

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Bakalářská práce

**Rozbor dopravně inženýrského softwaru a jeho využití
v praxi**

Oliver Píša

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Oliver Píša

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Rozbor dopravně inženýrského softwaru a jeho využití v praxi

Název anglicky

Analysis of traffic engineering softwares and its application in practice

Cíle práce

Popis studie přehledu možného použití dopravně inženýrského softwaru při aplikaci a návrhu pevného signálního plánu, struktura signálního plánu vybrané křižovatky, efekt mobility, následné kapacitní posouzení včetně návrhu přechodu pro chodce a fázových přechodů. Dále popsat účel softwaru pro dopravní plánování, modelování, designu a jeho přednosti.

Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Metodika práce
4. Přehled řešené problematiky
5. Vlastní zpracování
6. Výsledky a diskuse
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Doporučený rozsah práce

40 stran včetně grafů a příloh

Klíčová slova

SSZ, indukční smyčka, kongesce, dopravní modelování, PTV VISSIM, LISA+

Doporučené zdroje informací

Savolainen, P.; Mannering, F. Horizontal and Vertical Curve Impact on Road Accident; Texas Transportation Institute: Houston, TX, USA, 2007

Shanmuk, H. Geometric Design of Highway and Element of Cross Section. Transp. Eng. 2018. Available online: <https://knowledge4civil.wordpress.com/2016/12/12/geometric-design-of-highway/> (accessed on 25 April 2022).

Technické podmínky: TP 133 Zásady pro vodorovné dopravní značení na pozemních komunikacích (II. vydání), CDV, 2005

Technické podmínky: TP 179 Navrhování komunikací pro cyklisty, CDV, 2017

Technické podmínky: TP 65 Zásady pro dopravní značení na pozemních komunikacích (II. vydání), CDV, 2002

Technické podmínky: TP 81 Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení provozu na pozemních komunikacích, CDV, 2015

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

Dr. Ing. Retta Zewdie

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 18. 1. 2023

doc. Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 3. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 25. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci Rozbor dopravně inženýrského softwaru a jeho využití v praxi jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.03.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Dr. Ing. Retta Zewdie za ochotu, povzbuzení a pomoc při psaní bakalářské práce.

Rozbor dopravně inženýrského softwaru a jeho využití v praxi

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na problematiku dopravního inženýrství s využitím dopravně-inženýrského softwaru. Začíná projekty Smart Cities a C-Roads, které představují inovativní přístupy v řízení dopravy naší budoucnosti. Dále se zaměřuje na dopravní průzkumy, problematiku nehod a nástroje používané při jejich analýze a simulaci. Podrobněji se věnuje návrhu křižovatky se SSZ, včetně fázových přechodů, signálního plánu a bezpečnosti chodců na přechodech.

Vlastní zpracování práce zahrnuje význam dopravního modelování pomocí softwarových nástrojů, jako jsou PTV Vissim, DYNAMIQ, SUMO nebo Aimsun Next, a komplexního navrhování a řízení křižovatek s využitím programu LISA+. Kromě toho se zabývá také evidencí dopravního značení a využitím geografických informačních systémů pro efektivní plánování a správu dopravní infrastruktury.

Klíčová slova: SSZ, indukční smyčka, kongesce, dopravní modelování, PTV VISSIM, LISA+

Analysis of traffic engineering software and its application in practice

Abstract

This bachelor thesis focuses on the issues of traffic engineering using traffic engineering software. It begins with Smart Cities and C-Roads projects, which introduce innovative approaches in managing the transportation of our future. It further delves into transportation surveys, accident analysis, and tools used for their analysis and simulation. More specifically, it addresses the design of intersections with traffic signal systems, including phase transitions, signal plans, and pedestrian safety at crossings.

The main part of the thesis covers the significance of traffic modeling using software tools such as PTV Vissim, DYNAMIQ, SUMO, or Aimsun Next, and the comprehensive design and management of intersections using programs like LISA+. Additionally, it also addresses the documentation of traffic signage and the utilization of geographic information systems for efficient planning and management of transportation infrastructure.

Keywords: traffic lights, induction loop, traffic congestion, traffic model, PTV VISSIM, LISA+

Obsah

1 Úvod	1
2 Cíl práce	2
3 Metodika práce	2
4 Přehled řešené problematiky	3
4.1 Dopravní inženýrství: Výzvy a inovace	3
4.2 Inteligentní mobilita v městské dopravě	4
4.2.1 Kooperativní systémy a Projekt C-Roads	6
4.3 Dopravní průzkumy a získávání klíčových dopravních dat	7
4.3.1 Vyhodnocování charakteristik dopravních proudů	7
4.3.2 Celostátní sčítání dopravy a průzkum dopravního chování	7
4.4 Bezpečnost na silnicích	8
4.4.1 Moderní přístupy při analýze dopravních nehod	9
4.5 Křižovatky řízené SSZ	11
4.5.1 Historie řízených křižovatek	11
4.5.2 Kritéria při návrhu SSZ.....	12
4.5.3 Návrh signálního plánu	12
4.5.4 Fázové přechody a program řízení.....	16
4.5.5 Návrh přechodu pro chodce	17
4.5.6 Klíčové prvky křižovatky se SSZ, dopravní řadič a indukční smyčka	18
4.6 Preference MHD a IZS na SSZ	19
4.7 Dopravní kongesce.....	19
5 Vlastní zpracování	21
5.1 Modelování dopravy	21
5.1.1 Modely a simulace	21
5.1.2 Dopravní modelování v ČR	24
5.1.3 PTV Vissim.....	24
5.1.4 PTV Viswalk a Visum	26
5.1.5 DYNAMIQ a EMME	27
5.1.6 SUMO.....	28
5.1.7 Aimsun Next.....	29
5.2 Komplexní navrhování a řízení světelné signalizace	30
5.2.1 LISA+, ANNA a INES	30
5.2.2 TRANSYT, PTV VISTRO a EDIP Software	32
5.3 Evidence dopravního značení	33
5.3.1 Geografický informační systém.....	33
5.3.2 ArcGIS	34
6 Výsledky a diskuse	35

7 Závěr.....	37
8 Seznam použitých zdrojů	38
9 Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratk	44
9.1 Seznam obrázků	44
9.2 Seznam tabulek	44
9.3 Seznam grafů.....	44
9.4 Seznam použitých zkratk.....	45

1 Úvod

Doprava je nezbytnou a neodmyslitelnou součástí života každého z nás. Denně ovlivňuje celý náš svět při přepravě zboží a pohybu osob. Lidé díky dostupnosti dopravy a zlepšení životních standardů cestují nejen za prací či studiem, ale i za zábavou a rekreací. S nárůstem obyvatelstva, rozvojem ekonomiky společnosti, průmyslu a obchodu roste poptávka po dopravě. Doprava se neustále rozrůstá, a proto je nutné na ni reagovat zlepšením nebo udržením její bezpečnosti a efektivnosti. Požadavky na implementaci technologických dopravních řešení i dopravní politiky musí plnit očekávání zákazníků, dodavatelů i běžných občanů.

Rostoucí vývoj informačních technologií a dopravy zásadním způsobem formuje vše kolem nás. Celý svět se však nepotýká jen s nově vznikajícími výzvami, ale také se starými znovu se opakujícími problémy – dopravními kongescemi, nehodami, přetíženími a negativními vlivy na životní prostředí.

Není již pochyb o tom, že hlavním viníkem je nedostatečný výpočetní výkon počítačů nebo snad nedostupnost samotných počítačů a softwaru. To, že by však software vyřešil všechny problémy sám o sobě je stále pouhou iluzí. Klíčovým faktorem nadále zůstává potřeba zkušených a kompetentních dopravních inženýrů. Důležitost dopravně-inženýrského softwaru spočívá nejen v zjednodušení řízení dopravy, ale i ve schopnostech čelit neustále se měnícím výzvám.

2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je poskytnout ucelený přehled použití dopravně-inženýrského softwaru v oblastech dopravního inženýrství. Identifikovat klíčové firmy v USA i EU, které poskytují software pro různé účely a aplikace. Analyzovat jejich produkty, služby nebo inovace a porozumět trendům v dopravním inženýrství, jako je inteligentní mobilita v městské dopravě včetně projektu C-Roads. Zaměřit se na řízení křižovatky s pevným signálním plánem, stanovit kritéria při návrhu signálního plánu a bezpečnostních opatření na přechodu pro chodce. Specifikovat výhody a výzvy spojené s implementací a používáním dopravně-inženýrského softwaru.

3 Metodika práce

Metodika práce spočívá v kombinaci různých zdrojů informací, zahrnujících odbornou literaturu, články a periodika. Dále jsou v metodice zahrnuty online zdroje, konkrétně webové stránky firem, katalogy nebo postupy, které poskytují jak informace, tak recenze dostupných softwarových nástrojů. Metodika umožní získání spektra informací, která jsou nezbytná při sestavování rešerše.

4 Přehled řešené problematiky

4.1 Dopravní inženýrství: Výzvy a inovace

Dopravní inženýrství představuje oblast znalostí, která se zabývá organizací, koordinací a plánováním dopravní infrastruktury s cílem dosáhnout co nejlepší plynulosti a bezpečnosti provozu (1). Klíčová slova – doprava a inženýrství spojují technickou odbornost s praktickými potřebami mobility a infrastruktury. Obor dopravního inženýrství studuje různé jevy a zákonitosti v dopravě, ze kterých je možné získat podklady pro plánování a návrh dopravních cest. Při řešení dopravních výzev se dopravní inženýři neobejdou bez spolupráce s odborníky z různých oborů – životního prostředí, informatiky, sociologie, programování, urbanismu nebo architektury. Oproti jiným disciplínám sahají počátky dopravního inženýrství do nedávné historie. Dnes se uplatňuje zejména v městské a silniční dopravě, která představuje největší výzvy. Dopravní řešení obsahují nejen okamžitá opatření v řízení a organizaci dopravy, ale i dlouhodobé strategie pro její zlepšování. V dopravně-inženýrské praxi je klíčové dodržování platných předpisů jako jsou zákony, vyhlášky, normy nebo technické podmínky (2).

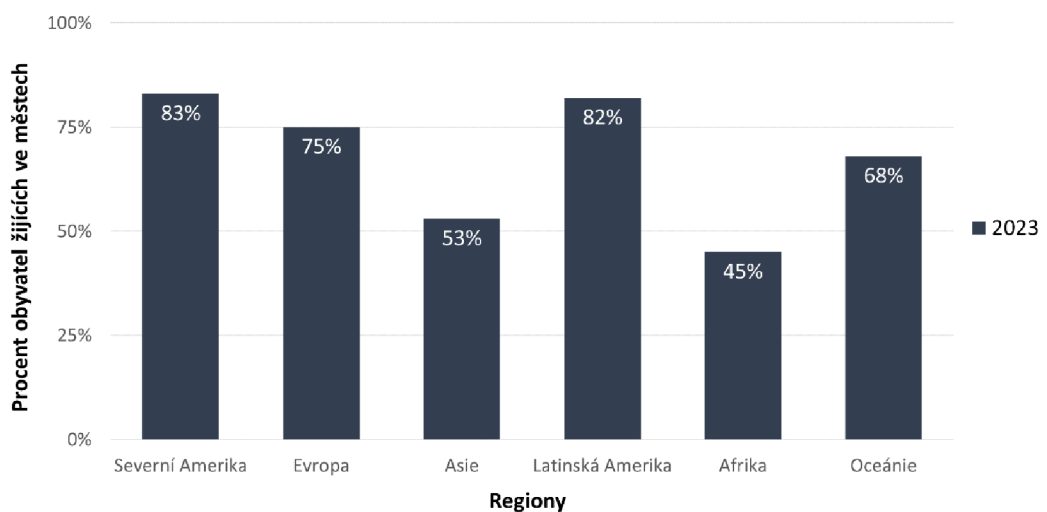
Dříve mělo přístup k ústředním počítačům pouze omezené množství osob. Jednalo se především o odborníky z řad institucí, jako jsou univerzity, úřady a velké firmy. Odborníci mohli využívat sofistikovaných nástrojů pro modelování dopravy, avšak ostatní byli odkázáni na manuální a analytické postupy. Jelikož se počítače staly postupně stejně dostupné jako např. v minulé době kalkulačky, a i ekonomicky přívětivé, začalo se vyvíjet široké množství softwaru a nástrojů pro dopravní inženýrství a každé fáze plánování (3).

Dopravně-inženýrský software je zásadním nástrojem v současném světě moderních technologií. Řadí se sem takové, které se týkají dopravních průzkumů, prognóz, analýz a návrhů. Mezi příklady použití patří (2):

- Dopravní průzkumy a analýza vývoje dopravy
- Posouzení dopravních řešení a prognóza dopravy
- Dopravní plánování a bezpečnost dopravy
- Modelování dopravy

4.2 Inteligentní mobilita v městské dopravě

V rámci měst dochází dlouhodobě k růstu obyvatelstva. Již od roku 2007 přetrvává situace, při které žije více lidí ve městech než mimo ně. V České republice tento trend zahrnuje téměř 75 % obyvatelstva (4). Nárůst nezvyšuje pouze stěhování obyvatel, ale také transformace venkovských lokalit na městská prostředí. V reakci na urbanizaci a nové inovace v informačních technologiích, vznikají chytrá města (Smart Cities). Cílem chytrých měst není vždy jen zlepšení bezpečnosti nebo ekologie, ale i celkové kvality života a veřejného prostoru. Chytrá města si kladou za cíl řešit otázky spojené se sociálními, demografickými, ekonomickými i environmentálními změnami (5).



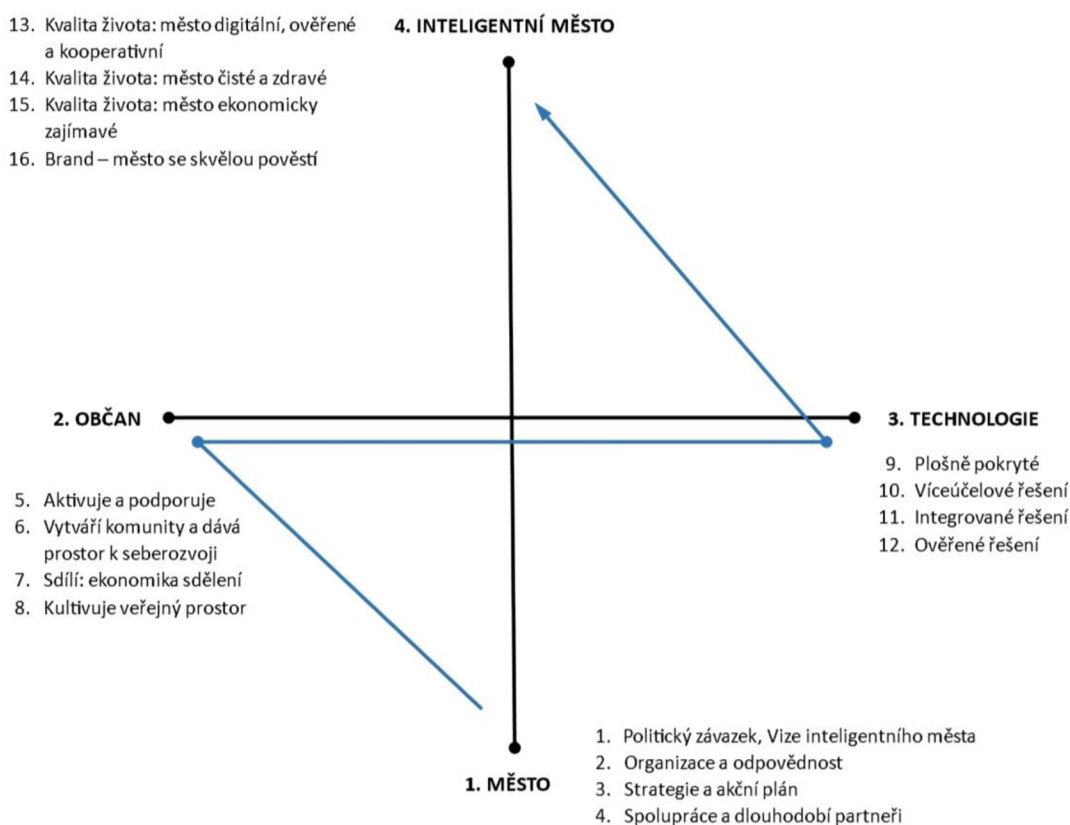
Graf 1 – Procent obyvatel z celkové populace žijících ve městech (58)

Z technologického kontextu jde především o integraci informační a komunikační sítě s fyzickými zařízeními. Propojením těchto dat vznikne internet věcí (IoT), který dokáže zpracovávat obrovská množství dat a podporovat řízení měst. Chytrá řešení přináší vizualizaci a virtualizaci dat, která se propojují a sdílejí. Data slouží jako cenný zdroj a jsou bezpečně a spolehlivě uložena před veřejností. Systémy jsou však často vyvíjeny pouze na konkrétní požadavky a nelze je tak z důvodu rozličné kompatibility zcela kombinovat (6).

