

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE**

**Přírodovědecká fakulta**

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Jan BARTOŠ

**DEVIATILITA KOMUNIKACÍ  
V SÍŤOVÝCH ANALÝZÁCH  
S VYUŽITÍM GIS**

**DEVIATILITY OF ROADS  
IN NETWORK ANALYSIS  
WITH THE USE OF GIS**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Tomáš Hudeček, Ph.D.

Praha 2012

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu

V Praze dne 28. 8. 2012

.....  
Jan Bartoš

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce RNDr. Tomáši Hudečkovi, Ph.D. za cennou inspiraci.

Dále mnohokrát děkuji rodině za neutuchající podporu v průběhu studia.

Děkuji!

## **Abstrakt**

Diplomová práce si klade za cíl určit způsob zohlednění tvaru komunikací v síťových analýzách. Jsou rozebrány metody pro matematické vyjádření tvaru linie, z nich je pro další využití vybrána metoda křivolakosti. Dále je řešena vazba mezi křivolakostí a rychlostí pohybu – je navržen model pro určení rychlostí. Významnou část práce představuje implementace v prostředí GIS. Navržený postup je implementován pomocí jazyka Python v prostředí ArcGIS for Desktop. Díky testování na konkrétních příkladech bylo potvrzeno, že zahrnutím tvarových charakteristik komunikací dochází k značnému zpřesnění síťových analýz.

**Klíčová slova:** křivolakost, deviatilita, síťové analýzy, GIS, Python

## **Abstract**

The key of presented diploma thesis is to find a way to take shape of roads into account when performing network analysis. Methods of mathematical representation of shape of lines are discussed; the curvature is chose for later use. Then the relation between road's curvature and speed is discussed – the model for setting the speed is suggested. Important part of the thesis is focused on implementation in GIS. Designed model is implemented by Python in the ArcGIS for Desktop. Due to testing on specific examples, it was confirmed, that the taking the shape characteristics into account provides high précising of network analysis.

**Key words:** curvature, deviatility, network analysis, GIS, Python

## Obsah

1. Úvod.....	7
1.1. Cíle.....	8
1.2. Struktura práce.....	10
2. Současný stav zkoumané problematiky .....	11
3. Metodika .....	17
3.1. Přehled postupu .....	17
3.2. Teorie grafů .....	17
3.3. Síťové analýzy .....	21
3.4. Síťová analýza v dopravně-geografických úlohách .....	21
3.4.1. Hledání cesty .....	21
3.4.2. Lokace/alokace zdrojů .....	21
4. Matematické vyjádření tvaru komunikace .....	22
4.1. Deviatilita.....	22
4.1.1. Postupy odvozené od deviatility.....	23
4.1.2. Diskuse vhodnosti deviatility .....	24
4.2. Křivolakost.....	24
4.2.1. Rozdíl mezi deviatilitou a křivolakostí.....	26
4.2.2. Výpočet křivolakosti.....	26
4.3. Postupy odvozené z generalizačních algoritmů .....	29
4.4. Ostatní .....	29
5. Vazba na rychlost .....	31
5.1. Dle zahraničních výzkumů.....	31
5.2. Dle Sladkého .....	32
5.3. Dle ČSN .....	34
5.4. Dle Louthana .....	36
5.5. Navržený postup.....	38
6. Implementace .....	40
6.1. Software pro GIS.....	40
6.2. ArcGIS .....	41

6.3.	Python .....	43
6.3.1.	Python v produktech ESRI.....	43
6.3.2.	Arcpy .....	44
6.4.	Návrh kódu.....	44
6.5.	Popis skriptu.....	46
6.5.1.	Přidání polí .....	46
6.5.2.	Křivolakost.....	46
7.	Testování .....	51
8.	Diskuze.....	54
9.	Závěr .....	55
	Seznam obrázků.....	56
	Seznam tabulek.....	57
	Seznam zkratk.....	58
	Zdroje .....	59

## 1. Úvod

Dopravní dostupnost je jedním z důležitých faktorů ovlivňujících rozvoj regionů, proto se jí zabývá celá řada výzkumů realizovaných na akademické půdě i v praxi. Tyto výzkumy jsou v dnešní době nejčastěji řešeny pomocí síťových analýz založených na ohodnoceném síťovém grafu. Nejčastějším typem výzkumů je analýza dostupnosti časové, kdy je komunikační síť ohodnocena časem nutným k překonání daných linií. Toto ohodnocení je většinou založeno na jednoduchém vztahu délky dané linie a předem určené průměrné rychlosti pohybu. V realitě je ale rychlost překonání určité komunikace ovlivňována celou řadou faktorů, z nichž velmi důležitým je i tvar komunikace. Tento fakt se však v naprosté většině analýz nebere v potaz. Důvodem je neexistence dostatečně přesné a v užívaných postupech a prostředích snadno použitelné metodiky pro realizaci zohlednění tvaru komunikační sítě při jejím ohodnocování pro potřeby síťových analýz. Např. Hudeček (2008) doslova uvádí: „*Klikatost silnic je dosud nevyřešený geoinformatický úkol, který si vyžaduje další pozornost.*“ A právě tímto doposud nevyřešeným geoinformatickým úkolem se bude tato práce zabývat.

Tato diplomová práce se tedy bude podrobně věnovat problematice zohlednění tvaru komunikací v síťových analýzách prováděných v prostředí GIS – zejména samotnému způsobu matematického vyjádření tvaru a postupu jeho výpočtu. Dále pak vazbě na určení rychlosti pohybu při užití v modelování časové dostupnosti. Důležité bude zaměření na automatizaci tohoto postupu a odhalení, popsání a vyřešení kritických míst daného postupu v prostředí GIS.

Síťové analýzy se díky svému stále širšímu využití stávají čím dál tím významnějšími - nacházejí uplatnění např. ve výzkumech dostupností nebo v praxi v navigacích. Již delší dobu jsou tyto analýzy v popředí zájmů odborníků a za tuto dobu se téměř podařilo převést celý proces modelování do prostředí GIS. Zatím však není možné zautomatizovat zohlednění tvaru komunikací a k vyplnění právě této mezery by měla sloužit tato práce.

## 1.1. Cíle

Hlavním cílem diplomové práce je vytvoření metodiky pro zohlednění tvaru komunikací při jejich ohodnocování pro potřeby síťových analýz ve výzkumech dostupností a důkladné popsání této metodiky tak, aby byla použitelná v dalších pracích zabývajících se výzkumy dostupností. Pro splnění tohoto hlavního cíle bude nutné splnit řadu dílčích cílů. Nejprve bude třeba vyhledat a analyzovat již existující literaturu a publikované práce na dané téma (a související témata) a definovat používané odborné pojmy. Ze získaných informací bude, krom jiného, třeba zjistit již existující či vhodné algoritmy pro matematické vyjádření tvaru linií a vazbu na určování rychlosti. Velmi důležitým krokem bude vytvoření algoritmu pro řešení daného problému. Tento algoritmus pak bude pomocí vhodného programovacího jazyku implementován jako nástroj do prostředí GIS. V tomto prostředí dále proběhne otestování vhodnosti vytvořeného algoritmu pro řešení daného problému. Samozřejmě bude diskuze navrhovaného řešení. Pro přehlednost lze cíle práce shrnout v následující podobě:

### *Hlavní cíl:*

- Vytvoření metodiky pro zohlednění tvaru komunikací v síťových analýzách

### *Dílčí cíle:*

- Rešerše literatury
- Definice pojmů
- Zjištění existujících algoritmů
- Návrh vlastního algoritmu
- Implementace navrženého algoritmu do prostředí GIS
- Testování vhodnosti navrženého algoritmu
- Diskuze navrhovaného řešení



Práce se tedy snaží hledat odpovědi na tyto výzkumné otázky:

- *Jak zautomatizovat zohlednění tvaru komunikací v síťových analýzách v GIS?*

Dosavadní výzkumy síťových analýz, potažmo dostupností, se buď tvarem komunikací vůbec nezabývají, nebo se s ním nejsou schopny dostatečně vypořádat, což může vést k nedostatečné přesnosti a reálnosti dosahovaných výsledků. Vyřešení tohoto problému v prostředí GIS by umožnilo provádět dané analýzy mnohem přesněji. Zautomatizování by navíc značně zjednodušilo aplikaci daných postupů. Tato problematika však v sobě skrývá dílčí výzkumné otázky, se kterými bude nutné se postupně vypořádat.

- *Jak číselně popsat tvar komunikací a jaké jsou podmínky pro použití daných algoritmů v prostředí GIS?*

První důležitou odpovědí nutnou pro sestavení skládky daného výzkumu bude způsob číselného vyjádření tvaru komunikace. Bude třeba analyzovat a porovnat použitelné algoritmy a vybrat (a dle potřeby upravit nebo vytvořit zcela nový) nejvhodnější algoritmus pro daný účel.

- *Jakým způsobem zohlednit tvar komunikace v době nutné k jejímu překonání?*

Dále bude třeba určit vazbu mezi číselným vyjádřením tvaru komunikace a rychlostí (k vyjádření času k překonání dané linie a dalšímu využití v síťových analýzách).

- *Jak celý postup realizovat v prostředí GIS?*

Samozřejmě bude nutné popsat daný postup pomocí programovacího jazyka tak, aby bylo možné jej použít v prostředí GIS. Budou popsána i kritická místa a důležité podmínky pro správné fungování daného postupu (např. podmínky pro vstupní data apod.). Dojde také k vytvoření zcela nového nástroje, který bude provádět daný postup automaticky. Při jeho tvorbě budou samozřejmě popsána problematická místa.

## **1.2. Struktura práce**

První kapitola představuje úvod do řešeného tématu, stanovuje cíle práce a formuluje výzkumné otázky. Druhá kapitola popisuje současný stav zkoumaného tématu pomocí přehledu a diskuze dosud publikovaných prací na dané téma a zabývá se rovněž i literaturou jiných oborů, která je v práci dále využita. Třetí kapitola uvádí přehled užitého postupu, definici důležitých pojmů a teoretický základ z oblasti teorie grafů a síťových analýz. Čtvrtá kapitola se pak již věnuje matematickému vyjádření tvaru linií – popisu a diskuzi stávajících řešení a výběru vhodného postupu. Pátá kapitola se dále věnuje problematice vzájemné vazby tvaru komunikace a rychlosti pohybu po komunikaci. Šestá kapitola se zabývá implementací daného postupu v prostředí GIS a jeho testování. Následuje diskuze a závěr.

## 2. Současný stav zkoumané problematiky

Je nutné konstatovat, že publikovaných prací řešících tvar komunikací ve vztahu k síťovým analýzám, potažmo výzkumu dostupnosti, není mnoho a práce řešící automatizaci tohoto procesu v prostředí GIS byla nalezena pouze jedna. Je proto nasnadě otázka, zda je řešení tohoto problému opodstatněné a přínosné. Jak již bylo zmíněno, síťové analýzy získávají na významu jak ve vědě, tak i v každodenním životě a proto by mělo být snahou provádět dané analýzy co nejpřesněji. Již samotné zohlednění tvaru komunikací v těchto analýzách by umožnilo zpřesnění daných modelů, navíc probádání možností a úskalí automatizace daných postupů v prostředí GIS by přineslo značný posun v aplikaci těchto metod v geoinformatice akademické i aplikované.

Již zmiňovaná jediná nalezená práce, která se snaží řešit automatizaci daného problému v prostředí GIS je diplomová práce „*Vztah digitálního modelu reliéfu a síťových analýz pro řešení dopravních úloh*“ Michala Louthana z Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci z roku 2010 [17]. V teoretické části je obecně popsána problematika síťových analýz a parametrů, které ovlivňují rychlost na komunikacích, praktická část je pak založena na testování vybraných parametrů ve zvolených GIS softwarech a v terénním výzkumu. Hlavním úkolem práce bylo naprogramovat algoritmus pro automatické ohodnocení dopravní sítě, založený na vybraných parametrech a na závěr vytvořit sadu nástrojů pro software ArcGIS [17]. Jako dané parametry byly vybrány sklon komunikace, typ komunikace a „zakřivení komunikace“ (autor zde užívá pojem „zakřivení komunikace“, v předkládané práci je užívána terminologie odlišná, viz kap. č. 4). Právě poslední parametr je hlavním objektem zájmu i této práce. Louthan pro jeho matematické vyjádření používá metodu deviatility [17] (viz kap. 4.1.), pro testování vytvořeného algoritmu pak používá terénní výzkum a porovnávání s výsledky veřejně dostupných plánovačů jízd (viz kap. 7).

S určitou snahou o zohlednění tvaru komunikací v síťových analýzách se lze setkat i v diplomové práci „*Síťové analýzy v GIS pro složky IZS*“ Jakuba Sladkého z Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni z roku 2009 [23]. Autor

se nejprve v teoretické části věnuje datovým reprezentacím a datovým modelům v GIS a uvádí přehled nejpoužívanějších vektorových datových formátů. V praktické části se pak zabývá modelováním silniční sítě a pravidly pro pohyb po komunikacích na území Plzeňského kraje a provádí analýzu dojezdnosti vozidel HZS PK. Právě v praktické části zmiňuje jako jeden z faktorů majících vliv na dojezdovou dobu i zakřivení komunikace. Tento faktor následně vyjadřuje pomocí Indexu zakřivení linie (viz kap. 4.1.1.), bohužel však bez podrobnějšího rozboru.

