

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta dopravní

Ústav dopravní telematiky



Použití ad-hoc vozidlových sítí (VANET)  
v prostředí kooperativních systémů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

*Vypracoval:* Alena Chernetskaya

*Vedoucí práce:* Ing. Petr Bureš, Ph.D.

*Rok:* 2019



**K620..... Ústav dopravní telematiky**

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Alena Chernetskaya**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – ITS – Inteligentní dopravní systémy**

Název tématu (česky): **Použití ad-hoc vozidlových sítí (VANET) v prostředí kooperativních systémů**

Název tématu (anglicky): Use of Vehicular Ad hoc Network (VANET) in C-ITS Environment

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- úvod do problematiky vozidlových sítí a kooperativních systémů
- analýza současných požadavků na vozidlové sítě s ohledem na kvalitu a bezpečnost
- analýza současných simulátorů pro vozidlové sítě
- simulace vozidlových sítí za použití vybraného simulačního nástroje
- zhodnocení analýz a provedené simulace a závěr

- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Xiaodong Lin, Rongxing Lu: Vehicular Ad Hoc Network Security and Privacy, Wiley-IEEE Press, Jun 2015  
Hannes Hartenstein (Ed.), Kenneth Laberteaux (Ed.): VANET: Vehicular Applications and InterNetworking Technologies, Wiley, Oct 2009

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Bureš, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **23. října 2018**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

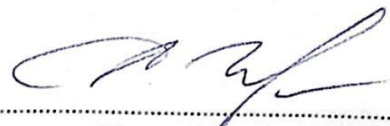
Datum odevzdání bakalářské práce: **26. srpna 2019**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

  
.....  
**Ing. Zuzana Bělinová, Ph.D.**  
vedoucí  
Ústavu dopravní telematiky



  
.....  
**doc. Ing. Pavel Hruběš, Ph.D.**  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

  
.....  
**Alena Chernetskaya**  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 23. října 2018

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem k tomu pouze zdroje uvedené na konci práce, a to v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským.

V Praze dne: .....

.....  
Alena Chernetskaya

## Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Burešovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych ráda poděkovala svým rodičům za podporu při studiu.

.....

Alena Chernetskaya

Název práce: Použití ad-hoc vozidlových sítí (VANET) v prostředí kooperativních systémů

*Autor:* Alena Chernetskaya

*Obor:* Inteligentní dopravní systémy

*Druh práce:* Bakalářská práce

*Vedoucí práce:* Ing. Petr Bureš, Ph.D.

Ústav dopravní telematiky, Fakulta dopravní, České vysoké učení technické v Praze

*Konzultant:* —

*Abstrakt:* Tato bakalářská práce se zabývá studováním problematiky sítí VANET (Dopravní Ad Hoc sítě), teoretickým popisem architektury a definicí konkrétních vlastností této sítě. Následně práce pojednává o analýze jednotlivých směrovacích protokolů a hlavních problémech v VANET sítích.

Dalším z cílů bylo seznámit se se simulátory a vytvořit simulační model v konkrétním prostředí. Hlavním výstupem praktické části práce je porovnání dvou simulací s různými vstupními intenzitami z pohledu počtu ztracených paketů dat a dob zpoždění.

*Klíčová slova:* Ad Hoc, VANET, simulace, vozidla, infrastruktura, SUMO, MOVE

Title: Use of Vehicular Ad hoc Network (VANET) in C-ITS Environment

*Author:* Alena Chernetskaya

*Abstract:* This bachelor thesis is analysis of networks VANET (Transport Ad Hoc network), a theoretical description of the architecture and the definition of specific properties of this network. Subsequently, the work discusses the analysis of individual routing protocols and the main problems in VANET networks.

Another goal was to get acquainted with the simulators and create a simulation model in a specific environment. The main outcome of the practical part of the thesis is to

compare two simulations with different input intensities from the point of view of the number of lost packets of data and time delay.

*Key words:* Ad Hoc, VANET, simulation, vehicles, infrastructure, SUMO, MOVE

# Obsah

Obsah .....	8
Úvod.....	10
1 Stávající síť VANET .....	12
1.1 Druhy konceptů v síti VANET .....	12
1.2 Klasická architektura VANET .....	13
1.3 Směrovací protokoly VANET .....	15
1.3.1 Proaktivní .....	15
1.3.2 Reaktivní .....	16
1.3.3 Hybridní .....	17
1.3.4 Protokoly na základě geolokace .....	18
1.4 Nevýhody sítě VANET .....	19
2 Problém zabezpečení přenášených dat .....	20
2.1 Příčiny problémů .....	20
2.1.1 Ohrožení dostupnosti (Threats to Availability) .....	21
2.1.2 Ověření pravosti (Threats to Authentication) .....	22
2.2 Zhodnocení problémů .....	23
3 Praktická část .....	24
3.1 Simulace sítě vozidel VANET .....	24
3.2 Požadavky na simulátor .....	24
3.3 Rozdělení simulátorů .....	25
3.3.1 Generátory pohybu automobilů .....	25
3.3.2 Porovnání simulátorů pohybu vozidel.....	29
3.3.3 Síťové simulátory.....	31
3.3.4 VANET simulátory.....	32
3.4 Provedení simulace.....	33



3.4.1	TraNS.....	33
3.4.2	SUMO + MOVE.....	34
3.4.3	Nastavení simulace .....	41
	Závěr .....	44
	Bibliografie.....	46
	Seznam zkratk.....	48

# Úvod

Digitální technologie se rychle rozvíjejí v posledních desetiletích a jsou stále více zaváděny v dopravě. Inteligentní Dopravní Systémy (ITS) jsou zaměřené na digitální technologie, které poskytují inteligentní systémy umístěné na silnici nebo ve vozidlech, C-ITS se zaměřuje na komunikaci mezi těmito systémy – buď to vozidlo komunikující s jiným vozidlem, s infrastrukturou, nebo s jinými C-ITS systémy.

Nově vyrobená vozidla generují během jízdy značné množství dat. Základní myšlenkou spolupracujících inteligentních dopravních systémů (C-ITS) je tato data využít a předávat si tak zprávy týkající se aktuální dopravní situace buď to mezi vozidly navzájem (tzv. V2V komunikace), anebo mezi vozidly a příslušným zařízením umístěným na silniční nebo železniční síti (tzv. V2I komunikace), tedy navzájem kooperovat. Tato kooperace je nejrychlejším způsobem, jak vyjádřit řidiči informace rychle, spolehlivě a srozumitelně před i během jízdy.

Kooperativní systémy ITS poskytují řidičům informace o aktuální situaci v silničním provozu, přispívají k dopravní předvídatelnosti řidičů a v důsledku toho ke snížení nehodovosti. Včasné získání informací o situaci na silnici je naprosto základní k tomu, aby řidič pohotově vnímal situaci v provozu a soustředil se na možný problém. Obrovským přínosem systémů C-ITS je varování řidičů při jízdě za snížené viditelnosti (mlha, sněžení, hustý déšť apod.) jako např. o koloně před řidičem nebo o dopravní nehodě či o pomalu jedoucím vozidle údržby se světelným vozíkem (pojízdná uzavírková tabule).

Dáme-li řidiči cílené, včasné a kvalitní informace o dění kolem něj a poskytneme-li zároveň správci komunikace aktuální informace o provozu, zabráníme v konečném efektu mnoha dopravním nehodám, ušetří se lidské životy a ekonomičnost jízdy se projeví snížením emisí z dopravy. Doprava bude bezpečnější, plynulejší a efektivnější. V dlouhodobém horizontu navíc na těchto systémech budou stavět technologie automatizovaného řízení vozidel.

Tato práce je rozdělena do tří kapitol, v nichž je popsána problematika sítí VANET, její koncepty, hlavní problémy existující v této síti a následně její simulace.

První kapitola je věnována architektuře sítě VANET, jejím směrovacím protokolům a vyjmenování jednotlivých nevýhod. Následně je směřováno k problému bezpečnosti v souvislosti se specifickými vlastnostmi VANET.

Druhá kapitola je věnována problému zabezpečení dat, jako hlavnímu problému takové sítě. Jsou vyjmenovány hlavní příčiny těchto problémů a popsány výsledky dopadů útočníků na jednotlivé účastníky provozu.

Kapitola tři se zaměřuje na praktické uplatňování sítí VANET v simulovaném světě. Jsou zanalyzovány požadavky na simulátory takové sítě, charakterizovány různé druhy simulátorů, včetně výhod a nevýhod. V této sekci se pro simulace používá několik různých nástrojů a jsou popsány výsledky těchto simulací.

# 1 Stávající síť VANET

Růst měst způsobený urbanizací obyvatelstva vede k souběžnému rozšíření silniční sítě. Spolu se zvýšením cenové dostupnosti automobilů tento trend vede k problémům spojeným se zvýšením hustoty a intenzity dopravních toků. To zase vede ke snížení bezpečnosti silničního provozu a v důsledku toho ke zvýšení počtu dopravních nehod. Při analýze příčin těchto trendů není obtížné pochopit, že nouzové situace nastávají z důvodu nemožnosti informovat řidiče o nebezpečí předem. Současná úroveň vývoje bezdrátových technologií přenosu dat umožňuje používat informační služby téměř odkudkoli pomocí mobilních zařízení. Jednou z možností implementace těchto technologií bylo zavedení kontroly a řízení silniční dopravy a vytvoření VANET.

VANET (Vehicular Ad-Hoc network) je síť, kde každý uzel představuje vozidlo, které je vybavené bezdrátovou technologií. Představují podmnožinu MANET (Mobile Ad-Hoc network), která poskytuje vynikající přístup k ITS.

Dnes většina pozemních mobilních bezdrátových komunikačních sítí má pevnou infrastrukturu a jsou propojeny mezi sebou pomocí různých, obvykle drátových nebo rádiově přenosových datových kanálů.

V poslední době je zvláštní pozornost věnována vývoji dynamických rádiových sítí, které nemají pevnou infrastrukturu, nazývaných (Ad Hoc).

Oblast použití těchto sítí je poměrně široká. Například síť MANET (Mobile Ad-Hoc network) jsou užitečné při záchranných operacích, na přeplněných místech (například slouží účastníkům konferencí) a tam, kde neexistuje pevná telekomunikační infrastruktura (např. v expedicích do regionů vzdálených od "civilizace").

Na rozdíl od sítí s hierarchickou strukturou a centrálně řízených sítí, peer-to-peer (P2P) síť bez infrastruktury se skládají ze stejného typu uzlů, kde každý uzel obsahuje sadu softwarových a hardwarových nástrojů, které umožňují organizovat přímý přenos dat ze zdroje na příjemce, pokud tato cesta fyzicky existuje. Tím se distribuuje zatížení sítě a zvyšuje se celková šířka pásma sítě. K přenosu dat od jednoho účastníka ke druhému může dojít, i když jsou tyto uzly mimo zorné pole.

## 1.1 Druhy konceptů v síti VANET

Úkol dopravních sítí VANET je vytvoření síťového rozhraní ve vozidle, které by umožnilo podporovat tři typy vazeb: vozidlo — vozidlo (V2V), vozidlo — infrastruktura sítě (V2I a I2V) a

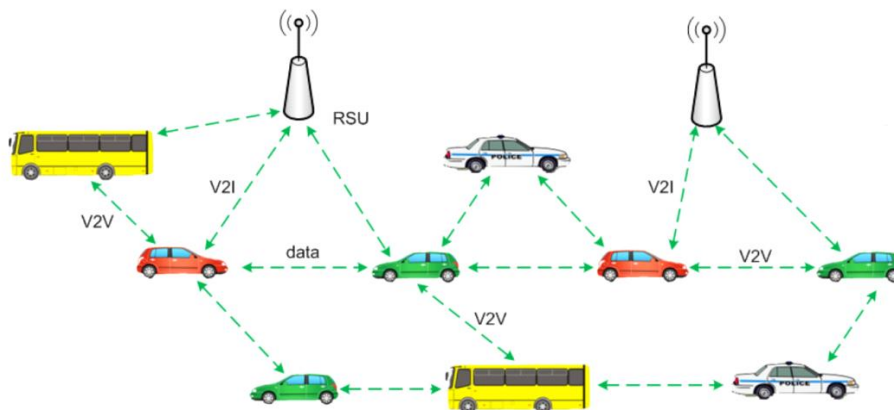
infrastruktura sítě — infrastruktura sítě (I2I). Následující informace o konceptech je převzata ze zdroje [1].

- Koncept V2V – komunikace typu V2V slouží k předávání informací přímo mezi jednotlivými vozidly. Každé vozidlo je zároveň vysílač i přijímač a kdykoliv, když přijme relevantní zprávu ji ihned rozešle všem vozidlům v dosahu. K hlavním aplikacím V2V kooperativních systémů patří upozornění na dopravní zácpy, na pomalu jedoucí vozidla (např. vozidla údržby) nebo stojící vozidla (např. vozidla stojící kvůli zácpě nebo kvůli technické závadě) a dále upozornění na přibližující se vozidla IZS (integrováný záchranný systém) jedoucí k zásahu.
- Koncept V2I a I2V – komunikace typu V2I a I2V nalézá uplatnění zejména při varování před nebezpečím, upozornění na dočasnou práci na silnici nebo informování o nepříznivých meteorologických podmínkách, například o námraze na vozovce. Také lze tento typ komunikace využít k předání informací do palubní jednotky vozidla o aktuálním zobrazení významu výstražných nebo zákazových (proměnných) dopravních značek, světelných signálů apod.
- Koncept I2I – komunikace typu I2I je využitelná zejména k předávání výše uvedených informací mezi jednotlivými komunikačními uzly a jejich následnému předání do vozidel pomocí systémů I2V.