Hlavními generátory dat jsou občané a stroje. Vlády a firmy získávají sociální a podniková data od lidí, avšak nejvíc dat pochází z chytrých zařízení, která na různých místech nepřetržitě vytvářejí, ať už obrazová, nebo textová data. Data získaná ze senzorů nebo softwaru lze souhrnně nazvat jako IoT data. Vzhledem k tomu, že exponenciálně roste množství dat ze strojů, vznikají otevřené datové portály, které napomáhají vývojářům při tvorbě nových aplikací. Data jsou vkládána především díky členským státům Evropské unie ve formátech xls, xlsx, xml, csv nebo pomocí webového API (6).

Smart City se dle metodiky Ministerstva pro místní rozvoj ČR (MMR) formuje sestavou 16 prvků, jež mohou být začleněny do 4 provázaných sfér (7):

- Organizační stránka (Město) se zaměřuje na efektivní organizaci městských struktur a využívání naměřených dat k rozhodování.
- Komunitní aspekt (Občan) zapojuje názory a data občanů do městského života prostřednictvím elektronické komunikace.
- Infrastrukturní část (Technologie) zavádí moderní technologie pro řešení městských výzev a vytváří systém pro sběr dat a jejich analýzu.
- Cílem (Inteligentní město) je zlepšení kvality života, zvýšení jeho atraktivity a dosažení měřitelných výsledků.



Obrázek 1 – Rámec inteligentního města (7)

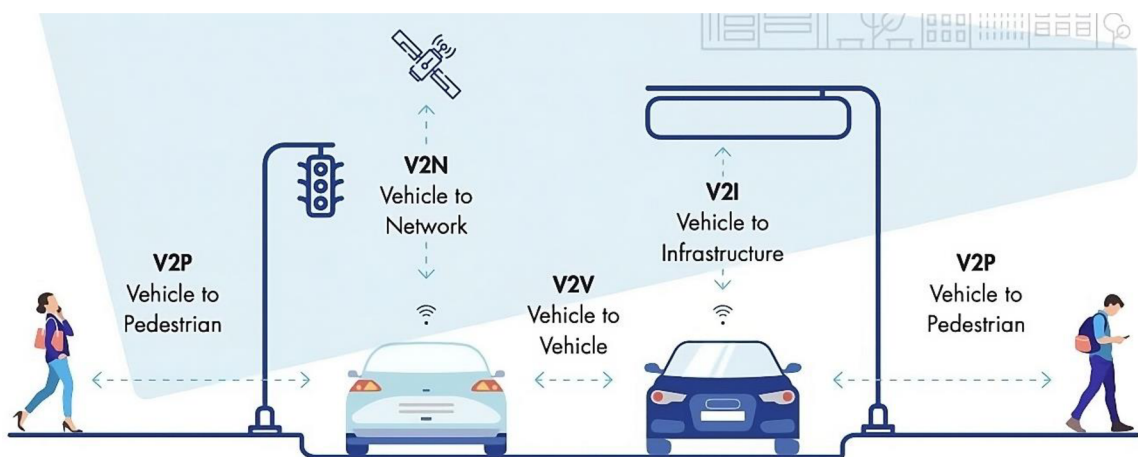
Mezi klíčové prvky chytrého města patří efektivní management velkého množství dat, podpora mobility a logistiky, bezpečnostní opatření, zohlednění rozhraní mezi člověkem a technologiemi, stanovení nových standardů pro moderní digitální řešení a příprava na využití autonomních vozidel a umělé inteligence. Skrze chytrá řešení a data městského prostředí lze získat důležitá vstupní data pro dopravní inženýry při plánování, modelování a simulaci dopravy (2).

4.2.1 Kooperativní systémy a Projekt C-Roads

Projekt C-Roads je součástí evropské iniciativy, která se snaží o implementaci kooperativních inteligentních systémů. Jedná se tak o test při nasazení nejmodernějších dopravních systémů na evropské dálnice, do center měst a MHD. Projekt je důležitý pro budoucnost jako příprava na nasazení autonomních vozidel. Komunikace může probíhat s řídicími a informačními centry, ale i se samotnými vozidly přes mobilní sítě nebo inteligentní systémy umístěné ve vozidlech (8).

Pod pojmem Vehicle-2-X si lze představit komunikaci každého vozidla s celou dopravní infrastrukturou. Moderní auta vytváří velké množství dat, která lze zasílat ostatním vozidlům (V-2-V) nebo dopravním zařízením (V-2-I). Komunikací se získají nejen základní data o rychlosti, směru nebo poloze vozidla, ale také informace o povětrnostních podmínkách, teplotě, automatickému brzdění vozidla nebo pohybu záchranných systémů. Díky těmto datům je možné varovat ostatní vozidla před dopravní nehodou, kongescí nebo upozornit na sníženou viditelnost. Jelikož budou řidiči dříve informováni, dojde tak k vyšší ukázněnosti, řidiči budou schopni zabránit dalším nehodám a zvýší se tak bezpečnost a plynulost silničního provozu.

V České republice, konkrétně v Plzni a Ostravě, probíhají přípravy k využití chytré komunikace i v rámci městské hromadné dopravy. Projíždějící vozidla budou varována např. při výstupu cestujících nebo při riziku střetu s tramvají při odbočování. Tato komunikace bude důležitá také na místech, kde není vytvořena preference pro vozidla hromadné dopravy (9).



Obrázek 2 – Kooperativní systémy (59)

4.3 Dopravní průzkumy a získávání klíčových dopravních dat

Pro získání důležitých dat, která jsou potřebná pro dopravní plánování a modernizaci komunikací, je nutné provádět dopravní průzkumy. Z průzkumů lze zaznamenat základní informace o typech a počtech dopravních prostředků, osob nebo cyklistů, ale také například směr a důvod cesty nebo kvalitu provozu. Sbíráni dat o dopravě může být někdy náročné, a proto existují různé způsoby a metody pro jeho usnadnění (10).

4.3.1 Vyhodnocování charakteristik dopravních proudů

Souvislým pohybem vozidel nebo chodců v jednom směru, ať už za sebou nebo vedle sebe, nazýváme dopravní proud. Mezi klíčové ukazatele patří intenzita, hustota a rychlost.

Intenzitou dopravního proudu rozumíme pohyb účastníků dopravy jedním směrem určitým profilem komunikace za stanovenou jednotku času, tedy např. počet vozidel za hodinu (voz/h). Odlišný význam má hustota, která naopak udává počet dopravních jednotek, které se v daném okamžiku vyskytují v jednom směru na vybrané délce komunikace (voz/km). Průměrná rychlost všech vozidel je pak označena jako rychlost dopravního proudu (km/h) (10).

4.3.2 Celostátní sčítání dopravy a průzkum dopravního chování

V pravidelných intervalech pěti let se na celém území České republiky provádí celostátní průzkum. Sčítáním se získávají informace o aktuální skladbě dopravního proudu, dopravních výkonech a vývoji intenzit potřebných pro aktualizaci technických podmínek a prognózy dopravy (11).

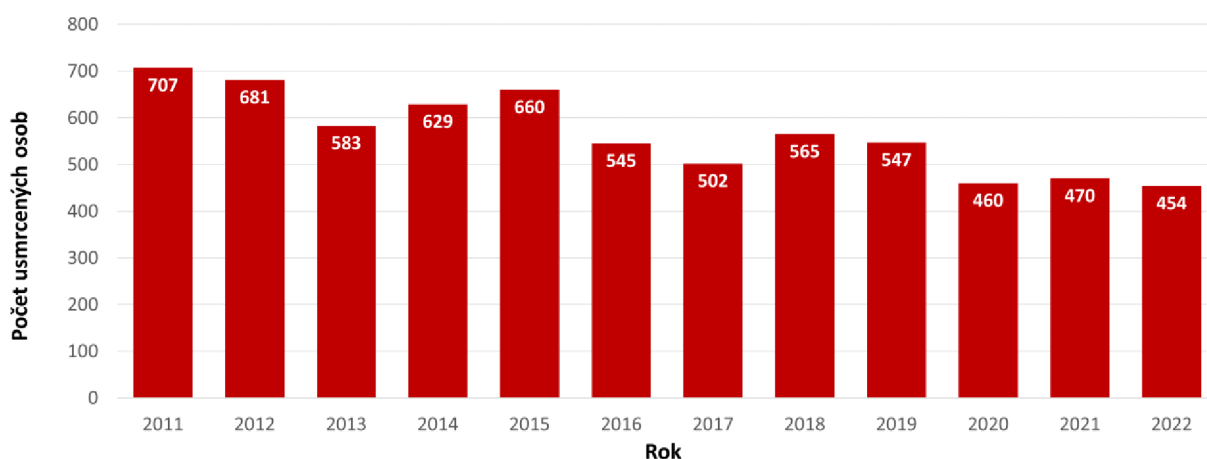
Průzkum dopravního chování je nezbytný pro pochopení chování řidičů a chodců, po kterém lze analýzou lépe investovat peníze do dopravních staveb. Poslouží k optimalizaci finančních prostředků a rozvoji regionů, obcí i státu. Může mít také pozitivní vliv na životní prostředí a kvalitu života (12).

Celostátní průzkum v České republice proběhl v období mezi lety 2017 až 2019. Pro zajištění reprezentativního výsledku bylo nutné zajistit dostatečný vzorek osob. Testu se zúčastnilo přes 22 000 osob, které odpovídaly na otázky typu účel, doba, vzdálenost cesty a čas, ve kterém cestují nebo jaký dopravní prostředek využívají. Průměrná vzdálenost jedné cesty v ČR je přibližně 10 km a doba strávená cestováním 28 minut (12).

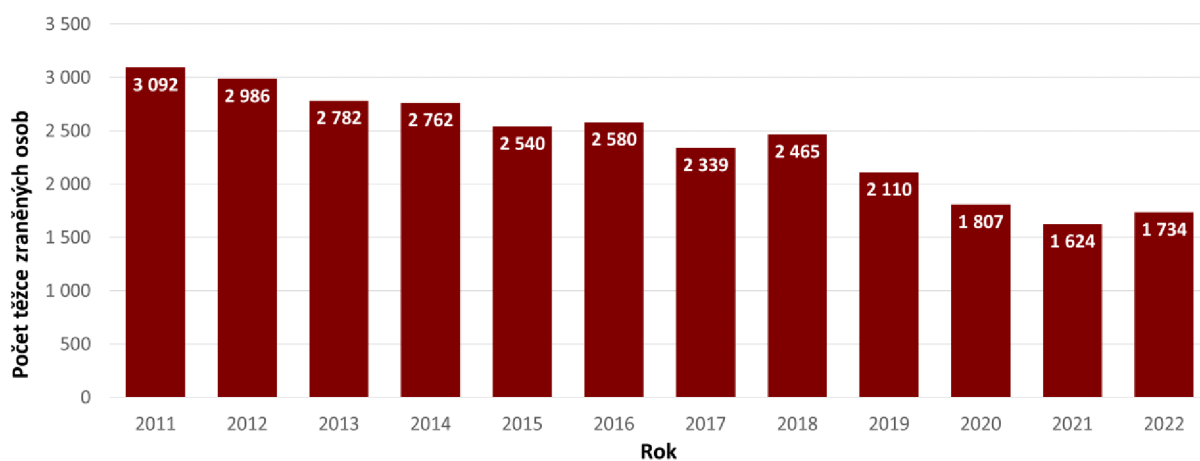
4.4 Bezpečnost na silnicích

Nehodovost je jedním z nejdůležitějších parametrů při návrhu a správě dopravní infrastruktury. Právní aspekty spojené s odpovědností za dopravní nehody a jejich řešení je oblastí, kterou se zabývá soudní inženýrství. Dopravní inženýrství se primárně soustředí na prevenci nehod v dopravní infrastruktuře. Při vytváření návrhu světelných křižovatek, vodorovného a svislého dopravního značení, chodníků, cyklostezek nebo různých technických řešení se spolupracuje s místními orgány a policií, která provádí analýzu dat a potřebná opatření k prevenci nehod.

V důsledku dopravních nehod vzniká v České republice každým rokem ztráta přibližně 135 miliard Kč. Navzdory pokračujícímu poklesu počtu obětí dopravních nehod v ČR (viz Graf 2) zůstává celkový počet stále vysoký v porovnání s ostatními státy EU (13). V přepočtu usmrcených osob na 1 milion obyvatel se Česká republika umístila až na děleném 17.–19. místě společně s Maltou a Polskem. Naopak počet osob s těžkými zraněními oproti roku 2021 zaznamenal nárůst (13).



Graf 2 – Počet osob usmrcených při dopravních nehodách v ČR (13)



Graf 3 – Počet těžce zraněných osob při dopravních nehodách v ČR (13)

Vládní strategie BESIP (Bezpečnost silničního provozu) pro roky 2021–2030 se zaměřuje na snižování počtu dopravních nehod, úrazů a obětí. Koncept „VIZE NULA“ si klade za cíl snížit následky dopravních nehod v roce 2030 na polovinu oproti roku 2020. V dlouhodobém měřítku je cílem úplná eliminace nehod s fatálními nebo těžkými následky. Bezpečnost na silnicích zahrnuje nejen samotné účastníky provozu, ale i dopravní prostředky, dopravní infrastrukturu a okolí (14). Pro zajištění bezpečnosti je nezbytné identifikovat a odstraňovat rizika již v plánovací fázi staveb nebo při návrzích rekonstrukcí. Snížení počtu dopravních nehod může být dosaženo prostřednictvím několika strategií, včetně vytvoření předvídatelných a bezpečných zón. Provedení může obsahovat absenci pevných překážek (např. stromořadí), jednoduše předvídatelné dopravní situace, dělící a ochranné ostrůvky nebo rychlostní limity odpovídající výskytu zranitelných účastníků silničního provozu (2).

Informace o dopravních nehodách v České republice jsou zveřejněny na webových stránkách Dopravní nehody v ČR, kde jsou poskytnuty kompletní statistiky o počtu a příčinách dopravních nehod, nejrizikovějších úseků, období a dalších relevantních statistik (15).