Práci řešících problematiku zohlednění tvaru komunikací v síťových analýzách rovněž není mnoho. V českém prostředí sice existuje metodika definující pojem křivolakost i vztah této vlastnosti komunikace s rychlostí pohybu, avšak v akademických pracích ani v praxi takřka není využívána. Jedná se o *Českou státní normu 73 6100 - 1. Názvosloví silničních komunikací - Část 1: Základní názvosloví* (2008) [8]. Jedná se o první část souboru pěti norem, které byly vytvořeny z důvodu velkého množství termínů z převzatých evropských norem. Obsahuje nejdůležitější termíny ze všech tematických celků, a tak podává ucelený přehled obecné terminologie v oblasti pozemních komunikací a lze ji považovat za přímou náhradu ČSN 73 6100:1983 (1965). Na výběru termínů a definic, které byly do této normy zařazeny, spolupracovali přední odborníci, reprezentující odborné sekce České silniční společnosti. Tito odborníci vybrali a seřadili termíny podle významové souvislosti do užších celků v rámci jednotlivých kapitol. Tato struktura vytváří přehlednější členění, než u předchozí nahrazované normy, ve které byly termíny uspořádány pouze jednostupňově do kapitol [8]. Pro tuto diplomovou práci je tato norma důležitá zejména z důvodu definice pojmů křivolakost komunikace a návrhová a směrodatná rychlost, včetně jejich matematických vztahů (viz kap. 4.2 a 5.3).

Z této normy samozřejmě vycházejí odborníci v oborech jako projektování a stavitelství pozemních komunikací. Pro předkládanou diplomovou práci je velmi zajímavá práce Krajčoviče a Řezáče, prezentovaná např. článkem *Křivolakost trasy silniční komunikace* (2006) [16] uvedeným ve Sborníku vědeckých prací VŠB-TUO. Autoři se tu věnují vlivům na očekávanou rychlost pohybu modelového vozidla, vycházejí z ČSN a krom křivolakosti komunikace řeší rovněž i problematiku vlivu

podélného sklonu či velikosti směrových oblouků. Práce je důležitá především díky rozboru definice pojmu křivolakost.

Bohužel ve světě nebyly nalezeny žádné práce komplexně řešící danou problematiku. Existuje celá řada prací zkoumajících tvar komunikací, nikoli však ve vztahu k určení průměrné rychlosti pohybu a síťovým analýzám - sledují vazbu mezi tvarem komunikací a nehodovostí. V těchto pracích je všeobecně kladen velký důraz na statistické zpracování dat a interpretaci výsledků, nikoli na samotnou metodu popisu tvaru komunikací. Pojítkem těchto prací je také to, že zkoumají vliv mnoha faktorů, např. počasí, hustotu provozu či sklon komunikace.

Této problematice se ve svém dlouhodobém výzkumu věnuje např. Shankar, který na toto téma publikoval spolu s dalšími autory několik článků, např. *Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies* (Accident Analysis and Prevention, 1995) [21]. Článek popisuje výzkum předpovědi počtu dopravních nehod na základě dat nehodovosti z předchozích let, různých dat popisujících počasí a geometrie komunikací. Jako většina podobných prací se i tato široce věnuje použitému statistickému postupu vyhodnocení. Zároveň však popisuje i použité indikátory tvaru komunikací (viz kap. 4.4).

Další prací na toto téma je např. práce Haynesse a kol., prezentovaná např. článkem „*District variations in road curvature in England and Wales and their association with road-traffic crashes*“ zveřejněném v časopise Environment and Planning v roce 2007 [14]. Práce na příkladu dat z Anglie a Walesu zkoumá, zda platí všeobecná domněnka, že zatáčky zvyšují riziko dopravních nehod a tudíž v oblastech s větším výskytem zatáček bude i vyšší výskyt dopravních nehod. Výsledky výzkumu tuto hypotézu vyvrací a tvrdí opak – v oblastech s „rovnějšími“ komunikacemi je riziko výskytu dopravních nehod vyšší. Pro předkládanou diplomovou práci je tato (i ostatní podobné práce) přínosná zejména v popsání způsobu číselného vyjádření tvaru komunikací (viz kap. 4.4).

Pro danou práci je kromě nastudování literatury řešící zkoumanou problematiku samozřejmě důležité rovněž i nastudování příslušné literatury širšího kontextu – od

literatury popisující aplikaci postupů v prostředí GIS včetně užitého programovacího prostředí, přes literaturu teorie grafů a síťových analýz a literaturu dopravně-geografického výzkumu až po literaturu základů a obecných principů geoinformatiky.

Významnou část používané literatury představují práce pojednávající o aplikaci teoretických poznatků, postupů a metodik v prostředí GIS. Jedná se o práce přímo o síťových analýzách v prostředí GIS, např. Peňáz - *Síťové analýzy v prostředí GIS* (2006) [19], který se v tomto učebním textu věnuje modelováním sítí reálného světa a grafům a geometrickým sítím z pohledu GIS, nebo obecněji o algoritmizaci v prostředí GIS, jako např. Rapant – *Algoritmizace prostorových úloh* (2006) [20], který se v tomto učebním textu zabývá pojmem algoritmus a věnuje se algoritmům pracujícím s vektory i rasty.

Již v názvu se objevuje pojem „síťové analýzy“. Ten vychází z teorie grafů, a proto významnou částí užitě literatury představují publikace na toto téma. Tuzemskou školu tu zastupuje např. Jiří Demel a jeho *Grafy a jejich aplikace* (2002) [9]. V této publikaci se autor věnuje grafům celé řadě témat s nimi spojených – od definic a základních pojmů přes prohledávání do hloubky a do šířky, minimální kostry, nejkratší cesty, toky v sítích, párování, Eulerovské tahy až k NP-těžkým úlohám jako jsou Hamiltonovské cesty a kružnice. Důraz je zde kladem na aplikaci a algoritmy pro řešení grafových úloh. Právě toto zaměření je důvodem pro využití právě této knihy.

Teorie grafů je tradiční a mezinárodně využívaná teorie. To dokazuje celá řada zahraničních publikací na dané téma. Jednou z nich je i *Graph Theory* (2010) Reinharda Diestela [10]. Publikace ukazuje teorii grafů v dnešní podobě, její základy, hlavní metody a výsledky. Pro využití je důležitá zejména pro porovnání s českými autory.

S ohledem na aplikaci a testování teoreticky popsaných postupů a algoritmů v prostředí GIS je potřebná rovněž i literatura pojednávající o programátorské implementaci v GIS, např. Sklenička – *Programovací jazyk python v geoinformaticce* (2006) [22], který popisuje různé způsoby využití tohoto programovacího jazyka v systémech GIS.

Jelikož pro samotnou implementaci algoritmů v GIS je zvolena kombinace programovacího jazyku Python a software ArcGIS Desktop 10, velmi užitečná je obsáhlá on-line nápověda k tomuto produktu [1].

Samozřejmostí pak je využití literatury věnující se jazyku Python a programování obecně, jako např. *How to Think Like a Computer Scientist: Think Python* Allena B. Downeyho z roku 2012 [12], či předchozí kniha stejného autora *How to Think Like a Computer Scientist: Learning with Python* z roku 2008 [11].

Při popisování generalizačních algoritmů a užití jejich modifikací je potřebná i literatura popisující tyto matematické postupy. Velmi přínosnou je v tomto publikace *Algoritmy v digitální kartografii* Tomáše Bayera z PřF UK z roku 2008 [2]. V publikaci se autor věnuje celé řadě algoritmů – od algoritmů pro kompresi rastrových dat, přes triangulaci, teselaci, algoritmy pro vytváření digitálních modelů terénu až po algoritmy používané pro analýzu grafu. Zvláště významnými budou kapitoly věnující se generalizačním algoritmům a operacím s liniemi.

Zkoumaná problematika se velmi týká dopravně-geografických výzkumů, proto je potřebná i literatura dopravní geografie. Této problematice se věnuje mnoho odborníků publikujících řadu odborných knih, článků, skript a dalších výukových materiálů. Základem studia dopravní geografie je Brinke se svým *Úvod do geografie dopravy* (1999) [5], kde popisuje základy oboru. Více matematického pohledu do oboru vnáší např. Čerba a jeho *Databázové systémy GIS* (2004) [7]. Přestože tomu název nenasvědčuje, autor se zde věnuje i geografii dopravy. Pohled komplexního dopravně-geografického výzkumu využívajícího síťové analýzy přináší dizertační práce Hudečka *Akcesibilita a dopady její změny v Česku v transformačním období* (2008) [15].

V oblasti teoretických základů GIS se tato práce bude opírat např. o Rapanta (Geoinformatika a geoinformační technologie, 2006) [20]. Autor v této knize seznamuje se základy geoinformatiky, věnuje se získávání geodat a široce popisuje principy geoinformačních technologií.

Tvorba samotné diplomové práce pak vychází z Voženílkovy publikace *Diplomové práce z geoinformatiky* (2002) [25], ve které jsou popsána pravidla pro vytváření diplomových prací – od zadání práce, přes pravidla pro psaní textu a citací až po grafické prezentace a obhajobu diplomové práce.



### 3. Metodika

#### 3.1. Přehled postupu

Při řešení dopravně-geografických úloh zaměřených na výzkum dostupnosti (např. vymezení oblastí obsluhy, hledání nejkratších cest atd.), tzn. provádění síťových analýz, se vychází z teorie grafů (viz kap 3.2). Při snaze zohlednit tvar komunikace v takto prováděných analýzách se nejprve číselně vyjádří tvar komunikace a následně se odvodí rychlost pohybu, resp. čas potřebný k překonání dané komunikace. Z obecně popsaného postupu vychází i postup řešení problému této práce - nejprve výpočet "koeficientu tvaru" jednotlivých komunikací a následně jeho vazba na rychlost pohybu po nich.

#### 3.2. Teorie grafů

Teorie grafů je matematická disciplína, která zkoumá vlastnosti struktur zvaných grafy. Pojem „graf“ je všeobecně znám z matematiky, kde se používá jako nejčastější grafické znázornění funkční závislosti. Grafem v teorii grafů se rozumí objekty popsané množinou vrcholů a množinou hran [24]. Graf se skládá z vrcholů (nebo též uzlů, angl. vertices) a hran (angl. edges), přičemž hrana vždy spojuje dva vrcholy. Hrana může být orientovaná, v tom případě se rozlišuje její počáteční a koncový bod. Graf může být označen za orientovaný v případě, že všechny jeho hrany jsou orientované. V teoreticky zaměřené literatuře se lze setkat i s pojmy prázdný graf (nemá žádné vrcholy, tudíž ani hrany) a nekonečný graf (má nekonečně mnoho vrcholů). Značně specifický případ rovněž nastává, když počáteční a koncový bod hrany jsou totožné – v tomto případě se hovoří o smyčce v grafu.

Graf  $G = (V, E)$  je definován jako uspořádaná dvojice množin  $V$  a  $E$ , kde  $V$  je konečná, neprázdná množina vrcholů grafu a  $E$  je množina hran  $(u, v)$  grafu  $G$ , přičemž  $u, v \in V$ .

V některých případech není orientace hran podstatná, tj. není potřeba rozlišovat počáteční a koncové vrcholy hran. V takových případech se užívá pojem neorientovaný graf. Neorientovaný graf je trojice  $G = (V, E, \varepsilon)$  tvořená neprázdnou konečnou množinou  $V$ , jejíž prvky se nazývají vrcholy, konečnou množinou  $E$ , jejíž prvky se nazývají neorientované hrany, a zobrazením  $\varepsilon$ , které se nazývá vztah incidence a které každé hraně  $e \in E$  přiřazuje jednoprvkovou nebo dvouprvkovou

množinu vrcholů. Těmto vrcholům se říká krajní vrcholy hrany  $e$ . Říká se také, že jsou incidentní (nebo že incidují) s hranou  $e$ . O hraně  $e$  se pak říká, že je incidentní s těmito vrcholy, nebo že spojuje tyto vrcholy. Je-li hrana  $e$  incidentní pouze s jedním vrcholem, nazývá se hrana  $e$  (neorientovaná) smyčka. [9]

Jako příklady případů, které je možno modelovat pomocí neorientovaných grafů lze uvést:

- dopravní síť (železniční, silniční, ...), kde:
  - vrchol reprezentuje např. křižovatku, nádraží, výhybku, atd.
  - hrana reprezentuje silnici, úsek tratí, jednotlivou kolej, atd.
- počítačovou síť, kde:
  - vrchol reprezentuje počítačový server, uživatelský terminál, atd.
  - hrana reprezentuje kabelové spojení, atd.
- radiokomunikační síť, kde:
  - vrchol reprezentuje jednotlivý radiový či televizní vysílač, uzel pro přenos signálu mobilních telefonů, atd.
  - hrana reprezentuje pomyslnou spojnicí mezi jednotlivými vysílači či přenosovými uzly (obvykle sousedními, tj. takovými, které se při vysílání na stejné frekvenci mohou vzájemně rušit), atd.

