

Univerzita Pardubice

Dopravná fakulta Jana Pernera

Nasadenie nízkoemisných vozidiel na linku 63 MHD Bratislava

Diplomová práca

2024

Bc. Andrej Barkar

Prohlašuji:

Práci s názvem **Nasadenie nízkoemisných vozidiel na linku 63 MHD Bratislava** jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 9.5.2024

Bc. Andrej Barkar v. r.

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Andrej Barkar**
Osobní číslo: **D22457**
Studijní program: **N1041A040008 Technologie a management v dopravě**
Specializace: **Technologie a řízení dopravy**
Téma práce: **Nasadenie nízkoemisných vozidiel na linku 63 MHD Bratislava**
Zadávací katedra: **Katedra technologie a řízení dopravy**

Zásady pro vypracování

Úvod
1. Analýza současného stavu
2. Návrh variant
3. Výber výslednej varianty
Záver

Rozsah pracovní zprávy: **50-60**
Rozsah grafických prací: **5-6**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Jazyk zpracování: **Slovenština**

Seznam doporučené literatury:

dle pokynů vedoucí/ho práce

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Pavel Drdla, Ph.D.**
Katedra technologie a řízení dopravy

Datum zadání diplomové práce: **3. února 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2024**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Jaromír Široký, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 2. ledna 2023

POĎAKOVANIE

Osobitné poďakovanie patrí doc. Ing. Pavlovi Drdlovi, Ph.D., vedúcemu práce, za jeho vedenie, cenné rady, pripomienky a konzultácie. Rovnako tak veľká vďaka patrí doc. Ing. Josefovi Bulíčkov, Ph.D., za jeho pomoc a vecné rady v oblasti rozhodovacích metód.

Autor chce tiež vyjadriť vďaku Ing. Michalovi Zdarilekovi za jeho dlhoročné odborné vedenie v oblasti MHD a spätnú odbornú väzbu k návrhom. Ďalšie poďakovanie patrí vedúcim pracovníkom zo spoločnosti DPB za návrh témy, poskytnutie dát a spätnú väzbu k diplomovej práci. Autor nemôže zabudnúť ani na spoločnosti Škoda Electric, SOR, Solaris, SPP, Messer Tatragas a Slovenské elektrárne za ich ochotu a poskytnutie dôležitých dát.

Nakoniec, veľká vďaka patrí rodine za ich neustálu podporu, pomoc a pochopenie počas celého obdobia štúdia.

ANOTÁCIA

Práca sa zameriava na analýzu a návrh optimálneho nasadenia nízkoemisných vozidiel pre mestskú hromadnú dopravu v Bratislave. Práca obsahuje podrobnú analýzu súčasného stavu dopravného podniku, charakteristiky vozového parku a linky 63, vrátane jej intervalov, pracovných služieb a konečných zastávok. Autor predkladá viaceré varianty riešení s použitím rôznych typov nízkoemisných vozidiel, ako sú elekrobusy, trolejbusy s nezávislým zdrojom energie a CNG autobusy. V závere práce je vybraný najvhodnejší variant pre linku 63 na základe multikriteriálnej analýzy, komparatívnej metódy zameranej na emisie vozidiel, analýzy cien pohonných hmôt do budúcnosti a CBA analýzy.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

nízkoemisné vozidlo, elekrobus, trolejbus s nezávislým zdrojom energie, vodíkový autobus, CNG autobus, vozidlo s nulovými emisiami, ekologické vozidlo

TITLE

Deployment of low-emission vehicles on line 63 MHD Bratislava

ANNOTATION

The thesis focuses on the analysis and design of the optimal deployment of low-emission vehicles for urban public transport in Bratislava. The thesis includes a detailed analysis of the current state of the transport company, the characteristics of the fleet and line 63, including its intervals, working services and final stops. The author presents several options for solutions using diverse types of low-emission vehicles, such as Electric buses, trolleybuses with independent energy source and CNG buses. The paper concludes with the selection of the most suitable option for line 63 based on a multi-criteria analysis, a comparative method focusing on vehicle emissions, a future fuel price analysis and a CBA analysis.

KEYWORDS

low emission vehicle, Electric bus, trolleybus with independent energy source, hydrogen bus, CNG bus, zero emission vehicle, eco-friendly vehicle

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV	10
ZOZNAM TABULIEK	11
ZOZNAM SKRATIEK	12
ÚVOD.....	13
1 ANALÝZA SÚČASNÉHO STAVU	14
1.1 Analýza Dopravného podniku Bratislava	14
1.1.1 <i>História mestskej hromadnej dopravy v Bratislave.....</i>	<i>14</i>
1.1.2 <i>Charakteristika vozového parku.....</i>	<i>14</i>
1.1.3 <i>Zákon o podpore ekologických vozidiel</i>	<i>14</i>
1.1.4 <i>Nízkoemisný vozový park Dopravného podniku Bratislava</i>	<i>14</i>
1.2 Analýza linky 63	14
1.2.1 <i>Interval linky 63.....</i>	<i>15</i>
1.2.2 <i>Pracovné služby na linke 63</i>	<i>15</i>
1.2.3 <i>Charakteristika konečných zastávok/obratísk</i>	<i>16</i>
1.2.4 <i>Výškový profil trasy</i>	<i>18</i>
1.2.5 <i>Prirážky na základe analýzy výškového profilu.....</i>	<i>22</i>
1.3 Zhrnutie analýzy.....	23
2 NÁVRH VARIANTOV RIEŠENIA	24
2.1 Variant 1: Vodíkový autobus	24
2.1.1 <i>Analýza silných a slabých stránok.....</i>	<i>24</i>
2.1.2 <i>Infraštruktúra</i>	<i>24</i>
2.1.3 <i>Charakteristika autobusu</i>	<i>25</i>
2.1.4 <i>Obmedzenia na linke 63</i>	<i>26</i>
2.1.5 <i>Ekonomika</i>	<i>27</i>
2.2 Variant 2: Elektrobus (akumulátor 240 kWh, nabíjanie Ride&Charge).....	27
2.2.1 <i>Analýza silných a slabých stránok.....</i>	<i>27</i>

2.2.2	<i>Charakteristika autobusu</i>	27
2.2.3	<i>Návrh infraštruktúry Ride&Charge</i>	30
2.2.4	<i>Obmedzenia na linke 63</i>	30
2.2.5	<i>Ekonomika</i>	32
2.3	Variant 3: Elektrobus (akumulátor 240 kWh, nabíjanie Two-Pole charging)	32
2.3.1	<i>Charakteristika Two-pole charging</i>	32
2.3.2	<i>Návrh infraštruktúry</i>	33
2.3.3	<i>Obmedzenia na linke 63</i>	34
2.3.4	<i>Ekonomika</i>	35
2.4	Variant 4: Elektrobus (akumulátor 602 kWh, nabíjanie Ride&Charge)	35
2.4.1	<i>Analýza silných a slabých stránok</i>	35
2.4.2	<i>Charakteristika autobusu</i>	36
2.4.3	<i>Návrh infraštruktúry Ride&Charge</i>	36
2.4.4	<i>Obmedzenia na linke 63</i>	37
2.4.5	<i>Ekonomika</i>	37
2.5	Variant 5: Elektrobus (akumulátor 602 kWh, nabíjanie Two-Pole charging)	38
2.5.1	<i>Návrh infraštruktúry Two-Pole charging a nabíjací model</i>	38
2.5.2	<i>Ekonomika</i>	38
2.6	Variant 6: Trolejbus s nezávislým zdrojom energie (akumulátorový)	39
2.6.1	<i>Analýza silných a slabých stránok</i>	39
2.6.2	<i>Charakteristika trolejbusu</i>	39
2.6.3	<i>Obmedzenia na linke 63</i>	41
2.6.4	<i>Návrh variantov</i>	41
2.6.5	<i>Metaheuristický výber trolejovej nabíjacej troleji v trase zst. Patrónka – Lamač</i>	42
2.6.6	<i>Ekonomika</i>	43
2.7	Variant 7: CNG pohon	43
2.7.1	<i>Analýza silných a slabých stránok</i>	44

2.7.2	<i>Charakteristika autobusu</i>	44
2.7.3	<i>Návrh infraštruktúry</i>	45
2.7.4	<i>Obmedzenia na linke 63</i>	45
2.7.5	<i>Ekonomika</i>	46
2.8	Bonusový variant: Autorov návrh	46
2.8.1	<i>Simulovaná prevádzka</i>	47
2.8.2	<i>Odhad ceny</i>	47
2.8.3	<i>Legislatívna problematika</i>	47
2.9	Zhrnutie	48
3	VÝBER VÝSLEDNÉHO VARIANTU	49
3.1	Vývoj ceny pohonných hmôt	49
3.2	Komparatívna porovnávacía metóda zameraná na emisie vozidiel	49
3.3	Multikriteriálna analýza s využitím Saatyho metódy odhadu váh	51
3.4	Analýza nákladov a prínosov (CBA)	55
3.4.1	<i>Identifikácia cieľov projektu</i>	55
3.4.2	<i>Finančná analýza</i>	56
3.4.3	<i>Výsledok analýzy</i>	57
3.5	Zhrnutie	58
4	ROZPRACOVANIE VYBRANEJ VARIANTY	60
4.1	Nabíjanie vozidiel	60
4.2	Zmena organizácie dopravy na obratisku + zmena projektu predĺženia trolejovej trate k obratisku Avion	61
4.3	Zhrnutie	63
	ZÁVER	64
	ZOZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÝCH ZDROJOV	65
	ZOZNAM PRÍLOH	71

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 Mapa trasy linky 63.....	15
Obrázok 2 Otokar Kent C 18,75	16
Obrázok 3 Obratisko Lamač	16
Obrázok 4 Obratisko Avion Shopping Park	17
Obrázok 5 Trasa linky 63 rozdelená na 3 časti.....	18
Obrázok 6 Prvá časť trasy linky 63.....	18
Obrázok 7 Výškový profil prvej časti linky 63 (smer Lamač → Avion)	19
Obrázok 8 Výškový profil prvej časti linky 63 (smer Avion → Lamač)	20
Obrázok 9 Druhá časť trasy	20
Obrázok 10 Výškový profil druhej časti trasy (smer Lamač → Avion).....	20
Obrázok 11 Výškový profil druhej časti trasy (smer Avion → Lamač).....	21
Obrázok 12 Tretia časť trasy.....	22
Obrázok 13 Výškový profil druhej časti trasy (smer Lamač → Avion).....	22
Obrázok 14 Solaris Hydrogen 18.....	25
Obrázok 15 Graf korelácie medzi dojazdom a vonkajšou teplotou.....	29
Obrázok 16 Solaris Urbino 18 Electric	30
Obrázok 17 Nabíjanie elektrobusev v Prahe	33
Obrázok 18 SOR NS 18 Electric	35
Obrázok 19 Škoda 27 TrA	40
Obrázok 20 Prejazd križovatkou Galvaniho-Bulharská	42
Obrázok 21 Princíp výroby E-GAS	44
Obrázok 22 SOR NSG 18	45
Obrázok 23 Rozloženie strechy elektrobuse Solaris Urbino 18 IV	47
Obrázok 24 Cestovný poriadok linky 63	61
Obrázok 25 Organizácia obratiska Avion.....	62
Obrázok 26 Ukážka vstupu do obratiska Avion	62

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Zhrnutie výškového profilu	23
Tabuľka 2 Parametre Solaris Hydrogen 18.....	25
Tabuľka 3 Analýza vhodnosti vodíkového pohonu na linku 63	26
Tabuľka 4 Ročný nákladový súhrn Solaris Hydrogen 18.....	27
Tabuľka 5 Spotreba energie elektrobusu Solaris Urbino Electric 18	28
Tabuľka 6 Parametre Solaris Urbino 18 Electric.....	29
Tabuľka 7 Nabíjanie Solaris Urbino 18m pri použití technológie Ride&Charge	31
Tabuľka 8 Ročný nákladový súhrn Solaris Urbino 18 Electric – Ride&Charge.....	32
Tabuľka 9 Nabíjanie Solaris Urbino 18m pri použití technológie Two-Pole charging.....	34
Tabuľka 10 Parametre elektrobusu SOR NS 18 Electric.....	36
Tabuľka 11 Nabíjanie SOR NS 18 Electric pri použití technológie Ride&Charge	37
Tabuľka 12 Ročný nákladový súhrn SOR NS 18 Electric – Ride&Charge	37
Tabuľka 13 Nabíjanie SOR NS 18 Electric pri použití technológie Two-Pole charging.....	38
Tabuľka 14 Ročný nákladový súhrn Škoda 27 TrA	43
Tabuľka 15 Ročný nákladový súhrn SOR NSG 18	46
Tabuľka 16 Výsledné emisie vyprodukované za 1 rok prevádzky	50
Tabuľka 17 Životnosť	51
Tabuľka 18 Výsledné kritériálne váhy Saatyho metódy.....	52
Tabuľka 19 Základná matica pre metódu TOPSIS a WSA	53
Tabuľka 20 Výsledok TOPSIS a WSA metód	54
Tabuľka 21 Investičné náklady - CBA analýza	56
Tabuľka 22 Harmonogram realizácie projektu a počet obnov za referenčné obdobie	57
Tabuľka 23 Cena emisií vodíku.....	58
Tabuľka 24 Náklady na základe financovania.....	59
Tabuľka 25 Plán nabíjania elektrobusev počas pracovných dní.....	60

ZOZNAM SKRATIEK

CBA	-	Cost-Benefit analýza (analýza nákladov a prínosov)
CNG	-	Compressed Natural Gas (stlačený zemný plyn)
CO ₂	-	Oxid uhličitý
DPB	-	Dopravný podnik Bratislava
DPH	-	Daň z pridanej hodnoty
EU	-	Európska únia
IGBT	-	Insulated-gate bipolar transistor (bipolárni tranzistor s izolovaným hradlom)
LTO	-	Lítium-titanium-oxidový akumulátor
MHD	-	Mestská hromadná doprava
NMC	-	Níkl-mangan-kobaltový akumulátor
PHM	-	Pohonné hmoty
SORT	-	Standardized on-road tests cycles (štandardizované cykly cestných skúšok)
SPP	-	Slovenská plynárenská spoločnosť
TTW	-	Tank to Wheel (emisie iba spôsobené jazdou)
VHD	-	Verejná hromadná doprava
WTW	-	Well to Wheel (emisie od zdroja až po jazdu)
Zst.	-	Zastávka

ÚVOD

V dnešnej dobe, ktorá sa zaoberá ekológiou a udržateľnosťou, je téma nízkoemisných vozidiel veľmi atraktívna a frekventovaná. V snahe zmierniť negatívne dopady na životné prostredie sa v rôznych oblastiach zavádzajú opatrenia a jednotlivé materiály alebo stroje sa nahrádzajú za udržateľný alebo ekologický variant. V oblasti dopravy sa snažia vytvoriť bezpečnú, efektívnu a ekologickú dopravu. Autor práce v prvej kapitole zanalyzuje aj najnovší zákon č. 214/2021 Z. z. o podpore ekologických vozidiel cestnej dopravy. Tento zákon obmedzuje spoločnosti využívajúce vozový park pre podnikanie pri kúpe emisných vozidiel.

Z rôznych zdrojov je počuť rôzne názory, ktorý druh je lepší, ktorý má aké výhody a nevýhody. Autor by to popísal ako rovnicu o jednotlivých neznámých. Samozrejme, že bez dosadenia hodnôt z definičného oboru sa nevie určiť, ktorá rovnica je pre nás výhodnejšia. Pri zbežnom porovnaní, alebo tzv. povedané na papieri, sa ako výhodné môžu zdať rôzne možnosti. Pri doplnení parametrov sa celá situácia môže ukázať inak. V tejto oblasti sa nachádzajú rôzne parametre, ktoré ovplyvňujú zavedenie nízkoemisných vozidiel. Autor v práci zanalyzuje všetky vstupy a vyhodnotí riziká pre jednotlivé vstupy. Výber optimálneho variantu prebehne pomocou rôznych rozhodovacích metód zameraných na celkové emisie (aj z výroby), budúce ceny PHM, i na základe výhodnosti investície a prevádzkových nákladov.

S rastúcou úrovňou znečistenia ovzdušia a narastajúcimi obavami o kvalitu životného prostredia sa stáva nevyhnutnosťou hľadať inovatívne riešenia, ktoré by minimalizovali negatívne dopady dopravy na ovzdušie a zdravie obyvateľov. V kontexte Bratislavy, kde sa každodenne stretávame s preťaženými cestami a zvýšenou mierou znečistenia ovzdušia, je implementácia nízkoemisných vozidiel do verejnej dopravy jedným z kľúčových opatrení na ceste k udržateľnejšiemu dopravnému systému. Linka 63, ako jedna z hlavných dopravných tepien v meste, predstavuje výzvu na implementáciu nízkoemisných vozidiel do prevádzky. Linka spája mestskú časť Lamač s centrom mesta a pokračuje smerom cez Trnávku až k obchodnému domu Avion.

Táto diplomová práca sa preto zameriava na návrh nasadenia nízkoemisných vozidiel na linku 63. V závere práce autor na základe výsledkov rozhodovacích metód vyberie výsledný optimálny variant, ktorý následne spracuje.

Cieľom diplomovej práce je navrhnúť najvýhodnejší druh nízkoemisného vozidla pre linku 63 za splnenia ekonomickej, zákonnej a racionálnej výhodnosti.

1 ANALÝZA SÚČASNÉHO STAVU

Kapitola je venovaná základnej charakteristike linky 63, jej parametrov a trasy. Autor sa podrobne venuje aj prevádzkovateľovi linky, ktorým je spoločnosť Dopravný podnik Bratislava (ďalej len DPB).

1.1 Analýza Dopravného podniku Bratislava

Dopravný podnik Bratislava je mestský podnik, ktorý zabezpečuje mestskú hromadnú dopravu v Bratislave. História podniku je rozsiahla a autor sa snažil stručne ju popísať v prílohe A odkazovaný kapitolou 1.1.1. Dopravný podnik prevádzkuje 3 subsystemy mestskej hromadnej dopravy. Najväčší subsystem je autobusový a následne prevádzkuje ešte električkový a trolejbusový. Vozový park je podrobnejšie popísaný v prílohe B odkazovaný kapitolou 1.1.2. Dopravný podnik zabezpečuje k roku 2023 prevádzku až 87 linkám. V súčasnosti, na základe nového zákona o podpore nízkoemisných vozidiel, dopravný podnik rozširuje „flotilu“ nízkoemisných vozidiel.

1.1.1 História mestskej hromadnej dopravy v Bratislave

História Dopravného podniku Bratislava je uvedená v prílohe A.

1.1.2 Charakteristika vozového parku

Charakteristika vozového parku vzhľadom na rozdelenie na jednotlivé subsystemy je uvedená v prílohe B.

1.1.3 Zákon o podpore ekologických vozidiel

V prílohe C je uvedená analýza zákona o podpore ekologických vozidiel.

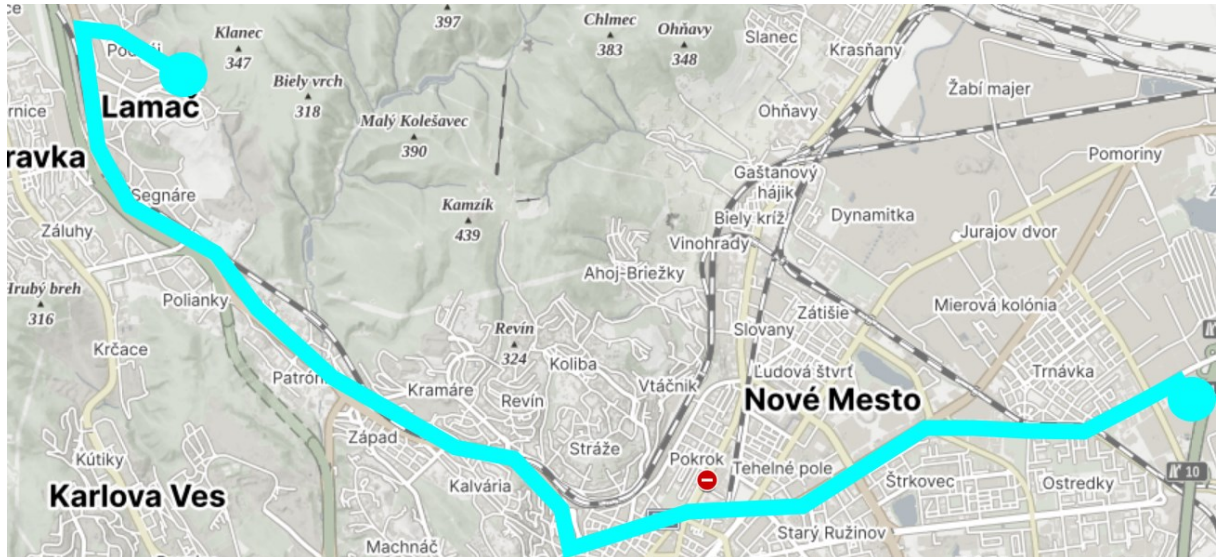
1.1.4 Nízkoemisný vozový park Dopravného podniku Bratislava

Dopravný podnik sa momentálne zaoberá nízkoemisným vozovým parkom. V roku 2018 nakúpil prvých 18 kusov elektrobusev a v roku 2023 mu boli dodané 4 vodíkové autobusy. V oblasti trolejbusového subsystemu tento rok prebieha dodávka až 50 nových trolejbusov. Celkovo má vo svojom vozovom parku 252 nízkoemisných vozidiel (1). Autor si myslí, že ide o správny krok, minimálne v oblasti financovania. Zvyčajne sa 85 % investičných nákladov hradí z kohéznych fondov.