4.4.1 Moderní přístupy při analýze dopravních nehod

Rozvoj výpočetní techniky v 90. letech 20. století přinesl výrazný pokrok při analýzách silničních nehod. Jedná se hlavně o podporu, jelikož tyto simulační programy a nástroje převážně slouží jako pomocníci a jejich používání vyžaduje kromě technických znalostí i rozsáhle povědomí o analýze silničních nehod. Mezi nástroje podpory pro analýzu silničních nehod patří (16):

- Tabulkové procesory, matematické a statistické programy
- Specializované simulační programy
- Expertní a pomocný software

Dominantním nástrojem při podpoře analýzy silničních nehod je tabulkový procesor Microsoft Excel. Dříve byl preferovaný pro svou schopnost rychle a snadno zpracovávat data. Byl to standardní nástroj pro práci s čísly a analýzou dat. V dnešní době zůstává významný při analytických výpočtech, statistickém zpracování dat, tvorbě diagramů a grafů. Hlavní výhodou je změna vstupních hodnot a přepočítání v reálném čase. Pro složitější analýzy lze použít matematické programy MathCAD nebo Maple, které navíc nabízejí symbolické a numerické výpočty pro inženýry a vědce (16).

Při provádění analýzy silničních nehod v Evropě se často využívají různé simulační programy, které umožňují zmíněnou podrobnou analýzu průběhů a následků dopravních nehod.

Mezi široce používané nástroje patří PC-Crash, Virtual CRASH, AnalyzerPro, Pam-Crash nebo LS-DYNA. Jedná se o sofistikované simulační programy pro analýzu silničních nehod, které dokážou pracovat s kinetickými a dynamickými modely pohybu vozidel a modely řešení střetu. Umožňují provádět komplexní dopředné modelování od okamžiku střetu až do konečných poloh, simulovat jízdní dynamiku a vnější silové účinky. Dále také složené pohyby souprav, převrácení vozidel, několikanásobné střety nebo simulaci pohybu osob ve vozidle (16).

4.5 Křižovatky řízené SSZ

Křižovatky se světelným signalizačním zařízením se navrhují na taková místa, kde již kapacita, bezpečnost nebo přehlednost stykové či průsečné křižovatky nedostačuje. Při tomto uspořádání vozidla zastavují ve skupinách při signálu STŮJ před příčnou čarou. Na signál VOLNO následně projíždějí křižovatkou v intenzitě na hranici saturovaného toku, což umožňuje maximální a plynulý průjezd křižovatkou za ideálních dopravních podmínek. Vozidla jsou díky zavedení střídavého rozdělení signálu VOLNO pouštěna křižovatkou bez ohledu na to, který směr je považován za hlavní a který za vedlejší (2).

Průjezd vozidel je řízen světelnými signály – STŮJ, POZOR a VOLNO, které představuje většinou tříkomorové návěstidlo pro vozidla a dvoukomorové pro cyklisty a chodce. V některých případech může být také doplněno signálem pro opuštění křižovatky, doplňkovou zelenou šipkou, žlutým světlem ve tvaru chodce, cyklisty a dalších (2).

Křižovatky se SSZ mohou být z hlediska řízení rozděleny na pevné a dynamické. Křižovatky s pevným řízením, respektive pevným signálním plánem jsou vhodná na místa, kde se intenzita vozidel krátkodobě nijak neodchyluje. Pokud se však jedná o provoz s častými krátkodobými výkyvy je nutné adaptivně měnit signální plány a pružně reagovat na aktuální stav. Dynamický systém získává aktuální data z měření a je tak schopný měnit pořadí fází nebo délku volna. Pevné signální plány jsou vhodné pouze tam, kde by dražší dynamické řízení nepřinášelo žádné výrazné zlepšení a umožňuje tak ušetřit za náklady spojené s provozem. Optimální rovnováhu dosahuje také kombinace pevného a dynamického řízení (17).

4.5.1 Historie řízených křižovatek

První řízená křižovatka vznikla roku 1868 v Londýně. I přesto, že první automobily byly zkonstruovány až o dvacet let později, mělo centrum Londýna problémy s kongescemi. Velké množství koňských povozů a chodců způsobovalo chaotické chování i kolize. O nutný pokrok se postaral vlakový inženýr John Peak Knight, který vynalezl první řízenou křižovatku. Policista manuálně ovládal návěstidlo s plynovou lampou umístěnou ve výšce 6 metrů a manévroval pažemi pro varování k zastavení nebo pokračování k jízdě. Kvůli unikajícímu plynu však došlo po pár týdnech k vážnému zranění policisty, a tak došlo k vyřazení tohoto konceptu z provozu (18).

Oproti tomu první elektricky řízený systém byl vytvořen až po více než 4 000 úmrtích při automobilových nehodách vozidel Ford ve Spojených státech amerických. V roce 1914 totiž silnice nebyly stavěny na tak vysoké rychlosti a křižovatky přeplněné sériově vyráběnými vozy

potřebovaly změnu. Nový systém byl převzat opět ze železniční dopravy. Celé řízení bylo ovládané policistou přes čtyři páry zelených a červených světél. V roce 1920 vznikla první trojbarevná světla se žlutým upozorněním pro zpomalení řidičů. A o pár let později i první časovače, které šetřily náklady spojené s platy strážníků. New York tak byl díky tomu schopný ušetřit až 12 milionů dolarů na mzdách (19).

4.5.2 Kritéria při návrhu SSZ

Pro úspěšný návrh křižovatky je nezbytné znát aktuální a výhledové intenzity dopravy a jejich proměnlivosti v různých hodinách a dnech v týdnu (denní a týdenní variace dopravy). Tyto informace jsou nezbytné pro stanovení různých programů řízení během ranních a odpoledních špiček nebo sedlového a nočního provozu. Pro posouzení účelnosti křižovatky je nezbytné splnit alespoň jedno ze stanovených kritérií (17):

- Intenzita provozu z hlediska vozidel
- Intenzita provozu z hlediska chodců
- Plynulost jízdy MHD
- Bezpečnost provozu

Kritéria intenzity z hlediska vozidel se posuzují nesplněním kapacitního výpočtu dle TP 188 během osmi nejvíce zatížených hodin. Křižovatka je tak pod tlakem dlouhodobě, nikoliv pouze během krátkodobých špiček, v takovém případě by investice do její rekonstrukce nebyly finančně výhodné (20). Kritérium z hlediska chodců je splněno při velké intenzitě přecházejících chodců nebo v situaci, kdy vozidla překračují mezní hodnoty intenzity dopravy pro bezpečné přecházení chodců. Plynulost jízdy MHD se prokáže v situaci, kdy je minimálně každé druhé vozidlo MHD zdrženo déle než dvě minuty v alespoň třech špičkových hodinách dne. Na rušných nebo nejasných křižovatkách, u škol s výskytem dětí nebo na přechodech vedoucích přes dva a více jízdnic pruhů, by se vždy měl zvážit návrh SSZ (2).

4.5.3 Návrh signálního plánu

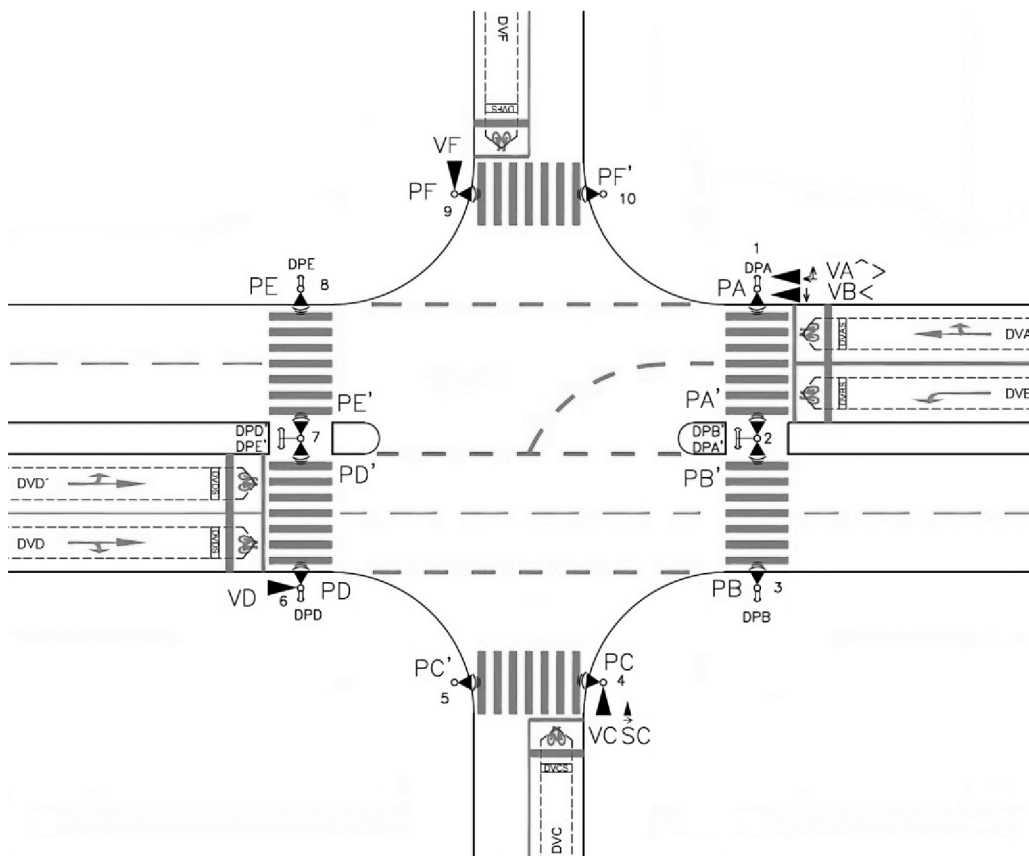
Vjezd vozidel do křižovatky je střídavě rozdělován a cyklicky se opakuje. Fáze je část časového úseku, při kterém má jeden nebo více dopravních proudů signál VOLNO. U nejjzákladnějších křižovatek se lze setkat s hlavním a vedlejším proudem, u složitějších křižovatek pak může být více fází pro zachování účinnosti křižovatky. Více fází však nemusí vždy znamenat lepší kapacitu křižovatky, např. u 4 fází na čtyřramenné křižovatce dochází

k velkému zpomalení vozidel. Vystřídání všech fází je označováno jako cyklus a jeho samotná délka a počet fází jsou nastaveny a přizpůsobeny intenzitě provozu (17).

Pro vytvoření signálního plánu je klíčové znát samotné situační schéma křižovatky a mít zakreslené schematické značky (2). Značky pro situační výkresy světelné signalizace se označují dle ČSN 73 6021. Pořadí vjezdu vozidel do křižovatky se označuje velkými písmeny nebo čísly podle hodinových ručiček od zvoleného vjezdu. Stejně pravidlo platí i pro typ signálu (označen velkými písmeny) a jeho pořadí. Typy signálů zobrazuje následující tabulka (17):

Tabulka 1 – Označení signálů (17)

Typ signálu	Písmeno
signál pro Vozidla	V
signál pro Tramvaje	T
signál pro Cyklisty	C
signál pro chodce – Pěší	P
signál dvoubarevné soustavy pro řízení provozu v Jízdních pruzích	J
signál doplňkové zelené Šipky	S
signál pro opuštění Křižovatky (vyklizovací šipka)	K
přerušované Žluté světlo	Z
přerušované Žluté světlo ve tvaru chodce	
Žluté světlo ve tvaru chodce	
výzvový signál pro tramvaje	
signál Účelové signalizace	U
Rychlostní signál	R



Obrázek 3 – Situační schéma křižovatky (60)

Signální plán je program křižovatky na řízení světelného signalizačního zařízení. Udává časový tok a pořadí jednotlivých světelných signálů. Všechny kroky jsou vzájemně provázané a jsou zapracovávány graficky s ohledem na jejich vzájemnou souvislost. Proces samotné tvorby signálního plánu usnadňuje specializovaný software, jehož druhy jsou uvedeny v kapitole 5.2. Pro návrh signálního plánu je nutné stanovit (17):

- Výpočet mezičasů, délku cyklu a doby volna
- Návrh schématu fází (rozdělení, počet a pořadí fází)
- Okrajové podmínky a samotné sestavení signálního plánu

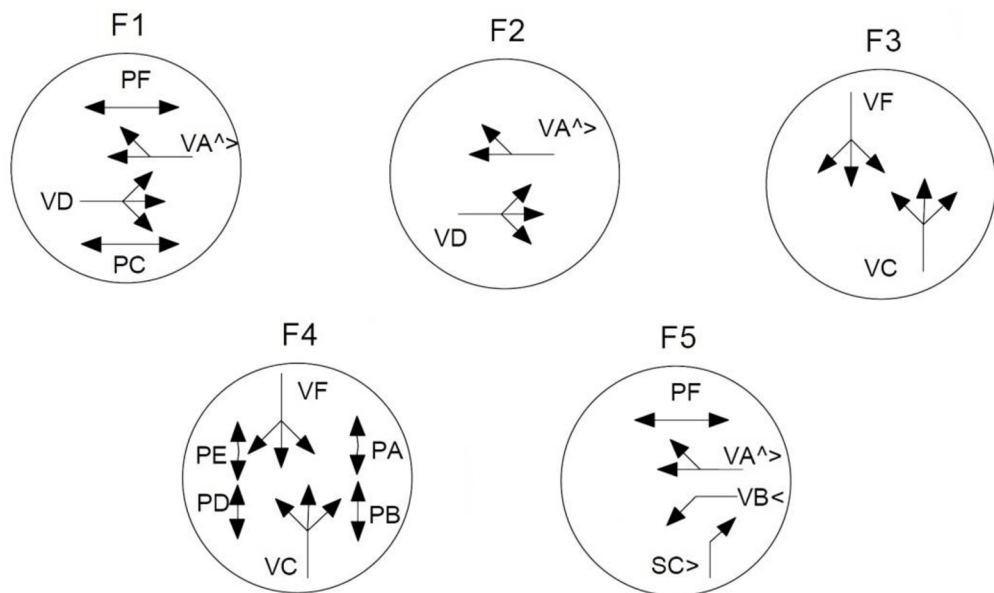
Signální skupiny jsou seskupení návěstidel, které v daném okamžiku zobrazují stejný signál. Skupina může zahrnovat jak několik návěstidel, tak i pouze jedno. Po ukončení signálu VOLNO jedné signální skupiny nesmí ihned navazovat kolizní signální skupina, která by mohla způsobit nehodu. Aby k této situaci nedocházelo, stanovují se mezičasy, které mají za úkol umožnit poslednímu vozidlu nebo chodci bezpečně opustit prostor křižovatky před zahájením signálu VOLNO kolizní signální skupiny. Kolizní plochy představují místa, ve kterých by došlo ke kolizi vozidel nebo vozidel s chodci a jsou nedílnou součástí výpočtu mezičasů. Vychází z nájezdových a vyklizovacích drah, přesněji trajektorií pohybu a okrajů přechodů. Samotné výpočty se provádějí dle vzorců v TP 81 (17).

Tabulka 2 – Mezičasy pro křižovatku (60)

	VA [^] >	VB ^{<}	VC	SC [^] >	VD	VF	PA	PB	PC	PD	PE	PF
VA [^] >	■	-	5	-	-	5	4	-	-	-	6	-
VB ^{<}	-	■	5	-	5	5	4	-	6	-	-	-
VC	5	5	■	-	5	-	-	-	4	-	-	6
SC [^] >	-	-	-	■	5	-	-	-	4	-	-	-
VD	-	5	5	5	■	5	-	6	-	4	-	-
VF	5	5	-	-	5	■	-	-	6	-	-	4
PA	10	10	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-
PB	-	-	-	-	6	-	-	■	-	-	-	-
PC	-	6	10	10	-	6	-	-	■	-	-	-
PD	-	-	-	-	10	-	-	-	-	■	-	-
PE	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-
PF	-	-	6	-	-	10	-	-	-	-	-	■

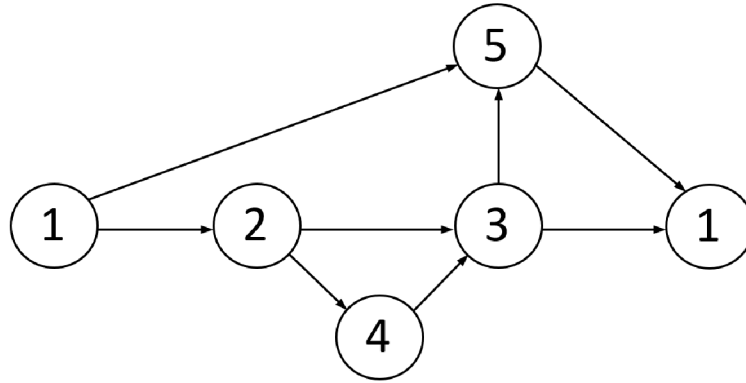
Fázové schéma graficky zobrazuje pořadí a uspořádání fází pro jednotlivé dopravní pohyby (kolizní, bezkolizní a podmíněně kolizní). Při návrhu schématu fází se zohledňují geometrické vlastnosti, organizace dopravy a intenzita provozu (2). Doba volna je zohledněna intenzitou provozu v jednotlivých směrech. Konkrétní výpočet lze provést metodami saturevaného toku, spotřeby času nebo postupného přibližování (iterace) (17).