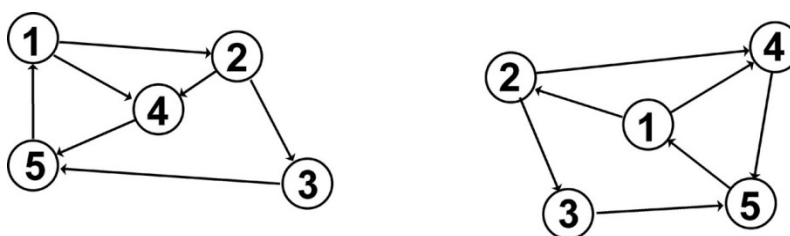
V jiných případech je orientace hran podstatná, tj. je potřeba rozlišovat počáteční a koncové vrcholy. V takových případech se užívá pojem orientovaný graf. Orientovaný graf je trojice  $G = (V, E, \varepsilon)$  tvořená neprázdnou konečnou množinou  $V$ , jejíž prvky se nazývají vrcholy, konečnou množinou  $E$ , jejíž prvky se nazývají orientované hrany, a zobrazením  $\varepsilon : E \rightarrow V^2$ , které se nazývá vztah incidence. Toto zobrazení přiřazuje každé hraně  $e \in E$  uspořádanou dvojici vrcholů  $(x, y)$ . První z nich,  $x$ , se nazývá počáteční vrchol hrany a značí se  $Pv(e)$ . Druhý,  $y$ , se nazývá koncový vrchol hrany a značí se  $Kv(e)$ . O hraně  $e$  se říká, že vede z vrcholu  $x$  do vrcholu  $y$  a také, že spojuje vrcholy  $x$  a  $y$ . O vrcholech  $x, y$  se pak říká, že jsou incidentní (nebo že incidují) s hranou  $e$  a také naopak že hrana  $e$  je incidentní s vrcholy  $x, y$ . Oba vrcholy  $x, y$  se také souhrnně nazývají krajní vrcholy hrany  $e$ . Jestliže  $Pv(e) = Kv(e)$ , pak se hrana  $e$  nazývá (orientovanou) smyčkou. Vrchol, který není incidentní s žádnou hranou, se nazývá izolovaný vrchol. Je možné, aby několik

hran mělo stejné počáteční a koncové vrcholy, tj. aby pro různé hrany  $e_1, e_2$  platilo  $Pv(e_1)=Pv(e_2)$  a  $Kv(e_1)=Kv(e_2)$  nebo, zapsáno jinak,  $\varepsilon(e_1)=\varepsilon(e_2)$ . O takových hranách se říká, že jsou rovnoběžné, nebo též násobné. Množina hran grafu může být prázdná. [9]

Jako příklady případů, které je možno modelovat pomocí neorientovaných grafů lze uvést:

- dopravní síť s jednosměrnými komunikacemi
- síť modelující procesy probíhající v čase
  - hrany reprezentují jednotlivé modelované činnosti (výchozí uzel hrany reprezentuje zahájení dané činnosti a cílový uzel její ukončení)
  - uzly reprezentují začátky a konce jednotlivých činností

Graf je definován pouze svými vrcholy a hranami, nikoli „způsobem“ zakreslení. Tentýž graf je možné zakreslit nekonečně mnoha různými způsoby (viz Obr. č. 1.), obvykle se však volí co nejpřehlednější způsob zakreslení (takový, aby se hrany neprotínaly, atd.).



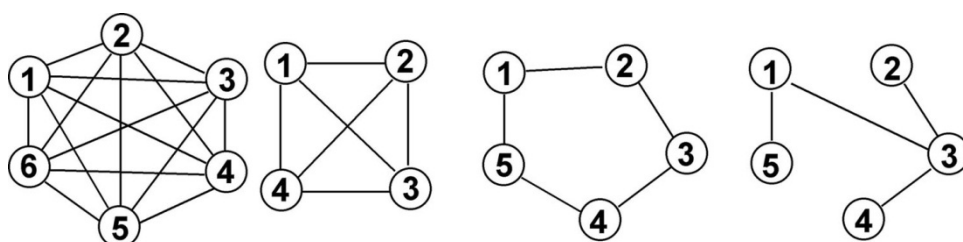
Obr. č. 1: Různé způsoby zakreslení grafu

Ve většině případů grafy samotné v podobě definované výše nepostačují k adekvátnímu popisu dané situace, proto se k hranám či vrcholům grafu přiřazují určité hodnoty, které představují např. délku, časovou náročnost nebo cenové náklady k překonání jednotlivých hran či dobu zdržení v jednotlivých vrcholech. Tato hodnota se nazývá impedance grafu. Proces přiřazování daných hodnot k hranám nebo uzlům se označuje jako ohodnocování grafu, takovéto grafy se označují jako ohodnocené (v případě ohodnocení hran hranově ohodnocené, v případě ohodnocení uzlů uzlově ohodnocené) nebo též jako síť. [9]

Hranově ohodnocený orientovaný graf  $(G, w)$  je orientovaný graf  $G$  spolu s reálnou funkcí  $w : E(G) \rightarrow (0, \infty)$ . Je-li  $e$  hrana grafu  $G$ , číslo  $w(e)$  se nazývá ohodnocením nebo váhou hrany  $e$ . [6]. Cesta v grafu mezi uzlem  $x$  a  $y$ , je posloupnost navzájem na sebe navazujících uzlů a hran začínající v uzlu  $x$  a končící v  $y$ , přičemž se v cestě žádný uzel nesmí vyskytnout dvakrát. V orientovaném grafu rozlišujeme tzv. orientovanou cestu (pokud je možné dojít z  $x$  do  $y$  s respektováním orientace hran) a neorientovanou cestu (pokud nerespektujeme orientaci hran).

Souvislý graf je takový graf, kde z každého uzlu existuje cesta do každého ze zbývajících uzlů grafu. V orientovaném grafu se rozlišuje tzv. silně souvislý graf (pokud z každého uzlu existuje orientovaná cesta do každého ze zbývajících uzlů grafu) a neorientovaně souvislý nebo jen souvislý graf (pokud pro některé dvojice uzlů existují pouze neorientované cesty). Nesouvislý graf je takový graf, který není souvislý. Graf se jeví jakoby „rozpadlý“ na více částí.

Úplný graf je takový graf, ve kterém existuje hrana mezi každou dvojicí uzlů grafu. Je zřejmé, že takový graf je nutně souvislý, resp. silně souvislý. Kružnice je souvislý neorientovaný graf, ve kterém z každého uzlu vycházejí právě dvě hrany. Cyklus je obdobou kružnice u orientovaných grafů. Je to silně souvislý graf, kde z každého uzlu vychází právě jedna hrana a právě jedna hrana do něj vchází. Strom je souvislý neorientovaný graf, ve kterém mezi každými dvěma uzly existuje právě jedna cesta. Strom tedy neobsahuje jako podgraf kružnici. Les je nesouvislý neorientovaný graf, jehož komponenty jsou pouze stromy. [6]



Obr. č. 2: Typy grafů

- a) úplné grafy se čtyřmi a šesti uzly      b) kružnice s pěti uzly      c) strom

Oblastí z teorie grafů, která bude v této práci využita, je síťová analýza.

### **3.3. Síťové analýzy**

Síťová analýza je v obecné rovině nástrojem pro analýzu a řízení projektů. Lze ji označit za metodu pro modelování určitého souboru činností, které je nutno provést k dosažení určitého cíle. Využívá se pro modelování a plánování různorodých procesů a činností (např. výstavba budov, výzkumné úkoly, zavádění informačních systémů, atd.) s cílem optimalizovat jejich průběh (s ohledem na čas, náklady, časové prostoje, atd.). Toto chápání je však velmi široké a je vhodné ho zúžit na pole dopravně-geografických analýz.

### **3.4. Síťová analýza v dopravně-geografických úlohách**

Síťové analýzy se v dnešní době využívají v mnoha podobách. Velmi důležitou roli hrají např. v činnosti složek IZS – od definování dojezdových časů a zón až po plánování konkrétních tras jednotlivých vozidel. Jako další příklad lze uvést navigační systémy, které se v posledních letech velice rozšířily do celé společnosti a mnoho lidí je využívá pro svou potřebu. Jedná se především o automobilové navigace. I přes značně široké spektrum konkrétních úloh lze rozlišit dva základní typy síťových analýz – hledání cesty a alokace zdrojů.

#### **3.4.1. Hledání cesty**

První základní úlohou síťových analýz je hledání cesty, angl. pathfinding. Jak je patrné z názvu, řeší problém nalezení nejvhodnější (podle daných hledisek) cesty mezi místy A a B v definovaném prostoru (grafu). Výsledkem může být buď samotná cesta (route), nebo okruh (tour). Výsledky jsou nalezeny jako spojnice zastávek – uzlů sítě, kudy výsledná cesta (okruh) prochází.

#### **3.4.2. Lokace/alokace zdrojů**

Jedná se o úlohu hledání optimální polohy různých zařízení v prostoru (lokace), nebo určování spotřebitelů k jednotlivým zdrojům (alokace). V síti jsou definována centra, představující zdroj nebo cíl spotřeby určité komodity (v praxi např. hasičské stanice, školy, obchodní centra, pobočky firem atd.). Výsledkem úlohy je alokování hran sítě, které přísluší k jednotlivým centrům, vznikají tedy plochy obslužené jednotlivými centry.

#### 4. Matematické vyjádření tvaru komunikace

Exaktní vyjádření tvaru komunikací je základem dalšího postupu. Způsobů jak číselně popsat určité charakteristiky tvaru komunikace je více, ne všechny jsou však vhodné pro vyjádření složitosti tvaru či další postup.

##### 4.1. Deviatilita

Nejčastěji užívaným způsobem je využití deviatility (nepřímocárosti, klikatosti). Jedná se o pojem pocházející z geografie dopravy a je popisován jako odchylka dopravní cesty od přímé vzdálenosti. Deviatilita je definována jako poměr skutečné a nejkratší vzdálenosti bodů A a B (tzn. poměr mezi délkou linie a přímou vzdáleností počátečního a koncového bodu). Pokud se v akademických pracích objeví snaha o zohlednění tvaru komunikací v síťových analýzách, v naprosté většině je využito popisované deviatility. Deviatilita se užívá jako bezrozměrné číslo a lze ji dle Brinkeho [5] vyjádřit vzorcem:

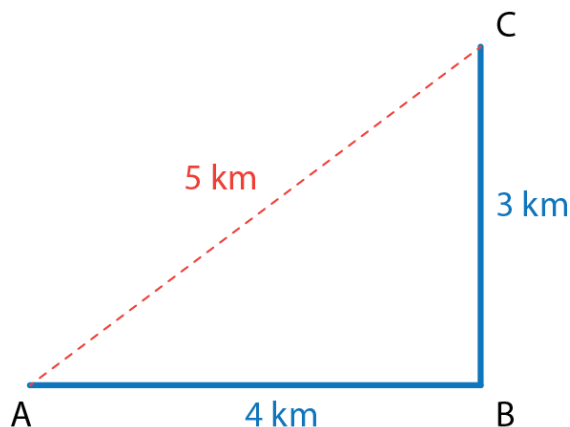
$$d = \frac{l_k}{l_p}$$

$d$  – deviatilita

$l_k$  – délka komunikace

$l_p$  – délka přímé spojnice mezi počátečním a koncovým bodem komunikace

Ilustrace výpočtu deviatility je patrná z obr. č. 3, který ukazuje postup výpočtu na segmentu linie tvořeného třemi body. Skutečná délka linie je 7 km, přímá vzdálenost počátečního a koncového bodu je 5 km, z toho plyne, že deviatilita dané linie je 1,4.



Obr. č. 3: Ilustrace výpočtu deviatility

$$d = \frac{l_k}{l_p} = \frac{4 + 3}{5} = 1,4$$

Z uvedeného postupu i příkladu je jasně patrné, že čím delší je skutečná vzdálenost počátečního a koncového bodu linie, tím větší je deviatilita.

#### 4.1.1. Postupy odvozené od deviatility

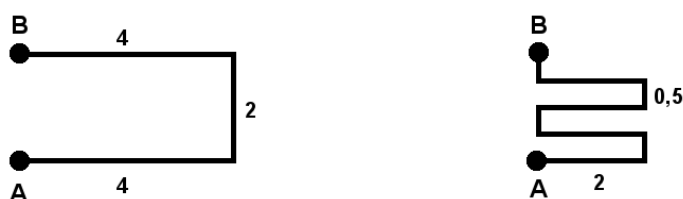
V jednotlivých pracích může být daná metoda drobně upravena, nebo může být použita jiná terminologie. Například Louthan [17] pojem deviatilita přímo neužívá, svůj postup popisuje na jednom místě své DP jako „rozdíl mezi skutečnou délkou úseku a vzdušnou vzdáleností koncových bodů úseku“, jinde jako „procentuální rozdíl mezi délkou přímky a skutečnou délkou úseku“. Bohužel skutečně užitý postup detailně nerozebírá, pouze dává nahlédnout do tabulky pro převod návrhové rychlosti na směrodatnou rychlost (návrhová a směrodatná rychlost viz kap. 5.4) s ohledem na zakřivení. V tabulce předpokládá zakřivení v řádech jednotek procent (uvádí intervaly 2 % a méně, 2 – 5 %, 5 % a více). Z této tabulky i textového popisu postupu je patrné, že užil (možná i nějakým způsobem upravenou) metodu deviatility.