## 1.2 Klasická architektura VANET

VANET (Vehicular Ad hoc Network) - bezdrátová decentralizovaná samoorganizující síť sestávající se z mobilních zařízení. Každé takové zařízení se může nezávisle pohybovat libovolným směrem a v důsledku toho často přerůstají a vytvářejí spojení se sousedy. Architektura sítě VANET předpokládá interakce vozu s ostatními auty a také se silniční sítí.

Na obrázku 1 je zobrazena tradiční architektura VANET sítě.



Obr. 1 Tradiční architektura VANET, zdroj: [2]

Hartenstein aj. (2010) [2] popisuje VANET jako typ ad-hoc sítě, která využívá ke komunikaci standard WAVE. V síti VANET vystupují pohybující se vozidla vybavená jednotkami OBU (*On-Board Unit*) jako pohyblivé síťové uzly a jednotky RSU (*Roadside Unit*) jako fixní body sítě. Tyto sítě jsou označeny jako Ad-Hoc, protože díky pohybu vozidel, tedy pohybu jednotek OBU, se jejich struktura neustále a velmi výrazně mění. S tím přichází i požadavky na spolehlivou funkčnost sítě a malé zpoždění i v prostředí s velkým množstvím měnících se parametrů. To je zajištěno možností regulovat přenášený výkon a datovou rychlost.

Důležitou vlastností sítí VANET je maximální decentralizace, což znamená, že v síti neexistuje žádný dedikovaný server a celá infrastruktura je distribuována do komunikačních uzlů. Tato vlastnost způsobuje vznik velkého počtu významných nedostatků, které brání zavádění této technologie.

Ve VANET lze rozlišit dvě skupiny služeb: služby bezpečnostní a služby v pohodlí.

V oblasti bezpečnosti lze rozlišovat tyto tři skupiny služeb:

- pomoc řidiči (navigace, objížďení hromadných nehod, změna silničního značení);
- informační podpora pro řidiče (rychlostní limit, informace o silničních pracích);
- varovné hlášení (nouzové situace, překážky nebo události, nepříznivé dopravní podmínky).

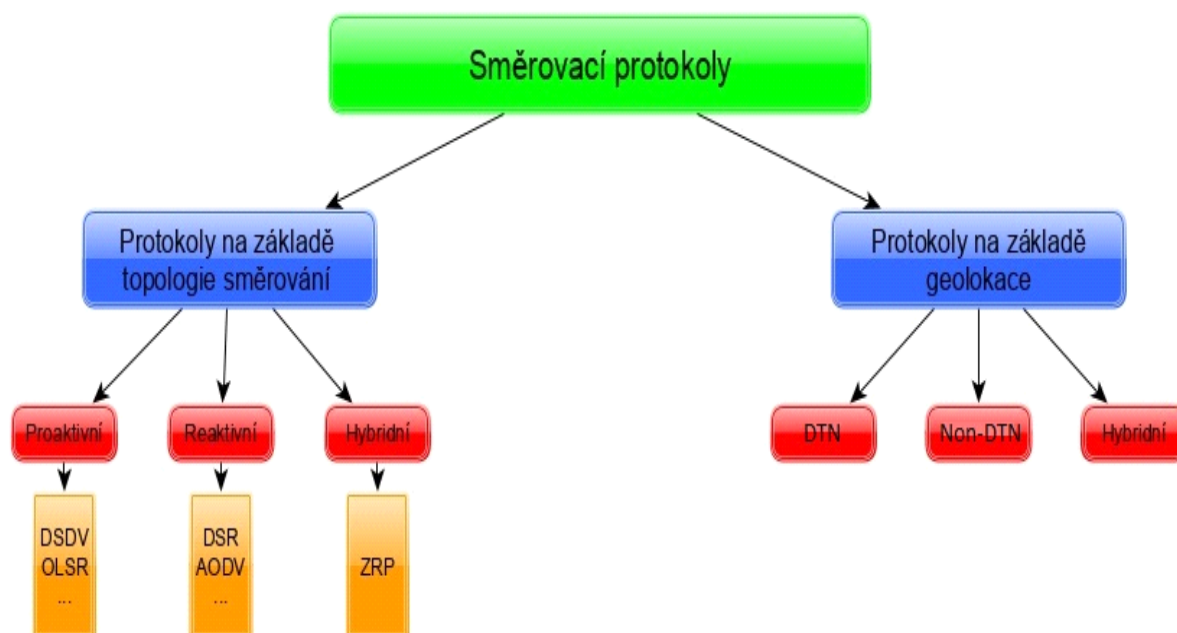
V oblasti, která ovlivňuje zvýšení komfortu, lze identifikovat následující služby:

- vytvoření skupin podle plánovaného směru v místních dopravních zácpách
- získávání informací o aktuálním stavu dopravy na silnicích
- získávání informací o počasí

## 1.3 Směrovací protokoly VANET

Charakteristika dynamické topologie činí navrhování účinných směrovacích protokolů pro VANET náročným úkolem. Existující směrovací protokoly VANET lze rozdělit na dvě kategorie: na základě topologie směrování a na základě geolokace.

Klasifikace směrovacích protokolů VANET je znázorněna na obrázku 2:



Obr. 2 Klasifikace směrovacích protokolů VANET, zdroj: [5]

### 1.3.1 Proaktivní

Proaktivní nebo tabulkové (angl. proactive, table-driven) protokoly pravidelně posílají po síti servisní zprávy s informacemi o všech změnách v topologii. V důsledku toho každý uzel sítě na základě této informace staví cesty do všech uzlů a ukládá je do směrovací tabulky, odkud pak budou načteny v případě potřeby přenosu zprávy jednotlivému příjemci.

#### **DSDV (Destination sequenced distance vector protocol)**

Jedná se o protokol představující kategorii tabulkových protokolů závislých na topologiích.

Používá Bellman-Ford algoritmus (nalezení nejkratší trasy), který je účinný při určování trasy a zabraňuje problémům se smyčkami ve směru.

Princip provozu: každý z uzlů má směrovací tabulku, která obsahuje pořadové číslo, vygenerované v závislosti na vzdálenosti. Uzel přijme nové informace, poté prohledá

směrovací tabulku a použije poslední číslo v tabulce pro předávání dál. V případě, že toto číslo se shoduje s existujícím číslem v tabulce směrování, používá cestu s lepší metrikou (metrika bere v úvahu šířku pásma komunikačních kanálů).

Použití DSDV je vhodné při vytváření malých ad-hoc sítí.

### **OLSR (Optimized Link State Routing)**

Optimalizovaný směrovací protokol stavu linky (OLSR) je vyvinut pro mobilní ad-hoc sítě. Funguje jako proaktivní protokol řízený tabulkou, tj. pravidelně si vyměňuje topologické informace s jinými uzly sítě.

OLSR je vyvinut tak, aby pracoval nezávisle na jiných protokolech a také nedělá žádné předpoklady o základní vrstvě propojení.

Jako hlavní nevýhody protokolu OLSR Clausen aj. (2003) [5] zmiňuje vysoké nároky na výpočetní výkon procesorů a také velkou část šířky pásma. Naopak výhodou je, že v případě broadcastového směrování je snížené množství paketů, které musí být znovu předány.

### **1.3.2 Reaktivní**

Reaktivní nebo protokoly na vyžádání jsou vyvinuty tak, že uzly neukládají potřebné informace o trase po celou dobu. Uzel iniciuje vytvoření trasy na vyžádání v okamžiku přijetí požadavku na přenos dat. Tento mechanismus budování trasy je založen na principu záplavového algoritmu: uzel jenom předá první balíček všem svým sousedům, a mezilehlé uzly ho přesměrují dále svým sousedům. Tyto opakující se akce umožňují doručit balíček do cíle. Zpravidla při průchodu paketu se cesta uloží (např. v podobě seznamu zúčastněných uzlů) a následně při předávání dalších paketů se tato informace používá pro výběr destinace.

### **DSR**

DSR (Dynamic Source Routing) reprezentuje kategorii protokolů na vyžádání. Narozdíl od DSDV využívá zdrojové směrování, místo hop-by-hop směrování paketů.

Jako hlavní nevýhodu takového protokolu Naaz (2014) [6] zmiňuje zpoždění nastavení připojení, které je vyšší než v protokolech řízených tabulkou a také to, že výkon protokolu klesá s rostoucí dynamikou VANET.

Naopak výhodou DSR je používání reaktivního přístupu, který eliminuje potřebu pravidelně zatěžovat síť aktualizacími zprávami tabulky, které jsou požadovány v tabulkovém přístupu.



## **AODV**

AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) stejně jako DSR je protokolem na vyžádání. Jako výhody tohoto protokolu Naaz (2014) [6] zmiňuje kratší zpoždění nastavení připojení. Protokol funguje takovým způsobem, že trasy jsou stanoveny na vyžádání a pořadová čísla cílů se používají k nalezení nejnovější trasy k cíli, ale tato vlastnost zároveň působí nevýhodu: mezilehlé uzly mohou vést k nekonzistentním trasám, pokud je zdrojové pořadové číslo velmi staré a mezilehlé uzly mají vyšší, ale ne nejnovější cílové pořadové číslo, takže mají zastaralé záznamy.

### **1.3.3 Hybridní**

Hybridní protokoly jsou kombinací reaktivních a proaktivních přístupů. Využívají výhody těchto dvou protokolů a v důsledku toho fungují poměrně efektivně v jednotlivých případech. Zpravidla oni rozdělí síť do mnoha podsítí, uvnitř kterých funguje proaktivní protokol a interakce mezi nimi probíhá reaktivními metodami. Ve velkých sítích to umožňuje snížit velikost směrovacích tabulek, protože je třeba znát přesné trasy pouze pro uzly v podsíti, ke které patří.

## **ZRP**

ZRP (Zone Routing Protocol) je hybridní směrovací protokol bezdrátové sítě, který při odesílání informací v síti používá proaktivní i reaktivní směrovací protokoly. ZRP byl navržen tak, aby zrychlil dodávku a snížil režijní náklady výběrem nejúčinnějšího typu protokolu, který se použije po celé trase. [7]

Pokud je cíl paketu ve stejné zóně jako původ, pro okamžité doručení paketu se použije proaktivní protokol používající již uloženou směrovací tabulku.

Pokud se trasa rozšíří mimo původní zónu paketu, převezme reaktivní protokol ke kontrole každé následující zóny na trase, aby zjistil, zda je cíl uvnitř této zóny. To snižuje režijní náklady na tyto trasy. Jakmile je potvrzeno, že zóna obsahuje cílový uzel, použije se pro doručování paketu proaktivní protokol nebo uložená tabulka se seznamem tras.

Tímto způsobem jsou pakety s cíli ve stejné zóně jako původní zóna doručeny okamžitě pomocí uložené směrovací tabulky. Pakety doručené do uzlů mimo odesílací zónu se vyhýbají režii kontroly směrovacích tabulek po cestě a jsou doručeny pomocí reaktivního protokolu.

### 1.3.4 Protokoly na základě geolokace

Protokol na základě geolokace se spoléhá hlavně na informace o polohových datech, které poskytují přijímače GPS (jeden na uzel). Tyto protokoly lze dále rozdělit na protokoly geocastů a protokoly založené na poloze.

Protokoly geocastů (např. GAMER, LBM) adresují všechny uzly patřící do oblasti. Naopak protokoly založené na poloze (např. LAR, DREAM, GPSR) adresují jeden uzel.

Moustafa aj. (2009) [3] popisuje geocast přístup jako přístup, při kterém protokol LBM zabraňuje zaplavení celé sítě definováním oblasti předávání, která zahrnuje alespoň cílovou oblast a cestu mezi odesílatelem a cílovou oblastí. Protokol GAMER dynamicky přizpůsobuje velikost oblasti předávání podle aktuálního síťového prostředí.

V případě přístupu, založeného na poloze, je poloha cíle známá buď ze služby správy polohy, nebo zaplavením v očekávané oblasti cíle.

Je třeba poznamenat, že obrovskou nevýhodou protokolů na základě geolokace je to, že čím více se zvyšuje dynamika, tím nestabilnější jsou pozice uzlů. V důsledku toho již nebude po přijetí zprávy platit pozice příjemce. Nepřesnost pozice obecně vede k omezení výkonu.

V zájmu mobility je možné zvětšit geografickou oblast určující cíl, ale také to zvyšuje počet zapojených uzlů a vede k plýtvání šířkou pásma.

#### DTN

Fall (2003) [8] popisuje DTN (Delay Tolerant Network) jako přístup k architektuře počítačové sítě, který se snaží řešit technické problémy v heterogenních sítích, kterým může chybět nepřetržitě síťové připojení. Příkladem takových sítí jsou sítě pracující v mobilních nebo extrémních pozemních prostředích nebo plánované sítě ve vesmíru.

Hlavní myšlenka koncepce DTN spočívá v tom, že pokud se mezi částmi sítě pohybuje dostatečný počet vozidel, pak mohou být doručovány pakety, i když je síť odpojena. Protokoly DTN využívají takový mechanismus přenosu a předávání paketů, avšak za cenu zvýšeného směrovacího zpoždění.

#### Non-DTN

Karimi aj., (2011) [9] popisuje základní princip Non-DTN tak, že uzel předá svůj paket takovému sousedovi, který je nejbližší k cíli. Strategie předávání může selhat, pokud žádný soused není blíže k cíli než samotný uzel. V tomto případě se říká, že paket dosáhl lokálního maxima v uzlu, protože dosáhl maximálního lokálního pokroku v aktuálním uzlu. Protokoly pro

směrování v této kategorii mají svou vlastní strategii obnovy, která se s takovým selháním vypořádá.