1.2 Analýza linky 63

Linka číslo 63 je linka spájajúca mestské časti Lamač a Nové Mesto. Slúži hlavne ako spojenie mestskej časti Lamač s mestom. Na zastávke Avion Shopping Park sa nachádza

nákupný komplex (obchodné centrum, Ikea a ďalšie). Predpokladané využitie je z oboch strán linky. Linka má dĺžku 14,8 km. Cesta v smere na Avion Shopping Park trvá 33 minút a v smere na Lamač 36 minút. Na obr. 1 je znázornená s pomocou webovej stránky mapy.cz trasa linky. Trasa je v oboch smeroch rovnaká.



Obrázok 1 Mapa trasy linky 63

Zdroj: Autor s pomocou (2)

1.2.1 Interval linky 63

Linka má interval v sedle cez pracovné dni a cez víkend 15 minút. Interval vo večernej špičke je 10 minút a v ranej špičke je jej chod nepravidelný. Pre príklad si autor vypíše postupnosť odchodov autobusov zo zastávky Avion Shopping Park o 6. hodine. Postupnosť odchodov je 06; 13; 20; 25; 33; 40; 48; 55. Interval medzi číslami v postupnosti je 7; 7; 5; 8; 7; 8; 7. Priemerný interval v ranej špičke na základe vypočítaných intervalov v postupnosti odchodov je 7 min (3).

1.2.2 Pracovné služby na linke 63

Autor čerpal rozdelenie služieb z portálu imhd.sk. Cez pracovný deň (školský rok) je na linke 11 služieb, cez víkend 8 služieb a počas sviatkov, resp. prázdnin, iba 10 služieb (4). Autor v prílohe D vytvoril analýzu jednotlivých služieb s ohľadom na počet najazdených kilometrov.

Výprava pozostáva iba z kĺbových vozidiel. Vo väčšine prípadov sa vypravujú autobusy typu Otokar Kent C 18,75 alebo SOR NB 18. Autobus typu Otokar je zobrazený na obr. 2.



Obrázok 2 Otokar Kent C 18,75

Zdroj: (5)

1.2.3 Charakteristika konečných zastávok/obratísk

Linka má iba jednu trasu, a to medzi dvoma zastávkami, ďalej označované už len ako konečné zastávky. Prvá konečná zastávka sa nachádza na zastávke Lamač. Na obr. 3 je zobrazené obratisko.



Obrázok 3 Obratisko Lamač

Zdroj: Autor

Obratisko je podľa názoru autora provizórne a nenachádza sa tam možnosť odstaviť vozidlo na dlhšiu dobu. Vozidlá sú odstavené zvyčajne na výstupnej zastávke. Zastávka je situovaná v pruhu, ale v danej lokalite nie je veľká intenzita dopravy. Na obratisku sa nachádzajú sociálne zariadenia pre vodičov. Dané obratisko slúži k odstavovaniu autobusov len pre jednu linku. Ostatné linky zastávkou iba prechádzajú. Na zastávke začína aj linka 23, ktorá má za celý deň iba pár odchodov (13 odchodov, väčšinou len v čase špičky).

Konečná zastávka Avion Shopping Park sa nachádza pred obchodným centrom Avion Shopping Park. V blízkosti obrátiska sa nachádza aj McDonald's. Na obr. 4 je zobrazené obrátisko s priestorom na odstavenie autobusov.

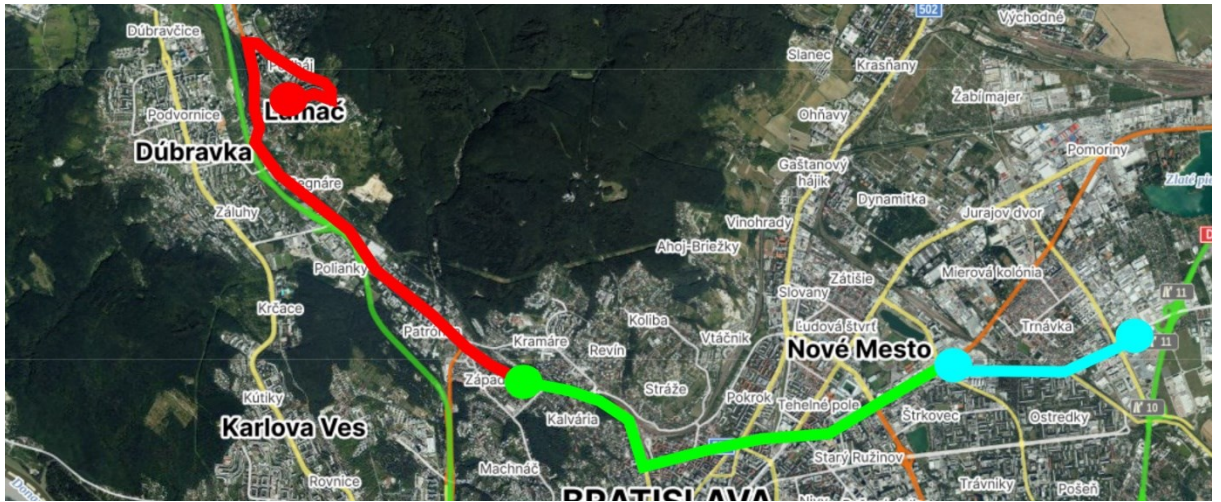


Obrázok 4 Obrátisko Avion Shopping Park

Zdroj: Autor

Obrátisko slúži ako priestor na odstavenie autobusov pre dve linky. Nachádza sa tu sociálne zariadenie. Problémom obrátiska je vjazd, ktorý je spoločný s McDonald's. Viackrát nastali situácie, kedy vozidlo nemohlo vojsť do obrátiska z dôvodu kongescie na McDrive, resp. sú autá odstavené až po križovatku a kľbové vozidlo nemá možnosť bezpečného vjazdu.

Trasa je v rôznych častiach členitá, čo môže spôsobovať problém pre niektoré druhy vozidiel. Trasu si autor rozdelil podľa stúpania/klesania na jednotlivé časti. Prvá časť trasy je od zastávky Lamač po zastávku Hroboňová (na obr. 5 červenou farba). Trasa je bez trolejového vedenia a je v oblasti výškového prevýšenia členitá. Druhá časť trasy je od zastávky Hroboňová po zastávku Klientské centrum (na obr. 5 zelená farba). V tejto časti sa nachádza trolejové vedenie. Posledná časť je od zastávky Klientské centrum až po Avion Shopping Park (na obr. 5 modrá farba). V tejto časti sa nenachádza trolejové vedenie a trasa je vedená v rovine. Rozdelenie trás je zobrazené na obr. 5.

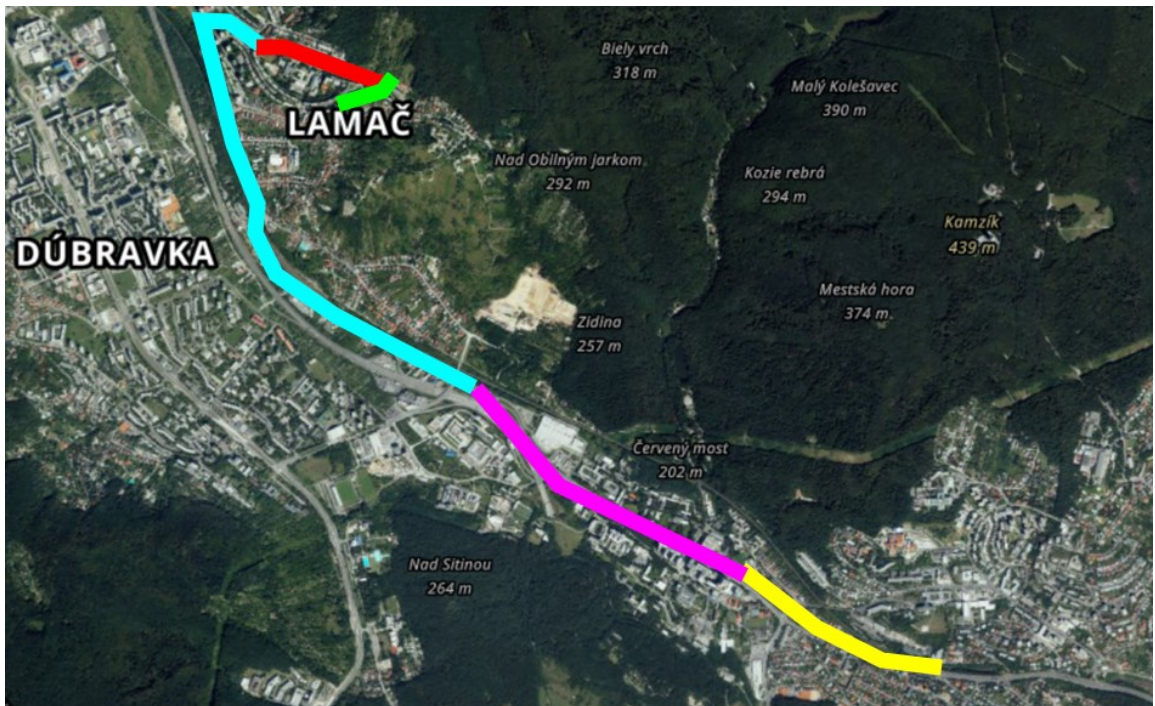


Obrázok 5 Trasa linky 63 rozdelená na 3 časti

Zdroj: Autor s pomocou (2)

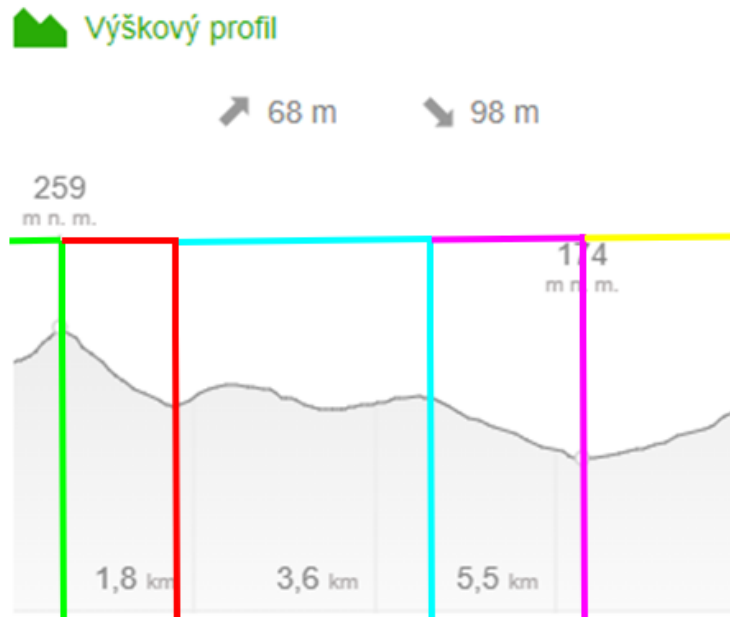
1.2.4 Výškový profil trasy

Výškový profil autor posudzuje na základe rozdelenia trasy z kapitoly 1.2.3. Prvá časť trasy je zobrazená na obr. 6. Na obr. 6 je trasa rozdelená na rôzne farebné úseky. Jednotlivý priebeh stúpania alebo klesania je znázornený na obr. 7.



Obrázok 6 Prvá časť trasy linky 63

Zdroj: Autor s pomocou (2)



Obrázok 7 Výškový profil prvej časti linky 63 (smer Lamač → Avion)

Zdroj: Autor s pomocou (2)

Autor v prvom rade pripomína, že trasa je posudzovaná v smere od obrátiska Lamač do obrátiska Avion Shopping Park. Prvá časť zeleného úseku je časť stúpania 473 m pod uhlom $2,7^\circ$. V tomto úseku je možné predpokladať zvýšenú spotrebu potrebnej energie. Červený úsek sa na obrázku 7 zobrazuje ako klesanie o dĺžke 1 200 m pod uhlom $2,5^\circ$. Tento úsek umožňuje ušetrenie využitej energie. V tomto úseku niektoré dopravné prostriedky môžu rekuperovať, tzn. vytvárať potrebnú energiu na pohon.

Nasledujúci modrý úsek autor berie vo vzťahu k spotrebe energii ako neutrálny. V úseku sa nachádza stúpanie, ale hneď sa tam nachádza aj klesanie rovnakého prevýšenia a vzdialenosti. Preto autor predpokladá rovnomernú spotrebu. Samozrejme, že je možné predpokladať kongescie s väčšou spotrebou energie. Túto udalosť autor v základnej analýze nebude predpokladať. V prípade potreby ju autor rozpracuje až po výbere nízkoemisného vozidla.

Fialový úsek znázorňuje 1 600 m klesanie pod uhlom $1,4^\circ$. Podobne ako v červenom úseku, je možné tzv. rekuperovať a pri niektorých vozidlách zvýšiť dojazd. Posledný žltý úsek znázorňuje 1 500 m stúpanie pod uhlom $1,2^\circ$. V tomto úseku sa nachádza BUS pruh, ktorý znižuje predpoklad častého zastavenia a rozjazdu do kopca.

Prvá časť trasy je 7,3 km dlhá. Táto časť tvorí až 49,7 % z celkovej trasy. Autor považuje túto časť pre niektoré bezimisé dopravné prostriedky za najnáročnejšiu. Náročné to bude aj v prípade opačného smeru, kde je vo veľkej väčšine iba stúpanie. Výškový profil pre opačný smer je znázornený na obr. 8.



Obrázok 8 Výškový profil prvej časti linky 63 (smer Avion → Lamač)

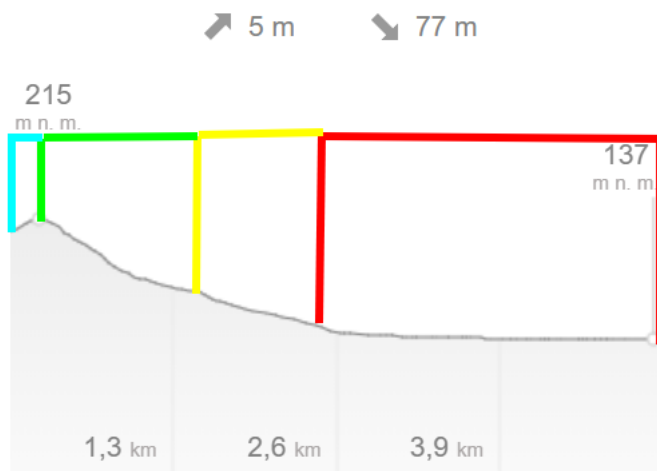
Zdroj: (2)

Druhá časť trasy je znázornená na obr. 9 a výškový profil je znázornený na obr. 10. Druhá časť je znova rozdelená na 4 úseky, viď obr. 9 a 10.



Obrázok 9 Druhá časť trasy

Zdroj: Autor s pomocou (2)



Obrázok 10 Výškový profil druhej časti trasy (smer Lamač → Avion)

Zdroj: Autor s pomocou (2)

Prvý modrý úsek znázorňuje stúpanie o dĺžke 248 m pod uhlom $2,1^\circ$. Tento úsek je síce teoreticky zanedbateľný, ale autor práce ho sem zahrnul z dôvodu rozjazdu zo zastávky (rozbeh z nulovej rýchlosti).

Druhý, zelený úsek, spolu s tretím, žltým úsekom znázorňuje klesanie. Autor tieto dva úseky rozdelil z dôvodu križovatky a predpokladaného zastavenia. Klesanie druhého úseku je o dĺžke 1 200 m a pod uhlom $2,2^\circ$. Tretí úsek má klesanie pod uhlom $1,4^\circ$ a s dĺžkou 1 100 m. V týchto úsekoch autor nepredpokladá veľkú úsporu energie pomocou rekuperácie, ktorá sa samozrejme využije pre účel udržania adekvátnej rýchlosti (tzv. dobrzd'ovanie do kopca). Väčšiu preferenciu autor prikladá rýchlejšiemu a menej náročnému rozjazdu, kde bude podľa autora menej energie využitej na rozbeh vozidla.

Posledný, červený, 2 600 m dlhý úsek je v teoretickom klesaní, ale toto klesanie je zanedbateľné. Jedná sa o klesanie pod uhlom $0,1^\circ$. Autor bude považovať tento úsek za rovný. V praxi by sa energia ušetrená pri zrýchlených rozjazdoch s menšou spotrebou a rekuperácii mohla rovnať, resp. byť menšia energii využitej pri častých rozbehoch zo zastávok a križovatiek.

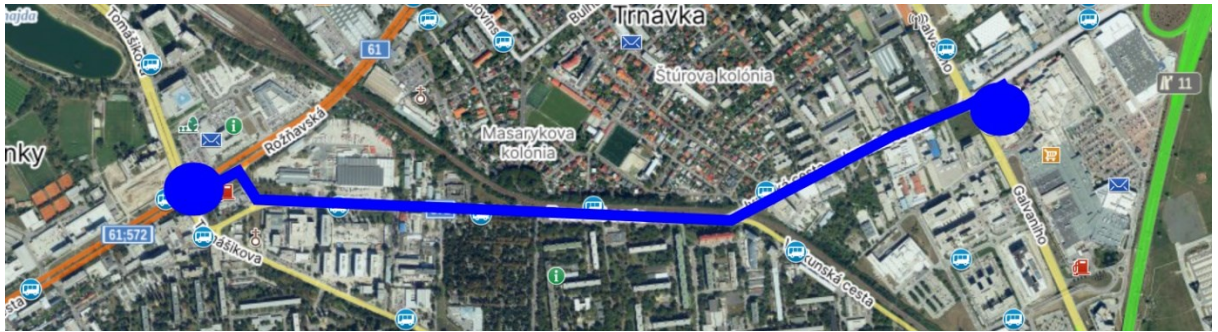
Autor tento 5,1 km dlhý úsek považuje za jednoduchý v smere Lamač-Avion. Opačný smer je horší. V tomto prípade sa jedná o permanentné stúpanie, vid' obr. 11. Napríklad v prípade trolejbusov bude toto zanedbateľné, čo im poskytuje výhodu. Tento úsek tvorí 34,7 % z celkovej trasy.



Obrázok 11 Výškový profil druhej časti trasy (smer Avion → Lamač)

Zdroj: (2)

Posledná časť trasy sa nachádza v teoretickom a zanedbateľnom klesaní. Autor túto časť nedelí na žiadne úseky. Na obr. 12 je zobrazený detail časti trati a na obr. 13 je zobrazený výškový profil poslednej časti trati. Táto časť má dĺžku 2,3 km a tvorí 15,6 % celku.



Obrázok 12 Tretia časť trasy

Zdroj: Autor s pomocou (2)



Obrázok 13 Výškový profil druhej časti trasy (smer Lamač → Avion)

Zdroj: (2)

1.2.5 Prirážky na základe analýzy výškového profilu

V kapitole 1.2.3 autor analyzoval výškový profil trasy. V niektorých úsekoch je výškový profil členitý. Autor sa po analýze výškového profilu rozhodol neuvažovať o prirážkach k spotrebe pohonných hmôt.

Prvým dôvodom je, že by sa museli prirážky určovať ku každému vozidlu. Pri jednotlivých variantoch vozidiel by sa museli zistiť jeho dynamické vlastnosti a výkonové charakteristiky motorov. Podstatou práce je zistiť optimálny variant nízkoemisného pohonu pre linku 63, a týmto by sa stratila podstata práce.

Druhým dôvodom je aj výškový profil. Ako je možné vidieť v tabuľke 1, po stúpaní prichádza ku klesaniu, čo naznačuje, že je možné predpokladať, že sa spotreba ustáli na určitej hladine. Samotní výrobcovia udávajú spotrebu buď pre každé podmienky, alebo ju udávajú podľa metodiky SORT 1.

Tabuľka 1 Zhrnutie výškového profilu

Smer/Úsek	1					2				3
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	
Lamač → Avion [%]	+4,8	-4,4	0	-2,5	+2,1	+3,7	-3,9	-2,45	0	0
Avion → Lamač [%]	-4,8	+4,4	0	+2,5	-2,1	-3,7	+3,9	+2,45	0	0

Zdroj: Autor s pomocou (2)

1.3 Zhrnutie analýzy

Prvá kapitola sa zaoberá základnou analýzou súčasného stavu vozového parku Dopravného podniku Bratislava. Vozový park v Bratislave prešiel veľkou obnovou, jednak vzhľadom na vekový priemer, ale aj z hľadiska technológie. Technologicky ide o nové typy pohonov (trolejbusy s akumulátorom, vodík), ale vozidlá dostávajú aj najmodernejší informačný systém. Podľa názoru autora dávajú mestu a DPB nový imidž.

Autor zdôrazňuje aj vynútenú podporu nízkoemisných vozidiel zo zákona č. 214/2021 Z. z. o podpore ekologických vozidiel cestnej dopravy a o zmene a doplnení niektorých zákonov (ďalej len „zákon č.214/2021 Z. z.“) (6). Treba skonštatovať, že daný zákon pretláča do popredia cestnú dopravu, ale nerieši podporu električkovému subsystému. Vzhľadom na nedávny nákup vodíkových autobusov a trolejbusov DPB spĺňa percentá v danom referenčnom období.

Druhá podkapitola rieši analýzu linky 63 nielen z vecného hľadiska, ale aj prevádzkového. Autor analyzoval výpravu danej linky, venoval sa podrobne jednotlivým službám v rôznych denných režimoch. Linka má dve konečné zastávky. Autor analyzoval dané obratiská vzhľadom na návrh možných riešení umiestnenia infraštruktúry (nabíjanie, troleje,...). Záver analýzy sa zaoberá výškovým profilom trasy. Zanalyzované boli všetky stúpania a klesania, na základe ktorých autor bude môcť navrhnúť úpravy. Autor zhodnotil, že daná trať nepotrebuje žiadne prirážky k výpočtu spotreby PHM.

2 NÁVRH VARIANTOV RIEŠENIA

Autor v kapitole uvádza adekvátne návrhy pre splnenie aktuálnej dopravnej ponuky a zároveň také návrhy, aby spĺňali podmienky v súlade so zákonom 214/2021 Z. z.

