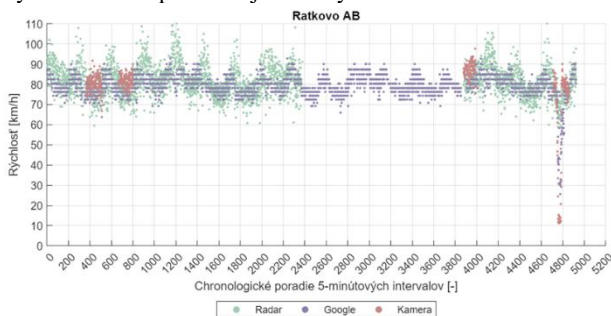
realizovaný za účelom získania údajov o úsekovej rýchlosti, resp. cestovnom čase vozidiel. Líniový dopravný prieskum bol realizovaný kamerovým setom pozostávajúcim z digitálnej kamery Sony HDR-CX405 a softvéru na rozpoznávanie EČV. Nakoľko rozpoznávanie EČV z kamerových záznamov je náročné na spracovanie dát a radarové prieskumy vedia iba nepriamo zmerať úsekovú rýchlosť, súčasťou výskumu bolo aj overenie využiteľnosti alternatívnych dopravných dát na účely kalibrácie funkcií zdržania. V tomto kontexte boli realizované líniové dopravné prieskumy na princípe plávajúcich vozidiel využívajúcich crowdsourcované dáta získavané v reálnom čase od užívateľov mobilných zariadení prostredníctvom softvéru Google Maps.



Obrázok 2. Meracie zariadenia umiestnené na zvislom dopravnom značení. Digitálna kamera (Hore). Notebook so softwarom pre získavanie crowdsourcových dát (v strede). Mikrovlnný radar Sierzega SR7 (dole).

4.2 Porovnanie metód merania úsekovej rýchlosti

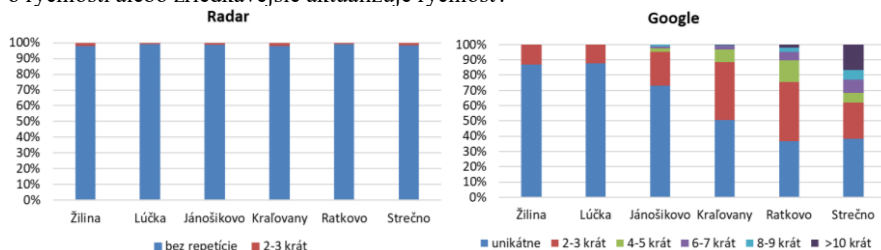
Obrázok 3 zobrazuje chronologický priebeh úsekovej rýchlosti na úseku Ratkovo. Vizuálne porovnanie troch použitých metód naznačuje, že všetky sú schopné detegovať poklesy rýchlosti a identifikovať začiatok porúch v DP. Napriek tomu sa v niektorých prípadoch prejavili rozdiely v citlivosti a presnosti jednotlivých metód.



Obrázok 3. Chronologické porovnanie úsekových rýchlostí.

Napríklad na úseku Ratkovo AB zachytila videodetekcia (červené body) aj údaje z Google Maps (fialové body) náhly pokles rýchlosti, zatiaľ čo rýchlosti z radaru (zelené body) vykazovali len mierne poklesy, čo môže naznačovať, že dopravné narušenie nastalo mimo dosahu samotného radaru. Hoci Google zaznamenal výskyt poklesov rýchlosti, systematicky nezachytil najnižšie hodnoty rýchlosti DP, ktoré boli zaznamenané videodetekciou, čo poukazuje na zníženú citlivosť Google dát na krátkodobé extrémne výkyvy rýchlosti. Vyhľadovací efekt sa ďalej prejavuje v časovej disperzii údajov, najmä na úsekoch Lúčka a Kraľovany. Zatiaľ čo radar a videodetekcia zachytili výrazné kolísanie rýchlosti, pravdepodobne odrážajúce reálnu dynamiku DP, údaje z Googlu vykazujú zníženú variabilitu, čo poukazuje na ich nižšiu citlivosť voči krátkodobým zmenám rýchlostí DP.

Priebehy rýchlostí na obrázku 2 jasne ukazujú, že na úseku Ratkovo, sa v dátach Googlu často vyskytujú totožné hodnoty rýchlosti. Predpokladanou príčinou zhoršenej kvality crowdsourcovaných dát je slabé pokrytie mobilnou sieťou. Predpoklad súvisí s pozorovaním, že slabé pokrytie mobilnou sieťou zhoršovalo vzdialené spojenie s radarom. Na kvantifikáciu frekvencie opakovaných hodnôt sa pre každý smer vypočítal podiel 5-minútových intervalov, v ktorých sa rýchlosť zopakovala v dvoch a viac po sebe idúcich intervaloch. Výsledky sú uvedené na obrázku 3, ktorý zobrazuje percento intervalov s unikátnymi rýchlosťami a percento intervalov s viacnásobným opakovaním. Vysoký podiel opakovaných hodnôt, najmä v sérii štyroch a viac intervalov, poukazuje na zlý mobilný signál a pravdepodobne aj agresívnejšie vyhľadovanie dát na strane Googlu. Hoci interné algoritmy Googlu nie sú verejne známe, správanie dát naznačuje, že pri slabom signály systém využíva historické dáta o rýchlosti alebo zriedkavejšie aktualizuje rýchlosť.

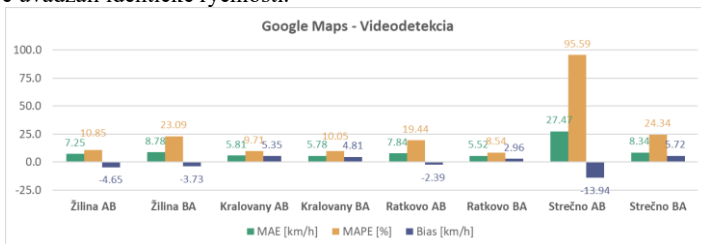


Obrázok 4. Podiel po sebe nasledujúcich identických hodnôt rýchlosti podľa úsekov, vľavo – radarové dáta, vpravo – crowdsourcované dáta.

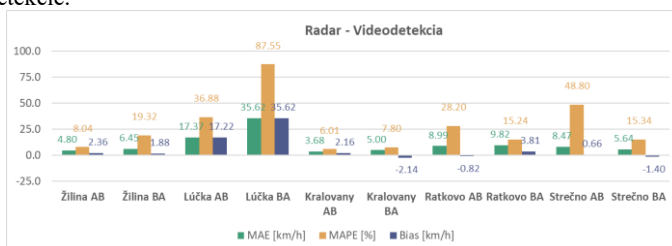
Údaje o rýchlosti získané z Google Maps API a radarov boli porovnané s rýchlosťami z videodetekcie, ktoré boli použité ako referenčná metóda. Porovnávací analýza bola vykonaná samostatne pre každý jazdný smer sledovaných cestných úsekov. Úsek Jánošíkovo je z komparácie úplne vylúčený z dôvodu, že v dôsledku technických problémov chýbali časové intervaly, kedy by boli simultánne dostupné dáta z Googlu, radaru aj videodetekcie. Zároveň, z dôvodu technických problémov boli rýchlostné údaje pre úsek Lúčka čiastočne nedostupné, čo viedlo k absencii párových hodnôt medzi údajmi z Googlu a videodetekcie, a preto bol z priameho porovnania týchto dvoch zdrojov vylúčený.