Při stanovení počtu fází je důležité minimalizovat ztráty – doby mezičasů pro zachování vysoké účinnosti křižovatky. Přednostně by se tak mělo navrhovat základní dvoufázové řízení. Opatření více fázemi je nutné v situacích, kdy je potřeba zvýšit bezpečnost křižovatky např. při odbočování tramvaji nebo vzhledem k intenzitám dopravních proudů. Více fází je také zvoleno v křižovatce (Obrázek 3) vzhledem k pohybu chodců. Jednotlivé fáze a jejich pořadí se zakreslují do fázových schémat (17). Pro křižovatku je stanoveno fázové schéma (Obrázek 4) a sled fází (Obrázek 5).



Obrázek 4 – Fázové schéma křižovatky (60)

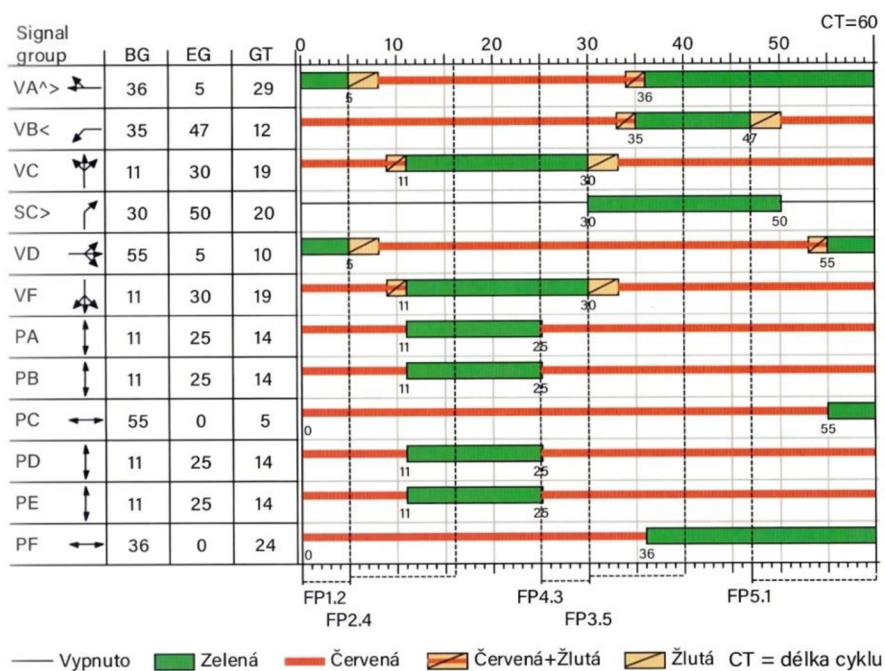
Sled fází je zobrazen na Obrázku 5. První fáze oproti fázi druhé umožňuje pohyb chodců a vozidel ve směru hlavní dvoupruhové pozemní komunikace. Poté je v případě stisknutí chodeckého tlačítka aktivována čtvrtá fáze, která zajišťuje signál VOLNO na přechodu pro chodce a volný průjezd vozidel z vedlejších komunikací. Po této fázi nastupuje třetí fáze (příp. je čtvrtá fáze přeskočena) a prodlužuje se bezpečný průjezd vozidel z vedlejšího směru. Pátá fáze nastupuje po první nebo třetí fázi a umožňuje odbočení vozidel ze směru A do směru C, a díky doplňkové zelené šipce také vozidlům v opačném směru.



Obrázek 5 – Sled fází křižovatky (60)

4.5.4 Fázové přechody a program řízení

Fázové přechody označují časový úsek při přechodu z končící fáze na začátek následující fáze. Mohou být pevné nebo pružné v závislosti na typu řízení. Pevné fázové přechody (F1-F2, F2-F4, F4-F3, F3-F5, F5-F1) jsou znázorněny na Obrázku 6. Základními vstupními hodnotami pro signální plány jsou zmíněné fáze, jejich sledy, mezičasy a hodinové intenzity provozu. Optimální délka je taková, která umožňuje nejmenší mezičasy (17). V České republice se primárně používá zmíněná metoda saturevaného toku, která je uvedena v TP 81. Obvykle se však metoda výpočtu délky cyklu používá jen u izolovaných křižovatek, jelikož při koordinaci s ostatními křižovatkami ve městech je délka cyklu stanovena pouze na nejzatíženější křižovatce (2).



Obrázek 6 – Ukázka možného signálního plánu křižovatky (2)

Na Obrázku 6 je znázorněn průběh signálních skupin v sekundách. Začátek je stanoven v počátku (0 s) a ukončen délkou cyklu (CT, 60 s). V souladu se standardy jsou zde zapsány začátky signálů VOLNO (BG), konce signálu VOLNO (EG) a ve třetím sloupci (GT) samotné délky jejich trvání. V signálním plánu jsou zobrazeny různé stavy – vypnuto, zelená, červená, současně svítící červená + žlutá a žlutá. Vypnutý stav je součástí doplňkové šipky (SC>), u signálních skupin pro vozidla svítí před zahájením signálu VOLNO červeno-žluté světlo a následně je ukončeno žlutým signálem. Přechody pro chodce přecházejí díky dvoukomorovým návěstidlům pouze mezi zelenými a červenými signály.

V neposlední řadě musí platit také stanovené okrajové podmínky, mezi které patří nejnižší hodnoty signálních dob např. (17):

- Signál VOLNO pro vozidla, chodce, cyklisty a tramvaje (5 s)
- Signál POZOR – žlutá (3 s)
- Signál POZOR – současně červená a žlutá (2 s)

Každý program může prezentovat navržené signální plány jiným stylem. Pro posouzení správnosti je nezbytné kapacitní posouzení dle TP 188 nebo využití mikrosimulačního softwaru (2).

4.5.5 Návrh přechodu pro chodce

Na křižovatkách řízených SSZ se musí zohledňovat a respektovat chodci i individuální automobilová doprava. Hledá se vždy kompromis pro zachování účinnosti a bezpečnosti na křižovatce. Délka zelené pro chodce musí být vždy taková, aby chodec pohodlně přešel nejméně 1/2 přechodu. Jako vhodné řešení se uvádí vzdálenost, kdy chodec pohodlně přejde 2/3 šířky vozovky, a to i v případě, pokud přechod vede přes dělicí ostrůvky a je rozdělen na více částí. Vyklizovací rychlost při přecházení se u chodců uvažuje 1,4 m/s. Celková doba od stisknutí chodeckého tlačítka by neměla být delší než 60 s. V případě nedodržení těchto předpisů může docházet u chodců k nerespektování pravidel silničního provozu, přecházení na signál STÚJ a zvýšenému riziku střetů (17).

Pro předcházení nebezpečných situací při odbočování vozidel je potřebné, aby chodec vstoupil na přechod ještě před začátkem signálu VOLNO pro vozidla z odbočujícího směru. Tímto se docílí lepšího rozhledu pro řidiče těchto vozidel, kteří mohou lépe reagovat na přecházející chodce. Řízení SSZ je nutné i v případech odbočování vozidel z více pruhů. S délkou přechodu souvisí i mezičasy, které se prodlužují s přibývajícím délkou přechodu. Přes přechod nesmí projet vozidla z hlavní pozemní komunikace a tím se prodlužuje fáze pro vozidla

z vedlejší. Při osazení dělicích ostrůvků je možné snížit mezičasy. Chodci vyčkají na signál VOLNO na dělicím ostrůvku, protože je přechod rozdělen na více částí (2). Pro nevidomé jsou přechody přizpůsobeny stavebními úpravami a akustickou signalizací v souladu s vyhláškou č. 369/2001 Sb. Akustický signál je generován buď z návěstidla, nebo chodeckého tlačítka. Křižovatky s více přechody krátkých vzdáleností musí chodci umožnit deaktivaci nechtěných zvukových signálů pomocí tlačítka (17).

4.5.6 Klíčové prvky křižovatky se SSZ, dopravní řadič a indukční smyčka

Klíčovými prvky křižovatky se SSZ jsou nosné konstrukce s návěstidly, kabelové rozvody, příslušenství, detektory a řadič (17). Jedním z nejzákladnějších a nejpoužívanějších typů detektoru na řízených světelných křižovatkách jsou indukční smyčky. Jedná se o elektromagnetické cívky a detektory umístěné pod zemí v blízkosti křižovatky tak, aby vozidla byla rozpoznána ještě dříve, než se přiblíží ke křižovatce. Při vjezdu vozidla do detekční zóny, naruší kovová konstrukce magnetické pole a detektor rozpozná rychlost nebo počet vozidel (10). Řadič je elektrické zařízení, které zajišťuje řízení, regulaci provozu SSZ a získává data z detektorů o průjezdu vozidel křižovatkou. S ohledem na jejich význam musí splňovat přísná bezpečnostní opatření a jsou ovládány na základě nastavených pravidel.

V České republice nalezneme dva přední poskytovatele řadičů pro SSZ – CROSS Zlín a Siemens. CROSS Zlín nabízí moderní řadiče, které řeší jak jednotlivé křižovatky, tak i pokrytí celého města. Jsou přizpůsobitelné pro veřejnou hromadnou dopravu, záchranné služby a umožňují i komunikaci vozidel s infrastrukturou (V-2-I). Některé z jejich řadičů se vyznačují působivými technickými specifikacemi, kdy dokážou obsluhovat až 128 signálních skupin a řídit v pevném i dynamickém signálním plánu programovatelném ze softwaru LISA+ (21).

Řídicí systém SiTraffic Scala od společnosti Siemens je navržen pro spolupráci různých řadičů křižovatek s dopravními ústředními. Kontrolu a správu dopravní infrastruktury řídí dopravní inženýři z centrálních pultů ústředí. Zde se nejčastěji určují intenzity dopravy a podle nich se pak mění signální plány. Na základě aktuálních situací z provozu se změní doby zelené a zvyšuje plynulost pro vozidla. Mezi další hlavní funkce patří (22):

- Sledování stavu světelných signálů
- Sběr a uchovávání provozních i chybových dat
- Online vizualizace dopravních situací

4.6 Preference MHD a IZS na SSZ

Pro plynulý průjezd vozidel veřejné dopravy je nutné nejen v dopravních špičkách vytvářet preference na řízených světelných křižovatkách. Dynamické řízení je nutné k umožnění aktivní detekce blížících se vozidel VHD a úpravě signálního plánu pro jejich volný průjezd. Hlavní výhody spočívají ve zvýšení atraktivity pro využití vozidel hromadné dopravy, tedy zvýšení plynulosti, rychlosti a zkrácení doby jízdy za dodržování jízdního řádu. Lze také dosáhnout menšího počtu spojů a tím snížit emise a poplatky za pohonné hmoty nebo náklady za personál.

Poloha blížících se vozidel se získá z infračervených majáků nebo z GPS, která je umístěna ve vozidlech. U křižovatek s vyhrazenými pruhy lze získat polohu také z indukční smyčky nebo videodetekce. Vozidlo se přihlásí do systému preference a zašle informace o své poloze, směru jízdy a čísla linky do řadiče. Systém vyhodnotí, zdali se ke křižovatce přibližuje zpožděný vůz a pozdrží mu tak volný průjezd křižovatkou nebo ne. Po samotném průjezdu se vozidlo odhlásí a preference je ukončena. Změna signálního plánu může být realizována prodloužením vlastní fáze tak, aby vozidlo stačilo projet křižovatkou, nebo zkrácením a změnou pořadí jiné fáze. Dalšími způsoby může být např. vložení fáze nebo doplnění fáze, která není kolizní (23).

Preference je důležité využívat na všech světelných křižovatkách, kterými vedou trasy MHD. V Praze se na více než 50 % křížení s autobusem a 90 % s tramvají nacházejí chytré technologie právě pro preferenci městské hromadné dopravy (24).

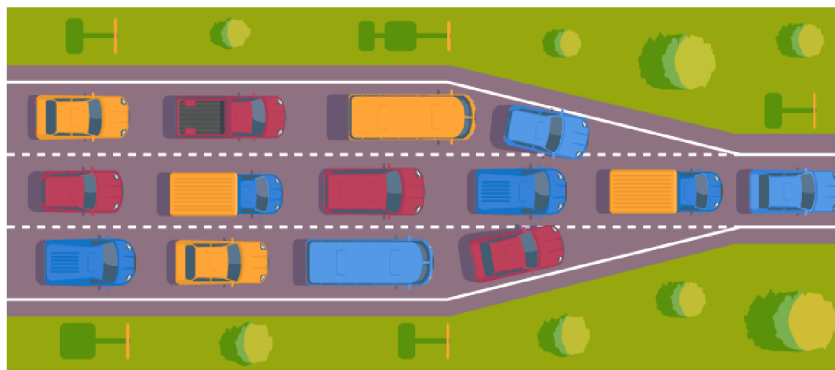
Pokud se jedná o vozidla integrovaného záchranného systému, je volný a bezpečný průjezd křižovatkou nejdůležitější. Komunikace s křižovatkou probíhá stejně, avšak požadavek do řadiče je zaslán s maximální prioritou. Ve směru vozidel IZS je nastaven signál VOLNO tak, aby vozidla zbytečně nezastavovala a bylo možné vytvořit bezpečnou záchrannou uličku. Ostatní ramena křižovatky jsou nastavena na signál STŮJ, aby nedošlo ke kolizím (25).

4.7 Dopravní kongesce

Na silnicích často vzniká charakteristická situace, která se projevuje sníženou rychlostí jedoucích vozidel, která zpomalují dopravní proud a můžou vytvářet frontu na daném úseku. Dopravní kongesce vzniká při situacích, kdy kapacita křižovatky nebo cesty nestačí aktuální dopravní poptávce. Dopravní poptávka se mění během dne a zvyšuje se během ranních a odpoledních špičkových hodin. Často se také může snížit i samotná kapacita komunikace,

zejména za nečekané situace (nehoda, práce na silnici, sportovní akce) nebo za špatného počasí (náledí, mlha, hustý déšť).

Mezi další druhy kongesce patří rázová vlna. Jedno z vozidel náhle zabrzdí a způsobí tím řetězovou reakci, při které vozidla za ním zabrzdí nebo zastaví. Tato situace je způsobena především kvůli nedodržení bezpečné vzdálenosti a rychlosti. Na úzkých silnicích nebo při zúžení více pruhů vzniká kongesce, která reflektuje situaci jako úzké hrdlo láhve. Samotná kapacita komunikace je vyčerpána a špatný návrh silnice zpomaluje průjezd vozidel (26).



Obrázek 7 – Kongesce reflektující úzké hrdlo láhve (61)

Spletitá dopravní síť ve městech je důvodem ke vzniku blokace v mříži. Krátké vzdálenosti mezi křižovatkami způsobí naprosté zablokování křižovatek vozidly, která nejsou schopna projet křižovatkou. V tomto případě ani dynamické signální plány nejsou schopny správně regulovat dopravu. Alternativní trasy vozidel způsobí přetížení i v dalších částech města a nastává tak nejhorší možná situace v celém regionu (27).