Autor vyberal vozidlá podľa histórie značky v dopravnom podniku, napríklad, či už sú podobné typy vozidiel vo vozovom parku (ušetrenie na nákladoch na náhradných dieloch a skúsenostiach s opravami). Takisto bol výber realizovaný podľa hlavného kritéria, ktorým je dostatočná kapacita. Jedinou možnosťou sú vozidlá kĺbové. Na základe analýzy linky 63 autor navrhuje nákup minimálne 15 vozidiel (11 vozidiel na linke, 4 záložné).

2.1 Variant 1: Vodíkový autobus

Autor sa rozhodol vybrať pre tento variant autobus Solaris Urbino 18 Hydrogen. Na linku je potrebné kĺbové vozidlo a firma Solaris je jediný aktuálny vývojový výrobca kĺbových vodíkových vozidiel. V Európe sa nachádza ešte jeden výrobca kĺbových autobusov, Van Hool. Daný model Fénix má menší dojazd aj kapacitu. Dopravný podnik vlastní už 4 ks vodíkových autobusov od výrobcu Solaris, ale iba v menšej dĺžke.

2.1.1 Analýza silných a slabých stránok

Analýza silných a slabých stránok vodíkového pohonu je uvedená v prílohe E. Autor zaradil všetky analýzy silných a slabých stránok do práce iba ako popisné metódy. Neslúžia ako primárne rozhodovacie metódy o optimálnom variante.

2.1.2 Infraštruktúra

Dopravný podnik nevlastní vo svojom areáli žiadnu plničku vodíka, ale má zabezpečený outsourcing u externého dodávateľa. Vodík dodáva spoločnosť Messer Tatragas, ktorý má vybudovanú plničku mimo areálu dopravného podniku. Vysúťažená cena je $17,5 \text{ €} \cdot \text{kg}^{-1}$ bez DPH. Plnenie je závislé od zostatku vodíka v nádržiach autobusu, ale trvá približne 30 minút. Nevýhodou plničky je malý plniaci tlak. Aktuálny plniaci tlak je 200 barov, pričom výrobca odporúča tlak 350 barov. Externý dodávateľ plánuje upgrade na požadovaný tlak v roku 2024. Dodávaný vodík je tzv. sivý vodík, ktorý je vyrábaný v rafinérii Slovnaft neďaleko Bratislavy (7).

2.1.3 Charakteristika autobusu

Pre potreby tohto variantu bol vybraný autobus spoločnosti Solaris. Dané kĺbové vozidlo nie je v prevádzke ešte v žiadnom meste. Prvé predvážacie vozidlo bolo predstavené 14. septembra 2022 a prvé dodávky boli plánované na druhý polrok roku 2023 (8).

Autor oslovil ohľadom dát spoločnosť Solaris SLOVAKIA. Orientačná cena vodíkového autobusu je približne 970 000 € bez DPH. Samozrejme cena je závislá na výbave vozidla. Vozidlo má dojazd 350 km, i keď prirodzene záleží od plniaceho tlaku. Spotreba získaná od oslovenenej spoločnosti sa pohybuje od 7,5 do 13,5 kg·100 km⁻¹. Na streche je uložených 8 nádrží s objemom 2 142 litrov (5x 312 l, 3x 194 l). Celkový objem vodíka je 51,2 kg pri plniacom tlaku 350 barov. Hrdlo pre dopĺňanie vodíka je nad pravým predným kolesom. Nádrže sa dopĺňajú približne 20 minút (9).

Palivové články majú výkon 100 kW. Celková hmotnosť modulu vrátane chladenia je 385 kg. Keďže 100 kW je pre kĺbový autobus málo, Solaris doplnil akumulátorové články na princípe LTO. Kapacita článkov je 58,4 kWh. Elektrický motor poskytuje výkon 240 kW na zadnú nápravu. Solaris ponúka aj možnosť alternatívneho variantu, a to motory v náboji o výkone 125 kW (celkový výkon 250 kW) (10). Zvyšné údaje sú uvedené v tabuľke 2 a ilustračná fotografia je zobrazená na obr. 14.

Tabuľka 2 Parametre Solaris Hydrogen 18

Parameter	Hodnota
Dĺžka	18 000 mm
Výška	3 300 mm
Celková hmotnosť	29 000 kg
Maximálna obsaditeľnosť	140 osôb
Výkon elektrického motora	240 kW

Zdroj: (10)



Obrázok 14 Solaris Hydrogen 18

Zdroj: (10)

2.1.4 Obmedzenia na linke 63

Jediným obmedzením vodíkových autobusov je možnosť doplnenia paliva na novej čerpacej stanici. V Bratislave je iba jedna. Dojazd je približne 350 km. Autor bude uvažovať o 5 % rezerve. Táto rezerva sa skladá z rezervy pre použitie pomocných spotrebičov (klimatizácia, kúrenie,...) a rezervného dojazdu 10 km (Avion → plnička vodíka). Rezerva zníži celkový dojazd na 333 km.

Pri využití dát z analýzy služieb na linke 63 z kapitoly 1.2.2 je autor schopný určiť vhodnosť tohto pohonu na linku 63. Dáta s vyznačenými problémovými službami, teda službami, ktoré sú menšie ako upravený celkový dojazd (333 km), sú v tabuľke označené červenou farbou. Analýza vhodnosti autobusu Solaris Hydrogen 18 je zobrazená v tabuľke 3.

Tabuľka 3 Analýza vhodnosti vodíkového pohonu na linku 63

Typ služby	Počet km	Typ služby	Počet km	Typ služby	Počet km			
<i>Pracovný deň, školský rok</i>	63011	337,2	<i>Pracovný deň, prázdniny</i>	63014	337,2	<i>Víkend, Sviatok</i>	63012/63013	357,5
	63021	357,5		63024	357,5		63022/63023	357,5
	63031	268,4		63034	300,3		63032/63033	314,4
	63041	329,9		63044	299,6		63042/63043	270,0
	63051	314,4		63054	329,2		63052/63053	329,2
	63061	329,9		63064	329,9		63062/63063	299,6
	63071	327,1		63074	327,1		63072/63073	337,2
	63081	155,2		63084	125,6		63512/63513	62,8
	63091	155,2		63094	155,2			
	63101	155,2		63104	92,4			
	63111	92,4						

Zdroj: Autor s pomocou (4)

Autor práce identifikuje problém pri službách, ktoré sú celodenné. Tento problém nie je kritický a dá sa riešiť možnosťou úpravy služieb (vyrovnania km medzi jednotlivými službami) alebo tankovaním vodíka počas služby. V podstate pri oboch možnostiach treba optimalizovať rozdelenie služieb a tzv. navýšenie výkonov v delených službách. Autor potvrdzuje vhodnosť tohto typu pohonu pre linku 63, samozrejme za predpokladu úpravy rozdelenia služieb.

Autor sa domnieva, že v prípade rozšírenia vozového parku by mohla vzniknúť plnička vodíka aj v areáli vozovne. Táto skutočnosť by podstatne zjednodušila systém dopĺňania vodíka a znížili by sa aj náklady (dochádzanie na plničku do Vlčieho hrdla, prestoje vodičov).

2.1.5 Ekonomika

V tabuľke 4 autor vyčíslil prevádzkové náklady na rok prevádzky. Ročná spotreba je vypočítaná pre rok 2024. Rok 2024 má 14 sviatkov, 104 víkendových dní a 56 prázdninových dní. Pracovných dní je 191. Autor bude pri ostatných variantoch počítať s rovnakými vstupmi.

Tabuľka 4 Ročný nákladový súhrn Solaris Hydrogen 18

Parameter	Hodnota	Jednotka
Denná spotreba vodíka pre všetky služby PO-PI	412,93	Kg
Denná spotreba vodíka pre všetky služby PO-PI (prázdniny)	388,29	Kg
Denná spotreba vodíka pre všetky služby SO-NE	347,4	Kg
Ročná spotreba vodíka	141 607	Kg
Cena vodíka	17,5	€·kg ⁻¹
Ročný náklad na PHM (2024)	2 478 118	€
Počiatkové investície		
Nákup vozidiel (15ks)	14 550 000	€

Zdroj: Autor s pomocou (7, 9)

2.2 Variant 2: Elektrobus (akumulátor 240 kWh, nabíjanie Ride&Charge)

Nie je možné navrhnúť iba jeden variant elektrobusu, keďže sa od seba líšia či už pohonom, alebo aj kapacitou akumulátorov. Je možnosť výberu vozidiel s menšou kapacitou akumulátorov a menším dojazdom, ale väčšou obsaditeľnosťou. Druhá možnosť sú vozidlá s väčšou kapacitou akumulátorov, väčším dojazdom, ale menšou obsaditeľnosťou. Výber správneho variantu závisí na dĺžke domovskej linky.

Elektrobusy sa líšia aj spôsobom nabíjania. Je možnosť nabíjania pomocou kábla (CCS), možnosť je dobíjať aj pomocou zberača (GIN, model od Škody Two-Pole charging), ale aj pomocou špeciálnej technológie zberača pre rýchle nabíjanie (opportunity charging).

2.2.1 Analýza silných a slabých stránok

Analýza silných a slabých stránok zavedenia elektrobusov do MHD je v prílohe F.

2.2.2 Charakteristika autobusu

Autor sa pre tento variant rozhodol vybrať vozidlo Solaris Urbino 18 Electric. Dané vozidlo sa testovalo v Bratislave v roku 2018. Autor využije dáta z testu tohto modelu pre potreby tohoto variantu. Cena tohto typu vozidla je 725 000 € (11).

Daný model bol vybavený asynchrónnym elektromotorom o výkone 240 kW. Vozidlo bolo vybavené akumulátormi typu LTO s kapacitou 240 kWh. Predpokladaný dojazd sa pohybuje cca medzi 120 až 140 km (priemerná spotreba $1,3 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$). Dojazd aj spotreba závisí na teplote a zaťažení vozidla. Autor dohľadal aj reálne dáta z prevádzky rovnakého modelu elektrobusu (11).

Dáta pochádzajú z mesta Jaworzno. Boli k dispozícii pri štúdiu riešenia pomalého a rýchleho nabíjania. Údaje sú zobrazené v tabuľke 5.

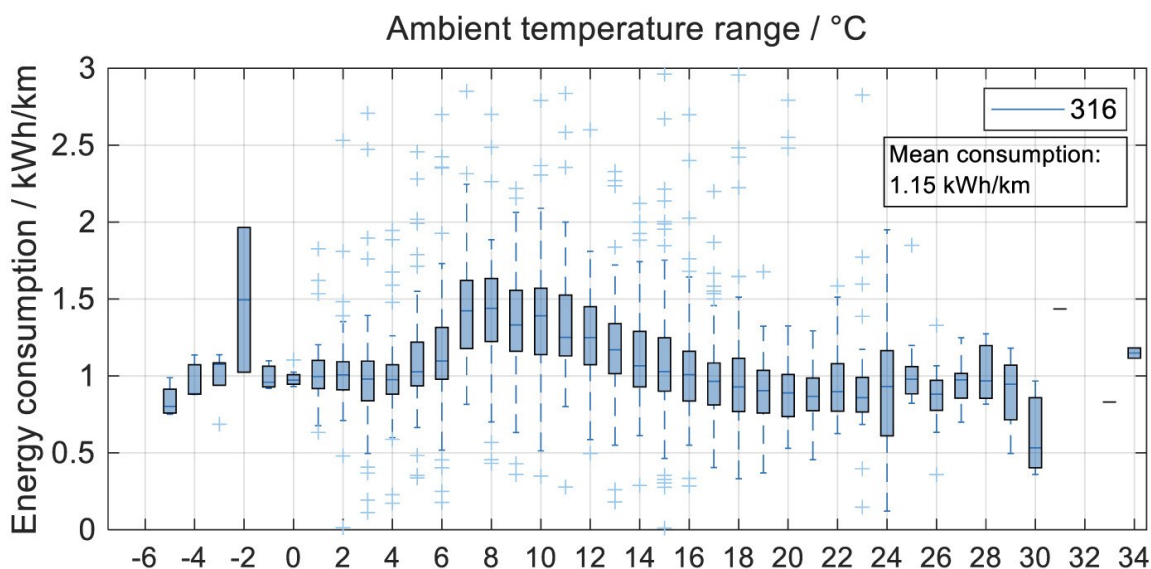
Tabuľka 5 Spotreba energie elektrobusu Solaris Urbino Electric 18

Mesiac	Počet najazdených km [km]	Priemerná spotreba energie [kWh·km⁻¹]	Priemerná teplota v meste Jaworzno deň/noc [°C]
október 2020	9 863	0,993612	15/5
november 2020	8 506	1,269722	9/2
december 2020	4 797	1,20919	4/-2
február 2021	6 754	1,169729	4/-3

Zdroj: (12)

Na výsledkoch je vidieť, ako sa počas zimy zvýši spotreba energie. Príčinou je samozrejme jednak väčšie zaťaženie (kúrenie), ale aj zvýšenie korelácie medzi teplotou aj dojazdom. Medzi ďalšie faktory autor zaraďuje aj spôsob jazdy vodiča či zaťaženie vozidla cestujúcimi.

Autor dohľadal aj inú prácu s názvom „Využitie lítium-iónovej batérie v rôznych režimoch elektronickej dopravy“, kde získal dáta taktiež kĺbového elektrobusu, ale s kapacitou 316 kWh (13). Daný výsledok je zobrazený na obr. 15.



Obrázok 15 Graf korelácie medzi dojazdom a vonkajšou teplotou

Zdroj: (13)

Treba poznamenať, že daný elektrobus je vybavený naftovým agregátom na vykurovanie vozidla. To je vysvetlenie zlomu grafu pri teplotách nižších ako 8 °C. V grafe je vidieť, že elektrobusy dosahujú najnižšie spotreby (stagnácia hodnôt) pri teplotách približne nad 16 stupňov (hodnoty menšie ako 1 kWh·km⁻¹). Teploty pod 16 stupňov sa vyznačujú výrazným rastom spotreby. Autor usudzuje rast až o 40-50 % (hodnoty podľa grafu blízke 1,5 kWh·km⁻¹) (13).

Tabuľka 6 Parametre Solaris Urbino 18 Electric

Parameter	Hodnota
Dĺžka	18 000 mm
Výška	3 300 mm
Celková hmotnosť	29 000 kg
Maximálna obsaditeľnosť	138 osôb
Výkon elektrického motora	240 kW

Zdroj: (11)

Zvyšné základné parametre autor uviedol v tabuľke 6. Vozidlo má 38 miest na sedenie (vozidlo je vybavené 2 priestormi pre kočíky). Celková obsaditeľnosť je 121 cestujúcich (pri predpoklade iba jedného miesta pre kočíky bude obsaditeľnosť väčšia). Klimatizácia

a vykurovanie vozidla je elektrické (11). Elektrobus je zobrazený na ilustračnej fotografii na obr. 16.



Obrázok 16 Solaris Urbino 18 Electric

Zdroj: (11)

Nabíjanie vozidla je možné káblové, ale i pomocou zberača opportunity charging. Autor upozorňuje, že výber možnosti nabíjania si určuje dopravný podnik na základe výberového konania. Autor navrhuje výber spôsobu nabíjania podľa množstva vozidiel. V prípade kúpy menšieho počtu vozidiel by bolo ekonomické zvoliť spôsob nabíjania cez trolejové vedenie. V prípade väčšieho množstva vozidiel je možné uvažovať o výstavbe doterajšieho systému nabíjania opportunity charging. Opportunity charging v Bratislave je od spoločnosti EC Engineering. Nabíjací typ je Ride&Charge, výkon nabíjania je až 600 kW (pre porovnanie, cez kábel je max. výkon 240 kW) (14).

2.2.3 Návrh infraštruktúry Ride&Charge

Infraštruktúra pre elektrobus je veľmi jednoduchá, a to mať minimálne 2 typy nabíjačiek. Jednu vo vozovni pre pomalé nabíjanie (tzv. vybalancovanie) a druhú z dôvodu menšieho dojazdu na trase linky. Vo vozovni Trnávka sa nachádzajú 4 pantografové nabíjačky. Autor navrhuje vyhradenie parkovacieho miesta pre elektrobusy, kde sa vytvorí minimálne 8 pomalých nabíjačiek, resp. 8 pantografových nabíjačiek pre pomalé nabíjanie. Cena pomalej nabíjačky sa pohybuje približne okolo 3000 € (cena je bez DPH a je z vysúťaženého tendra z Prešova) (15). Počet pantografových nabíjačiek určí autor v kapitole 2.2.4.

2.2.4 Obmedzenia na linke 63

Medzi základné obmedzenia na linke 63 patrí dojazd a dobíjanie batérií. Dojazd autobusu je iba cca 130 km. Priemerný denný nájazd je počas pracovných dní 256 km. To

znamená, že je potreba dobudovať nabíjačku v obratisku. Autor navrhuje ako optimálne miesto obratisko Avion Shopping Park. V dnešnej dobe sú už v tesnej blízkosti vybudované nabíjačky pre elektrické automobily, takisto je v pláne výstavba trolejového vedenia v tejto oblasti, čo by mohlo uľahčiť výstavbu nabíjačky. Cena z roku 2018 je 16 171,33 € (16). Autor bude používať pre kalkuláciu vyššiu cenu - 20 000 €. Daná pantografová nabíjačka sa stavala pri zastávke Patrónka. Cena je kompletná aj s montážou.

Čas na konečnej zastávke Avion Shopping Park sa pohybuje približne od 15 do 35 minút. Služba 63011 má príjazd 10:02, odjazd je od 10:37 (35 min, sedlo). Služba 63061 má príjazd o 7:36 a odjazd o 7:54 (18 min, špičková doba). Služba 630302 má príjazd 7:16 a odjazd 7:40 (24 min, víkend). Rýchlonabíjačka s výkonom 600 kW nabije akumulátor o kapacite 240 kWh približne za 24 min. To znamená, že v podstate sa môžu autobusy nabíjať aj menším výkonom (menšia spotreba, menšie zaťaženie akumulátora).

Autor spracoval pre zaistenie celodennej výdrže na linke 63 aj model nabíjacieho cyklov. Priebeh výpočtu je popísaný v prílohe G. Autor modeloval priebeh nabíjania v službe 63011, pri plnom nabíjacom výkone. Autor sa rozhodol vytvoriť aj model pre zimnú prevádzku. Zvýšenie spotreby prebral zo situácie z Osla. Autor predpokladá, že daný výsledok nemusí byť podobný ako v Bratislave, je potrebné brať to s rezervou. Výsledok je zobrazený v tabuľke 7.

Tabuľka 7 Nabíjanie Solaris Urbino 18m pri použití technológie Ride&Charge

Účelová funkcia	Označenie nabíjania	Čas nabíjania	Spotreba elektrickej energie [kWh]
<i>Normálna spotreba</i>	Nabíjanie 1	10:02 – 10:37 (35 minút)	262,5
	Nabíjanie 2	17:10 – 17:34 (24 minút)	180
<i>Zimná zvýšená spotreba (+40 %)</i>	Nabíjanie 1	7:59 – 8:37 (38 minút)	285
	Nabíjanie 2	10:02 – 10:37 (35 minút)	262,5
	Nabíjanie 3	13:47 – 14:14 (27 minút)	202,5
	Nabíjanie 4	18:50 – 19:25 (35 minút)	262,5

Zdroj: Autor s pomocou (11, 14)

Pre túto variantu je potrebné nabíjanie 2x. V prípade zimnej spotreby navýšenej o 40 % je potrebné nabíjať 4x denne.

2.2.5 Ekonomika

V tabuľke 8 autor vyčíslil prevádzkové náklady na rok prevádzky. Treba podotknúť, že autor počíta iba kilometrový náklad a nerieši nočné nabíjanie.

Tabuľka 8 Ročný nákladový súhrn Solaris Urbino 18 Electric – Ride&Charge

Parameter	Hodnota	Jednotka
Denná spotreba elektrickej energie pre všetky služby PO-PI	3 666,24	kWh
Denná spotreba elektrickej energie pre všetky služby PO-PI (prázdniny)	3 450,29	kWh
Denná spotreba elektrickej energie pre všetky služby SO-NE	3 086,9	kWh
Ročná spotreba elektrickej energie	1 258 296,34	kWh
Cena elektrickej energie (1/2024)	0,18934	€· kWh ⁻¹
Ročný náklad na PHM	238 245,83	€
Počiatkové investície	Hodnota	Jednotka
Nákup vozidiel (15 ks)	10 875 000	€
Výstavba nabíjačiek (9 ks rýchlonabíjačiek)	180 000	€

Zdroj: Autor s pomocou (13, 16)

2.3 Variant 3: Elektrobus (akumulátor 240 kWh, nabíjanie Two-Pole charging)

Kapitola sa zaoberá rovnakým modelom ako kapitola 2.2. Preto kapitoly zaoberajúce sa analýzou silných a slabých stránok a charakteristikou elektrobusu autor preberie z kapitol 2.2.1 až 2.2.2.

2.3.1 Charakteristika Two-pole charging

Tento variant nie je až tak rozšírený, a to z dôvodu slabého nabíjacieho výkonu a aj potreby trolejovej infraštruktúry. Porovnanie investičných nákladov je diskutabilné. Záleží to na lokácii. Cena sa odvíja od výstavby meniarne (v prípade, že je v blízkosti, je to výhoda). Výkon tejto nabíjačky je 150 kW pri napätí 600 V (17). To znamená, že nabitie akumulátora s kapacitou 240 kWh by trvalo 96 minút. Čas na konečnej zastávke Avion Shopping Park sa pohybuje približne od 15 do 35 minút. Pri uvažovaní veľmi zjednodušeného modelu bez

závislosti na teplote okolia, batérii a pri nabíjaní 100% nabíjacím výkonom by to znamenalo, že za dobu 15 až 35 minút sa môže dobiť cca 15 až 36 % batérie.