Kvantitatívne metriky, ktorými boli porovnané technológie porovnané sú znázornené na obrázku 5 a 6. Rozptyľové diagramy na obrázku 7 porovnávajú rýchlosti z Google Maps alebo radaru (vertikálna os) s rýchlosťami z videodetekcie (horizontálna os) pre každý analyzovaný

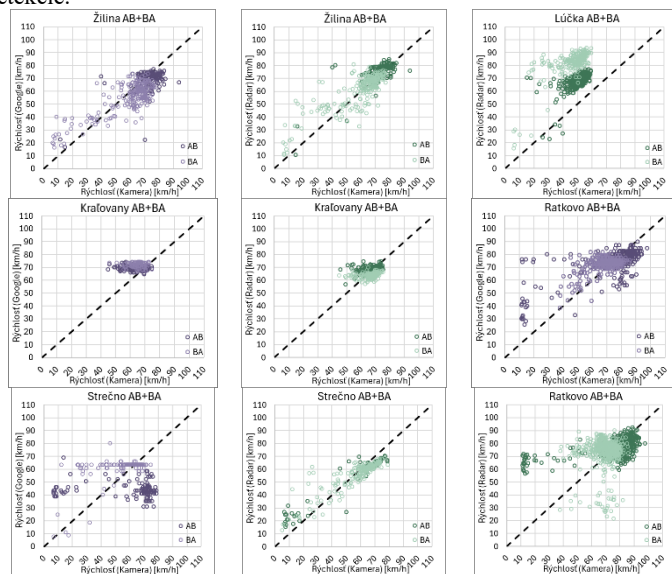
úsek. Prerušované diagonálne čiary znázorňujú ideálny stav dokonalej zhody, pri ktorom by oba zdroje uvádzali identické rýchlosti.



Obrázok 5. Porovnanie kvantitatívnych metrík rýchlostí získaných z Google Maps API a z videodetekcie.



Obrázok 6. Porovnanie kvantitatívnych metrík rýchlostí získaných z mikrovlnného radaru a z videodetekcie.



Obrázok 7. Rozptyľové grafy Google Maps a radaru vs videodetekcia.

Pre stanovenie úsekovej rýchlosti ako aj samotnej rýchlosti voľného DP je kľúčové zvoliť vhodnú technológiu, ktorá poskytuje ako dostatočnú presnosť a spoľahlivosť, tak aj v praxi vyžadovanú finančnú a časovú efektívnosť. Každá z analyzovaných technológií má svoje špecifické výhody a obmedzenia, podrobne zhrnuté v tabuľke 3 až 5. Výber konkrétnej metódy by mal zohľadniť požadovanú presnosť, dostupný rozpočet a rozsah analýzy. Z výsledkov vyplýva, že pre kalibráciu a validáciu funkcií zdržania sa odporúča kombinácia metód – videodetekcia ako referenčný štandard, doplnený o Google Maps API pre široké pokrytie siete a identifikáciu trendov. Profilové radarové merania môžu slúžiť ako kontinuálny monitoring na geometricky vhodných lokalitách. Špecificky pre stanovenie základného parametra funkcií zdržania – rýchlosti voľného dopravného prúdu – sa ukázalo, že Google Maps API poskytuje spoľahlivé výsledky najmä v období nízkych intenzít, keď podmienky najlepšie aproximujú voľný dopravný prúd.

Tabuľka 3. Výhody a nevýhody použitia videodetekcie pre určenie funkcií zdržania.

Videodetekcia	
Výhody	• Presné a spoľahlivé meranie skutočnej úsekovej rýchlosti. • Schopnosť zaznamenať celý rozsah rýchlostí, vrátane extrémne nízkych hodnôt. • Vysoká citlivosť na dynamické zmeny v dopravnom prúde s presným časovým rozlíšením. • Možnosť spätného spracovania dát. • Overiteľnosť výsledkov. • Flexibilita škálovania od manuálneho spracovania až po plne automatizované systémy s vyhodnocovaním v reálnom čase. • Možnosť merania ďalších charakteristík DP (intenzita, odstup, zloženie DP).
Nevýhody	• Vysoké náklady na implementáciu a prevádzku. • Časovo alebo technologicky náročné spracovanie dát (v závislosti od miery automatizácie). • Obmedzená spoľahlivosť pri zhoršenej viditeľnosti, resp. nevyhnutnosť použitia špecializovanej, cenovo nákladnej technológie. • Citlivosť na poveternostné podmienky. • Právne a etické otázky ochrany súkromia.

Tabuľka 4. Výhody a nevýhody použitia radaru pre určenie funkcií zdržania.

Mikrovlnný štatistický radar	
Výhody	• Kontinuálne, automatické meranie v reálnom čase. • Relatívne nízke prevádzkové náklady, jednoduché nasadenie a údržba. • Vysoká citlivosť na dynamické zmeny v dopravnom prúde s presným časovým rozlíšením. • Nezávislosť od svetelných podmienok. • Možnosť aproximácie na úsekovej rýchlosti pri vhodnom umiestnení radaru a geometrii cestného úseku. • Možnosť merania ďalších charakteristík dopravného prúdu (intenzita, odstup, zloženie DP).
Nevýhody	• Meranie iba bodových rýchlostí. • Potreba konverzie na úsekovú rýchlosť. • Vysoká závislosť od umiestnenia radaru, systematické chyby pri nevhodnom umiestnení. • Problémy v geometricky zložitých úsekoch. • Nemožnosť detekcie a merania pri veľmi nízkych rýchlostiach (menej ako 8 km/h).

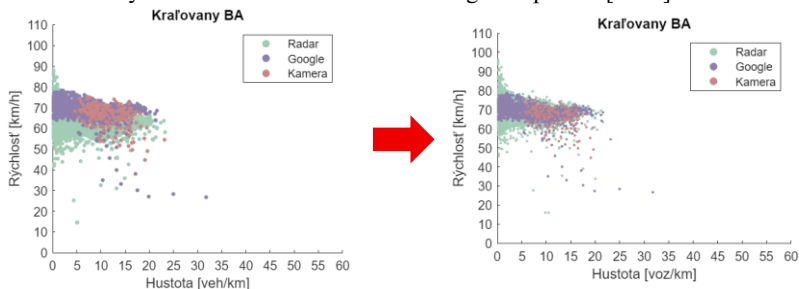
Tabuľka 5. Výhody a nevýhody použitia Google Maps API pre určenie funkcií zdržania.

Google Maps API	
Výhody	• Kontinuálny zber a automatické spracovanie dát. • Možnosť odhadu úsekovej rýchlosti bez ohľadu na zložitosť trasovania cestného úseku. • Veľmi nízke náklady na implementáciu. • Okamžitá dostupnosť bez potreby ďalšej infraštruktúry. • Škálovateľnosť pre veľké cestné siete, pokrytie rozsiahlych území. • Spoľahlivé stanovenie rýchlosti voľného dopravného prúdu.
Nevýhody	• Závislosť od externého poskytovateľa. • Závislosť od kvality mobilného signálu. • Vyhladené dáta s obmedzenou citlivosťou na dynamické zmeny v dopravnom prúde. • Problémové zachytenie najnižších rýchlostí počas kongescií. • Agregované dáta bez možnosti presného časového rozlíšenia. • Nedostupnosť v reálnom čase pri slabom mobilnom signále. • Neznáma presnosť algoritmov. • Nemožnosť merania ďalších charakteristík dopravného prúdu (intenzita, odstup, zloženie DP).

