

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní



Jan Tarabec

VALIDACE EFEKTIVITY SOUČASNÉHO SYSTÉMU
DISTRIBUCE UČEBNIC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K617..... Ústav logistiky a managementu dopravy

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

Jméno-a-příjmení studenta (včetně titulů):

Jan Tarabec

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – LOG – Logistika a řízení dopravních procesů

Název tématu (česky): **Validace efektivity současného systému distribuce učebnic**

Název tématu (anglicky): Efficiency Validation of the Current Textbook Distribution System

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Charakteristika distribučních systémů
- Analýza současného stavu distribuce učebnic a formulace problému
- Charakteristika potenciálních řešících metod a výběr vhodné metody
- Aplikace vybrané metody ve zvoleném období
- Zhodnocení dosažených výsledků



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucích bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: JANÁČEK, J.: Optimalizace na dopravních sítích, 1. vydání, EDIS, Žilina, 2003, ISBN 80-8070-031-1
DEMEL, J.: Grafy a jejich aplikace, 1. vydání, Academia, Praha, 2002, ISBN 80-200-0990-6

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.**
doc. Ing. Denisa Mocková, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: **30. září 2020**
(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: **9. srpna 2021**
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

doc. Ing. Tomáš Horák, Ph.D.

vedoucí

Ústavu logistiky a managementu dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.

děkan fakulty

Jan Tarabec

jméno a podpis studenta

V Praze dne 30. září 2020

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mi poskytli informace, podklady a rady, jež jsem využil při psaní bakalářské práce, a to především vedoucím bakalářské práce, doc. Ing. Denise Mockové, Ph.D. a doc. Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph. D.

Děkuji i své rodině, která mi studium na ČVUT v Praze – Fakultě dopravní umožnila a po celé tři roky mě v něm podporovala.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 8. 8. 2021



Jan Tarabec

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

VALIDACE EFEKTIVITY SOUČASNÉHO SYSTÉMU DISTRIBUCE UČEBNIC

Bakalářská práce

Srpen 2021

Jan Tarabec

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je ověřit na základě dostupných dat efektivitu distribuce ve firmě zabývající se distribucí učebnic po celé České republice. První část práce je teoretická, ve které jsou charakterizovány jednotlivé distribuční systémy. Následuje seznámení se současným systémem distribuce a formulace řešeného problému. Pro řešení optimalizačního problému je navržen modifikovaný Clarke-Wrightův algoritmus zohledňující specifické technologické aspekty daného distribučního systému a aplikovaný na vybraný týden roku 2020.

Klíčová slova: logistika, distribuce učebnic, optimalizace, Clarke-Wrightův algoritmus

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Sciences

EFFICIENCY VALIDATION OF THE CURRENT TEXTBOOK DISTRIBUTION SYSTEM

Bachelor thesis

August 2021

Jan Tarabec

Abstract

The aim of the bachelor's thesis is to verify the efficiency of distribution on the basis of available data in a company dealing with the distribution of textbooks throughout the Czech Republic. The first part of the work is theoretical, in which the individual distribution systems are characterized. Following is an introduction to the current delivery system and the formulation of the problem. To solve the optimization problem, a modified Clarke-Wright algorithm is proposed, taking into account the specific technological aspects of the given distribution system and applied to the selected week of 2020.

Key words: logistics, distribution of textbooks, optimization, Clarke-Wright algorithm

Obsah

Úvod.....	6
1 Charakteristika distribučních systémů	7
1.1 Obecná klasifikace distribučních systémů	7
1.2 Distribuční systémy ve školství	10
2 Analýza vývoje na trhu učebnic a současný stav ve firmě XY	11
2.1 Popis současného systému distribuce.....	15
2.2 Obslužné trasy v týdnu 10. 8. – 14. 8. 2020.....	17
3 Využití teorie grafů	28
3.1 Optimalizační úlohy teorie grafů se vztahem k řešené problematice.....	28
3.2 Původní Clarke-Wrightův algoritmus	29
3.3 Obecná formulace řešeného problému	33
3.4 Modifikovaný Clarke-Wrightův algoritmus.....	33
4 Experimentální část – aplikace modifikovaného CWA na řešený problém.....	40
4.1 Vstupní data a jejich příprava	44
4.2 První úloha – obsluha škol na území Moravskoslezského kraje.....	46
4.4 Druhá úloha – obsluha škol na území ČR mimo území Moravskoslezského kraje	50
4.5 Druhá úloha – výsledná podoba okružních jízd.....	51
4.6 Srovnání výsledků s původním stavem.....	53
5 Závěr	55
Použité zdroje.....	56
Seznam zkratk	56
Seznam grafů.....	57
Seznam obrázků	57
Seznam tabulek	58
Přílohy na CD.....	58

Úvod

Bakalářská práce se zabývá problematikou validace efektivity distribuce učebnic, zejména pro základní školy, v podmínkách anonymizované reálné firmy (dále firma XY), která má distribuci učebnic jako hlavní předmět podnikání.

Firma XY zabývající se distribucí učebnic působí v současné době jako prostředník mezi nakladatelem a zákazníkem (školou).

Současné plánování obsluhy zákazníků je založeno na dlouhodobé praxi a intuitivním rozhodování. Navržený plán obsluhy může nést znaky kvality, mohou v něm však existovat rezervy, jejichž odstranění by mohlo efektivitu stávajícího způsobu distribuce dále zvýšit. Metody, které umožňují navrhovat obsluhu zákazníků s vysokou efektivitou (v některých případech dokonce optimálně) přitom existují a jsou součástí tzv. matematické teorie dopravy (teorie dopravních systémů), která je významnou aplikační oblastí disciplíny zvané operační výzkum (operační analýza).

Přestože je současný systém distribuce učebnic ve firmě XY udržitelný a generuje zisk, je vhodné, s využitím uvedených metod, prověřit efektivitu stávajícího řešení, což je základním cílem prezentované bakalářské práce. Odstraňování skrytých rezerv umožní zvýšit ziskovost distribučního systému, příp. snížit náklady na distribuci, což při zachování stávající míry ziskovosti eventuálně umožní snižování cen, a tedy také zvyšování konkurenceschopnosti služeb poskytovaných firmou XY.

1 Charakteristika distribučních systémů

Jedna z nejčastěji používaných definic logistiky hovoří, že *logistika je disciplína uvádějící do vzájemného vztahu zboží, personál, výrobní kapacity a informace tak, aby byly na správném místě ve správném čase, ve správném množství, ve správné kvalitě za správnou cenu* [1]. Z ní mimo jiné vyplývá, že distribuční systém je nedílnou součástí logistického řetězce.

Distribuce (nebo také distribuční služby) je činnost spojená s přemístěním zboží od výrobce ke konečnému spotřebiteli nacházejícího se v místě určení. Distribuce je jednou ze složek tzv. marketingového mixu, což je souhrn či spojení čtyř základních marketingových nástrojů, které firma používá k tomu, aby usilovala o dosažení svých cílů. Součástí distribuce mohou být kromě samotné přepravy zboží také další služby, jako např. balení do přepravních obalů a finanční toky inkasované za poskytované distribuční služby. [1, 2]

Distribuční systém může být složen z jednoho nebo více nezávislých výrobců a z článků velkoobchodní a maloobchodní sítě. Protože každý článek je zpravidla nezávislý, snaží se maximalizovat svůj zisk, někdy dokonce i na úkor distribučního systému jako celku. Budování distribučního systému trvá léta a je velmi obtížné a nákladné. Zároveň jsou obtížné a finančně náročné i aktivity vedoucí ke změnám v již vybudovaném a provozovaném distribučním systému. [3]

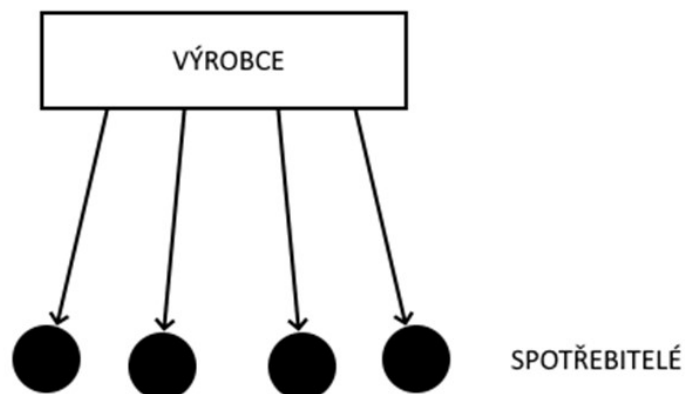
1.1 Obecná klasifikace distribučních systémů

Terminologie v této podkapitole vychází z literatury [4].

Distribuční systémy můžeme rozdělit hned z několika hledisek:

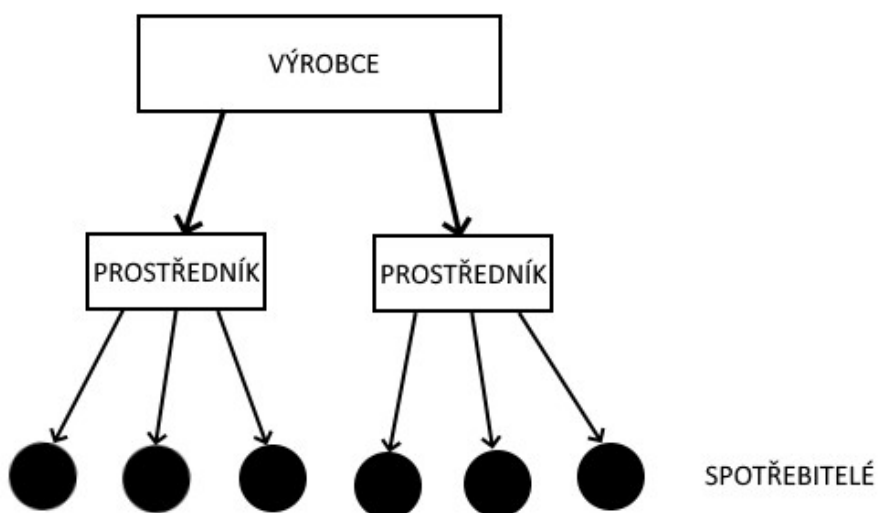
Podle počtu mezičlánků v distribučním řetězci mezi výrobcem a spotřebitelem rozlišujeme distribuční systémy:

- s **přímou cestou** – v uvedených případech se zboží přemísťuje od výrobce přímo ke spotřebiteli,
- s **nepřímou cestou** – v uvedených případech figurují mezi výrobcem a spotřebitelem prostředníci v podobě velkoobchodu, maloobchodu nebo zprostředkovatele, kteří logicky usilují o co nejvyšší zisk.



Obrázek 1: Distribuční systém s přímou cestou

Zdroj: [4, autor]



Obrázek 2: Distribuční systém s nepřímou cestou

Zdroj: [4, autor]

Z pohledu organizace rozlišujeme distribuční systémy:

- **vertikální** - ve vertikálních distribučních systémech jsou všechny jeho články součástí jedné společnosti, vyžadují vysoké investice, jde o tzv. vertikální integraci. Články distribučních cest jsou nezávislé subjekty, u kterých se spolupráce děje na základě smlouvy. Ta vymezuje práva, odpovědnost a povinnost jednotlivých článků distribučního systému. Jde o smluvní marketingový systém. Do této skupiny patří dobrovolné řetězce, nákupní družstva, franchising,

- **horizontální** – v horizontálních distribučních systémech se jedná o spojení několika firem, které jsou na stejné úrovni a shlukují se na jednom místě, například v nákupních centrech na okraji měst, přičemž jednotlivé firmy se podílejí na nákladech na reklamu, parkování či úklid společných prostor,
- **vícecestné / hybridní** – ve vícecestných systémech existuje více distribučních cest na jeden cílový trh.

Z pohledu časového rozložení obsluhy rozlišujeme distribuční systémy:

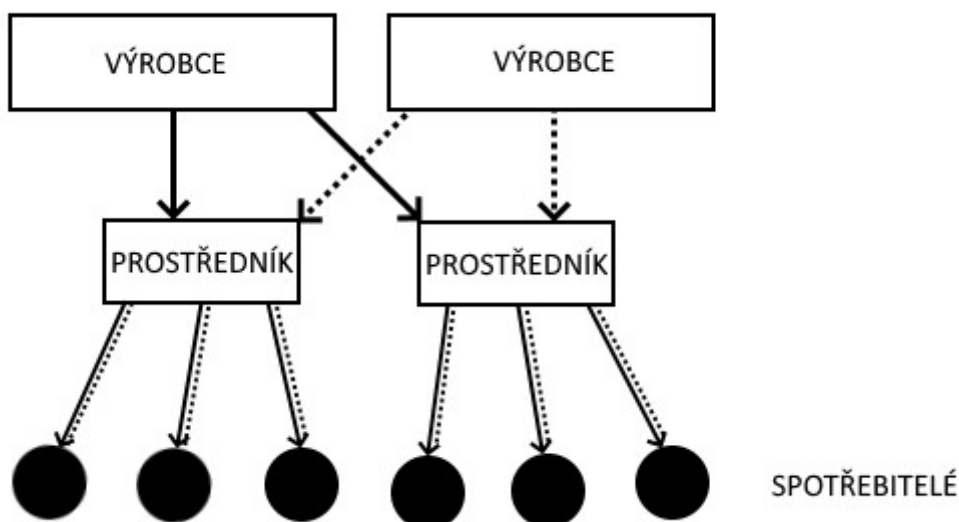
- **s pravidelnou obsluhou,**
- **s nepravidelnou obsluhou.**

Z pohledu četnosti obsluhy rozlišujeme distribuční systémy:

- **s kontinuálním zásobováním** – jsou vhodné v případech, kdy se jedná o distribuci zboží podléhající degradaci v krátkém čase (potraviný), nebo když je zásadním omezením objem skladu (palivo na čerpacích stanicích),
- **s jednorázovým zásobováním** – vhodným pro minimalizaci nákladů na dopravu. Předpokladem je takové množství dodávaného zboží, aby jej bylo možné vozidlem využívaným k distribuci přepravit, jednorázová objednávka fyzické osoby (např. z e-shopu) nebo nízké nároky na skladovací prostory (učebnice).

Z pohledu druhů přepravovaného zboží rozlišujeme distribuční systémy:

- **jednokomoditní** – zásobují zákazníky jedním druhem zboží,
- **vícekomoditní** – zásobují zákazníky více druhy zboží současně.



Obrázek 3: Vícekomoditní distribuční systém

Zdroj: [autor]

1.2 Distribuční systémy ve školství

Školy, jakožto instituce sloužící k poskytování vzdělání, mají také své místo v některých distribučních systémech. Kromě toho, že průběžně objednávají učebnice, pracovní sešity či další učební pomůcky, se objevují i v dalších distribučních řetězcích. Z nepravdělných distribučních řetězců lze jmenovat například nákup různého vybavení, ať už se jedná o nábytek, nebo třeba výpočetní techniku. Pravidelně je také potřeba doplňovat zásobu hygienických prostředků, papíru do tiskáren apod. I tímto spotřebním zbožím jsou ale zásobovány spíše jednorázově ve větších množstvích. Protože škola není výrobním závodem a ani při své činnosti nevyužívá produkty podléhající v čase silné degradaci, není, kromě pravidelného zásobování školních jídelen, kontinuální zásobování potřebné.

Pokud bychom měli zařadit distribuční systém učebnic řešený v bakalářské práci z pohledu jednotlivých kategorizačních hledisek distribučních systémů, jedná se o systém s nepřímou cestou (mezi nakladatelstvím a školou existuje distributor), vícecestný (nakladatelství mají snahu o co nejvyšší odbyt – konkurence je vysoká – a proto oslovují školy napřímou a zároveň i další distribuce), nepravdělný (i přesto, že je zvykem zasílat největší objednávku učebnic před letními prázdninami, probíhá distribuce nepravdělně, na základě aktuálních potřeb) a s jednorázovým zásobováním (to přispívá k minimalizaci nákladů na rozvoz a zároveň ani spotřebitel nemá důvod k tomu, aby vyžadoval kontinuální zásobování).