2.3.2 Návrh infraštruktúry

Výhodou Two-pole charging je, že na nabíjanie stačí klasická trolejbusová trolej. Podobný spôsob nabíjania je napríklad aj v Žiline a v Prahe. Na nočné nabíjanie je možné zvoliť pomalé káblové nabíjanie, ale môžu sa nabíjať aj cez zberač (softwarové nastavenie, po ukončení nabíjania pomalým prúdom z troleje sa sám odpojí).

Návrh infraštruktúry pozostáva z výstavby nabíjacej troleje. V prvom rade sa autor zameria na nabíjanie vo vozovni. Nastávajú tu dve možné alternatívy. Prvá alternatíva je bez investičných nákladov. Autor navrhuje parkovanie vozidiel v priestore trolejbusov (vozovňa Trnávka). Pod trolejovou stopou budú odstavené elektobusy, vedľa trolejbusy. Táto alternatíva je možná pri malom počte elektobusov. Druhá alternatíva je výstavba nabíjacích trolejí, ktoré sú paralelne umiestnené, vid' obr. 17.



Obrázok 17 Nabíjanie elektobusov v Prahe

Zdroj: (18)

Vozidlá je potrebné nabíjať aj na trase linky 63. Autor navrhuje nabíjanie na konečnej zastávke Avion Shopping Park. Dané obratisko má väčšie rozmery a je tam umožnená výstavba až dvoch nabíjacích trolejí. Od roku 2020 je v návrhu predĺženia trolejbusovej trate z oblasti

Trnávka až na obratisko Avion Shopping Park (stav k dátumu 9/2023: čakanie na stavebné povolenie + výber zhotoviteľa). V tomto projekte sa má vybudovať trolejové prepojenie a kontajnerová meniareň (alokovaná v obratisku Avion Shopping Park). Realizácia projektu je plánovaná v rokoch 2024 až 2026. Návrh ale nepočíta s trolejovou stopou na obratisku (19). Autor v návrhu nebude počítat' s výstavbou meniarne.

2.3.3 Obmedzenia na linke 63

Podobne ako pri variante 2 je najväčším obmedzením nabíjanie akumulátora. Pri tomto type nabíjacej infraštruktúry čas na nabíjanie akumulátora dlhší, čo by mohlo znamenať väčší počet nabíjacích cyklov.

Autor podobne ako v prechádzajúcom variante spracoval pre zaistenie celodennej výdrže na linke 63 aj model nabíjacích cyklov. Priebeh výpočtu je popísaný v prílohe G. Autor modeloval priebeh nabíjania v službe 63011. Výsledok pre obidve optimalizačné funkcie je zobrazený v tabuľke 9.

Tabuľka 9 Nabíjanie Solaris Urbino 18m pri použití technológie Two-Pole charging

Účelová funkcia	Označenie nabíjania	Čas nabíjania	Spotreba elektrickej energie [kWh]
<i>Normálna spotreba</i>	Nabíjanie 1	7:59 – 8:37 (38 minút)	71,25
	Nabíjanie 2	10:02 – 10:37 (35 minút)	65,63
	Nabíjanie 3	15:30 – 15:54 (24 minút)	45
	Nabíjanie 4	18:50 – 19:25 (35 minút)	65,63
	Nabíjanie 5	20:46 – 21:12 (26 minút)	48,75
	Nabíjanie 6	22:28 – 22:42 (14 minút)	26,25

Zdroj: Autor s pomocou (11, 17)

Pri klasickej spotrebe je počet nabíjaní 6. V prípade zimnej spotreby je prevádzka náročná. Je potreba nabíjať vozidlo pravidelne, a to až 9-krát. Celkom sa nabíja pri každej novej príležitosti. Autor konštatuje, že táto kombinácia nie je vhodná.

2.3.4 Ekonomika

Náklady sú rovnaké ako pri variante s technológiou Ride&Charge. Cenu vozidla autor predpokladá rovnakú. V prípade ceny nabíjania vo vozovni autor navrhuje výstavbu paralelného státi (225 m trolejového vedenia). Pre nabíjanie na obratisku Avion autor navrhuje výstavbu 15 m dlhého trolejového vedenia. Výsledná investičná cena za infraštruktúru je 186 465,64 €. Cena vychádza z konzultácie so spoločnosťou Elektrizace železnic Praha a.s. (20).

2.4 Variant 4: Elektrobus (akumulátor 602 kWh, nabíjanie Ride&Charge)

Ako autor spomínal, Solaris v tomto segmente dominuje. Či už v experimentoch s vodíkom, vozidlách s rôznymi dĺžkami, ale aj pri elektrických pohonoch. Pri elektrobusoch má širokú ponuku akumulátorov s rôznym dojazdom podľa požiadaviek dopravcu. Ku koncu roku 2023 predstavil nový kĺbový elektrobus s dojazdom až 600 km (21). Dané vozidlo bolo iba nedávno predstavené verejnosti, a preto ho z dôvodu nedostatku dát autor nezaradil do základných kapitol.

Autor sa rozhodol ozvláštniť prácu, a preto si pre tento variant zvolil elektrobus SOR NS 18 Electric. Elektrobus je zobrazený na ilustračnom obr. 18.



Obrázok 18 SOR NS 18 Electric

Zdroj: Autor s využitím (22)

2.4.1 Analýza silných a slabých stránok

Analýza silných a slabých stránok pre tento model je podobná ako pre elektrobus s menšou kapacitou akumulátorov. Analýza silných a slabých stránok je uvedená v prílohe F.

Jediný rozdiel je pri dojazde, ktorý je s väčšou kapacitou väčší, ale má o niečo menšiu obsaditeľnosť.

2.4.2 Charakteristika autobusu

SOR NS 18 je český klbový elektrobús. Autorom dizajnu karosérie je Patrik Kotas. Karoséria sa využíva aj pre dieselový CNG pohon, ale aj na výrobu trolejbusov. Elektrobús je vybavený štyrmi pneumatickými dvojkridlymi dverami. Poskytuje 48 miest na sedenie a 102 miest na státie. Prvý prototyp tohto vozidla bol vyrobený v roku 2022. V roku 2023 sa elektrobús objavil v dopravnom podniku Hradec Králové, kde bol testovaný (23). V pravidelnej prevádzke ho bude možné vidieť v Kladne, kde si ho daný dopravca objednal v počte 8 kusov. Cena za 8 ks je 141 miliónov Kč. Autor predpokladá cenu 700 000 € za 1 vozidlo (24).

Elektrobús je vybavený trakčnými akumulátormi NMC (nikel-mangán-kobaltový), ktoré sú umiestnené na streche. Kapacita je 602 kWh a poskytuje dojazd 300 km. Priemerná spotreba elektrickej energie je $136,9 \text{ kWh} \cdot 100 \text{ km}^{-1}$ ($1,369 \text{ kWh} \cdot \text{km}^{-1}$). Spotreba je dodaná od spoločnosti SOR a je meraná podľa metódy SORT 1. Nabíjanie je pomocou káblového nabíjania podľa štandardov CCS2 (pomalé nabíjanie) alebo pomocou zberača (22). Ostatné parametre autor uviedol v tabuľke 10.

Tabuľka 10 Parametre elektrobusu SOR NS 18 Electric

Parameter	Hodnota
Dĺžka	18 750 mm
Výška	2 995 mm
Celková hmotnosť	30 000kg
Maximálna obsaditeľnosť	150 osôb
Výkon elektrického motora	240 kW

Zdroj: Autor s využitím (22)

2.4.3 Návrh infraštruktúry Ride&Charge

Podobne ako v predchádzajúcom variante je potrebné nabíjanie na obratisku Avion Shopping Park. Priemerný potrebný dojazd na celodenných službách je 324 km. Pri delených službách nie je potrebné nabíjanie. Nabíjanie je potrebné iba pre celodenné služby. Z uvedeného dôvodu je nutné vybudovať nabíjaciú sieť na obratisku Avion Shopping Park.

2.4.4 Obmedzenia na linke 63

Podobne ako v prechádzajúcom variante je obmedzením dojazd pre celodenné služby. Autor rovnako vytvoril model nabíjajúcich cyklov pre službu 63011. Priebeh výpočtu je popísaný v prílohe G. Výsledok modelu je znázornený v tabuľke 11.

Tabuľka 11 Nabíjanie SOR NS 18 Electric pri použití technológie Ride&Charge

Účelová funkcia	Označenie nabíjania	Čas nabíjania	Spotreba elektrickej energie [kWh]
Normálna spotreba	Nabíjanie 1	6:28 – 6:40 (12 minút)	90
Zimná zvýšená spotreba (+40 %)	Nabíjanie 1	13:47 – 14:14 (38 minút)	202,5
	Nabíjanie 2	18:50 – 19:25 (35 minút)	262,5

Zdroj: Autor s pomocou (14, 22)

Nabíjanie pri klasickej spotrebe je potrebné iba jedno. V prípade navýšenia spotreby o 40 % sa zvýši počet nabíjaní na dva.

2.4.5 Ekonomika

V tabuľke 12 autor vyčíslil prevádzkové náklady na rok prevádzky.

Tabuľka 12 Ročný nákladový súhrn SOR NS 18 Electric – Ride&Charge

Parameter	Hodnota	Jednotka
Denná spotreba elektrickej energie pre všetky služby PO-PI	3 864	kWh
Denná spotreba elektrickej energie pre všetky služby PO-PI (prázdniny)	3 633,42	kWh
Denná spotreba elektrickej energie pre všetky služby SO-NE	3 250,75	kWh
Ročná spotreba elektrickej energie	1 325 082,54	kWh
Cena elektrickej energie (1/2024)	0,18934	€· kWh ⁻¹
Ročný náklad na PHM	250 891,9	€
Počiatkové investície	Hodnota	Jednotka
Nákup vozidiel (15 ks)	10 500 000	€
Výstavba nabíjačiek (9 ks rýchonabíjačiek)	180 000	€

Zdroj: Autor s pomocou (16, 22)

2.5 Variant 5: Elektrobus (akumulátor 602 kWh, nabíjanie Two-Pole charging)

Variant číslo 5 vychádza koncepčne z variantu číslo 4, ale rozdiel je v nabíjacej infraštruktúre. Z dôvodu rovnakého popisu ako je pri variante 4, autor v tejto kapitole hovorí len o zmene nabíjacej infraštruktúry.

2.5.1 Návrh infraštruktúry Two-Pole charging a nabíjací model

System nabíjania je vysvetlený už v kapitole 2.3.2. Pre potreby nabíjania je potrebná jedna dvojstopá nabíjacia trolej. Autor už danú trolej opísal v kapitole 2.3.2.

Pre potreby overenia prevádzkyschopnosti na linke 63 autor spracoval model nabíjania na obratisku Avion pre službu 63011. Priebeh výpočtu je popísaný v prílohe G. Počet nabíjaní je zobrazený v tabuľke 13.

Tabuľka 13 Nabíjanie SOR NS 18 Electric pri použití technológie Two-Pole charging

Účelová funkcia	Označenie nabíjania	Čas nabíjania	Spotreba elektrickej energie [kWh]
<i>Normálna spotreba</i>	Nabíjanie 1	7:59 – 8:37 (38 minút)	71,25
<i>Zimná zvýšená spotreba (+40 %)</i>	Nabíjanie 1	7:59 – 8:37 (38 minút)	71,25
	Nabíjanie 2	10:02 – 10:37 (35 minút)	65,63
	Nabíjanie 3	18:50 – 19:25 (35 minút)	65,63
	Nabíjanie 4	20:46 – 21:12 (26 minút)	48,75

Zdroj: Autor s pomocou (17, 22)

Nabíjanie pri klasickej spotrebe je potrebné iba jedno. V prípade navýšenia spotreby o 40 % sa zvýši počet nabíjaní až na 4.

2.5.2 Ekonomika

Náklady na prevádzku sú podobné ako pri predchádzajúcom variante s technológiou Ride&Charge. Náklady na výstavbu trolejového napájacieho vedenia sú podobné ako pri variante 3.

2.6 Variant 6: Trolejbus s nezávislým zdrojom energie (akumulátorový)

Trolejbusy s nezávislým zdrojom energie predstavujú najväčšiu výhodu zo zákona 214/2021 Z. z. pre dopravné podniky, ktoré majú vytvorenú trolejovú sieť. Už v minulosti výrobcovia trolejbusov experimentovali s takýmto druhom trolejbusov, ale bohužiaľ v tej dobe iba s pomocným dieselgenerátorovým pohonom. Prvé sériovo vyrábané vozidlá Škoda s takýmto pohonom boli vozidlá typu 24/25 Tr.

Samozrejme s vývojom elektrobusev a trakčných akumulátorov sa začali viac využívať akumulátory ako pomocný pohon. Tento druh hybridných trolejbusov kombinuje kladné vlastnosti trolejbusov a elektrobusev. V dnešnej dobe nie je dojazd daných vozidiel až tak veľký a pohybuje sa okolo 15 km. S takýmto typom trolejbusov je možné sa stretnúť v mestách České Budějovice, Plzeň, Praha, Pardubice, ale aj vo viacerých slovenských mestách, ako je napr. Bratislava, Prešov či Banská Bystrica.

2.6.1 Analýza silných a slabých stránok

Analýza silných a slabých stránok je uvedená v prílohe H.

2.6.2 Charakteristika trolejbusu

Autor si pre tento typ pohonu vybral už zakúpené vozidlá DPB Škoda 27 TrA. Treba dodať, že vozidlá boli vyrobené a dimenzované na základe požiadavky DPB. Referenčnou linkou, na ktorú boli vozidlá dimenzované, bola linka 61 (25). Pre ilustráciu, v dobe písania práce (3/2024) spoločnosť Škoda testuje trolejbus s dojazdom už 20 km na akumulátory. Momentálne sa testuje iba verzia 12 m prototypu (Škoda 32 Tr pre Vilnius) (26).

Vozidlo vzniklo kooperáciou spoločností Škoda Electric (elektrická časť) a Solaris (karoséria). Vozidlo z hľadiska karosérie vychádza z vozidla Solaris Urbino 18 m. Tento typ karosérie bol použitý pri vodíkovom variante a pri variante s využitím elektrobusev. Trolejbus je zobrazený na obr. 19.



Obrázok 19 Škoda 27 TrA

Zdroj: Autor

Trakčný motor je od výrobcu Škoda Electric. Motor má výkon 250 kW a poháňa zadnú nápravu. IGBT elektrovýzbroj trolejbusu je umiestnená v strešnej jednotke na streche predného článku. Elektrovýzbroj dovoľuje prevádzkové elektrodynamické brzdenie s možnosťou rekuperácie. Rekuperácia brzdovej energie smeruje prvotne do obvodov vlastnej spotreby trolejbusu, na dobíjanie trakčnej batérie, do trolejového vedenia. Vo výzbroji sa okrem IGBT spínacích prvkov nachádza aj napájanie pomocných pohonov. Vedľa boxu, resp. odborne nazvanej strešnej jednotky, sa nachádza brzdový rezistor (zariadenie slúži k mareniu elektrickej energie počas brzdení, keď sa nenájde iné využitie). Na prívod jednosmerného prúdu do elektrickej výzbroje slúžia dva tyčové poloautomatické zberače, ktoré disponujú možnosťou automatického stiahnutia alebo nasadenia zberačov na trolej (27).

Trakčné akumulátory sú umiestnené v boxoch v zadnej časti trolejbusu. Spolu sa na vozidle nachádzajú dvakrát. Akumulátor je zložený z LTO článkov o kapacite 51 kWh. Daná kapacita by mala postačiť na 12 km jazdu. Nabíjanie môže byť priebežné 45 kW alebo nočné (vybalancovanie) 20 kW. Výrobca uvádza aj počet cyklov nabitia akumulátora (0-100 %), a to SOC 25 000. Nabíjanie je možné pri státi vozidla, ale aj počas jazdy (brzdenia) (28).

Autor kontaktoval DPB a spoločnosť Škoda Electric ohľadom veľkosti spotreby trakčnej energie. DPB dáta by veľmi rado poskytlo, ale vozidlá zatiaľ spotrebu nemerajú správne. Škoda Electric nemá oficiálnu spotrebu, ale poskytli spotrebu podobného vozidla vo Francúzsku. Vozidlo je prevádzkované na podobnej linke s menšími odlišnosťami. Vo Francúzsku je v zimných mesiacoch teplejšie, ale zas terén je viac členitý. Preto autor dané údaje využije. Najnižšia spotreba za jarné alebo jesenné mesiace (bez potreby klimatizácie

alebo kúrenia) je $2,2 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$. Najvyššia za zimné mesiace bola $3,3 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$. Škoda Electric odporučila použiť priemernú spotrebu $2,6 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ (18).

2.6.3 Obmedzenia na linke 63

Výrobca uvádza pri pravidelnej celodennej prevádzke a pre udržanie vyrovnanej energetickej bilancie stavu batérie dodržať režim jazdy pri napájaní z trakčnej batérie ku režimu jazdy pri napájaní z trolejového vedenia v pomere 2:3 (25).

Táto podmienka na linke 63 nie je možná bez investícií. Autor v nasledujúcich variantoch navrhne možnú prevádzku daného typu vozidiel na linke 63. Autor si stanovil podmienku, aby bol na trase pomer jazdy mimo trolejové napájanie voči jazde na troleji 40/60. Táto podmienka vychádza aj z výberového konania DPB, kde bol zadaný takýto rozsah. Na linke 63 to znamená, že je potreba mať 7,35 km trasy pod trolejmi. V súčasnosti je to iba 5,1 km. Autor v nasledujúcich podkapitolách navrhne možné varianty riešenia.

DPB vlastní 23 vozidiel Škoda 27 TrA. Denne je vypravených 17 vozidiel (27). Autor sa domnieva, že na zabezpečenie prevádzkyschopnosti na linke 63 je potrebné zakúpiť ďalšie. Vo výberovom obstarávaní je možné dimenzovať budúce vozidlá na linku 63. Autor ale bude navrhovať varianty s pomerom 2/3.

2.6.4 Návrh variantov

Nabíjanie jedného cyklu trakčného akumulátora s kapacitou 52 kWh pri výkone 45 kW trvá 1 hodinu a 13 minút. Čas jazdy pod vedením trvá približne 13-14 minút (záleží podľa kongescií).

Autorova prvá myšlienka bola navrhnúť zámenu trasy linky 61 a 63. Tento návrh bol autorovi vyvrátený pri konzultácii s DPB. Vozidlá boli kupované na linku 61 a na danú zadanú referenčnú trasu. Preto autor neuvažuje o zámene trasy linky. Jedným z ďalších dôvodov je aj náročná trasa, napr. problematická križovatka Galvaniho/Bulharská. Jedným z prvých problémových bodov na tejto križovatke je zvýšenie meškania. Druhý problémový bod je výjazd z ulice Bulharská. Problém, ktorý autor identifikoval, je veľká intenzita na ulici Galvaniho (dvojpruhová komunikácia). Pri výjazde je potrebné dať prednosť všetkým vozidlám a nadbehnúť si cez dva pruhy. Pri zlom nadbehnutí vozidla vzniká problém, kedy posledná náprava (12 metrový voz 2. náprava, 18 metrový 3. náprava) prechádza obrubníkom, kde môže dôjsť k poškodeniu pneumatiky alebo zraneniu chodca. Situácia je zobrazená na obr. 20.



Obrázok 20 Prejazd križovatkou Galvaniho-Bulharská

Zdroj: Autor

Autor nebude navrhovať ani predĺženie trasy na smer Avion, keďže v danom území prebiehajú projektové prípravy na výstavbu terminálu VHD, parkovacieho domu a úprava železničného prejazdu.

2.6.5 Metaheuristický výber trolejovej nabíjacej troleji v trase zst. Patrónka – Lamač

Postup výberu optimálnej trate autor popísal v prílohe I. Optimálnou voľbou by bola výstavba trolejového vedenia v úseku 1 a 2. Výsledná cena by bola 2 490 829,67 €. Výstavba trolejového vedenia by bola vo vzdialenosti 3,1 km.

V praxi ide o predĺženie trate až po Tesco Lamač, čo môže podľa autora zväčšiť príležitosť na zelektrifikovanie ďalších liniek, resp. predĺženie trolejbusových liniek.

2.6.6 Ekonomika

V tabuľke 14 autor vyčíslil prevádzkové náklady na rok prevádzky.

