

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Modelování a simulace – projekt
Model dopravy na dálnici D1



8. prosince 2014

Michal Dobeš (xdobes13)
Martin Borek (xborek08)

Obsah

1	Úvod	2
1.1	Zdroje informací	2
1.2	Validita modelu	2
2	Rozbor tématu a použitých metod/technologií	3
2.1	Použité postupy:	5
2.2	Původ použitých postupů:	5
3	Koncepce	5
3.1	Způsob vyjádření konceptuálního modelu:	5
3.2	Formy konceptuálního modelu:	6
4	Architektura simulačního modelu/simulátoru	7
4.1	Definiční soubor HDF	7
4.2	Výstupní soubor CSV	8
4.3	Jádro modelu	8
5	Podstata simulačních experimentů a jejich průběh	9
5.1	Postup experimentování	9
5.2	Test 1: směr Brno – Praha v aktuálním stavu	10
5.3	Test 2: směr Praha – Brno v aktuálním stavu	11
5.4	Scénář 1: směr Brno – Praha se třemi pruhy	12
5.5	Scénář 2: směr Praha – Brno se třemi pruhy	13
5.6	Scénář 3: směr Brno – Praha se třemi pruhy o rychlosti 160 km/h	14
5.7	Scénář 4: směr Praha – Brno se třemi pruhy o rychlosti 160 km/h	15
5.8	Scénář 5: směr Brno – Praha v aktuálním stavu s dodržováním 2 s rozestupů	16
5.9	Scénář 6: směr Praha – Brno v aktuálním stavu s dodržováním 2 s rozestupů	17
5.10	Scénář 7: směr Brno – Praha se třemi pruhy o rychlosti 160 km/h s 2 s rozestupy	18
5.11	Scénář 8: směr Praha – Brno se třemi pruhy o rychlosti 160 km/h s 2 s rozestupy	19
5.12	Závěry experimentů	20
6	Shrnutí simulačních experimentů a závěr	20

1 Úvod

Tento dokument zpracovává problematiku modelování dopravy na dálnici D1, od analýzy modelovaného systému přes vytvoření modelu a experimentování až po interpretaci výsledků. Pro vytvoření modelu bylo třeba vyhledat a analyzovat dostupná data o provozu na D1 a zjistit potřebné informace o chování řidičů na silnicích. Výsledný model uvažuje jednotlivé úseky dálnice jako jednotlivé obslužné linky, jejichž počet na jednom úseku odpovídá počtu jízdních pruhů. Tím je docíleno realistického chování modelu, neboť lze díky rozdělení úseků na pruhy věrohodně modelovat předjíždění vozidel, při kterém je třeba měnit jízdní pruhy.

Kapitola 2 se zabývá detailní analýzou modelovaného systému [4, slide 18] (dálnice D1). Kapitola 3 objasňuje vytvoření konceptuálního modelu [4, slide 48] tohoto systému a zmiňuje abstrakce, které bylo nutno provést. Kapitola 4 popisuje jednotlivé části simulačního modelu [4, slide 44] a uvádí mapování jednotlivých vztahů a entit mezi konceptuálním a simulačním modelem. Kapitola 5 se zabývá prováděnými experimenty a jejich výsledky. Kapitola 6 obsahuje shrnutí získaných poznatků.

1.1 Zdroje informací

Autory modelu jsou Michal Dobeš a Martin Borek. Potřebné informace a data byly získány ze stránky Celostátního sčítání dopravy 2010 [9] a periodickým zaznamenáváním aktuálních informací o hustotě provozu v profilu dálnice D1 ze stránky dopravniinfo.cz [3].

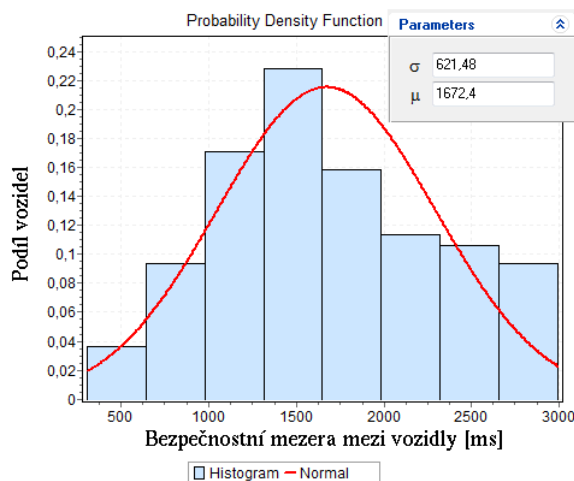
1.2 Validita modelu

Validita modelu [4, slide 37] byla ověřena experimentálně, a to simulací dálnice v aktuálním stavu a následným porovnáním výsledků s reálnými daty. Na základě dostupných informací o provozu na dálnici D1 bylo zjištěno, že chování modelu věrohodně kopíruje modelovaný systém.

2 Rozbor tématu a použitých metod/technologií

Provoz na dálnici je ovlivněn několika podstatnými faktory. Jedná se především o počet vozidel, který je schopen pojmout jeden úsek dálnice. Tento počet závisí na rychlosti vozidel na úseku, neboť vozidla by měla dodržovat *bezpečnostní mezery*. Velikost těchto mezer je určena časovým rozestupem mezi vozidly.

Doporučený rozestup mezi auty jsou 2 sekundy [1]. Ke zjištění, zda je tato mezera mezi auty dodržována, proběhlo měření na silnici I/43 na ulici Sportovní v Brně. Měřením 370 aut bylo zjištěno, že hodnoty odpovídají normálnímu rozdělení [4, slide 93] s koeficienty $\mu = 1672.4$ ms a $\sigma = 621.48$ ms. Měření se uskutečnilo v pátek odpoledne, kdy je hustota dopravy zvýšená. Nicméně na určitých úsecích dálnice bude v případě větší hustoty provozu rozestup mezi auty pravděpodobně ještě menší.

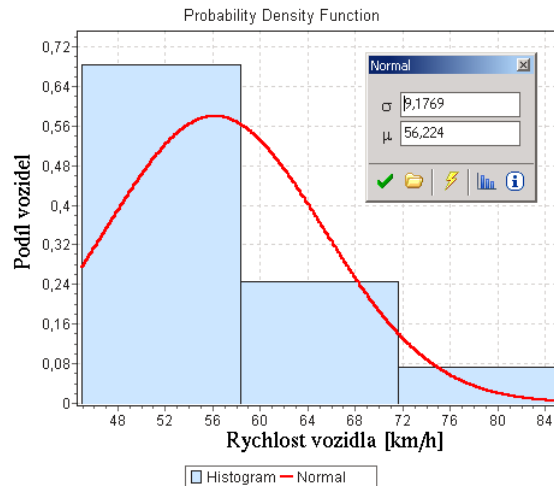


Obrázek 1: Analýza rozdělení velikosti bezpečnostní mezery mezi vozidly

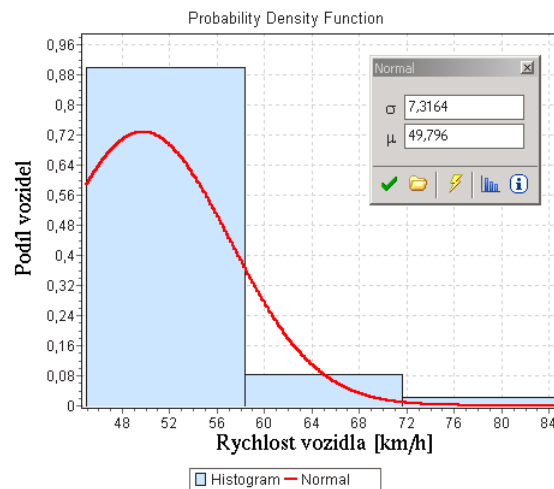
Důležitým faktorem je rovněž rychlost vozidla, kterou by jelo v případě, že by nebylo omezeno okolním provozem. Ta je ovlivněna maximální povolenou rychlostí na daném úseku dálnice, mírou, do jaké daný řidič chce tuto rychlost dodržovat, a maximální rychlostí, kterou může dané vozidlo jet. Maximální rychlost na dálnici je stanovena zákonem na 130 km/h pro osobní automobily a 80 km/h pro nákladní automobily nad 3500 kg [8, §18]. Podle nové normy EU mají být nákladní automobily vybavovány omezovačem nastaveným na tuto rychlost.

K určení míry dodržování povolené rychlosti byly použity statistiky překračování rychlosti [6]. Míru překročení rychlosti lze vyjádřit jako *koeficient překračování rychlosti*, kterým je povolená rychlost násobena. Zjištěné hodnoty odpovídaly normálnímu rozdělení s koeficienty $\mu = 56.22$ km/h a $\sigma = 9.17$ km/h. Vzhledem k tomu, že na měřeném úseku byla maximální povolená rychlost 50 km/h, normální rozdělení pro koeficient překračování rychlosti má koeficienty $\mu = 1.12$ km/h a $\sigma = 0.18$ km/h. Pro nákladní vozidla bylo rovněž zjištěno normální rozdělení rychlosti, a to s koeficienty $\mu = 49.80$ km/h a $\sigma = 7.32$ km/h, pro koeficient překračování rychlosti tedy koeficienty normálního rozdělení budou $\mu = 0.99$ km/h a $\sigma = 0.15$ km/h. Hodnoty byly získány pomocí programu EasyFit¹.