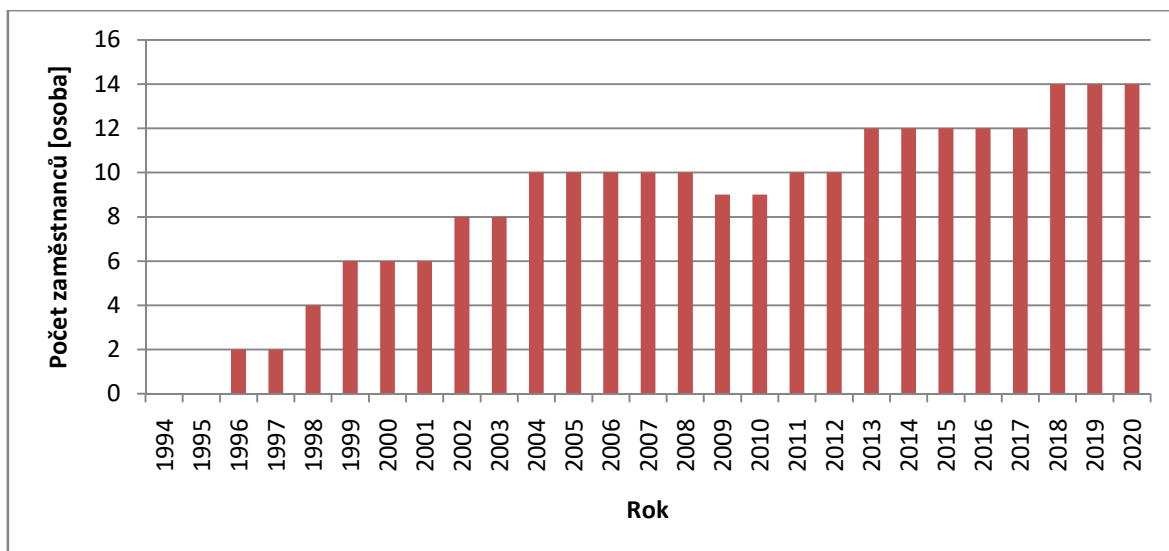
2 Analýza vývoje na trhu učebnic a současný stav ve firmě XY

Před rokem 1989 byla distribuce učebnic do školních zařízení zabezpečena výhradně prostřednictvím specializovaných institucí s názvem Služba škole, jejichž zřizovateli byly jednotlivé okresní národní výbory. Služba škole zajišťovala nejen distribuci učebnic, ale i učebních pomůcek nebo nábytku. Jejich provoz byl ovšem velmi ztrátový. Náklady na provoz většinou samostatné budovy a platy zaměstnanců několikanásobně převyšovaly jejich příjmy. S výjimkou Hlavního města Prahy se totiž v žádném okrese nenacházelo takové množství škol nakupujících pomůcky za takové částky, aby zisk dané služby škole tyto náklady pokryl.

Po roce 1989 a nástupu tržní ekonomiky byly jednotlivé okresní organizace Služba škole zprivatizovány. Jejich financování probíhalo prostřednictvím tzv. školních úřadů. Většina z nich ovšem nebyla schopna změnit svoji podnikatelskou strategii natolik, aby se byly schopny ve vznikajícím konkurenčním prostředí udržet a zároveň vykazovat zisk, a tak během 90. let 20. století zanikla. Úspěšně transformované bývalé okresní organizace šly většinou cestou zbavení se majetku v podobě velkých, nepotřebných a energeticky náročných budov a lepší organizace práce, avšak svým působením si zachovaly nejvýše regionální význam.

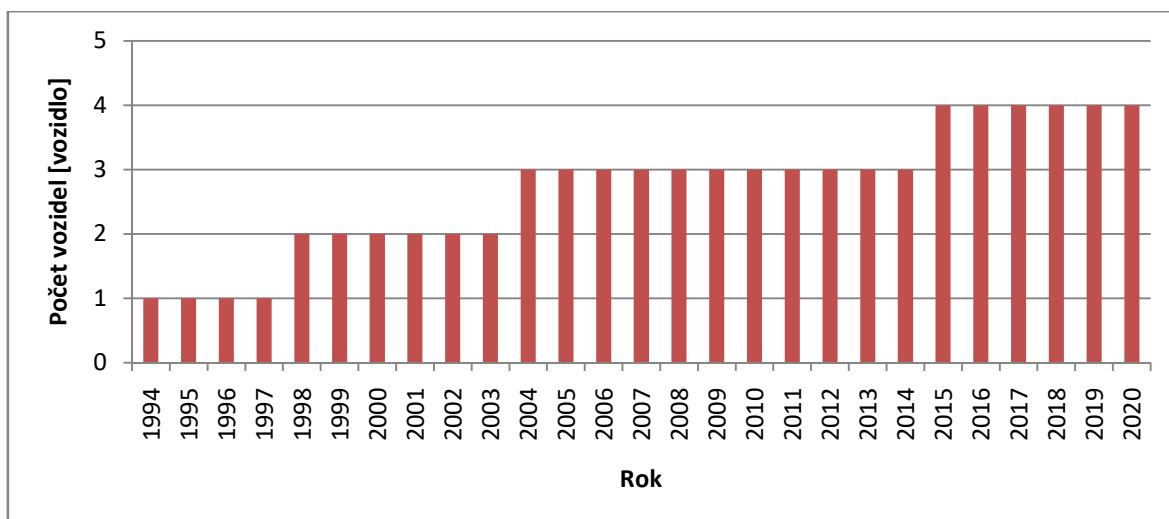
Firma XY využila těchto podmínek a navázala první spolupráci se školami, pro které byl nákup učebních pomůcek velmi obtížný. V té době nebylo v některých regionech téměř možné, aby školy nakupovaly učebnice a jiné pomůcky jinak, než po velkých množstvích přímo od nakladatelů, nebo za vysoké ceny z knihkupectví. Předběhla i dnes fungující restrukturalizované, nebo zcela nově zřízené služby školám, které často nabízejí zajištění učebních pomůcek jako doplňkovou činnost k vedení administrativních činností školám, což je jejich hlavním předmětem podnikání.

Průběh vývoje počtu zaměstnanců, vozidel a růstu obratu firmy XY je znázorněn na následujících Grafech 1, 2, 3 a 4.



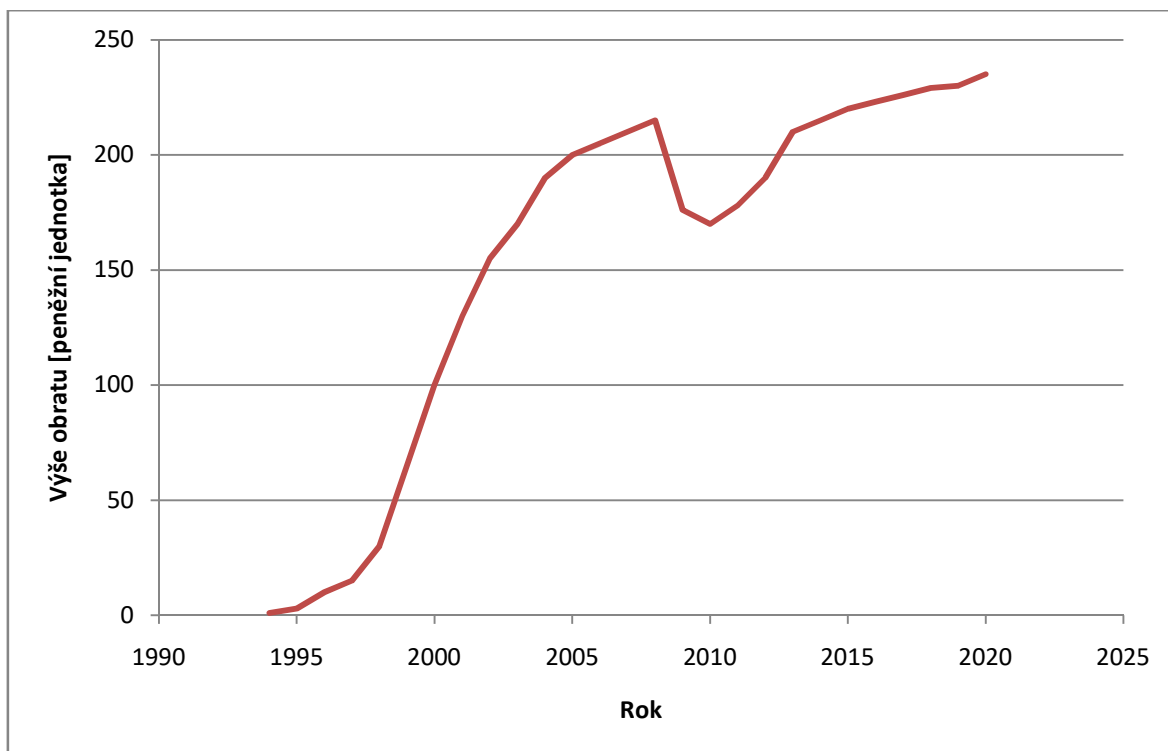
Graf 1: Vývoj počtu zaměstnanců firmy XY

Zdroj: [autor]



Graf 2: Vývoj počtu vozidel provozovaných firmou XY

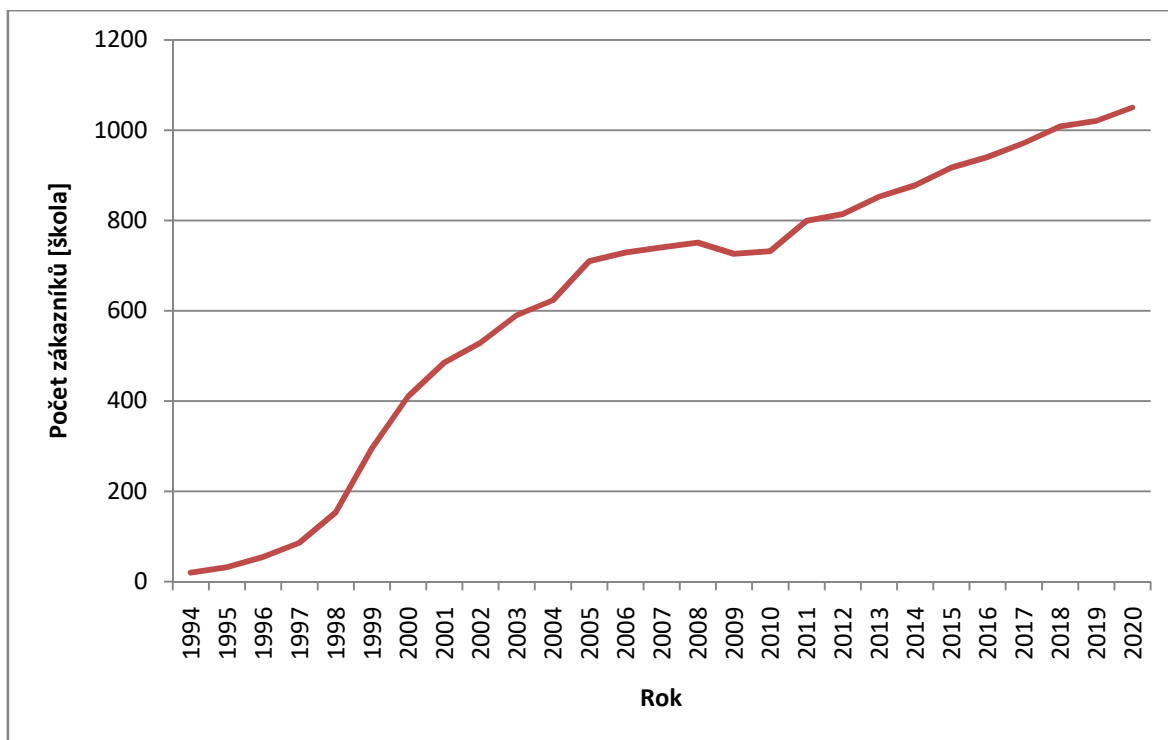
Zdroj: [autor]



Graf 3: Vývoj ročního obrátu firmy XY

Zdroj: [autor]

Výše obrátu v Grafu 3 je z důvodu zachování obchodního tajemství firmy XY uvedena nikoliv v českých korunách, ale v peněžních jednotkách, na které byly s využitím pevného poměru převedeny. Propady hodnot výše obrátu kolem roku 2009 jsou způsobeny dopady tehdejší celosvětové ekonomické krize, kdy byl stát nucen hledat úspory ve všech odvětvích a ministerstvo školství snížilo na 2 roky výši ostatních neinvestičních prostředků (ONIV), ve kterých jsou zahrnuty i finance na nákup učebnic a dalších učebních pomůcek. V roce 2011 pak došlo k jejich zvýšení a až do roku 2020 se jejich výše neměnila. Růst obrátu od roku 2011 je tedy způsoben především nárůstem počtu pravidelných zákazníků, tedy těch, kteří uskuteční každý rok alespoň jednu větší objednávku. Ten je zaznamenán na Grafu 4. Z důvodu pandemie Covid-19 byly ONIV na žáka na rok 2021 téměř zdvojnásobeny. Stalo se tak z důvodu nutnosti nakupovat více elektronického vybavení potřebného k dálkové výuce a pravděpodobnému přesunu některých výukových témat plánovaných ve školním roce 2020/2021 do školního roku následujícího. V určitých případech poté nemusí být možné včasné předání pomůcek nižšímu ročníku, a proto této situace školy využijí k nákupu novějších výtisků učebnic do svých skladů.



Graf 4: Vývoj počtu zákazníků firmy XY

Zdroj: [autor]

V současnosti nabízí firma XY nakladatelům jednu z cest, jak dostat jeho produkty k zákazníkům. Jedná se tedy o článek hybridního systému v podobě velkoobchodu a zároveň zprostředkovatele, neboť díky dlouhodobě kladným vztahům s jednotlivými nakladateli dochází často i k jejich přímému zastupování.

Hlavní činnost firmy XY spočívá v přijímání objednávek od škol či jednotlivců, naskladnění zboží od jednotlivých nakladatelů do skladu v Liberci, kompletace těchto objednávek a jejich distribuci k zákazníkům. Ta je školám poskytována zdarma.

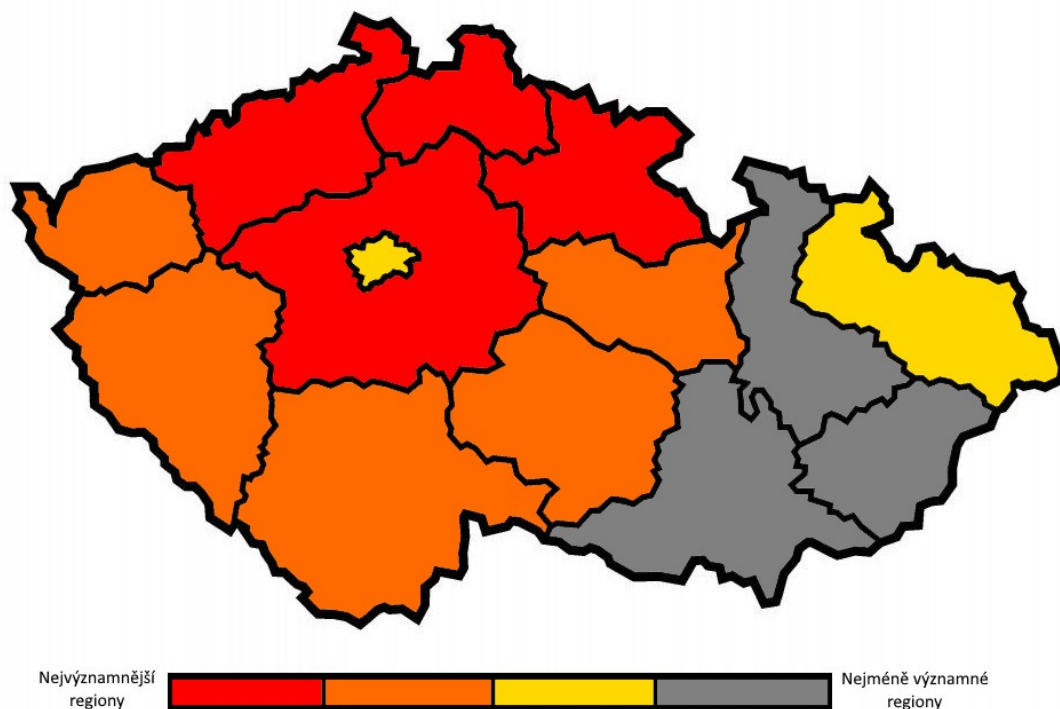
Ačkoliv by se mohlo zdát, že provoz firmy s takovýmto předmětem podnikání bude výhradně sezónní, není tomu tak. Rozdíly v pracovní náplni zaměstnanců mezi jednotlivými obdobími školního roku ovšem existují. Nárůst počtu objednávek se vyskytuje v měsících květen a červen, kdy jsou prováděny hromadné objednávky učebnic, pracovních sešitů a ostatních pomůcek na příští školní rok. Doobjednávky následně probíhají především v měsících srpen a září. V těchto měsících jsou proto přijímáni do firmy XY brigádníci, většinou z řad studentů středních a vysokých škol, kteří stálým zaměstnancům firmy XY pomáhají s kompletací objednávek a jejich rozvozem. V zimním období je zpracovaných objednávek méně, avšak v pracovní náplni zaměstnanců se na rozdíl od léta objevují realizace výstav, práce na sestavení katalogu pro následující rok

a manažerská činnost v podobě oslovování potencionálních budoucích zákazníků a komunikace s těmi stávajícími.