## 1.4 Nevýhody sítí VANET

Mezi hlavními nevýhodami sítě patří:

- Samoorganizace, tj. neexistence centrální entity, organizující participující uzly. Uzly se tak musí organizovat samostatně.
- Nezbytnost mechanismů pro dynamickou identifikaci a správu směrovacích cest, tj. omezenému dosahu bezdrátové komunikace. Data tak musí být doručována po cestách zahrnujících více uzlů.
- Mobilita uzlů, tj. síťové uzly se mohou pohybovat. Kvalitu sítě tak lze hodnotit podle rychlosti adaptace na změny v topologii.
- Pro dopravní sítě VANET je typické velké množství rušení různých druhů. Zajistit maximální snížení vlivu rušení lze pomocí výběru optimální frekvence nebo pomocí regulace kapacity přijímače a vysílače zařízení v síti, nicméně v klasických VANET sítích tento problém zůstává nevyřešen a má významný vliv na provoz sítě.
- Hlavním problémem mnoha výzkumníků VANET je zabezpečení sítě.

Zabezpečení dat ve světě počítačů je dobře prozkoumáno, i když stále dochází k ničivým útokům ve velkém měřítku. Zabezpečení ve vozidlových sítích představuje různé bezpečnostní hrozby a také má odlišné požadavky.

V dnešní době není pevně stanoveno, jakou metodou by se ve VANET sítích mohlo provádět směrování a který protokol a technologie přenosu by byly neoptimálnější při využití v praxi. Při technologii přenosu se vývojáři přiklánějí k technologiím s různými alternativami standardu 802.11, které v dnešní době fungují a není proto nutné vyvíjet novou technologii, která by byla kompatibilní s ostatními účastníky. Tento fakt však značně omezuje možnosti, které by mohla síťová infrastruktura VANET dosáhnout, zároveň však rozšiřuje množství potencionálních účastníků v síti.

Nejvýznamnější problematikou je však zabezpečení VANET sítí. Vzhledem k tomu, že technologie přenosu není standardizována, nejsou vyřešeny otázky kompatibility a bezpečnostních aktualizací, tím pádem se dá říci, že se jedná o nejzranitelnější typ sítě. Tento fakt je však přesným opakem žádané úrovně zabezpečení, neboť útoky a chyby v ní by mohly mít velmi vážné následky, tím pádem je nutno se zaměřit na problém zabezpečení podrobněji.

## 2 Problém zabezpečení přenášených dat

Přestože automobilové ad hoc sítě přinášejí společnosti obrovské výhody, přesto vyvolávají mnoho výzev, kde jsou nejkritičtější obavy o bezpečnost a soukromí.

Bezpečnost je důležitým faktorem pro všechny sítě. Mobilita uzlu v síti VANET je vyšší než v MANET, což představuje velký problém v zabezpečení. V takové síti může vést k útoku nepředvídatelný pohyb uzlů a vysoká mobilita útočníka. Bezpečnostní aspekt je proto v takových sítích velmi důležitý.

### 2.1 Příčiny problémů

Příčiny problémů souvisejících s informační bezpečností dopravních sítí VANET jsou:

- nedostatek prostředků na ochranu uzlů před útočníkem;
- schopnost poslouchat kanály a spoofing zpráv z důvodu sdílené dostupnosti přenosového prostředí;
- nutnost použití složitých algoritmů pro směrování z důvodu velké pravděpodobnosti nepřesné informace o poloze od ohrožených uzlů v důsledku změny topologie sítě;
- jakýkoli uzel v rozsahu zdroje signálu, který zná přenosovou frekvenci a další fyzikální parametry (modulace, kódovací algoritmus) může potenciálně zachytit a zveřejnit signál. Současně ani zdroj signálu ani příjemce o tom nebudou vědět;
- neschopnost realizace bezpečnostní politiky kvůli zvláštnostem klasické architektury sítí VANET, jako je nedostatek pevné topologie a centrálních uzlů;

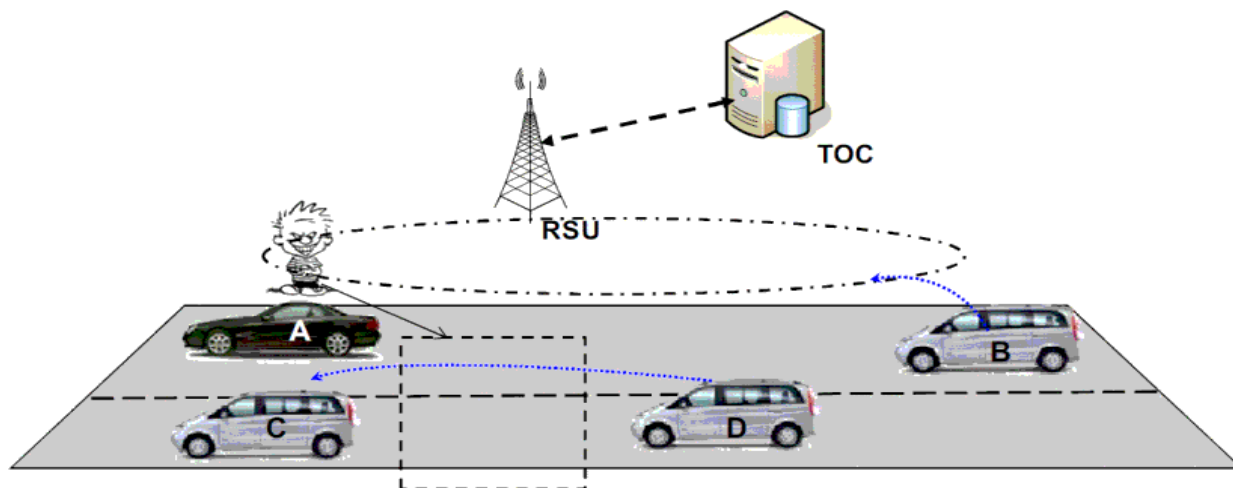
Lze tedy poznamenat že samoorganizující sítě VANET jsou zranitelné vůči klasickým typům útoků spojených s většinou bezdrátových sítí (např. útoky typu odmítnutí služby, odposlouchávání, analýza provozu apod.) a mají své vlastní výrazné nedostatky. Protože bezdrátové samoorganizující sítě nemají pevnou topologii, centrální uzly, širokopásmové kanály, stabilní zdroj energie a nepřetržitou komunikaci uzlů, provedení úspěšného útoku útočníkem se stává snadno proveditelným.

Útoky ve VANET lze rozdělit do dvou hlavních skupin [4]: ty, které ohrožují dostupnost, a ty, které ověřují pravost.

## 2.1.1 Ohrožení dostupnosti (Threats to Availability)

### DOS Attack (Odmítnutí služby)

V DOSu je hlavním cílem zabránit oprávněnému uživateli v přístupu k síťovým službám a k síťovým zdrojům. K útoku DOSu může dojít rušením kanálu systému, takže k němu nemá přístup žádné oprávněné vozidlo. Ve VANET je to nejzávažnější problém, protože uživatel nemůže komunikovat v síti a předávat informace jinému vozidlu.



Obr. 3 DOS Attack, zdroj: [4]

### DDOS Attack (Distribované odmítnutí služby)

Útoky DDOS jsou ve vozidlovém prostředí závažnější, protože mechanismus útoku je distribuovaný. V tomto případě útočníci zahájí útoky z různých míst a mohou použít jiný časový úsek pro odeslání zprávy. Povaha zpráv a časový úsek se tedy může měnit. Hlavním cílem je odpojit síť, takže síť nebude k dispozici pro použití. Existují dvě možnosti útoků DDOS: vozidlo na vozidlo anebo vozidlo na infrastrukturu (RSU).

### Spamování

Pro spotřebu šířky pásma sítě a zvýšení přenosové latence útočník v síti používá spamové zprávy. Je obtížné tento druh útoku kontrolovat z důvodu nedostatku nezbytné infrastruktury a centralizované správy.

### Černá díra

V případě tohoto útoku uzel odmítá účast v síti nebo když zavedený uzel vypadne, vytvoří se černá díra. Tím se veškerý provoz sítě přesměruje na konkrétní uzel, který ve skutečnosti neexistuje, což má za následek ztrátu dat.

## Malware

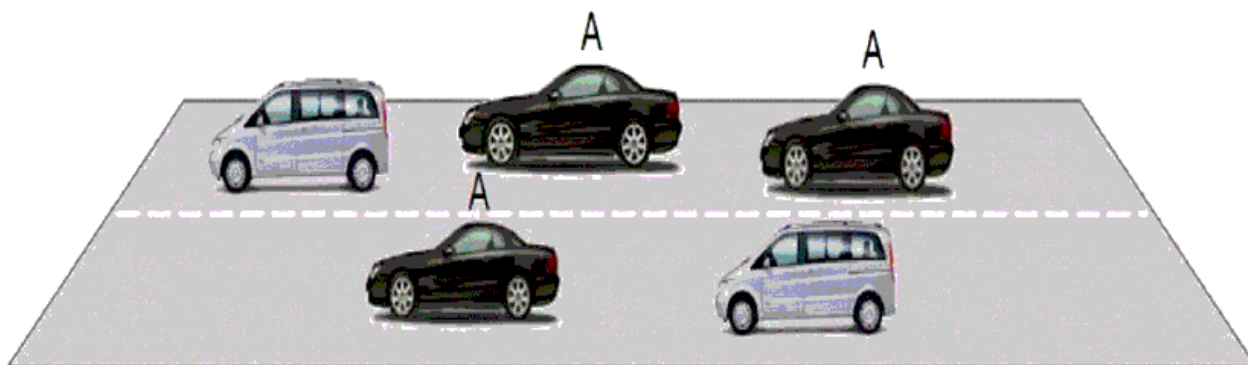
Škodlivé útoky jsou stejné jako viry, které brání normálnímu provozu sítě. VANET je infikován těmito útoky obvykle, když se provádí aktualizace softwaru v jednotkách VANET nebo RSU.

### 2.1.2 Ověření pravosti (Threats to Authentication)

#### Sybil attack

Při tomto typu útoku útočník přenáší více zpráv s různými ID do ostatních vozidel. Tak, systém v jiných vozidlech rozpozná, že tyto zprávy přicházejí z různých vozidel a identifikují tuto situaci jako zácpu, tím pádem jsou nuceni se vydat alternativní cestou.

Obrázek vysvětluje útok Sybil, při kterém útočník vytváří více vozidel na silnici se stejnou identitou. Cílem je, aby ostatní vozidla opustila silnici ve prospěch útočníka.

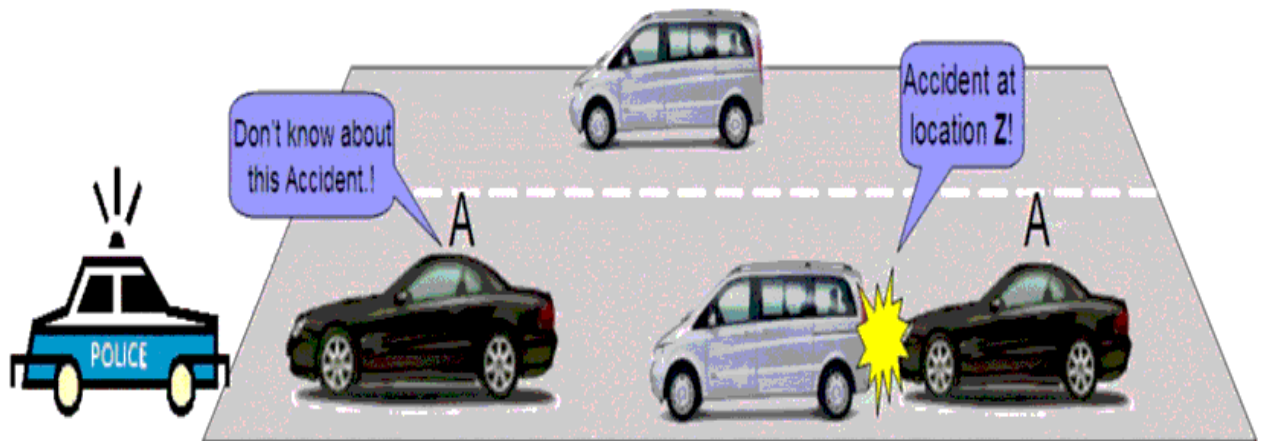


Obr. 4 Sybil attack, zdroj: [4]

#### Útok napodobováním uzlů (Node Impersonation attack)

Ve VANET síti má každé vozidlo jedinečné ID a pomocí těchto ID je každé vozidlo identifikováno v síti VANET. Nejdůležitější je, když dojde k nehodě.

Při útoku na odcizení identity může útočník změnit svou identitu a chovat se jako skutečný původce zprávy. Útočník obdrží zprávu od původce zprávy a změní její obsah pro vlastní prospěch. Poté útočník pošle tuto zprávu ostatním vozidlům.



Obr. 5 Node Impersonation attack, zdroj: [4]

### Tunelování

Útočník spojí dvě vzdálené části sítě Ad hoc pomocí zvláštního komunikačního kanálu jako tunelu. Výsledkem je, že dva vzdálené uzly předpokládají, že jsou sousedy a odesílají data pomocí tunelu. Útočník má možnost provést analýzu provozu nebo přesměrování útoku.

### Černá díra

V tomto problému uzel odmítá účast v síti nebo vypadne ze sítě a vytvoří „černou díru“. V tomto případě útok spočívá v tom, že provoz sítě se přesměruje na konkrétní uzel, který ve skutečnosti neexistuje, což má za následek ztrátu dat.