¹<http://www.mathwave.com/products/easyfit.html>



Obrázek 2: Analýza rozdělení rychlosti osobních vozidel (histogram [4, slide 81] a vypočtené normální rozdělení)



Obrázek 3: Analýza rozdělení rychlosti nákladních vozidel (histogram a vypočtené normální rozdělení)

Dalším faktorem je počet pruhů a způsob, jakým se do pruhů řadí vozidla. Obecně platí, že řidič vybírá první jízdní pruh směrem zprava, který dostačuje rychlosti, kterou chce řidič jet. Pokud je daný pruh již obsazen jiným vozidlem, musí jet řidič nejvýše takovou rychlostí, aby dodržel bezpečnostní mezeru za předchozím vozidlem. Nákladní vozidla typicky nejezdí v nejrychlejším jízdním pruhu, aby neblokovala rychlejší osobní vozidla, přestože to není zakázáno zákonem.

Téměř celou dálnici D1 mezi Brnem a Prahou tvoří dva pruhy v každém směru. Výjimkou je úsek mezi Prahou a Mirošovicemi, kde jsou oba směry rozšířeny na pruhy tři. Kvůli opravám silnice bývají některé úseky omezeny tím, že se počet pruhů sníží. Spolu s tímto omezením dochází i ke snížení maximální povolené rychlosti takového úseku. Dopravu na dálnici také ovlivňují případné nehody.

Hustota dopravy závisí na úseku, dni v týdnu a denní hodině. Například v odpoledních hodinách jezdí výrazně větší počet aut, než je tomu dopoledne. Hustota dopravy může být dále ovlivněna i jinými faktory (např. svátky). Z dat o hustotě na dálnici D1 ze dnů 24. - 30. 11. [3] byly analyzovány poměry hustot mezi jednotlivými dny a hodinami. Z těchto údajů byly také získány informace o počtu vozidel, která se v jednotlivých úsecích vyskytují.

Významnou součástí dálnic jsou nájezdy a sjezdy, které ovlivňují počet aut mezi danými úseky. Kromě toho také narušují tok dopravy tím, že auta opouštějící dálnici před sjezdem zpomalí a tím přibrzdí i ostatní auta. Podobně najíždějící auta mohou lehce omezit auta, která již na dálnici jsou. Bylo zjištěno, které nájezdy a sjezdy jsou nejvýznamnější a ovlivňují počet aut na úsecích. Jsou to: Brno-centrum, Brno-západ, Kývalka, Velké Meziříčí - západ, Mirošovice a Všechnomy [9].

Nákladní vozidla se kromě rychlosti a zmíněné volby jízdního pruhu liší od osobních také v délce vozu. Pro osobní

automobily se délka pohybuje kolem 5 metrů. V případě nákladních automobilů dosahuje délka přibližně 15 metrů [7]. Poměr mezi nákladními a osobními vozy je tedy pro provoz na dálnici velmi důležitý. Z údajů celostátního sčítání dopravy pro rok 2010 [9] bylo vypočítáno zastoupení nákladních vozidel na dálnici D1 pro jednotlivé kraje na úseku Brno - Praha: Jihomoravský kraj - 23.256 %, kraj Vysočina - 28.591 % a Středočeský kraj - 23.259 %.

2.1 Použité postupy:

Části konceptuálního modelu byly vytvářeny jako Petriho sítě [4, 123]. Části, jejichž popis by byl v Petriho sítích značně komplikovaný, byly popsány slovní formou. Pro samotný simulační model byla použita knihovna SIMLIB [5] pro jazyk C++. Jazyk C++ je pro projekt vhodný svou rychlostí, přenositelností a především objektovou orientací. Objekty tak představují jednotlivé prvky modelované reality.

2.2 Původ použitých postupů:

Postupy byly převzaty z materiálů předmětu Modelování a simulace [4]. Programovací metody jazyka C++ byly čerpány z cplusplus.com [2].

3 Koncepce

3.1 Způsob vyjádření konceptuálního modelu:

Jak bylo popsáno v kapitole 2, nákladní automobily tvoří přibližně čtvrtinu celé dopravy. Vzhledem k tomu, že rychlost a délka vozu se u nákladních automobilů liší od osobních automobilů, je v modelu rozlišováno mezi nákladními a osobními vozidly. Ostatní typy vozidel (autobusy, motocykly ...) jsou v modelu zanedbány pro jejich nízký počet. Navíc pro ně platí stejné zákony jako pro osobní vozidla, tudíž by výsledky simulace téměř neovlivnily. O který typ vozidla (osobní / nákladní) se jedná se určuje při nájezdu vozidla na dálnici na základě pravděpodobnosti. Ta se u jednotlivých nájezdů liší. Spolu s informací o typu vozidla je danému vozidlu generován i koeficient respektování maximální povolené rychlosti a minimální bezpečnostní mezera od předchozího auta v sekundách. Střední délku mezery je zvolena jako 1.5 sekundy na základě měření uvedeného v kapitole 2.

Jelikož je simulace zaměřena především na případy různých počtů pruhů na dálnici D1, je tomu uzpůsoben i model. Dálnice je rozdělena na jednotlivé úseky. Úseky jsou typicky dlouhé 1000 metrů a mají definovanou maximální povolenou rychlost. Tyto úseky také obsahují definovaný počet pruhů. Mezi pruhy lze přejíždět pouze na předělech úseků. Nejmenší možná délka úseku je 500 metrů, aby nedocházelo k příliš častému přejíždění mezi pruhy. Počty pruhů se mohou v různých úsecích lišit. Aby mohly být pruhy správně využívány, mohou si řidiči pruh vybrat podle toho, který jim rychlostně vyhovuje. Při nájezdu auta do dalšího úseku si auto nejprve zjistí, který pruh jeho požadavkům dostačuje. To provede porovnáním rychlosti, kterou by v daném úseku auto chtělo jet, s rychlostmi, které pruhy aktuálně umožňují. Aby bylo zajištěno, že levé pruhy jsou rychlejší než pravé, vybírá si auto první vyhovující pruh zprava. Tak tomu je i ve skutečnosti. V případě nákladních vozidel je zakázána jejich jízda v nejlevějším pruhu. Simulace povolení jízdy kamionů v nejlevějším pruhu při dopravní špičce by výrazně snížila rychlost ostatních vozidel. Tím by se zhoršila kvalita získaných výsledků, neboť k předjíždění nákladních vozidel dochází zřídka.

Každý pruh je tvořen skladem [4, slide 146] o kapacitě délky úseku, do kterého patří. Kapacita reprezentuje metry, které jsou v daném pruhu k dispozici. Slouží tak k zajištění, že každé auto dostane takový prostor, který ke své jízdě potřebuje. Potřebný prostor se skládá z délky vozidla a bezpečnostní vzdálenosti od předchozího auta. Délka vozidla je určena jeho typem (5 metrů u osobního vozidla a 15 metrů v případě vozidla nákladního). Bezpečnostní vzdálenost se vypočítá na základě minimální bezpečnostní mezery kterou vozidlo vyžaduje (rozdílná pro každý vůz), vynásobené rychlostí, kterou auto v daném úseku pojede:

$$l = b * v \quad (1)$$

l - bezpečnostní vzdálenost [m]

v - rychlost vozidla [m/s]

b - bezpečnostní mezera [s]

Výpočet rychlosti, kterou by vozidlo mohlo v daném pruhu jet, spočívá ve zjištění, jak daleko v úseku se aktuálně nachází naposledy vjeté auto a jaká je jeho rychlost. Z toho pak lze vypočítat, jaká maximální rychlost může být vozidlu umožněna, aby byla po celý úsek zajištěna bezpečná vzdálenost mezi oběma vozidly. Jinými slovy, druhé auto musí do

konce aktuálního úseku dojet nejdříve b sekund po prvním, kde b je velikost bezpečnostní mezery druhého vozu. Z toho vyplývá vzoreček pro výpočet maximální možné rychlosti (vzorec 2):

$$v_{max} = \frac{l}{\frac{l-v \cdot (T-t)}{v} + b} \quad (2)$$

v_{max} - maximální možná rychlost [m/s]

l - délka úseku [m]

v - rychlost předchozího [m/s]

T - aktuální čas [s]

t - čas vjezdu předchozího vozidla [s]

b - bezpečnostní mezera vjíždějícího vozidla [s]

Po výběru pruhu se vozidlo vzdává bezpečnostní mezery ve starém pruhu a zařazuje se do čekací fronty vybraného nového pruhu. Nicméně samotné vozidlo zůstává v předchozím pruhu do doby, než se mu podaří vjet do vybraného pruhu následujícího úseku, tedy zabrat délku auta a bezpečnostní mezery v novém pruhu. Tím dojde k zabránění vjezdu dalších vozidel do úseku, dokud se předchozím vozidlům nepodaří do následujícího úseku úspěšně vjet z důvodu jeho zaplnění. To způsobí žádané zpomalení úseků v případě, kdy následující úseky jsou přeplněny. V případě kolony v jednom úseku se tak bude kolona šířit dál do úseků předcházejících.

Pro vjezd aut do modelu dálnice slouží generátor, který vytváří nová vozidla na vstupu do počátečního úseku. Aby mohla být hustota dopravy mezi úseky upravována, existují v modelu nájezdy a sjezdy. Nájezdy generují nová vozidla a sjezdy vozidla naopak z modelu odebírají. Po vytvoření vozidla na nájezdu musí takové vozidlo zůstat minimálně po dobu jednoho úseku v nejpravějším pruhu. U nájezdů i počátečního generátoru je kromě intervalu mezi nově příjíždějícími auty definován i poměr mezi osobními a nákladními vozidly, který se na D1 pro jednotlivé úseky liší. Sjezdy jsou spojeny s nájezdy na vlastním vyhrazeném úseku o délce 500 metrů. O sjíždění vozidel z dálnice je rozhodováno na základě pravděpodobnosti. Ta je definována pro každý sjezd. Vozidlo, které má z dálnice sjet, se musí zařadit do nejpravějšího pruhu jeden úsek před plánovaným sjetím. Nájezdy a sjezdy v modelu slouží jen ke korekci počtu vozidel v daných úsecích. Byly tedy vybrány jen takové nájezdy a sjezdy, které výrazně ovlivnily počet vozidel v sousedních úsecích. V modelu nejsou zakomponovány všechny nájezdy a sjezdy, protože mění počet vozidel na úsecích jen nepatrně a z hlediska modelu jsou tedy zanedbatelné. Přesné údaje o počtu aut na jednotlivých nájezdech a sjezdech navíc nejsou dostupné.