Vedlejším příjmem firmy XY je prodej učebních pomůcek v liberecké vzorkovně a královéhradecké podnikové prodejně.

2.1 Popis současného systému distribuce

Obsluhy škol na následující týden jsou vždy plánovány na konci týdne předchozího na základě přehledu objednávek, které jsou jeden den až dva dny před plánovanou obsluhou připraveny v prostorách libereckého skladu. Distribuce probíhá po celém území České republiky, přičemž nejvíce zákazníků se vzhledem ke geografické poloze sídla firmy nachází v Libereckém, Královéhradeckém, Středočeském a Ústeckém kraji. Co do objemu prodaného zboží poté následují Karlovarský, Jihočeský, Plzeňský a Pardubický kraj a kraj Vysočina. V posledních letech probíhá distribuce častěji i na území Moravskoslezského kraje a Hlavního města Prahy. Ve třech zbývajících nejmenovaných krajích je pak zákazníků nejméně, a to především z důvodu existence regionální konkurence. K plánování obsluhy není ve firmě XY v současnosti využíván žádný počítačový software. Vychází se především ze zkušeností z minulosti a geografické polohy jednotlivých školských zařízení. Nemalou roli v plánování obsluh hrají i nakladatelství, z nichž je zboží naskladňováno a je žádoucí jej vyzvednout například při zpáteční cestě, aby bylo vozidlo s řidičem maximálně vytíženo v obou směrech. Na následujícím Obrázku 4 je na mapě České republiky znázorněna významnost každého kraje pro firmu z hlediska velikosti odbytu.



Obrázek 4: Vyznačení významnosti krajů ČR pro firmu XY z hlediska velikosti odbytu

Zdroj: [autor]

Vozidlový park

K distribuci učebnic jsou využívána 4 nákladní vozidla značky Ford, jejichž technické parametry jsou vypsány níže:

Značka: Ford

Model: Transit MK8 L2H2

Motorizace: 2.0 EcoBlue 130 k

Palivo: motorová nafta

Spotřeba: 8,5l/100 km

Užitečná hmotnost: 1481 kg



Obrázek 5: Vozidlo využívané k distribuci

Zdroj: [autor]

Vozidla využívaná k distribuci (Obrázek 5) spadají do kategorie vozidel N1. Do kategorie N1 se řadí nákladní vozidlo, jehož největší přípustná hmotnost nepřevyšuje 3 500 kg. Na řidiče těchto vozidel se nevztahuje Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 561/2006 upravující mimo jiné dobu řízení, přestávky v řízení a dobu odpočinku.

2.2 Obslužné trasy v týdnu 10. 8. – 14. 8. 2020

Bakalářská práce je věnována validaci efektivitu současného systému distribuce učebnic. K validaci efektivitu byly vybrány obslužné trasy v týdnu 10. – 14. 8. 2020. V tomto období roku se pravidelně přepravují velké objemy učebnic. Zároveň analýza a validace obslužných tras v období delším, než jeden pracovní týden, by překročila rozsah bakalářské práce.

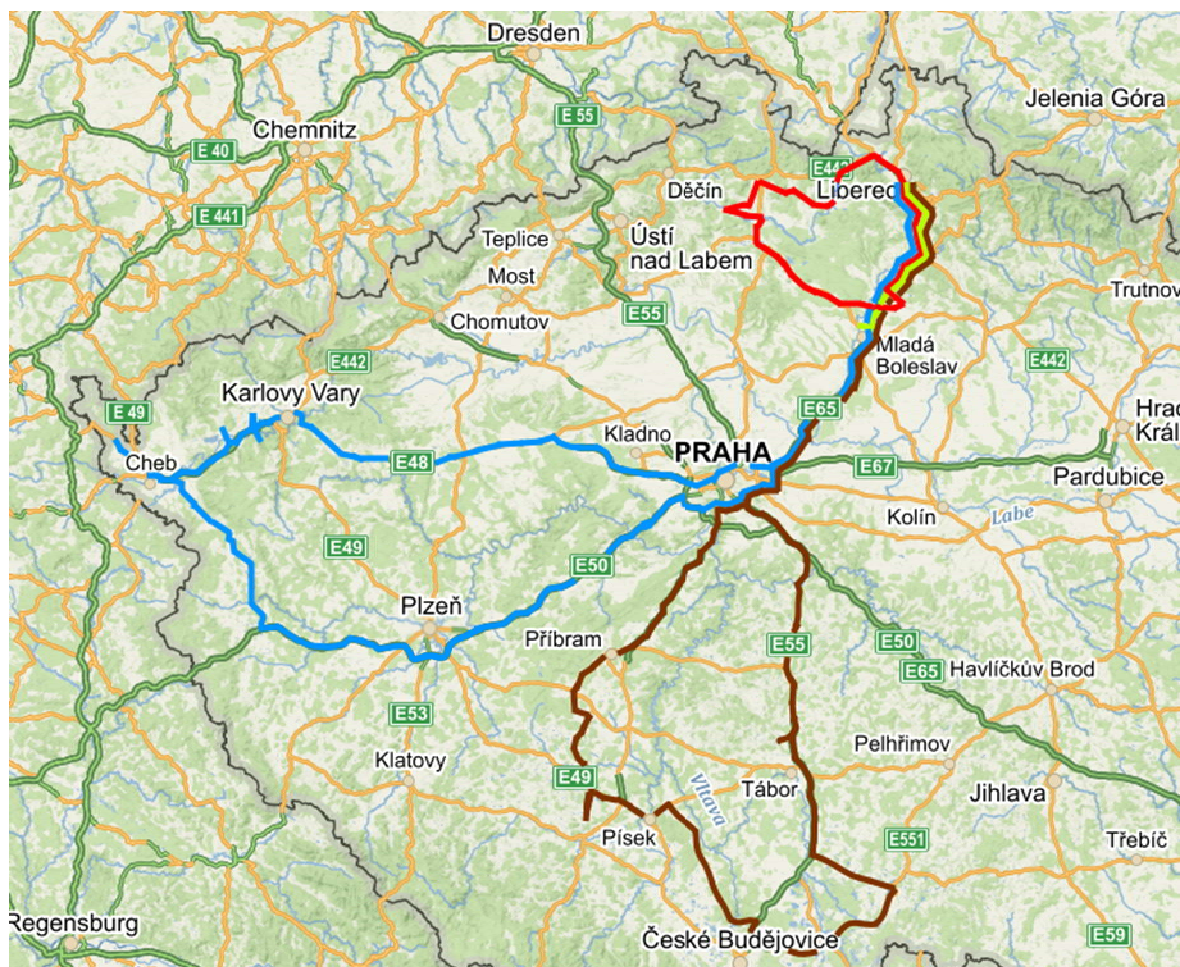
Distribuované zboží bylo převedeno na fiktivní kapacitní jednotky (dále jen fiktivní jednotky *fj*). Maximální kapacita jednoho vozidla je 250 *fj* a jedna fiktivní jednotka představuje zboží o hmotnosti 5,92 *kg*. Přepočtení na *fj* vychází z kusových cen jednotlivých knih a sešitů a je nastaven tak, aby se nejmenší požadavek školy (z pohledu velikosti zásilky), který byl v řešeném týdnu realizován, rovnal po zaokrouhlení jedné jednotce (tzn. výsledná kapacita potřebná pro přepravení zásilky byla vyšší než 0,5 *fj*) a kapacita vozidla mohla být z důvodu přehlednosti zaokrouhlena na nejbližší vyšší hodnotu dělitelnou číslem 10.

V Tabulkách 1 – 5 jsou uvedeny jednotlivé dny, trasy a základní parametry jednotlivých tras čtyř vozidel zajišťujících distribuci v týdnu, který je předmětem validace. V závorce za každým navštíveným městem/navštívenou obcí je uveden požadavek škol na počet vykládaných jednotek. V případech, kdy se jedná o nakládku učebnic, je tato skutečnost uvedena. V odpoledních hodinách po příjezdu vozidla do depa se vždy nakládá zboží na další den, přičemž provozní doba depa není nijak omezena. Pokud je zboží nakládáno mimo depo, probíhá nakládka, z důvodu jeho umístění na dřevěných paletách, výrazně rychleji, než vykládka ve školách. Z těchto důvodů není doba nakládky v depu a v nakladatelstvích započtena do celkové doby manipulace, aby nebyl ovlivněn výpočet průměrné doby manipulace potřebné pro vykládku 1 *fj*. S dobou nakládky v depu nebude počítáno vůbec. V případě nakladatelství bude doba nakládky 1 *fj* stanovena paušálně.

Tabulka 1: Obslužné trasy v pondělí 10. 8. 2020

Vozidlo	Trasa	Počet přepravovaných jednotek / Kapacita vozidla [fj]	Délka trasy [km]	Doba jízdy [h] [min]	Doba manipulace [h] [min]
1	ZAČÁTEK: Liberec → Kněžmost (24) → Bakov n. J. (85) → Bělá p. Bezdězem (57) → Horní Police (11) → Okrouhlá (1) → Brniště (10) → Dubnice (4) KONEC: Liberec	192/250	198	3 h 30 min	2 h 10 min
2	ZAČÁTEK: Liberec → Kosmonosy (214) KONEC: Liberec	214/250	116	1 h 45 min	55 min
3	ZAČÁTEK: Liberec → Karlovy Vary (84) → Locket (4) → Chodov (17) → Sokolov (26) → Lomnice (3) → Hazlov (3) → Františkovy Lázně (21) → Planá (34) KONEC: Liberec	192/250	692	8 h 50 min	3 h 15 min
4	ZAČÁTEK: Liberec → Rožmitál p. Třem. (9) → Radomyšl (8) → Písek (19) → Záhoří (13) → Třeboň (31) → Jindřichův Hradec (35) → Borotín (15) KONEC: Liberec	130/250	617	8 h 15 min	1 h 50 min

Zdroj: [autor]



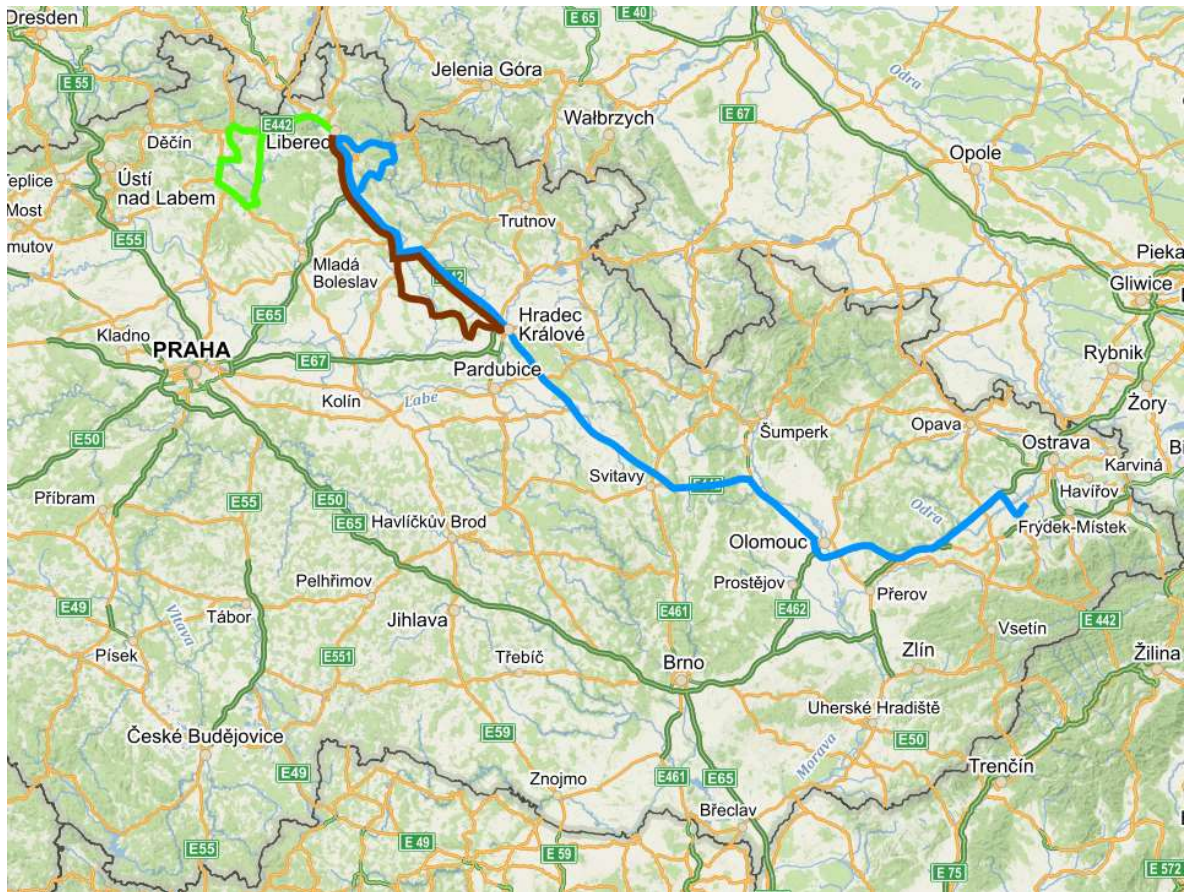
Obrázek 6: Schematická mapa – obslužné trasy v pondělí 10. 8. 2020

Zdroj: [8, autor]

Tabulka 2: Obslužné trasy v úterý 11. 8. 2020

Vozidlo	Trasa	Počet přepravovaných jednotek / Kapacita vozidla [fj]	Délka trasy [km]	Doba jízdy [h] [min]	Doba manipulace [h] [min]
1	Liberec a nejbližší okolí	236/250	41	1 h 35 min	3 h 30 min
2	ZAČÁTEK: Liberec → Doksy (17) → Zahradky (10) → Česká Lípa (48) → Zákupy (42) → Cvikov (45) KONEC: Liberec	162/250	147	2 h 45 min	2 h 15 min
3	ZAČÁTEK: Liberec → Turnov (23) → Malá Skála (10) → Tanvald (49)	115/250	98	1 h 55 min	2 h 00 min
	→ Jablonec n. Nisou (33) → Liberec (nakl. 225) KONEC: Petřvald	225/250	331	4 h 40 min	
4	ZAČÁTEK: Liberec → Hradec Králové (61) → Stěžery (16) → Libčany (70) → Nový Bydžov (86) KONEC: Liberec	233/250	230	4 h 25 min	3 h 30 min

Zdroj: [autor]