## 2.2 Zhodnocení problémů

Z uvedených informací lze učinit závěr, že bezpečnost je hlavní pozornosti účastníků silničního provozu. VANET má schopnost poskytovat bezpečnostní požadavky přes informací o silnicích, ale VANET však není imunní vůči jakýmkoli zranitelnostem a hrozbám. Z tohoto důvodu musí být zavedena bezpečná řešení, aby se zvýšila bezpečnost přenášených informací. Proto je důležité udržovat dostupnost sítě a rozvíjet důvěru k informacím ve VANET.

## 3 Praktická část

Vozidla v síti VANET tvoří mobilní uzly. Vzhledem k nepřiměřeným nákladům na zavedení a implementaci takového systému v reálném světě většina výzkumů v takové síti spoléhá na simulace pro vyhodnocení. Klíčovou součástí simulací VANET je realistický model mobility vozidel, který zajišťuje, že závěry ze simulačních experimentů přinesou skutečná nasazení.

Tato část práce je věnována problematice simulátorů v sítích VANET. Jsou zmíněny požadavky na tyto specifické simulátory, jejich rozdělení a porovnání z různých pohledů. Následně je uveden postup k provedení simulace pomocí konkrétního nástroje a jsou uvedeny výsledky provedených experimentů v souvislosti s cílem praktické části.

### 3.1 Simulace sítí vozidel VANET

Kromě toho, že v simulaci VANET se často používají velké a nestabilní scénáře, ve srovnání s MANET sítí při modelování VANET je třeba vzít v úvahu některé specifické vlastnosti, vyskytující se v automobilovém prostředí. Model mobility v takové síti může výrazně ovlivnit výsledky simulace, proto je důležité, aby tento model byl co nejbliž k realitě.

Ještě jedním důležitým aspektem ve VANET je to, že uzly se pohybují nezávisle na sobě, a rychlost těchto uzlů se liší: pohybuje se od 0 do 40 metrů za sekundu. Tyto fakty však přinášejí závěr, že na simulátor sítě VANET musí existovat specifické požadavky.

### 3.2 Požadavky na simulátor

Simulátor VANET sítí musí splňovat všechny následující požadavky:

- musí být simulován realistický pohyb vozidel;
- musí existovat možnost nastavit vlastní městskou mapu (buď ze souboru, nebo vytvořit ručně);
- musí být vizualizace pohybu aut po celou simulaci;
- musí existovat možnost přidání základnových stanic a silničních síťových uzlů;
- musí být zobrazen poloměr přenosu dat u aut, základních stanic, silničních uzlů;
- musí existovat možnost změny rychlosti přenosu dat u aut;
- musí být zobrazena rychlost přenosu paketů dat a procento dodaných balíčků;
- musí existovat možnost nastavení bezpečnostní politiky účastníků silničního provozu (souběžný přístup, kterým se stanovuje priorita);
- pohyb aut a rychlost přenosu dat musí být vzájemně propojené



## 3.3 Rozdělení simulátorů

Tato část se zabývá veřejnými VANET simulátory, které jsou v současné době používány, a jejichž zdrojový kód je veřejně dostupný.

Dotčený software byl rozdělen do 3 kategorií:

- generátory pohybu automobilů;
- síťové simulátory;
- VANET simulátory.

### 3.3.1 Generátory pohybu automobilů

Generátory pohybu automobilů jsou nezbytné pro zvýšení úrovně realismu v simulaci VANET sítí. Vytvářejí realistický pohyb automobilů, který lze použít při vstupu do síťového simulátoru.

Vstupními daty generátorů pohybu aut jsou model silnice, parametry skriptu (tj. maximální rychlost vozidel a směr jejich pohybu). Výstupními daty jsou informace o přesné poloze každého vozidla v každém okamžiku, a to po celou dobu simulace, a také profily mobility automobilů.

Jako software, generující pohyb automobilů byly zváženy 3 různé simulátory: VanetSim, SUMO a CityMob.

#### **VanetSim**

VanetSim je diskretní simulátor událostí a komunikace s otevřeným zdrojovým kódem, který se zaměřuje na analýzu bezpečnostních konceptů ve VANET. [13]

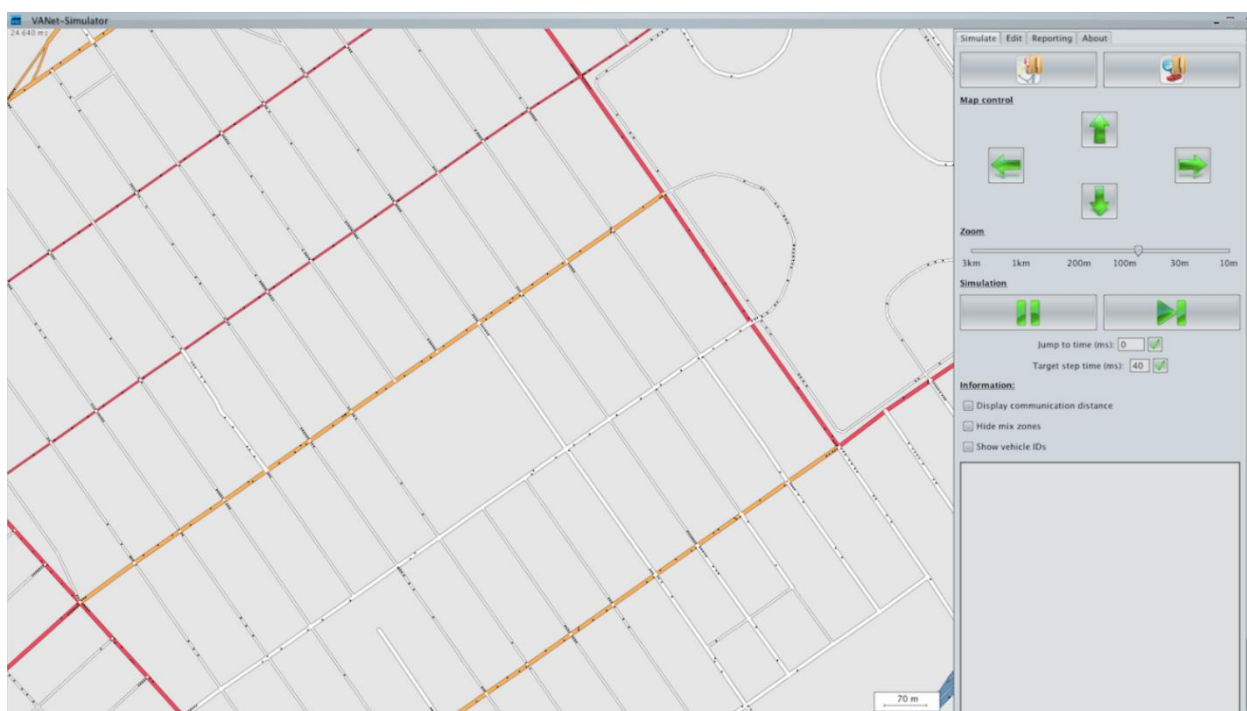
VanetSim obsahuje čtyři hlavní složky: GUI (grafické uživatelské prostředí), Scenario Creator (tvůrce scénáře), Simulation Core (simulační jádro) a Post Processing Engine (modul pro další zpracování).

*The GUI* poskytuje grafický editor map, který umožňuje vytvářet mapy. Mapy mohou být vytvořeny uživatelem anebo importovány z OpenStreetMap a uloženy v souborech XML, což usnadňuje interoperabilitu s jinými nástroji. GUI dále vizualizuje proces simulace na interaktivní mapě, která zobrazuje silnice i vozidla. Jako alternativu k režimu GUI lze simulaci provést na příkazovém řádku.

*Scenario Creator* nabízí možnost rychle připravit řadu experimentů, ve kterých jsou jednotlivé parametry měněny automaticky. Experimenty se ukládají do XML souborů.

*Simulation Core* provádí skutečnou simulaci. Je to přístup k mapě, včetně veškeré infrastruktury, vozidel a konceptů bezpečnosti a ochrany soukromí, které jsou důležité pro simulaci.

V poslední komponentu, *Post Processing Engine*, jsou logy vytvořené během simulace analyzovány a zpracovány za účelem vytvoření tabulek, grafů nebo vizualizace výsledků získaných během simulace přímo na interaktivní mapě *GUI*.



Obr. 6 snímek obrazovky v VanetSim, zdroj: [15]

## SUMO

SUMO je otevřený software se simulačními balíčky.

SUMO lze použít pro:

- Vytvoření sítě a přiřazení tras v rámci sítě
- Vyvinutí algoritmů pro semaforey
- Simulace a analýzu trafiku v rámci sítě

V SUMO lze silniční síť vytvořit třemi způsoby:

- Manuálně vytvořením vlastního režimu, hran, trasy, připojovacích souborů
- Použití příkazu "netgenerate"
- Import silniční sítě z externích zdrojů, jako jsou OSM, VISSIM atd.

Následující text je převzat ze zdroje [16].

Jako vstup v SUMO používáme síť a soubor trasy. Jako výstup můžeme mít:

- výpis polohy vozidla

Obsahuje: polohy a rychlosti pro všechna vozidla pro všechny simulované časové kroky. Používá se pro získání pohybů uzlů (V2V, pro ns-2)

- emisní výkon

Obsahuje: emisní hodnoty všech vozidel pro každý krok simulace (CO<sub>2</sub>, CO, Nox atd.)

- výstup VTK

Obsahuje: vygenerované soubory ve známém formátu VTK (Visualization Toolkit), aby bylo možné zobrazit polohu rychlosti pro každé vozidlo

- výstup FCD (Floating Car Data)

Obsahuje: název, polohu, rychlost a typ pro každé vozidlo v síti v každém časovém kroku. Výstup se chová poněkud jako vysoce přesné vysokofrekvenční GPS zařízení pro každé vozidlo.

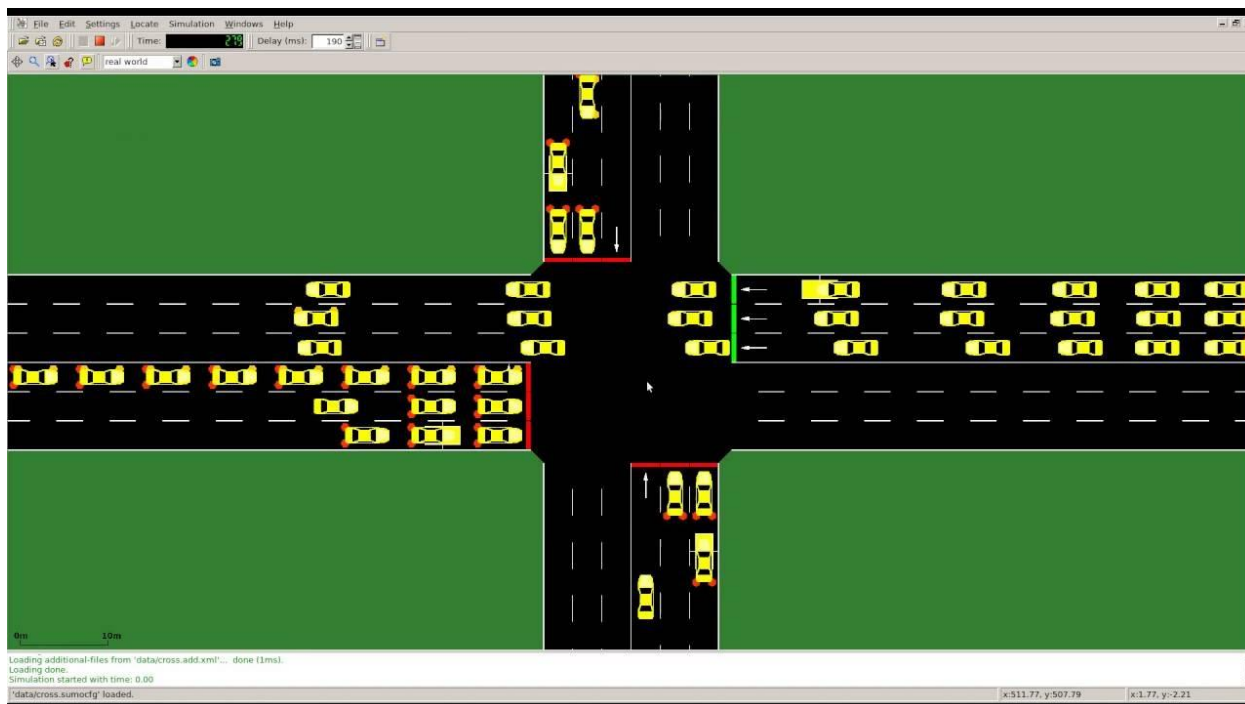
- výstup z jízdního pruhu

Obsahuje: změnu jízdního pruhu s přidruženou motivací pro změnu pro každé vozidlo

- náhradní bezpečnostní opatření

Obsahuje: výstup opatření souvisejících s bezpečností, rychlostí atd.

SUMO je schopen také vygenerovat tzv. plný výstup. Vypisuje všechny informace obsažené v síti, včetně emisí, polohy, rychlosti a jízdního pruhu pro každé auto. Splnění tohoto úkolu však vyžaduje spoustu času a velikost souboru je výrazně větší (obvykle několik GB).