S cieľom využiť silné stránky jednotlivých metód a zároveň minimalizovať ich individuálne limity bola navrhnutá hybridná stratégia integrácie všetkých dostupných zdrojov údajov. Rýchlosti získané z videodetekcie použité bez ďalších úprav, keďže predstavujú najpresnejší zdroj. Údaje z Googlu boli taktiež použité priamo aj napriek ich nižšej variabilite, ktorá má za následok menší počet pozorovaní v saturovanej oblasti. Avšak údaje z úseku Strečno boli z dôvodu výrazného ovplyvnenia slabým mobilným signálom úplne vylúčené. V prípade radaru bola časová dynamika rýchlostí zachytená spoľahlivo, avšak absolútne hodnoty boli ovplyvnené bodovým charakterom merania a umiestnením senzora. Z tohto dôvodu bola radarová rýchlosť podrobená korekcii, ktorá umožňuje zachovať priebeh rýchlosti, ale zároveň upraviť jej úroveň na hodnoty porovnateľné s úsekovými rýchlosťami meranými prostredníctvom videodetekcie alebo Google Maps API. Korekcia bola realizovaná podľa nasledovného vzťahu a jej aplikácia na úseku Kraľovany BA je zobrazená na obrázku 8:

$$R_k = \frac{R}{\text{medián}(\frac{R}{U})}. \quad (2)$$

Kde R_k sú radarové rýchlosti po korekcii [km/h], R sú pôvodné radarové rýchlosti [km/h] a U sú úsekové rýchlosti z videodetekcie alebo Google Maps API [km/h].

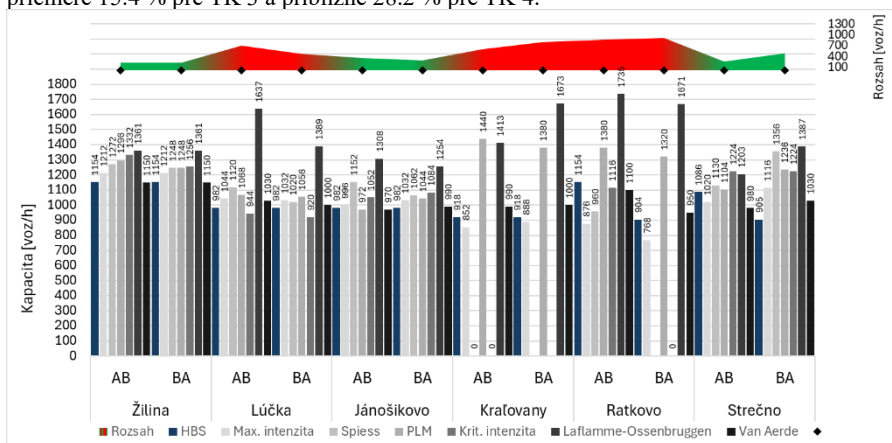


Obrázok 8. Příklad korekcie radarových rýchlostí na úseku Kraľovany BA.

4.3 Porovnanie metód odhadu kapacity

Výstupy všetkých siedmich porovnávaných metód odhadu kapacity sú prehľadne znázornené na obrázku 9. Na základe odhadov možno konštatovať, že metódy HBS, Maximálna intenzita a Van Aerde poskytujú konzistentne najnižšie hodnoty kapacity, zatiaľ čo metóda LaFlamme-Ossenbruggen konzistentne najvyššie. Rozdielna výpočtová logika jednotlivých metód a ich odlišné nároky na vstupné údaje sa premietli do výrazných rozdielov medzi jednotlivými odhadmi. Z porovnaných postupov vykazujú najvyššiu konzistentnosť metódy podľa metodiky HBS 2015 ($CV = 0.10$) a Van Aerdeho ($CV = 0.07$).

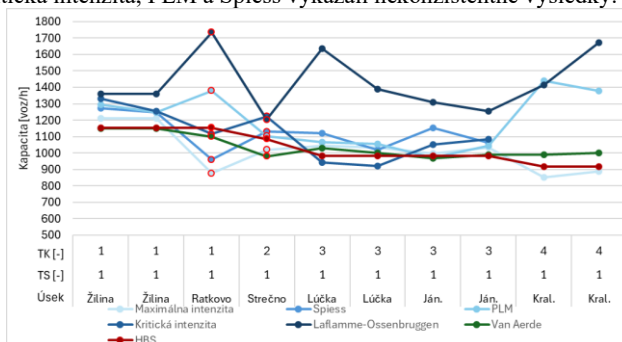
Na základe výsledkov je taktiež možné konštatovať, že geometrické charakteristiky úsekov, konkrétne trieda krivolakosti (TK) a trieda stúpania (TS), významne ovplyvňujú odhadovanú kapacitu. Negatívny vplyv je evidentný naprieč všetkými metódami odhadu kapacity. Výnimku predstavuje metóda LaFlamme-Ossenbruggen, ktorá okrem úseku Jánošíkovo kapacity nadhodnotila o 2.1 % až 22.9 %. Pri metóde PLM taktiež pozorovať nadhodnotenie kapacity, avšak iba na čiastkovom úseku Kraľovany (TK 4). Čo sa týka miery poklesu kapacity v závislosti od zmeny triedy krivolakosti (obrázok 10), najvýraznejšiu a najkonzistentnejšiu koreláciu preukázali metódy HBS a Maximálna intenzita. V prípade metódy HBS predstavoval pokles pre TK 2 hodnotu 6 %, pre TK 3 hodnotu 14.9 % a pre TK 4 až 20.5 %. Pri metóde Maximálna intenzita bol zaznamenaný pokles o 15.8 % pre TK 2, v priemere 15.4 % pre TK 3 a približne 28.2 % pre TK 4.



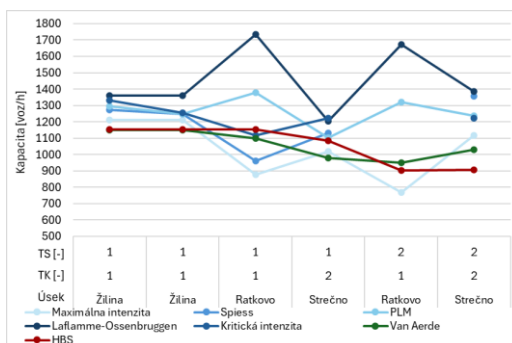
Obrázok 9. Porovnanie odhadov kapacity na všetkých čiastkových úsekoch vrátane farebnej škály znázorňujúcej rozsah kapacít.

Vplyv TS na kapacitu bol potvrdený všetkými metódami. Pre č. ú. Ratkovo v smere BA metódy generovali pokles kapacity v rozpätí od 21.7 % (HBS) do 48.1 % (Spiess). Výnimku tvorí metóda LaFlamme-Ossenbruggen, ktorá nadhodnotila kapacitu oproti referenčnému úseku o 22.8 % a metóda PLM s miernym nadhodnotením o 1.9 %. Rozdielna schopnosť zachytiť vplyv TS na kapacitu u jednotlivých metód je dobre viditeľná na obrázku 11, pričom najkonzistentnejšie sú opäť metódy HBS a Van Aerde. Vo výsledku vplyv vyššej triedy krivolakosti a stúpania na kapacitu úsekov, najkonzistentnejšie odrážajú metódy HBS a Van

Aerde. Naopak metóda LaFlamme-Ossenbruggen systematicky nadhodnocovala kapacitu a metódy Kritická intenzita, PLM a Spiess vykázali nekonzistentné výsledky.



Obrázok 10. Porovnanie kapacít v závislosti od triedy krivolakosti čiastkových úsekov (červeným krúžkom sú zvýraznené úseky v klesaní).



Obrázok 11. Porovnanie kapacít v závislosti od triedy stúpania úsekov.

Odporúčania vyplývajúce z analýzy výsledkov a citlivosti jednotlivých metód na kvalitu vstupných dát možno formulovať nasledovne. V prípade, že nie sú k dispozícii dáta, napríklad pri plánovaní alebo projektovaní ciest, je možné použiť príručku HBS 2015 alebo technické podmienky TP 102, ktoré z nej vychádzajú. V ostatných prípadoch sa odporúča použitie Van Aerdeho metódy, nakoľko vykazuje najväčšiu robustnosť a schopnosť zohľadniť lokálne podmienky. Dodatočnou výhodou tejto metódy je, že poskytuje hodnoty kapacity bez tendencie k výraznému nad- či podhodnocovaniu kapacity a poskytuje pohľad aj na samotné správanie dopravného prúdu. Avšak vzhľadom na jej relatívnu náročnosť je v prípade dobrej dostupnosti dát v saturovanej oblasti prípustné použitie metódy Maximálnej intenzity.