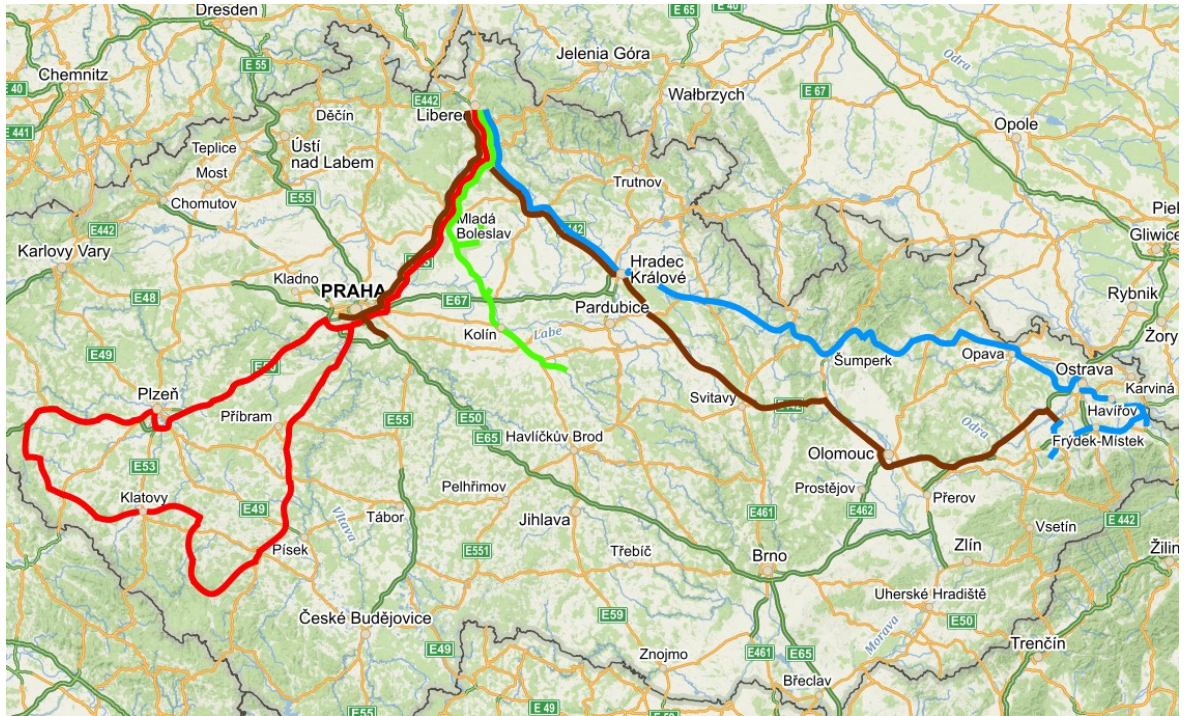
Obrázek 7: Schematická mapa – obslužné trasy v úterý 11. 8. 2020

Zdroj: [8, autor]

Tabulka 3: Obslužné trasy ve středu 12. 8. 2020

Vozidlo	Trasa	Počet přepravovaných jednotek / Kapacita vozidla [fj]	Délka trasy [km]	Doba jízdy, [h] [min]	Doba manipulace [h] [min]
1	ZAČÁTEK: Liberec → Kašperské Hory(12) → Sušice (51) → Plánice (26) → Kout na Šumavě (19) → Domažlice (66) → Bělá nad Radbuzou (47) → Plzeň (nakládka 162) KONEC: Liberec	TAM 221/250 ZPĚT 162/250	662	9 h 10 min	3 h 00 min
2	ZAČÁTEK: Liberec → Ronov n. Doubr. (74) → Kolín (26) → Poděbrady (14) → Nymburk (8) → Luštěnice (42) → Semčice (16) → Dobrovice (52) KONEC: Liberec	232/250	311	5 h 15 min	2 h 40 min
3	ZAČÁTEK: Petřvald → Kopřivnice (102) → Třinec (23) → Český Těšín (8) → Havířov (21) → Ostrava (66) → Lichnov u Bruntálu (5) KONEC: Liberec	225/250	492	9 h 00 min	3 h 00 min
4	ZAČÁTEK: Liberec → Praha (30) → Čestlice (nakl. 241) → Liberec (nakl. 202) KONEC: Petřvald	TAM 30/250 ZPĚT 241/250 202	278 325	3 h 45 min 4 h 30 min	1 h 25 min

Zdroj: [autor]



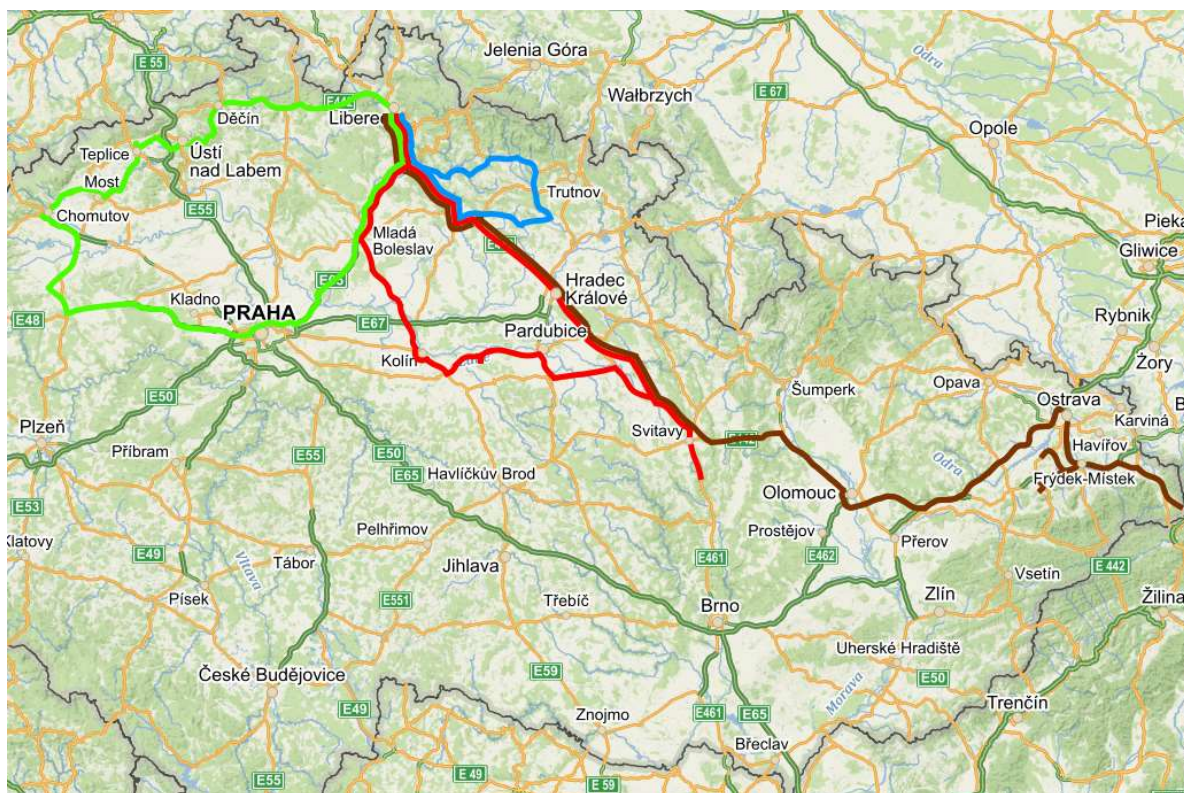
Obrázek 8: Schematická mapa – obslužné trasy ve středu 12. 8. 2020

Zdroj: [8, autor]

Tabulka 4: Obslužné trasy ve čtvrtek 13. 8. 2020

Vozidlo	Trasa	Počet přepravovaných jednotek / Kapacita vozidla [fj]	Délka trasy [km]	Doba jízdy [h] [min]	Doba manipulace [h] [min]
1	ZAČÁTEK: Liberec → Sruby (3) → Choceň (72) → Litomyšl (56) → Svitavy (7) → Březová n. Svit. (38) → Morašice (21) KONEC: Liberec	197/250	458	6 h 55 min	2 h 35 min
2	ZAČÁTEK: Liberec → Podbořany (18) → Žatec (22) → Chomutov (16) → Most (32) → Novosedlice (24) → Chabařovice (28) → Ústí nad Labem (71) KONEC: Liberec	211/250	409	6 h 50 min	3 h 05 min
3	ZAČÁTEK: Liberec → Jilemnice (17) → Rudník (21) → Hostinné (45) → Dvůr Králové n. L. (44) → Jičín (62) KONEC: Liberec	189/250	211	4 h 20 min	2 h 15 min
4	ZAČÁTEK: Petřvald → Brušperk (24) → Kopřivnice (84) → Frýdek-Místek (29) → Bukovec (14) → Ostrava (51) KONEC: Liberec	202/250	518	8 h 15 min	3 h 25 min

Zdroj: [autor]



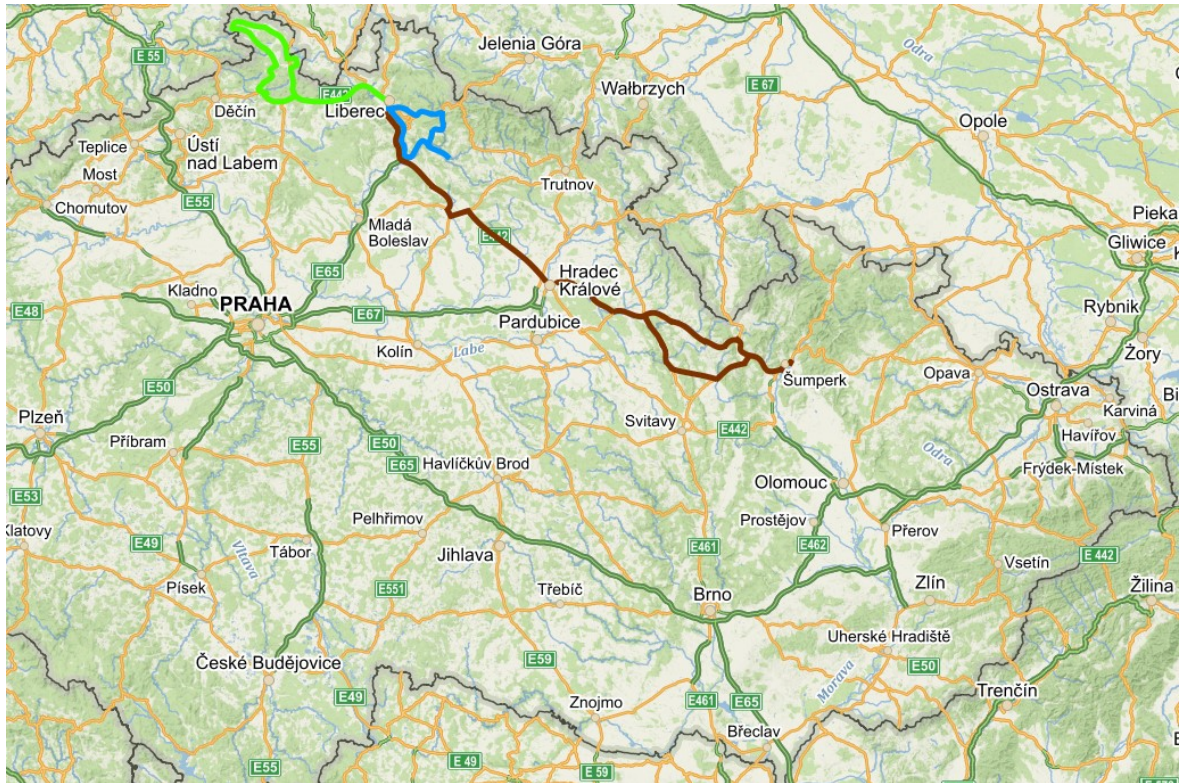
Obrázek 9: Schematická mapa – obslužné trasy ve čtvrtek 13. 8. 2020

Zdroj: [8, autor]

Tabulka 5: Obslužné trasy v pátek 14. 8. 2020

Vozidlo	Trasa	Počet přepravovaných jednotek / Kapacita vozidla [fj]	Délka trasy [km]	Doba jízdy [h] [min]	Doba manipulace [h] [min]
1	Liberec a nejbližší okolí	148/250	31	1 h 00 min	1 h 55 min
2	ZAČÁTEK: Liberec → Dolní Podluží (1) → Varnsdorf (12) → Rumburk (62) → Šluknov (13) → Dolní Poustevna (2) → Prysk (5) → Kamenický Šenov (65) KONEC: Liberec	162/250	197	3 h 45 min	2 h 30 min
3	ZAČÁTEK: Liberec → Jablonec nad Nisou (4) → Lučany nad Nisou (40) → Velké Hamry (51) → Semily (32) KONEC: Liberec	127/250	113	2 h 30 min	1 h 45 min
4	ZAČÁTEK: Liberec → Žamberk (88) → Vamberk (45) → Lanškroun (19) → Víkřovice (nakl. 210) KONEC: Liberec	TAM 152/250 ZPĚT 210/250	475	7 h 55 min	2 h 40 min

Zdroj: [autor]



Obrázek 10: Schematická mapa – obslužné trasy v pátek 14. 8. 2020

Zdroj: [8, autor]

Hodnoty parametrů vstupujících do experimentální části:

Celkový počet vrcholů: **95**

Průměrná doba manipulace na vykládku 1 *fj*:

$$t = \frac{\sum_{den=pátek} \sum_{vozidlo=1}^4 \text{Doba manipulace}[min]}{\sum_{den=pátek} \sum_{vozidlo=1}^4 \text{Počet přepravovaných f. jednotek}[fj]} \cong \mathbf{0,8 \text{ min}/fj}$$

Průměrná doba manipulace na nakládku 1 *fj* je z důvodu uvedeného na str. 17 pevně stanovena jako $t' = 0,1 \text{ min}$.

Průměrná rychlost vozidla:

$$v = \frac{\sum_{den=pátek} \sum_{vozidlo=1}^4 \text{Délka trasy}[km]}{\sum_{den=pátek} \sum_{vozidlo=1}^4 \text{Doba jízdy}[h]} \cong 62,76 \text{ km/h}$$

3 Využití teorie grafů

Teorie grafů je jedním z oborů diskrétní matematiky a zároveň je součástí samostatné disciplíny nazývané operační výzkum (operační analýza). Zabývá se řešením mnoha teoretických i praktických úloh na matematických strukturách nazývaných grafy. Algoritmy využívané v teorii grafů mohou být buď exaktní, nebo heuristické. Při použití exaktního algoritmu existuje teoretická garance nalezení optimálního řešení. Využitím heuristického algoritmu sice garance nalezení optimálního řešení neexistuje, avšak zpravidla u rozsáhlých úloh nalezneme suboptimální řešení v rozumném čase. [5]

Teorie grafů má kromě širokého spektra využitelnosti výhodu i v tom, že díky grafické reprezentaci problému je pro řešitele snadnější pochopit procesy, které postup řešení zahrnuje.

Základní pojmy používané v bakalářské práci odpovídají terminologii předmětu 17TGA – Teorie grafů a její aplikace v dopravě – vyučovaném na ČVUT v Praze Fakultě dopravní ve 2. ročníku bakalářského studia.

3.1 Optimalizační úlohy teorie grafů se vztahem k řešené problematice

Při řešení problematiky distribuce učebnic v podmínkách firmy XY přicházejí v úvahu dva základní typy optimalizačních úloh:

- **Problém obchodního cestujícího** = Traveling salesman problem (**TSP**):

Úloha obchodního cestujícího je typ problému, kde řešíme dopravní obsluhu vrcholů sítě, která začíná a končí v určitém vrcholu, všemi vrcholy se prochází právě jednou a kritériem je minimalizace celkové délky trasy (nebo jiné veličiny). Z pohledu teorie grafů řešíme úlohu o vyhledání tzv. minimální Hamiltonovské kružnice (HK). Minimální HK obsahuje všechny vrcholy sítě a součet ohodnocení hran do ní zahrnutých je minimální. Ke konstrukci minimální HK slouží exaktní algoritmus – Littlův algoritmus nebo z heuristik Greedy algoritmus.

- **Problém trasování vozidel** = Vehicle routing problem (**VRP**):

Úlohu TSP můžeme dále rozšířit o okružní problém (VRP) při obsluze vrcholů. Úloha obsahuje kapacitní (kapacita obslužného vozidla) a časové (maximální doba strávená na trase) omezení. Kritériem je minimalizace celkové délky trasy a cílem je stanovení počtu vozidel nutných k obsluze všech zákazníků. Na rozdíl od úlohy TSP součet požadavků zákazníků překračuje kapacitu vozidla. K řešení úlohy VRP se využívají

exaktní přístupy založené na matematickém programování nebo heuristické přístupy založené nejčastěji na Clarke-Wrightově algoritmu, nebo metaheuristických přístupech (genetické algoritmy, algoritmy rojové inteligence apod.).

Nutným vstupem do obou typů optimalizačních úloh je distanční matice (její prvky reprezentují vzdálenostní, nebo časovou či nákladovou náročnost jízd uskutečňovaných mezi všemi obsluhovanými vrcholy dopravní sítě a depem). K získání distanční matice z matice vzdáleností využíváme nejčastěji Floydův algoritmus, který umožňuje vyhledat vzdálenosti mezi všemi vrcholy.