Tabuľka 14 Ročný nákladový súhrn Škoda 27 TrA

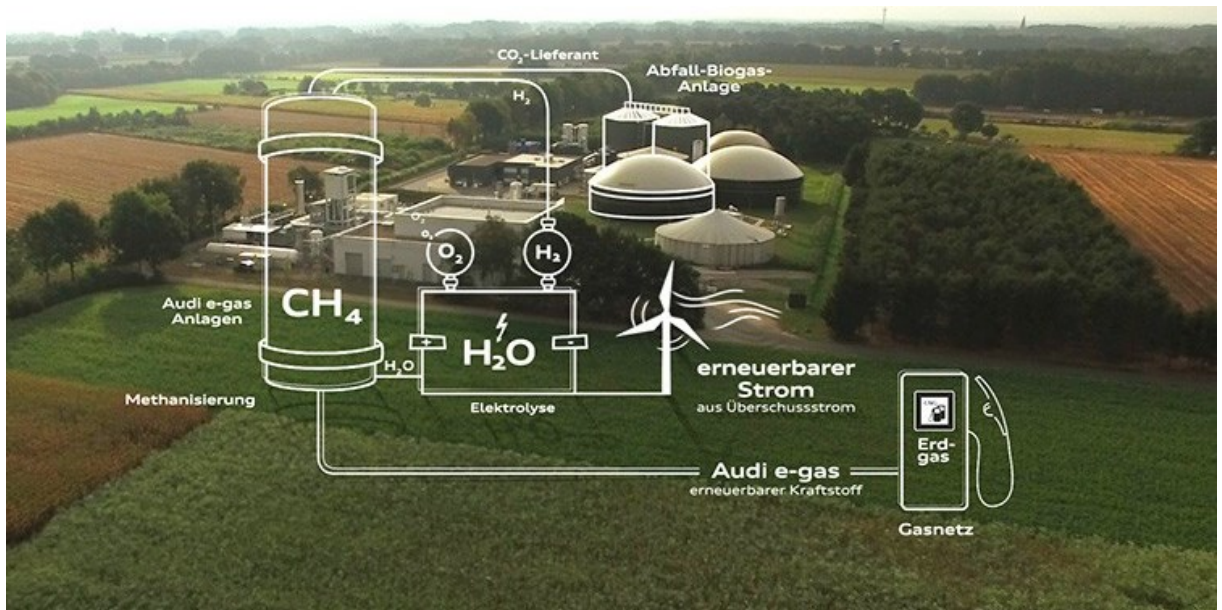
Parameter	Hodnota	Jednotka
Denná spotreba elektrickej energie pre všetky služby PO-PI	7 338,49	kWh
Denná spotreba elektrickej energie pre všetky služby PO-PI (prázdniny)	6 900,58	kWh
Denná spotreba elektrickej energie pre všetky služby SO-NE	6 473,8	kWh
Ročná spotreba elektrickej energie	2 516 592,69	kWh
Cena elektrickej energie (1/2024)	0,18934	€·kWh ⁻¹
Ročný náklad na PHM	476 491,66	€
Počiatočné investície	Hodnota	Jednotka
Nákup vozidiel (15 ks)	9 017 175	€
Výstavba trolejového vedenia	2 490 829,67	€

Zdroj: Autor s pomocou (18, 27)

2.7 Variant 7: CNG pohon

Compressed Natural Gas, známy aj pod skratkou CNG, je stlačený zemný plyn. Zemný plyn je vhodný na kúrenie, ohrev úžitkovej vody a aj ako motorové palivo. CNG sa v doprave zvyčajne stláča na 200 barov. CNG pohon je zapísaný ako alternatívne palivo podporované EU. Pri spaľovaní CNG uniká do ovzdušia oproti dieselovým motorom až o 30 % menej CO₂ (29).

E-GAS je projekt od spoločnosti Audi. Laicky povedané, účelom projektu je vyrábať plyn vhodný na vykurovanie alebo tankovanie CNG vozidiel. Celý princíp je využitie prebytočnej zelenej energie, ktorá sa využíva na výrobu vodíka z vody. Následne vodík reaguje s CO₂ a vzniká syntetický metán. Vedľajšími produktami sú voda a kyslík. Princíp systému je zobrazený na obr. 21 (30).



Obrázok 21 Princíp výroby E-GAS

Zdroj: (30)

2.7.1 Analýza silných a slabých stránok

Analýza silných a slabých stránok CNG pohonu v MHD je uvedená v prílohe J.

2.7.2 Charakteristika autobusu

Autor si pre tento typ pohonu vybral vozidlo SOR NSG 18. Toto vozidlo bolo dodané do Košíc v roku 2023. Dopravný podnik vlastní iba jeden kus tohto typu (a 2x SOR NSG 12). Cena vozidla je 409 500 €. Modelový rad NS bol predstavený už v roku 2018, ale v dieselovej verzii. Typ elektropohonu a CNG boli sériovo vyrábané od roku 2022 (31). Popis karosérie autor spravil už v kapitole 2.4.

Vozidlo je štandardne vybavené 4 dverami a poskytuje kapacitu pre 45 miest na sedenie a 132 pre stojacich. SOR NSG 18 je vybavený plynovým motorom FPT Industrial Cursor 9, ktorý spĺňa Euro 6E. Motor má výkon 251 kW a spotrebu $56 \text{ kg} \cdot 100 \text{ km}^{-1}$ ($5,6 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1}$). Vozidlo disponuje ôsmimi palivovými nádržami s objemom 217 l. Pre ilustráciu vid' obr. 22 (32).



Obrázok 22 SOR NSG 18

Zdroj: (33)

2.7.3 Návrh infraštruktúry

Návrh infraštruktúry nie je potrebný z dôvodu, že DPB má vo vozovni Trnávka čerpaciu stanicu CNG. Cena CNG z výročnej správy z roku 2022 je 1,361 € (34). Cena sa ťažko určuje, keďže DPB spolu s OLO majú združenú zmluvu o dodávke CNG. Druhým dôvodom je aj malý počet vozidiel na CNG.

Autor sa snažil dohľadať cenu z Dopravného podniku mesta Košice (DPMK), ktorý má samotnú dodávku. Cena pevná nie je, ale je aktualizovaná každý týždeň. Cena sa aktualizuje podľa štatistického úradu a v 5. týždni 2024 je cena 1,601 €·kg⁻¹ (35). DPMK má v zmluve množstevnú zľavu 1,9 % (36). Výsledná cena je 1,6 €·kg⁻¹.

2.7.4 Obmedzenia na linke 63

Autorovi sa nepodarilo dohľadať reálny dojazd, resp. objem CNG do nádrží. Autor oslovil DPMK, ktorý daný voz prevádzkuje. Takisto oslovil spoločnosť SOR, kde dostal informácie o objeme nádrže (v litroch) a o hustote paliva (0,738 kg·m⁻³) (22). Autorovi pri výpočtoch vznikli neprimerané hodnoty (napr. dojazd 2 290 km). Preto sa rozhodol tento problém vyriešiť pomocou matematického odvodenia. Vozidlo Škoda Octavia G-TEC má 90-litrovú nádrž na CNG. Do tejto nádrže sa pod tlakom 200 barov plní 15 kg CNG (37). Pri vypočítanom pomere 1 liter = 0,1546 kg CNG je kapacita CNG v nádrži autobusu SOR 268 kg.

Dojazd autobusu je 479 km. Autor konštatuje, že neexistuje žiadne obmedzenie pre linku 63.

2.7.5 Ekonomika

V tabuľke 15 autor vyčíslil prevádzkové náklady na rok prevádzky.

Tabuľka 15 Ročný nákladový súhrn SOR NSG 18

Parameter	Hodnota	Jednotka
Denná spotreba CNG pre všetky služby PO-PI	1 580,60	kg
Denná spotreba CNG pre všetky služby PO-PI (prázdniny)	1 486,28	kg
Denná spotreba CNG pre všetky služby SO-NE	1 329,74	kg
Ročná spotreba CNG	542 035,35	kg
Cena CNG	1,6	€·kg ⁻¹
Ročný náklad na PHM	867 256,56	€
Počiatkové investície		
Nákup vozidiel (15 ks)	6 142 500	€

Zdroj: Autor s pomocou (22)

2.8 Bonusový variant: Autorov návrh

Autor si pri spracovaní jednotlivých variantov všimol koreláciu medzi trolejbusmi a elektobusmi. Elektobusy majú výhodu v tom, že nie sú závislé od trakčného vedenia. Tento fakt im umožňuje mať väčšiu flexibilitu a dojazd na jedno nabitie batérie. Trolejbusy s pomocným akumulátorovým pohonom majú tiež podobnú výhodu, ale iba na krátku vzdialenosť. Nevýhodou oboch je dlhé nabíjanie. Nevýhodou elektobusov je výstavba špeciálnych nabíjačiek, čo zvyšuje investičné náklady. V prípade trolejbusov je nevýhodou nutnosť odjazdiť min. 60 % trasy alebo času s pripojením na trakčné napájanie. Autor ale našiel riešenie vo forme spojenia oboch technológií do jedného konceptu.

Autor navrhuje elektobus vybavený plnohodnotnými akumulátormi a s nabíjaním z dvojpólového trolejového vedenia. Pre spojenie elektobusu a trolejového vedenia by sa používali tyčové zberače. Týmto spôsobom by sa kombinovali kladné vlastnosti oboch typov vozidiel. Pri vozidle Škoda 27 TrA je nabíjací výkon iba 42 kWh, autor bude uvažovať o podobnom nabíjacom výkone.

Výhodou bude dynamické dobíjanie (žiadne prestoje) a neprepaľovanie trolejového drôtu (vozidlo sa dobíja počas pohybu).

Autor pri návrhu tohto typu trolejbusu kontaktoval aj spoločnosť Škoda Electric. Spoločnosť sa vyjadrila, že autor práce má pravdu v efektívite daného typu nabíjania pre linku, ale je to vždy na individuálnom posúdení. Hlavne je potreba dodať, že v prípade pantografu je

nutné s vozidlom stáť. V prípade tyčových zberačov je nutnosť zabezpečiť ich natrolejenie, čím nedosahujú tak veľké nabíjacie výkony.

2.8.1 Simulovaná prevádzka

Autor sa rozhodol využiť jednoduchý periodický výpočet prevádzky tohto typu elektrobusu. Autor počíta s akumulátormi Solaris High Energy+ (jeden box akumulátorov má 79 kWh). Pri domontovaní zberačov autor počíta s max. 3 boxmi na streche a 2 boxmi uloženými v zadnej časti vozidla. Celková kapacita pri takomto rozložení je 395 kWh (38). Rozloženie elektrobusu so 4 boxmi akumulátorov autor znázornil na obr. 23. Autorovi sa nepodarilo zohnať fotografiu najnovšieho vozidla od Solaris-u. Na najnovšom vozidle sa nachádza 7 boxov na streche (39).



Obrázok 23 Rozloženie strechy elektrobusu Solaris Urbino 18 IV

Zdroj: (40)

Autor bude uvažovať o spotrebe $2 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$. Na jeden obrat vychádza kilometrová spotreba 38,4 kWh. Na úseku s trolejovým vedením, kde je možné dobíjať akumulátor, sa vozidlo bude pohybovať minimálne 14 minút. Samozrejme pri predpoklade kongescií sa bude nabíjať dlhšie, ale autor bude počítať s minimálnou dobou. Na jeden obrat je možné dobiť akumulátory o 19,6 kWh. S vozidlom je možné odjazdiť 20 plnohodnotných obratov. Maximálny počet plnohodnotných obratov na linke je 11.

2.8.2 Odhad ceny

Výhodou tohto konceptu je minimálna nutnosť výstavby nabíjacej infraštruktúry. Vozidlá sa môžu dobíjať v priebehu jazdy. Vstupné náklady sú iba vo forme nákupu vozidiel a popríklad úpravy trate (pre linku 63 iba natrolejovacia striedka).

2.8.3 Legislatívna problematika

Trolejbus spadá pod drážne vozidlá. Trolejbusy majú vlastné schvaľovacie podmienky a predpisy. Elektrobuses nespádajú pod drážnu dopravu, ale pod cestné vozidlá. Problematikou je priradenie vozidla do správneho súboru vozidiel. Z jedného pohľadu je to stále elektrobuses,

keďže trakčnú energiu nevyužíva z pripojenia k trolejovému vedeniu. Z druhého pohľadu sa môže daný typ zaradiť medzi drážne vozidlá, a to kvôli jazde po trolejovom vedení. Síce vozidlo neberie energiu na pohon, ale stále musí dodržiavať drážne predpisy pre jazdu na trolejovom vedení (zníženie rýchlosti pred výhybkami, jazda v oblúku,...).

Autor navrhuje podľa uváženia vozidlo zaradiť medzi drážne vozidlá. Je to z dôvodu jazdy po trolejovom vedení, a s tým spojenou nutnosťou dodržiavať dané predpisy.

2.9 Zhrnutie

Druhá kapitola sa zaoberá návrhom riešenia cieľa diplomovej práce. Autor spracoval celkom 7 variant možného riešenia z každého rozšíreného druhu nízkoemisného pohonu. Prvý návrh sa zaoberal vodíkovým variantom. Výhody sú vo forme nulových emisií pri prevádzke vozidla. Nevýhodou sú vysoké náklady a slabý dojazd. Vozidlo bez priebežného doplnenia vodíka nie je schopné celodennej prevádzky.

Druhý až piaty variant je zameraný na elektrobusesy. Autor pri spracovaní narazil na rôzne možnosti návrhu riešenia, či už rôznymi typmi akumulátorov, alebo rôznou formou nabíjania. Výhodou všetkých variantov sú nulové emisie pri prevádzke a nízke prevádzkové náklady. Nevýhodou sú vysoké investičné náklady (výstavba nabíjacej infraštruktúry, nákup vozidiel), ale aj nízky dojazd.

Variant číslo šesť je venovaný najnovšej móde, a to trolejbusom s nezávislým akumulátorovým pohonom. Tieto typy sa nazývajú aj hybridné trolejbusy alebo parciálne trolejbusy. Vozidlá potrebujú linku, kde budú 60 % trasy pod trolejovým vedením. Autor metaheuristickým výberom úseku navrhol predĺženie trolejbusovej trate.

Posledným porovnávajúcim variantom je pohon CNG. CNG pohon je využívaný hlavne pre lacné prevádzkové a investičné náklady. Pre DPB, ktorá vlastní plničku CNG, je to veľká príležitosť pre rozvoj danej technológie. Nevýhodou CNG sú emisie a hluk vytváraný vozidlami počas prevádzky.

Posledný variant je bonusový. Autor pri spracovaní narazil na možné využitie kombinácie dvoch technológií, trolejbusovej technológie a elektrobusesov. Koncept je v podstate elektrobuses, ale na nabíjanie sa využívajú tyčové zberače. Výhodou je možnosť nabíjania za jazdy cez trolejbusovú trakčnú sieť. Oproti elektrobusesom, ktoré sa pri nabíjaní musia odstaviť, a zároveň pre dopravné podniky, ktoré disponujú väčším podielom trolejovej siete, je to veľká výhoda. Nevýhodou je malý nabíjací výkon pomocou tyčových zberačov. Takisto je nutné prispôsobiť infraštruktúru pre časté natrolejenie zberačov.

3 VÝBER VÝSLEDNÉHO VARIANTU

Výber výsledného variantu je náročná téma, keďže je ovplyvnená výberom metódy rozhodovania. Rozhodovať sa je možné podľa rôznych parametrov, ako sú investičná cena, prevádzkové náklady, efektívnosť, emisie a podobne. Autor si v tejto kapitole zvolí rôzne metódy na výber optimálnej varianty riešenia problematiky.

3.1 Vývoj ceny pohonných hmôt

Veľkým rozhodovacím parametrom je vývoj cien pohonných hmôt do budúcnosti. Ceny sa pravidelne menia a ovplyvňujú budúce prevádzkové náklady. Vývoj cien pohonných hmôt je uvedený v prílohe K. Na základe analýzy autor volí optimálny zdroj energie elektrický, keďže všetky ostatné druhy palív sú závislé na cene elektrickej energie. Druhou alternatívnou je CNG, z dôvodu malej spotreby elektrickej energie na stlačenie CNG.

3.2 Komparatívna porovnávacía metóda zameraná na emisie vozidiel

Emisie vozidiel je možné merať dvomi spôsobmi - WTW a TTW. WTW metóda (Well to Wheel) je spotreba energie/emisie od zdroja až po jazdu. Metóda TTW (Tank to Wheel) je zameraná iba na jazdu vozidla (41). Autor volí metódu WTW.

Spotreba a emisie z jazdy sa dajú určiť ľahko. V prípade vodíkových a elektrických vozidiel sú emisie nulové, ale treba poukázať na ich výrobu. Daná výroba môže produkovať emisie. V prípade vodíka sú dostupné rôzne typy výroby. DPB je dodávaný sivý vodík. Vodík spoločnosť Slovnaft vyrába parným reformingom zemného plynu (42). Pri takejto výrobe 1 kg vodíka sa vyprodukuje približne 5,5 kg CO₂. Druhou možnosťou je výroba zeleného vodíka (cez elektrolýzu vody). Na výrobu takéhoto vodíka je potrebných 9 l vody a 60 kWh elektrickej energie (43).

Elektrická energia je na Slovensku dodávaná z 86,7 % z jadrovej elektrárne, 9,68 % vodnej elektrárne a zvyšné percentá tvoria tepelné elektrárne a fotovoltika. 96,5 % energie je dodávaných z tzv. zelene. Na jeden vyrobený kWh elektrickej energie je vytvorených 76,8 g CO₂ (44).

CNG má nevýhodu, a to dvoje emisie. Prvé emisie sú vytvorené pri stláčaní zemného plynu. Autor oslovil spoločnosť SPP. Spotreba elektrickej energie na stláčanie závisí na type potrubia. Môže sa vyskytovať nízkotlakové, strednotlakové (obe dohromady 32 500 km) alebo vysokotlakové (6 300 km). Pri vysokotlakovom potrubí je spotreba elektrickej energie 0,016 – 0,020 kWh·kg⁻¹. Pri nízkotlakovom a strednotlakovom je spotreba elektrickej energie

0,6 – 0,9 kWh·kg⁻¹. Autor bude uvažovať o spotrebe pre nízkotlakové potrubia 0,6 kWh·kg⁻¹ (45).

Druhé emisie sú vytvorené pri prevádzke vozidla. Autor oslovil spoločnosť SOR za účelom zistenia emisií vozidla, ale SOR dané údaje nemá k dispozícii. Preto sa autor rozhodol využiť vzorec na výpočet emisií CO₂ na základe výhrevnosti palív (46). Výsledky celej analýzy autor znázornil v tabuľke 16.

$$E = M \cdot H \cdot EF \cdot (1 - N) \quad (1)$$

kde:

E = celkové množstvo vyprodukovaných emisií CO₂ [t],

M = celková hmotnosť paliva [t],

H = výhrevnosť paliva [MJ·t⁻¹] => 34,575 MJ·t⁻¹,

EF = emisný faktor paliva [t CO₂·TJ⁻¹] => 55,42 t CO₂·TJ⁻¹,

N = koeficient priemerného nedopalu => 0,005.

Tabuľka 16 Výsledné emisie vyprodukované za 1 rok prevádzky

Parametre	Solaris Hydrogen (Var. 1)		Solaris Electric (Var. 2, 3)	SOR NS 18 (Var. 4, 5)	Škoda 27 Tr (Var. 6)	SOR NSG 18 (Var. 7)
	Sivý vodík	Zelený vodík				
Priemerná spotreba vozidla na km	0,1463 kg		1,3 kWh	1,37 kWh	2,6 kWh	0,56 kg
Priemerné emisie CO ₂ vozidla [t]	0 t		0	0	0	0,00267
Ročná spotreba PHM na linke 63	141,61 t		1 258,3 MWh	1 325,1 MWh	2 516,6 MWh	542 t
Ročné vyprodukované emisie CO ₂ na linke 63 [t]	0		0	0	0	1 033,36

Parametre	Solaris Hydrogen (Var. 1)		Solaris Electric (Var. 2, 3)	SOR NS 18 (Var. 4, 5)	Škoda 27 Tr (Var. 6)	SOR NSG 18 (Var. 7)
	Sivý vodík	Zelený vodík				
Emisie CO ₂ z výroby paliva [t]	708,04	652,53	96,64	101,78	193,27	24,98
Ročné emisie CO ₂ celkom [t]						1 058,34

Zdroj: Autor s pomocou (42, 43, 44, 45, 46)

Na základe analýzy autor vyberá ako prostriedok s najnižšou ekologickou stopou variant 2 a 3. Variant 4 a 5 je takisto prijateľný a väčšie emisie sú spôsobené výberom inej značky dopravného prostriedku.

3.3 Multikriteriálna analýza s využitím Saatyho metódy odhadu váh

Autor sa pre tretí typ rozhodovacej metódy rozhodol pre využitie multikriteriálnej analýzy. Autor svoj návrh kritérií konzultoval s DPB a po menších úpravách a doplnení záujmu DPB sú výsledné kritériá:

- prevádzkové náklady na rok;
- cena vozidla/životnosť;
- cena infraštruktúry/životnosť;
- splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.;
- využiteľnosť dopravného prostriedku alebo infraštruktúry mimo linku 63.

Prevádzkové náklady sú dôležité, pretože charakterizujú ekonomickú výhodnosť za celý rok. Kritériá „cena vozidla/životnosť“ a „cena infraštruktúry/životnosť“ sú pomer ceny a životnosti daných stavieb alebo vozidiel. Pomer k životnosti autor vyjadruje z dôvodu, že niektoré drahšie stavby môžu byť drahšie na investíciu, ale vzhľadom na ich dlhšiu životnosť môžu byť výhodnejšie. Autor bude dosadzovať životnosť na základe tabuľky 17.

Tabuľka 17 Životnosť

Variant	Životnosť dopravného prostriedku [rok]	Životnosť infraštruktúry [rok]
Variant 1	10	-

Variant	Životnosť dopravného prostriedku [rok]	Životnosť infraštruktúry [rok]
Variant 2	10	20
Variant 3	10	40
Variant 4	10	20
Variant 5	10	40
Variant 6	15	40
Variant 7	10	-

Zdroj: (28, 32, 47, 48, 49)

Autor zo začiatku navrhol kritérium na celkové emisie, čo neskôr nebolo zo strany DPB odporúčané. Dané kritérium bolo nepraktické a nedokonale zohľadňovalo záujmy DPB. Od DPB bolo odporúčané kritérium „splnenie kritérií ekologických vozidiel“. Ani toto kritérium ale nie je ideálne, vzhľadom na to, že všetky varianty sú ekologické. Autor toto kritérium prepracoval na „splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.“. Toto kritérium hodnotí vozidlá na základe uverejnených podmienok o ekologických vozidlách. Vzhľadom na zákon, ktorý autor zanalyzoval v kapitole 1.1.3, sú možné 3 výsledky:

0. → vozidlo nie je ekologické;
1. → vozidlo spadá pod pojem „ekologické vozidlo“;
2. → vozidlo spadá pod pojem „vozidlo s nulovými emisiami“.