Dopravní kongesce mají široký rozsah negativních dopadů na společnost, ekonomiku a životní prostředí. Zvyšují riziko vzniku dopravních nehod v situacích, kdy se řidiči pokoušejí najít alternativní cesty, opakovaně zastavují a znovu se rozjíždí. Nekonzistentní jízda s častým rozjížděním má škodlivý vliv na životní prostředí. Během popojíždění dochází k zvýšené spotřebě paliva a tvorbě emisí. Prodloužení cesty může způsobit větší frustraci, stres a snížit produktivitu práce. Ve většině případů značně zpomalují cestu záchranářů k nehodám, což může mít za následek vážně zdravotní následky pro zraněné osoby. Je proto důležité hledat a následně implementovat opatření, která vedou k minimalizaci tvorby kongescí. Řešením může být investice do dopravní infrastruktury, použití dynamického řízení na křižovatkách se SSZ a vytváření preferencí pro vozidla hromadné dopravy (26).

5 Vlastní zpracování

5.1 Modelování dopravy

Firmy a dopravní inženýři zabývající se dopravním plánováním potřebují programy, které otestují a zkontrolují jejich plány a poskytnou cenné informace pro vylepšení dopravních systémů. Jelikož je doprava jeden z nejdetailnějších systémů, není vhodné ani praktické provádět experimenty v reálném světě. Vysoké výkony počítačů již umožňují řešit různé problémy v umělých experimentálních prostředích. Simulace v těchto programech také přinášejí výsledky výrazně dříve a levněji (28).

5.1.1 Modely a simulace

Dopravní model zjednodušeně reprezentuje skutečné systémy (prvky), které nám pomáhají a umožňují lépe pochopit danou problematiku. Dopravní modelování predikuje, simuluje a analyzuje dopravu v určité oblasti nebo na konkrétní situaci na základě modelu. Pro řešení existuje i více modelů, z nichž se každý může zaměřovat na odlišné detaily nebo jevy. Vždy se jedná o zjednodušení reálné podoby, která však při vynechání klíčového detailu může vést k problematickému až nedostatečnému řešení. Na druhou stranu je vždy vhodné odstraňovat nepodstatné detaily, které nevedou k výsledku (29).

V dopravě se nacházejí i složitější systémy, které nelze popsat jednoduchými analytickými modely. Rušná křižovatka s různými typy vozidel, chováním řidičů, a i vlivem počasí nebo naopak rozsáhlá síť o tisících spojích. V takových případech se využívá simulace. Simulací se chápe provádění experimentů na vytvořeném modelu, kde se získají různé alternativy, jak systém funguje a hlouběji se porozumí jejímu chování.

5.1.1.1 Vývoj simulačních modelů

První zmínka o simulaci dopravy pochází kolem roku 1950. Tehdy byly počítače určeny především pro speciální vojenské účely a bylo je možné používat pouze v omezeném množství zarezervované na velmi krátkou dobu. Zřejmě první program vyvinul profesor Harry H. Goode na univerzitě v Michiganu. Společně s disertační prací Daniela Gerlougha o simulaci dopravy se poté otevřela cesta pro vývoj simulačního softwaru v USA. V následujících letech se také začalo formovat dopravní inženýrství z různých oborů matematiky, fyziky a civilního inženýrství. Vznikaly nové formulace o analogii toku tekutin s dopravním proudem, o základech makroskopické a mikroskopické simulace a statistickém modelování. V 60. letech 20. století se zvýšila dostupnost počítačů. Vznikaly simulační jazyky, které usnadnily

programování a vývoj dopravní simulace. Pravidelně se také konala mezinárodní symposia, která představovala nové dopravní teorie a umožňovala diskuse o dopravě z pohledu simulace. Tehdejší modely měly omezené možnosti logiky, ale i tak demonstrovaly potenciál simulace jako užitečného nástroje pro dopravní plánování a hodnocení systémů. V této době se objevil i model TRANSYT, který sloužil pro cyklické časování dopravních signálů a dodnes zůstává populární. V 70. letech vznikaly počítačové společnosti jako Apple, Intel a Microsoft, které postupně zlepšovaly výkony a prostředí pro práci na počítačích. Novými funkcemi této doby byly emise vozidel, řízení provozu autobusů, tok dopravy na dvouproudých silnicích a pozornost na bezpečnostních aspektech křižovatek.

Opravdový rozmach přišel s nástupem osobních počítačů v průběhu 80. a 90. let. Na univerzitách vznikaly simulační programy, které byly dále rozvíjené v komerčních organizacích a cílené do osobních počítačů. Začal být kladen silný důraz na spolehlivost a přesnost simulačních modelů. Lidé zahrnovali simulaci jako primární prostředek pro modelování dopravních sítí. Hlavní produkty jako jsou Aimsun, Dynameq, Paramics, Simtraffic nebo Vissim začaly být dostupnými po celém světě. Poskytují grafická rozhraní, analýzy, grafy pro zobrazení výsledků, ale často i úpravu pro programátory. Od roku 2000 roste výkon počítačů a vznikají výzkumy, které zdokonalují funkci algoritmů a snižují výpočetní čas. Část využití se přesouvá i do online prostředí, kde se klade důraz na vývoj komunikace mezi vozidly a dopravní infrastrukturou (30).

5.1.1.2 Rozdělení simulačních modelů

Nezákladnější rozdělení modelů je na fyzické a abstraktní. Fyzické modely se snaží, co nejdříveji zobrazit své detaily a fyzikální vlastnosti. Takové modely se proto hodí na vizualizaci a demonstraci konceptů. Patří mezi ně modely automobilů, osob i měst. Abstraktní modely zobrazují typické vlastnosti originálu pomocí vzorců a pravidel. Jsou založeny na samotné teorii fungování, matematických rovnicích, algoritmech nebo na grafických a mentálních modelech (31).

Každý typ modelu je vhodný na odlišné problémy nebo situace. Některé jsou vhodné na dlouhodobější predikci a jiné na krátkodobou. V závislosti na čase mohou být modely statické nebo dynamické. Při zahrnutí náhodných proměnných – stochastické, které např. při rychlostním limitu 50 km/h zahrnují i rychlosti vyšší a nižší, než je dovolená rychlost, a za pevných předpokladů a podmínek deterministické. Dle změn proměnných kontinuální, které se mění pravidelně nebo diskrétní, které pouze v určitý čas (32).

Nejčastější rozdělení simulačních modelů u softwaru je dle rozsahu, resp. oblasti, kterou popisují na makroskopické, mezoskopické a mikroskopické (2).

5.1.1.3 Makroskopické a mikroskopické modely

Shromážděná data u makroskopických modelů popisují celkový obraz pohybu dopravního proudu. Tento popis je inspirován analogiemi proudění kapalin a šíření tepla. Makroskopické modely sledují dopravu v celém regionu (kraji, státu), ale neposkytují detailní analýzu o jednotlivých dopravních prostředcích. Vzhledem ke své podstatě nejsou vhodné při zkoumání inteligentních dopravních systémů nebo řídičského chování (29). I přes zanedbání detailů vzniká reálnější přehled o rychlosti, intenzitě a hustotě dopravního proudu. Při použití na dopravních projektech zobrazují environmentální dopady a prognózu dopravy. Součástí makroskopických modelů jsou modely dynamiky dopravních toků, které simulují řízení dopravy na dálnicích a modely cestovního času, které zachycují intenzitu dopravy během celého dne (2).

Mikroskopické modely se zaměřují na individuální pohyb vozidel v dopravním proudu. Řeší situace na úsecích silnic, křižovatkách, přechodech nebo cyklostezkách. Dílčími modely podrobně popisují interakce mezi vozidly, které zahrnují například akceptování mezer mezi vozidly, následování vozidel nebo změny jízdního pruhu. Modely poskytují detailní analýzy, které je poté možno spojit a získat komplexní průběh dopravního proudu. V některých situacích je nutné se zaměřit na středně velké oblasti a získat základní informace o pohybu vozidel. Kombinací prvků vznikne střední úroveň tzv. mezoskopický model, který však nezohledňuje interakce mezi vozidly. Existují i další modely, které primárně kombinují zmíněné metody. Submikroskopické modely se zabývají i detaily jednotlivých vozidel, jako jsou motory a mechanismy pohonů. Vytváří vyšší detailnost, čímž jsou náročnější na vstupní data a délku zpracování simulace. Hybridní modely kombinují v různých místech rysy makroskopických a mikroskopických modelů (29).

5.1.1.4 Výběr softwaru a kroky při modelování dopravy

Při výběru dopravně-inženýrského softwaru je důležité zvážit několik faktorů. Každý si sice uvědomuje, že náklady na pořízení softwaru hrají klíčovou roli, a to hlavně tehdy, když překračují statisíce korun. Důležité je zvážit i poplatky za doprovodné funkce, náklady spojené s údržbou a aktualizacemi softwaru nebo školením zaměstnanců. Software by měl mít uživatelsky přívětivé rozhraní, být kompatibilní s existujícími systémy a obsahovat dostatečnou podporu.

Před makroskopickým modelováním je nutné postupovat systematicky, stanovit cíle, určit typ modelu, softwaru a nasbírat data, která postupně povedou k modelování. Předpovědi v programech mohou být téměř bezchybné. Vše záleží na kompletních a přesných vstupních datech. V praxi je kvůli financím často sbíráno méně dat, a proto i sebevíce dokonalý a sofistikovaný model je jen tak spolehlivý, jako byla právě jeho vstupní data. Po vytvoření každého modelu se musí doladit a zkontrolovat jeho funkčnost. Nedílnou součástí je tak kalibrace a validace, která opakovaně testuje, aby zmíněný dopravní model zobrazoval reálné výsledky. Až poté lze model využít jako právoplatný dopravní model pro vývoj dopravy (2).

5.1.2 Dopravní modelování v ČR

Technické správy komunikací hlavního města Prahy – Úsek dopravního inženýrství (TSK-ÚDI) a Institut plánování a dopravního rozvoje (IPR Praha) lze zařadit mezi klíčové pražské organizace zabývající se modelováním dopravy. Modely těchto organizací zahrnují nejen současný stav, ale také pomocí multimodálního modelu i střednědobý rozvoj komunikační sítě a výhledový horizont pro územní plánování automobilové a veřejné hromadné dopravy. Hlavními rozdíly ve využití jsou, že TSK-ÚDI se soustředí na současný a střednědobý stav, tj. na organizaci a řízení dopravy, parametry pro dopravní stavby a hodnocení vlivu dopravních investic na systém města. IPR pak především na dlouhodobý časový horizont územního plánu s ohledem na udržitelný rozvoj i životní prostředí např. u ověřování plánované dopravní sítě (33).

V České republice patří mezi nejčastěji používaný software PTV Vissim, který je využíván v dopravně-inženýrských firmách, veřejném sektoru nebo na vysokých školách. Aimsun a PARAMICS jsou dalšími populárními nástroji, které jsou rovněž využívány v oblastech mikroskopického modelování (2).

5.1.3 PTV Vissim

Německá společnost PTV Group (Planung Transport Verkehr) nabízí jeden z nejúspěšnějších dopravních softwarů. O jeho oblibě vypovídá používání ve více než 2 500 městech po celém světě. Mezi jeho nejrozšířenější komerční aplikace patří Visum, Vissim a Viswalk, které jsou součástí balíčku PTV Vision (34).

Jak už ze zkratky tohoto softwaru vyplývá, Vissim je software zaměřený na dopravu ve městech (Verkehr In Städten – SIMulationsmodell). Vissim byl vytvořen v roce 1992 jako výsledek společného výzkumu několika akademických institucí. Představuje vysoce výkonný

simulátor pohybu v multimodálním prostředí, kde lze detailně modelovat osobní a nákladní automobily, autobusy, tramvaje i cyklisty a chodce (34).

Vissim nachází široké uplatnění v oblastech simulace individuální dopravy a veřejné dopravy. Hlavními aplikacemi může být studie, plánování a řízení dálnic, opatření pro zklidnění dopravy nebo prioritizace vozidel veřejné hromadné dopravy. Kromě toho se používá také u letecké nebo kolejové dopravy, např. u železničních přejezdů a rychlodrah nebo při plánování evakuace na letišti. Propojení dopravních prostředků k síti může být realizováno třemi způsoby (34):

- stochastický model (podle předem definovaných tras),
- dynamické přiřazování v reakci na události (nehody, SSZ),
- dynamické přiřazování provozu za použití matic zdrojů a cílů (dlouhodobější).



Obrázek 8 – PTV Vissim, Multimodální simulace v Heidelbergu (62)

Široká škála využití umožňuje modelovat různé sítě, od dálnic až po příjezdové cesty, nebo i specifické geometrické a provozní podmínky. Rychlost pohybu lze zobrazovat ve vysokém rozlišení s frekvencí pohybu až jedna desetina sekundy. Díky spolupráci s ostatními programy je možno přidávat modely budov nebo CAD výkresy, ze kterých je pak uživatel schopen vytvářet realistická videa pomocí 3D animace (34). Při vytváření modelu ve Vissim je klíčové dodržovat systematický postup. Nejprve je zapotřebí vytvořit profily rychlosti, charakteristiky vozidel a složení dopravy. Poté se vytvoří pozadí, nakreslí spojnice, body pro silnice a přechody pro chodce. Nakonec se zadá objem dopravy na koncových bodech, objem chodců na přechodech a pravidla pro řízení křižovatek. Vše se doplňuje vytvořením linek a zastávek MHD, jízdních řádů a nastavením výstupních souborů (35).

Tím, že se jedná o mikroskopický model, dokáže Vissim individuálně zpracovat simulaci každého vozidla i chodce. V rámci simulace je také možno zahrnout i chodce, kteří nerespektují světelné signály. Společně se softwarem Vissim mohou být integrovány moduly Viswalk a Visum (34).

5.1.4 PTV Viswalk a Visum

Chůze patří mezi nejstarší a nejběžnější způsob dopravy. Díky chůzi se uskutečňují cesty do práce a do škol, ale také přestupy ve veřejné dopravě nebo cesty do různých dopravních prostředků. Chůze na delší vzdálenosti je sice postupně méně používaná, ale jde ruku v ruce se zdravým životním stylem. Lidské chování je často nepředvídatelné a velmi komplikované. Obyvatelé při chůzi nevyužívají doporučené cesty a nedodržují pravidla. Často se tak lze setkat se spontánním zastavením, změnou směru nebo využitím alternativní trasy. Ve spolupráci s vědci a výzkumníky byl vyvinut Viswalk. Mikroskopický software je navržen tak, aby simuloval složité lidské chování, nejen volně venku, ale také uvnitř budov nebo v dopravě. V jedné simulaci je schopen zpracovat více než 100 000 osob. Viswalk je vhodný pro použití při plánování městské a meziměstské dopravní infrastruktury. Chodci si volí své nejkratší, ale také nejrychlejší cesty. Výsledky generují analytická data o úrovni kvality dopravy, době čekání, délkách cest a front (36).