3.2 Původní Clarke-Wrightův algoritmus

Clarke-Wrightův algoritmus (dále jen „CWA“) je heuristickou metodou vyvinutou pro řešení VRP úlohy. CWA bude také využit pro validaci efektivity distribuce učebnic v bakalářské práci. Hlavním důvodem výběru CWA je velikost řešené sítě (95 vrcholů). CWA má také tu výhodu, že jej lze rozšířit o další podmínky, a tím ho uzpůsobit k řešení konkrétního případu z praxe.

CWA patří do skupiny tzv. metod výhodnostních koeficientů. Výhodnostním koeficientem se rozumí číslo, které signalizuje snížení hodnoty optimalizačního kritéria. Omezujícími podmínkami jsou kapacita obslužného vozidla a maximální doba strávená na trase.

Základní podmínky pro původní verzi CWA:

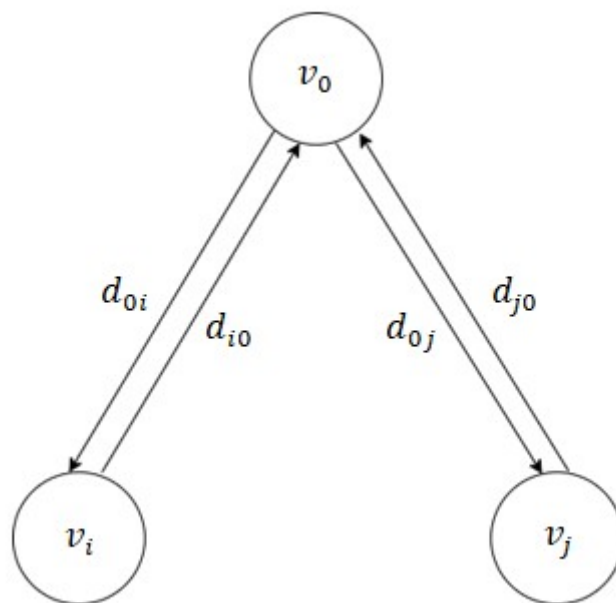
- homogenní vozidlový park (z hlediska kapacity),
- homogenní typ zásilek,
- požadavek jednotlivého zákazníka nesmí překročit kapacitu vozidla.

Nejčastěji používané vstupy do původní verze CWA:

- distanční matice,
- výchozí a cílový uzel = depo,
- seznam zákazníků,
- množstevní požadavky zákazníků,
- kapacita obslužného vozidla,
- maximální čas strávený na cestě,
- průměrná rychlost vozidla,
- doba nabládky/vykládky jedné jednotky.

Za výchozí řešení vstupující do CWA považujeme soustavu kyvadlových jízd. Principem CWA je postupné sloučení kyvadlových jízd do co nejvýhodnějších jízd okružních, a to tak, aby nedošlo k překročení definovaných kapacitních a časových omezení (omezujících podmínek úlohy). Okružní jízdy sestavujeme s využitím postupného výběru největších úspor v matici úspor, přičemž původní CWA předpokládá, že matice úspor bude symetrická (v průběhu řešení stačí pracovat s hodnotami úspor nacházejícími se buď nad, nebo pod hlavní diagonálou matice úspor).

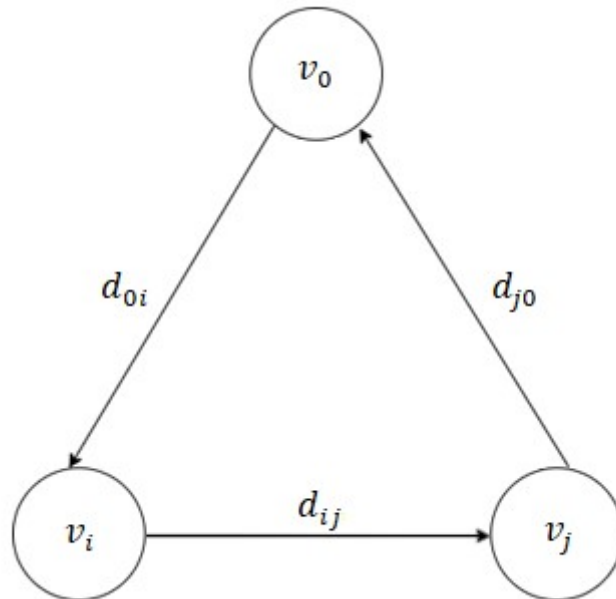
Soustava kyvadlových jízd má tvar uvedený na Obrázku 11.



Obrázek 11: Výchozí řešení

Zdroj: [autor]

V případě realizace této dvojice kyvadlových jízd, tj. např. trasy $v_0 - v_i - v_0 - v_j - v_0$ bude ujetá vzdálenost rovna výrazu $d = d_{0i} + d_{i0} + d_{0j} + d_{j0}$.



Obrázek 12: Sloučení kyvadlových jízd do okružní jízdy

Zdroj: [autor]

V případě, že obě kyvadlové jízdy sloučíme do jedné jízdy okružní vedené v trase $v_0 - v_i - v_j - v_0$, bude ujetá vzdálenost rovna výrazu $d = d_{0i} + d_{ij} + d_{j0}$.

Ve výrazu nyní chybí součet $d_{i0} + d_{0j}$, ale vyskytuje se zde navíc vzdálenost d_{ij} , která úsporu sníží, platí-li, že $d_{ij} \in \langle 0; d_{i0} + d_{0j} \rangle$. Vztah pro výpočet úspory ujeté vzdálenosti, které dosáhneme spojením kyvadlových jízd a představuje výhodnostní koeficient, má tvar $z_{ij} = d_{i0} + d_{0j} - d_{ij}$. Krajními případy jsou situace, kdy $d_{ij} = 0$ a $d_{ij} = d_{i0} + d_{0j}$. Je-li $d_{ij} = 0$, potom se dva různí zákazníci nacházejí ve stejném vrcholu dopravní sítě. Je-li $d_{ij} = d_{i0} + d_{0j}$, potom jde o případ, kdy minimální cesta z vrcholu v_i do vrcholu v_j prochází depem, nebo neprochází depem, ale její délka je stejná, jako délka jízdy procházející depem.

Vypočítané úspory jsou tedy vždy nezápornými hodnotami. Při sestavování distanční matice nezáleží na skutečnosti, zda minimální cesta mezi dvěma vrcholy zahrnuje výchozí uzel. Proto nerovnost, že $d_{ij} > d_{i0} + d_{0j}$, nemůže nastat.

Pro přehlednost se všechny úspory zapisují do matice úspor.

CWA– postup:

Níže popsaný postup je převzatý z materiálů [7].

Při splnění výše uvedených podmínek sestavíme distanční matici **D**, definujeme požadavky vrcholů q_i , kapacitu vozidla K , průměrnou rychlost vozidla v , dobu vykládky či nakládky jednoho elementu t a maximální přípustnou dobu pobytu vozidla mimo depo T .

1. krok: Sestavíme výchozí řešení definované jako soustavu kyvadlových jízd, pokračujeme 2. krokem.

2. krok: Vypočítáme hodnoty z_{ij} a sestavíme matici úspor **Z** (úspory nepočítáme v případě prvků matice, které obsahují index nula), pokračujeme 3. krokem.

3. krok: Existuje-li v matici úspor kladná hodnota, postoupíme na 4. krok, v opačném případě je splněno zastavovací pravidlo a CWA končí.

4. krok: V matici **Z** vybereme maximální hodnotu z_{ij} a testujeme, zda je splněna kapacitní podmínka pro sloučení tras (sloučením tras musí vzniknout přípustná trasa, tzn., že nesmí být překročena kapacita vozidla K a čas T). Pokud jsou splněny obě podmínky, realizujeme navrhované sloučení tras do jedné trasy (okružní jízdy) a pokračujeme 5. krokem (v případě, že některý z vrcholů je součástí okružní jízdy vytvořené v některém z předchozích kroků, je nutno za jeho požadavek dosadit součet požadavků všech vrcholů obsažených v dané okružní jízdě).

5. krok: Vyhledanou maximální hodnotu z_{ij} v matici úspor položíme rovnu nule, přestal-li být (v důsledku slučování jízd) některý vrchol krajním vrcholem (krajní vrchol je vrchol sousedící s depem), položíme v matici úspor rovny nule také všechny zbývající úspory týkající se tohoto vrcholu a následuje 3. krok.

3.3 Obecná formulace řešeného problému

V dopravní síti je umístěno n vrcholů. Pro každý vrchol $j = 0, \dots, n$, představující obec ležící na území České republiky, je definována hodnota q_j reprezentující buď požadavek zákazníka (školy) vyjádřený ve fj , který má být v řešeném plánovacím období uspokojen, nebo počet nakládaných fj . Na zákazníky (školy) nacházející se na území jedné obce je pohlíženo tak, jako by se jednalo pouze o jednoho zákazníka (školu). Hodnota n tedy nepředstavuje celkový počet zákazníků. Dále je definována hodnota t , která představuje dobu vykládky jedné fj a hodnota t' , která představuje dobu nakládky jedné fj . Dále je definována maximální doba obsluhy vrcholů T (doba od okamžiku příjezdu do prvního obsluhovaného vrcholu do okamžiku odjezdu z posledního obsluhovaného vrcholu v dané části plánovacího období).

Známa je poloha výchozího/cílového depa. Výchozím depem se rozumí vrchol, ve kterém začíná trasa obsluhy dané části plánovacího období. Cílovým depem se rozumí vrchol, ve kterém trasa obsluhy dané části plánovacího období končí.

3.4 Modifikovaný Clarke-Wrightův algoritmus

Původní CWA je určen pro samostatné rozvozní, nebo samostatné svozní úlohy.

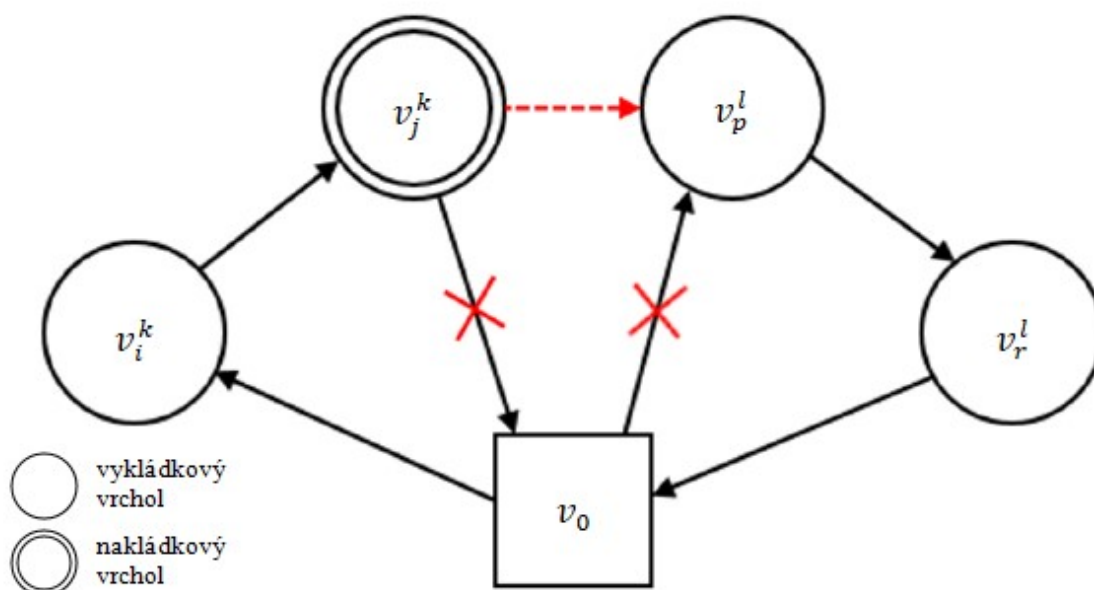
Protože původní CWA neumožňuje kombinovat v rámci jedné úlohy svoz a rozvoz zásilek a uvažuje celkovou dobu trvání jízdy, je nutno jej pro potřeby řešené úlohy určitým způsobem modifikovat.

Do modifikovaného CWA tedy musí být zapracovány následující změny:

1) Zapracování upraveného testu přípustnosti slučování jízd v případě, že obsluhované vrcholy mají různé funkce (nakládka, vykládka):

V podmínkách reálné okružní jízdy může nastat jeden ze dvou případů:

a) slučovanými krajními vrcholy jsou nakládkový a vykládkový vrchol, přičemž v navrhované okružní jízdě bude slučovaný nakládkový vrchol bezprostředně předcházet slučovanému vykládkovému vrcholu (viz Obrázek 13).



Obrázek 13: Slučovaný nakládkový vrchol bezprostředně předchází slučovanému vykládkovému vrcholu

Zdroj: [autor]

Horní index u označení vrcholů na Obrázku 13 reprezentuje číslo jízdy.

Když slučujeme krajní nakládkový vrchol s krajním vykládkovým vrcholem, přičemž v nově vzniklé okružní jízdě slučovaný krajní nakládkový vrchol bude bezprostředně předcházet slučovanému krajnímu vykládkovému vrcholu, je nutná kapacitní kontrola nově navržené okružní jízdy.

V případě reprezentovaném Obrázkem 13 je nutno realizovat dvoufázovou kontrolu kapacitní přípustnosti.

První fáze kontroly kapacitní přípustnosti se provádí standardně jako v případě původního CWA, tzn. před odjezdem z depa. Na rozdíl od původního CWA se však při kontrole neprovádí součet požadavků všech vrcholů, které jsou zařazeny do nově navržené okružní jízdy, ale pouze součet požadavků vykládkových vrcholů.

Druhá fáze kontroly kapacitní přípustnosti se provádí pro část nově navržené okružní jízdy, která následuje po zařazení nakládkového vrcholu do okružní jízdy.

Uvažujme následující dva jednoduché příklady odpovídající schématu na Obrázku 13.

Příklad 1 testu kapacitní přípustnosti nově navrhované okružní jízdy $v_0 \rightarrow v_i^k \rightarrow v_j^k \rightarrow v_p^l \rightarrow v_r^l \rightarrow v_0$

$$q_i^k = 50 \text{ fj (vykládkový vrchol)}$$

$$q_j^k = 100 \text{ fj (nakládkový vrchol)}$$

$$q_p^l = 10 \text{ fj (vykládkový vrchol)}$$

$$q_r^l = 20 \text{ fj (vykládkový vrchol)}$$

$$K = 250 \text{ fj (kapacita vozidla)}$$

První kontrola kapacitní přípustnosti (před odjezdem vozidla z vrcholu v_0):

$$\underbrace{q_i^l + q_p^l + q_r^l}_{\substack{\text{požadavky} \\ \text{všech vykládkových} \\ \text{vrcholů v navržené} \\ \text{okružní jízdě}}} \leq K$$

$$50 + 10 + 20 \leq 250$$

Druhá kontrola kapacitní přípustnosti (pro část jízdy za nakládkovým vrcholem):

$$\underbrace{q_p^l + q_r^l}_{\substack{\text{požadavky} \\ \text{vykládkových} \\ \text{vrchoů} \\ \text{v části jízdy} \\ \text{za nakládkovým} \\ \text{vrcholem}}} + \underbrace{q_j^k}_{\substack{\text{požadavek} \\ \text{nakládkového} \\ \text{vrcho}}} \leq K$$

$$10 + 20 + 100 \leq 250$$

Protože obě nerovnosti jsou splněny, je možno navrhované slučování obou okružních jízd

$v_0 \rightarrow v_i^k \rightarrow v_j^k \rightarrow v_0$ a $v_0 \rightarrow v_p^l \rightarrow v_r^l \rightarrow v_0$ do jedné okružní jízdy $v_0 \rightarrow v_i^k \rightarrow v_j^k \rightarrow v_p^l \rightarrow v_r^l \rightarrow v_0$ v příkladu 1 realizovat.