Obr. 7 snímek obrazovky v SUMO, zdroj: [16]

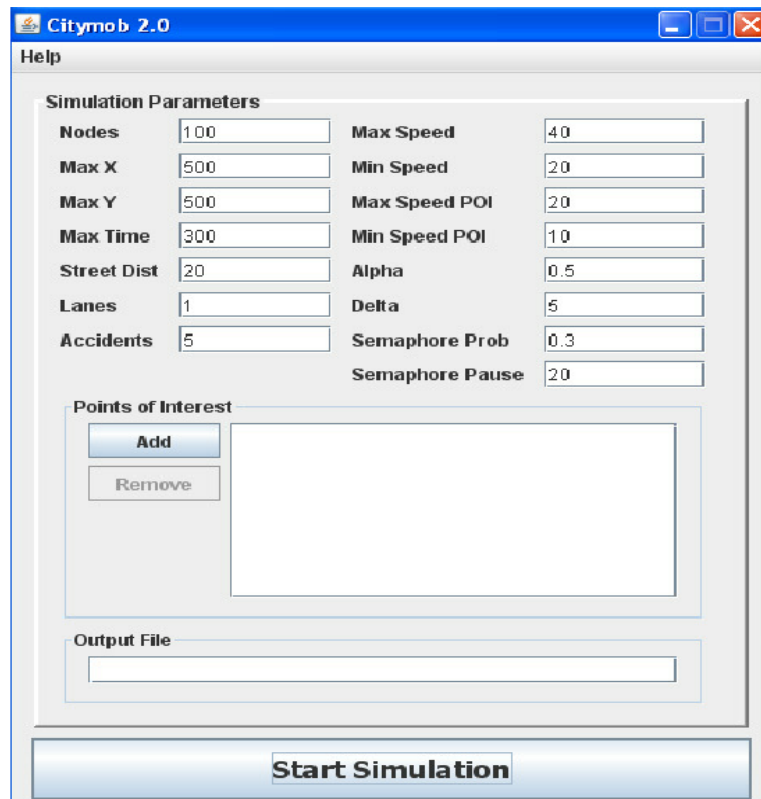
## CityMob

MARTINEZ aj. (2008) [14] popisuje CityMob jako generátor vzorů mobility, navržený pro zkoumání různých modelů mobility ve VANET a jejich dopad na kvalitu komunikace mezi vozidly pomocí NS-2. CityMob vytváří scénáře městské mobility a využívá síť k odesílání informací jiným vozidlům s cílem (v simulaci) předcházet nehodám a dopravním zácpám. CityMob dokáže generovat trasy pro scénáře VANET pomocí tří různých modelů mobility: Simple, Manhattan a Downtown.

Uživatel musí nastavit model mobility, celkový počet uzlů, čas simulace, velikost mapy, maximální rychlost vozidel, vzdálenost mezi po sobě jdoucími ulicemi a počet poškozených uzlů.

- Simple model (SM): Model, ve kterém vozidla jezdí beze změny směru. Semaforey nejsou podporovány.
- Manhattanský model (MM): Modelujeme město jako mřížku ve stylu manhattan, s jednotnou velikostí bloku napříč simulační oblastí. Všechny ulice jsou obousměrné a jednopruhové. Pohyby aut jsou těmito pruhy omezeny. Směr každého uzlu je v každém okamžiku náhodný. Navíc tento model simuluje různé stavy semaforů a s různým zpožděním. Když je na cestě semafor, vozidlo se zastaví, dokud se signál semaforu nezmění na zelenou.

- The Downtown Model (DM): Tento model přidá manhattanskému modelu hustotu provozu. Ve skutečném městě je provoz distribuován nerovnoměrně; existují zóny s vyšší hustotou vozidel. Tyto zóny jsou obvykle v centru města a vozidla se musí pohybovat pomaleji než na okraji města.



Obr. 8 snímek obrazovky v CityMob, zdroj: [17]

### 3.3.2 Porovnání simulátorů pohybu vozidel

Tato kapitola se věnuje srovnání vlastností různých druhů simulátorů s cílem objevit výhody a nevýhody každého z nich. Simulátory vozidlového pohybu jsou porovnány z pohledů softwaru jako takového, z pohledu možnosti použití různých typů map, a nakonec z pohledu specifičnosti nastavení silniční dopravy v konkrétním simulátoru. Následně jsou také porovnány síťové a VANET simulátory.

Tab. 1 Porovnání generátorů pohybu automobilů z pohledu softwaru, zdroj: autor

SOFTWARE	VanetSim	SUMO	CityMob
Free	+	+	+
Open Source	+	+	+
Konzole	+	+	—
Grafické rozhraní	+	+	+
Další vývoj	—	+	+

Z této tabulky lze učinit závěr, že software simulátoru SUMO má nejvíc výhod ve srovnání s ostatními uvedenými simulátory, protože se aktivně vyvíjí a na rozdíl od simulátoru CityMob má konzole.

Tab. 2 Porovnání generátorů pohybu automobilů z pohledu map, zdroj: autor

MAPY	VanetSim	SUMO	CityMob
Reálné	+	+	—
Definované uživatelem	+	+	—
Náhodné	+	+	+

Z tabulky č. 2 lze vidět, že simulátor SUMO stejně jako simulátor VanetSim podporuje nejrůznější typy map, což je velmi důležitým faktorem při vytváření simulace.

Tab. 3 Porovnání generátorů pohybu automobilů z pohledu silniční dopravy, zdroj: autor

SILNIČNÍ DOPRAVA	VanetSim	SUMO	CityMob
Vícepásmové silnice	+	+	+
Výběr směru jízdy	+	+	+
Omezení rychlosti	+	+	+
Dopravní značky	+	+	—
Semaforey	+	+	—
Podmínky pro předjíždění	+	—	—
Různé typy vozidel	—	+	+

Z tabulky č. 3 lze vidět, že CityMob je nejslabším simulátorem z pohledu nastavení silniční dopravy, neboť nepodporuje hodně důležitých funkcí. Simulátory VanetSim a SUMO mají svoje slabiny, ale většinu z funkcí podporují.

Po zvážení uvedených simulátorů vozidlového pohybu lze učinit závěr, že každý ze simulátorů má svoje výhody a nevýhody, a v závislosti na účelu simulace lze vybrat jeden nebo druhý software. V případě potřeby simulovat maximálně realistický a intuitivní pohyb aut je nejvýhodnějším řešením využít SUMO.

### 3.3.3 Síťové simulátory

Síťové simulátory se používají pro modelování telekomunikačních a výpočetních sítí. Daty síťových simulátorů jsou získané adresy odesílatele a příjemce, přenos a příjem datových paketů, informace o zatížení sítě a komunikačních kanálech. Většina stávajících síťových simulací je navržena pro MANET sítě, a proto vyžadují VANET rozšíření, předtím, než mohou být použity pro simulaci automobilových sítí, proto jsou použity v kombinaci s generátory pohybu vozidel.

Jako síťové simulátory byly zváženy 2 simulátory: NS-2 a NS-3.

#### NS-2

Bezdrátové simulace NS-2 jsou ty, které podporují pouze modely volného prostoru a dvou paprskových pozemních odrazů a nemůže simulovat útlum a stínové jevy [10]. NS-2 má také omezení, pokud jde o více než jedno bezdrátové rozhraní na uzel. Při simulaci bezdrátových sítí pomocí NS-2 musí být uzly naprogramovány tak, aby mezi sebou přenášely data. Neexistuje žádné vestavěné skenovací zařízení pro snímání dalších uzlů v okolí. Dalším omezením u NS-2 je to, že nemůže simulovat velkou mobilní síť.

Vývoj NS-2 se zastavil kolem roku 2010. Není již vyvíjen ani udržován.

#### NS-3

Následující text je převzat ze zdroje [18].

NS-3 je open-source síťový simulátor, který je postaven na podobném programovacím jazyce, jako kombinace C++ a Python. Jeho vývoj je zaměřen na zlepšení základní architektury NS-2. Práce v tomto simulátoru je ve formě kódu, jehož výsledky mohou být zobrazeny pomocí dalších nástrojů.

Nejdůležitějším atributem poskytovaným NS-3 je vysoká úroveň realismu v modelech a integrace nástrojů s virtualizačním prostředím.

NS-3 byl vyvinut, aby poskytoval otevřenou, rozšiřitelnou síťovou simulační platformu pro výzkum a vzdělávání v oblasti sítí. NS-3 poskytuje modely fungování a výkonu paketových datových sítí a poskytuje uživatelům prostředí pro provádění simulačních experimentů.

NS-3 se aktivně vyvíjí a udržuje.

### 3.3.4 VANET simulátory

VANET simulátory poskytují jak modelování dopravních toků, tak simulace na úrovni datových paketů. Tyto simulátory mohou být kombinací stávajících generátorů pohybu automobilů a síťových simulátorů.

Jako VANET simulátory byly zváženy 2 simulátory: TraNS a iTETRIS.

#### **TraNS (SUMO + NS-2)**

Realistic Joint Traffic and Network Simulator for VANET (TraNS) podporuje dva režimy simulace. [12] V síťové simulaci TraNS simuluje staticky určené dopravní toky (např. informace o cestování). Simulátor provozu generuje trasu a síťový simulátor simuluje soubor trasování. V simulaci zaměřené na aplikaci TraNS umožňuje dynamicky generované výjimečné události (např. prudké brzdění a zabránění kolizím) změnit provoz.

Protože simulátory provozu a sítě mohou běžet současně v simulaci zaměřené na aplikaci, není generován žádný trasovací soubor. V důsledku toho tento přístup snižuje spotřebu paměti pro rozsáhlou simulaci.

TraNS je nástroj založený na Java, vytvořený pro integraci SUMO a NS-2 s ohledem na simulaci a vizualizaci VANET. SUMO převede dopravní soubor na soubor výpisu, který je později používán síťovým simulátorem. Výstup získaný z NS-2 nemůže být předán zpět do SUMO, tj. NS-2 generuje svůj výstup do souboru file.out a během simulace VANET tento file.out nemůže být předán SUMO pro regeneraci tras.

#### **iTETRIS (SUMO + NS-3)**

iTETRIS integruje a rozšiřuje SUMO a ns-3, dvě platformy s otevřeným zdrojovým kódem pro simulace mobility vozidel a bezdrátové komunikace a umožňuje implementaci kooperativních aplikací ITS v různých programovacích jazycích. [11] Jeho open source povaha a modulární architektura usnadňují budoucí rozšíření platformy. Platforma je také schopna simulovat scénáře ve velkém měřítku, což představuje velmi přitažlivou vlastnost pro zkoumání spolupracujících systémů ITS.

iTETRIS integruje platformy pro bezdrátovou komunikaci a simulaci silničního provozu v prostředí, které je snadno přizpůsobeno konkrétním situacím a umožňuje analýzu výkonnosti C-ITS systémů na úrovni města. Přesnost a rozsah simulací využívaných iTETRIS odhaluje dopad dopravního inženýrství na efektivitu silničního provozu ve městech, operační strategii a interoperabilitu komunikací.

Další informace jsou uvedeny na webové adrese [20].



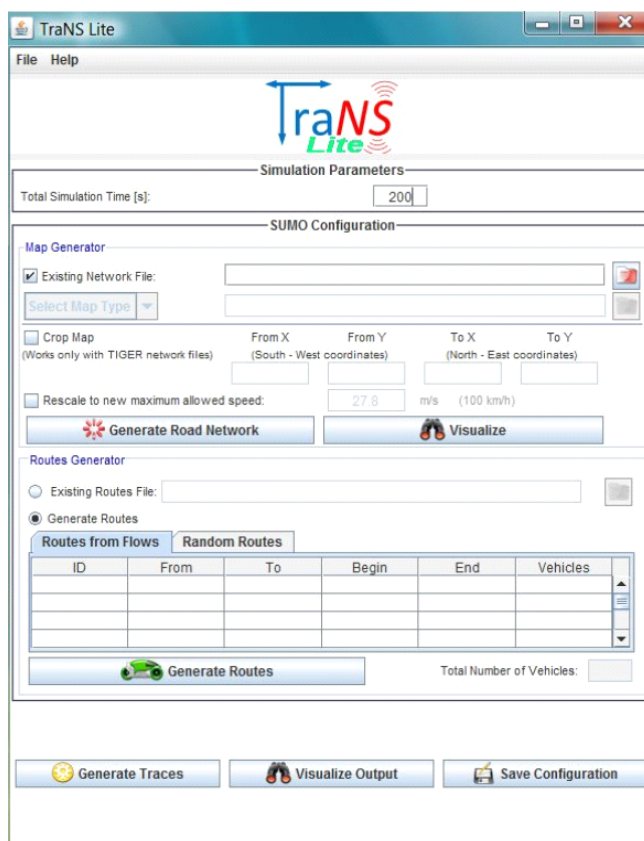
## 3.4 Provedení simulace

Vozidlové sítě Ad-Hoc (VANET) si získávají na popularitě, kdy vozidla tvoří mobilní uzly v síti. Simulace takových sítí pomáhá provést řadu experimentů a prověřit konkrétní scénáře pro budoucí skutečná nasazení.

V dané práci bylo vyzkoušeno několik druhů simulátorů.

### 3.4.1 TraNS

Nejprve byl využit VANET simulátor TraNS, který představuje spojení simulátoru vozidlového pohybu SUMO a síťového simulátoru NS-2. Ale kvůli zastavení vývoje byla ukončena podpora tohoto softwaru, tím pádem v tomto prostředí nebylo možné nasimulovat konkrétní scénář.