Obrázek 9 – PTV Viswalk, letištní kontrola (64)



Obrázek 10 – PTV Viswalk, přesun mezi terminály (63)

Visum je software určený pro plánování dopravy, správu sítě a k získání dat o poptávce po cestování. Jeho systém umožňuje integrovat různé dopravní módy (individuální automobilovou dopravu, nákladní dopravu i železniční dopravu) v jednom multimodálním modelu na městské, regionální a národní úrovni. Přívětivé prostředí usnadňuje používání díky rychlému a intuitivnímu spouštění modelových kroků a editace. Uživatelé mohou programovat aplikace pomocí Visual Basic a využívat rozhraní s dalšími formáty dat (ArcGIS, MS Excel, MS Access). Jedna z hlavních funkcí programu Visum umožňuje v jedné databázi kombinaci dopravních dat s GIS a vytvořit výkonné mapy s vektorovými daty nebo leteckými snímky. Modelování poptávky zahrnuje různé vrstvy, které spolu navzájem souvisejí (zóny, uzly dopravní sítě, trasy veřejné dopravy, vrstvy objektů a další) a obsahují jak standardní charakteristiky integrované v softwaru, tak i uživatelské přizpůsobení vlastních definic. Během každé úpravy je automaticky provedena kontrola konzistence sítě a případné aktualizování čísel uzlů nebo dat na trasách. Pro veřejnou dopravu nabízí přístupy založené na intervalu nebo

jízdním řádu, které zobrazují alternativní trasy a zmíněné multimodální varianty s využitím různých dopravních prostředků. Při vytvoření modelu jízdného, provozních nákladů, složení a typu vozidel včetně řízení mezi linkami zhodnotí interaktivní editor kapacitu veřejné dopravy. Na základě dat odhadne celkové náklady a výnosy. Každý údaj je doplněn časovým razítkem a volitelnou informací o pracovních dnech nebo vlastního kalendáře. Díky časovým údajům je možné sledovat změny v čase, analyzovat časové trendy a lépe optimalizovat procesy a rozhodování (37).

Integrace programů Visum a Vissim umožňuje komplexní analýzu dopravní infrastruktury. Spojením makroskopické a mikroskopické simulace se lépe porozumí provozním dopadům, kritickým a přetíženým částem sítě, které sníží počet chyb a tím čas i náklady (37).

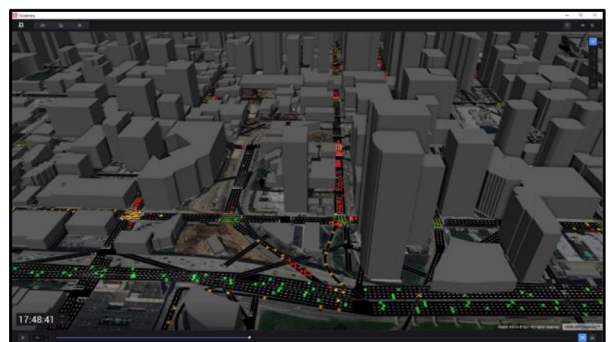
5.1.5 DYNAMIQ a EMME

Jednou z dalších klíčových firem je americká společnost Bentley Systems, která vytváří softwarová řešení pro inženýry a architekty s důrazem na plánování, návrh a provoz infrastrukturních projektů. Díky spojení s kanadskou společností INRO (38), která dlouhodobě přispívala k rozvoji softwaru na simulaci dopravy, patří DYNAMIQ a EMME mezi nejpoužívanější simulační software. Využívány jsou např. v rušné metropolitní dopravě v Londýně, ve Švédsku nebo São Paulu (39).

DYNAMIQ představuje simulační software, který spolehlivě zpracovává velmi rozsáhlé i silně přetížené dopravní sítě v jednom dopravním modelu. Využívá pohybu jednotlivých vozidel i dynamické přidělování dopravy tak, aby výstupem byla konzistentní vysoká úroveň na celé dopravní síti. Bez ztráty kvality dokáže simulovat pohyb vozidel v pruzích, přijímání mezer a změny pruhů. Zachycuje také příčiny kongescí z křížení trajektorií nebo předbíhání a pozdního řazení vozidel.



Obrázek 11 – DYNAMIQ v měřítku (65)



Obrázek 12 – DYNAMIQ v detailu (65)

Výběr tras se odráží z každodenního učení chování řidičů a může být použit nejen k předvídání kongescí a alternativních tras, ale také na návrh signálních plánů nebo výhledové

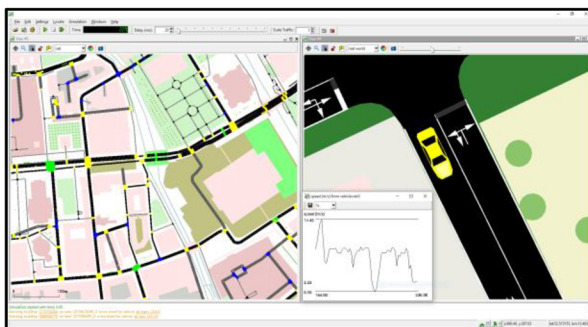
scénáře na několik desítek let dopředu. Modely i přes svou komplexnost pracují s nízkými nároky na operační paměť, a tak výrazně rychleji dokážou zpracovávat i obsáhlé modely měst, např. San Francisco s více než 650 000 vozidly. Dalšími výhodami jsou detaily vozidel, světelné signalizace, 3D vizualizace nebo modelování mýtných poplatků a řízení tranzitní dopravy. DYNAMIQ se díky jednomu škálovatelnému modelu stává efektivnější a ekonomičtější. Nalezne své využití při návrhu veřejné dopravy, omezeních při stavebních pracích, studiích dopadů dopravy, emisí a na strategie pro snížení kongescí (40).

EMME slouží jako digitální model na předvídaní pohybu lidí po městech, regionech i státech. Za použití algoritmů vytváří modely poptávky po cestování, organizaci tranzitních služeb a veřejné dopravy (41).

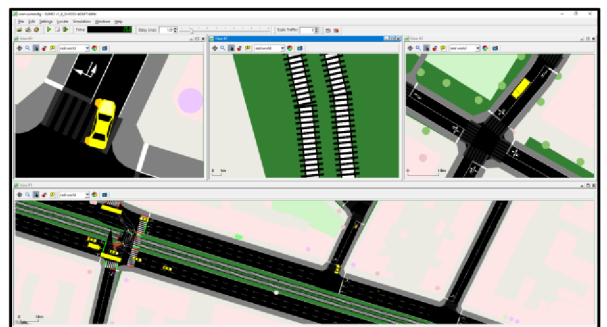
5.1.6 SUMO

Simulation of Urban Mobility je jedním z multimodálních simulačních programů s otevřeným zdrojovým kódem. Vývoj probíhá od roku 2001 ve spolupráci uživatelů s německou firmou German Aerospace Center (DLR). Celý balíček SUMO umožňuje díky otevřenému rozhraní interakci s jinými aplikacemi a import dat z různých zdrojů. Pracuje tak s daty z Vissim, Visum, Open Street Map a dalších, ze kterých je simulace nastavena a řízena.

SUMO je navrhován tak, aby byl rychlý a přenosný. Spouští se pouze části z celkového balíčku, čímž se odlišuje od ostatního softwaru, kde jsou tyto funkce integrovány v jednom. Individuální spouštění různých částí umožňuje větší efektivitu a rychlost, na druhou stranu tím ale vzniká komplikovanější práce pro začátečníky. Jelikož se jedná o mikroskopický model, zvládá na základě dopravní poptávky simulovat různé objekty (vozidla, autobusy s pasažéry, cyklisty, lodě atd.) s libovolnou vlastní cestou ve městě. Pro bezproblémovou funkci je nezbytné znát jak dopravní poptávku, tak dopravní síť (pro vozidla, autobusy), infrastrukturu (SSZ, autobusové zastávky, mýtné brány) a chování řidičů. Disponuje funkcemi pro plánování a řízení dopravy, SSZ a krátkodobou dopravní předpovědí. Simuluje i nové technologie, jako jsou komunikace mezi vozidly a inteligentní dopravní systémy (42).



Obrázek 13 – SUMO (66)



Obrázek 14 – SUMO (66)

5.1.7 Aimsun Next

Dalším softwarem pro modelování mobility je Aimsun Next používaný ve více než 100 zemích světa. Získal řadu ocenění díky svým více než 26letým zkušenostem. V různých měřítkách a dopravních módech umožňuje simulaci dopravy. Pokrývá širokou škálu prostorových úrovní od jednotlivých křižovatek, dálnic až po celé regiony. S integrovaným přístupem zahrnuje mikroskopické, mezoskopické i makroskopické simulace a jejich hybridní kombinace. Díky sadě vestavěných funkcí se přizpůsobuje potřebám každého projektu propojením s externími systémy nebo pomocí API a Pythonovských skriptů. Hodí se na posuzování infrastrukturních návrhů, řízení dopravy při pořádání událostí, mapování a testování pěších zón a priority VHD. Porovnává návrhy dopravních vylepšení a provádí studie proveditelnosti. Z moderních technologií simuluje autonomní vozidla, analyzuje spotřebu elektrické energie u elektromobilů a testuje iniciativy chytrých měst (43).

V rámci této práce je důležité zmínit i další relevantní programy, jako jsou TransModeler (plně integrovaný s GIS), Paramics Discovery, CORSIM (mikroskopické simulování zaměřené na provoz na dálnicích a silnicích, především v USA) nebo MATSim (44) (45) (46).



Obrázek 15 – TransModeler, dopravní simulace (67)

5.2 Komplexní navrhování a řízení světelné signalizace

Hlavním způsobem, kterým lze předejít kongescím na křižovatkách ve velkých městech, a zvýšit bezpečnost pro vozidla i chodce, je návrh řízené křižovatky se SSZ. Mezi největší výhodou této řízené křižovatky lze zařadit zvýšení kapacity provozu. Díky různým signálním plánům řídí řadič návěstidly provoz na křižovatce a reaguje na změny intenzity dopravy během celého dne, čímž se snižuje hluk, emise a spotřeba vozidel.

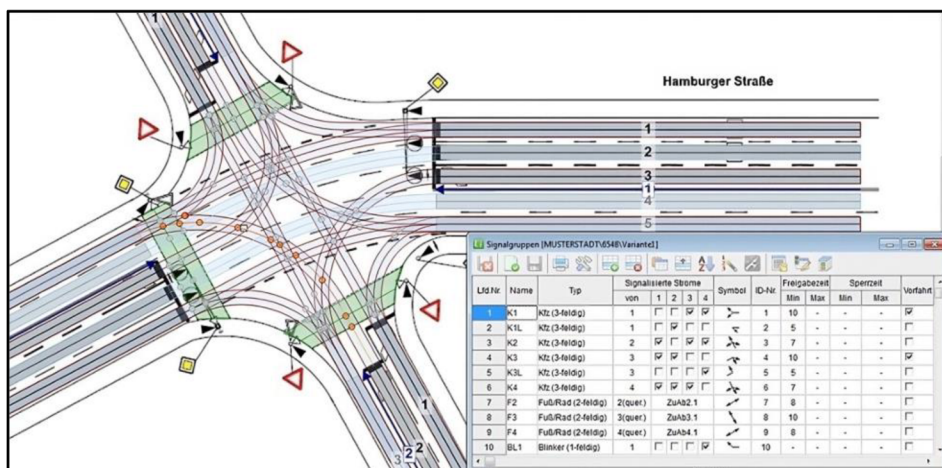
Ve městech tyto křižovatky umožňují zapojení blízkých křižovatek do koordinace a vytváření preference pro vozidla MHD a IZS. Řízené křižovatky zaručují i přes více kolizních bodů také bezpečné přechody pro chodce a osoby se sníženou orientací. Při stavbě jsou často levnější a zabírají méně místa.

Mají však také své nevýhody, které souvisí se samotným provozem. Při velmi nízkých intenzitách dochází k prodloužení doby čekání a v případě vypnutí k větším rizikům srážek, jelikož se křižovatka stane neřízenou a platí dopravní značení. Řízení signálními plány spotřebovává elektrickou energii a je nutné provádět pravidelné servisní kontroly a údržbu samotných žárovek v návěstidlech (47).

5.2.1 LISA+, ANNA a INES

Společnost Schlothauer & Wauer GmbH stojí za vývojem a aktualizací softwarů LISA+, ANNA a INES. Programy zaměřené na technologická řešení řízení dopravy nabízí návrh, plánování a správu signalizačních systémů (48).

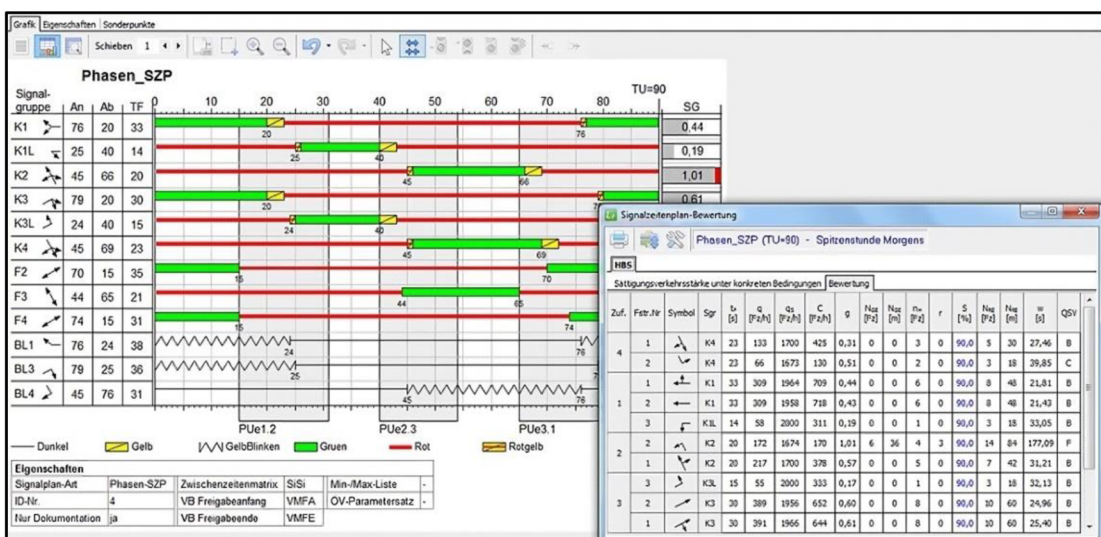
LISA+ je ověřený softwarový balíček používaný ve všech krocích plánování, řízení a instalace světelných signálů. Tím ulehčuje dopravním inženýrům výpočty a hodnocení křižovatek. V Německu, Rakousku, Belgii a Jižní Americe se jedná o nejčastěji používaný software, a proto také podporuje několik evropských jazyků včetně češtiny (48).



Obrázek 16 – LISA+, náčrt křižovatky a signální skupiny (68)

Práce začíná provedením náčrtku křižovatky. V grafickém rozhraní je nastaveno měřítko pro zachování správné proporce. Následně jsou definovány osy a ramena křižovatky, počet a šířka jízdnic pruhů, příp. přechod pro chodce nebo přejezd pro cyklisty. Po doplnění dat se vytváří kartogram intenzity dopravy, fáze a sled fází, zapnutí a ukončení provozu SSZ, logika řízení a další (48).

Signální plány je možné vytvářet ručně nebo zcela automaticky, vypočítat a optimalizovat je podle různých parametrů. Funkce analýzy kvality nabízí informace o délce fronty nebo době čekání. Koordinace je nastavitelná podle potřeb VHD, kde zobrazuje ručně vytvořené linky dopravy v závislosti na čase i vzdálenosti. Proces zadávání dat pro křižovatky a signální skupiny je usnadněn díky grafickému rozhraní, které umožňuje vytváření matic konfliktů pro kolizní body a výpočet mezičasů. Matice i tabulky jsou automaticky generovány a jejich změny je možno provádět jak v příslušných tabulkách, tak v náčrtech. Uživatelé mohou do výchozího souboru uložit specifická nastavení, např. regionální normy pro danou oblast (48).