Příklad 2 testu kapacitní přípustnosti nově navrhované okružní jízdy $v_0 \rightarrow v_i^k \rightarrow v_j^k \rightarrow v_p^l \rightarrow v_r^l \rightarrow v_0$

$$q_i^k = 240 \text{ fj (vykládkový vrchol)}$$

$$q_j^k = 100 \text{ fj (nakládkový vrchol)}$$

$$q_p^l = 10 \text{ fj (vykládkový vrchol)}$$

$$q_r^l = 20 \text{ fj (vykládkový vrchol)}$$

$K = 250$ fj (kapacita vozidla)

První kontrola kapacitní přípustnosti (před odjezdem vozidla z vrcholu v_0):

$$\underbrace{q_i^k + q_p^l + q_r^l}_{\substack{\text{požadavky} \\ \text{všech vykládkových} \\ \text{vrcholů v navržené} \\ \text{okružní jízdě}}} \leq K$$

$$240 + 10 + 20 \not\leq 250$$

Druhá kontrola kapacitní přípustnosti (pro část jízdy za nakládkovým vrcholem):

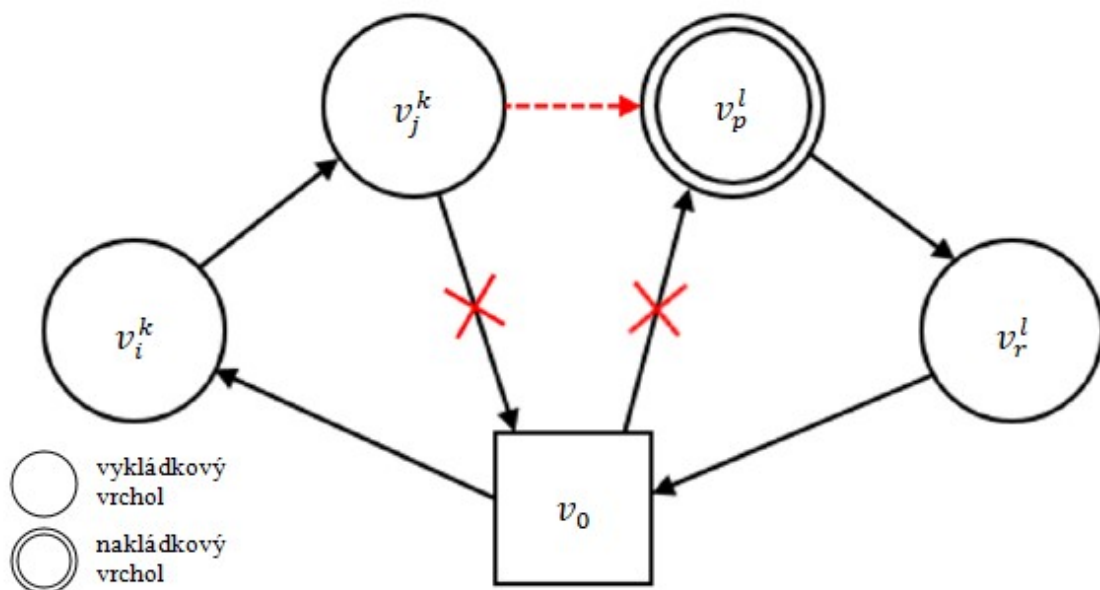
$$\underbrace{q_p^l + q_r^l}_{\substack{\text{požadavky} \\ \text{vykládkových} \\ \text{vrcholů} \\ \text{v části jízdy} \\ \text{za nakládkovým} \\ \text{vrcholem}}} + \underbrace{q_j^k}_{\substack{\text{požadavek} \\ \text{nakládkového} \\ \text{vrcholu}}} \leq K$$

$$10 + 20 + 100 \leq 250$$

Z uvedeného příkladu je zřejmé, že podmínka kapacitní přípustnosti je sice splněna v části jízdy nacházející se za nakládkovým vrcholem, ale, bohužel, není splněna před odjezdem vozidla ze střediska. Z uvedeného tedy plyne, že navrhované slučování okružních jízd $v_0 \rightarrow v_i^k \rightarrow v_j^k \rightarrow v_0$ a $v_0 \rightarrow v_p^l \rightarrow v_r^l \rightarrow v_0$ do jedné okružní jízdy $v_0 \rightarrow v_i^k \rightarrow v_j^k \rightarrow v_p^l \rightarrow v_r^l \rightarrow v_0$ v příkladu 2 realizovat nelze.

Analogicky se postupuje i v případech, kdy se na krajní nakládkový vrchol napojuje kyvadlová jízda realizovaná za účelem obsluhy vykládkového vrcholu.

b) slučovanými krajními vrcholy jsou nakládkový a vykládkový vrchol, přičemž v navrhované okružní jízdě bude nakládkový vrchol bezprostředně následovat po slučovaném vykládkovém vrcholu (viz Obrázek 14).



Obrázek 14: Slučovaný nakládkový vrchol bezprostředně následuje za slučovaným vykládkovým vrcholem

Zdroj: [autor]

Horní index u označení vrcholů na Obrázku 14 opět reprezentuje číslo jízdy.

Když slučujeme okružní jízdy prostřednictvím krajního nakládkového vrcholu a krajního vykládkového vrcholu, přičemž v nově vzniklé okružní jízdě slučovaný krajní nakládkový vrchol bezprostředně následuje za slučovaným krajním vykládkovým vrcholem, stačí provést pouze jednofázovou kontrolu kapacitní přípustnosti, a to kontrolu před odjezdem vozidla ze střediska. Druhou fází kontroly kapacitní přípustnosti není nutno realizovat, neboť kontrola kapacitní přípustnosti pro část nově navrhované okružní jízdy nacházející se za nakládkovým vrcholem již byla provedena před tvorbou okružní jízdy, ve které je nakládkový vrchol prvním obsluhovaným vrcholem.

Uvažujme opět následující jednoduchý příklad odpovídající tentokrát schématu na Obrázku 14.

Příklad 3 testu kapacitní přípustnosti nově navrhované okružní jízdy $v_0 \rightarrow v_i^k \rightarrow v_j^k \rightarrow v_p^l \rightarrow v_r^l \rightarrow v_0$

$q_i^k = 50 fj$ (vykládkový vrchol)

$q_j^k = 100 fj$ (vykládkový vrchol)

$$q_p^l = 10 fj \text{ (nakládkový vrchol)}$$

$$q_r^l = 20 fj \text{ (vykládkový vrchol)}$$

$$K = 250 fj \text{ (kapacita vozidla)}$$

$$\underbrace{q_i^k + q_j^k + q_r^l}_{\substack{\text{požadavky} \\ \text{všech vykládkových} \\ \text{vrcholů v navržené} \\ \text{okružní jízdě}}} \leq K$$

$$50 + 100 + 20 \leq 250$$

Nižší míra kontroly je umožněna tím, že se předpokládá, že kapacitní přípustnost okružní jízdy $v_0 - v_p^l - v_r^l - v_0$ již byla provedena před její realizací.

2) Úprava definice hodnoty T (maximální čas strávený na cestě):

Jedním ze vstupů do původního CWA je hodnota T reprezentující maximální čas strávený vozidlem na cestě. Hodnota T může reprezentovat např. časová omezení plynoucí z Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 561/2006. Uvedený typ časového omezení však vzhledem k parametrům vozidla (viz str. 16) nepřichází v úvahu.

Vzhledem k provozní době zákazníků (škol) a nakladatelství se však v řešené úloze vyskytuje jiný typ časového omezení. Hodnota T bude tedy v řešené stanovena jako doba od okamžiku příjezdu vozidla do prvního obsluhovaného vrcholu do okamžiku odjezdu vozidla z posledního obsluhovaného vrcholu v dané části plánovacího období (dne). Jak k nakládkovým, tak k vykládkovým vrcholům se vztahují stejná časová okna, ve kterých může obsluha proběhnout. Proto je také hodnota T nastavena jednotně.

Řidič tedy musí zorganizovat svou jízdu tak, aby uvedené časové podmínce vyhověl. Je tedy žádoucí naplánovat odjezd z výchozího vrcholu tak, aby příjezd k prvnímu obsluhovanému vrcholu byl načasován na začátek doby T .

3) Předpoklad nesymetrické matice úspor:

Vzhledem k povaze řešeného problému (reálná dopravní síť) nelze rovněž předpokládat, že matice úspor bude symetrická. Z toho důvodu nestačí pracovat s polovinou matice úspor, ale je nutné pracovat se všemi jejími hodnotami (vyjma hodnot nacházejících se na hlavní diagonále). Postup jejího nulování je ale principiálně totožný, jako u symetrické matice a bude detailněji popsán v postupu modifikovaného CWA.

Modifikovaný CWA – postup:

1. krok: Sestavíme výchozí řešení definované soustavou kyvadlových jízd, pokračujeme 2. krokem.

2. krok: Vypočítáme hodnoty z_{ij} (úspory) a sestavíme matici úspor \mathbf{Z} (úspory nepočítáme v případě prvků matice, které obsahují index nula), pokračujeme 3. krokem.

3. krok: Existuje-li v matici úspor kladná hodnota, postoupíme na 4. krok, v opačném případě je splněno zastavovací pravidlo a algoritmus končí.

4. krok: Položíme $\max|z_{ij}| = z_{max}$, tzn., že v matici \mathbf{Z} vybereme maximální hodnotu z_{ij} a pokračujeme 5. krokem.

5. krok: Testujeme, zda jsou splněny podmínky kapacitní přípustnosti pro slučování tras odpovídající vybrané maximální úspoře z_{max} (po sloučení tras musí vzniknout kapacitně přípustná trasa, tzn., že v žádné části jízdy nesmí být překročena kapacita vozidla K). Pokračujeme krokem 6.

6. krok: Provedeme součet jízdnicích dob mezi všemi vrcholy zahrnutými do okružní jízdy (s výjimkou dob cest z/do depa). K němu přičteme celkový čas potřebný pro nakládku/vykládku f_j a ověříme, zda byly všechny vrcholy obslouženy ve stanoveném časovém limitu T . Pokračujeme krokem 7.

7. krok: Když je splněna kapacitní i časová přípustnost navrhované okružní jízdy, realizujeme ji a položíme $z_{max} = 0$. Po obsluze vrcholu v_i následuje bezprostředně obsluha vrcholu v_j , a proto v matici úspor položíme rovny nule také všechny zbývající kladné hodnoty v řádku odpovídajícímu vrcholu v_i a všechny zbývající kladné hodnoty ve sloupci odpovídajícímu vrcholu v_j . Pokud se v matici úspor nacházejí úspory, které již nelze využít, protože se vrcholy, kterých se týká, již nacházejí uvnitř okružní jízdy (jedná se o vrcholy, které nesousedí se střediskem), také je položíme rovny nule.

V opačném případě (pokud není splněna kapacitní i časová přípustnost navrhované okružní jízdy) položíme $z_{max} = 0$.

Pokračujeme krokem 3.

4 Experimentální část – aplikace modifikovaného CWA na řešený problém

Cílem experimentální části bakalářské práce je aplikovat modifikovaný CWA, který zohlední veškerá specifika úlohy, na řešený problém a zhodnotit výsledky včetně jejich porovnání se skutečnými trasami realizovanými v týdnu 10. 8. – 14. 8. 2020.

Pokud obsluha probíhala k více zákazníkům nacházejícím se ve stejném městě/obci, byly z důvodu snížení celkového počtu obsluhovaných vrcholů sloučeny všechny školy do jednoho vrcholu.

V experimentální části práce budou řešeny dvě samostatné úlohy.

V první řešené úloze bude obsluhováno 14 škol v 9 obcích na území Moravskoslezského kraje. Ve druhé řešené úloze bude řešeno zbývajících 100 škol v 81 obcích na území ČR mimo Moravskoslezský kraj. Z řešení budou vynechány jízdy vozidla č. 1 v úterý 11. 8. 2020 a v pátek 14. 8. 2020. Důvodem uvedeného vynechání je skutečnost, že se v těchto dnech vozidlo pohybovalo pouze v Liberci a jeho nejbližším okolí, tedy v místě, kde se zároveň nachází i depo. Vzhledem k podstatě formulovaného problému, kdy se na zákazníky (školy) nacházející se na území jedné obce, nahlíží jako na jednoho zákazníka (školu), je bezpředmětné tyto jízdy do optimalizačních výpočtů zahrnovat.

Na území Moravskoslezského kraje byly v týdnu 10. 8. – 14. 8. 2020 uskutečněny dvě jízdy. První jízda byla zajišťována vozidlem č. 3 ve středu 12. 8. 2020, druhá jízda byla zajišťována vozidlem č. 4 ve čtvrtek 13. 8. 2020. Pro uvedené dvě jízdy platí následující plán:

Ložená vozidla se přemístí z depa v Liberci do vrcholu reprezentujícího obec Petřvald (u Nového Jičína). Při jízdě z Liberce do Petřvaldu nedochází k obsluze žádné školy, protože se jízdy z Liberce do Petřvaldu uskutečňují mimo přípustný limit obsluhy škol. Vzdálenost mezi vrcholem v_0 reprezentujícím depo v Liberci a vrcholem v_{34} reprezentujícím obec Petřvald bude pro účel výpočtu úspory z tohoto důvodu nulová. V obci Petřvald je naplánován noceh řidičů, přičemž v ranních hodinách následujícího dne je zahájena obsluha škol.

Přehled požadavků škol v podmínkách první úlohy je uveden v Tabulce 6. Přehled požadavků škol v podmínkách druhé úlohy je uveden v Tabulce 7.

Konkrétní škola je dohledatelná pod přiděleným číslem v převodní tabulce v Příloze 2.

Tabulka 6: Přehled požadavků škol – první úloha

Obec	Číslo školy	Požadavek na vykládku [fj]	Požadavek na vykládku po sloučení [fj]	Původně součástí obsluhy [č. vozidla, den]
Kopřivnice	1	84	186	4, ČT 13. 8. 2020
	2	102		3, ST 12. 8. 2020
Třinec	3	15	23	3, ST 12. 8. 2020
	4	8		3, ST 12. 8. 2020
Český Těšín	5	8	8	3, ST 12. 8. 2020
Havířov	6	21	21	3, ST 12. 8. 2020
Ostrava	7	43	117	3, ST 12. 8. 2020
	8	23		3, ST 12. 8. 2020
	9	38		4, ČT 13. 8. 2020
	10	13		4, ČT 13. 8. 2020
Lichnov u Bruntálu	11	5	5	3, ST 12. 8. 2020
Brušperk	12	24	24	4, ČT 13. 8. 2020
Frýdek-Místek	13	29	29	4, ČT 13. 8. 2020
Bukovec u Jablunkova	14	14	14	4, ČT 13. 8. 2020

Zdroj: [autor]

Tabulka 7: Přehled požadavků škol – druhá úloha

Obec	Číslo školy	Požadavek na vykládku [fj]	Požadavek na vykládku po sloučení [fj]	Původně součástí obsluhy [č. vozidla, den]
Kněžmost	15	24	24	1, PO 10. 8. 2020
Bakov nad Jizerou	16	85	85	1, PO 10. 8. 2020
Bělá pod Bezdězem	17	57	57	1, PO 10. 8. 2020
Horní Police	18	11	11	1, PO 10. 8. 2020
Okrouhlá	19	1	1	1, PO 10. 8. 2020
Brniště	20	10	10	1, PO 10. 8. 2020
Dubnice	21	4	4	1, PO 10. 8. 2020
Kosmonosy	22	214	214	2, PO 10. 8. 2020
Karlovy Vary	23	33	84	3, PO 10. 8. 2020
	24	51		3, PO 10. 8. 2020
Loket	25	4	4	3, PO 10. 8. 2020
Chodov	26	12	17	3, PO 10. 8. 2020
	27	5		3, PO 10. 8. 2020
Sokolov	28	19	26	3, PO 10. 8. 2020
	29	7		3, PO 10. 8. 2020
Lomnice	30	3	3	3, PO 10. 8. 2020
Hazlov	31	3	3	3, PO 10. 8. 2020
Františkovy Lázně	32	21	21	3, PO 10. 8. 2020
Planá	33	34	34	3, PO 10. 8. 2020