Sladký [23] pojem deviatilita rovněž nepoužívá, nahrazuje ho pojmem „Index zakřivení linie“. Říká, že tento index vyjadřuje poměr mezi délkou linie vypočtenou

ze souřadnic počátečního a koncového bodu a skutečnou délkou linie. Metoda výpočtu tohoto indexu je tedy stejná, jako metoda výpočtu deviatility, proto se dá říci, že se jedná o totéž. Bohužel ani tento autor ve své práci nevěnuje pozornost rozboru vhodnosti daného postupu.

#### 4.1.2. Diskuse vhodnosti deviatility

Využití deviatility jako ukazatele složitosti tvaru komunikací pro potřeby síťových analýz však není vhodné. To lze dokumentovat velmi snadno na jednoduchém příkladu, např. na obrázku č. 4.



Délka	10	Délka	10
Vzdálenost AB	2	Vzdálenost AB	2
Deviatilita	5	Deviatilita	5

Obr. č. 4: Ilustrace nevhodnosti deviatility pro síťové analýzy

Jak je patrné z uvedených hodnot, délka linie je v obou případech stejná. Rovněž i vzdálenost počátečního a koncového bodu je stejná, tudíž i výsledná hodnota deviatility je totožná. Pokud by ale dané linie představovaly komunikace, je zcela patrné, že v druhém případě by byl pohyb pomalejší, díky častějšímu výskytu zatáček. Z tohoto důvodu lze deviatilitu (či jakékoli odvozené metody, které zohledňují pouze skutečnou délku linie a přímou vzdálenost počátečního a koncového bodu) označit za nevhodnou pro daný účel.

#### 4.2. Křivolakost

Velmi důležitým pojmem je křivolakost. Ta je chápána jako geometrická složitost komunikace. V obecném popisu se jedná o charakteristiku, která se velmi blíží deviatilitě (pojem používaný v geografii dopravy), avšak rozdíl je v odlišném matematickém vyjádření těchto dvou charakteristik. ČSN [8] definuje křivolakost jako podíl sumy absolutních hodnot středových úhlů změn směru trasy připadající na jednotku délky. Tímto způsobem vyjádřená složitost tvaru komunikace ještě nebyla ve spojení se síťovými analýzami a prostředím GIS využita, používá se především



v projektování pozemních dopravních staveb. Křivolakost lze dle ČSN vyjádřit vzorcem:

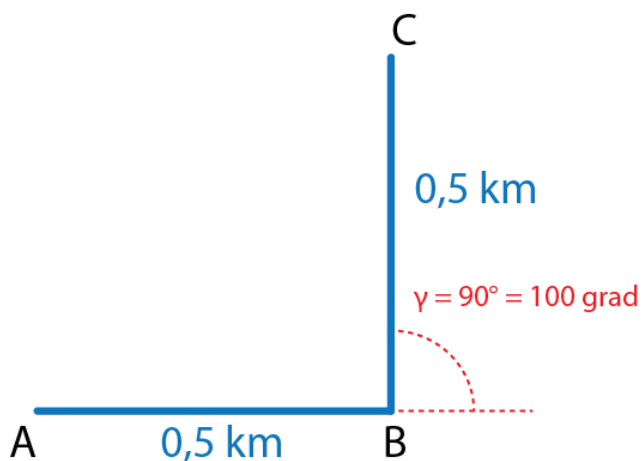
$$K = \frac{\sum_{i=1}^j \gamma_i}{L} ; [\text{grad/km}] \quad (2)$$

$K$  – křivolakost

$\gamma_i$  – úhlová změna v úseku  $i$

$L$  – délka linie

Ilustrace výpočtu křivolakosti pro segment linie tvořený třemi po sobě jdoucími body je názorně ukázána na obr. č. 5. Délka segmentu komunikace je 1 km, úhel ABC je  $90^\circ$ , což je 100 gradů, výsledná křivolakost tedy 100 grad/km.



Obr. č. 5: Ilustrace výpočtu křivolakosti

$$K = \frac{\gamma_i}{L} = \frac{100 \text{ grad}}{0,5 \text{ km} + 0,5 \text{ km}} = 100 \text{ grad/km}$$

Z uvedených matematických vztahů i názorného příkladu je patrné, že čím více je nutné měnit směr, tím je křivolakost, při zachování délky linie, větší.

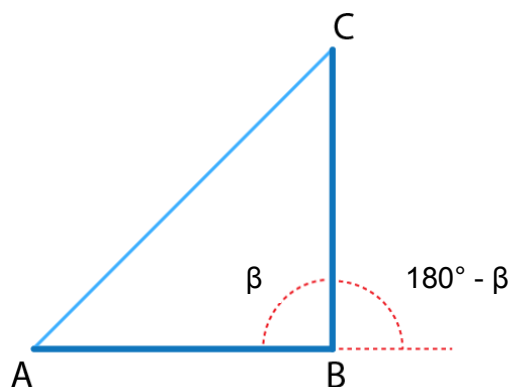
#### 4.2.1. Rozdíl mezi deviatilitu a křivolakostí

Přestože se výše zmíněné pojmy (deviatilita a křivolakost) snaží popsat stejnou vlastnost linie, značně se liší v matematickém přístupu a proto i ve svém dalším využití. Toho si všímá i Borchhardt [3], který ve své práci zavádí pojem křivolakost silniční trasy a matematicky jej definuje dvěma způsoby, a to právě výše uvedenými – jako poměr skutečné a přímé vzdálenosti bodů a jako součet absolutních hodnot úhlových změn směrového vedení trasy, vztažených k délce trasy.

Tímto rozdílem se ve svém článku zabývá Krajčovič [16]. Věnuje se tématu tvaru komunikací s ohledem na plynulost silniční trasy, což přispívá k bezpečnosti následného provozu. Jsou zde uvedeny obě zmíněné definice, včetně jejich vhodnosti pro využití pro daný účel. Autor zde říká, že využití deviatility je velmi sporné, protože ne zcela přesně vystihuje složitost silniční trasy, což dokumentuje schémata.

#### 4.2.2. Výpočet křivolakosti

Nevyřešenou otázkou zůstává princip výpočtu úhlové změny. Louthan [17] dokonce říká, že je to v prostředí GIS velice složité. To však není pravda. V prostředí GIS lze zjistit souřadnice jednotlivých lomových bodů linie. Pokud se algoritmus zaměří na trojici po sobě jdoucích bodů, tyto body tvoří hypotetický trojúhelník. Požadovaný úhel (resp. úhlová změna) pak je vlastně doplněk vnitřního úhlu trojúhelníku u prostředního bodu do 180° (viz obr. č. 6).



Obr. č. 6: Úhlová změna jako doplněk vnitřního úhlu v trojúhelníku

Postupů, jak zjistit daný úhel při znalosti souřadnic bodů je několik, přičemž mohou být i poměrně jednoduché – případ se dá vyřešit za použití středoškolské matematiky.

Jeden z postupů může vycházet z Kosinovy věty.

$$\beta = \arccos \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}$$

Další postup může vycházet z následujícího odvození:

Obsah trojúhelníku lze vypočítat z délek stran pomocí Heronova vzorce:

$$S = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$$

kde platí

$$s = \frac{a + b + c}{2}$$

Nebo pomocí dvou stran a jimi sevřeného úhlu

$$S = \frac{1}{2} ac \sin \beta$$

Spojením těchto vzorců se získá následující vztah pro úhel  $\beta$

$$\beta = \arcsin \frac{2\sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}}{ac}$$

kde samozřejmě stále platí

$$s = \frac{a + b + c}{2}$$

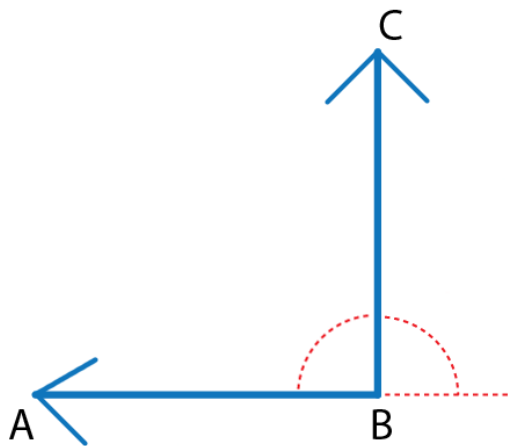
V těchto postupech se vychází ze znalosti délky tří stran. V daném případě však nejsou známy. Dají se však vypočítat se souřadnic jednotlivých bodů (které jsou v prostředí GIS známé) ze vztahu

$$|AB| = \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2}$$

Na základě souřadnic souřadnice

$$A[a_1, a_2] \quad B[b_1, b_2]$$

Poněkud jiný (i když velice podobný) postup lze zvolit v případě, že se trojice bodů nechápe jako trojúhelník, ale jako dva vektory (viz obr. č. 7).



Obr. č. 7: Úhel mezi vektory

Cílem zájmu je tedy úhel, který svírají tyto dva vektory. Z něj se pak dopočítá požadovaná úhlová změna (jako doplněk do  $180^\circ$ ). Úhel dvou vektorů se vypočítá dle vzorce

$$\cos\varphi = \frac{u \cdot v}{|u| \cdot |v|}$$

což se dá přepsat jako

$$\cos\varphi = \frac{u_1 v_1 + u_2 v_2}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2} \cdot \sqrt{v_1^2 + v_2^2}}$$

kde platí

$$u = (u_1, u_2) \quad v = (v_1, v_2)$$

Při znalosti souřadnic bodů se jednotlivé složky vektorů spočítají dle vztahu pro výpočet složek vektoru (v tomto případě vektor směřující z bodu A do bodu B)

$$u_1 = b_1 - a_1 \quad u_2 = b_2 - a_2$$

při souřadnicích

$$A[a_1, a_2] \quad B[b_1, b_2]$$

Pomocí těchto vztahů lze tedy poměrně jednoduše spočítat úhel mezi dvěma vektory při znalosti souřadnic bodů. V porovnání s postupy dle Kosinovy věty nebo obsahu trojúhelníka je postup dle vektorů jednodušší a bude dále využit ve vlastních skriptech.

### 4.3. Postupy odvozené z generalizačních algoritmů

Zkoumáním tvarů linií se zabývají i některé metody kartografické generalizace. Tvar komunikace je v tomto případě pouze ukazatelem, ze kterého vycházejí další generalizační postupy. Určité části těchto metod by mohly být využity i v síťových analýzách. Jedná se zejména o postupy aplikované v tzv. lokálních algoritmech. Po studiu příslušné literatury [2] však nemohl být žádný algoritmus prohlášen za využitelný.

### 4.4. Ostatní

Jak již bylo zmíněno v kap. 2, na mezinárodním poli již byla publikována celá řada odborných článků zkoumajících případnou souvislost mezi tvarem komunikace a nehodovostí. Příkladem může být článek Shankara a kol. [21]. Ten mezi geometrické charakteristiky, kterými popisuje tvar komunikace, řadí: počet

horizontálních zakřivení, nejvyšší a nejnižší horizontální rádius, počet vertikálních zakřivení a nejvyšší a nejnižší stoupání/klesání.

Této tematice se dlouhodobě věnuje např. i Hayness. Ten ve svém článku [14] mezi geometrické ukazatele řadí počet zatáček na kilometr, poměr skutečné a přímé vzdálenosti, podíl rovných úseků, celkový úhel zatočení na kilometr a střední úhel zatáček.

Tyto ukazatele jsou sice vhodné pro účel daných prací (vzájemné porovnání komunikací a sledování vztahu s nehodovostí), ale pro účel exaktního popisu tvaru jednotlivých komunikací vhodné nejsou.

## 5. Vazba na rychlost

V předešlé kapitole byl řešen způsob matematického vyjádření složitosti tvaru komunikací. Jak je všeobecné známo, k vypočtení rychlosti času pohybu je nutné znát délku dráhy a rychlost pohybu. Právě v rychlosti pohybu se musí „promítnout“ tvar komunikace. Tato vazba mezi tvarem komunikace a rychlostí pohybu je předmětem této kapitoly.

Vychází-li se ze známého vzorce

$$t = s/v$$

$t$  = čas

$s$  = dráha

$v$  = rychlost

je tedy nutné znát délku jednotlivých komunikací a rychlost pohybu po jednotlivých komunikacích. Délka jednotlivých komunikací je v prostředí GIS velmi dobře zjistitelná, je tedy třeba řešit především rychlost pohybu.

### 5.1. Dle zahraničních výzkumů

Vcelku jednoduchý pohled přinášejí zahraniční práce staršího data. Ty se sice vůbec nezabývaly tvarem komunikací, přesto dávají jistý náhled do rozdílů rychlostí pohybu dle jednotlivých tříd komunikací.

Jako příklad lze uvést práci autorů Gutiérreze a Urbana prezentovanou článkem *Accesibility in the European Union* z roku 1996 [13]. Cílem autorů bylo zjistit dopad budoucí transevropské silniční sítě. Hodnoty průměrných rychlostí zde byly stanoveny velmi jednoduše (viz tab. č. 1). Důležité je však zmínit, že se jedná o hodnoty značně průměrované; mnohdy se jedná o maximální povolenou rychlost v některých ze zemí EU. Přitom se nejedná o nedostatek – práce byla tvořena v evropském měřítku.