Obr. 9 snímek obrazovky softwaru TraNS, zdroj: autor

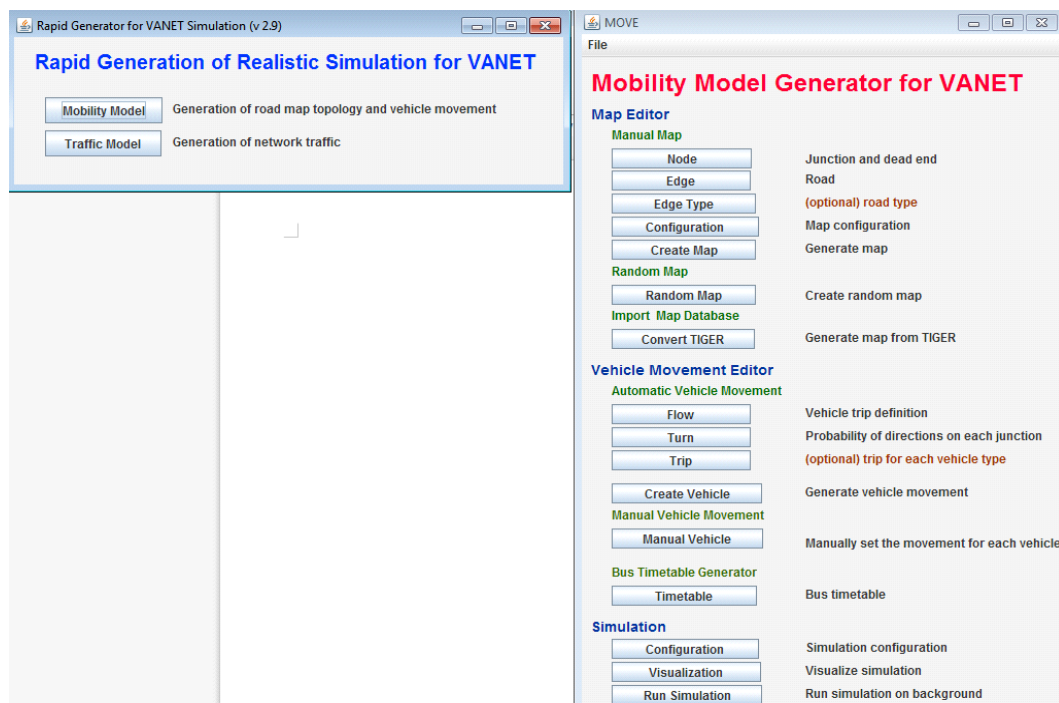
Kvůli těmto problémům byla zvolena jiná cesta k simulaci, a to využití simulátoru vozidlového pohybu SUMO spolu se simulátorem MOVE.

### 3.4.2 SUMO + MOVE

MOVE umožňuje uživatelům rychle generovat realistické modely mobility pro simulace VANET a mohou jej okamžitě použít populární síťové simulátory, jako je NS-2.

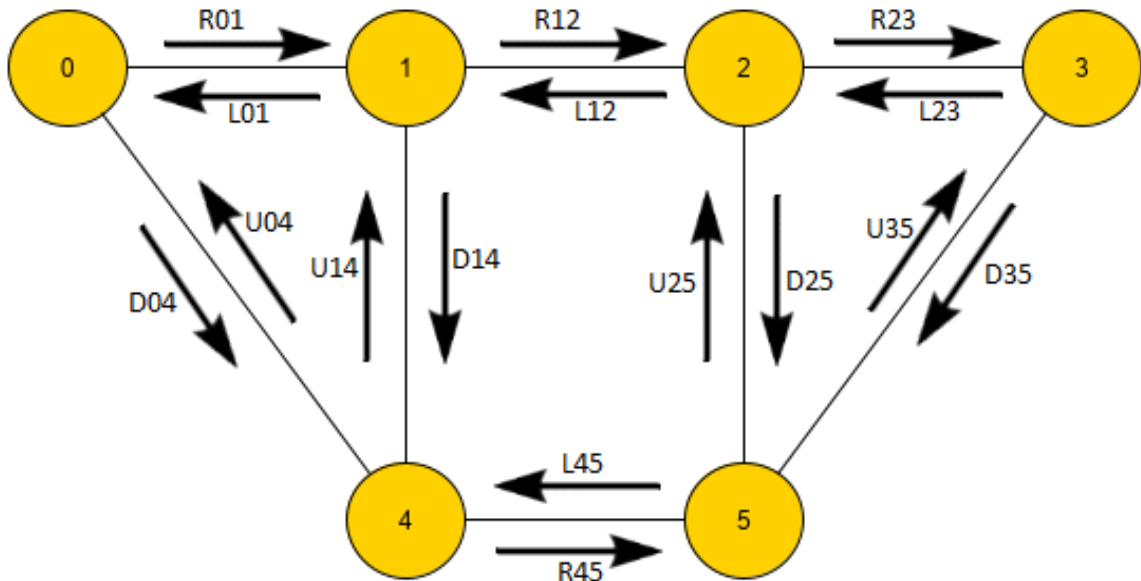
Nevýhodou ovšem je, že MOVE je schopen použít jen konkrétní verzi SUMO, a to je **SUMO-0.12.3**. Požadavky na simulaci:

- MOVE.jar
- SUMO (0.12.3)
- jdk (pro spuštění MOVE)



Obr. 10 snímek obrazovky softwaru MOVE, zdroj: autor

V dané simulaci SUMO je použit jako nástroj, který simuluje realistický pohyb aut. MOVE byl použit jako nástroj, který definuje scénář.



Obr. 11 schéma křižovatek, zdroj: autor

Na výše uvedeném diagramu je 6 křižovatek (0 až 5) a dopravní signály jsou umístěny na 1, 2, 4 a 5. Jsou to silnice, které spojují křižovatky. Každá silnice má dva pruhy s názvem R (right) pro pravý, L (left) pro levý, U (up) zdola nahoru a D (down) jako shora dolů. R12 označuje jízdní pruh od 1 do 2 a L12 označuje jízdní pruh od 2 do 1.

Pro vytvoření simulace pomocí MOVE musí být zadány následující parametry a údaje v MOVE.jar.

#### Mobility Model:

- Node (file.nod.xml)
- Edge (file.edge.xml)
- Configuration (file.netc.cfg)
- Create Map (file.net.xml)
- Flow (file.flow.xml)
- Turn (file.turn.xml)
- Create Vehicle (file.rou.xml)
- Configuration (file.sumo.cfg) - Tento soubor je spuštěn v sumo-gui
- Visualization (file.sumo.tr) - Tento soubor bude užitečný při vytváření souboru .tcl pro ns2
- Run Simulation (nebude zobrazeno žádné vozidlo emitované a provozované s časem simulace)

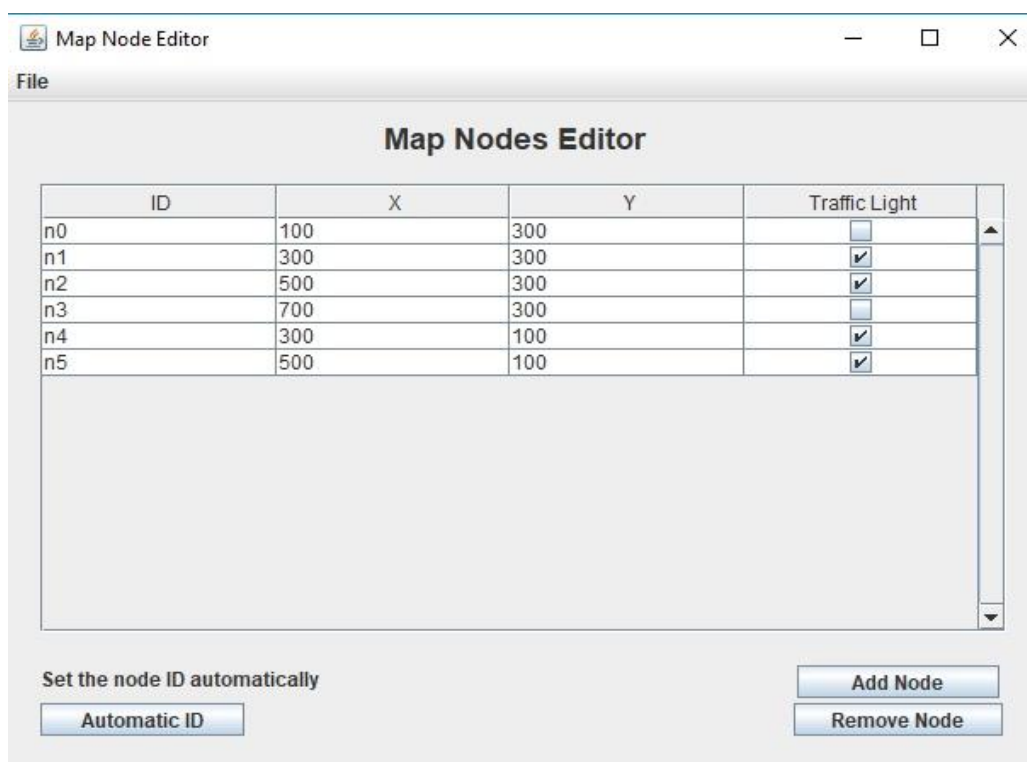
Traffic Model:

- Static Mobility (to vytváří file.nam, file.tr, file.tcl) které lze spustit pomocí ns2.

### Mobility model (model mobility)

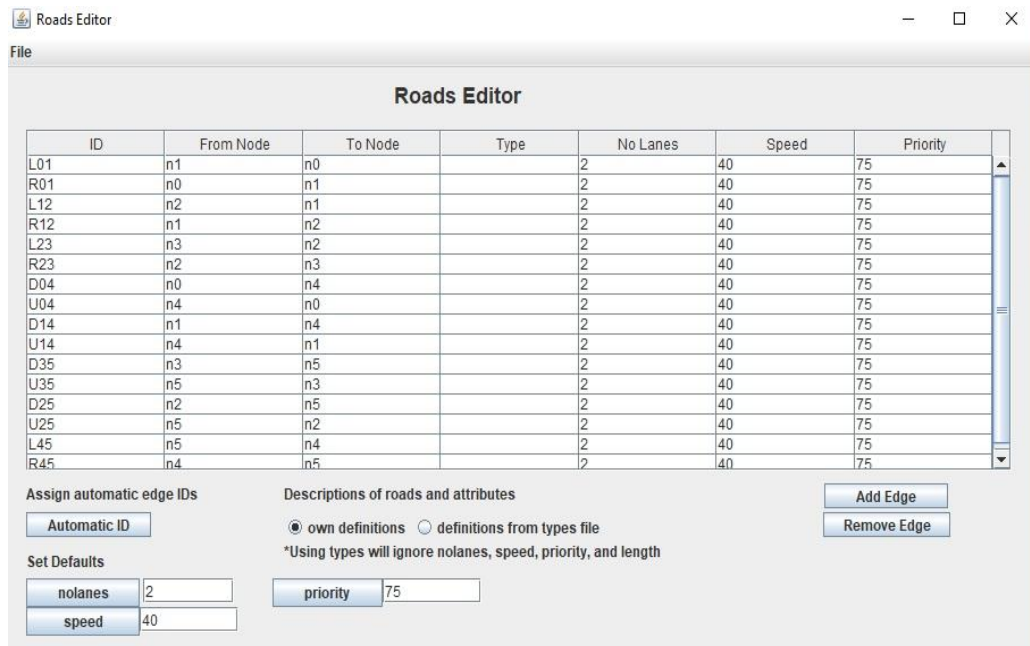
Nejprve je nutno začít modelem mobility. Tady existuje několik možností: program navrhuje udělat manuální anebo náhodnou mapu. Vzhledem k tomu, že v dané práci se provádí simulace podle konkrétního schématu, je nutno nastavit mapu manuálně.

Jako první se nastavují uzly, což jsou křižovatky. (ID uzlu, X a Y poloha a přítomnost/nepřítomnost semaforu).



Obr. 12 nastavení uzlů, zdroj: autor

Po nastavení uzlů následuje nastavení hran, což jsou silnice. (ID silnice, odkud-kam vede silnice, počet pruhů a rychlost).

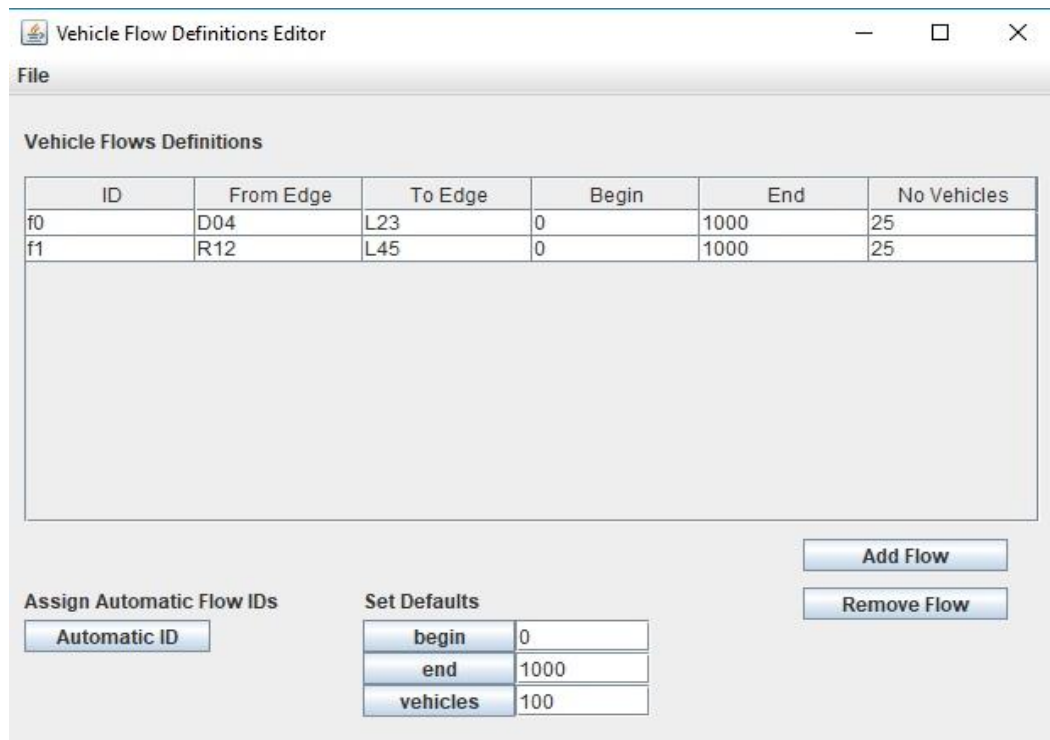


Obr. 13 nastavení silnic, zdroj: autor

Po nastavení uzlů a hran podle schématu následuje konfigurace do generátoru vozidlového pohybu SUMO. Tady je nutno uvést soubor s uzly a hranami pro budoucí konfiguraci do výstupního souboru.