Obrázek 17 – LISA+, fázové přechody a jejich vyhodnocení (68)

Pokročilé vývojové prostředí v kombinaci s logickým editorem a integrovanými nástroji vytváří řídicí logiku. Jedním kliknutím je řízení otestováno pomocí simulačního nástroje, který je možný použít u řízení jednotlivých křižovatek nebo koordinace s dalšími křižovatkami včetně adaptivního řízení. Mezi křižovatkami lze jednoduše přepínat a změnit tak např. řízenou křižovátku na okružní. Díky integraci s programem PTV Vissim lze okamžitě simulovat ovládání vytvořené v programu LISA+. Simulace PTV Vissim pomocí signálních plánů ovládá SSZ křižovatky a simuluje podrobné analýzy chování v různých dopravních scénářích. Systémy s logikou a parametry mohou být exportovány do různých formátů a následně ihned spuštěny v řídicích jednotkách (48).

ANNA je webový systém pro detailní analýzu kvality SSZ. Nabízí automatizovaný nebo manuální import dat ze SSZ, monitorování poruch a následné vyhodnocování. Díky tomu lze nezávisle a komplexně zkontrolovat kvalitu řízení v pravidelných kontrolách. ANNA je určena především pro dopravně-inženýrské firmy a městská plánovací oddělení (49).

Hlavním zaměřením systému INES je adaptivní řízení dopravních sítí, které se integruje do dopravních řadičů díky svému otevřenému rozhraní. Řízení je prováděno modulárními algoritmy, které se přizpůsobují konkrétním potřebám. Schopností je rozpoznávat nevyužitelné délky zelené a následně je přerozdělovat dle aktuální dopravní zátěže. INES zlepšuje kapacitu provozu, jelikož změna délek fáze zvyšuje kvalitu i výkon řízení. Používá se především v hustě obydlených městských oblastech, na koridorech s proměnnými dopravními proudy nebo při speciálních dopravních situacích (50).

5.2.2 TRANSYT, PTV VISTRO a EDIP Software

TRANSYT je dopravně-inženýrský software určený pro návrh a optimalizaci dopravních sítí. Používají ho dopravní inženýři, studenti i různé státní orgány ve více než 110 zemích světa. Skládá se z makroskopického dopravního modelu, optimalizace signálních plánů a simulačního modelu. Hlavním cílem programu je minimalizovat ekonomické náklady spojené se zpožděním a zastavováním na křižovatkách a silničních úsecích (51).

PTV Vistro (zkratka pro Vision Traffic + Optimization) je dalším softwarem společnosti PTV AG využívaným při dopravních analýzách, které jsou nepostradatelné při optimalizacích dopravního toku a plánování dopravní infrastruktury. Uživatelské rozhraní nabízí široké škály funkcí od výpočtů křižovatky, řízení signálních plánů, po analýzu dopadů výstavbových projektů. Využívá metody, které splňují průmyslové standardy, jako je Highway Capacity Manual v USA. Jak již bylo zmíněno u programů PTV Vision, programy od společnosti PTV Group jsou navzájem kompatibilní, a tak i PTV Vistro umožňuje snadný export a import dat např. do softwaru PTV Vissim (52).

Český zástupce EDIP s. r. o. se specializuje na komplexní služby v oboru dopravního inženýrství. Poskytuje bezpečnostní inspekce, dopravní průzkumy i vývoj dopravně-inženýrského softwaru. Ve formě online nástrojů nabízí své programy EDIP Software pro dopravní inženýry, projektanty, policisty, úřady nebo školy. Tyto nástroje vždy splňují příslušné normy a technické podmínky. Mezi nabízený software patří ROZHLED (pro výpočet rozhledových trojúhelníků), PARK (pro stanovení počtu parkovacích míst a odstavných stání), EDIP-eS (pro výpočet a prognózu intenzit dopravy), EDIP-Ka, EDIP-OK a EDIP-eL (pro posouzení kapacity úrovnňových, okružních a světelně řízených křižovatek) (53).

5.3 Evidence dopravního značení

Pro získání přehledu o majetku obce nebo města se vytváří důležitý dokument o evidenci značení – Pasport dopravního značení. Zákon č. 13/1997 Sb. nařizuje povinnost o vedení pasportu komunikací. Pasport poskytuje přehled o dopravním značení (svislém i vodorovném) a bezpečnostních prvcích na pozemních komunikacích. Výsledkem je grafický nebo tabulkový souhrn o počtu, stavu a umístění jednotlivého značení, který může být doplněn o návrh dopravního značení. Mylné nebo zbytečné dopravní značení může vést ke snížení bezpečnosti a nehodám (54).

Většina programů je postavena na platformě Microsoft Office, jelikož je vhodná na sběr dat a snadno upravitelná. Pasport dopravního značení lze za použití geografických informačních systémů přesně lokalizovat.

5.3.1 Geografický informační systém

GIS je moderní počítačový nástroj, který mění způsob, jakým lze pracovat s geografickými daty. Na určitém místě naší planety je možné pomocí souřadnic a jiných atributů stanovit specifické místo. Oproti klasickým mapám, které zobrazují ve formě prezentace pouze statické informace, dokáže GIS poskytovat interaktivní zpracování a analýzu dat. Přispívá tak k lepšímu porozumění geografických informací při práci s daty. Tím, že se jedná o komplexní nástroj, nemá ucelenou definici. V některých případech nezahrnuje pouze software, ale také další prvky jako jsou personál, hardware, data a různé postupy (55).

Data mohou být prezentována ve formě vektorových nebo rastrových modelů. Vektorové modely prezentují data pomocí bodů, linií a ploch, zatímco rastrové rozdělují oblast na buněčné jednotky (pixely), které mají určité hodnoty charakterizované např. barvou. K získání informací o reliéfu a umístění stavebních, technických i jiných objektů lze použít Digitální technickou mapu (2). GIS je důležitý pro správu inženýrských sítí, jako jsou distribuční sítě v oblasti vodohospodářství, energetiky a telekomunikace. Pomáhá plánovat a organizovat MHD, monitorovat intenzitu dopravy a navigační systémy. Informace z intenzity dopravy mohou následně vést k efektivnější optimalizaci dopravy např. obslužnosti v kraji. Systémy využívá státní správa a samospráva také při plánování a údržbě dopravní infrastruktury (veřejného osvětlení, chodníků, zelené plochy aj.) (55).

5.3.2 ArcGIS

ArcGIS je komplexní geografický informační systém vyvinutý společností Esri, který umožňuje sběr, zpracování a analýzu prostorových dat. Usnadňuje přístup k informacím jak odborníkům na geoprostorová data, tak i široké veřejnosti. Nabízí širokou škálu nástrojů pro vytváření map, které zahrnují i zobrazení geoprostorových dat souvisejících s dopravou. Uživatelé mohou provádět analýzy geoprostorových dat pomocí statistických, prostorových a síťových nástrojů, které jim pomáhají identifikovat vzory, trendy a vztahy v dopravních datech (56).

Geokódování převádí adresy na geografické souřadnice a je užitečné pro zobrazení přesného umístění na mapě a např. sledování dopravy. Lze jím také vytvářet a spouštět prostorové modely, které automatizují složité analýzy geoprostorových dat. Sdílení dat a spolupráce v programu jsou usnadněny pomocí různých aplikací a webových platforem.

Organizace jsou tak schopny provádět rozhodnutí na základě dat a porozumět vzorcům a vztahům v geografickém kontextu. Obvykle jej začlení třemi základními způsoby – jako jednotný GIS systém, kolekci specializovaných systémů, z nichž každý je zaměřen na jeden určitý soubor nebo jako doplnění k stávajícím systémům. Dopravní inženýři ho používají pro efektivní plánování, monitoring a správu dopravní infrastruktury, stejně jako pro různé analytické úlohy a práce s daty (57).

ArcGIS byl použit Národním dopravním informačním centrem při vytvoření aplikace Dopravní info o aktuálních dopravních informacích. Používán je také při správě prostorových dat Ředitelstvím silnic a dálnic ČR. Široké uplatnění zahrnuje monitorování hromadné dopravy, reagování na potřeby v dopravní logistice, ale také i lodní dopravu při kontrole vodní hladiny nebo leteckou při pasportizaci letišť a pohybu letadel (56).

6 Výsledky a diskuse

Bakalářská práce odhalila souvislosti mezi dopravně-inženýrským softwarem a potřebami moderního městského prostředí. Do výsledků je zahrnuta tabulka srovnání makroskopických, mezoskopických a mikroskopických dopravních modelů, kde jsou identifikovány oblasti, na které se každý typ modelu zaměřuje a jeho výhody a nevýhody.

Tabulka 3 – Srovnání dopravních modelů (vlastní)

Aspekty	Makroskopické modely	Mezoskopické modely	Mikroskopické modely
Velikost zkoumané oblasti	Globální	Regionální	Lokální
Úroveň analýzy	Celostátní dopravní síť, dálnice	Městské čtvrti a větší části měst	Menší části měst, koridory a křižovatky
Dopravní analýza	Dopravní proud jako celek bez rozlišení na jednotlivá vozidla	Dopravní proud jako celek s rozlišením na jednotlivá vozidla	Individuální chování vozidel, změna jízdních pruhů
Detailnost	Nízká	Střední	Vysoká
Příklady aplikací	Simulace dopravního proudu na dálnicích, plánování dopravní infrastruktury	Simulace chování populace v rámci města	Simulace provozu na křižovatkách a průjezdů
Výpočetní náročnost	Nízká	Střední	Vysoká
Výhody	Schopnost poskytnout celkový přehled dopravních toků a prognózu dopravy	Schopnost modelovat chování skupin, zobecnění výsledků pro celé populace	Detailní pochopení chování jednotlivých osob, schopnost modelovat složité interakce
Nevýhody	Nedostatek detailu, omezení v modelování složitých interakcí a individuálního chování	Nedostatek detailu v porovnání s mikrosimulací, menší rozsah analýzy vůči makrosimulaci	Obtížnější implementace a potřeba detailních dat o chování řidičů

Dále je zde uvedena Tabulka 4, která detailněji porovnává dopravně-inženýrský software zaměřený na dopravní modelování. Tabulka poskytuje informace o vybraných funkcích každého softwaru, a to včetně jeho nedostatků, což umožňuje podrobnější porovnání jeho využití a přínosu z hlediska požadavků a potřeb.

Tabulka 4 – Srovnání dopravně-inženýrského softwaru (vlastní)

Kritérium	Vissim	Visum	Viswalk	DYNAMEQ	SUMO	Aimsun Next
Typ simulace	Mikro až mezosimulace	Makrosimulace	Mikrosimulace chodců	Mezo až makrosimulace	Mikrosimulace	Mikro, mezo a makrosimulace
Cenová politika	Placený	Placený	Placený	Placený	Zdarma	Placený
Grafické rozhraní	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Možnost prezentace	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Vizualizace	2D/3D	2D	2D/3D	2D/3D	2D	2D/3D
Autonomní vozidla	Ano	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano
Modelování pěších	Ano	Ne	Ano	Ne	Ne	Ano
Otevřený zdrojový kód	Ne	Ne	Ne	Ne	Ano	Ne
Světelná signalizace	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Chování řidičů	Ano	Ne	Ne	Ano	Ano	Ano
Podpora GIS	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Modelování MHD	Ano	trasy MHD	Ano	Ano	Ano	Ano
Technická podpora	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Model spotřeby paliva	Ano	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano
Český jazyk	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne

Z analýzy tabulky vyplývá několik klíčových zjištění. Většina softwaru nabízí různé typy simulací specializované na konkrétní oblasti, např. na modelování chodců. Programy jsou sice převážně placené, ale podporují mnoho funkcí, jako jsou řízení dle světelné signalizace, grafické rozhraní, podporu GIS nebo možnost prezentace. S ohledem na aktuální trendy je důležité, že většina programů podporuje modelování autonomních vozidel nebo spotřebu paliva pro hodnocení environmentálních dopadů. Je důležité poznamenat, že výběr vhodného softwaru závisí na potřebách a preferencích samotného projektu, uživatele nebo firmy.

7 Závěr

Dopravně-inženýrský software je klíčovým nástrojem pro plánování a provozování dopravy. Umožňuje dopravním inženýrům efektivně analyzovat dopravní strategie a následně je vyhodnocovat na základě komplexních dat. Pomáhá nejen zlepšovat proces rozhodování, ale také minimalizuje čas i náklady spojené s návrhy a hodnocením dopravy. Slouží jako účinný prostředek pro monitorování výkonnosti dopravní infrastruktury a díky kvalitním grafickým zobrazením také k prezentaci veřejnosti.

Lze konstatovat, že přináší mnoho výhod, ale také s sebou nese i určité výzvy. Každý program má své specifické funkce, které mu umožňují plnit určité úkoly. Není zde však univerzální nástroj, který by dokázal řešit všechny problémy dopravy. Při výběru je nezbytné zvážit finanční možnosti, školení pro porozumění programům, ale i zisk kvalitních vstupních dat.

Část práce byla zaměřena na křižovátku řízenou světelným signalizačním zařízením, kde je software zásadní při optimalizaci signálních plánů, vytváření fázových schémat a následného hodnocení správnosti dle kapacitního posouzení nebo mikrosimulace. Dopravní modely jsou nezbytné při plánování, analýze křižovatek a dálnic, správném fungování dopravy v městských oblastech i při prevenci nehod. Mikroskopické modely simulují různé dopravní prostředky na křižovatkách, chodce na přechodech, jejich vzájemnou integraci i pravidla silničního provozu. Identifikují správné umístění a rozložení prvků pro zachování účinnosti a bezpečnosti. Makroskopické modely získávají reálnější výsledky při posuzování rozsáhlých dopravních projektů, charakteristik dopravního proudu a prognóz dopravy. Vizualizace prostorových dat umožňuje plánovat dopravní síť a zobrazovat prvky dopravní infrastruktury (dopravní značení, silnice, parkoviště) v geografickém informačním systému. Závěry naznačují, že využití tohoto typu softwaru může mít významný dopad na zlepšení dopravních podmínek.

Integrace dopravně-inženýrského softwaru v praxi dopravních inženýrů a úřadů vede k efektivnějšímu plánování dopravy a lepšímu řízení dopravního toku. Je důležité zdůraznit, že úspěšné používání tohoto softwaru vyžaduje nejen technické znalosti, ale také schopnost interpretovat výsledky simulací a navrhnout relevantní opatření pro zlepšení dopravní situace.

V následujícím vývoji v oblasti dopravně-inženýrského softwaru lze očekávat kombinaci různých metod, které budou podpořeny pokročilejšími teoriemi, technologiemi a také strojovým učením a umělou inteligencí.

8 Seznam použitých zdrojů

1. *Dopravní inženýrství TSK Praha*. Online. C2023. Dostupné z: <https://www.tsk-praha.cz/wps/portal/root/dopravni-inzenyrstvi>. [cit. 2023-10-28].
2. BARTOŠ, Luděk; KOČÁRKOVÁ, Dagmar a UHLÍK, Michal. *Dopravní inženýrství*. 2023. Praha: Česká silniční společnost, 2023. ISBN 978-80-02-03028-7.
3. *Traffic Analysis Software Tools*. Online. 2000, č. E-CO14. Transportation Research Board and National Research Council, 2000. Dostupné z: <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec014.pdf>. [cit. 2024-01-09].
4. V českých městech žijí skoro tři čtvrtiny obyvatelstva. Online. *Statistika & My*. Roč. 2012, č. 4. Dostupné z: https://www.czso.cz/documents/10180/20555415/1804120426_27.pdf/d216b1ce-ec0d-48c5-bff1-7124f5a925a7?version=1.0. [cit. 2024-01-01].
5. MOOS, Petr; ČINČERA, Pavel; ŠTĚPÁNEK, Petr; ŠPIRKOVÁ, Daniela; HAVRÁNEK, Jan et al. *Praha – Vídeň: možnosti cesty k Smart city ve střední Evropě*. Praha: BEZK, 2016. ISBN 978-80-905254-8-1.
6. RAGHAVAN, Subashini; LAU BOUNG YEW, Simon; LEE, Ying Loong a TAN, Weilun. *Data Integration for Smart Cities: Opportunities and Challenges*. Researchgate. Malaysia, 2019. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/335471605_Data_Integration_for_Smart_Cities_Opportunities_and_Challenges. [cit. 2024-01-16].
7. BÁRTA, David. *Metodika Konceptu inteligentních měst: Projekt TB930MMR001*. Brno, 2015. Dostupné z: https://mmr.gov.cz/getmedia/b6b19c98-5b08-48bd-bb99-756194f6531d/tb930mmr001_metodika-konceptu-inteligentnich-mest-2015.pdf. [cit. 2024-03-14].
8. C-ROADS. *C-ROADS Czech Republic*. Dostupné z: <https://www.bkom.cz/c-roads/assets/media/c-roads-cs.pdf>. [cit. 2024-02-04].
9. C-ROADS O2. *C-ROADS Czech Republic*. Dostupné z: https://radom.eu/images/soubory-ke-stazeni/C-Roads_O2_A5_CZ_03.pdf. [cit. 2024-02-04].
10. KŘIVDA, Vladislav. *Základy organizace a řízení silniční dopravy*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1253-3.