Typ silnice	Průměrná rychlost (km/h)
Dálnice	120
Rychlostní komunikace	110
Silnice první třídy	90
Ostatní silnice	40

Tab. č. 1: Průměrné rychlosti dle [4]

Dalším příkladem může být výzkum autorů Brainarda, Lovetta a Batemana shrnutý v článku *Using isochrone surface in travel-cost models* z roku 1997 [3]. Autoři se zde snažili vytvořit izochory dostupnosti na příkladu dopravní situace ve východní Anglii. Rychlosti pohybu stanovují dle typu komunikace a odlišují urbánní a rurální prostor (viz tab. č. 2). Vycházejí z dosavadních výzkumů jejich Oddělení Dopravy z let 1992 a 1993, které jim poskytly základní odhady průměrných rychlostí pro jednotlivé třídy komunikací. Dané hodnoty byly následně upraveny na základě jim známých cestovních časů. Bohužel zmiňované výzkumy se pro potřeby této práce nepodařilo dohledat.

Typ silnice	Průměrná rychlost (km/h)	
	Venkov	Město
Minor road	22	18
B-road single carriageway	39	19
B-road dual carriageway	58	29
A-road single carriageway	51	29
A-road single carriageway (trunk)	72	40
A-road dual carriageway	80	40
A-road dual carriageway (trunk)	87	45
Motorway	101	56

Tab. č. 2: Průměrné rychlosti dle [13]

Na těchto hodnotách jsou zřejmé velmi nízké rychlosti v urbánním prostoru – to je způsobeno velmi vysokou intenzitou provozu v dané zemi.

## 5.2. Dle Sladkého

Tato práce [23] je zaměřena na síťové analýzy pro potřeby IZS. Svůj postup při stanovování časů nutných k překonání komunikací autor shrnuje do dvou tabulek. V první (tab. č. 3) ukazuje jím zavedené atributy včetně jejich popisu a matematických vztahů. Ve druhé (tab. č. 4) pak uvádí jím užití rychlosti pohybu, avšak bez dalšího popsání původu těchto hodnot.



Atribut	Popis	Přidáno vrstvám
Rychlost	Teoretická rychlost jízdy po komunikaci.	Všem liniovým
Čas	Čas potřebný k překonání komunikace, vypočtený z atributů Shape length (délka linie automaticky spravovaná ArcGIS) a Rychlost.	Všem liniovým
CurvatureIndex	Index zakřivení linie. Číslo vyjadřující poměr mezi délkou linie vypočtenou ze souřadnic počátečního a koncového bodu linie a skutečnou délkou linie.	Cesta, Cesta neudržovaná, Dálnice, Silnice 1., 2., 3. Třídy, Ulice, Silnice bez čísla
Opravený čas	Čas potřebný k překonání komunikace, vypočtený z atributů Shape length a rychlost. Hodnota atributu Rychlost je v tomto případě snížena přenásobením atributem CurvatureIndex. Tyto hodnoty zohledňují zakřivení komunikací.	Cesta, Cesta neudržovaná, Silnice bez čísla
Rychlost běžného provozu	Rychlost běžného provozu na jednotlivých typech komunikací. Tento atribut byl zaveden pro zohlednění vlivu hustoty dopravy na rychlost jízdy.	Dálnice, Silnice 1., 2., 3. Třídy, Ulice, Mosty, Mosty D5
Opravený čas – den	Čas potřebný k překonání komunikace, vypočtený z atributů Shape length a rychlost běžného provozu. Hodnota atributu Rychlost běžného provozu je v tomto případě snížena přenásobením atributem CurvatureIndex. Tyto hodnoty zohledňují zakřivení komunikací a větší hustotu dopravy přes den.	Dálnice, Silnice 1., 2., 3. Třídy, Ulice, Mosty, Mosty D5
Opravený čas – noc	Ekvivalent atributu Opravený čas. V tomto případě má atribut zohledňovat kromě zakřivení komunikací i nižší hustotu dopravy v nočních hodinách.	Dálnice, Silnice 1., 2., 3. Třídy, Ulice,

Tab. č. 3: Zavedené atributy a jejich popis

Vrstva	Rychlost (km/h) ZZS – HZS	Rychlost běžného provozu (km/h) ZZS – HZS
Cesta	40 – 40	-
Cesta neudržovaná	20 – 20	-
Dálnice	160 – 130	130 – 110
Silnice 1. Třídy	110 – 90	90 – 70
Silnice 2. Třídy	90 – 70	70 – 50
Silnice 3. Třídy	70 – 70	50 – 50
Silnice bez čísla	60 – 60	-
Pěšina	4	-
Ulice	60 – 60	50 – 50
Mosty	Podle třídy navazující komunikace	Podle třídy navazující komunikace
Mosty D5	160 – 130	130 – 110

Tab. č. 4: Stanovení rychlostí

Jak je známo, vozidla IZS se při svém výjezdu pohybují značně rychleji než běžná vozidla, proto tento postup a jeho hodnoty nelze zcela využít. Zajímavá však je autorova práce s atributy, zejména pak násobení hodnoty rychlosti hodnotou tzv. indexu zakřivení (jedná se o deviatilitu, viz. kap. 4.1.1.).

### 5.3. Dle ČSN

V České republice existuje Česká státní norma [8], která definuje jak pojem křivolakost a uvádí jeho matematické vyjádření (viz kap. 4.2.), tak uvádí i vztah mezi křivolakostí komunikace a rychlostí pohybu po komunikaci. K tomu využívá další pojmy – návrhová a směrodatná rychlost.

#### Návrhová rychlost

Jedná se o základní určující parametr komunikace. Slouží k odvození návrhových prvků pro projektování pozemní komunikace. Udává největší rychlost průměrného vozidla, kterou lze bezpečně projet kterýmkoli úsekem navrhované komunikace za normálních atmosférických podmínek a bez ovlivnění provozem ostatních vozidel. Jinými slovy – jde o rychlost, vycházející z empirie i fyzikálních

zákonů, které přísluší přijatelná míra bezpečnosti provozu na pozemních komunikacích. Není tedy míněna jako rychlost, kterou se bude určité vozidlo pohybovat po komunikaci. Rovněž se nejedná o rychlost limitní. Závisí na územních podmínkách, přičemž ČSN rozeznává čtyři typy – rovinaté s přirozenými sklony terénu do 3 %, mírně zvlněné do 5 %, pahorkovité do 15 % a horské nad 15 %. Volí se dle konkrétních podmínek komunikace – na dálnicích a rychlostních silnicích v rozsahu 80 až 120 km/h, na silnicích v rozsahu 30 až 100 km/h a na místních komunikacích v rozsahu 30 až 80 km/h. Rychlost vozidel v dopravním proudu může být vyšší, než návrhová rychlost, ale může být i nižší. Závisí to na hustotě dopravního proudu (například při dopravní zácpě rychlost klesá k nule), na klimatických podmínkách (při mlze je rychlost rovněž malá), na složení dopravního proudu (těžká nákladní vozidla nebo v extrémním případě traktor mohou rychlost rovněž podstatně snížit) a na mnoha jiných okolnostech. Toto jsou však všechno faktory, které nelze pro daný účel práce modelovat. Bohužel ČSN neudává žádný postup, jak návrhovou rychlost určit.

#### Směrodatná rychlost

Stručně řečeno, jedná se o odhad provozní rychlosti. Je to očekávaná rychlost osobních automobilů umožněná dopravně-technickým stavem úseku komunikace, kterou nepřekračuje 85 % jinak neomezovaných řidičů na mokré vozovce. Nejvyšší hodnota směrodatné rychlosti je omezena nejvyšší povolenou rychlostí dle zákona o provozu na pozemních komunikacích. Je větší, nebo alespoň stejná jako návrhová rychlost a měla by být bližší skutečné rychlosti vozidel. Pro směrově nerozdělené komunikace závisí na křivolakosti. Na rozdíl od návrhové rychlosti by tak směrodatná rychlost měla zohlednit kombinované působení jednotlivých směrových vlastností. V praxi jde o zachycení faktu, že tam, kde ve směrovém řešení komunikace převažují přímé úseky nebo oblouky o velkém poloměru, lze předpokládat větší rozdíl skutečné rychlosti a návrhové rychlosti oproti místům, kde jsou limitní hodnoty návrhových prvků.

Pro dálnice a směrově rozdělené komunikace ČSN předepisuje směrodatnou rychlost pouze v závislosti na návrhové rychlosti, tedy zcela bez ohledu na křivolakost nebo jiné faktory.

Návrhová rychlost v km/h	100	90	80	70
Směrodatná rychlost v km/h	100	90	90	80

Tab. č. 5: Směrodatná rychlost pro směrově rozdělené silnice s neomezeným přístupem

Návrhová rychlost v km/h	120	100	80
Směrodatná rychlost v km/h	130	110	100

Tab. č. 6: Směrodatná rychlost pro dálnice a rychlostní silnice

Pro směrově nerozdělené komunikace ČSN zavádí pojem křivolakost (definice viz kap. 4.2). Směrodatná rychlost pak závisí na křivolakosti.

Návrhová rychlost v km/h	Směrodatná rychlost v km/h při křivolakosti		
	249 a méně	250-315	316 a více
50	70	70	60
60	80	80	70
70	90	80	70
80	90	80	80
90	90	90	90

Tab. č. 7: Směrodatná rychlost pro směrově nerozdělené komunikace

#### 5.4. Dle Louthana

Rychlosti pohybu po silnicích se ve své diplomové práci poměrně zajímavě věnuje Louthan [17]. Vychází z ČSN [8], pracuje tedy s pojmy návrhové a směrodatné rychlosti. Pouze u křivolakosti obchází danou definici – říká, že v prostředí GIS je velice složité vypočítat úhlové změny v každé zatáčce. Proto danou definici nahrazuje postupem blízkým deviatilitě – vypočítává procentuální rozdíl mezi skutečnou přímou vzdáleností počátečního a koncového bodu linie a skutečnou délkou komunikace (viz kap. 4.1.1.). Výslednou hodnotu pak zahrnuje do tabulek, které vytvořil na základě ČSN a upravil dle svého terénního výzkumu. Důležité jsou zejména autorem vytvořené (resp. částečně převzaté z ČSN a autorem upravené) tabulky návrhové a směrodatné rychlosti v závislosti na typu, sklonu a zakřivení komunikace.

Typ úseku		Druh území podle sklonu			
		Rovinné (do 3 %)	Mírně skloněné (3 - 5 %)	Pahorkovité (5 - 10 %)	Horské (nad 10 %)
		Rychlost dle sklonu			
Dálnice a rychlostní silnice		110	110	100	90
Směrově rozdělené komunikace v obci		80	80	80	70
Silnice I. třídy		80	75	70	60
Silnice II. třídy		70	65	60	55
Silnice III. třídy		65	60	55	50
Účelové komunikace		40	35	35	30
Zpevněná cesta		20	20	20	15
Polní a lesní cesta, pěšina, stezka		20	20	20	15
Most, přemostění, podjezd, zúžení		60	60	50	40
Obec	Hlavní průjezd	40	40	30	20
	Ulice	35	30	30	20
Úsek komunikace se železničním přejezdem		40	40	30	30

Tab. č. 8: Hodnoty návrhových rychlostí pro ohodnocení na základě typu a sklonu komunikace

Návrhová rychlost	Směrodatná rychlost
70	80
80	90
100	110
110	120

Tab. č. 9: Směrodatné rychlosti pro směrově rozdělené silnice

Návrhová rychlost	Směrodatná rychlost při zakřivení		
	2 % a méně	2 – 5 %	5 % a více
15	25	25	25
20	30	30	30
30	40	40	35
35	45	45	40
40	50	50	45
50	60	60	55
55	65	65	60
60	70	70	60
65	75	70	60
70	80	80	70
75	85	80	75
80	90	80	80

Tab. č. 10: Směrodatné rychlosti dle zakřivení komunikace

Je zřejmé, pro určení návrhové rychlosti je třeba zjistit sklon komunikace. Autor dále ve svém nástroji dává možnost nevyužívat sklon, ale bohužel již neuvádí další postup přiřazování rychlostí.

### 5.5. Navržený postup

Jak je patrné, pro co nejpřesnější ohodnocení komunikací je třeba zohlednit řadu parametrů – třídu silnice, sklon, křivolakost. Tato práce je zaměřena pouze na křivolakost, v základu tedy neřeší další zmíněné faktory. Nicméně pro správné využití vypočtené křivolakosti je nutné si všimnout i dalších faktorů. Proto se navrhuje využít křivolakost vypočítanou dle kap. 4.2.2. ve spojení s Louthanovými modely pro určení návrhové a směrodatné rychlosti. Jelikož ale tento autor používá odlišnou metodu výpočtu zakřivení komunikace, je nutné jeho postupy lehce upravit.

Jeho tabulka pro určení směrodatné rychlosti dle zakřivení komunikace (tab. č. 10) pracuje se zakřivením určeným procentuálním rozdílem skutečné délky komunikace a přímé vzdálenosti počátečního a koncového bodu. Právě tento faktor je vhodné nahradit výpočtem křivolakosti dle kap. 4.2.2. Výsledná tabulka pro určení směrodatné rychlosti musí být upravena. Toto upravení je provedeno dle tab. č. 7 – směrodatná rychlost dle ČSN.