4.4 Výber vhodných tvarov funkcií zdržania

Analýzou domácej a zahraničnej literatúry sa za najčastejšie používané funkcie zdržania identifikovali funkcie BPR, modifikovanú Davidsonovu, Kónickú a Akcelik. V dizertačnej práci je uvedený literárny pôvod týchto funkcií, matematický zápis, vstupujúce parametre a

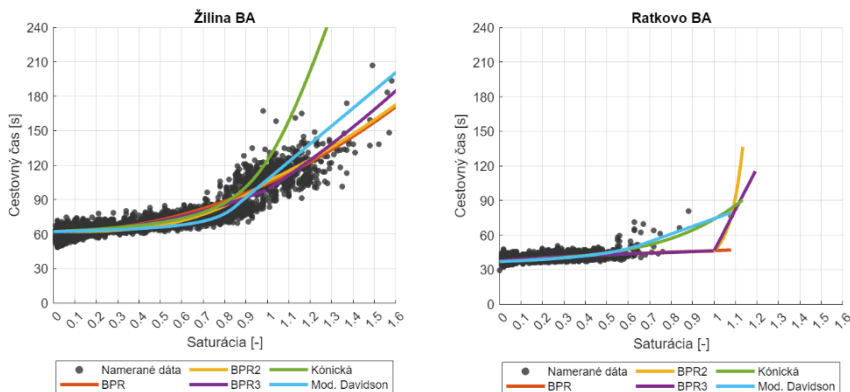
podrobný opis výhod, nevýhod a oblastí použitia. Vzhľadom na použitie funkcií zdržania, bola funkcia Akcelik identifikovaná ako nevhodná pre použitie na dvojpruhových cestách, a preto funkcie boli doplnené o modifikácie funkcie BPR, konkrétne BPR 2 a BPR 3.

Tabuľka 6. Presnosť kalibrácie funkcií zdržania pre čiastkové úseky cesty I/18 (farebná škála predstavuje množstvo dát v saturovanej oblasti, zelená – spoľahlivé, oranžová – obmedzené, červená – nedostatočné).

Čiastkový úsek	Žilina		Lúčka		Jánošíkovo		Kraľovany		Ratkovo		Strečno	
Smer	AB	BA	AB	BA	AB	BA	AB	BA	AB	AB	AB	BA
BPR												
R² [-]	0.65	0.70	0.70	0.67	0.50	0.84	-	-	-	-	0.75	0.56
RMSE [s]	11.24	16.76	16.76	27.54	22.58	9.129	-	-	-	-	5.65	11.96
BPR 2												
R² [-]	0.66	0.72	0.73	0.58	0.46	0.85	-	-	-	-	0.76	0.63
RMSE [s]	11.20	16.38	8.27	30.79	23.62	8.68	-	-	-	-	5.55	11.01
BPR 3												
R² [-]	0.72	0.74	0.74	0.75	0.64	0.89	-	-	-	-	0.76	0.70
RMSE [s]	10.04	15.81	8.23	23.65	19.23	7.28	-	-	-	-	5.53	9.86
Kónická												
R² [-]	-5.29	-0.11	-3.38	-6.97	-45.22	-76.23	-	-	-	-	-4.246	-67.09
RMSE [s]	47.93	32.46	33.50	134.79	217.76	298.92	-	-	-	-	25.969	148.59
Modifikovaná Davidsonova												
R² [-]	0.73	0.72	0.73	0.76	0.64	0.90	-	-	-	-	0.76	0.69
RMSE [s]	10.00	16.16	8.25	23.60	19.31	7.20	-	-	-	-	5.53	10.01

Výsledky preukázali výrazné rozdiely v kvalite kalibrácie jednotlivých funkcií zdržania. Tieto rozdiely sú priamo ovplyvnené dostupnosťou dát v oblasti saturovaného dopravného prúdu, ktorá je kľúčová pre správne stanovenie tvaru funkcie, nakoľko v tejto oblasti sú najvýraznejšie rozdiely v tvare jednotlivých funkcií. Najvýraznejšie sa nedostatok dát prejavili na úsekoch Ratkovo a Kraľovany, pre ktoré nebolo možné funkcie vôbec kalibrovať. Rovnako nevhodná je situácia výrazného rozptylu dát v saturovanej oblasti, čo je typické pre úsek Strečno BA.

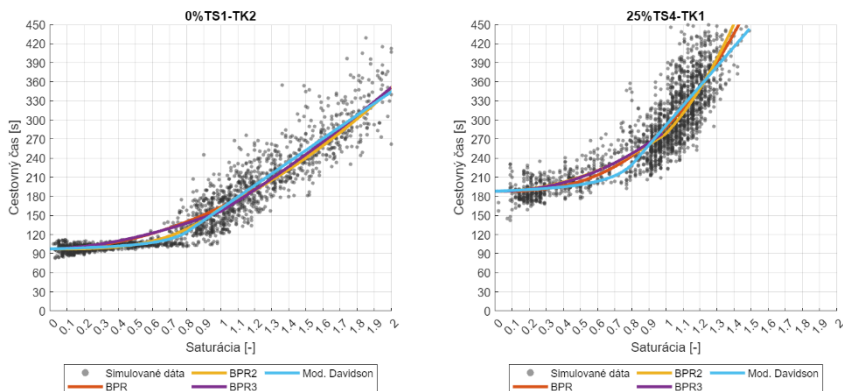
Pri posudzovaní kalibrácie funkcií zdržania sú hodnoty RMSE a R² dôležitými indikátormi, avšak je potrebná aj vizuálna analýza priebehu funkcií. RMSE totiž rastie aj v prípadoch, kde je prítomný veľký rozptyl dát, aj keď funkcia môže dobre vystihovať ich všeobecný trend. Tento jav je možné pozorovať napríklad na úseku Žilina BA, kde vyšší rozptyl údajov spôsobuje nárast RMSE na 16.76 s, v porovnaní s 11.24 s pre úsek Žilina AB disponujúci nižším počtom dát v saturovanej oblasti. Grafické znázornenie dát a kalibrovaných kriviek pre úsek Žilina BA a Ratkovo BA je na obrázku 12.



Obrázok 12. Porovnanie kalibrovaných funkcií zdržania s nameranými údajmi.

Z experimentálnych meraní nebolo možné z dôvodu malého počtu úsekov a nedostatočného množstva dát v saturovanej oblasti spoľahlivo stanoviť najvhodnejší tvar funkcie zdržania. Z tohto dôvodu boli funkcie BPR, BPR 2, BPR 3 a Modifikovaná Davidsonova ďalej testované a kalibrované na simulovaných úsekoch. Výnimku tvorí Kónická funkcia, ktorej tvar sa preukázal byť nevhodným pre použitie na cestách.

Najvernejšie vystihovala skutočné správanie Modifikovaná Davidsonova funkcia. Rozdiely v presnosti medzi funkciami sú však minimálne - hodnoty RMSE sa líšia iba v rozsahu od 0.02 do 1.95 s. Napriek malým rozdielom v celkovej presnosti sa funkcie líšia vo svojom priebehu v jednotlivých oblastiach saturácie (obrázok 13).



Obrázok 13. Porovnanie priebehu funkcií zdržania.