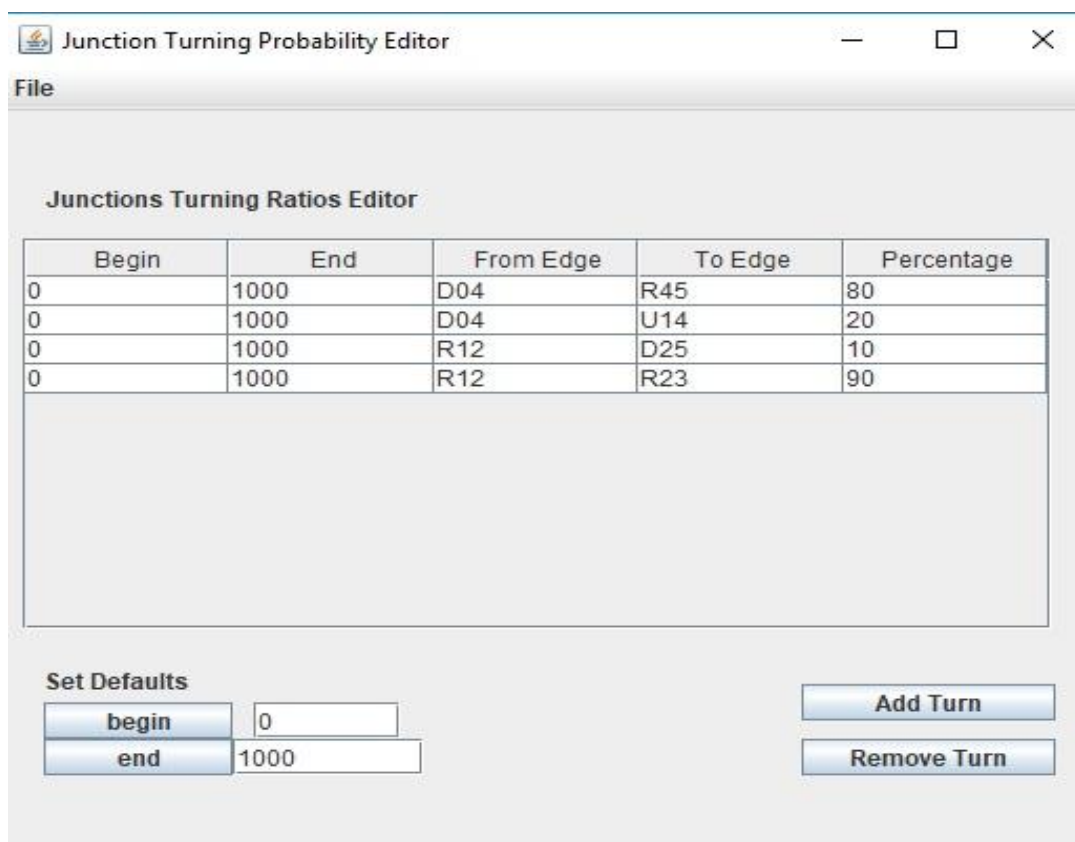
Poté byl programem vygenerována mapa s nastavenými parametry.

Následně se nastavují toky: ID toku, odkud-kam, počáteční a koncový čas simulace a celkový počet aut.



Obr. 14 nastavení toků, zdroj: autor

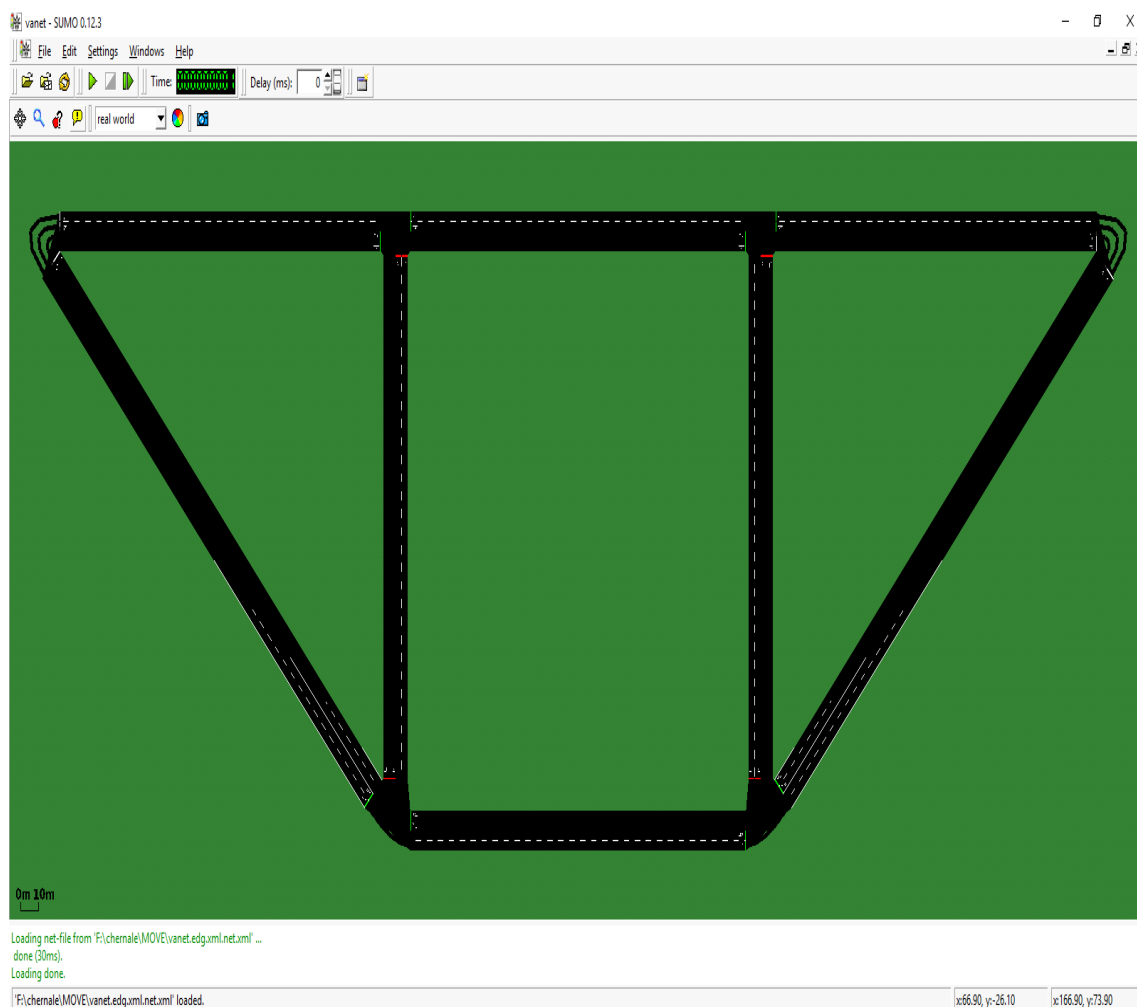
Podobně se nastavují zatáčky, včetně procenta odbočujících vozidel.



Obr. 15 nastavení zatáček, zdroj: autor

Následně je potřeba uvést oba tyto soubory (toky a zatačky) pro generování výstupu. Z těchto dvou souborů pak byl vygenerován soubor s trasou.

Poté je nutno otevřít editor konfigurace provozních simulací. Tady je potřeba uvést oba dříve vygenerované soubory: soubor s mapou s parametry a soubor s trasou. Program se zeptá, jak dlouho má trvat simulace a vygeneruje konečný soubor, který pak lze otevřít v generátoru vozidlového pohybu SUMO.



Obr. 16 snímek obrazovky v SUMO, zdroj: autor

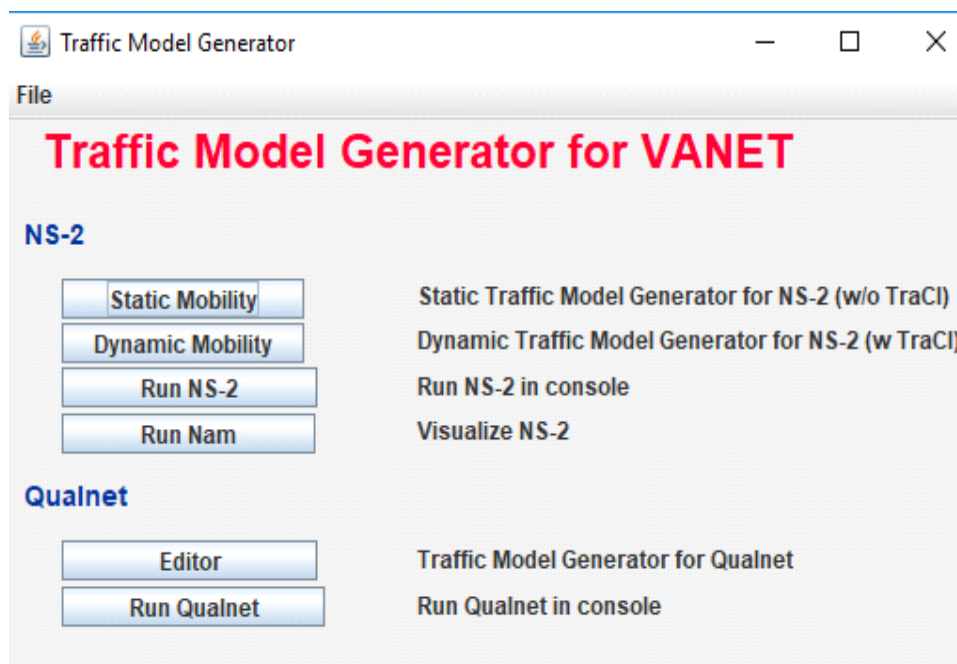
Obrázek 16 je výstupem po nastavení modelu mobility v MOVE. Na něm je vidět 6 křižovatek a 4 z nich jsou řízeny světelnými signalizačními zařízeními.

Teď je nutno přejít na dopravní model (Traffic Model).

### Traffic Model

V této fázi je potřeba vytvořit statický dopravní model (Static Traffic Model Generator for NS-2), který nasimuluje danou síť. V této části mají být importovaná data, vytvořená v modelu

mobility. Z těchto dat program vygeneruje ID všech vozidel. Následně je potřeba zadat propojení vozidel (jaká vozidla budou předávat pakety mezi sebou).

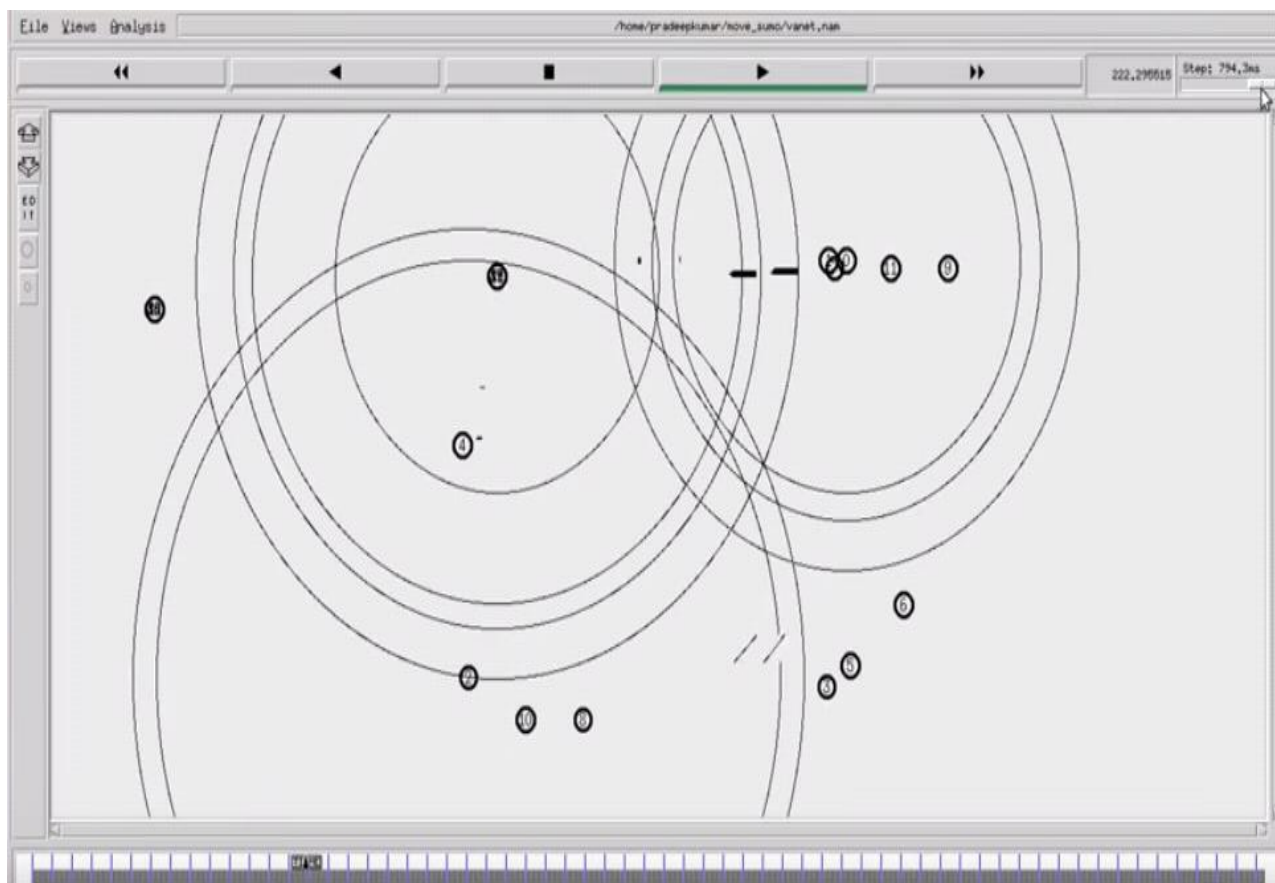


Obr. 17 snímek obrazovky MOVE

Následně byl vytvořen *.tcl soubor*, který pak lze otevřít ve speciálním prostředí NetAnim.