Rožmitál p. T.	34	9	9	4, PO 10. 8. 2020
Radomyšl	35	8	8	4, PO 10. 8. 2020
Písek	36	19	19	4, PO 10. 8. 2020
Záhoří	37	13	13	4, PO 10. 8. 2020
Třeboň	38	31	31	4, PO 10. 8. 2020
Jindřichův Hradec	39	35	35	4, PO 10. 8. 2020
Borotín	40	15	15	4, PO 10. 8. 2020
Doksy	41	17	17	2, ÚT 11. 8. 2020
Zahrádky	42	10	10	2, ÚT 11. 8. 2020
Česká Lípa	43	48	48	2, ÚT 11. 8. 2020
Zákupy	44	42	42	2, ÚT 11. 8. 2020
Cvikov	45	45	45	2, ÚT 11. 8. 2020
Turnov	46	23	23	3, ÚT 11. 8. 2020
Malá Skála	47	10	10	3, ÚT 11. 8. 2020
Tanvald	48	31	49	3, ÚT 11. 8. 2020
	49	18		3, ÚT 11. 8. 2020
Jablonec nad Nisou	50	19	37	3, ÚT 11. 8. 2020
	51	6		3, ÚT 11. 8. 2020
	52	4		3, PÁ 14. 8. 2020
	53	8		3, ÚT 11. 8. 2020
Hradec Králové	54	6	61	4, ÚT 11. 8. 2020
	55	35		4, ÚT 11. 8. 2020
	56	20		4, ÚT 11. 8. 2020
Stěžery	57	16	16	4, ÚT 11. 8. 2020
Libčany	58	70	70	4, ÚT 11. 8. 2020
Nový Bydžov	59	68	86	4, ÚT 11. 8. 2020
	60	18		4, ÚT 11. 8. 2020
Kašperské Hory	61	12	12	1, ST 12. 8. 2020
Sušice	62	51	51	1, ST 12. 8. 2020
Plánice	63	26	26	1, ST 12. 8. 2020
Kout na Šumavě	64	19	19	1, ST 12. 8. 2020
Domažlice	65	66	66	1, ST 12. 8. 2020
Bělá nad Radbuzou	66	47	47	1, ST 12. 8. 2020
Ronov n. D.	67	74	74	2, ST 12. 8. 2020
Kolín	68	7	26	2, ST 12. 8. 2020
	69	19		2, ST 12. 8. 2020
Poděbrady	70	14	14	2, ST 12. 8. 2020
Nymburk	71	8	8	2, ST 12. 8. 2020
Luštěnice	72	42	42	2, ST 12. 8. 2020
Semčice	73	16	16	2, ST 12. 8. 2020
Dobrovice	74	52	52	2, ST 12. 8. 2020
Praha	75	30	30	4, ST 12. 8. 2020
Srubby	76	3	3	1, ČT 13. 8. 2020
Choceň	77	72	72	1, ČT 13. 8. 2020
Litomyšl	78	56	56	1, ČT 13. 8. 2020
Svitavy	79	7	7	1, ČT 13. 8. 2020
Březová n. S.	80	38	38	1, ČT 13. 8. 2020

Morašice	81	21	21	1, ČT 13. 8. 2020
Podbořany	82	18	18	2, ČT 13. 8. 2020
Žatec	83	5	22	2, ČT 13. 8. 2020
	84	17		2, ČT 13. 8. 2020
Chomutov	85	11	16	2, ČT 13. 8. 2020
	86	5		2, ČT 13. 8. 2020
Most	87	22	36	2, ČT 13. 8. 2020
	88	14		2, ČT 13. 8. 2020
Novosedlice	89	24	24	2, ČT 13. 8. 2020
Chabařovice	90	28	28	2, ČT 13. 8. 2020
Ústí nad Labem	91	29	71	2, ČT 13. 8. 2020
	92	6		2, ČT 13. 8. 2020
	93	36		2, ČT 13. 8. 2020
Jilemnice	94	17	17	3, ČT 13. 8. 2020
Rudník	95	21	21	3, ČT 13. 8. 2020
Hostinné	96	45	45	3, ČT 13. 8. 2020
Dvůr Králové n. L.	97	44	44	3, ČT 13. 8. 2020
Jičín	98	35	62	3, ČT 13. 8. 2020
	99	27		3, ČT 13. 8. 2020
Dolní Podluží	100	1	1	2, PÁ 14. 8. 2020
Varnsdorf	101	12	12	2, PÁ 14. 8. 2020
Rumburk	102	62	62	2, PÁ 14. 8. 2020
Šluknov	103	13	13	2, PÁ 14. 8. 2020
Dolní Poustevna	104	2	2	2, PÁ 14. 8. 2020
Prysk	105	5	5	2, PÁ 14. 8. 2020
Kamenický Šenov	106	65	65	2, PÁ 14. 8. 2020
Lučany nad Nisou	107	40	40	3, PÁ 14. 8. 2020
Velké Hamry	108	51	51	3, PÁ 14. 8. 2020
Semily	109	19	32	3, PÁ 14. 8. 2020
	110	13		3, PÁ 14. 8. 2020
Žamberk	111	63	88	4, PÁ 14. 8. 2020
	112	25		4, PÁ 14. 8. 2020
Vamberk	113	45	45	4, PÁ 14. 8. 2020
Lanškroun	114	19	19	4, PÁ 14. 8. 2020

Zdroj: [autor]

V rámci daného plánovacího období jsou dále formulovány požadavky na nakládku, viz Tabulka 8.

Tabulka 8: Přehled požadavků na nakládku

Nakladatelství	Požadavek na nakládku [fj]	Původně součástí obsluhy [č. vozidla, den]
FRAUS – Chebská 78/25, Plzeň	162	1, 12. 8. 2020
Fortuna, SPN – Říčanská 108, Čestlice	241	4, 12. 8. 2020
Tiskárna Nová škola - Vikýřovice	210	4, 14. 8. 2020

Zdroj: [autor]

4.1 Vstupní data a jejich příprava

DISTANČNÍ MATICE

Distanční matice obsahuje údaje o minimálních dobách přejezdů $d_{i,j}$ (uvedených v minutách) mezi vrcholy zahrnutými do CWA, které reprezentují obce s obsluhovanými školami, místy nakládky a výchozím/cílovým depem v Liberci. V případě úlohy o obsluze škol v Moravskoslezském kraji bude distanční matice obsahovat také vrchol reprezentující místo noclehu řidičů – obec Petřvald.

K výpočtu hodnot uvedených v distančních maticích byl využit software CDXZipStream nainstalovaný do uživatelského prostředí MS Office Excel. Aby bylo možné program využít, bylo nejdříve nutné získat tzv. API¹ klíč. Pro získávání dat z portálu bing.com/maps/ lze API klíč získat zdarma po přihlášení uživatele pod účtem Microsoft na bingmapsportal.com. Po zadání API klíče v nastavení programu dokáže CDXZipStream pro vybrané adresy nalézt minimální doby přejezdů, případně jejich vzájemné vzdálenosti (dle požadavku uživatele), bez nutnosti zadávat parametry každé trasy zvlášť v rozhraní mapové aplikace.

Před zahájením výpočtů minimálních dob přejezdů mezi vrcholy bylo nutno definovat konkrétní adresy, mezi kterými byly vzdálenosti počítány. Pokud se v dané obci nacházela pouze jedna obsluhovaná škola, potom adresa odpovídala poloze uvedené školy. Pomocí přesné adresy je definována i poloha všech míst s požadavkem na nakládku a depa v Liberci. Pokud se v dané obci nacházelo více obsluhovaných škol, potom adresa odpovídala geografickému středu města.

¹ Application Programming Interface – Jedná se o rozhraní, kterým mohou komunikovat dvě aplikace mezi sebou a vyměňovat si tak data [9].

Distanční matice pro první i druhou úlohu se nacházejí v Příloze 1.

DEPO

Výchozím bodem, ze kterého je zboží distribuováno, je depo v Liberci reprezentované vrcholem v_0 . I přesto, že nakládka zboží probíhá i v jiných vrcholech sítě, všechny objednávky projdou před doručením ke koncovým zákazníkům právě přes depo v Liberci.

Pro potřeby první úlohy (obsluha 14 škol v 9 obcích na území Moravskoslezského kraje) bude jako výchozí depo uváděn Petřvald (u Nového Jičína) reprezentovaný vrcholem v_{34} .

MNOŽSTEVNÍ POŽADAVEK q_j

Množstevní požadavky pro každého zákazníka i požadavek po sloučení škol, které se nacházejí ve stejném městě/obci, do jednoho vrcholu, je uveden přímo v Tabulkách 6, 7 a 8.

KAPACITA OBSLUŽNÉHO VOZIDLA K

Kapacita obslužného vozidla byla nastavena na 250 fiktivních jednotek. Z přepočtu vychází, že $1 fj = 5,92 kg$.

MAXIMÁLNÍ ČAS STRÁVENÝ NA CESTĚ T

V řešené úloze není striktně omezený čas strávený na cestě. Větší výpovědní hodnotu má časové okno, ve kterém je možné realizovat vykládku ve školách, případně nakládku v nakladatelstvích. Časové okno odpovídá časovému intervalu 7.30 – 13.30 h. Pro hodnotu T tedy platí, že $T = 6 h = 360 min$, přičemž se do něj jako první zahrnuje manipulační doba v prvním obsluhovaném vrcholu a jako poslední manipulační doba v posledním obsluhovaném vrcholu. Předpokládá se, že odjezd vozidla z depa v Liberci, nebo vrcholu reprezentujícího obec Petřvald (v případě obsluhy škol na území Moravskoslezského kraje) je naplánován tak, aby příjezd do prvního obsluhovaného vrcholu nastal vždy v 7.30 ($T = 0 min$).

DOBA VYKLÁDKY t , DOBA NAKLÁDKY t'

Doba vykládky jedné fiktivní jednotky t vychází z výpočtu provedeného v podkapitole 2.2 na str. 27 a činí 0,8 min. Doba nakládky jedné fiktivní jednotky t' je stanovena na 0,1 min.

4.2 První úloha – obsluha škol na území Moravskoslezského kraje

1. krok: Výchozí řešení

Přehled kyvadlových jízd je obsažen v Tabulce 9. Určit adresu, které náleží jednotlivé indexy vrcholů, lze s pomocí distanční matice v Příloze 3.

Tabulka 9: První úloha - přehled kyvadlových jízd

k	Jízda (trasa) J_k (34 – i – 0)	$\sum_{i \in J_k} q_i [fj]$
1	34 – 52 – 0	186
2	34 – 53 – 0	23
3	34 – 54 – 0	8
4	34 – 55 – 0	21
5	34 – 56 – 0	117
6	34 – 57 – 0	5
7	34 – 77 – 0	24
8	34 – 78 – 0	29
9	34 – 79 – 0	14
Celkem	–	427

Zdroj: [autor]

2. krok: Matice úspor

V matici úspor jsou uvedeny časové úspory v minutách ve vazbě na vrchol v_{34} (obec Petřvald reprezentující výchozí vrchol). Jelikož se z hlediska časové přípustnosti neuvažuje doba jízdy z výchozího vrcholu do prvního obsluhovaného vrcholu a doba jízdy z posledního obsluhovaného vrcholu do cílového vrcholu a zároveň při jízdě z Liberce do Petřvaldu nedochází k obsluze žádné školy, je možné pro potřeby tohoto výpočtu považovat vzdálenost mezi vrcholy v_0 (depo v Liberci) a v_{34} (penzion v obci Petřvald, ve kterém jízda ráno reálně začíná) za nulovou.

Tabulka 10: První úloha - matice úspor

	52	53	54	55	56	57	77	78	79
52	–	18	18	6	7	5	6	17	18
53	17	–	66	45	27	21	15	40	80
54	17	65	–	48	27	21	15	40	63
55	8	44	48	–	40	33	14	32	44
56	6	27	27	39	–	35	14	27	27
57	3	19	19	30	32	–	9	19	19
77	6	15	15	13	13	11	–	15	15
78	16	39	39	29	28	22	14	–	39
79	17	76	62	44	27	21	15	40	–

*Zdroj: [autor]***Problematika vrcholu v_0 v první úloze:**

Aby byl výpočet z algoritmického hlediska proveden správně, je nutno kyvadlové i okružní jízdy zahajované ve v_{34} (Petřvald) v tomto vrcholu také formálně ukončit, a to i v případě, že toto ukončení ve vrcholu v_{34} neproběhne, protože jízda vozidla končí v Liberci reprezentovaným vrcholem v_0 .

Proto také jsou jednotlivé kyvadlové jízdy v Příloze 3, kde je uveden postup celého výpočtu, zapsány ve tvaru $34 - i - 34$. Na druhou stranu, matice úspor obsahuje navíc vrchol v_0 reprezentující depo v Liberci. Přehled kyvadlových jízd tedy navíc obsahuje formálně zavedenou jízdu ve tvaru $34 - 0 - 34$, přičemž pro požadavek vrcholu v_0 platí $q_0 = 0$ *fj*.

Řádek odpovídající vrcholu v_0 je v matici úspor vynulován ještě před prvním výběrem maximální hodnoty úspory, jelikož musí být tento vrchol zařazen až jako poslední obsluhovaný v dané okružní jízdě. Není možné uvažovat s přejezdem vozidla z vrcholu v_0 do jiného vrcholu.

Sloupec odpovídající vrcholu v_0 před prvním výběrem maximální hodnoty úspory vynulován není, ovšem v průběhu výpočtu se z něj maximální úspora nevybírá. Mohla by totiž nastat situace, kdy bude vrchol v_0 zařazen do okružní jízdy příliš brzy, a tím nemusí dojít k maximálnímu vytížení loženého vozidla. Maximální vytížení vozidla je v případě jízd na území Moravskoslezského kraje preferováno, protože je nutno si uvědomit, že každá jízda na území Moravskoslezského kraje znamená neproduktivně ujetou vzdálenost mezi Libercem a vrcholem reprezentujícím obec Petřvald. Po realizaci 7. sloučení jízd, kdy již matice úspor, vyjma sloupec odpovídající vrcholu v_0 , neobsahuje

žádnou kladnou hodnotu, je pak sloupec odpovídající vrcholu reprezentujícímu depo v Liberci zařazen do procesu výběru maximální úspory.

Vrchol v_0 může být obslužen vícekrát, než jednou, a je tak zařazen jako poslední obsluhovaný do všech zbylých okružních jízd.

3. krok: Splnění zastavovacího pravidla

Protože matice úspor obsahuje minimálně jeden kladný prvek, pokračujeme 4. krokem.

4. krok: Výběr maximální úspory

Z matice nyní vybereme maximální úsporu - $z_{53,79} = 80$.

5. krok: Ověření kapacitní přípustnosti navrhované okružní jízdy

Před zařazením vrcholu v_{79} do kyvadlové jízdy k_2 za vrchol v_{53} je nutné ověřit kapacitní a časovou přípustnost navrhované okružní jízdy. Oba vrcholy jsou vykládkové, tzn., že kapacitní ověření navrhované okružní jízdy proběhne podle pravidel původního CWA.

$$q_{53} + q_{79} = 23 fj + 14 fj = 37 fj \leq K = 250 fj$$

6. krok: Ověření časové přípustnosti navrhované okružní jízdy

$$t_{53} + d_{53,79} + t_{79} = t \cdot q_{53} + d_{53,79} + t \cdot q_{79} = 0,8 \cdot 23 + 27 + 0,8 \cdot 14 = 56,6 \text{ min} \\ \leq T = 360 \text{ min}$$

7. krok: Sloučení vrcholů do společné okružní jízdy, nulování prvků v matici úspor

Protože jsou obě podmínky přípustnosti splněny, je možno, aby po obsluze vrcholu v_{53} následovala obsluha vrcholu v_{79} . Vrchol v_{79} tedy přidáme do jízdy $k = 2$ za vrchol v_{53} . Tímto postupem dojde k zániku kyvadlové jízdy $k = 9$.

Přehled jízd se změnil následovně, viz Tabulka 11:

Tabulka 11: První úloha – přehled kyvadlových jízd po sloučení obsluhy v_{53} a v_{79}

k	Jízda (trasa) J_k ($34 - i - 0$)	$\sum_{i \in J_k} q_i [fj]$
1	33 – 52 – 0	186
2	33 – 53 – 79 – 0	37
3	33 – 54 – 0	8
4	33 – 55 – 0	21
5	33 – 56 – 0	117
6	33 – 57 – 0	5
7	33 – 77 – 0	24
8	33 – 78 – 0	29

Zdroj: [autor]

Položíme $z_{53,79} = 0$ a $z_{79,53} = 0$.

Po obsluze vrcholu v_{53} následuje bezprostředně obsluha vrcholu v_{79} , a proto v matici úspor položíme rovny nule také všechny zbývající kladné hodnoty v řádku odpovídajícímu vrcholu v_{53} a všechny zbývající kladné hodnoty ve sloupci odpovídajícímu vrcholu v_{79} .