Na základe analýzy dosiahla Modifikovaná Davidsonova funkcia najlepšie celkové hodnotenie pre modelovanie dvojpruhových ciest v nezastavanom území. Avšak keďže nie je implementovaná v najrozšírenejšom softvéri pre makroskopické modelovanie (PTV Visum),

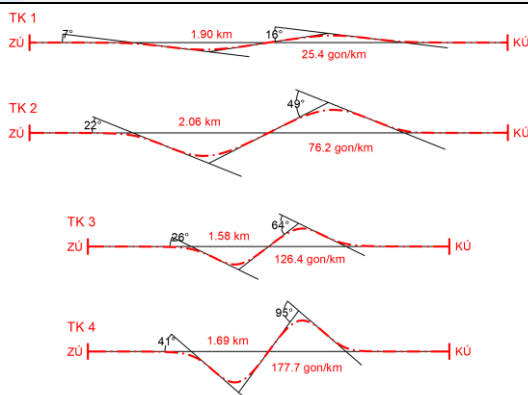
jej použitie by vyžadovalo dodatočné programovanie. Pri výbere vhodnej funkcie sa odporúča zohľadniť špecifické požiadavky konkrétneho modelu. Hoci sú celkové rozdiely v presnostiach relatívne malé, jednotlivé funkcie sa výrazne líšia v rôznych oblastiach saturácie. Tvorca modelu by preto mal zvážiť požadovanú presnosť a kritickú oblasť saturácie, pričom na základe týchto kritérií zvolí vhodný tvar funkcie. Avšak vzhľadom na jednoduchosť implementácie a rýchlosť kalibrácie sa odporúča použitie funkcie BPR, pre ktorú sú ďalej uvedené kalibrované hodnoty jej parametrov.

4.5 Kalibrácia hodnôt parametrov funkcií zdržania

Funkcie zdržania boli kalibrované na základe simulácie správania dopravného prúdu na charakteristických úsekoch dvojpruhových ciest, ktorých charakteristiky sú uvedené v tabuľke 7, pričom názov každého úseku je tvorený kombináciou podielu ťažkých vozidiel (TV), triedy stúpania (TS) a krivolakosti (TK). Smerové vedenie simulovaných úsekov je znázornené na obrázku 14. Postup kalibrácie a validácie simulácie je podrobne popísaný v dizertačnej práci v podkapitole 3.7.

Tabuľka 7. Geometrické charakteristiky simulovaných charakteristických úsekov dvojpruhových ciest.

Úsek	Dĺžka [km]	s [%]	TS [-]	KÚ [gon/km]	TK [-]
0%TS1-TK1	1.9	1.5	1	25.4	1
0%TS1-TK2	2.06	1.5	1	76.2	2
0%TS1-TK3	1.58	1.5	1	126.4	3
0%TS1-TK4	1.69	1.5	1	177.7	4
25%TS1-TK1	1.9	1.5	1	25.4	1
25%TS1-TK2	2.06	1.5	1	76.2	2
25%TS1-TK3	1.58	1.5	1	126.4	3
25%TS1-TK4	1.69	1.5	1	177.7	4
25%TS2-TK1	1.9	4.5	2	25.4	1
25%TS3-TK1	1.9	6	3	25.4	1
25%TS4-TK1	1.9	9	4	25.4	1
25%TS2-TK4	1.69	5.5	2	177.7	4
25%TS3-TK4	1.69	7	3	177.7	4
25%TS4-TK4	1.69	9	4	177.7	4



Obrázok 14. Smerové vedenie simulovaných úsekov dvojpruhových ciest.

Hodnoty parametrov funkcií zdržania boli stanovené v práci v podkapitole **Error! Reference source not found.** pre konkrétne kombinácie podielu ťažkých vozidiel a geometrických charakteristík úsekov. Pre širšie praktické využitie boli tieto parametre analyzované s cieľom identifikovať trendy umožňujúce aplikáciu na rozmanitejšie podmienky, aj za cenu mierne zníženej presnosti.

Výsledkom analýzy je tabuľka 8 obsahujúca hodnoty parametrov, ktoré umožňujú interpoláciu pre medziľahlé hodnoty podielu ťažkých vozidiel. Hodnoty sú uvedené výlučne pre funkciu BPR, ktorá napriek nižšej presnosti než Modifikovaná Davidsonova funkcia dosahuje dostatočnú presnosť a jej jednoduchý tvar umožňuje pozorovanie trendov v zmene hodnôt parametrov, čo ju predurčuje na tento účel.

Modifikovaná Davidsonova funkcia síce ponúka najvyššiu presnosť, avšak hodnoty parametra J sa výrazne menia v závislosti od parametra μ . Interpolácia pre rôzne podiely ťažkých vozidiel by preto spôsobila výrazné skreslenie vplyvu saturácie na zdržanie dopravného prúdu. V prípade požiadavky na maximálnu presnosť sa odporúča použiť Modifikovanú Davidsonovu funkciu, jej parametre však musia byť kalibrované na konkrétny podiel ťažkých vozidiel a geometrické charakteristiky úseku.

Tabuľka 8. Upravené hodnoty parametra α a β (uvedeného v zátvorkách) funkcie BPR pre interpoláciu pri rôznych podieloch ťažkých vozidiel v DP.

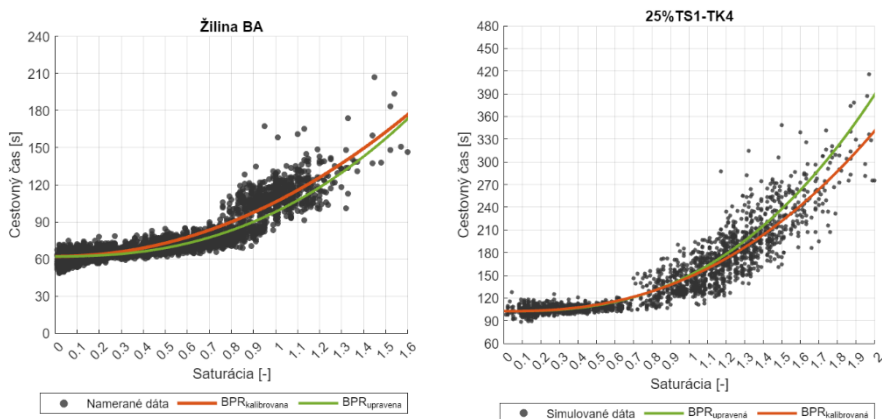
BPR						
Trieda krivolakosti [-]						
Trieda stupňania [-]	%TV	α (β)	1	2	3	4
	0	1 - 4	0.63 (2.1)	0.53 (2.2)	0.44 (2.3)	0.44 (2.5)
	25	1	0.58 (2.4)	0.56 (2.4)	0.50 (2.4)	0.46 (2.6)
		2	0.56 (2.4)			0.48 (2.6)
		3	0.50 (2.4)			0.50 (2.8)
		4	0.50 (2.7)			0.50 (2.8)

Presnosť BPR funkcie je hodnotená pomocou strednej kvadratickej chyby (RMSE) voči simulovaným údajom pre jednotlivé úseky. Porovnanie výsledkov pri použití pôvodných kalibrovaných a následne upravených hodnôt parametrov α a β je uvedené v tabuľke 9.

Na overenie aplikovateľnosti takto upravených hodnôt bola vykonaná demonštrácia na úseku Žilina BA, ktorý disponuje najširším rozsahom dostupných dát naprieč rôznymi úrovňami dopravného zaťaženia a simulovanom úseku 25%TS1-TK4 pre overenie správnosti aj pri výraznejšej geometrii úseku.

Tabuľka 9. Porovnanie presnosti funkcie BPR vzhľadom na simulované dáta použitím kalibrovaných a upravených hodnôt jej parametrov.