Jelikož se hustota dopravy mění v závislosti na dni v týdnu a denní hodině, je počet najíždějících aut upravován podle těchto údajů i v modelu. Dnům v týdnu a jednotlivým hodinám jsou přiřazeny normalizované koeficienty. Těmito koeficienty se dělí střed exponenciálního rozdělení u počátečního generátoru i u generátorů jednotlivých nájezdů. To zajišťuje, že se v simulaci projeví dopravní špičky i útlumy, které se objevují v realitě.

Model neřeší situace nehod a lokálních omezení z důvodu oprav, neboť si klade za cíl simulovat obecný stav dálnice, ne tyto specifické situace. Model dále zanedbává rychlost vozidel v závislosti na výškovém profilu dálnice, jelikož poměr zkvalitnění modelu vzhledem ke složitosti získání a zakomponování těchto informací je marginální.

3.2 Formy konceptuálního modelu:

Petriho síť na obrázku 4 zobrazuje průběh přechodu z jednoho úseku do druhého s ohledem na výběr pruhu. Pokud vozidlu rychlostně vyhovuje více pruhů, vybere si ten nejpravější z nich. Na obrázku jsou znázorněny pruhy dva. Předchozí úsek vozidlo opouští až ve chvíli obsazení požadované kapacity z vybraného pruhu, tedy vjetím do dalšího úseku. Vozidla se při nájezdu do pruhu řadí do fronty.

SEGMENT:

SEGMENT 5000 m 3 lanes @ 130 kph

Výše uvedený řádek specifikuje, že simulovaná část dálnice obsahuje 5 km dlouhý úsek o třech pružích, kde je maximální povolená rychlost 130 km/h. Interně bude tento úsek rozdělen na úseky o maximální délce 1 km a minimální délce 500 m.

První úsek by také měl obsahovat údaje o provozu, který na něm má být generován. Ty je možné pro daný úsek specifikovat klíčovým slovem *ENTRYPOINT*:

SEGMENT 5000 m 3 lanes @ 130 kph
ENTRYPOINT composite IN: 10 s 0.3 trucks

Výše uvedený příklad pro daný úsek dálnice specifikuje provoz, který na něm má být generován. Typ generátoru je určen prvním slovem za entypoint (v tomto případě jde o generátor typu *composite*²). Za klíčovým slovem *IN*: následuje střed časového intervalu, za který má být vygenerováno jedno vozidlo (zde 10 s). Posledním parametrem je procento nákladních vozidel v generovaném provozu (zde 30 %).

Pro libovolný úsek dálnice může být definován *exit* (nájezd a sjezd). Ten lze specifikovat klíčovým slovem *EXIT*.

SEGMENT 5000 m 3 lanes @ 130 kph
EXIT composite OUT: 0.07 IN: 1 s 0.25 trucks

Zde jsou parametry stejné jako v případě deklarace entypointu, navíc je zde ale sekce *OUT*:, která specifikuje procento vozidel, které mají na daném exitu sjet (zde 7 %). Pro exit je interně vyhrazen úsek o délce 500m. Po něm následuje zbytek úseku (v tomto případě 4500m), rozdělený standardním způsobem – viz výše.

Dále je možno k úseku přiřadit sběrač statistik. K tomu slouží klíčové slovo *STAT*:

SEGMENT 5000 m 3 lanes @ 130 kph
STAT "D1 194.2 km – Brno-centrum"

Jediným parametrem je název statistiky, ten je uveden v uvozovkách. Takto označený úsek bude sbírat statistiky o všech vozidlech, která jej opouštějí. Součástí statistik je rychlost vozidla a počet vozidel, která opustila úsek.

Parametry stat a exit jsou volitelné a lze je pro daný úsek libovolně kombinovat. Tím je docílena dostatečná flexibilita pro definici dálniční komunikace.

4.2 Výstupní soubor CSV

Data ze sběračů statistik jsou ukládána do výstupního souboru ve formátu CSV. Pro každý úsek s definovaným sběračem statistik je do výstupního souboru pro každou hodinu modelového času [4, slide 21] uložena minimální, maximální a průměrná rychlost vozidel opouštějících úsek a jejich počet. Příklad výstupního souboru může být:

TIME,	WEEKDAY,	HOURL,	CARS (D1 194.2),	MIN (D1 194.2),	MAX (D1 194.2),	AVG (D1 194.2)
3599,	0	, 0	, 452	, 80	, 213.561	, 131.185
7199,	0	, 1	, 363	, 78.6948	, 216.527	, 129.938

Sloupec *TIME* obsahuje hodnotu modelového času, ve kterém byla statistika pořízena. Hodnota je v sekundách. Sloupec *WEEKDAY* obsahuje číslo dne v týdnu, kterému hodnota modelového času odpovídá (0 pro pondělí, 6 pro neděli). Sloupec *HOURL* obsahuje hodinu ve dni, které hodnota modelového času odpovídá (0 pro půlnoc až jednu hodinu ráno, 23 pro 11 hodin večer až půlnoc). Následující sloupce pro jednotlivé sběrače statistik definované v souboru HDF, pro každý sběrač čtyři sloupce. Sloupec *CARS* obsahuje počet aut, sloupce *MIN*, *MAX* a *AVG* pak obsahují minimální, maximální a průměrnou rychlost pro úsek v kilometrech za hodinu.

4.3 Jádru modelu

Vlastní jádro modelu je tvořeno programem *model*. Skládá se z několika částí, které jsou reprezentovány jednotlivými zdrojovými soubory:

Main *main.cpp* je startovním bodem programu. Obsahuje zpracování parametrů příkazové řádky, inicializaci, atd. Při inicializaci je nastaveno *RandomSeed* knihovny *SIMLIB* na hodnotu aktuálního UNIX času. Dále je volán modul *Highway*, který podle předpisu z HDF souboru vytvoří vnitřní struktury reprezentující jednotlivé úseky, pruhy, sjezdy, nájezdy a statistiky pro modelovanou část dálnice.

²Byly plánovány a implementovány generátory pro nájezdy s ranní špičkou, večerní špičkou a bez špičky, pro nedostatek statistických dat bylo možné použít pouze generátoru typu *composite*, který předchází typy vhodně kombinuje.

Config `Config.h` obsahuje neměnné konstanty a makra pro simulaci, například minimální a maximální délku úseku či délky vozidel. Obsahuje také makra pro zjištění dne v týdnu a hodiny ve dni na základě modelového času.

Highway zajišťuje sestavení dálnice podle předpisu ze souboru HDF a sběr statistik. Úseky definované v souboru HDF musí být pro potřeby modelu rozděleny. Sestavení jednoho úseku z HDF tak probíhá postupným vytvářením kilometrových podúseků (jejich délka je parametrizovatelná v souboru `Config.h`). Pokud zbývá méně než dvojnásobek této délky, je zbývající délka rozdělena rovnoměrně mezi dva poslední podúseky. Případný exit je vytvořen v rámci prvního podúseku, který má v takovém případě délku 500m. Případný sběrač statistik je umístěn do posledního podúseku, což odpovídá jeho sémantice.

Segment představuje podúsek dálnice, tedy úsek o délce 500 až 1000 m, jak byl zmíněn v abstraktním modelu. Jelikož jsou úseky v abstraktním modelu tvořeny jízdními pruhy, obsahuje i třída *Segment* pole jednotlivých pruhů (*Lane*). Pokud byl k úseku přiřazen exit či sběrač statistik, obsahuje odkazy na příslušné struktury. Tato reprezentace úseku rovněž obsahuje metody, které simulují příjezd, průjezd a odjezd jednotlivých vozidel. Při příjezdu vozidla provádí výběr pruhu, ve kterém vozidlo pojedí, a to způsobem popsaným v abstraktním modelu, viz strana 5. Před sjezdem z dálnice podle pravděpodobnosti určuje, zda dané vozidlo sjede, a pokud ano, řadí ho o úsek dříve do pravého pruhu, což v souladu s abstraktním modelem simuluje sjezd z dálnice.

Lane reprezentuje jeden jízdní pruh v daném úseku. Stejně jako v abstraktním modelu je jízdní pruh modelován jako sklad volných metrů v úseku. Před vstupem do úseku (požadavkem `Enter`) jsou ovšem vozidla řazena do fronty (ta je řešena obslužným zařízením s kapacitou 1 vozidlo). Sklad by totiž upřednostnil vozidla s nižší rychlostí (a tedy nižším požadavkem na bezpečnostní mezeru a metry v úseku), což neodpovídá reálnému chování. Tento mechanismus je mapován z abstraktního modelu, který na tuto skutečnost pamatuje.

ExitSpec obsahuje reprezentace exitů (*ExitSpec*) a generátorů vozidel (*CarGenerator*). *ExitSpec* obsahuje informace o procentu sjíždějících vozidel a o složení a četnosti najíždějících vozidel. *CarGenerator* je potomek *SIMLIB* třídy *Event*, který se opakovaně aktivuje, aby generoval nové vozidlo na základě informací v *ExitSpec* (mapováno z generátoru vozidel v abstraktním modelu). Pro každé nové vozidlo je náhodně určen koeficient dodržování povolené rychlosti a minimální bezpečnostní mezera, jakožto i typ vozidla.