Návrhová rychlost	Směrodatná rychlost při křivolakosti		
	249 a méně	250-315	316 a více
15	25	25	25
20	30	30	30
30	40	40	35
35	45	45	40
40	50	50	45
50	60	60	55
55	65	65	60
60	70	70	60
65	75	70	60
70	80	80	70
75	85	80	75
80	90	80	80

Tab. č. 11: Směrodatná rychlost dle návrhové rychlosti a křivolakosti

## 6. Implementace

Jak bylo uvedeno v úvodu práce, zvolené algoritmy budou implementovány v prostředí GIS. Bylo zvoleno prostředí ArcGIS od společnosti ESRI. Jako implementační programovací jazyk byl zvolen Python. Více v následujících kapitolách.

### 6.1. Software pro GIS

V současné době existuje na poli GIS software celá řada produktů. Mezi největší světové distributory patří firmy Autodesk, Esri, Intergraph, Mapinfo ad. Na základě funkcionality lze software pro GIS rozdělit do následujících skupin:

- Profesionální GIS – takto lze označit plně funkční systém sloužící pro pořizování dat, jejich editaci, administraci databází; je rozšířen o nástroje prostorových analýz a další speciální nástroje. Jako příklad lze uvést Smallworld GIS (GE) nebo kombinace produktů ArcGIS (ESRI).
- Desktop GIS – jedná se o nejvíce rozšířenou formu GIS systémů, pokrývající hlavní podíl uživatelů GIS. Funkce jsou primárně zaměřeny na používání dat (spíše než na jejich pořizování), obsahují tedy nástroje pro tvorbu map, grafů a dalších výstupů, provádění prostorových analýz atd. Známými příklady jsou GeoMedia (Intergraph), ArcGIS for Desktop (ESRI), AutoCAD Map 3D (Autodesk). Řada desktop řešení je k dispozici i jako freeware, např. GRASS nebo Quantum GIS.
- Příruční GIS - Samostatnou kategorii lze vyčlenit pro GIS programy pro mobilní zařízení (PDA, tablety, mobilní telefony, specializovaná zařízení). Příkladem může být např. ArcPAD (ESRI).
- GIS prohlížečky - Programy označované jako GIS prohlížečky jsou primárně určeny zejména pro prohlížení a jednoduché dotazování. Bývají tedy velmi jednoduché a uživatelsky přívětivé. Do této kategorie se řadí např. ArcGIS Explorer (ESRI) nebo GeoMedia Viewer (Intergraph).
- Internet GIS - S rozvojem informačních technologií v posledních letech (rozšíření PC, rozmach internetu, atd.) stále vzrůstá poptávka po geografických informacích a díky tomu vzrůstá i význam jejich šíření na internetu. K tomu



slouží mapové servery, příkladem mohou být řešení ArcGIS for Server (ESRI), GeoMedia Web Map (Intergraph) či ERDAS APOLLO (ERDAS).

V posledních letech lze sledovat trend tzv. „Cloud GIS“. Tento směr nelze zařadit do zmíněného klasického členění GIS software, ani ho nelze prohlásit za další kategorii. Jedná se spíše o novou, celkovou koncepci GIS. Tento směr prožívá dynamický růst a dle mnohých představuje budoucnost GIS. Nicméně daného výzkumu se netýká.

## 6.2. ArcGIS

Jak již bylo uvedeno, jako implementační prostředí je zvolen software firmy ESRI – ArcGIS for Desktop. Důvodem pro tuto volbu je zejména jeho rozšíření a možnosti programování a skriptování.

ArcGIS for Desktop je komplexní nástroj pro správu dat, prostorové analýzy i tvorbu výstupů. Existují tři úrovně, které se liší funkcionalitou [1]:

- Basic – je základním produktem. Disponuje základními nástroji pro tvorbu, správu a editaci dat, slouží zejména k zobrazování dat, základním analýzám a tvorbě výstupů.
- Standard – Poskytuje navíc zejména správu a editaci dat uložených v geodatabázi (nejčastěji relační databáze SDE uložená na databázových serverech Oracle, Microsoft SQL atp.). Významné jsou i nástroje pro kontroly topologie dat.
- Advanced – jedná se o nejvyšší možnou úroveň. Obsahuje navíc zejména nástroje pro pokročilou správu databází a kompletní sadu nástrojů pro pokročilé analýzy dat. Rovněž obsahuje pokročilejší nástroje pro vytváření mapových výstupů a pro zvýšení produktivity práce.

Produkty ArcGIS for Desktop jsou tvořeny zejména aplikacemi ArcMap a ArcCatalog. ArcMap je centrální aplikace ArcGIS for Desktop. Slouží pro všechny mapové úlohy, včetně prostorových analýz a editace dat. ArcCatalog slouží především pro organizaci, správu a vyhledávání dat GIS i tvorbu a správu metadat. Významné je rovněž i využití v práci s geodatabázemi – aplikace umožňuje jejich návrh, tvorbu a práci s nimi.

Funkcionalitu všech těchto produktů lze rozšířit přidáním nejrůznějších nadstaveb, vyvinutých Esri i dalšími organizacemi. Mimoto si uživatelé mohou s využitím knihovny softwarových komponent ArcObjects vytvořit nadstavby vlastní. Tyto uživatelské nadstavby a nástroje mohou uživatelé vyvíjet ve standardních programovacích rozhraních, jako je .NET (Visual Basic .NET a C#), Java, Visual C++.

Veškeré nástroje a funkce pro zpracování prostorových dat (angl. geoprocessing) jsou v prostředí ArcGIS for Desktop organizovány v tzv. ArcToolbox. Krom jednoduchého použití jednotlivých nástrojů je možnost vytvářet složitější postupy pomocí aplikace ModelBuilder. Rozhraní aplikace ModelBuilder poskytuje grafické modelovací prostředí pro návrh a implementaci modelů zpracování prostorových dat, které mohou zahrnovat nástroje, skripty a data. Modely jsou diagramy postupů zpracování dat, které organizují a propojují řadu nástrojů a dat za účelem vytvoření progresivních procedur a postupů zpracování dat. Do modelu lze přetáhnout nástroje a datové sady, propojit je a vytvořit tak uspořádanou posloupnost kroků pro provádění komplexních úloh GIS.

Pro náročnější pracovní postupy lze využít integrovaný programovací jazyk Python. Jeho prostřednictvím lze přistupovat k různým funkcím ArcGIS for Desktop a zahrnout je do komplexních modelů pro automatizovanou správu dat nebo pro pokročilé výpočty. ArcGIS for Desktop dále podporuje .NET (Visual Basic .NET a C#), Java, Visual C++, nicméně Python se těší největší podpoře (např. díky integrovanému tzv. „Python oknu“, knihovně Arc.py atd.) a je ESRI označován za základní programovací jazyk.

Hlavním důvodem po vybrání software ArcGIS je jeho všeobecné rozšíření a časté používání v naprosté většině institucí napříč obory – od akademické sféry (využíván a vyučován na všech předních VŠ), přes jednotlivé složky IZS, státní správu (ministerstva, státní instituce a úřady jako ČHMÚ, CENIA, AOPK, ČSÚ, ČÚZK, atd.) a samosprávu (veškeré krajské úřady, mnohé obecní úřady) až po soukromé firmy (ČEZ, DHL, atd.). V posledních letech se systém ArcGIS stal standardem v oblasti GIS.

### 6.3. Python

Python je moderní skriptovací programovací jazyk. Díky svým základním vlastnostem je velice často používaný a oblíbený. Jedná se rovněž i o hlavní podporovaný skriptovací jazyk v ArcGIS for Desktop.

Skriptovací jazyk Python začal vyvíjet v roce 1990 Guido van Rossum na Stichting Mathematisch Centrum (CWI) v Nizozemsku. Hlavní platformu autor převzal z jazyka ABC, který dosud vyvíjel. V roce 1995 se vývoj Pythonu přesunul do Corporation for National Research Initiatives (CNRI) v USA. V roce 2000 byl vývojáři Pythonu založen tým BeOpen PythonLabs, který se přesunul pod firmu Zope Corporation. V roce 2001 byla založena nezisková organizace Python Software Foundation (PSF), která tvoří základ vývojářů Python dodnes [22].

Mezi hlavní znaky Pythonu patří to, že je objektově orientovaný, interpretovaný a platformě nezávislý (je vyvíjen jako open source projekt, nabízí instalační balíčky pro všechny běžné platformy – Windows, Unix, Mac OS). Mezi další významné vlastnosti patří vysoká modularita, jednoduchá syntaxe, snadný způsob integrace s dalšími programovacími jazyky, existence velkého množství knihoven a modulů (včetně výkonných pro numerické výpočty a práci s grafikou), podpora tvorby webových aplikací, snadná rozšiřitelnost o moduly C/C++ pro operace vyžadující vysoký výpočetní výkon, či snadný vývoj grafického uživatelského rozhraní [11].

Python se dále vyznačuje velmi jednoduchou a snadně čitelnou syntaxí kódu. V porovnání s dalšími jazyky má odlišnou blokovou strukturu kódu – v jiných jazycích se blokové struktury (např. určení těla cyklu, podmínky nebo funkce) definují uzavíráním kódu do závorek, v pythonu se využívá mezer a odsazování kódu od začátku řádku.

#### 6.3.1. Python v produktech ESRI

Počínaje verzí 9.0 byl Python zaveden jako skriptovací jazyk do produktů ArcGIS. Pro zpracování geografických dat a řešení prostorových úloh (tzv. geoprocessing) je v ArcGIS k dispozici několik jazyků, nicméně Python je od verze 10.0 Python označován jako základní. To se projevuje zejména v míře podpory jednotlivých jazyků – pro práci s Pythonem je k dispozici tzv. Python okno přímo

v aplikaci ArcMap, knihovna Arcpy, či široká nápověda v rámci nápovědy k produktu ArcGIS for Desktop.

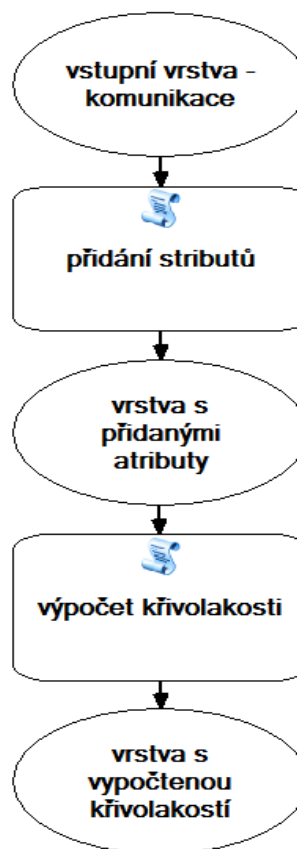
### 6.3.2. Arcpy

Arcpy je základní síťový balíček (angl. Site package) sloužící k přístupu k funkcím ArcGIS. Byl uveden ve verzi 10, v předešlých verzích se pracuje s komponentou geoprocessor. Pro přístup k jednotlivým funkcím lze využívat moduly, třídy nebo volat funkce samotné.

### 6.4. Návrh kódu

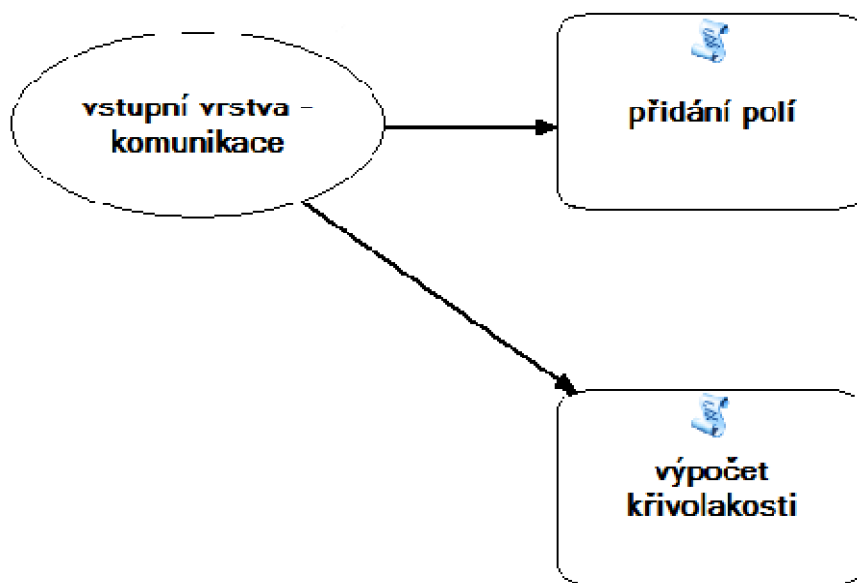
Byly vytvořeny skripty v jazyce Python a s využitím knihovny Arcpy. Dané skripty byly tvořeny tak, aby byly logicky členěny dle své funkce – celý postup není řešen pomocí jednoho skriptu, ale je rozdělen do jednotlivých dílčích skriptů dle dané funkce. Prvotní logický návrh modelu (tak, jak by vypadal nástrojový model v aplikaci ModelBuilder v prostředí ArcGIS) vypadá následovně:

1. Vstupní data - linie komunikací
2. První skript – přidání atributů – skript vezme vstupní data, přidá požadované atributy
3. Výsledkem je nová vrstva – linie komunikací s požadovanými atributy
4. Druhý skript – výpočet křivolakosti – skript vezme vrstvu komunikací s vloženými poli a provede výpočet křivolakosti
5. Výsledkem je nová vrstva, obsahující vypočtenou křivolakost pro každou linii



Obr. č. 8: První návrh modelu

Tento postup však generuje mnoho dílčích pracovních vrstev, proto je přikročeno k využití funkce SetValue – nahrazování stávajících hodnot v datech. Výhodou tohoto přístupu je fakt, že nevznikají nové vrstvy, pouze se modifikuje stávající. V podobném znázornění jej lze zaznamenat následovně:



Obr. č. 9: Princip skriptu

1. Načtení vstupních dat – vrstva komunikací
2. Přidání polí – skript načte vstupní vrstvu a přidá do ní nová pole.
3. Výpočet křivolakosti – skript načte vstupní vrstvu (do které byly v předešlém kroku přidány pole), provede výpočet křivolakosti a výsledné hodnoty zapíše do přidaných polí.