Úsek	RMSE [s]		
	Kalibrovaná	Upravená	Rozdiel
0%TS1-TK1	16.04	16.35	+0.31
0%TS1-TK2	24.08	25.17	+1.09
0%TS1-TK3	17.8	18.57	+0.77
0%TS1-TK4	19.31	19.88	+0.57
25%TS1-TK1	10.48	12.95	+2.47
25%TS1-TK2	24.68	25.95	+1.27
25%TS1-TK3	18.35	18.70	+0.35
25%TS1-TK4	21.21	20.03	+1.18
25%TS2-TK1	21.38	21.59	+0.21
25%TS3-TK1	28.87	28.91	+0.04
25%TS4-TK1	33.93	34.04	+0.11
25%TS2-TK4	24.57	27.41	+2.84
25%TS3-TK4	28.9	33.79	+4.89
25%TS4-TK4	30.66	33.65	+2.99

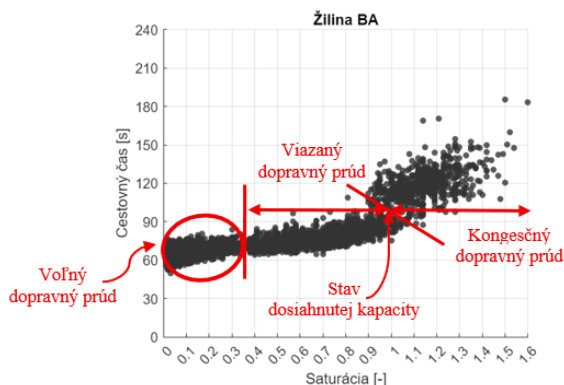


Obrázok 15. Porovnanie tvarov kalibrovanej a upravenej funkcie BPR s empirickými dátami na úseku 25%TS1TK1 a simulovanými údajmi na úseku 25%TS1TK4.

4.6 Vplyv saturácie na cestovný čas

Vplyv saturácie na cestovný čas je možné pozorovať už na samotných nameraných dátach, ktorého dobrým príkladom je úsek Žilina BA, obrázok 16. Pri pohľade na dáta možno rozlíšiť jednotlivé základné stavy dopravného prúdu.

Do saturácie približne 0.4 je možné pozorovať voľný dopravný prúd, v ktorom sa vodiči navzájom neovplyvňujú a dosahujú najvyššie rýchlosti, respektíve najnižšie cestovné časy o hodnote v priemere 60 s. Vodiči si môžu zvoliť ľubovoľnú rýchlosť, čo sa prejavuje väčším rozptýlením cestovných časov ako pri viazanom dopravnom prúde.

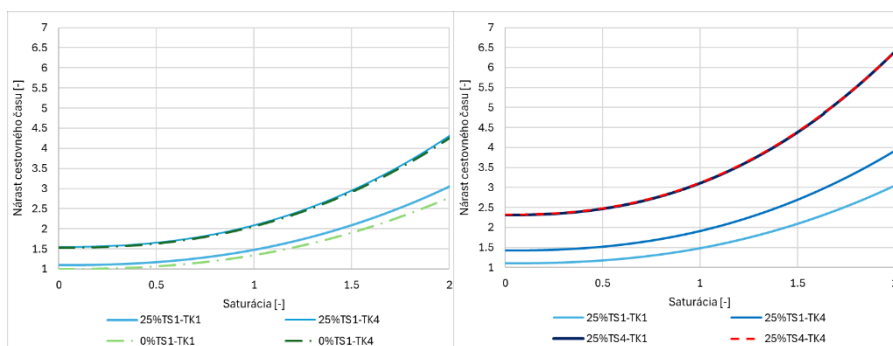


Obrázok 16. Pozorované stavy dopravného prúdu na úseku Žilina BA.

Viazaný dopravný prúd v oblasti saturácie zhruba 0.4 až 1.0 sa vyznačuje vzájomným ovplyvňovaním vodičov a postupnou tvorbou čiat, v ktorých vedúce vozidlo stanovuje rýchlosť. Tým sa zužuje rozptyl cestovného času. S narastajúcou saturáciou sú interakcie medzi vozidlami čoraz výraznejšie, čoho dôsledkom je neustály nárast cestovného času.

Tento nárast sa pri intenzitách blízkyh kapacite (zhruba od saturácie 0.8) zrýchľuje až po stav dosiahnutej kapacity. Po dosiahnutí tohto stavu vznikajú v dopravnom prúde nestability a stáva sa kongesčným. To znamená, že dochádza ku kongesciám a výraznému nárastu cestovného času, ktorý je viac než dvojnásobný v porovnaní s cestovným časom pri voľnom dopravnom prúde (150 s). Takýto stav je ďalej umocnený tvorbou kolón, pričom maximálne pozorované cestovné časy dosahovali až trojnásobok, teda vyše 180 s.

Na základe analýzy simulovaných charakteristických úsekov a kalibrovannej funkcie BPR je možné kvantifikovať vplyv saturácie DP na cestovný čas v závislosti od podielu ťažkých vozidiel, triedy stúpania a krivolakosti. Výsledky sú zobrazené na obrázku 17.



Obrázok 17. Vplyv podielu ťažkých vozidiel, triedy stúpania a triedy krivolakosti na cestovný čas.

Pri najpriaznivejších podmienkach (0 % podiel ťažkých vozidiel, TS1 a TK1) je nárast času najnižší. Pri dosiahnutí kapacity (saturácia $x = 1.0$) dochádza k 1.3-násobnému nárastu oproti voľnému dopravnému prúdu. Pri saturácii $x = 2.0$ je nárast 2.8-násobný, a pri reálnejšej saturácii $x = 1.6$ (čo je maximum z úseku Žilina BA) je nárast 2.1-násobný.

Vplyvom nárastu krivolakosti na TK4 sa výrazne zosilňuje vplyv saturácie. Už pri voľnom dopravnom prúde dochádza k 1.5-násobnému nárastu cestovného času. Pri saturácii $x = 1.0$ je nárast 2.1-násobný a pri saturácii $x = 1.6$ je nárast 3.1-násobný.

Zvýšenie podielu ťažkých vozidiel má relatívne mierny samostatný vplyv, keďže pri rovnakej geometrii úseku je nárast cestovného času len približne o 10 %. Najvýraznejší vplyv na cestovný čas má kombinácia vysokého podielu ťažkých vozidiel s výrazným stúpaním. Na úseku s TS4, TK1 a pri 25 % podiele ťažkých vozidiel dochádza pri voľnom dopravnom prúde k 2.3-násobnému nárastu, pri saturácii $x = 1.0$ k 3.1-násobnému nárastu a pri saturácii $x = 1.6$ k 4.7-násobnému nárastu.

Zároveň je možné pozorovať prekryv kriviek pre 0 % a 25 % podiel ťažkých vozidiel pri triede krivolakosti 4, ako aj prekryv kriviek pre 25 % ťažkých vozidiel pri triede stúpania 4 a kombinácii triedy stúpania a krivolakosti 4. Tento prekryv naznačuje, že pri extrémnych charakteristikách úseku je spomalenie dopravného prúdu natoľko výrazné, že ďalšie faktory už nemajú významný vplyv.

5 ZÁVER

V kontexte strategického plánovania zohrávajú kľúčovú úlohu makroskopické dopravné modely. Avšak jedným z ich nedostatkov je obmedzená schopnosť realisticky zachytiť preťaženie dopravnej siete. Prekonanie tejto nepresnosti zabezpečujú funkcie zdržania, ktoré matematicky popisujú vzťah medzi intenzitou dopravného prúdu, kapacitou komunikácie a cestovným časom. Cestovný čas je zároveň jedným z najdôležitejších parametrov v týchto modeloch, nakoľko má zásadný vplyv nielen na výslednú atraktivitu trás, ale vstupuje aj do distribúcie ciest a výberu dopravného prostriedku. Presné stanovenie cestovného času je preto rozhodujúce pre spoľahlivú prognózu dopravného správania.