Car je potomkem *SIMLIB* třídy *Process*. Reprezentuje vozidlo z abstraktního modelu. Vozidlo vzniká na žádost *CarGeneratoru* a svou jízdu začíná na úseku, ke kterému přísluší *CarGenerator* náleží. Pokud svou jízdu začíná na začátku dálnice (generátor náleží k `ENTRYPOINT`), volí si pruh, který mu nejlépe vyhovuje. Pokud začíná na jednom z nájezdů (generátor náleží k `EXIT`), jede po délku úseku s nájezdem (500 m) v pravém pruhu, což v souladu s abstraktním modelem simuluje rozjezd. Pro pohyb po dálnici používá metody třídy *Segment*, které jej řadí do preferovaných pruhů a zajišťují sjezd z dálnice.

Model je parametrizovatelný pomocí výše zmíněného HDF souboru a pomocí argumentů příkazové řádky, což mu dodává značnou flexibilitu. Argumenty příkazové řádky mohou definovat následující hodnoty:

- Doba simulace (maximum modelového času [4, slide 21] v sekundách) – parametr `-t` (výchozí 10 dní)
- Definiční soubor HDF – parametr `-s` (výchozí `test.hdf`)
- Výstupní soubor CSV, do kterého se mají zapsat statistiky – parametr `-o` (výchozí `stat.csv`)
- Parametr μ pro normální rozložení bezpečnostních mezer mezi vozidly – parametr `-sgmu` (výchozí 1.5 s)
- Parametr σ pro normální rozložení bezpečnostních mezer mezi vozidly – parametr `-sgsg` (výchozí 0.62148 s)

5 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

5.1 Postup experimentování

Před vlastním experimentováním bylo třeba se ujistit, že model pracuje dle očekávání. Byly tedy provedeny dva referenční experimenty (testy 1 a 2) nad aktuálním stavem dálnice (jeden pro směr na Prahu, druhý na Brno), jejichž výsledky byly porovnány s realitou. Po této testovací fázi následovala série scénářů, které modelovaly úpravy rychlostních omezení a počtu pruhů na dálnici (scénáře 1 až 4). V souvislosti s povolenou rychlostí a počtem pruhů byl rovněž zkoumán vliv bezpečnostní mezery mezi vozidly na plynulost a hustotu provozu (scénáře 5 až 8).

Pro popis dálnice byly vytvořeny dva soubory HDF, jeden pro směr na Brno, druhý na Prahu. Ty byly pro účely různých scénářů upravovány. Všechny scénáře byly opakovaně spuštěny na serveru Merlin a z jejich výsledků byl pořízen průměr. Z výpočtu byl vždy vyřazen první týden simulace, jelikož na počátku simulace není dálnice zaplněna vozidly a tudíž by výsledky neodpovídaly simulovanému systému.

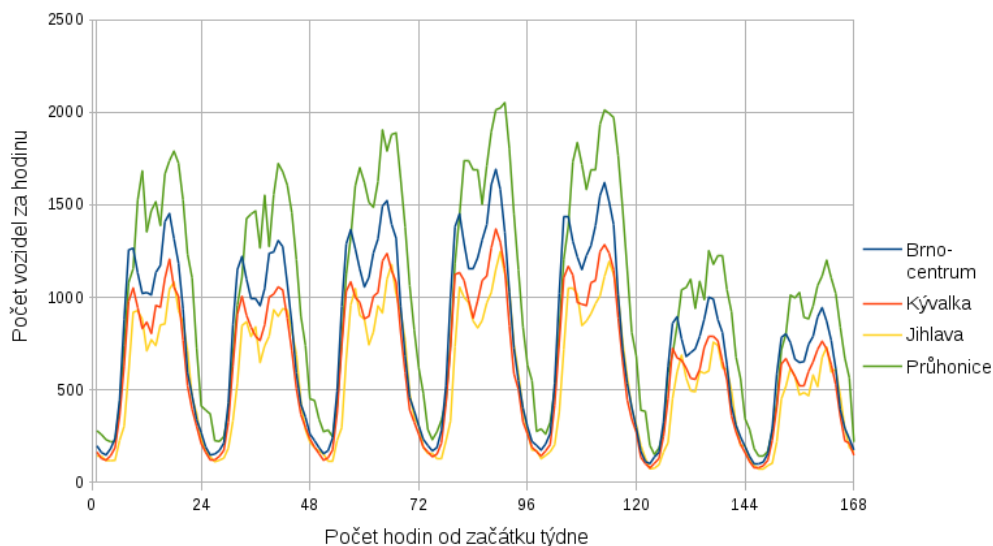
Statistiky byly měřeny na několika místech modelu dálnice. Ve směru Brno-Praha jsou nejzajímavější údaje z míst: Brno-centrum (D1 194.2 km), Kývalka (D1 182.2 km), Jihlava (D1 112.6 km) a Průhonice (D1 6.2 km). Ve směru Praha-Brno jsou to místa: Modletice (D1 11.7 km), Jihlava (D1 112.6 km), Kývalka (D1 182.2 km) a Brno-Slatina (D1 201.0 km)

5.2 Test 1: směr Brno – Praha v aktuálním stavu

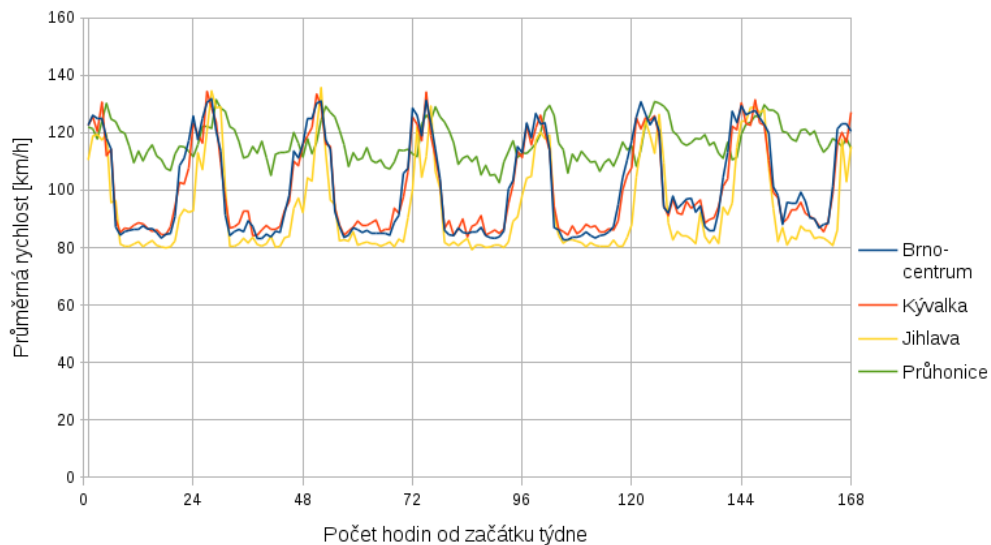
Jedná se o testovací scénář, který měl za úkol ověřit, je-li model správně nastavený a odpovídají-li hodnoty statistik modelu hodnotám skutečného stavu dálnice ve směru Brno-Praha.

Aktuální maximální povolená rychlost na dálnici je 130 km/h. Celá dálnice až na úsek Praha-Mirošovice má dva pruhy. Zmíněný úsek má v obou směrech pruhy tři. Bezpečnostní mezera použitá v modelu je 1.5 s, jelikož doporučená bezpečnostní mezera 2.0 s za současného stavu dálnice nemůže být dodržována. To zobrazují další scénáře.

Graf hustoty provozu odpovídá údajům získaným z dálnice D1, kde hustota je na různých místech odlišná. Graf také ukazuje, kdy během týdne dochází ke špičkám. Z grafu průměrné rychlosti je zase patrné, že při dopravních špičkách tato rychlost klesá. Také si lze všimnout, že průměrná rychlost je špičkami nejméně ovlivněna v Průhonicích, kde jsou, na rozdíl od ostatních měřených míst, tři pruhy.



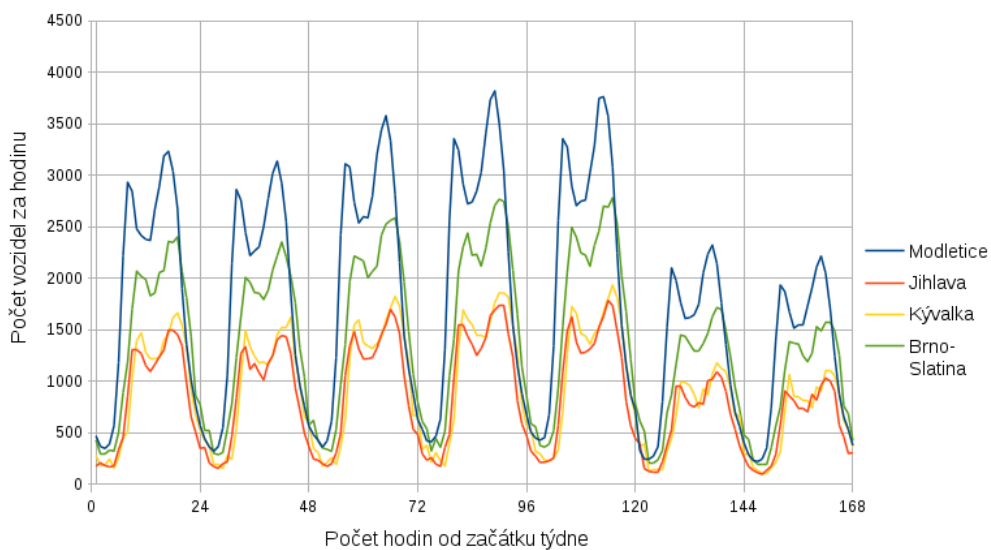
Obrázek 5: Hustota provozu při aktuálním stavu dálnice ve směru Brno-Praha