Posledným porovnávajúcim kritériom je využiteľnosť pre ďalšie linky. Pod týmto kritériom autor myslí napr. využitie nabíjania na obratisku pre iné linky či využitie dopravných prostriedkov pre iné linky.

Na zistenie váh pre jednotlivé porovnanie autor využije Saatyho metódu. Popis postupu pri výpočte váh autor uviedol v prílohe L. Autor vypočítané váhy zobrazil v tabuľke 18.

Tabuľka 18 Výsledné kritériálne váhy Saatyho metódy

Kritérium	Váha [%]
Prevádzkové náklady na rok	14,29
Cena vozidla/životnosť;	14,29
Cena infraštruktúry/životnosť;	14,29
Splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.	54,45
Využiteľnosť dopravného prostriedku alebo infraštruktúry mimo linku 63	2,68

Zdroj: Autor

Vypočítané váhy sa využijú v multikriteriálnej analýze. Na výber sú dve možné metódy - WSA a TOPSIS. Obidve metódy majú svoje výhody aj nevýhody, a preto sa autor rozhodol spracovať obe. Prvá je metóda TOPSIS, ktorá sa viac hodí pre potreby diplomovej práce z dôvodu porovnávania ideálneho a antiideálneho riešenia pre každé kritérium. WSA metóda je jednoduchšia. V podstate sa jednotlivé hodnoty variantov vynásobia s váhami a sčítajú sa dokopy. Týmto sčítaním vznikne pre každý variant jeho celkový úžitok, ktorý sa následne porovnáva.

Základnú maticu pre výpočet oboch metód autor zobrazil v tabuľke 19. Matica obsahuje doplnené hodnoty z kapitoly 2 (náklady) a 3.2 (emisie) pre jednotlivé varianty. Piaty stĺpec charakterizuje využiteľnosť dopravných prostriedkov alebo infraštruktúry aj pre iné linky. Definičný obor hodnôt pre daný stĺpec je $\langle 0,3 \rangle$, kde jednotlivé čísla charakterizujú:

- 0 → žiadne využitie;
- 1 → využitie buď dopravného prostriedku, alebo infraštruktúry (vlastnej);
- 2 → využitie aj infraštruktúry, aj dopravného prostriedku;
- 3 → možné predĺženie liniek.

Tabuľka 19 Základná matica pre metódu TOPSIS a WSA

	Prevádzkové náklady na rok [€]	Cena vozidla / životnosť [€]	Cena infraštruktúry / životnosť [€]	Splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z. [-]	Využiteľnosť DP alebo INF mimo linku 63 [-]
Variant 1	2 478 118,00	1 455 000,00	0,00	2,00	1,00
Variant 2	238 245,83	1 087 500,00	9 000,00	2,00	2,00
Variant 3	238 245,83	1 087 500,00	4 661,64	2,00	2,00
Variant 4	250 891,90	1 050 000,00	9 000,00	2,00	2,00
Variant 5	250 891,90	1 050 000,00	4 661,64	2,00	2,00
Variant 6	476 491,66	601 145,00	62 270,74	2,00	3,00
Variant 7	867 256,56	614 250,00	0,00	1,00	1,00

Zdroj: Autor s pomocou (47)

Žlté farebné označenie v tabuľke 19 označuje minimalizačné kritéria, ktoré je potrebné premeniť na maximalizačné. Zmenu autor previedol podľa vzorca 2.

$$y = B_{MAX} - x \quad (2)$$

kde:

y = transformovaný prvok [-];

B_{MAX} = maximálna hodnota zo všetkých variant v danom kritériu [-];

x = pôvodný prvok [-].

Ďalší postup je už pri jednotlivých metódach rozdielny a autor ho uvedie v prílohách M (TOPSIS) a N (WSA).

Výsledok oboch metód autor uviedol v tabuľke 20. Autor uviedol iba prvých 5 miest, pričom sa pri oboch metódach potvrdili prvé tri miesta. Druhé a tretie sú zamenené vzhľadom na odlišné postupy výpočtu. Autor konštatuje koreláciu rozhodovacími metódami WSA, TOPSIS a predchádzajúcimi analýzami. Vo všetkých analýzach sa elektrické varianty zobrazujú ako optimálne varianty.

Tabuľka 20 Výsledok TOPSIS a WSA metód

Poradie umiestnenia	TOPSIS	Relatívny ukazovateľ	WSA	Relatívny ukazovateľ
1.	Variant 5	0,760	Variant 5	0,900
2.	Variant 4	0,755	Variant 3	0,895
3.	Variant 3	0,744	Variant 4	0,890
4.	Variant 2	0,739	Variant 2	0,885
5.	Variant 6	0,703	Variant 6	0,842

Zdroj: Autor s pomocou (47)

V tomto porovnaní znova dominovali varianty s elektrickým pohonom. Obe metódy potvrdili, že na základe kritérií je elektrobús optimálnou voľbou. Rozdiel medzi variantami elektrobúsov je minimálny (iné dopravné prostriedky, iná infraštruktúra). Zaujímavosťou bolo umiestnenie trolejbusových variantov. Dôvodom je aj väčšia životnosť o 5 rokov, ktorá znížila ročnú cenu dopravného prostriedku. Autor ale aj z logického prístupu chápe vhodnosť trolejbusov s nezávislým zdrojom energie.

Keďže pridelenie preferencií je extrémne subjektívne a každý človek môže mať svoje vlastné, autor sa rozhodol pre možnosť umožniť čitateľovi práce doplniť si vlastné preferencie. Autor na priloženom CD nahral Excel súbor s interaktívnym dosadením preferencie jednotlivých kritérií. Po dosadení sa zobrazia vypočítané váhy kritérií a výsledky TOPSIS a WSA metódy. Autor uvedie postup práce s Excelom v prílohe O.

3.4 Analýza nákladov a prínosov (CBA)

CBA analýza patrí medzi základné techniky, ktoré sa zaoberajú hodnotením investičných projektov. Využíva sa vo veľkej miere vo verejnej správe. Autor sa s CBA analýzou ešte nestretol. Pri hľadaní postupu spracovania CBA analýzy narazil na množstvo odlišných postupov. Autor CBA analýzu spracoval podľa metodiky Ministerstva financií SR (48). Postup sa skladá z nasledujúcich krokov:

1. Identifikácia cieľov projektov.
2. Finančná analýza.
3. Ekonomická analýza.
4. Analýza rizík.

Autorovi bola odporučená metóda CBA spoločnosťou DPB. Hlavným cieľom tejto kapitoly je výber výsledného variantu. Z uvedeného dôvodu si autor analýzu a postup upravil pre potreby výberu, resp. ujasnenia vybraného výsledného variantu. Autor využije CBA analýzu hlavne na časové rozpracovanie projektu. V danej analýze je možné porovnávať čas začiatku prevádzky a dobu životnosti jednotlivých variantov. Autor sa z dôvodu opakovania nebude zaoberať bodom 3 a 4.

Ekonomická analýza slúži na zistenie vplyvu na spoločnosť, a či je ekonomicky výhodný. Vplyv na spoločnosť vzhľadom na cieľ znižovania emisií nie je potrebné riešiť. Zároveň autor v kapitole 3.2 vyberal variantu s najmenšími emisiami. Podobne aj ekonomickú výhodnosť nie je nutné rozpracovávať. Z hľadiska budúcich cien palív tento záver autor uviedol v kapitole 3.1. Z hľadiska ekonomickej výhodnosti pri investičných a prevádzkových nákladoch autor danú analýzu rozpracoval v kapitole 3.3. Medzi hlavné riziká, ktoré sa môžu vyskytnúť, môže patriť napr. zvýšenie ceny PHM (riešené v kapitole 3.1), nedostatok paliva, zvýšenie nákladov na údržbu dopravného prostriedku alebo infraštruktúry.

Výsledkom CBA analýzy pre potreby diplomovej práce postačí analýza harmonogramu projektu.

3.4.1 Identifikácia cieľov projektu

Účelom projektu je znížiť ekologickú stopu v mestskej hromadnej doprave v Bratislave, produkovanú na linke 63. Tento cieľ sa dosiahne využitím nízkoemisných vozidiel. Treba však zvážiť, či je daná forma nízkoemisného pohonu ekologická, hlavne na počiatku výroby paliva. Autorovým sekundárnym cieľom je myslieť do budúcnosti a nevybrať druh pohonu s vysokými prevádzkovými nákladmi.

3.4.2 Finančná analýza

Spracovanie finančnej analýzy sa skladá z rôznych bodov. Autor si určil nasledujúce základné kroky potrebné na dosiahnutie cieľa práce (48):

- investičné výdavky,
- harmonogram realizácie projektu,
- obnova investície v referenčnom období.

Autor sa nebude zaoberať všetkými krokmi, jednak kvôli rozsahu práce, a taktiež preto, že to nie je podstatné pre dosiahnutie cieľa práce. Investičné výdavky autor spomenul už pri každom variante a v kapitole 2. V nadväznosti na metodiku CBA sem autor zaradil investičné náklady na nákup dopravných prostriedkov a výstavbu infraštruktúry. Pre zhrnutie ich autor uviedol v tabuľke 21.

Tabuľka 21 Investičné náklady - CBA analýza

Variant	Cena vozidla	Cena infraštruktúry	Investície celkom
Variant 1	14 550 000,00	-	14 550 000,00
Variant 2	10 875 000,00	180 000,00	11 055 000,00
Variant 3	10 875 000,00	186 465,67	11 061 465,67
Variant 4	10 500 000,00	180 000,00	10 680 000,00
Variant 5	10 500 000,00	186 465,67	10 686 465,67
Variant 6	9 017 175,00	2 490 829,67	11 508 004,67
Variant 7	6 142 500,00	-	6 142 500,00

Zdroj: Autor s pomocou (9, 11, 17, 22)

Autor v tabuľke 22 uviedol životnosť subjektov v jednotlivých variantoch. V poslednom stĺpci je uvedený počet, koľkokrát je potreba danú stavbu alebo dopravný prostriedok obnoviť. Autor uviedol iba koľkokrát za referenčné obdobie 30 rokov je potrebná ich výmena alebo generálna oprava. Vypočítať cenu nie je potrebné. Podľa názoru autora je pre porovnanie variantov postačujúce vedieť, koľkokrát sa obnoví.

Z tabuľky 22 vyplýva, že doba na zavedenie trolejbusov je min. 6 rokov bez komplikácií. Tento časový údaj vyplýva zo spomalených konaní a schvaľovaní jednotlivých súčastí projektu (výstavba trolejového vedenia – výberové konania, stavebné povolenie, posudzovanie vplyvov na životné prostredie..., nákup trolejbusov – výberové konanie, schvaľovanie typu trolejbusu,...). Pri ostatných variantoch autor počíta zavedenie do 2 rokov.

Tabuľka 22 Harmonogram realizácie projektu a počet obnov za referenčné obdobie

Var.	Typ investície	Harmonogram realizácie projektu [rok]																Obnova [-]	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		17
1	Dopravný prostriedok																		2
2	Dopravný prostriedok																		2
	Nabíjacie zariadenie																		1
3	Dopravný prostriedok																		2
	Nabíjacia trolej																		0
4	Dopravný prostriedok																		2
	Nabíjacie zariadenie																		1
5	Dopravný prostriedok																		2
	Nabíjacia trolej																		0
6	Dopravný prostriedok																		1
	Trolejové vedenie																		0
7	Dopravný prostriedok																		2

Zdroj: Autor s pomocou (28, 32, 47, 49, 50)

Z tabuľky 22 vyplýva, že doba na zavedenie trolejbusov je min. 6 rokov bez komplikácií. Tento časový údaj vyplýva zo spomalených konaní a schvaľovaní jednotlivých súčastí projektu (výstavba trolejového vedenia – výberové konania, stavebné povolenie, posudzovanie vplyvov na životné prostredie..., nákup trolejbusov – výberové konanie, schvaľovanie typu trolejbusu,...). Pri ostatných variantoch autor počíta zavedenie do 2 rokov.

3.4.3 Výsledok analýzy

Na CBA analýzu sú možné tri pohľady. Pohľad na investičné náklady nájde najlacnejšiu variantu. Tou je CNG variant (číslo 7). Je to logické, keďže DPB je vybavený svojou vlastnou

plničkou. Elektrické varianty majú investičné náklady skoro podobné (elektrobus, trolejbus). Investičné náklady vodíkovej varianty sú najdrahšie.

Druhý pohľad je na rýchlosť zavedenia. V tomto prípade sú výhodné všetky varianty, okrem variantu 6 (trolejbus).

Tretí pohľad je na náklady na budúcu obnovu. Je investične diletantské zainvestovať do infraštruktúry, ktorá má životnosť 20 až 40 rokov a využívať ju iba 10 rokov a potom daný druh pohonu zrušiť. Autor chápe, že v prípade rapídneho navýšenia cien opráv alebo PHM je to prijateľné, ale to je mimoriadna situácia. Z tohto pohľadu je optimálnym variantom trolejbusový variant, a to z dôvodu vyššej životnosti.

CBA analýza ukázala mnoho výhod jednotlivých variantov. Autorov názor je, že elektrobusový variant je optimálny ako z hľadiska nákladov, tak aj doby zavedenia.

3.5 Zhrnutie

Autor spracoval celkom 4 metódy, na základe ktorých sa určil výsledný variant. Prvá spracovaná metóda bol vývoj cien palív. V tejto metóde autor zanalyzoval vo výrobe palív väzbu na potrebné vstupy. Výsledkom tejto analýzy je, že najnižšia cena bude pri elektrických variantoch. Palivá ako vodík a CNG budú vždy závislé na cene elektrickej energie.

Druhou metódou je komparatívna metóda zameraná na emisie. Autor analyzoval všetky emisie vznikajúce ako v prevádzke, tak aj pri výrobe. Najnižšie emisie dosahovali elektrobusy (var. 2 až 5). Je to z dôvodu nízkej spotreby. Autor v tabuľke 23 uviedol peňažné náklady na emisie. Výslednú cenu autor vypočítal s cien emisných povoleniek. Cena emisnej povolenky je $68,15 \text{ €} \cdot \text{t}^{-1} \text{ CO}_2$. Cena je k dátumu 1.5.2024 (51). Optimálnou voľbou je elektrobusový variant.

Tabuľka 23 Cena emisií vodíku

Variant	Ročné emisie [t]	Celková cena [€]
Variant 1 (sivý vodík)	708,04	48 253
Variant 1 (zelený vodík)	652,53	44 470
Variant 2/3	96,64	6 587
Variant 4/5	101,78	6 937
Variant 6	193,27	13 172
Variant 7	1 058,34	72 126

Zdroj: Autor s pomocou (42, 43, 44, 45, 46, 51)

Tretia metóda je multikriteriálna analýza. Autor v spolupráci s DPB navrhol porovnávajúce kritériá, jednotlivé preferencie v Saatyho matici a pomocou metódy WSA

a TOPSIS určil optimálne poradie variantov. Optimálnym variantom podľa oboch metód je elektrobusev variant 5. Na prvých piatich priečkach sa umiestnili iba elektrické varianty.

Posledná metóda je CBA analýza. S touto metódou mal autor najväčší problém, vzhľadom na nedohľadateľnosť jednotného postupu (rôzne postupy). Zavedenie trolejbusovej dopravy predstavuje výzvu, najmä vzhľadom na dlhý proces schvaľovania stavby trolejového vedenia. Treba spomenúť výhody spojené s touto formou dopravy, ako je dlhšia životnosť vozidiel a s tým spojené zníženie nákladov na ich obnovu (z pohľadu na referenčné obdobie).

Autor konzultoval jednotlivé metódy aj s DPB. DPB sa vyjadril, že rozhodujúci faktor je financovanie. Rozhodnutie o výbere variantu závisí od schválenia financovania pomocou kohéznych fondov alebo z rozpočtu DPB a mesta. Náklady na prevádzku sú samozrejme tiež dôležité, ale to si DPB hradí sám. Náklady z hľadiska financovania autor uviedol v tabuľke 24.

Tabuľka 24 Náklady na základe financovania

Varianty	Cena vozidiel [€]		Cena infraštruktúry [€]	
	Bez financovania	15% vlastné financovanie	Bez financovania	15% vlastné financovanie
Variant 1	14 550 000	2 182 500	0	0
Variant 2	10 875 000	1 631 250	180 000	27 000
Variant 3	10 875 000	1 631 250	186 465,67	27 969,85
Variant 4	10 500 000	1 575 000	180 000	27 000
Variant 5	10 500 000	1 575 000	186 465,67	27 969,85
Variant 6	9 017 175	1 352 576	2 490 829,67	373 624,45
Variant 7	6 142 500	921 375	0	0

Zdroj: Autor s pomocou (9, 11, 17, 22)

Všetky tieto metódy sú založené na matematickom princípe výpočtu, ale chýba im logické myslenie. Autor konštatuje, že optimálnou voľbou sú elektrobuse, ktoré dosahujú najnižšie emisie, pre zadané kritéria dosiahli najlepšie výsledky a majú možnosť rýchleho zavedenia. V kapitole 3.4 je optimálnou voľbou variant 5. Autor bude uvažovať o elektrobuse s väčším dojazdom. Rozhodovacou voľbou je v tomto prípade nabíjanie. Oba typy majú výhody aj nevýhody. Investičná cena je skoro rovnaká. Autor si myslí, že optimálnou voľbou je nabíjanie Two-Pole charging. Autor sa tak rozhodol z dôvodu výstavby trolejového vedenia k obratisku Avion (nižšia cena → bez meniarne), väčšej kapacity nabíjajúcich vozidiel, menšieho nabíjacieho prúdu (nezaťažuje akumulátor) a využiteľnosti aj pre trolejbusovú dopravu.

4 ROZPRACOVANIE VYBRANEJ VARIANTY

Autor sa snažil diplomovú prácu navrhnuť tak, aby sa prevádzkové nastavenie linky (interval prestávky...) vôbec nemenili. Preto autor nebude meniť interval linky, cestovné poriadky, obeh vozidiel a ani iné prevádzkové nastavenia linky.

Autor sa v nasledujúcich podkapitolách zameria na nastavenie nabíjania vozidiel na obratisku a zmenu organizácie dopravy v oblasti obratiska.

4.1 Nabíjanie vozidiel

Keďže vozidlá nedisponujú celodenným dojazdom, je potreba nastaviť plán nabíjania. Autor podľa prílohy G vytvoril plán nabíjania pre denné služby počas pracovných dní. Počas pracovných dní je celkom 11 služieb. Služby 8 až 11 sú delené (4). Nájazd pri delených službách sa počíta okolo 212 km (služba 11 cca 126 km). Autor pre tieto služby nevypracoval plán nabíjania. Nabíjať sa budú vo vozovni.

Autor počíta so plne dobitým akumulátorom na začiatku služby. Nabíjací výkon je 150 kW. Nabíjanie je možné iba na obratisku Avion (pre delené služby vozovňa Trnávka). Autor počíta aj s rezervou proti meškaniam. Toto riziko ošetril nabíjaním iba 75 % možného času. Druhým rizikom je degradácia kapacity počas nabíjania. Autor uvedené ošetril stratou energie v podobe 10 % z celkovej sumy energie nabíjania za daný čas. Od spoločnosti SOR bolo autorovi odporučené, aby počítal iba s 80 % využiteľnej energie. Pod 20 % vozidlo už nebude jazdiť z dôvodu ochrany akumulátorov. Autor si určil z dôvodu inej metodiky merania max. hodnotu 30 %. V tabuľke 25 je zobrazený plán nabíjania.

Tabuľka 25 Plán nabíjania elektrobusov počas pracovných dní

Služba	Počet nabíjaní [-]	Čas nabitia	Doba nabitia [min]	Prísun energie [kWh]	Dojazd na konci služby [%]
63011	1	7:59 – 8:37	38	71,25	34
63021	2	1. 8:21 – 9:07 2. 22:43 – 22:57	1. 46 2. 14	1. 86,25 2. 26,25	32
63031	1	8:40 – 9:22	42	126	34
63041	1	7:20 – 7:34	14	42	31
63051	1	14:47 – 15:14	27	50,63	30
63061	1	18:20 – 18:53	33	61,88	31
63071	1	18:30 – 19:10	40	75	33

Zdroj: Autor s pomocou (17, 22)

Autor plán pripravil pomocou softwaru Excel (funkcia Riešiteľ). Tá našla vzhľadom na podmienky optimálny čas na nabíjanie. Služba 63021 je jediná, kde sa musí nabíjať vozidlo dvakrát. Podľa názoru autora je to iba chyba pri uvažovaní rezerv. Autor nespracoval plán nabíjania pre prázdninový režim a víkend z dôvodu nepotrebnosti. Zároveň spracoval najsilnejšiu prevádzku. Cestovný poriadok je skoro podobný vo všetkých troch režimoch, vid' obr. 24.