Hlavným cieľom dizertačnej práce bolo analyzovať vplyv saturácie dopravného prúdu na funkcie zdržania a stanoviť tvar a hodnoty parametrov, ktoré najlepšie vystihujú správanie dopravného prúdu na charakteristických úsekoch dvojpruhových ciest v nezastavanom území. Výskum sa zameriaval na úseky s rôznym smerovým a výškovým vedením (charakterizované triedou krivolakosti a triedou stúpania), podielom ťažkých vozidiel a dopravným zaťažením počas dňa zabezpečujúce rôzne úrovne saturácie. Týmto prístupom sa zabezpečilo, že kalibrované funkcie zdržania budú použiteľné pre väčšinu v praxi pozorovateľných situácií, kde je presné stanovenie zdržania dôležité.

Na základe analýzy domácej a zahraničnej literatúry bolo porovnaných päť tvarov funkcií zdržania: originálna BPR funkcia a jej dve modifikácie (BPR 2 a BPR 3), Modifikovaná Davidsonová a Kónická funkcia. Ich analýzou sa preukázalo, že Modifikovaná Davidsonova funkcia dosahuje najlepšie celkové hodnotenie pre modelovanie dvojpruhových ciest v nezastavanom území. Avšak vzhľadom na jej absenciu v na Slovensku najrozšírenejšom softvéri pre tvorbu dopravných modelov (PTV Visum) sa pre praktické použitie odporúča funkcia BPR, ktorá preukázala dostatočne vysokú presnosť a spoľahlivosť. Zároveň, pre funkciu BPR bola navrhnutá tabuľka hodnôt parametrov, ktoré umožňujú interpoláciu

pre medziľahlé hodnoty podielu ťažkých vozidiel, vďaka čomu je možné pokryť široké spektrum v praxi sa vyskytujúcich podmienok.

V rámci výskumu bola vykonaná komparatívna analýza metód stanovenia kapacity. V prípade nedostupnosti dát, napríklad pri plánovaní alebo projektovaní ciest, je možné použiť príručku HBS 2015 alebo technické podmienky TP 102, ktoré z nej vychádzajú. V ostatných prípadoch sa odporúča použitie Van Aerdeho metódy, nakoľko vykazuje najväčšiu robustnosť a schopnosť zohľadniť lokálne podmienky. Vzhľadom na jej relatívnu náročnosť je v prípade dobrej dostupnosti dát v saturovanej oblasti prípustné použitie metódy Maximálnej intenzity.

Komparatívna analýza troch rôznych zdrojov dopravných dát pre určenie funkcií zdržania (videodetekcia s rozpoznávaním EČV, mikrovlnný radar, crowdsourcované dáta z Google Maps) umožnila overiť ich spoľahlivosť a stanoviť efektívny spôsob merania z pohľadu presnosti, nákladovosti a praktickosti. Výsledky analýzy ukázali, že žiadny zdroj dát nie je univerzálne najlepší a výber konkrétnej metódy by mal zohľadniť požadovanú presnosť, dostupný rozpočet a rozsah analýzy. Pre kalibráciu a validáciu funkcií zdržania je možné odporučiť kombináciu metód – videodetekcia ako referenčný štandard pre presné merania na kľúčových cestných úsekoch, doplnené o Google Maps API pre široké pokrytie cestnej siete a identifikáciu trendov. Zároveň Google Maps API predstavuje dostatočne spoľahlivý zdroj dopravných dát pre stanovenie rýchlosti voľného dopravného prúdu. Profilové radarové merania môžu slúžiť ako kontinuálny monitoring na geometricky vhodných lokalitách a meranie ďalších charakteristík dopravného prúdu ako je jeho intenzita a zloženie.

Výsledky práce poskytujú spoľahlivý základ pre praktické aplikácie v dopravnom inžinierstve a prispievajú k zvýšeniu presnosti modelovania správania dopravného prúdu na dvojpruhových cestách v nezastavanom území.

5.1 Prínosy dizertačnej práce

Za hlavné teoretické prínosy dizertačnej práce pre vedný odbor možno považovať:

- Komplexné preverenie vhodnosti a spoľahlivosti modelu Van Aerde pri modelovaní fundamentálnych vzťahov dopravného prúdu za rôznych dopravných podmienok a geometrickom vedení trasy dvojpruhových ciest.
- Rozšírenie poznatkov o použiteľnosti a spoľahlivosti nepriamych a priamych empirických, stochastických metód stanovenia odhadu kapacity dvojpruhových ciest vzhľadom na ich geometrické vedenie a dopravné podmienky, ako aj ich citlivosť na kvalitu a rozsah vstupných dát.
- Rozšírenie poznatkov o vplyve smerového a výškového vedenia trasy cesty ako aj zloženia dopravného prúdu na závislosť cestovného času od saturácie.
- Preverenie vhodnosti modelov závislosti cestovného času od saturácie vyjadreného funkciami zdržania pre dvojpruhové cesty v nezastavanom území.

Za hlavné prínosy dizertačnej práce pre prax možno považovať:

1. Definovanie odporúčaní pre optimálne využitie troch hodnotených zdrojov dopravných dát (videodetekcia s rozpoznávaním EČV, mikrovlnný radar, crowdsourcované dáta z Google Maps) pri určovaní funkcií zdržania na základe ich špecifických charakteristík a podmienok použitia.

2. Odporúčania pre výber vhodnej metódy pre stanovenie hodinovej kapacity v závislosti od dostupnosti dát v saturovanej oblasti dopravného prúdu a požadovanej presnosti.
3. Kvantifikácia vplyvu geometrického vedenia trasy a zloženia dopravného prúdu na cestovný čas.
 - Identifikácia vhodných tvarov funkcií zdržania a tvorba súboru parametrov pre vybraný tvar funkcií zdržania v makroskopických dopravných modeloch špičkovej hodiny pre dvojpruhové cesty v závislosti od geometrického vedenia cesty a zloženia dopravného prúdu.

5.2 Odporúčania pre ďalší výskum

Na základe uvedených poznatkov vyplýva niekoľko odporúčaní a možných smerov ďalšieho výskumu:

- Rozšírenie výskumu na viacpruhové a iné typy ciest: Toto odporúčanie súvisí s predchádzajúcim bodom, a teda nakoľko táto dizertačná práca sa zamerala iba na dvojpruhové cesty v nezastavanom území, je vhodné výskum doplniť o iné typy pozemných komunikácií, u ktorých je predpoklad, že sa vyznačujú inou dynamikou dopravného prúdu. Popríklad by budúci výskum mal otestovať použiteľnosť kalibrovaných funkcií aj na tieto prípady.
- Zohľadnenie variability a neistoty: Kalibrácia modelov by nemala poskytnúť iba jedinú “najlepšiu” krivku, ale aj informáciu o spoľahlivosti. V duchu štúdie Petrik a kol. [69] by bolo prínosné vykonať analýzu citlivosti – napríklad, ako sa menia výsledky dopravnej prognózy, ak použijeme o niečo iné parametre funkcie zdržania. Tým by sa určilo, nakoľko kritická je presnosť parametrov pre praktické aplikácie, a identifikovali by sa prípady, kde by mohla nesprávna kalibrácia spôsobiť výrazné chyby.
- Výskum variácie dopravy a jej dopady na funkcie zdržania: Vzhľadom na to, že v dopravnom modelovaní sa často pracuje s celodennými (napr. 24-hodinovými) intenzitami, zatiaľ čo funkcie zdržania sú kalibrované na základe hodinovej kapacity, je potrebné sa v ďalšom výskume zamerať na denné variácie dopravy a jej dopady na tvar funkcií zdržania. Neexistuje jednoznačný vzťah medzi hodinovou kapacitou a objemami dopravy počas celého dňa, čo môže ovplyvniť správnosť výpočtov zdržania v dopravných modeloch. Odporúča sa preto analyzovať použiteľnosť kalibrovaných funkcií aj pri odlišných časových intervaloch a prípadne vyvinúť konverzné koeficienty alebo korekčné metodiky, ktoré zohľadnia túto časovú variabilitu pri výpočtoch zdržania.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] C. S. Fisk, “Link travel time functions for traffic assignment,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 25, no. 2–3, pp. 103–113, Apr. 1991, doi: 10.1016/0191-2615(91)90017-D.
- [2] D. J. R., M. Beckman, C. B. McGuire, C. B. Winsten, and T. C. Koopmans, “Studies in the Economics of Transportation.,” *OR*, vol. 7, no. 4, 1956, doi: 10.2307/3007560.