11. ŘEDITELSTVÍ SILNIC A DÁLNIC ČR. *Základní informace k celostátnímu sčítání dopravy 2020*. Online. C2022. Dostupné z: https://scitani.rsd.cz/CSD_2020/pages/informations/default.aspx. [cit. 2024-02-05].
12. CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU. *První celostátní průzkum dopravního chování*. Online. Česko v pohybu. C2022. Dostupné z: <https://www.ceskovpohybu.cz/>. [cit. 2024-02-01].
13. NEJVYŠŠÍ KONTROLNÍ ÚŘAD. *Kontrolní závěr z kontrolní akce: Peněžní prostředky vynakládané na zvýšení bezpečnosti silničního provozu*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.nku.cz/assets/kon-zavery/k22026.pdf>. [cit. 2024-03-18].
14. MINISTERSTVO DOPRAVY. *Strategie BESIP 2021-2030*. Online. BESIP, 2020. Dostupné z: <https://besip.cz/Besip/media/Besip/data/web/Strategie-BESIP-2021-2030.pdf#page=6&zoom=100,90,15>. [cit. 2023-10-15].
15. *Dopravní nehody v ČR*. Online. Dopravní nehody v ČR. C2024. Dostupné z: <https://nehody.cdv.cz/>. [cit. 2024-02-24].
16. SEMELA, Marek. *Analýza silničních nehod II*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2012. ISBN 978-80-214-4549-9.
17. Technické podmínky: TP 81, *Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení provozu na pozemních komunikacích*. Třetí. Ministerstvo dopravy, 2015.
18. ELTEC. *Brief History of Traffic Lights*. Online. Medium. 2019. Dostupné z: <https://medium.com/@eltec/brief-history-of-traffic-lights-8e661298e627>. [cit. 2023-12-07].
19. *The Origin and Evolution of Traffic Lights*. Online. The Otomotif College. Dostupné z: <https://www.toc.edu.my/automotiveandmotorsports-hub/the-origin-and-evolution-of-traffic-lights>. [cit. 2023-12-07].
20. Technické podmínky: TP 188, *Posuzování kapacity křižovatek a úseků pozemních komunikací*. Ministerstvo dopravy, 2018.
21. *ŘADIČE A NÁVĚSTIDLA*. Online. CROSS Zlín. Dostupné z: <https://www.cross-traffic.com/cz/radice-a-navestidla/>. [cit. 2024-03-01].
22. *Inteligentní dopravní infrastruktura*. Online. Siemens. Dostupné z: <https://www.siemens.cz/smartcities/inteligentni-dopravni-infrastruktura>. [cit. 2024-03-01].

23. NOVOTNÝ, Vojtěch; PROUSEK, Tomáš a JAVOŘÍK, Tomáš. *Zásady pro navrhování a zřizování preference autobusů VHD*. Praha: ČVUT v Praze Fakulta dopravní, Ústav dopravních systémů, 2017. ISBN 978-80-01-06311-8.
24. MAGISTRÁT HLAVNÍHO MĚSTA PRAHY. *Smart City v praxi: Chytré semaforey upřednostňují autobusy*. Online. Portál hlavního města Prahy. 2022. Dostupné z: https://www.praha.eu/jnp/cz/doprava/smart_city_v_praxi_chytre_semaforey.html. [cit. 2023-12-28].
25. *Záchranáři k vám dorazí včas*. Online. Intens. Dostupné z: <https://www.intens.cz/cs/nase-reseni/zachranari>. [cit. 2024-01-15].
26. *What is Traffic Congestion?* Online. Isarsoft. Dostupné z: <https://www.isarsoft.com/knowledge-hub/traffic-congestion>. [cit. 2024-02-08].
27. Technické podmínky: TP 123, *Zjišťování kapacity pozemních komunikací a návrhy na odstranění kongescí*. CityPlan, 1999.
28. KOTUSEVSKI, G. a HAWICK, K. A. *A Review of Traffic Simulation Software*. Online. 2009. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228966705_A_Review_of_Traffic_Simulation_Software. [cit. 2024-01-09].
29. PŘIBYL, Ondřej a KŘÍŽ, Milan. *Dopravní plánování a modelování*. Prezentace. 2019. Dostupné z: <https://zolotarev.fd.cvut.cz/dopm/ctrl.php?act=show,section,242>. [cit. 2024-01-09].
30. *Traffic and Transportation Simulation*. Online. Roč. 2015, č. E-C195. Washington, D.C.: Transportation Research Board. ISSN 0097-8515. Dostupné z: <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec195.pdf>. [cit. 2024-01-05].
31. *Stochastické modely: Modely a modelování*. Prezentace. Masarykova univerzita. Dostupné také z: <https://is.muni.cz/el/1431/jaro2016/M6444/um/61762308/>. [cit. 2024-01-09].
32. ORTÚZAR, Juan de Dios a WILLUMSEN, Luis G. *Modelling Transport*. Čtvrté. Wiley, 2011. ISBN 978-1-119-99330-8.
33. *Modelování dopravy pomocí matematických modelů*. Online. IPR Praha. Dostupné z: <https://iprpraha.cz/stranka/3941/modelovani-dopravy-pomoci-matematickych-modelu>. [cit. 2024-01-02].

34. *VISSIM: State-of-the-Art Multi-Modal Simulation*. Germany: PTV. Dostupné z: https://company.intertraffic.com/Image/Download?docid=2052&dl=MIJNRAI_TOP_LIBRARY<c=MIJNRAI_LOGIN_PRIVATEFILE. [cit. 2024-01-05].
35. *VISSIM 4.10 User Manual*. Germany: PTV, 2005. Dostupné z: https://www.dot.ny.gov/main/roundabouts/files/manual_vissim_410.pdf. [cit. 2024-01-05].
36. *VISWALK – Pedestrian Simulation*. Germany: PTV. Dostupné z: https://company.intertraffic.com/Image/Download?docid=2057&dl=MIJNRAI_TOP_LIBRARY<c=MIJNRAI_LOGIN_PRIVATEFILE. [cit. 2024-01-05].
37. *VISUM – State-of-the-Art Travel Demand Modeling*. Germany: PTV. Dostupné z: https://company.intertraffic.com/Image/Download?docid=2050&dl=MIJNRAI_TOP_LIBRARY<c=MIJNRAI_LOGIN_PRIVATEFILE. [cit. 2024-01-06].
38. *INRO is now part of Bentley Systems!* Online. Bentley. 2021. Dostupné z: <https://info.inrosoftware.com/blog/inro-is-now-part-of-bentley-systems>. [cit. 2024-01-13].
39. *Bentley Systems Announces Acquisition of Mobility Simulation Leader INRO*. Online. Business Wire. 2021. Dostupné z: <https://www.businesswire.com/news/home/20210414005928/en/Bentley-Systems-Announces-Acquisition-of-Mobility-Simulation-Leader-INRO>. [cit. 2024-01-13].
40. *Dynameq 4: Multiscale Traffic Simulation*. Canada: INRO, 2016. Dostupné také z: https://www.polinomia.it/assets/files/dynameq_brochure_it.pdf. [cit. 2024-01-13].
41. *EMME*. Online. Bentley. Dostupné z: <https://www.bentley.com/software/emme/>. [cit. 2024-01-18].
42. LOPEZ, Alvarez; BEHRISCH, Michael; BIEKER-WALZ, Laura; ERDMANN, Jakob; FLÖTTERÖD, Yun-Pang et al. *Microscopic Traffic Simulation using SUMO*. USA: IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), 2018.
43. *Aimsun Next Overview*. Online. Aimsun. Dostupné z: <https://www.aimsun.com/aimsun-next-overview/>. [cit. 2024-01-25].
44. *TransModeler Traffic Simulation Software*. Online. Caliper. Dostupné z: <https://www.caliper.com/transmodeler/>. [cit. 2024-01-25].

45. *Paramics Microsimulation*. Online. Systra. Dostupné z: <https://www.systra.com/digital/solutions/transport-planning/paramics/>. [cit. 2024-01-25].
46. *TSIS-CORSIM*. Online. UNIVERSITY OF FLORIDA. McTrans Center. Dostupné z: <https://mctrans-wordpress-prd-app.azurewebsites.net/tsis-corsim/>. [cit. 2024-01-21].
47. ČIHÁČKOVÁ, Pavlína a KOSŇOVSKÝ, Michal. *Okružní křižovatky vs. světelně řízené křižovatky*. Online. SILNICE ŽELEZNICE. 2014. Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/okruzni-krizovatky-vs-svetelne-rizene-krizovatky>. [cit. 2024-02-12].
48. *LISA+*. Online. Schlothauer & Wauer. C2023. Dostupné z: <https://www.schlothauer.de/en/software-systems/lisa/>. [cit. 2024-02-20].
49. *ANNA*. Online. Schlothauer & Wauer. C2023. Dostupné z: <https://www.schlothauer.de/en/software-systems/anna/>. [cit. 2024-02-20].
50. *INES*. Online. Schlothauer & Wauer. C2023. Dostupné z: <https://www.schlothauer.de/en/software-systems/ines/>. [cit. 2024-02-20].
51. *TRANSYT*. Online. TRL. Dostupné z: <https://trlsoftware.com/products/junction-signal-design/transyt/#how-transyt-works>. [cit. 2024-02-17].
52. *PTV VISTRO*. Online. PTV Group. C2024. Dostupné z: <https://www.ptvgroup.com/en/products/traffic-engineering-software-ptv-vistro>. [cit. 2024-03-04].
53. *O programech EDIP Software*. Online. EDIP. Dostupné z: <https://www.edip.cz/software/o-programech-edip-software>. [cit. 2024-03-15].
54. *Pasport dopravního značení*. Online. Pasportujeme. Dostupné z: <https://pasportujeme.cz/pasporty/pasport-dopravniho-znaceni/>. [cit. 2023-12-03].
55. RAPANT, Petr. *Úvod do geografických informačních systémů*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2002.
56. *GIS v oborech: Doprava*. Online. Arcdata Praha. Dostupné z: <https://www2.arcdata.cz/oborova-reseni/gis-v-oborech/doprava>. [cit. 2024-03-19].
57. *Systém ArcGIS*. Online. Arcdata Praha: Přehled produktů a aplikací. Dostupné z: <https://www.arcdata.cz/cs-cz/produkty/arcgis/aplikace>. [cit. 2024-03-09].

58. DYVIK, Einar H. *Share of urban population worldwide in 2023, by continent*. 2024. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/270860/urbanization-by-continent/>. [cit. 2024-03-14].
59. *V2X komunikace – jen inovace nebo revoluce?* Online. In: Automatizace HW. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/v2x-komunikace-jen-inovace-nebo-revoluce.html>. [cit. 2024-03-21].
60. AF-CITYPLAN, ČVUT, FAKULTA STAVEBNÍ. *Metodika pro volbu způsobu řízení SSZ v období slabého provozu*. Certifikováno Ministerstvem dopravy ČR. Praha, 2015. Dostupné také z: <http://d2051.fsv.cvut.cz/metodiky/mrSSZ.pdf>. [cit. 2024-03-12].
61. *Bottleneck traffic jam*. Online. In: Heidipozzo. 2019. Dostupné z: <https://heidipozzo.com/bottleneck-traffic-jam-road-dence-traffic-on-motorway-or-highway-different-car-on-road-top-view-vector/>. [cit. 2024-03-18].
62. PTV MOBILITY. *PTV Vissim: Multimodal capacity study Heidelberg*. Youtube video. 2017. Dostupné z: <https://youtu.be/18q4is-xyI8>. [cit. 2024-02-27].
63. PTV MOBILITY. *PTV Vissim: People Mover*. Youtube video. 2023. Dostupné z: <https://youtu.be/O8EHiiwua1E>. [cit. 2024-02-26].
64. PTV MOBILITY. *PTV Viswalk: Security Check at Airport*. Youtube video. 2020. Dostupné z: https://youtu.be/Xz_eaU2iVX4. [cit. 2024-02-26].
65. INRO Software. *Dynameq City-Scale Traffic Simulation*. Youtube video. 2018. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=yL8sJPYWcbs>. [cit. 2024-02-26].
66. *About Eclipse SUMO*. Online. In: SUMO. Dostupné z: <https://sumo.dlr.de/about>. [cit. 2024-03-17].
67. *TransModeler Traffic Simulation Software*. Online. In: Caliper. Dostupné z: <https://www.caliper.com/transmodeler/default.htm>. [cit. 2024-03-19].
68. *LISA+*. Online. In: Magyar Közút. 2018. Dostupné z: <https://internet.kozut.hu/2018/12/10/lisa-es-az-okos-jelzolampak/>. [cit. 2024-03-18].

9 Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratk

9.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Rámec inteligentního města (7).....	5
Obrázek 2 – Kooperativní systémy (59).....	6
Obrázek 3 – Situační schéma křižovatky (60).....	13
Obrázek 4 – Fázové schéma křižovatky (60).....	15
Obrázek 5 – Sled fázi křižovatky (60).....	16
Obrázek 6 – Ukázka možného signálního plánu křižovatky (2).....	16
Obrázek 7 – Kongesce reflektující úzké hrdlo láhve (61).....	20
Obrázek 8 – PTV Vissim, Multimodální simulace v Heidelbergu (62).....	25
Obrázek 9 – PTV Viswalk, letištní kontrola (64).....	26
Obrázek 10 – PTV Viswalk, přesun mezi terminály (63).....	26
Obrázek 11 – DYNAMIQ v měřítku (65).....	27
Obrázek 12 – DYNAMIQ v detailu (65).....	27
Obrázek 13 – SUMO (66).....	28
Obrázek 14 – SUMO (66).....	28
Obrázek 15 – TransModeler, dopravní simulace (67).....	29
Obrázek 16 – LISA+, náčrt křižovatky a signální skupiny (68).....	30
Obrázek 17 – LISA+, fázové přechody a jejich vyhodnocení (68).....	31

9.2 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Označení signálů (17).....	13
Tabulka 2 – Mezičasy pro křižovatku (60).....	14
Tabulka 3 – Srovnání dopravních modelů (vlastní).....	35
Tabulka 4 – Srovnání dopravně-inženýrského softwaru (vlastní).....	36

9.3 Seznam grafů

Graf 1 – Procent obyvatel z celkové populace žijících ve městech (58).....	4
Graf 2 – Počet osob usmrcených při dopravních nehodách v ČR (13).....	8
Graf 3 – Počet těžce zraněných osob při dopravních nehodách v ČR (13).....	8

9.4 Seznam použitých zkratek

GIS – geografický informační systém

IZS – integrovaný záchranný systém

MHD – městská hromadná doprava

SSZ – světelné signalizační zařízení

TP – Technické podmínky

VHD – veřejná hromadná doprava