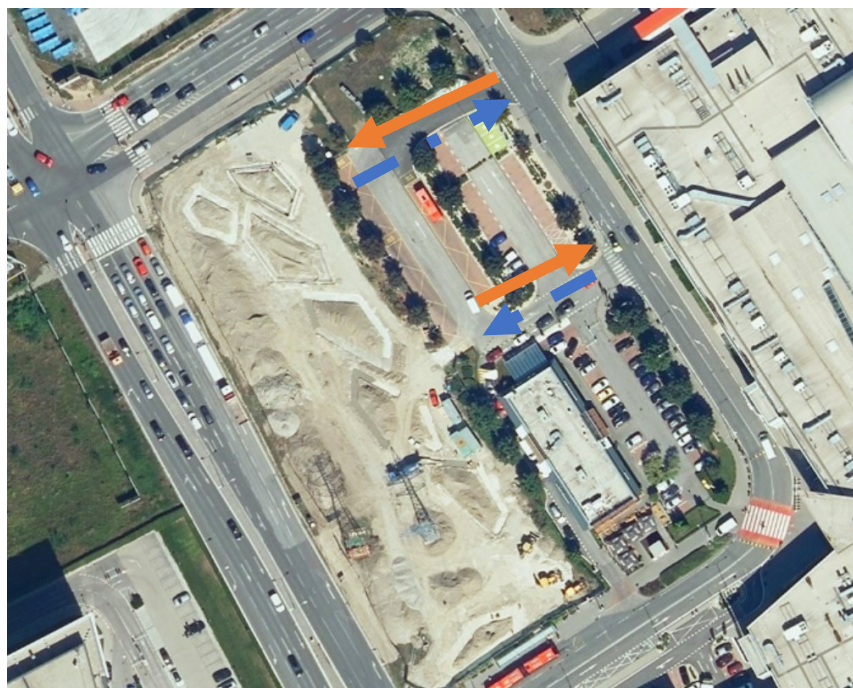
Pracovné dni, školský rok		Pracovné dni, školské prázdniny		Voľné dni	
hod	min	hod	min	hod	min
4	42 57	4	42 57	4	42 57
5	08 18 28 36 44 55	5	10 25 40 54	5	12 27 42 57
6	05 13 20 26 33 40 48 55	6	04 14 24 34 44 54	6	12 26 40 55
7	03 13 24 34 44 54	7	04 14 24 37 52	7	10 25 40 55
8	07 22 37 52	8	07 22 37 52	8	10 25 40 55
9	07 22 37 52	9	07 22 37 52	9	10 25 40 55
10	07 22 37 52	10	07 22 37 52	10	10 25 40 55
11	07 22 37 52	11	07 22 37 52	11	10 25 40 55
12	07 22 37 52	12	07 22 37 52	12	10 25 40 55
13	07 22 37 52	13	07 22 37 52	13	10 25 40 55
14	04 14 24 34 44 54	14	04 14 24 34 44 54	14	10 25 40 55
15	04 14 24 34 44 54	15	04 14 24 34 44 54	15	10 25 40 55
16	04 14 24 34 44 54	16	04 14 24 34 44 54	16	10 25 40 55
17	04 14 24 34 44 54	17	04 14 24 34 44 54	17	10 25 40 55
18	07 22 37 53	18	07 22 37 53	18	10 25 40 55
19	10 25 40 55	19	10 25 40 55	19	10 25 40 55
20	10 25 40 56	20	10 25 40 56	20	10 25 40 56
21	12 27 42 57	21	12 27 42 57	21	12 27 42 57
22	12 27 42 57	22	12 27 42 57	22	12 27 42 57

Obrázok 24 Cestovný poriadok linky 63

Zdroj: (3)

4.2 Zmena organizácie dopravy na obratisku + zmena projektu predĺženia trolejovej trate k obratisku Avion

Dôvod zmeny v projekte je s ohľadom na racionalizáciu projektu. Samozrejme autor nemá informácie o dlhodobých plánoch DPB, ako bude vyzeráť linkové vedenie po dokončení predĺženia trolejovej siete až po obchodné centrum Avion. Autor navrhuje zmenu smeru vjazdu do obratiska. V analýze tejto diplomovej práce autor spomínal problém s kongesciami pri vjazde do obratiska (McDonald's). Kongescie a organizáciu dopravy (modré šípky) je možné vidieť na obr. 25.



Obrázok 25 Organizácia obratiska Avion

Zdroj: Autor s pomocou (2)

Na obr. 26 je zaznačený aj autorov návrh organizácie dopravy pomocou oranžových šípok. V projekte predĺženia by trolejové vedenie kopirovalo trasu linky 63 (cez obratisko). Pre uskutočnenie tohto projektu je nutné postaviť 126 metrov trolejového vedenia. Na plánovanom projekte sa ušetrí 51 metrov trolejového vedenia. Cena dostavby (mínus 51 metrov trolejového vedenia) je 57 685 €. Na obratisku bude potrebné upraviť značenie (pridanie vodorovného dopravného značenia) pri križovatke s McDonald's a úpravu vstupného vjazdu (zaoblenie chodníka, vid' obr. 26).



Obrázok 26 Ukážka vstupu do obratiska Avion

Zdroj: Autor

Výhody zmeny organizácie a trolejové spojenie obratiska sú:

- zníženie rizika, že vozidlá sa nedostanú na nabíjaciu infraštruktúru,

- zníženie psychickej nervozity vodičov MHD, ktorí nemôžu v pokoji čerpať svoju prestávku,
- zníženie rizika kolízie s osobným vozidlom,
- možné predĺženie trolejbusových liniek,

4.3 Zhrnutie

Autor sa v tejto kapitole venoval skôr zmenám v prevádzke, ako v nastavení linky (interval, obeh). Navrhol zmenu organizácie dopravy na obratisku Avion. Zmena môže pomôcť v efektívnosti prejazdu danej oblasti. So zmenou organizácie je spojená aj zmena projektu. Autor navrhol výstavbu trolejového vedenia cez obratisko. Výhodou by mohli byť predĺžené niektoré trolejbusové linky.

V kapitole sa autor zaoberal optimálnym nabíjaním. Vypracoval denný plán nabíjania, ktorý ukázal, že daná prevádzka je reálna. Autor napriek tomu odporúča zapožičanie testovacieho vozidla napr. zo Žiliny (Škoda Perun 26SH). Dané vozidlo je 12 metrové.

ZÁVER

Diplomová práca je zameraná na jednu z najviac diskutovaných tém tejto doby. Každý dopravný podnik sa snaží o preferenciu nízkoemisných vozidiel. Jednotlivé dopravné podniky si do svojej rovnice dosadzujú svoje vlastné hodnoty, resp. parametre alebo vstupy. Autorovi odporučená téma od Dopravného podniku Bratislava sa zaoberala nasadením nízkoemisných vozidiel na linku 63. Autor v prvej kapitole charakterizoval vstupy, ako je spoločnosť Dopravný podnik alebo linka. V danej kapitole sa venoval aj zákonu o podpore ekologických vozidiel. Autor zhodnotil, že daný zákon by bolo potrebné ešte doplniť a aktualizovať.

Druhá kapitola sa zaoberala návrhom variantov riešenia. V dnešnej dobe existujú 3 základné pohony nízkoemisných vozidiel. V mestskej hromadnej doprave sa najviac používa elektrický pohon vo forme trolejbusu alebo elektrobusu. Medzi ďalšie patri vodíkový pohon a CNG pohon.

Jednotlivé pohony a ich návrh infraštruktúry je potreba porovnať a na základe analýzy rozhodnúť o optimálnom variante. Autor využil 4 rozhodovacie metódy. Je treba poznamenať, že vývoj daných pohonov stále pokračuje, a preto je nutné myslieť do budúcnosti. Ceny pohonných hmôt vždy na niečom závisia. Autor zanalyzoval všetky druhy pohonných hmôt a určil ich závislosť na jednotlivých subjektoch. Druhá metóda bola zameraná na porovnanie emisií. Cieľom je znížiť emisie, ktoré sa v meste zmenšia, ale ich výroba a vzniknuté emisie môžu znamenať problém do budúcnosti.

Predposledná metóda sa venovala porovnávacím kritériám. Autor v spolupráci s Dopravným podnikom Bratislava navrhol kritériá, Dopravný podnik dosadil svoje preferencie a autor pomocou saatyho metódy určil váhy kritérií. Metóda TOPSIS a WSA určili optimálny variant. Posledná metóda je CBA analýza. Autor ju použil ako doplnok k výslednému rozhodnutiu.

Autor zvolil ako optimálny variant elektrobuses s väčšou kapacitou akumulátorov. Ako nabíjaciu infraštruktúru zvolil Two-Pole charging. Výber nabíjacej infraštruktúry je zložitá činnosť. Autor je toho názoru, že Dopravný podnik má dosť liniek, kde by sa dal využiť daný systém nabíjania. To je pre Dopravný podnik príležitosť zelektrifikovať viaceré linky za minimálne investičné náklady. Samozrejme, rozvoj napr. v mestskej časti Petržalka s týmto systémom nabíjania by bol veľmi drahou investíciou (ide o mestskú časť bez veľkého rozšírenia trolejbusovej alebo električkovej infraštruktúry).

Autor možnú realizáciu overil v 4. kapitole, kde navrhol denný plán nabíjania elektrobusev.

ZOZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÝCH ZDROJOV

1. *Autobusy na vodík jsou aktuální i na Slovensku*. Online. BUS PORTÁL. 2021. Dostupné z: <https://www.busportal.cz/clanek/autobusy-na-vodik-jsou-aktualni-i-na-slovensku-17492>. [cit. 2024-04-28].
2. Online. Mapy.cz. Dostupné z: <https://sk.mapy.cz/>. [cit. 2024-04-28].
3. *Cestovný poriadok linky 63*. Online. Imhd.sk. 2023, 4.11.2023. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/linka/63/bd807c807f847f85827c8582>. [cit. 2024-04-28].
4. *Služby linky 63*. Online. Imhd.sk. 2023, 4.11.2023. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/sluzby>. [cit. 2024-04-28].
5. EYE, Pi. *Otokar Kent C 18,75 - DPB 3313*. Online. Flickr. 2021. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/pieye/52470820493>. [cit. 2024-04-28].
6. *ZÁKON zo 4. mája 2021 o podpore ekologických vozidiel cestnej dopravy a o zmene a doplnení niektorých zákonov*. Online. SLOV-LEX. 2021, 2.8.2021. Dostupné z: <https://www.slov-lex.sk/pravne-predpisy/SK/ZZ/2021/214/>. [cit. 2024-04-28].
7. *V Bratislave začínajú premávať vodíkové autobusy*. Online. Imhd.sk. 2023, 31.7.2023. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/doc/sk/22687/V-Bratislave-za%C4%8D%C3%ADnaj%C3%BA-prem%C3%A1va%C5%A5-vod%C3%ADkov%C3%A9-autobusy>. [cit. 2024-04-28].
8. *Solaris Urbino 18 hydrogen launched. Up to 140 passengers and 350 km range for the articulated bus*. Online. Sustainable BUS. 2022, 14.6.2022. Dostupné z: <https://www.sustainable-bus.com/fuel-cell-bus/solaris-urbino-18-hydrogen-launched-articulated/>. [cit. 2024-04-28].
9. *Interné materiály spoločnosti Solaris*. 2024.
10. *Solaris uspěl poprvé s vodíkovými kloubovými autobusy*. Online. HINČICA, Libor. Československý Dopravák. 2023, 17.2.2023. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/solaris-uspel-poprve-s-vodikovymi-kloubovymi-autobusy/>. [cit. 2024-04-28].
11. *Dopravný podnik testuje klbový elektrobús Solaris Urbino 18 Electric*. Online. Imhd.sk. 2018, 14.11.2018. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/doc/sk/17975/Dopravny-podnik-testuje-klbovy-elektrobuss-Solaris-Urbino-18-Electric>. [cit. 2024-04-28].
12. *Slow and Fast Charging Solutions for Li-Ion Batteries of Electric Heavy-Duty Vehicles with Fleet Management Strategies*. Online. MDPI. 2021, 25.9.2021. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/19/10639>. [cit. 2024-04-28].

13. *Lithium-ion battery utilization in various modes of e-transportation*. Online. ScienceDirect. 2023, 28.8.2023. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590116823000498#appsec1>. [cit. 2024-04-28].
14. *Inštalácia nabíjacích miest pre pantografové nabíjanie elektrobusev*. Online. Imhd.sk. 2018, 12.12.2018. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/doc/sk/18081/Instalacia-nabijacich-miest-pre-pantografove-nabijanie-elektrobusev>. [cit. 2024-04-28].
15. *DODATOK č. 1 ku Kúpnej zmluve*. Online. ÚVO – Úrad pre verejné obstarávanie. 2023, 23.8.2024. Dostupné z: <https://www.uvo.gov.sk/vyhľadavanie/vyhľadavanie-dokumentov/download/3329042/1563546?cHash=a7c51fae1faf7c39601cef5fada45ed1>. [cit. 2024-04-28].
16. *Zmluva o dielo*. Online. Dopravný podnik Bratislava. 2018. Dostupné z: <https://dpba.blob.core.windows.net/media/Default/Dokumenty/Zverejnen%C3%A9%20dokumenty/Zmluvy/Zmluva%20o%20dielo%20O%2081-2018.pdf>. [cit. 2024-04-28].
17. *Interné materiály spoločnosti Škoda Electric*. 2024.
18. *Elektrobusev Škoda E`CITY 36BB*. Online. In: Dopravní podnik hl. m. Prahy, akciová spoločnosť. 2022. Dostupné z: https://www.dpp.cz/data/photo_gallery/1565/thumbs/2022-17-01-16-10-40-800-800-2-foto4.jpg. [cit. 2024-04-29].
19. *Trolejbusová trať Bulharská – Galvaniho*. Online. BUS PORTÁL. 2021, 8.3.2024. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/doc/sk/20404/20404>. [cit. 2024-04-28].
20. *Interné materiály spoločnosti Elektrizace železnic Praha a.s.* 2024.
21. *Solaris predstavuje svoje najnovšie produkty na Busworld 2023*. Online. Solaris. 2023, 6.10.2023. Dostupné z: <https://www.solarisbus.com/en/press/solaris-showcases-its-latest-products-at-busworld-2023-2050>. [cit. 2024-04-28].
22. *Interné materiály spoločnosti SOR*. 2024.
23. *Hradecký dopravní podnik testuje kloubový elektrobusev SOR NS 18 Electric*. Online. Sdružení dopravních podniků ČR. 2023, 29.3.2023. Dostupné z: <https://www.sdp-cr.cz/systext/41/6/649/hradecky-dopravni-podnik-testuje-kloubovy-elektrobusev-sor-ns-18-Electric/>. [cit. 2024-04-28].
24. *V kladenské MHD vyjel poprvé kloubový elektrobusev SOR NS 18 Electric*. Online. Z dopravy.cz. 2024, 2.2.2024. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/v-kladenske-mhd-vyjel-poprve-kloubovy-elektrobusev-sor-ns-18-Electric-193040/>. [cit. 2024-04-28].
25. *Technická špecifikácia Dodávka nízkopodlažných 18 metrových trolejbusov*. Online. ÚVO – Úrad pre verejné obstarávanie. 2020. Dostupné

- z: <https://www.uvo.gov.sk/vyhľadavanie/vyhľadavanie-dokumentov/download/3206623/1291272?cHash=b054a7bae38f24a5cb431ee6add27356>. [cit. 2024-04-28].
26. *Škoda Group zahajuje typové zkoušky a homologaci trolejbusů pro Vilnius*. Online. Mhd86.cz. 2024, 5.4.2024. Dostupné z: <https://mhd86.cz/2024/04/05/skoda-group-zahajuje-typove-zkousky-a-homologaci-trolejbusu-pro-vilnius/>. [cit. 2024-04-28].
27. *Škoda 27 Tr Solaris*. Online. Imhd.sk. 2024. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/popis-typu-vozidla/1032/%C5%A0koda-27-Tr-Solaris>. [cit. 2024-04-28].
28. *Technická špecifikácia parciálnych trolejbusov - trolejbusov s pomocným pohonom*. Online. ÚVO – Úrad pre verejné obstarávanie. 2020. Dostupné z: <https://crz.gov.sk/data/att/3836183.pdf>. [cit. 2024-04-28].
29. *Čo je CNG*. Online. CNG Slovensko. 2018. Dostupné z: <https://www.cngslovensko.sk/preco-jazdit-na-cng>. [cit. 2024-04-28].
30. *Čo je CNG*. Online. CNG Slovensko. 2018. Dostupné z: <https://www.cngslovensko.sk/clanok/audi-g-tron-audi-e-gas>. [cit. 2024-04-28].
31. *SOR NSG 18*. Online. Imhd.sk. 2023. Dostupné z: <https://imhd.sk/ke/popis-typu-vozidla/1094/SOR-NSG-18>. [cit. 2024-04-28].
32. *Kúpna zmluva SOR NSG 18*. Online. Imhd.sk. 2023, 27.3.2023. Dostupné z: <https://www.crz.gov.sk/data/att/4029009.pdf>. [cit. 2024-04-28].
33. *4801 o zopár chvíľ opustí obratisko Lingova vyrazí na 71tku*. Online. In: Imhd.sk. 2023. Dostupné z: <https://imhd.sk/ke/media/gn/00312171/4801-o-zop%C3%A1r-chv%C3%AD%C4%BE-opust%C3%AD-obratisko-Lingova-vyraz%C3%AD-na-71tku.jpg?1908380554>. [cit. 2024-04-28].
34. *Dodatok správy nezávislého auditora*. Online. Dopravný podnik Bratislava. 2022. Dostupné z: <https://dpba.blob.core.windows.net/media/Default/Dokumenty/V%C3%BDro%C4%8Dn%C3%A1%20spr%C3%A1va%20za%20rok%202022.pdf>. [cit. 2024-04-28].
35. *Priemerné ceny pohonných látok v SR (týždenné)*. Online. STATdat. 26.4.2024. Dostupné z: [http://statdat.statistics.sk/cognosext/cgi-bin/cognos.cgi?b_action=cognosViewer&ui.action=run&ui.object=storeID\(%22i4B1941EAC9154096A2C339E0666EA7E6%22\)&ui.name=Priemern%C3%A9+ceny+pohonn%C3%BDch+l%C3%A1tok+v+SR+\(t%C3%BD%C5%BE denn%C3%A9\)+%5Bsp0207ts%5D&run.outputFormat&run.prompt=true&cv.header=false&ui.backURL=/cognosext/cps4/portlets/common/close.html&run.outputLocale=sk](http://statdat.statistics.sk/cognosext/cgi-bin/cognos.cgi?b_action=cognosViewer&ui.action=run&ui.object=storeID(%22i4B1941EAC9154096A2C339E0666EA7E6%22)&ui.name=Priemern%C3%A9+ceny+pohonn%C3%BDch+l%C3%A1tok+v+SR+(t%C3%BD%C5%BE denn%C3%A9)+%5Bsp0207ts%5D&run.outputFormat&run.prompt=true&cv.header=false&ui.backURL=/cognosext/cps4/portlets/common/close.html&run.outputLocale=sk). [cit. 2024-04-28].

36. *Kúpna zmluva CNG*. Online. DPMK. 2020, 14.12.2020. Dostupné z: https://www.dpmk.sk/sites/default/files/documents/228219/ZML_696_2020.pdf. [cit. 2024-04-28].
37. *Metodický zpravodaj autoškol č. 82/2014 – technické informace*. Online. Autoklub.cz. 2014. Dostupné z: <https://www.autoklub.cz/wp-content/uploads/2018/11/6306-a5.pdf>. [cit. 2024-04-28].
38. *New design, driveline architecture and more safety: what's new in the Solaris Urbino 18*. Online. Sustainable BUS. 2023, 18.12.2023. Dostupné z: <https://www.sustainable-bus.com/news/new-design-driveline-architecture-safety-solaris-urbino-18/>. [cit. 2024-04-28].
39. *New batteries and longest bus so far from Solaris*. Online. Electrive. 2019, 15.2.2022. Dostupné z: <https://www.electrive.com/2019/10/19/new-batteries-and-longest-bus-so-far-from-solaris/>. [cit. 2024-04-28].
40. *2023 PREMIERE: SOLARIS URBINO 18 ELECTRIC*. Online. Solaris. 2023, 30.10.2023. Dostupné z: <https://magazine.solarisbus.com/en/premiere-2023-solaris-urbino-18-Electric/>. [cit. 2024-04-28].
41. *Jaké hodnoty poskytne výpočet emisí?* Online. PTV MAP&Guide. 2023. Dostupné z: https://support.mapandguide.com/client/cs/Content/FAQ/FAQ_emission_data_values.htm. [cit. 2024-04-28].
42. *Interné materiály spoločnosti MESSER TRANDGAS*. 2024.
43. *VÝROBA VODÍKU*. Online. Devinn. 2019, 5.8.2019. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/blog/vyroba-vodiku>. [cit. 2024-04-28].
44. *Produkcia emisií do ovzdušia*. Online. Slovenské Elektrárne. 2024. Dostupné z: <https://www.seas.sk/o-nas/zivotne-prostredie/ochrana-ovzdušia/produkcia-emisii-do-ovzdušia/>. [cit. 2024-04-28].
45. *Interné materiály spoločnosti SPP*. 2024.
46. CHYTIL, I. *Stanovení emisí CO₂ výfukových plynů u CNG, benzinových a naftových vozidel*. Online, Diplomová práce, vedoucí doc. Ing. Petr Bača, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=171373. [cit. 2024-04-28].
47. Bulíček, J. *Systémová analýza a rozhodování (opora s interaktivními prvky)*. Pardubice, 2020.