Výsledkem tohoto postupu tedy není nově vytvořená vrstva, ale modifikovaná vstupní vrstva.

## 6.5. Popis skriptu

### 6.5.1. Přidání polí

Každý skript v jazyce Python začíná importem požadovaných modulů. V tomto případě je potřebný pouze modul Arcpy. Ten umožní přistupovat k funkcím prostředí ArcGIS.

```
import arcpy
```

Dále jsou do skriptu načtena vstupní data – liniová vrstva komunikací. To umožní práci s touto konkrétní vrstvou.

```
lineFC = arcpy.GetParameter(0)
```

Následně jsou přidávána jednotlivá pole. Do těchto polí budou následně další skripty ukládat požadované výsledky daných výsledků.

Pole „uhlZmena“ a „kriv“ se váží na výpočet křivolakosti. Do pole „uhlZmena“ jsou dalším skriptem zaznamenávány hodnoty součtu úhlových změn, vyjadřuje tedy celkovou úhlovou změnu jedné linie. Do pole „kriv“ jsou pak zapisovány výsledné hodnoty křivolakosti pro jednotlivé linie.

```
fieldName = "uhlZmena"  
fieldAlias = "uhlovaZmena"  
arcpy.AddField_management(lineFC, fieldName, "FLOAT", "", "", "",  
fieldAlias, "NULLABLE")  
  
fieldName = "kriv"  
fieldAlias = "krivolakost"  
arcpy.AddField_management(lineFC, fieldName, "FLOAT", "", "", "",  
fieldAlias, "NULLABLE")
```

### 6.5.2. Křivolakost

Tento skript se stará o výpočet křivolakosti dle definice v kap. 4.2.2. pro jednotlivé komunikace. Načítá tedy úhlové změny při průběhu komunikace a následně počítá poměr tohoto součtu s celkovou délkou komunikace. Přestože např. Louthan [17] uvádí, že výpočet úhlových změn je v prostředí GIS velmi složitý, není tomu tak.

Zde je výpočet úhlové změny řešen na základě faktu, že každá linie je určena lomovými body. Skript bere trojice bodů  $P_i$ ,  $P_{i+1}$  a  $P_{i+2}$  a vypočítává úhel u bodu  $P_{i+1}$ , přičemž požadovaný úhel změny směru je doplněk úhlu u bodu  $P_{i+1}$  do  $180^\circ$ .

Díky faktu, že v prostředí GIS lze zjistit souřadnice jednotlivých lomových bodů linie, tento výpočet lze řešit několika postupy. Byl zvolen postup pomocí vektorů. Úhel u bodu  $P_{i+1}$  je tedy počítán jako úhel vektorů  $P_{i+1}, P_i$  a  $P_{i+1}, P_{i+2}$ .

Při znalosti souřadnic bodů se pak již za pomoci běžné středoškolské matematiky vypočítá úhel daných vektorů, tj. dle vzorce uvedeného v kap. 4.2.2.

Celý skript je psán s důrazem na co nejlepší srozumitelnost, všechny matematické postupy jsou tedy rozepsány, přestože by mohly být v praxi často zkráceny. To mohlo snížit časovou náročnost skriptu, nicméně by skript ztratil na přehlednosti a srozumitelnosti. Daný skript tedy vypadá následovně. Nejprve je nutné importovat všechny potřebné moduly.

```
import arcpy, os, sys, math, numpy
from arcpy import env
```

Dále dochází k načtení vstupních dat.

```
lineFC = arcpy.GetParameter(0)
```

V dalším kroku jsou skriptu sděleny názvy polí, do kterých budou zapisovány výsledky (jedná se o pole přidána prvním skriptem).

```
field1Name="uhlZmena"
field2Name="kriv"
```

Dále je vytvořen speciální objekt `dsc`, který slouží k popisu dat. Do něj jsou načtena vstupní data. Je vytvořen kursor. Toho se v Arcpy využívá pro procházení dat nebo jejich přepisování. V tomto případě bude sloužit k zapisování vypočtených hodnot.

```
dsc = arcpy.Describe(lineFC)
shapeFieldName = dsc.ShapeFieldName
updateRows = arcpy.UpdateCursor(lineFC)
```

V dalším kroku je zaveden cyklus typu for. Ten slouží k procházení dat po jednotlivých prvcích (/záznamech/řádcích), v tomto případě bere vždy jednu linii. Pro ni vytvoří seznam souřadnic jednotlivých lomových bodů linie – vertexList. Nejprve je vytvořen prázdný a následně jsou do něj pomocí vnořeného cyklu typu for zapisovány souřadnice jednotlivých bodů.

```
for updateRow in updateRows:
    vertexList = []
    shapeObj = updateRow.getValue(shapeFieldName)
    partObj = shapeObj.getPart(0)
    for pointObj in partObj:
        vertexList.append((pointObj.X, pointObj.Y))
```

Pro účely dalšího využití jsou dále určeny proměnné i (vyjadřuje pořadí právě zkoumaného bodu), angularChange (úhlová změna) a averageCurvature (křivolakost). Rovněž je zjištěn celkový počet bodů linie.

```
vertexCount = len(vertexList)
i = 0
angularChange=0
averageCurvature=0
```

Dále je využit vnořený cyklus typu while. Takto nastavená podmínka zajišťuje, že algoritmus prochází všechny trojice bodů linie tak, že začíná s první trojicí (počáteční bod, druhý bod, třetí bod) a končí s poslední trojicí (druhý bod od konce, předposlední bod a koncový bod).

```
while i + 3 <= vertexCount:
```

Následně tedy skript pracuje pouze nad trojicí bodů. Nejprve jsou načteny jejich souřadnice x a y, k tomu je využit připravený seznam souřadnic bodů (vertexList) a pořadí bodu (i).

```
x1 = vertexList[i][0]
y1 = vertexList[i][1]
x2 = vertexList[i + 1][0]
y2 = vertexList[i + 1][1]
x3 = vertexList[i + 2][0]
y3 = vertexList[i + 2][1]
```



V dalším kroku jsou vypočteny jednotlivé složky vektorů  $P_{i+1}, P_i$  a  $P_{i+1}, P_{i+2}$ . Zde je třeba věnovat pozornost pořadí bodů – jelikož se zkoumá úhel u bodu  $P_{i+1}$  (tzn. prostředního z trojice), zkoumá se úhel mezi vektory  $P_{i+1}, P_i$  a  $P_{i+1}, P_{i+2}$  a tudíž jsou složky vektorů odlišné od standardního užívání.

$$\begin{aligned} u_1 &= x_1 - x_2 \\ u_2 &= y_1 - y_2 \\ v_1 &= x_3 - x_2 \\ v_2 &= y_3 - y_2 \end{aligned}$$

Jsou tedy zjištěny hodnoty jednotlivých složek vektorů a je možné přistoupit k výpočtu dle vzorce pro výpočet úhlu mezi vektory. Jak již bylo zmíněno, skript je vytvořen s ohledem na srozumitelnost – jednotlivé výpočty jsou tedy rozepsány, přestože by bylo možné je v určitých případech realizovat rychleji.

Vychází se tedy ze vzorce pro výpočet úhlu mezi vektory, který zní

$$\cos\varphi = \frac{u_1 v_1 + u_2 v_2}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2} \cdot \sqrt{v_1^2 + v_2^2}}$$

Pro přehlednost je tedy vzorec rozdělen na jednotlivé části. Nejprve je spočten čitatel, poté obě části jmenovatele a jmenovatel samotný. Následně je spočten daný cosinus.

$$\begin{aligned} \text{cit} &= (u_1 * v_1) + (u_2 * v_2) \\ \text{jmen1} &= \text{math.sqrt}((u_1 * u_1) + (u_2 * u_2)) \\ \text{jmen2} &= \text{math.sqrt}((v_1 * v_1) + (v_2 * v_2)) \\ \text{jmen} &= \text{jmen1} * \text{jmen2} \\ \text{cosfi} &= \text{cit} / \text{jmen} \end{aligned}$$

Dále je pomocí funkce arccos modulu numpy vypočten samotný úhel. Ten je však díky vlastnostem nástroje vypočten v radiánech. Dle vztahu mezi radiány a grady (výsledný úhel je požadován v gradech) je tedy úhel převeden do gradů. Tím je získán úhel mezi vektory. Požadovaný úhel, představující úhlovou změnu, je doplněk vypočteného úhlu do  $180^\circ$  (200 grad). Dále je tedy proveden dopočet.

$$\begin{aligned} \text{fiRad} &= \text{numpy.arccos}(\text{cosfi}) \\ \text{fiGrad} &= \text{fiRad} * 200 / \text{math.pi} \\ \text{fiGrad} &= 200 - \text{fiGrad} \end{aligned}$$

Tímto způsobem je tedy vypočtena úhlová změna pro danou trojici bodů. Aby mohl být zjištěn součet těchto změn pro všechny trojice bodů (tj. pro celou linii), je následně zjištěná hodnota přičtena k proměnné `angularChange`. Tím je zajištěno potřebné načítání úhlových změn. Aby se mohl daný výpočet aplikovat na další trojici bodů, je proměnné `i` přičtena 1. Tím se celý výpočet posune o jeden bod.

```
angularChange=angularChange+fiGrad  
i = i + 1
```

Když algoritmus projde všechny trojice po sobě jdoucích bodů (skončí cyklus `while`), je vypočtena křivolakost. Jak již bylo zmíněno, jedná se o poměr mezi celkovou úhlovou změnou a délkou linie. Protože výsledek je požadován v `grad/km` a délka linie je popsána v metrech, je nutné zajistit převod mezi těmito jednotkami.

```
averageCurvature=angularChange/shapeObj.length*1000
```

Tímto postupem je tedy vypočtena hodnota křivolakosti pro zkoumanou linii. V posledním kroku se tedy vypočtené hodnoty zapíše do příslušných polí (pole přidaná prvním skriptem). Jak již bylo uvedeno, zapisují se hodnoty celkové úhlové změny a celkové křivolakosti. Zapsání hodnot je docíleno pomocí funkcí `setValue` a `updateRow`.

```
updateRow.setValue(field1Name, angularChange)  
updateRow.setValue(field2Name, averageCurvature)  
updateRows.updateRow(updateRow)
```

## 7. Testování

Jak bylo uvedeno v kap. 5.5, předmětem práce není co nejreálnější ohodnocení komunikací, ale co nejpřesnější matematické vyjádření složitosti tvaru komunikace. To však se záměrem dalšího využití v praktických úlohách síťových analýz. Proto bylo navrženo další využití ve spojení s modelem Louthana, upraveného dle metody výpočtu křivolakosti (viz kap. 5.5.). Testování navrženého postupu na konkrétních příkladech může doložit potřebnost zohledňování takových parametrů komunikace, jako je její tvar.

Louthan ve své práci prováděl testování na čtyřech příkladech různých tras – na silnicích různé délky, typu, zakřivení i na územích s různým sklonem. Dané trasy testoval na jím vytvořeném modelu a výsledky porovnával s jím provedeným terénním výzkumem. Ten spočíval ve fyzickém projetí daných tras dvěma různými automobily a dvěma různými řidiči, přičemž údaje o jízdách byly zaznamenávány pomocí GPS přístrojů GARMIN GPSMAP 60CSx a GARMIN eTrex Legend. Výsledky jeho modelu a terénního průzkumu rovněž porovnával s hodnotami získanými pomocí veřejně dostupných internetových plánovačů cest [17].

Jelikož pro případné využití při výzkumu dostupností je navrženo vytvořený algoritmus na výpočet křivolakosti použit ve spojení s upraveným Louthanovým modelem, je velice vhodné aplikovat tento postup na jím testované trasy.

Pro testování byl tedy převzat Louthanův model pro stanovení návrhových rychlostí na základě sklonu a jeho model pro určení směrodatných rychlostí, upravený pro odlišnou metodu výpočtu křivolakosti (viz kap. 5.5). V prostředí ArcGIS for Desktop byly provedeny stejné síťové analýzy. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. č. 12.