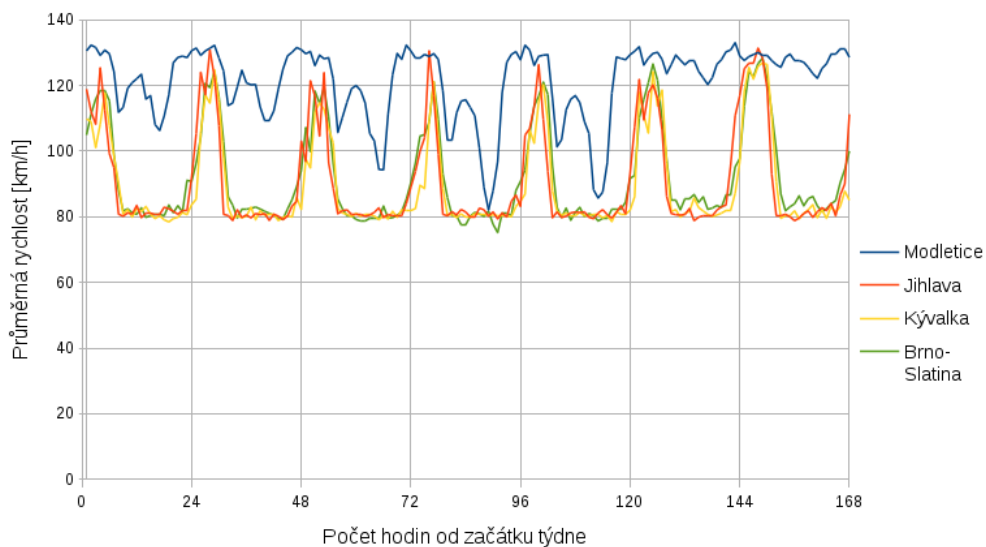
Obrázek 6: Průměrná rychlost aut při aktuálním stavu dálnice ve směru Brno-Praha

5.3 Test 2: směr Praha – Brno v aktuálním stavu

Jedná se o testovací scénář, který měl za úkol ověřit, je-li model správně nastavený a odpovídají-li hodnoty statistik modelu hodnotám skutečného stavu dálnice ve směru Praha-Brno. Model je v tomto případě nastaven stejně jako v Testu 1. Výsledky modelu odpovídají skutečným hodnotám.



Obrázek 7: Hustota provozu při aktuálním stavu dálnice ve směru Praha-Brno

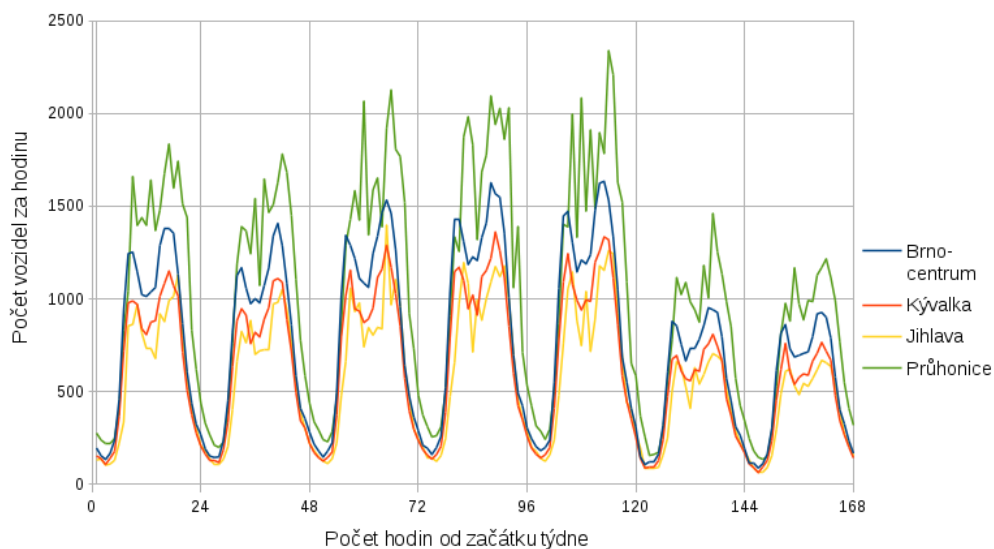


Obrázek 8: Průměrná rychlost aut při aktuálním stavu dálnice ve směru Praha-Brno

5.4 Scénář 1: směr Brno – Praha se třemi pruhy

První simulační scénář si kladl za cíl ověřit plynulost provozu dálnice při jejím rozšíření ze dvou na tři pruhy. Podle Ministerstva dopravy ČR je toto rozšíření plánováno až na rok 2050. V rámci tohoto scénáře však rozšíření uvažujeme již dnes.

Zde je patrné z grafu průměrné rychlosti, že dopravní špičky nezpomalily dopravu tak výrazně, jak je tomu za současného stavu dálnice. I přesto špičky rychlost dopravy stále viditelně ovlivňují.



Obrázek 9: Hustota provozu při rozšíření dálnice ve směru na Prahu na tři pruhy

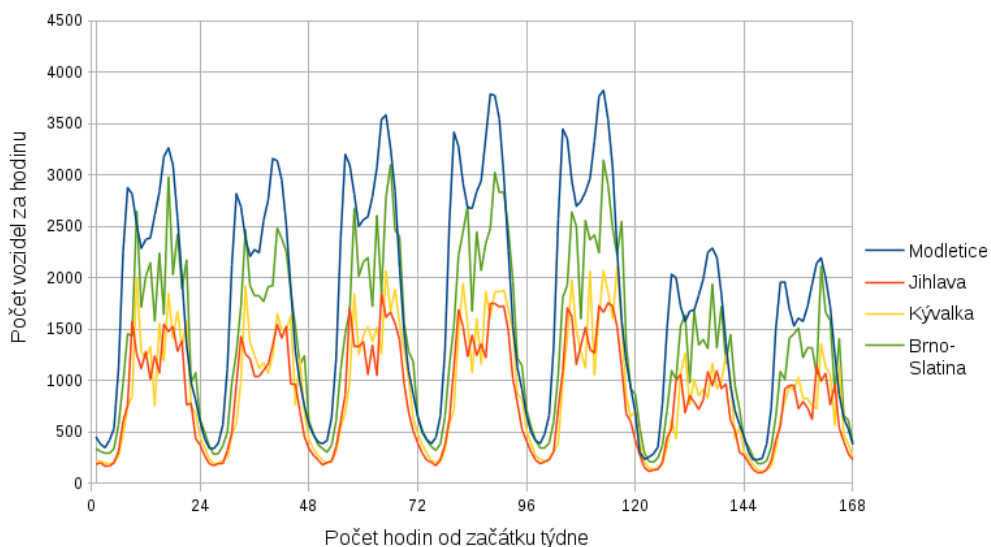


Obrázek 10: Průměrná rychlost aut při rozšíření dálnice ve směru na Prahu na tři pruhy

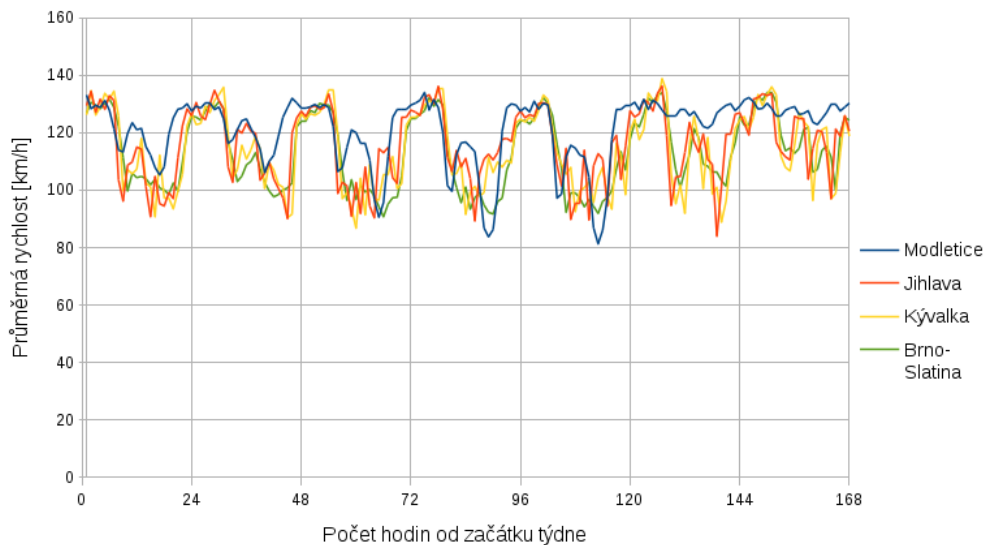
5.5 Scénář 2: směr Praha – Brno se třemi pruhy

Druhý simulační scénář je obdobný prvnímu, ověřuje však plynulost ve směru na Brno.

Stejně jako v předchozím scénáři simulace ukázala, že tři pruhy by zvýšily plynulost dopravy. Jelikož počet aut ve směru Praha - Brno je větší než ve směru opačném, dopravní špičky v tomto scénáři zatěžují průměrnou rychlost více než ve Scénáři 2.