NetAnim je offline animátor. Aktuálně animuje simulaci pomocí trasovacího souboru XML shromážděného během simulace.





Obr. 16 snímek obrazovky v NetAnim, zdroj: autor

### 3.4.3 Nastavení simulace

V bakalářské práci bylo bráno za úkol porovnat dvě simulace z pohledu kvality a rychlosti předání paketů mezi auty. Tyto simulace jsou nastaveny takovým způsobem, že se liší výhradně intenzitou dopravy. Přitom obě simulace mají stejný scénář, vygenerovaný pomocí SUMO. To znamená, že oba scénáře mají stejnou mapu a podmínky během simulaci, jako jsou např. semaforey, zatáčky a rychlost.

- V simulaci č. 1 bylo vygenerováno celkem 50 vozidel.
- V simulaci č. 2 bylo vygenerováno 100 vozidel.

Pro analýzu dvou simulací byl použit software Tracegraph. [19]

Tracegraph je bezplatný analyzátor síťových souborů vyvinutý pro zpracování dat, vygenerovaných síťovým simulátorem ns-2. Tento software je schopen ukázat informaci o vygenerovaných (generated), poslaných (sent), přeposlaných (forwarded), přijatých (received), upuštěných (dropped) a ztracených (lost) paketech během simulací. Je schopen také spočítat maximální a minimální zpoždění paketů.

Tím pádem, aby bylo možné porovnat tyto dvě simulace je třeba zanalyzovat obě simulace v tomto prostředí.

Po provedení dvou simulací jsou k dispozici následující výstupy:

### Výstupy z 1.simulace (50 aut)

Tab. 4 Analýza ztráty paketů v 1 simulace, zdroj: autor

Celkový počet uzlů	50
Počet uzlů odesílacích	50
Počet uzlů přijímacích	5
Počet paketů vygenerovaných	5414
Počet paketů poslaných	5402
Počet paketů přeměrovaných	3867
Počet paketů upuštěných	68
Počet paketů ztracených	379

Tab. 5 analýza dob zpoždění v 1.simulace, zdroj: autor

Minimální doba zpoždění	0,02689 [s]
Maximální doba zpoždění	4,131344 [s]

### Výstupy ze 2. simulace

Tab. 6 analýza ztráty paketů ve 2.simulace, zdroj: autor

Celkový počet uzlů	100
Počet uzlů odesílacích	100
Počet uzlů přijímacích	10
Počet paketů vygenerovaných	10519
Počet paketů poslaných	10487
Počet paketů přeměrovaných	8847
Počet paketů upuštěných	134
Počet paketů ztracených	1999

Tab. 7 analýza dob zpoždění ve 2.simulace, zdroj: autor

Minimální doba zpoždění	0,0537 [s]
Maximální doba zpoždění	8,26269 [s]

### Porovnání simulací

Pro účely této práce bylo důležité porovnat podíly ztracených paketů k vygenerovaným paketům a dále doby zpoždění paketů během obou simulací.

Tab. 8 porovnání výsledků dvou simulace, zdroj: autor

	Simulace č.1	Simulace č.2
Počet paketů vygenerovaných	5414	10519
Počet paketů ztracených	379	1999
Procento paketů ztracených	7 %	19 %
Minimální doba zpoždění	0,02689 [s]	0,0537 [s]
Maximální doba zpoždění	4,131344 [s]	8,26269 [s]

Z tabulky srovnání lze učinit závěr, že při zvětšení intenzity dopravy podíl ztracených paketů narůstá, stejně jako i doba zpoždění (jak minimální, tak i maximální). Přitom maximální doba zpoždění při dvakrát větší intenzitě je až dvakrát vyšší. Procento ztracených paketů je více než dvakrát vyšší.

Všechny nastavení pro MOVE včetně nastavení křižovatek, silnic, toků a zatáček jsou předány na CD a jsou k použití pro provedení simulace. Dále jsou předány síťové nastavení a výstupní scénáře pro provedení uvedené simulace v SUMO.

# Závěr

Cílem této práce bylo studovat a analyzovat problematiku sítí VANET. V teoretické části je popsána klasická architektura VANET, jsou vysvětleny druhy konceptů této sítě, tj. způsoby, jakým mohou jednotliví účastníci síťové infrastruktury vzájemně komunikovat, jejich vlastnosti, popis fungování a praktické využití. Následně se první kapitola zaměřuje na směrovací protokoly, jejich popis a hierarchii a také na nevýhody této sítě.

Ve druhé kapitole je popsán problém zabezpečení přenášených dat, který se zaměřuje na příčiny těchto problémů a třídy možných útoků na síť.

Ve třetí kapitole je shrnutí analýzy současných požadavků na vozidlové sítě s ohledem na kvalitu a bezpečnost a analýza současných simulátorů pro vozidlové sítě.

Praktická část bakalářské práce byla stanovena na seznámení se simulačními nástroji, které se používají pro práce s vozidlovými sítěmi a také na zhodnocení analýz této simulace.

V dané práci se prováděla analýza kvality a rychlosti zpracování paketů dat v závislosti na změně intenzity dopravy na příkladu konkrétního scénáře.

Je zřejmé, že nasazení a testování VANET zahrnuje vysoké náklady, proto je simulace kvalitní alternativou pro vlastní realizaci. V dnešní době existuje obrovské množství různých simulátorů, ale většina z nich, přestože je schopná provést samotnou simulaci, není pak schopná vydat smysluplné výsledky a provést analýzu. Proto je nezbytné použití několika programů zároveň, což bylo zpracováno v praktické části práce.

Po provedení simulací pomocí zvolených nástrojů lze učinit závěr, že čím vyšší je intenzita dopravy, tím vyšší je ztráta paketů v síti. Tento výsledek může být odůvodněn minimálně jedním z hlavních problémů ztráty paketů, konkrétně zahlcením sítě, neboť čím větší je počet uživatelů sítě, tím pravděpodobnější je ztráta paketů z důvodu zahlcení, které je definováno zaplněním přenosové kapacity.

Z výsledků simulací lze také vidět, že po zvýšení intenzity provozu lze zaznamenat výrazně delší dobu zpoždění paketů, což vede k nebezpečí v rámci komunikace.

Výsledky simulace přinášejí závěr, který definuje problém VANET sítí jako problém, který je otevřený inovacím. Lze také říci, že existující protokoly sítě VANET nejsou stále dostačující pro potřeby takových sítí, obzvlášť když počet účastníků je vysoký, což existuje zpravidla ve městech, kde tyto sítě jsou obzvlášť nezbytné z důvodu většího nebezpečí provozu.

Dalším zajímavým řešením by mohla být simulace realizována podle vlastních návrhů křižovatek a silnic pomocí openstreetmap. Takovým způsobem by bylo možné analyzovat problém přenášených dat a zpoždění paketů v reálných situacích.

V uvedených simulačních nástrojích lze také nasimulovat problémy týkající se zabezpečení. To by spočívalo ve vytvoření vozidla jako „škodlivého“ uzlu, např. „černou díru“. Lze pak toto vozidlo analyzovat na ztrátu paketů před a po škodlivé činnosti.

# Bibliografie

- [1] *C-ROADS Czech Republic* [online]. [cit. 2019-08-26]. Dostupné z WWW: <<https://c-roads.cz>>
- [2] HARTENSTEIN, Hannes a LABERTEAUX, Kenneth. 2010. VANET: vehicular applications and inter-networking technologies. Chichester, U.K.: Wiley, 2010. Intelligent transportation systems (Chichester, England). ISBN 0470740620.
- [3] MOUSTAFA, Hassnaa a ZHANG, Yan. 2009. Vehicular networks: techniques, standards, and applications. Boca Raton: CRC Press, c2009. ISBN 1420085719.
- [4] RAWAT, Ajay, SHARMA, Santosh a SUSHIL, Rama. 2012. VANET: Security attacks and its possible solutions. *Journal of Information and Operations Management*. 3.
- [5] CLAUSEN, Thomas Heide, JACQUET, Philippe, ADJIH, Cedric, LAOUITI, Anis, MINET, Pascale, MUHLETHALER, Paul, QAYYUM, Amir, VIENNOT, Laurent. 2003. Optimized link state routing protocol (OLSR).
- [6] NAAZ, Sameena. 2014. Routing in Vehicular Ad Hoc Network (VANET). *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*.
- [7] Zone Routing Protocol [online], poslední aktualizace 31. července 2019, 10:22, Wikipedie. Dostupné z WWW: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Zone\\_Routing\\_Protocol](https://en.wikipedia.org/wiki/Zone_Routing_Protocol)>
- [8] FALL, Kevin. 2003. A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets. *Computer Communication Review*. 33. 27-34. 10.1145/863955.863960
- [9] KARIMI, Ramin, ITHNIN, Associate Professor Dr Nora, RAZAK, Shukor a NAJAFZADEH, Sara. 2011. Non DTN Geographic Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks. *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*. Vol. 8. page 86.
- [10] HASSAN, Aamir a LARSSON, Tony. 2011. On the requirements on models and simulator design for integrated VANET Simulation. Halmstad University Department of Computer and Electrical Engineering.
- [11] RONDINONE, Michele, et al.. 2013. ITETRIS: A modular simulation platform for the large scale evaluation of cooperative ITS applications. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 34. 99-125. 10.1016/j.simpat.2013.01.007.
- [12] PIÓRKOWSKI M., RAYA M., LUGO A., PAPADIMITRATOS P., GROSSGLAUSER M. a HUBAUX J.-P. 2008. TraNS: Realistic Joint Traffic and Network Simulator for VANETs. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, pp. 31-33, 2008.

- [13] TOMANDL, Andreas, HERRMANN, Dominik, FUCHS, K.-P, FEDERRATH, Hannes a SCHEUER, Florian. 2014. VanetSim: An open source simulator for security and privacy concepts in VANETs. Proceedings of the 2014 International Conference on High Performance Computing and Simulation, HPCS 2014. 543-550. 10.1109/HPCSim.2014.6903733.
- [14] MARTINEZ F.J., CANO J.-C., CALAFATE C. T. a MANZONI P. 2008. CityMob: a mobility model pattern generator for VANETs. ICC Workshops - 2008 IEEE International Conference on Communications Workshops. ISBN 9781424420520
- [15] *SimulatorVanetSim* [online]. [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: <https://svs.informatik.uni-hamburg.de/vanet/>
- [16] KRAJZEWICZ Daniel, ERDMANN Jakob, BEHRISCH Michael, and BIEKER Laura. *Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban MObility*. International Journal On Advances in Systems and Measurements, 5 (3&4):128-138, December 2012
- [17] *Simulator CityMob* [online]. [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: <http://www.grc.upv.es/Software/citymob.html>
- [18] *NS-3 Simulator* [online]. [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: [www.nsnam.org](http://www.nsnam.org)
- [19] *Tracegraph network analyser* [online]. [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: <http://ns-2.blogspot.com/2008/10/trace-graph-network-simulator-ns-2.html>
- [20] *ITETRIS: The open simulation platform for intelligent transport system (its) services* [online]. [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: <http://www.ict-itetris.eu>

# Seznam zkratek

AODV	Ad hoc On-demand Distance Vector
C-ITS	Cooperative Intelligent Transport Systems
DDOS	Distributed Denial Of Service
DOS	Denial Of Service
DREAM	Distance Routing Effect Algorithm for Mobility
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector protocol
DSR	Dynamic Source Routing
DTN	Delay Tolerant Network
ID	Identifier
FCD	Floating Car Data
GAMER	Geocast Adaptive Mesh Environment for Routing
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GPS	Global Positioning System
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
GUI	Graphical User Interface
ITS	Intelligent transportation system
LAR	Location Aided Routing
LBM	Latency Busters Messaging
MANET	Mobile Ad hoc Network
OBU	On-Board Unit



OLSR	Optimized Link State Routing
OSM	Open Street Map
P2P	Peer-to-Peer
RSU	Roadside Unit
TCP	Transmission Control Protocol
TraNS	Realistic Joint Traffic and Network Simulator
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
VANET	Vehicular Ad hoc Network
VTK	Visualization Toolkit
ZRP	Zone Routing Protocol