Zdroj	délka	Průměrná rychlost	Čas
<b>Olomouc – Mohelnice (rychlostní komunikace; převýšení 48 m; délka 29,4 km)</b>			
Mapy.cz	29,5	88,5	20
Maps.google.cz	29,6	98,7	18
ViaMichelin	29	102,3	17
Louthan – DMÚ 25*	29,33	85	20:42
Louthan – DMÚ 25	29,33	109,5	16:04
Louthan – DMÚ 200	28,50	110	15:32
Louthan – terénní průzkum	29,41	112	15:43
Bartoš – DMÚ 25	29,33	109,5	16:04
Bartoš – DMÚ 200	29,41	110	15:32
<b>Mohelnice – Moravská Třebová (silnice I. třídy; převýšení 295 m; délka 18,7 km)</b>			
Mapy.cz	18,8	75,2	15
Maps.google.cz	18,6	74,4	15
ViaMichelin	20	66,6	29
Louthan – DMÚ 25*	18,68	73,9	15:10
Louthan – DMÚ 25	18,68	82,5	13:35
Louthan – DMÚ 200	18,58	81	13:46
Louthan – terénní průzkum	18,7	81	13:52
Bartoš – DMÚ 25	18,68	81,5	13:45
Bartoš – DMÚ 200	18,58	81,3	13:43
<b>Topolany – Drahanovice (silnice II. třídy; převýšení 25 m; délka 8,2 km)</b>			
Mapy.cz	8,2	41	12
Maps.google.cz	8,1	54	9
ViaMichelin	9	49	11
Louthan – DMÚ 25*	8,16	50,3	9:44
Louthan – DMÚ 25	8,16	64,7	7:34
Louthan – DMÚ 200	8,15	67,4	7:15
Louthan – terénní průzkum	8,2	66,6	7:23
Bartoš – DMÚ 25	8,16	65,4	7:29
Bartoš – DMÚ 200	8,15	67	7:18
<b>Bohuslavice – Vilémov (silnice III. třídy; převýšení 57 m; délka 3,3 km)</b>			
Mapy.cz	3,4	34	6
Maps.google.cz	3,3	66	3
ViaMichelin	4	60	4
Louthan – DMÚ 25*	3,28	54	3:38
Louthan – DMÚ 25	3,28	60,5	3:15
Louthan – DMÚ 200	3,69	57,2	3:52
Louthan – terénní průzkum	3,3	52,8	3:45
Bartoš – DMÚ 25	3,28	53,9	3:39
Bartoš – DMÚ 200	3,69	56,5	3:55

\*Louthanův starší výzkum, při kterém zohlednil pouze kategorie silnic

Tab. č. 12: Výsledné hodnoty testování

Z výsledných hodnot je patrné, že při využití postupů zohledňujících tvar komunikace se výsledky velice blíží realitě. Internetové plánovače tvarové charakteristiky (sklon komunikace, křivolakost) nezohledňují vůbec, proto jsou jejich výsledky reálnému stavu velice vzdáleny. Velmi zajímavé je především porovnání se starším Louthanovým výzkumem, který zohledňoval pouze třídy komunikací. Z uvedených hodnot jasně vyplývá, že zohledněním tvarových charakteristik lze dosáhnout mnohem přesnějších výsledků. Porovnání výsledků originální Louthanovy metody a metody navrhované v této práci nepřináší tak velký rozdíl, jako při porovnání ostatních metod. Přesto se ukazuje, že při výpočtu křivolakosti navrhovaným způsobem jsou výsledky realitě bližší.

## 8. Diskuze

Zohledněním tvaru komunikací v síťových analýzách se doposud zabývalo jen velmi málo prací. Ty, které prováděly síťovou analýzu, v naprosté většině tvar komunikací neřešily vůbec. Pokud se o to některá snažila, skončila u využití deviatility. Tento stav bohužel trvá dodnes.

Díky tomu může vyvstat otázka, zda je opodstatněné zabývat se tématem, kterým se dosud téměř nikdo nezabýval; které dosud stálo na okraji zájmu vědy i praxe. Tato otázka byla zodpovězena již několikrát – díky tomu, že význam síťových analýz stále stoupá a již dnes jsou nedílnou součástí některých důležitých odvětví společnosti (např. jednotky IZS), existuje poptávka po co možná nejpřesnějších výsledcích daných analýz. Je zcela jasné, že zohlednění tvaru komunikací k získávání stále přesnějších výsledků přispívá.

Jelikož předmětem práce nebylo sledování výškové členitosti území, což je potřebné k vhodnému stanovení návrhové rychlosti, je doporučen postup na základě vytvořeného algoritmu a modelu jiného autora. Jak bylo zjištěno při testování tohoto postupu na konkrétních trasách, lze tak dosáhnout velmi přesných výsledků.

Dalšího zpřesnění síťových analýz bude moci být dosaženo různými metodami. Jednou z nich jistě je zahrnutí velikostí směrových oblouků. Pro tento postup jsou však potřebná data s velmi podrobným zákresem vedení komunikace, proto je tento postup zatím velmi obtížně aplikovatelný. Přesnější a obsáhlejší data jsou další možností jak dané analýzy zpřesnit. Přesnější v podrobnosti zákresu, obsáhlejší v rovině obsažených atributů.

## 9. Závěr

Diplomová práce se věnovala vztahu mezi složitostí tvarů komunikací a síťovými analýzami. Cílem práce bylo určit způsob zohlednění tvaru komunikací v těchto úlohách.

Nejprve došlo k rozboru dostupných zdrojů relevantních pro danou práci. Bylo zjištěno, že dané problematice se věnovalo poměrně málo autorů a jedná se tak o pole relativně nepopsané.

V další části byl řešen způsob matematického vyjádření tvaru linií. Byl uveden a diskutován postup nejčastěji používaný – deviatilita. Výsledkem diskuze vhodnosti využití deviatility byl závěr, že tento parametr není vhodné používat v síťových analýzách. I proto je doporučen jiný způsob popsání tvaru komunikací – křivolakost. Ta byla důkladně popsána, včetně rozboru jejího výpočtu.

Následně byl zájem směřován na vazbu mezi křivolakostí komunikace a rychlostí pohybu. Zde se projevuje celá řada dalších faktorů, které jsou nad rámec této práce (zejména sklonitost silniční trasy). Byl však doporučen model pro určení návrhové a směrodatné rychlosti.

Navržený postup byl implementován v prostředí GIS – pomocí jazyka Python v prostředí ArcGIS. Celý skript byl důkladně popsán a vysvětlen.

Proběhlo testování navrhovaného postupu na konkrétních příkladech a porovnání výsledků s výsledky jiných modelů i s výsledky terénního šetření. Výsledky ukázaly, že zohlednění tvarových charakteristik v síťových analýzách přináší značné zpřesnění těchto úloh.

Toto důležité zjištění svědčí o možném přínosu celé práce. Zabývala se tematikou, kterou dosud řešilo jen málo ostatních. Navíc způsobem, který dosud nikdo nevyužil. Jak bylo potvrzeno, tento způsob vede ke zpřesňování síťových analýz. Ty se staly důležitou součástí fungování společnosti a proto je nutné je provádět co nejpřesněji.

## **Seznam obrázků**

Obr. č. 1: Různé způsoby zakreslení grafu – str. 19

Obr. č. 2: Typy grafů – str. 20

Obr. č. 3: Ilustrace výpočtu deviatility – str. 23

Obr. č. 4: Ilustrace nevhodnosti deviatility pro síťové analýzy – str. 24

Obr. č. 5: Ilustrace výpočtu křivolakosti – str. 25

Obr. č. 6: Úhlová změna jako doplněk vnitřního úhlu v trojúhelníku – str. 27

Obr. č. 7: Úhel mezi vektory – str. 28

Obr. č. 8: První návrh modelu – str. 44

Obr. č. 9: Princip skriptu – str. 45



## **Seznam tabulek**

Tab. č. 1: Průměrné rychlosti dle [4] - str. 32

Tab. č. 2: Průměrné rychlosti dle [13] - str. 32

Tab. č. 3: Zavedené atributy a jejich popis - str. 33

Tab. č. 4: Stanovení rychlostí – str. 34

Tab. č. 5: Směrodatná rychlost pro směrově rozdělené silnice s neomezeným přístupem – str. 36

Tab. č. 6: Směrodatná rychlost pro dálnice a rychlostní silnice – str. 36

Tab. č. 7: Směrodatná rychlost pro směrově nerozdělené komunikace – str. 36

Tab. č. 8: Hodnoty návrhových rychlostí pro ohodnocení na základě typu a sklonu komunikace – str. 37

Tab. č. 9: Směrodatné rychlosti pro směrově rozdělené silnice – str. 37

Tab. č. 10: Směrodatné rychlosti dle zakřivení komunikace – str. 38

Tab. č. 11: Směrodatná rychlost dle návrhové rychlosti a křivolakosti – str. 39

Tab. č. 12: Výsledné hodnoty testování – str. 52

## Seznam zkratk

AOPK	Agentura ochrany přírody a krajiny
CENIA	Česká informační agentura životního prostředí
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČSN	Česká státní norma
ČSÚ	Český statistický úřad
ČÚZK	Český úřad zeměměřičský a katastrální
GIS	Geografické informační systémy
EU	Evropská unie
HZS PK	Hasičský záchranný sbor Plzeňského kraje
IZS	Integrovaný záchranný systém
PřF UK	Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy
VŠ	Vysoká škola
VŠB – TUO	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

## Zdroje

- [1] *ArcGIS Help Library* [online]. c2012, last revision 27th of June 2012. [cit. 2012-08-01] Dostupné z: <<http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/>>.
- [2] BAYER, Tomáš. *Algoritmy v digitální kartografii*. 1. vyd. Praha: Karolinum, 2008. 251 s. ISBN 978-80-246-1499-1.
- [3] BORCHHARDT, D.: *Bemerkungen zum Abschnitt räumliche Linienführung der Richtlinien für die Anlage von Landstrassen aus Beitragen zum Strassen und Verkehrswesen*. Stuttgart: Institut für Strassenverkehrstechnik der UTH, 1968.
- [4] BRAINARD, J.S. – LOVETT, A.A. – BATEMAN, I.J. *Using isochrone surfaces in travel-cost models*. *Journal of Transport Geography*. June 1997, vol. 5, no. 2. s. 117-126. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692396000749>>.
- [5] BRINKE, Josef. *Úvod do geografie dopravy*. 1. vyd. Praha: Karolinum, 1999. 112 s. ISBN 80-718-4923-5.
- [6] ČADA, Roman – KAISER, Tomáš – RYJÁČEK, Zdeněk. *Diskrétní matematika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. 170 s. ISBN: 80-7082-939-7.
- [7] ČERBA, Otakar. *Databázové systémy GIS*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004.
- [8] ČSN 73 6100 - 1. *Názvosloví silničních komunikací: Část: Základní názvosloví*. Praha: Český normalizační institut, 2008. 67 s.
- [9] DEMEL, Jiří. *Grafy a jejich aplikace*. 1 vyd. Praha: Academia, 2002. 257 s. ISBN 80-200-0990-6.
- [10] DIESTEL, Reinhard. *Graph Theory*. 4. vyd. New York: Springer, 2010. 436 s. ISBN 9783642142789.
- [11] DOWNEY, Allen. *How to Think Like a Computer Scientist: Learning with Python*. 1st ed. Wellesley, MA: Green TeaPress, 2002. 288 s. ISBN 09-716-7750-6.
- [12] DOWNEY, Allen. *How to Think Like a Computer Scientist: Think Python*. 1st ed. Wellesley, MA: Green TeaPress, 2008. 216 s.
- [13] GUTIÉRREZ, Javier – URBANO, Paloma. *Accessibility in the European Union: the impact of the trans-European road network*. *Journal of Transport Geography*. March 1996, vol. 4, iss. 1. s. 15-25. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0966692395000429>>.
- [14] HAYNES, Robin – et al. *District variations in road curvature in England and Wales and their association with road-traffic crashes*. *Environment and Planning*.

March 2007, vol. 39, iss 5, s. 1222 – 1237. Dostupné z: <<http://www.envplan.com/abstract.cgi?id=a38106>>.

[15] HUDEČEK, Tomáš. *Akcesibilita a dopady její změny v Česku v transformačním období*. Praha, 2008. 119 s. Dizertační práce. Univerzita Karlova. Katedra sociální geografie a regionálního rozvoje.

[16] KRAJČOVIČ, Marián – ŘEZÁČ Miloslav. Křivolakost trasy silniční komunikace. In: *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské-Technické univerzity Ostrava: Řada stavební*. Ostrava, 2006. s 159 - 167. ISSN 1213-1962.

[17] LOUTHAN, Michal. *Vztah digitálního modelu reliéfu a síťových analýz pro řešení dopravních úloh*. Olomouc, 2010. 68 s. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci.

[18] ORLÍK, Antonín. *Algoritmizace prostorových úloh. Učební text*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006. 63 s.

[19] PEŇÁZ, Tomáš. *Síťové analýzy v prostředí GIS*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. 32 s.

[20] RAPANT, Petr. *Geoinformatika a geoinformační technologie*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. 513 s. ISBN 80-248-1264-9.

[21] SHANKAR, Venkataraman – MANNERING, Fred – BARFIELD, Woodrow. *Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies*. Accident Analysis & Prevention. June 1995, vol. 27, iss. 3, s. 371-389. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000145759400078>>.

[22] SKLENIČKA, Radek. Programovací jazyk python v geoinformatice. In: *GEOS 2006: 1st International Trade Fair of Geodesy, Cartography, Navigation and Geoinformatics: conference proceedings: Prague, Czech Republic, 16-18 March 2006*. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, 2006. s. 151-155. ISBN 80-85881-25-X.

[23] SLADKÝ, Jakub. *Síťové analýzy v GIS pro složky IZS Plzeň*. Plzeň, 2009. 67 s. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[24] ŠEDA, Miloš. *Teorie grafů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. 89s.

[25] VOŽENÍLEK, Vít. *Diplomové práce z geoinformatiky*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, 2002. 61 s. ISBN 80-244-0469-9.