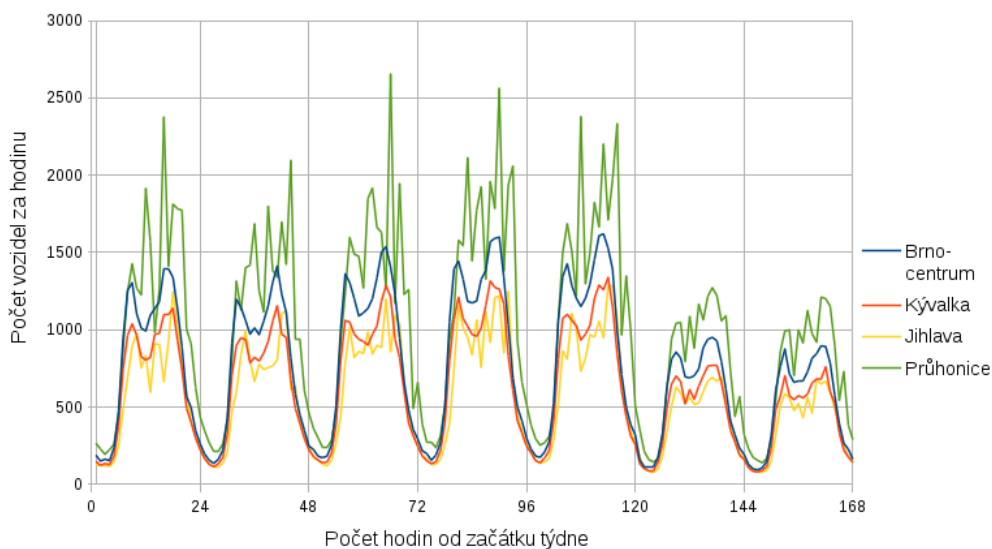
Obrázek 11: Hustota dopravy při rozšíření dálnice ve směru na Brno na tři pruhy



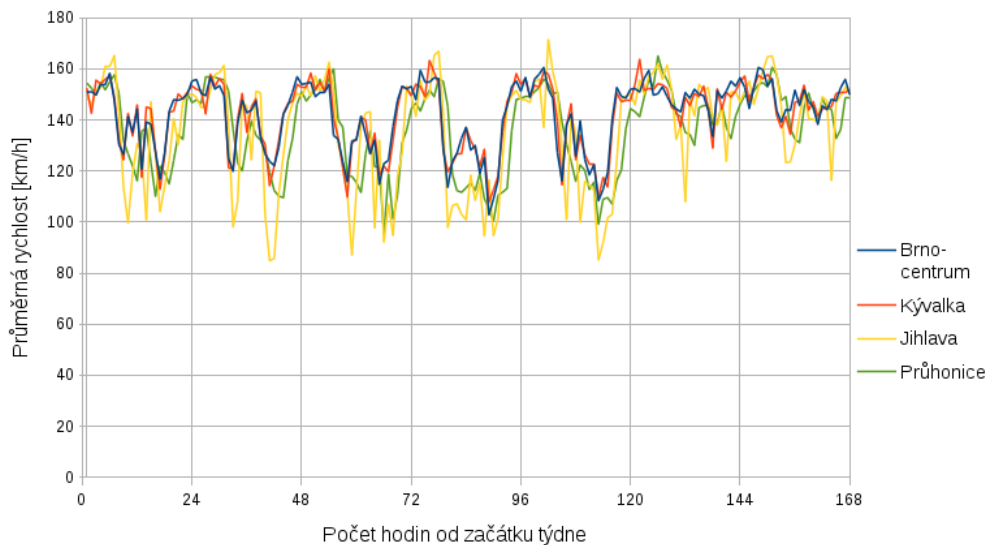
Obrázek 12: Průměrná rychlost aut při rozšíření dálnice ve směru na Brno na tři pruhy

5.6 Scénář 3: směr Brno – Praha se třemi pruhy o rychlosti 160 km/h

Třetí simulační scénář měl určit, nakolik by hustotě a plynulosti provozu na třípruhové D1 pomohlo zvýšení povolené rychlosti na 160 km/h. Vzhledem k aktuálnímu stavu dálnice nebyl uvažován scénář, ve kterém by rychlost byla zvýšena bez rozšíření na tři pruhy. Průměrná rychlost v tomto případě očekávaně vzrostla. Nicméně při dopravních špičkách zůstala rychlost stejná jako při maximální povolené rychlosti 130 km/h.



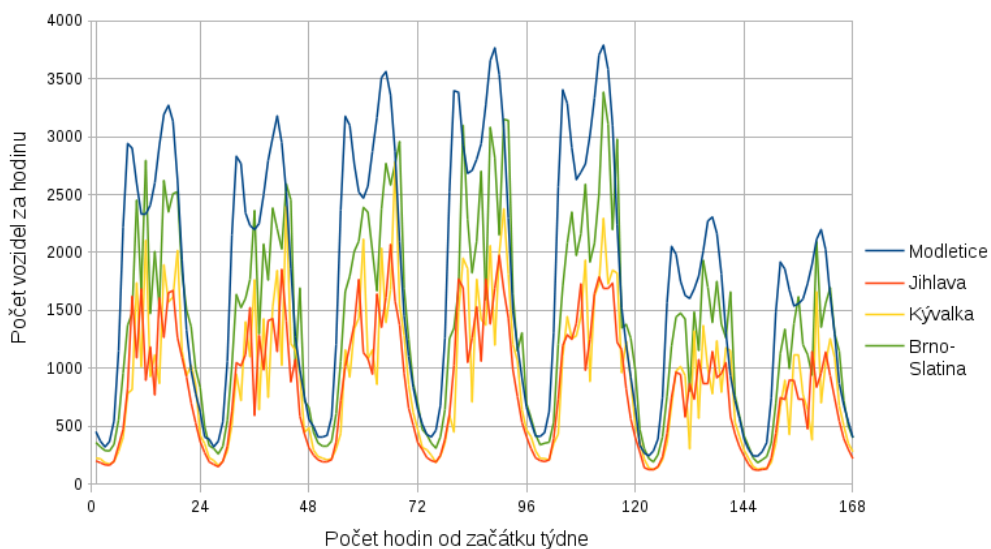
Obrázek 13: Hustota provozu při rozšíření dálnice ve směru na Prahu na tři pruhy a zvýšení maximální povolené rychlosti na 160 km/h



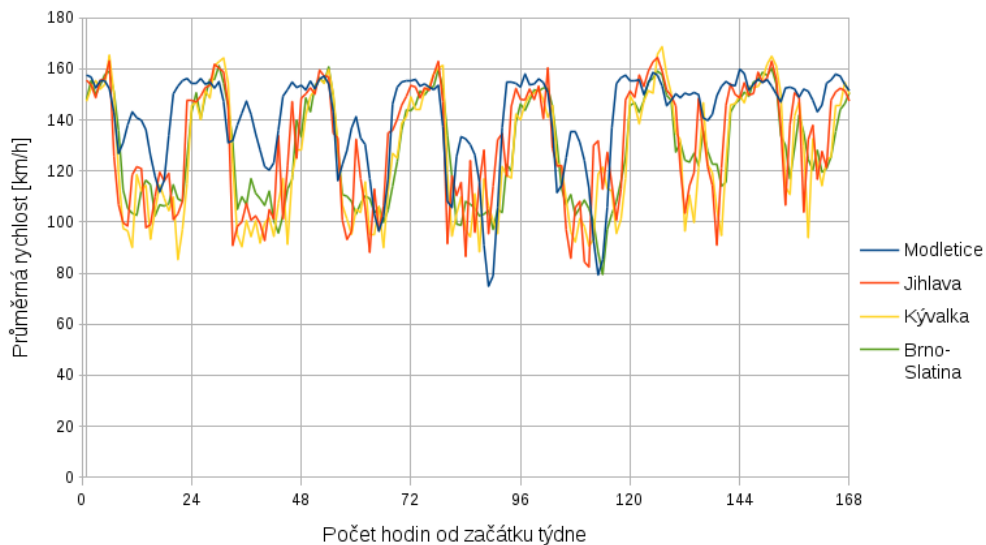
Obrázek 14: Průměrná rychlost aut při rozšíření dálnice ve směru na Prahu na tři pruhy a zvýšení maximální povolené rychlosti na 160 km/h

5.7 Scénář 4: směr Praha – Brno se třemi pruhy o rychlosti 160 km/h

Čtvrtý scénář zkoumá vliv zvýšení rychlostního limitu na 160 km/h na třípruhové D1 ve směru na Brno. I v tomto scénáři je průměrná rychlost aut vyšší než při rychlostním limitu 130 km/h. Tato rychlost se však velice mění v závislosti na hustotě okolního provozu.



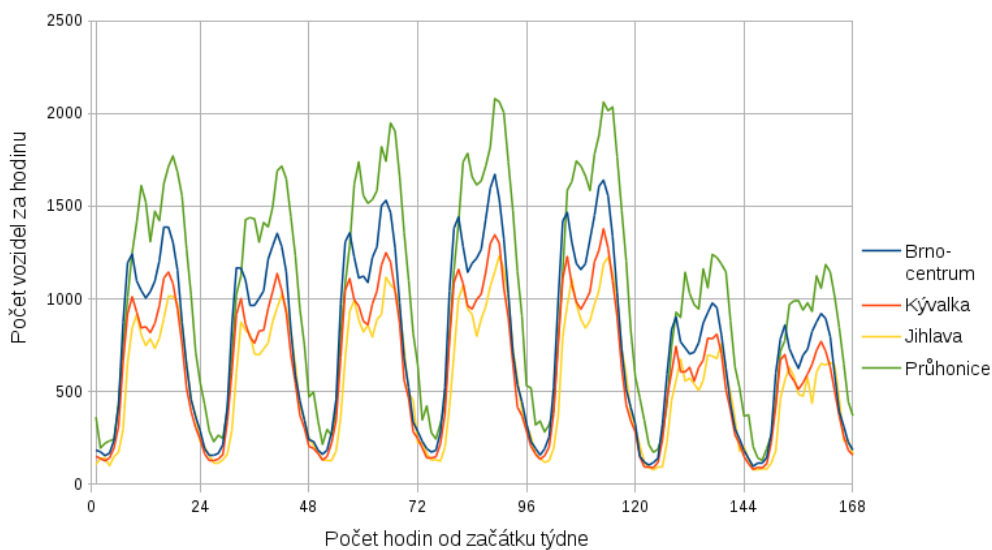
Obrázek 15: Hustota provozu ve směru na Brno v případě tří pruhů a maximální povolené rychlosti 160 km/h