Matrice úspor bude po prvním sloučení vrcholů vypadat následovně:

Tabulka 12: První úloha – matice úspor po sloučení obsluhy v_{53} a v_{79}

	52	53	54	55	56	57	77	78	79
52	–	18	18	6	7	5	6	17	0
53	0	–	0	0	0	0	0	0	0
54	17	65	–	48	27	21	15	40	0
55	8	44	48	–	40	33	14	32	0
56	6	27	27	39	–	35	14	27	0
57	3	19	19	30	32	–	9	19	0
77	6	15	15	13	13	11	–	15	0
78	16	39	39	29	28	22	14	–	0
79	17	0	62	44	27	21	15	40	–

Zdroj: [autor]

Novou nejvyšší úsporou je nyní $z_{54,53} = 65$. Pokračovat budeme stejným způsobem (5. krok). V případě, že nejsou v nějakém kroku splněny obě podmínky, vrchol není do okružní jízdy zařazen, řešená úspora je v matici vynulována a po jejím vynulování je vybrána aktuální maximální úspora.

4.3 První úloha - výsledná podoba okružních jízd

Po skončení CWA dostáváme dvě okružní jízdy $k = 1$ a $k = 5$.

Tabulka 13: První úloha – přehled okružních jízd

k	Jízda (trasa) J_k ($34 - i - 0$)	$\sum_{i \in J_k} q_i [fj]$
1	34 – 52 – 57 – 0	191
5	34 – 56 – 55 – 54 – 53 – 79 – 78 – 77 – 0	236

Zdroj: [autor]

4.4 Druhá úloha – obsluha škol na území ČR mimo území

Moravskoslezského kraje

Vzhledem k rozsahu druhé úlohy (81 obsluhovaných vykládkových vrcholů, 3 obsluhované nakládkové vrcholy a 1 výchozí vrchol) se celý průběh výpočtu nachází pouze v Příloze 4. Jelikož se ovšem v první úloze nevyskytla problematika zařazování nakládkových vrcholů do okružní jízdy, jsou do textu bakalářské práce zařazeny dva případy, u kterých k tomu během řešení druhé úlohy došlo. U uvedených dvou případů bude v textu bakalářské práce ukázáno ověření pouze kapacitní přípustnosti.

Příklad 1)

4. krok: Výběr maximální úspory

Z matice vybíráme úsporu $z_{93,92} = 335$.

Vrchol v_{93} je nakládkovým vrcholem, vrchol v_{92} vykládkovým vrcholem. V aktuálním řešení jsou oba vrcholy obsluhovány prostřednictvím samostatných kyvadlových jízd ($k = 92$ ve tvaru $0 - 93 - 0$ a $k = 91$ ve tvaru $0 - 92 - 0$).

5. krok: Ověření kapacitní přípustnosti navrhované okružní jízdy

Před zařazením vrcholu v_{92} do kyvadlové jízdy $k = 92$ za vrchol v_{93} je nutné ověřit kapacitní a časovou přípustnost navrhované okružní jízdy. V tomto případě bude kapacitní ověření vypadat následovně:

$$q_{93} + q_{92} = 210 fj + 19 fj = 229 fj \leq K = 250 fj$$

Příklad 2)

4. krok: Výběr maximální úspory

Z matice vybíráme úsporu $z_{63,93} = 311$.

Vrchol v_{63} je vykládkovým vrcholem, vrchol v_{93} nakládkovým vrcholem. Při splnění kapacitní a časové podmínky dojde ke sloučení okružních jízd $k = 64$ ve tvaru $0 - 62 - 63 - 0$ a $k = 92$ ve tvaru $0 - 93 - 92 - 0$.

5. krok: Ověření kapacitní přípustnosti navrhované okružní jízdy

Před zařazením vrcholu v_{93} do okružní jízdy $k = 64$ za vrchol v_{63} je nutné ověřit kapacitní a časovou přípustnost navrhované okružní jízdy. Slučovanými krajními vrcholy jsou nakládkový a vykládkový vrchol, přičemž v navrhované okružní jízdě bude nakládkový vrchol bezprostředně následovat po slučovaném vykládkovém vrchole. V tomto případě bude kapacitní ověření vypadat následovně:

$$q_{62} + q_{63} + q_{92} = 7 fj + 38 fj + 19 fj = 64 fj \leq K = 250 fj$$

Případ, kdy by slučovanými krajními vrcholy byly nakládkový a vykládkový vrchol, přičemž by v navrhované okružní jízdě nakládkový vrchol bezprostředně předcházel slučovanému vykládkovému vrcholu, v průběhu výpočtu nenastal.

4.5 Druhá úloha – výsledná podoba okružních jízd

Výsledkem druhé úlohy je následujících 14 okružních jízd a jedna kyvadlová jízda (viz Tabulka 14). Indexy nakládkových vrcholů jsou pro větší zřetelnost uvedeny tučně.

Tabulka 14: Druhá úloha – přehled okružních jízd

k	Jízda (trasa) J_k (0 – i – 0)	$\sum_{i \in J_k} q_i [f_j]$
12	0 – 3 – 25 – 26 – 27 – 4 – 86 –85 – 5 – 0	214
17	0 – 8 – 0	214
20	0 – 11 – 10 – 12 – 13 – 14 –15 – 9 – 65 – 66 – 0	198
25	0 – 16 – 44 – 43 – 42 – 17 –0	166+162 (nakl.)
29	0 – 20 – 19 – 39 – 40 – 41 –18 – 0	125
31	0 – 22 – 23 – 24 – 94 – 0	81+241 (nakl.)
42	0 – 33 – 87 – 32 – 88 – 0	177
54	0 – 46 – 90 – 45 – 64 – 36 –0	225
57	0 – 49 – 48 – 47 – 37 – 38 –1 – 0	244
58	0 – 2 – 50 – 51 – 0	153
60	0 – 58 – 67 – 68 – 69 – 70 –71 – 0	205
61	0 – 59 – 60 – 91 – 35 – 76 –0	243
63	0 – 61 – 62 – 63 – 93 – 92 –0	101+210 (nakl.)
77	0 – 75 – 74 – 73 – 72 – 89 –21 – 31 – 30 – 0	205
80	0 – 81 – 82 – 83 – 84 – 80 –29 – 6 – 28 – 7 – 0	191

Zdroj: [autor]

4.6 Srovnání výsledků s původním stavem

Pro reprezentaci výsledků a jejich srovnání s původním stavem slouží následující Tabulky 15 a 16. Vzhledem ke skutečnosti, že bakalářská práce řeší obsluhu vrcholů v rámci jednoho týdne, kdy není dáno, v jaký den je nutné daný vrchol navštívit, není smysluplné mezi sebou srovnávat jízdy jednotlivých vozidel, ani celkové hodnoty pro všechna vozidla v jednotlivých dnech. Srovnávány jsou tedy pouze celkové hodnoty za celé plánovací období (celý týden), rozdělené na první a druhou úlohu. U celkové doby jízdy a celkové ujeté vzdálenosti jsou v případě původního stavu uvedeny vždy dvě hodnoty. Naměřená data vychází z reálného měření v daném plánovacím období, avšak pro srovnání s novým stavem je vhodnější i pro původní stav použít data získaná z distančních matic časových a kilometrických vzdáleností, které byly v rámci bakalářské práce vytvořeny.

Tabulka 15: První úloha – srovnání výsledků

	Původní stav (naměřená data)	Původní stav (získaná data)	Nový stav
Okružních jízd celkem	2		2
Celková doba jízdy [h] [min]	26 h 25 min	22 h 22 min	21 h 18 min
Celková ujetá vzdálenost [km]	1666	1619	1520

Zdroj: [autor]

Pozn.: Hodnoty jsou udávány včetně cesty z depa v Liberci do vrcholu v_{34} reprezentujícího obec Petřvald, z vrcholu v_{34} do prvního obsluhovaného vrcholu a z posledního obsluhovaného vrcholu do depa v Liberci.

Tabulka 16: Druhá úloha – srovnání výsledků

	Původní stav (naměřená data)	Původní stav (získaná data)	Nový stav
Okružních jízd celkem	15		14
Kyvadlových jízd celkem	1		1
Celková doba jízdy [h] [min]	81 h 50 min	77 h 15 min	69 h 35 min
Celková ujetá vzdálenost [km]	5212	5451	4975

Zdroj: [autor]

Rozdíly v hodnotách celkové doby jízdy u původního stavu mohou být způsobeny nezaznamenanou přestávkou řidiče v jízdě, kongescemi v dopravních špičkách, nižší cestovní rychlostí naloženého vozidla, nebo, stejně jako rozdíly v ujeté vzdálenosti, zvolením mírně odlišné trasy. Celková ujetá vzdálenost se pak ale liší hlavně z důvodu

slučování adres škol nacházejících se na území jedné obce do jedné (zanedbání přejezdů po městě/obci).

V případě první úlohy se podařilo díky využití modifikovaného CWA uspořít oproti původnímu rozvržení tras $1\text{ h } 4\text{ min}$. Tato doba představuje úsporu **4,8 %**. Snížila se i celková ujetá vzdálenost z 1619 km na 1520 km .

Významnější rozdíly mezi původním a novým stavem jsou vidět v případě druhé úlohy. Po výpočtu provedeném s využitím modifikovaného CWA byl snížen původní počet 15 okružních jízd na 14 okružních jízd, tzn., že byla ušetřena jedna jízda jednoho vozidla. Celková doba jízdy poklesla o **9,0 %** z hodnoty $77\text{ h } 15\text{ min}$ na $69\text{ h } 35\text{ min}$. Výrazně se podařilo snížit i celkovou ujetou vzdálenost, a to o **8,7 %** z 5451 km na 4975 km .

5 Závěr

Bakalářská práce se zabývala validací efektivity současného stavu distribuce učebnic firmou XY, a to na základě porovnání původního stavu (obslužných tras realizovaných v daném plánovacím období roku 2020) s novým stavem (obslužnými trasami navrženými v bakalářské práci).

První kapitola práce je teoretická a je stručně věnována zejména terminologii vztahující se k distribuční logistice a kategorizaci distribučních systémů, včetně distribučních systémů ve školství.

Druhá kapitola bakalářské práce se zabývá analýzou vývoje na trhu učebnic a současným stavem ve firmě XY. Nacházejí se v ní mj. data z reálného provozu za období daného plánovacího období (jednoho týdne), na nichž byla validace efektivity prováděna.

Následuje kapitola 3, ve které bylo krátce představeno využití teorie grafů v dopravě a obecná formulace problému. Pro formulovaný problém byl následně navržen modifikovaný Clarke-Wrightův algoritmus.

Experimentální část bakalářské práce obsažená v kapitole 4 byla, vzhledem k drobným odlišnostem jednotlivých částí řešeného problému, rozdělena na dvě úlohy. V první úloze byl modifikovaný CWA aplikován na menší dopravní síť. Dopravní síť řešená v druhé úloze nebyla vzhledem k počtu řešených vrcholů (celkem 85) vhodná k reprezentaci v tištěné podobě, a proto se postup řešení nachází pouze v elektronické příloze. Po ukončení řešení první a druhé úlohy následuje srovnání získaných výsledků s původním stavem. V závěru kapitoly 4 bylo také provedeno zhodnocení přínosů bakalářské práce.

Validace efektivity současného systému distribuce učebnic firmou XY proběhla úspěšně. I přesto, že byl modifikovaný CWA aplikován pouze na trasy v rámci jednoho týdne, ukazuje výsledek výpočtu, že plánování distribuce za pomoci vhodných optimalizačních nástrojů má potenciál zlepšit její efektivitu, přičemž časová i vzdálenostní úspora znamená v tomto případě zároveň snížení variabilních nákladů na obsluhu zákazníků.

Použité zdroje

- [1] Pernica, P. *Logistický management*. Teorie a podniková praxe. 1. vydání. Praha: Radix, 1998. ISBN 80-86031-13-6.
- [2] Hálek, V. *Prezentace k přednáškám z předmětu Marketing* [online]. [cit. 2021-07-12]. Dostupné z: <https://halek.info/prezentace/marketing-prednasky6/mprp6-print.php?projection&l=10>
- [3] Hálek, V. *Prezentace k přednáškám z předmětu Prodej a reklama* [online]. [cit. 2021-07-12]. Dostupné z: <https://halek.info/prezentace/sell-prednasky1/sellp1-print.php?projection&l=03>
- [4] Janáček, J. *Optimalizace na dopravních sítích*. 1. vydání. Žilina: EDIS, 2003. ISBN 80-8070-031-1
- [5] Kovář, P. *Úvod do Teorie grafů* [online]. 2012. [cit. 2021-07-12]. Dostupné z: https://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/uvod_do_teorie_grafu.pdf
- [6] Horák, J. *Prostorová analýza dat* [online]. Linie, cesty v sítích. [cit. 2021-07-12]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~hor10/Vyuka/PAD/PAD72020.pdf>
- [7] Mocková D., Teichmann D. *Studijní materiály k předmětu Teorie grafů a její aplikace v dopravě*.
- [8] Seznam.cz. *Mapy.cz* [online]. [cit. 2021-06-07]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>
- [9] SmartSelling a.s. *Co je to API a k čemu slouží?* [online]. 2016. [cit. 2021-07-12]. Dostupné z: <https://napoveda.smartemailing.cz/article/343-co-je-to-api-a-k-cemu-slouzi>

Seznam zkratk

Firma XY	Anonymizovaná reálná firma zabývající se distribucí učebnic zejména pro základní školy
ONIV	Ostatní neinvestiční prostředky
TSP	Traveling salesman problem = problém obchodního cestujícího
VRP	Vehicle routing problem = problém trasování vozidel
HK	Hamiltonovská kružnice
CWA	Clarke-Wrightův algoritmus
API	Application Programming Interface

Seznam grafů

Graf 1: Vývoj počtu zaměstnanců firmy XY	12
Graf 2: Vývoj počtu vozidel provozovaných firmou XY	12
Graf 3: Vývoj ročního obrátu firmy XY	13
Graf 4: Vývoj počtu zákazníků firmy XY	14

Seznam obrázků

Obrázek 1: Distribuční systém s přímou cestou.....	8
Obrázek 2: Distribuční systém s nepřímou cestou.....	8
Obrázek 3: Vícekomoditní distribuční systém	10
Obrázek 4: Vyznačení významnosti krajů ČR pro firmu XY z hlediska velikosti odbytu	16
Obrázek 5: Vozidlo využívané k distribuci.....	16
Obrázek 6: Schematická mapa – obslužné trasy v pondělí 10. 8. 2020	19
Obrázek 7: Schematická mapa – obslužné trasy v úterý 11. 8. 2020	21
Obrázek 8: Schematická mapa – obslužné trasy ve středu 12. 8. 2020.....	23
Obrázek 9: Schematická mapa – obslužné trasy ve čtvrtek 13. 8. 2020	25
Obrázek 10: Schematická mapa – obslužné trasy v pátek 14. 8. 2020.....	27
Obrázek 11: Výchozí řešení	30
Obrázek 12: Sloučení kyvadlových jízd v okružní jízdou	31
Obrázek 13: Slučovaný nakládkový vrchol bezprostředně předchází slučovanému vykládkovému vrcholu	34
Obrázek 14: Slučovaný nakládkový vrchol bezprostředně následuje za slučovaným vykládkovým vrcholem.....	37

Seznam tabulek

Tabulka 1: Obslužné trasy v pondělí 10. 8. 2020.....	18
Tabulka 2: Obslužné trasy v úterý 11. 8. 2020	20
Tabulka 3: Obslužné trasy ve středu 12. 8. 2020	22
Tabulka 4: Obslužné trasy ve čtvrtek 13. 8. 2020.....	24
Tabulka 5: Obslužné trasy v pátek 14. 8. 2020	26
Tabulka 6: Přehled požadavků škol – první úloha	41
Tabulka 7: Přehled požadavků škol – druhá úloha	41
Tabulka 8: Přehled požadavků na nakládku.....	44
Tabulka 9: První úloha – přehled kyvadlových jízd	46
Tabulka 10: První úloha – matice úspor	47
Tabulka 11: První úloha – přehled kyvadlových jízd po sloučení obsluhy v_{53} a v_{79}	49
Tabulka 12: První úloha – matice úspor po sloučení obsluhy v_{53} a v_{79}	49
Tabulka 13: První úloha – přehled okružních jízd	50
Tabulka 14: Druhá úloha – přehled okružních jízd.....	52
Tabulka 15: První úloha – srovnání výsledků.....	53
Tabulka 16: Druhá úloha – srovnání výsledků	53

Přílohy na CD

Příloha 1 – Distanční matice

Příloha 2 – Převodní tabulka ZŠ

Příloha 3 – Podklady a rámcový postup výpočtu pro první úlohu

Příloha 4 – Podklady a rámcový postup výpočtu pro druhou úlohu