- [3] P. Tisato, "Estimating travel time functions for urban roads: Options and issues," *Transportation Planning and Technology*, vol. 14, no. 1, 1989, doi: 10.1080/03081068908717414.
- [4] H. Xiong and G. A. Davis, "Field evaluation of model-based estimation of arterial link travel times," *Transp Res Rec*, no. 2130, 2009, doi: 10.3141/2130-18.
- [5] D. Branston, "Link capacity functions: A review," *Transportation Research*, vol. 10, no. 4, 1976, doi: 10.1016/0041-1647(76)90055-1.
- [6] C. Kosun, G. Tayfur, and H. M. Celik, "Soft computing and regression modelling approaches for link-capacity functions," *Neural Network World*, vol. 26, no. 2, 2016, doi: 10.14311/NNW.2016.26.007.
- [7] Y. Sheffi, *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis With Mathematical Programming Methods*. 1984.
- [8] M. Patriksson, *The Traffic Assignment Problem: Models and Methods*. 2015.
- [9] B. Ran and D. E. Boyce, "A link-based variational inequality formulation of ideal dynamic user-optimal route choice problem," *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 4, no. 1, 1996, doi: 10.1016/0968-090X(95)00017-D.
- [10] K. A. Small, E. T. Verhoef, and R. Lindsey, *The Economics of Urban Transportation*. London: Routledge, 2024. doi: 10.4324/9781315157375.
- [11] H. Spiess, "Technical Note—Conical Volume-Delay Functions," *Transportation Science*, vol. 24, no. 2, 1990, doi: 10.1287/trsc.24.2.153.
- [12] J. Čelko, M. Drličiak, and A. Gavulová, "Transportation planning model," 2007. doi: 10.26552/com.c.2007.3.28-32.
- [13] J. Celko, A. Gavulova, and M. Drliciak, "The transportation planning process in Slovakia," in *WIT Transactions on the Built Environment*, 2009. doi: 10.2495/UT090201.
- [14] M. Cingel, J. Čelko, and M. Drličiak, "Analysis in modal split," in *Transportation Research Procedia*, 2019. doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.028.
- [15] "Metodická príručka k zostave dopravných modelov a dopravných prognóz (verzia 1.1)," 2021.
- [16] Y. Pan, J. Guo, Y. Chen, M. Abbasi, G. List, and X. Zhou, "A review of volume-delay functions: Connecting theoretical fundamental, practical deployment and emerging applications A review of volume-delay functions: Connecting theoretical." [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=4143355>
- [17] K. B. Davidson, "A flow travel time relationship for use in transportation planning," *Australian Road Research Board (ARRB) Conference*, vol. 3, no. 1, 1966.
- [18] K. B. Davidson, "THEORETICAL BASIS OF A FLOW-TRAVEL TIME RELATIONSHIP FOR USE IN TRANSPORTATION PLANNING.," *Aust Road Res*, vol. 8, no. 1, 1978.
- [19] P. Tisato, "Suggestions for an improved Davidson travel time function," *Australian road research*, vol. 21, no. 2, 1991.
- [20] R. Akçelik, "Travel time functions for transport planning purposes: Davidson's function, its time-dependent form and an alternative travel time function," *Australian Road Research*, vol. 21, Jan. 1991.

- [21] M. Saberi Kalae, "Investigating Freeway Speed-Flow Relationships for Traffic Assignment Applications," Portland, OR, Jan. 2000. doi: 10.15760/etd.33.
- [22] E. T. Mtoi and R. Moses, "Calibration and Evaluation of Link Congestion Functions: Applying Intrinsic Sensitivity of Link Speed as a Practical Consideration to Heterogeneous Facility Types within Urban Network," *J Transp Technol*, vol. 04, no. 02, 2014, doi: 10.4236/jtts.2014.42014.
- [23] A. Šarić and I. Lovrić, "Improved Volume-Delay Function for Two-Lane Rural Highways with Impact of Road Geometry and Traffic-Flow Heterogeneity," *J Transp Eng A Syst*, vol. 147, no. 10, 2021, doi: 10.1061/jtepbs.0000575.
- [24] J. Oskarbski, K. Jamroz, L. Smolarek, M. Zawisza, and K. Zarski, "Analysis of possibilities for the use of volume-delay functions in the planning module of the TRISTAR system," *Transport Problems*, vol. 12, no. 1, 2017, doi: 10.20858/tp.2017.12.1.4.
- [25] R. Kucharski and A. Drabicki, "Estimating macroscopic volume delay functions with the traffic density derived from measured speeds and flows," *J Adv Transp*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/4629792.
- [26] X. Wu and X. S. Zhou, *Characterization and calibration of volume-to-capacity ratio in volume-delay functions on freeways based on a queue analysis approach*. 2020.
- [27] W. Wong and S. C. Wong, "Network topological effects on the macroscopic Bureau of Public Roads function," *Transportmetrica A: Transport Science*, vol. 12, no. 3, 2016, doi: 10.1080/23249935.2015.1129650.
- [28] D. A. Lazar, S. Coogan, and R. Pedarsani, "Routing for Traffic Networks with Mixed Autonomy," *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 66, no. 6, 2021, doi: 10.1109/TAC.2020.3020059.
- [29] G. Casey, B. Zhao, K. Kumar, and K. Soga, "Context-specific volume-delay curves by combining crowd-sourced traffic data with automated traffic counters: A case study for London," *Data-Centric Engineering*, vol. 1, no. 3, 2020, doi: 10.1017/dce.2020.18.
- [30] I. Ivanović, N. Čelar, V. Đorić, and D. Petrović, "MODELLING THE IMPACT OF RAIN IN TRAFFIC ASSIGNMENT PROCEDURES," *Promet - Traffic - Traffico*, vol. 34, no. 1, 2022, doi: 10.7307/ptt.v34i1.3936.
- [31] D. Nobel and S. Yagi, "Network Assignment Calibration of BPR Function: A Case Study of Metro Manila, the Philippines," *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 12, 2017.
- [32] O. Petrik, F. Moura, and J. De Abreu E Silva, "The influence of the volume-delay function on uncertainty assessment for a four-step model," *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 262, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-04630-3_22.

PUBLIKOVANÉ ČLÁNKY

Kniz A, Kocianova A. Analysis in the Field of Volume-Delay Function Research. *TRANSCOM 2023: 15th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport*, Transportation Research Procedia, 2023. Vol. 74, pp. 1022-1029.
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.239>.

Citované: bez evidovaných ohlasov

V tlači:

Kniz A, Kocianova A. Analysis of Space-Mean Speed Measurement Methods. *TRANSCOM 2025: 16th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport*, 2025.

Kocianova A, Kniz A, Pisca P. Comparative Analysis of Traffic Speed Data on Two-Lane Rural Road Segments: Radar Technology, Google Maps API, and License Plate Recognition. *Civil and Environmental Engineering*, 2025. Vol. 21.
https://doir.org_10.2478/cee-2025-0065.