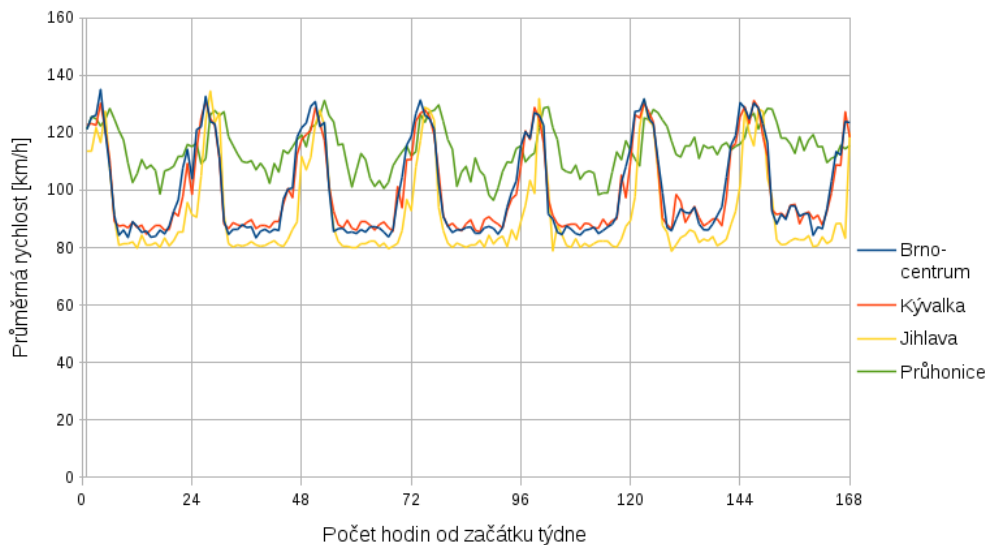
Obrázek 16: Průměrná rychlost aut ve směru na Brno v případě tří pruhů a maximální povolené rychlosti 160 km/h

5.8 Scénář 5: směr Brno – Praha v aktuálním stavu s dodržováním 2 s rozestupů

Pátý scénář měl zjistit propustnost dálnice v aktuálním stavu v případě, že by řidiči dodržovali bezpečnostní mezeru se středem 2 s. Simulace ukázala, že ve směru na Prahu by dodržování doporučené bezpečnostní vzdálenosti 2 s nemělo na hustotu dopravy, ani na průměrnou rychlost velký vliv.



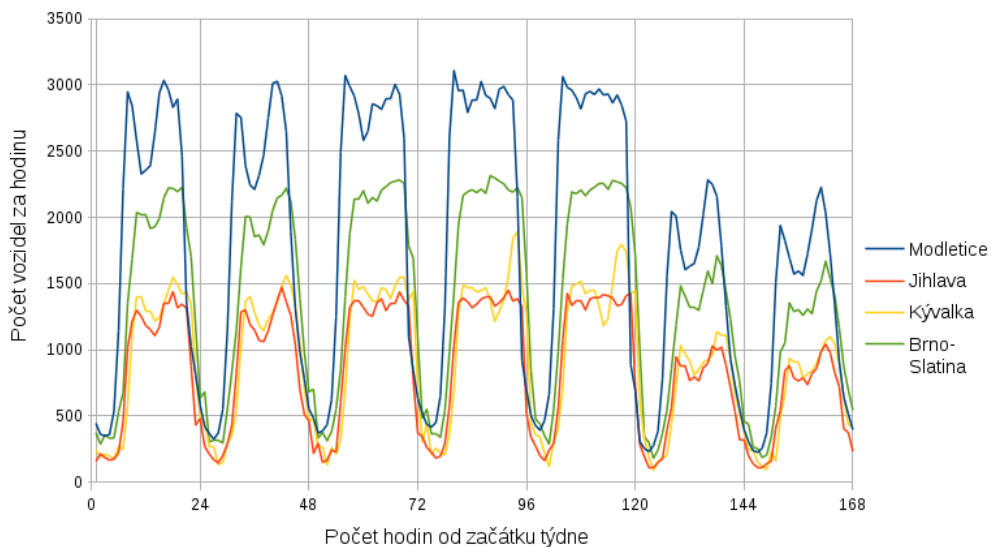
Obrázek 17: Hustota provozu ve směru na Prahu při bezpečnostní mezeře 2 s



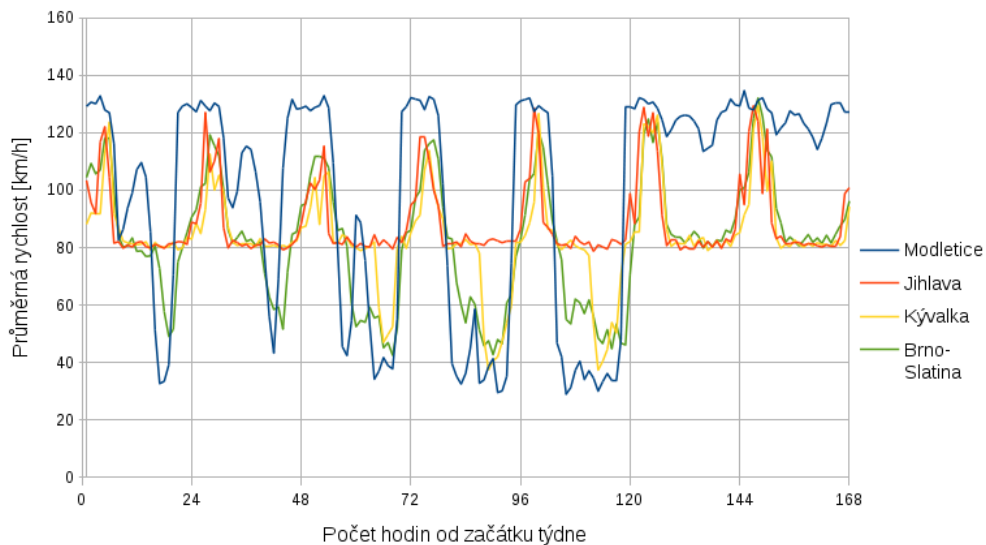
Obrázek 18: Průměrná rychlost aut ve směru na Prahu při bezpečnostní mezeře 2 s

5.9 Scénář 6: směr Praha – Brno v aktuálním stavu s dodržováním 2 s rozestupů

Šestý scénář měl zjistit vliv dvousekundové bezpečnostní mezery ve směru na Brno. Zde by se kvůli zvýšené bezpečnostní mezeře na dálnici nedostal požadovaný počet vozidel. To znamená, že dálnice D1 by nedokázala obsloužit všechna vozidla v případě, že by řidiči dodržovali doporučenou bezpečnostní mezeru. Patrné je to především u prvního měřicího bodu, který je nejblíže Praze a hustota dopravy je zde vždy nejvyšší. Na zbylé úseky zvětšená bezpečnostní mezera neměla velký vliv. Z průměrné rychlosti je patrné, že při simulaci tohoto scénáře došlo na dálnici k zácpám.



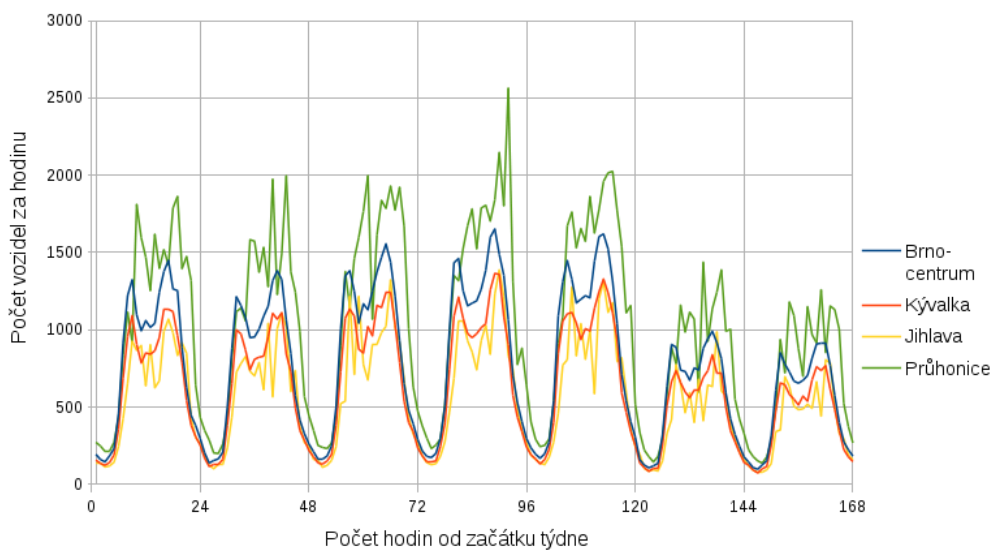
Obrázek 19: Hustota provozu ve směru na Brno při bezpečnostní mezeře 2 s



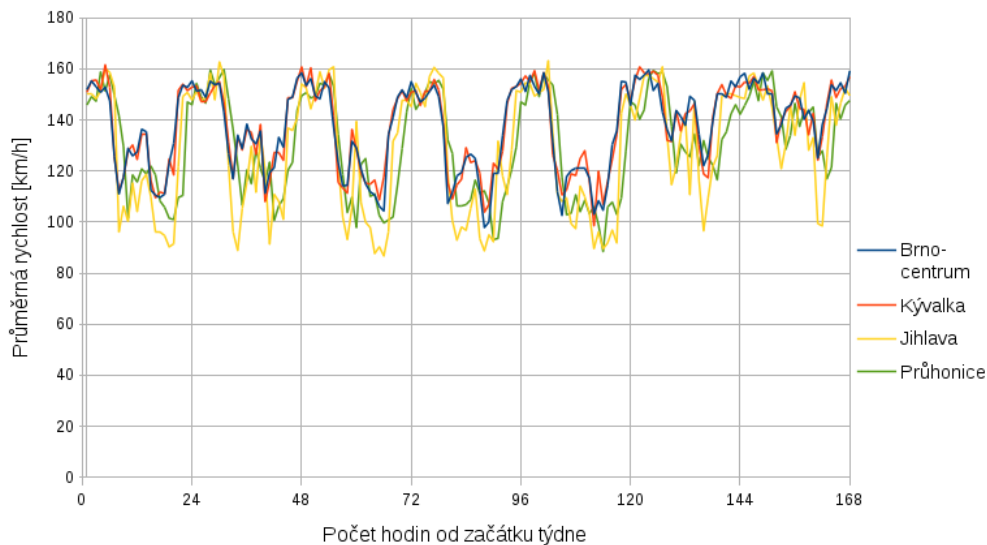
Obrázek 20: Průměrná rychlost aut ve směru na Brno při bezpečnostní mezeře 2 s

5.10 Scénář 7: směr Brno – Praha se třemi pruhy o rychlosti 160 km/h s 2 s rozestupy

Sedmý scénář si kladl za cíl určit propustnost dálnice rozšířené na tři pruhy s povolenou rychlostí 160 km/h, kde řidiči dodržují bezpečnostní mezery se středem 2 s. Dálnice ve směru na Prahu nemá problém obsloužit požadovaný počet vozidel ani v tomto případě.



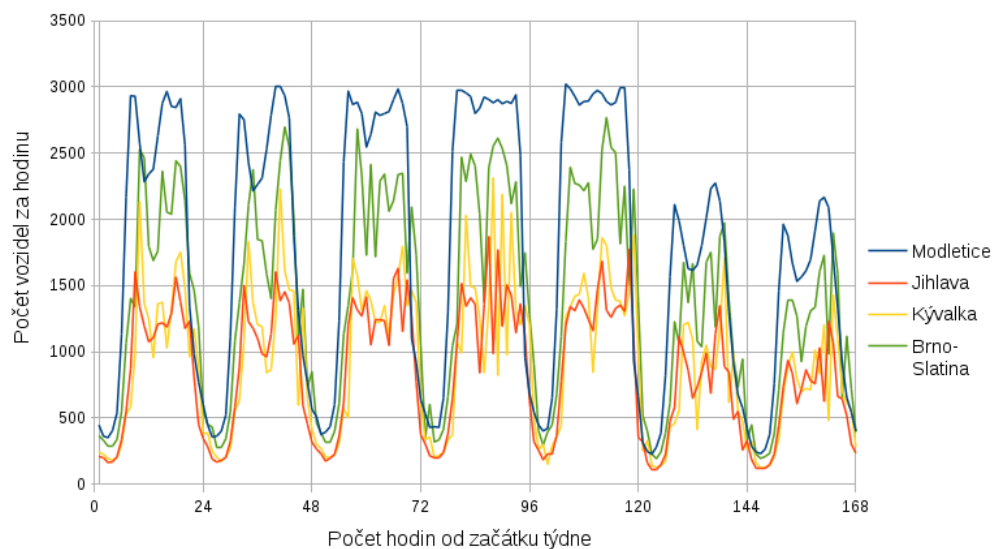
Obrázek 21: Hustota provozu ve směru na Prahu v případě tří pruhů, maximální povolené rychlosti 160 km/h a bezpečnostní mezery 2 s



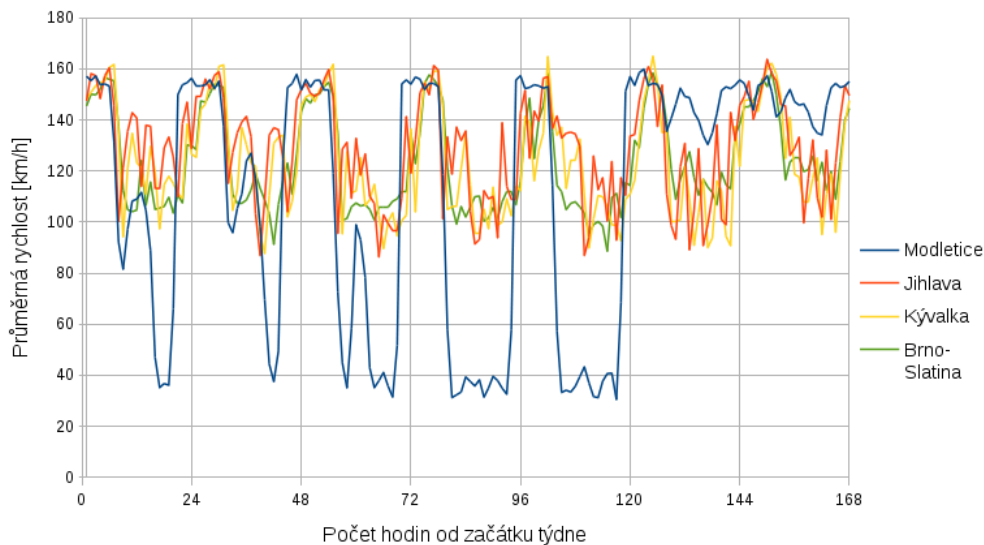
Obrázek 22: Průměrná rychlost aut ve směru na Prahu v případě tří pruhů, maximální povolené rychlosti 160 km/h a bezpečnostní mezery 2 s

5.11 Scénář 8: směr Praha – Brno se třemi pruhy o rychlosti 160 km/h s 2 s rozestupy

Osmý scénář ověřoval vliv dvousekundových bezpečnostních mezer ve směru na Brno. Počet vozidel, kterým bylo umožněno dálnicí projet, je v tomto případě stejný jako ve Scénáři 6. To znamená, že dálnice neumožnila průjezd požadovanému počtu vozidel.



Obrázek 23: Hustota provozu ve směru na Brno v případě tří pruhů, maximální povolené rychlosti 160 km/h a bezpečnostní mezery 2 s



Obrázek 24: Průměrná rychlost aut ve směru na Brno v případě tří pruhů, maximální povolené rychlosti 160 km/h a bezpečnostní mezery 2 s

5.12 Závěry experimentů

Byly provedeny dva testy a osm experimentů. Testování modelu ukázalo, že model je dostatečně validní pro následné experimenty. V těch byly zkoumány možné budoucí úpravy dálnice, jako rozšíření na tři pruhy či zvýšení rychlostního limitu. Obě tyto úpravy mají totiž v budoucnu reálné šance na uskutečnění. Rovněž jsme zkoumali vliv dodržování bezpečnostních mezer mezi vozidly na propustnost dálnice a plynulost provozu na ní.

Výsledky našich experimentů ukazují, že současný stav dálnice neumožňuje ve směru z Prahy na Brno dodržování doporučených bezpečnostních mezer (2 s) při aktuální hustotě provozu. I při snížených bezpečnostních mezích je v dopravní špičce doprava neplynulá. Plynulosti dopravy by pomohlo rozšíření dálnice na tři jízdní pruhy. Co se týče zvýšení maximální povolené rychlosti na 160 km/h, naše experimenty ukázaly, že průměrná rychlost dopravy by vzrostla, zvýšená rychlost by nicméně nikterak nesnížila dopad dopravních špiček.

6 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

Experimenty prokázaly pozitivní vliv tří jízdních pruhů na plynulost jízdy, neprokázaly však, že by zvýšení rychlostního limitu pomohlo zmírnit dopad dopravních špiček. Rovněž ukázaly, že za současné situace je v některých částech dálnice D1 nemožné dodržovat v dopravní špičce dostatečné bezpečnostní mezery mezi vozidly.

Reference

- [1] BESIP. *Bezpečná vzdálenost* [online]. 2014 [cit. 2014-12-06]. Dostupné na: <<http://www.ibesip.cz/cz/ridic/bezpecne-rizeni-vozidla/bezpecna-vzdalenost>>.
- [2] CPPREFERENCE.COM. *C++ reference* [online]. 2014 [cit. 2014-12-07]. Dostupné na: <<http://en.cppreference.com/w/>>.
- [3] DOPRAVNÍINFO.CZ. *Hustota provozu v profilu dálnice D1* [online]. 2014 [cit. 2014-12-06]. Dostupné na: <<http://www.dopravniinfo.cz/hustota-provozu-v-profilu-dalnice-d1>>.
- [4] PERINGER, P. *Modelování a simulace* [online]. 2014 [cit. 2014-12-04]. Dostupné na: <<http://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IMS/public/prednasky/IMS.pdf>>.
- [5] PERINGER, P. *SIMLIB* [online]. 2014 [cit. 2014-12-07]. Dostupné na: <<http://www.fit.vutbr.cz/peringer/SIMLIB/>>.
- [6] RYCHNOV, n. M. *Statistika dopravy* [online]. 2014 [cit. 2014-12-04]. Dostupné na: <<http://www.rychnovnm.cz/dokumenty/statistika-dopravy-0>>.
- [7] TEXPRESSLANES. *Vehicle Classifications* [online]. 2014 [cit. 2014-12-06]. Dostupné na: <<http://http://www.texpresslanes.com/pricing/vehicle-classification-shapes>>.
- [8] ČESKO. *Zákon č. 361/2000 Sb.: o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů* [online]. 2000 [cit. 2014-12-04]. Dostupné na: <<http://ftp.aspi.cz/opispdf/2000/098-2000.pdf>>.
- [9] ČR Ředitelství silnic a dálnic. *Celostátní sčítání dopravy 2010* [online]. 2011 [cit. 2014-12-06]. Dostupné na: <<http://scitani2010.rsd.cz/pages/shop/default.aspx>>.