48. *Metodická príručka k tvorbe analýz nákladov a prínosov (CBA)*. Online. MFSR. 2017. Dostupné z: https://www.mfsr.sk/files/archiv/uhp/3370/76/CBA_1.pdf. [cit. 2024-04-28].
49. ČERNÝ, Pavel. *Jed'te elektrobusem*. Online. Odborne casopisy. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/jedte-elektrobusem--17089>. [cit. 2024-04-28].
50. *Technické požiadavky na nákup vodíkových autobusov*. Online. ÚVO – Úrad pre verejné obstarávanie. 2021. Dostupné z: <https://www.uvo.gov.sk/vyhľadavanie/vyhľadavanie-dokumentov/download/3237001/1355751?cHash=944152e2ab5b17531dd9798ba8f34f74>. [cit. 2024-04-28].
51. *Ušetřeno.cz*. Online. 2024, 1.5.2024. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/energostat/ceny-aktualne/emisni-povolenka>. [cit. 2024-05-01].
52. KAVACKÝ, MATEJ. *História verejnej dopravy v Bratislave pred rokom 1895*. Online. Imhd.sk. 2010, 1.1.2010. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/doc/sk/15413/Historia-verejnej-dopravy-v-Bratislave-pred-rokom-1895>. [cit. 2024-04-28].
53. KAVACKÝ, MATEJ. *História bratislavskej MHD v rokoch 1909 až 1926*. Online. Imhd.sk. 2010, 1.1.2010. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/doc/sk/10031/Hist%C3%B3ria-bratislavskej-MHD-v-rokoch-1909-a%C5%BE-1926>. [cit. 2024-04-28].
54. KAVACKÝ, MATEJ. *História bratislavskej MHD v rokoch 1938 až 1952*. Online. Imhd.sk. 2010, 1.1.2010. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/doc/sk/10033/Hist%C3%B3ria-bratislavskej-MHD-v-rokoch-1938-a%C5%BE-1952>. [cit. 2024-04-28].
55. KAVACKÝ, MATEJ. *História bratislavskej MHD v rokoch 1953 až 1969*. Online. Imhd.sk. 2010, 1.1.2010. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/doc/sk/10034/Hist%C3%B3ria-bratislavskej-MHD-v-rokoch-1953-a%C5%BE-1969>. [cit. 2024-04-28].
56. D3K0. *História bratislavskej MHD v rokoch 1970 až 1979*. Online. Imhd.sk. 2010, 1.1.2010. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/doc/sk/10035/Hist%C3%B3ria-bratislavskej-MHD-v-rokoch-1970-a%C5%BE-1979>. [cit. 2024-04-28].
57. D3K0. *História bratislavskej MHD v rokoch 1980 až 1989*. Online. Imhd.sk. 2010, 1.1.2010. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/doc/sk/10036/Hist%C3%B3ria-bratislavskej-MHD-v-rokoch-1980-a%C5%BE-1989>. [cit. 2024-04-28].
58. D3K0. *História bratislavskej MHD v rokoch 1990 až 1999*. Online. Imhd.sk. 2010, 1.1.2010. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/doc/sk/10037/Hist%C3%B3ria-bratislavskej-MHD-v-rokoch-1990-a%C5%BE-1999>. [cit. 2024-04-28].
59. D3K0 a KAVACKÝ, MATEJ. *História bratislavskej MHD v rokoch 2000 až 2009*. Online. Imhd.sk. 2010, 1.1.2010. Dostupné

- z: <https://imhd.sk/ba/doc/sk/10038/Hist%C3%B3ria-bratislavskej-MHD-v-rokoch-2000-a%C5%BE-2009>. [cit. 2024-04-28].
60. KAVACKÝ, MATEJ. *História bratislavskej MHD v rokoch 2016 až 2020*. Online. Imhd.sk. 2010, 31.12.2020. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/doc/sk/17193/Hist%C3%B3ria-bratislavskej-MHD-v-rokoch-2016-a%C5%BE-2020>. [cit. 2024-04-28].
61. *Evidenční stav vozidiel*. Online. Imhd.sk. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/vozidla/evidencny-stav>. [cit. 2024-04-28].
62. TRAGÁČIK. *Vyleštená #7431 v obratisku Stn. Nové Mesto*. Online. In: Imhd.sk. 2023, 7.10.2023. Dostupné z: <https://imhd.sk/ba/media/gn/00305642/Vyle%C5%A1ten%C3%A1-7431-v-obratisku-Stn-Nov%C3%A9-Mesto.jpg?652486936>. [cit. 2024-04-28].
63. *Zákon o podpoře nízkoemisních vozidel prostřednictvím zadávání veřejných zakázek a veřejných služeb v přepravě cestujících*. Online. Zakony pro lidi. 2022, 30.11.2022. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2022-360>. [cit. 2024-04-28].
64. *Interné materiály spoločnosti SOR vystavený na CzechBUS 2023*. Praha, 2023.
65. *Interné materiály spoločnosti DPB*. 2024.
66. *Mladá veda*. 2016, roč. 2016, č. 6. 2016. ISSN 1339-3189.

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A História DPB	72
Príloha B Charakteristika vozového parku	75
Príloha C Zákon o podpore ekologických vozidiel	79
Príloha D Analýza služieb linky 63 z pohľadu na kilometrový nájazd	81
Príloha E Analýza silných a slabých stránok vodíkového pohonu v MHD.....	83
Príloha F Analýza silných a slabých stránok elektrobusu v MHD.....	86
Príloha G Optimalizácia počtu a času nabíjania elektrobusev na obratisku AVION.....	88
Príloha H Analýza silných a slabých stránok trolejbusu s nezávislým zdrojom energie	92
Príloha I Metaheuristický výber trolejovej nabíjacej troleji v trase zst. Patrónka – Lamač	94
Príloha J Analýza silných a slabých stránok CNG pohonu v MHD.....	98
Príloha K Vývoj cien pohonných hmôt	100
Príloha L Saatyho metóda výpočtu váh	101
Príloha M TOPSIS metóda	103
Príloha N WSA metóda	106
Príloha O Postup dosadzovania preferencií kritérií	108

Príloha A História DPB

Bratislavská MHD je v Bratislave už od nepamäti. Prvé datované údaje sú z roku 1848, kde vznikol prepravný dopyt hlavne medzi úsekmi k železničnej stanici. Doprava bola zabezpečená omnibusmi a nájomnými kočmi (fliakre a drožky). Omnibusy boli premávané medzi stanicou a mestským divadlom. Dopyt po prepravných službách stále rástol a mesto sa rozhodlo pre výstavbu prvej električkovej dráhy. Električkový subsystém začal fungovať od roku 1895. Dopyt stále rástol a mesto pripravovalo ďalší rozvoj, pričom zaujímavosťou je, že v roku 1899 boli zavedené prvé nočné električkové spoje (52).

V ďalších rokoch narazili nové električkové trate na finančný a technologický problém. Preto sa v niektorých prípadoch uvažovalo nad lacnejšími riešeniami, ako je napr. trolejbusový subsystém. V roku 1909 vznikla prvá trolejbusová trať v Bratislave. Trať bola smerovaná na Železničnú studničku a jednalo sa o výletnú linku. Na linkách boli nasadené vozidlá Mercédès-Électrique-Stoll, ktorý je zobrazený na obr. A-1. V nasledujúcich rokoch pokračovala výstavba vedľajších električkových tratí a postupne pokračoval ich rozvoj. V roku 1914 skončila trolejbusová prevádzka z dôvodu finančných a technických problémov. Rozvoj MHD spomalila prvá svetová vojna, kedy sa aj napriek zvyšovaniu prepravného dopytu kvalita znižovala (53).



Obrázok A-1 Replika trolejbusu Mercédès-Électrique-Stoll

Zdroj: Autor

V roku 1927 sa začal v Bratislave prevádzkovať autobusový subsystém. Autobusový subsystém sa začal rýchlo rozširovať, samozrejme aj z dôvodu jednoduchosti a finančnej úspory. Ale aj električkový subsystém sa rozvíjal, kupovali sa nové vozy a predlžovali sa trate. V roku 1941 sa znova v Bratislave obnovil trolejbusový subsystém. V priebehu jedného roka sa otvorili 2 nové trolejbusové trate. Rozvoj dopravy opäť spomalila druhá svetová vojna. V období od roku 1945 do roku 1953 sa opravovala infraštruktúra, pokračoval rozvoj, predlžovali sa trate, prebiehalo zdvojkolajnenie niektorých úsekov (54).

Medzi rokmi 1953 až 1969 postupne vznikali nové linky, prebiehala výstavba novej vozovne Jurajov Dvor, prebiehala obnova, resp. dopĺňanie stavu vozového parku (začiatok dodania ikonických autobusov Škoda 706 RTO, električiek Tatra T3 a trolejbusov Škoda 8Tr) a pokračoval rozvoj jednotlivých subsystémov. Zaujímavým rokom pre trolejbusový subsystém bol rok 1964. V tomto roku sa začalo s obmedzovaním trolejbusovej dopravy z dôvodu nedostatku vozidiel. Niektoré linky boli nahradené autobusovým subsystémom. Dané obdobie by sa dalo popísať ako rozmach autobusového subsystému a stagnácia rozvoja dopravného podniku (zle nastavená tarifa, mesto bez územného plánu, nesúlady výstavby tratí a nedostatok vozidiel) (55).

70. roky 20. storočia by sa dali popísať ako začiatok dodávky ikonických autobusov Karosa ŠM 11, Ikarus 280, rozvoj autobusového subsystému a úpadok trolejbusového subsystému. V oblasti električkového subsystému prebiehali rekonštrukcie a predlžovanie tratí (Karlova Ves), prebiehali dodávky nových vozidiel a bola dostavaná nová vozovňa Krasňany. Medzi rokmi 1970 až 1975 nastala ropná kríza. Zvýšila sa cena za barel ropy z 1 USD na 15 USD. Prudký rozvoj autobusového subsystému táto kríza spomalila. A pri začiatku druhej ropnej krízy, v roku 1979, sa zmenilo smerovanie plánov dopravy pre 80. roky (56).

V 80. rokoch 20. storočia, z dôvodu ropnej krízy (cena za barel ropy až 45 USD), sa začalo plánovať množstvo projektov pre rozvoj elektrickej trakcie. 80. roky priniesli aj ikonické a dnes ešte veľmi známe dodávky trolejbusov Škoda 14Tr, ale aj autobusov Karosa B731. Trolejbusový a električkový subsystém v týchto rokoch napredoval, ale samozrejme kvôli menším nákladom a jednoduchosti taktiež vznikali aj nové autobusové linky. V roku 1985 prebehlo skapacitnenie niektorých trolejbusových liniek, a to vďaka dodaniu kĺbových trolejbusov Sanos. Na konci 80. rokov sa testovali aj kĺbové autobusy, napr. aj na plynový pohon (57).

90. roky 20. storočia sa popisujú v znamení úpadku, rušenia liniek, predvolebných sľubov na výstavbu metra a zvyšovania ceny cestovných lístkov. Jednou z výhod bolo dokončenie niektorých nových trolejbusových trás a dodávok kĺbových vozidiel vo všetkých

prevádzkovaných subsystémoch. V daných rokoch prebiehali aj reorganizácie liniek, prečíslovanie liniek a zavádzanie zastávok na znamenie (58).

Po ťažkom období 90. rokov 20. storočia bolo nasledujúce desaťročie venované rekonštrukciám tratí, modernizácii vozového parku a prerábke niektorých autobusov na plynový pohon. Za celé obdobie sa postavila iba jedna nová trať, a to 2,7 km segregovaná trolejbusová trať v oblasti Dlhé diely. V oblasti autobusového subsystému sa začali prerábať vozidlá Karosa B731/732/741 na pohon CNG. Prebehala aj modernizácia vozového parku, väčšinou formou generálnych opráv. Prebiehal tiež nákup nových vozidiel, nakupovali sa väčšinou krátke minibusy a vozidlá do 12 m. Vo veľkom sa nakupovali aj autobusy na CNG, ako napr. TEDOM a Solaris. Dopravný podnik od Solarisu nakupoval 15 m CNG vozidlá, ktoré slúžili ako náhrada za kĺbové Ikarusy 280. V elektrickej trakkii sa nakupovali nové trolejbusy, napr. v roku 2003 sa kúpil prvý nízkopodlažný trolejbus Škoda 21Tr. V roku 2006 sa nakúpilo 6 trolejbusov Škoda 25Tr s dieselgenerátorovým pohonom pre trať Dlhé diely. Tieto vozy sa využívali aj na autobusové linky z dôvodu lepšej spotreby paliva (59).

V rokoch 2010 sa do dopravy začala miešať politika a Bratislava dostala napríklad až 25 veľkokapacitných autobusov Mercedes-Benz CapaCity, ale aj ďalších 80 kĺbových a ďalších 20 autobusov do dĺžky 12 metrov. V rokoch 2015 nastala veľká obnova vozového parku trolejbusov a električiek. V roku 2016 boli dodané prvé elektrobusesy. Od roku 2018 sa mestská hromadná doprava posúva smerom dopredu, začali sa testovať nové vozidlá, či už hybridné trolejbusy, 24-metrový trolejbus, kĺbový elektrobuses, ale aj autobus na vodík. Jedinou nevýhodou je pomalé stavanie infraštruktúry potrebnej pre rozvoj trolejbusov alebo električiek (60).

Príloha B Charakteristika vozového parku

Vozový park v Bratislave sa delí podľa využitého subsystému. Električkový subsystém je tvorený celkom 206 prevádzkyschopnými vozidlami. Priemerný vek je 22,5 roka. Celkovo 39 % (80 ks) električiek je nízkopodlažných a klimatizovaných. Na obr. B-1 je vidieť najnovší prírastok do vozového parku – voz Škoda 29T3 (61).



Obrázok B-1 Škoda 29T3

Zdroj: (62)

Vozový park trolejbusového subsystému je v počte 180 ks prevádzkyschopných vozov. Z dôvodu terajšieho nákupu nových trolejbusov je priemerný vek iba 6,8 roka. Nízkopodlažných vozidiel je 97 % (175 ks) a klimatizovaných je 94 % (169 ks). Ako autor spomínal, počas písania práce prebiehala dodávka nových trolejbusov a väčšia časť z nich je aj s nezávislým zdrojom energie (akumulátorovým). Presnejšie ide o kĺbové vozidlá Škoda 27TrA (23 ks) a sólo vozidlá SOR TNS 12 (11 ks). K tomuto typu trolejbusov by sa dalo započítať aj 16 ks 24-metrových vozidiel Škoda 38Tr (Škoda-Solaris Trollino 24), ktoré sú vybavené pomocným akumulátorom, ale zatiaľ slúžia v krízových situáciách (61). Na obr. B-2 je znázornený najnovší trolejbus Škoda 27TrA.



Obrázok B-2 Škoda 27TrA

Zdroj: Autor

Najväčšiu časť vozového parku tvorí autobusový subsystém. Celkom je to 517 prevádzkyschopných vozidiel. Priemerný vek je 7,1 roka. Momentálne je nízkopodlažných 100 % všetkých vozidiel a klimatizovaných je 97 % (502 ks) (61). Na obr. B-3 je znázornený najnovší vodíkový autobus Solaris Hydrogen 12.



Obrázok B-3 Solaris Hydrogen 12m

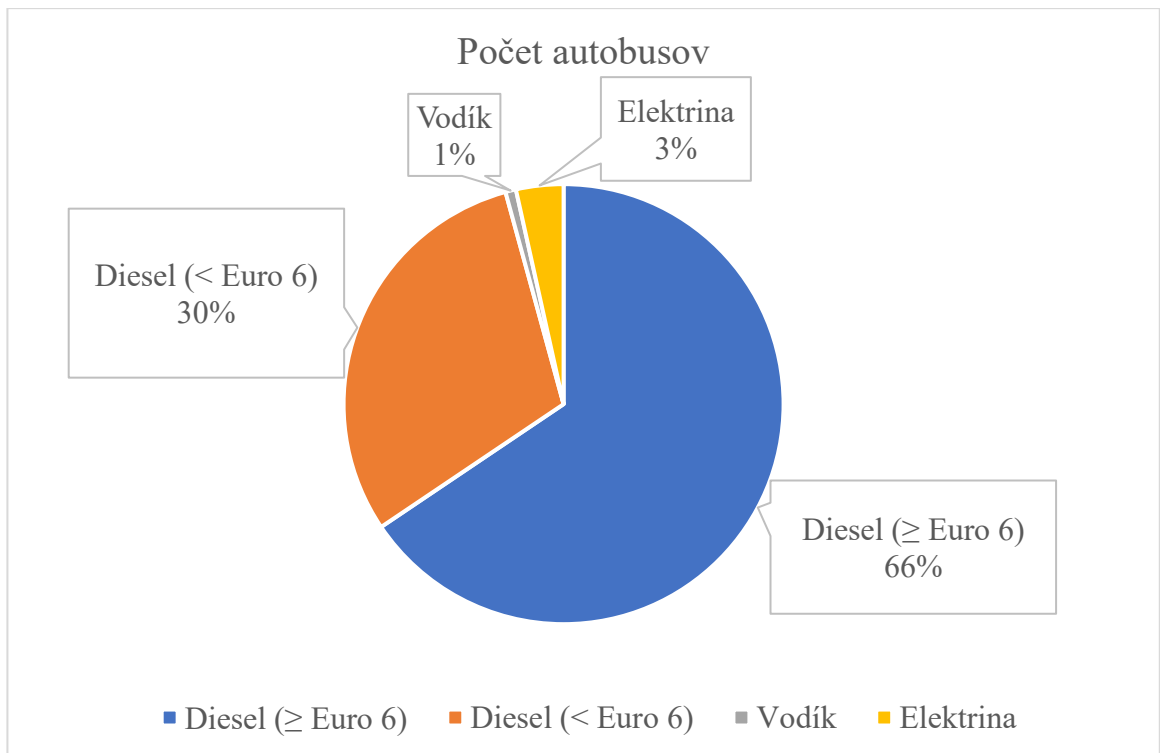
Zdroj: Autor

Zaujímavosťou je využitie druhu pohonu. Na obr. B-4 a v tabuľke B-1 je znázornený graf počtu vozidiel rozdelených podľa druhu pohonu.

Tabuľka B-1 Počet autobusov rozdelených podľa typu pohonu

Druh pohonu	Počet autobusov [ks]
Diesel (\geq Euro 6)	339
Diesel ($<$ Euro 6)	156
Vodík	4
Elektrina	18

Zdroj: Autor s pomocou (61)



Obrázok B-4 Graf čestnosti využitia rôznych pohonnou v autobusovom systéme

Zdroj: Autor s pomocou (61)

Z obrázku B-4 jasne vyplýva preferencia k modernejším vozidlám, pričom napr. Euro normy 4 a 5 sú iba v podiele cca 30 %. Pod normou Euro 6 sa rátajú všetky jej obnovy až po písmeno „e“. Nízkoemisné autobusy sú v malom počte, tvoria ledva 4 % z celkového vozového parku autobusového systému.

Príloha C Zákon o podpore ekologických vozidiel

Dňa 20. júna 2019 prijal Európsky parlament smernicu o podpore ekologických vozidiel v cestnej doprave v záujme nízkoemisnej mobility (Smernica Európskeho parlamentu a Rady 2019/1161). Na Slovensku túto smernicu uvádza do platnosti na území SR zákon č. 214/2021 Z. z. o podpore ekologických vozidiel cestnej dopravy a o zmene a doplnení niektorých zákonov (ďalej len „Zákon č. 214/2021 Z. z.“) (6).

Tento zákon sa vzťahuje na vozidlá kategórie M1, M2, M3, N1, N2 alebo N3 a trolejbus. Oblasti typu ozbrojené sily, sanitné, policajné, poľnohospodárske, pohrebné služby a ďalšie majú výnimku z uvedeného zákona. Takisto výnimku majú vozidlá pracujúce na stavenisku, letisku a v prístave (6).

Zákon č. 214/2021 Z. z. nespomína pojem „nízkoemisné vozidlo“, ale používa pojem „ekologické vozidlo“. Podľa autorovho názoru pojmy evidentne závisia od autorov prekladu. V českom zákone sú nízkoemisné vozidlá, ale v slovenskom sú to ekologické vozidlá. Autor v práci bude naďalej používať pojem „nízkoemisné vozidlo“, ktoré sa viac približuje pojmu „vozidlo s nulovými emisiami“.

Zákon č. 214/2021 Z. z. rozdeľuje vozidlá na 2 druhy. Prvý druh sú nízkoemisné vozidlá a druhý druh sú vozidlá s nulovými emisiami. Parametre nízkoemisných vozidiel sa podľa zákona 214/2021 Z. z. líšia podľa kategórie. Pre potreby práce budú autora zaujímať iba dve kategórie. Prvá kategória je M3. V kategórii M3 je za nízkoemisné vozidlo považované také, ktoré využíva alternatívne palivá (vodík, elektrická energia, CNG,...). Pod pojem „vozidlo s nulovými emisiami“ sa priradujú vozidlá so spaľovacím motorom alebo bez, ktoré emitujú menej ako 1 gram CO₂ na 1 km (alebo 1 g CO₂ na 1 kWh). Druhou kategóriou autorovho záujmu je trolejbus. V tejto kategórii existujú dve možnosti. Prvá možnosť je trolejbus poháňaný len na elektrickú energiu, ktorý v čase, kedy nie je pripojený na elektrickú sieť, využíva hnaciu sústavu s nulovými emisiami. Táto možnosť spadá pod pojem „vozidlo s nulovými emisiami“. Druhou možnosťou sú trolejbusy využívajúce mimo trolejového vedenia hnaciu sústavu s emisiami (dieselgenerátor). Táto možnosť spadá pod kategóriu „nízkoemisné vozidlo“ (6).

Zákon č. 214/2021 Z. z. upravuje minimálny percentuálny podiel ekologických vozidiel (nízkoemisných) pri kúpe, lízingu, kúpe na splátky alebo prenájme. Zákon vymedzuje referenčné obdobia pre vykazovanie minimálneho podielu ekologických vozidiel. Podiel je zistený podľa vzorca A-1 (6).

$$A = (E \cdot C^{-1}) \cdot 100 \quad (\text{A-1})$$

kde:

A = výsledný podiel v percentách [%]

E = počet ekologických vozidiel [-]

C = počet vozidiel, ktoré boli predmetom zmlúv za referenčné obdobie [-]

Zákon č. 214/2021 Z. z. určil dve referenčné obdobia, a to od 2. augusta 2021 do 31. decembra 2025 a druhé od 1. januára 2026 do 31. decembra 2030. V prvom referenčnom období musia dopravné podniky (kategória M3 a trolejbus) dodržať 34% podiel nízkoemisných vozidiel a v druhom až 48 %. Zároveň platí podmienka, že polovica z daného podielu musí byť zrealizovaná vozidlami s nulovými emisiami (6).

Zaujímavosťou je, že v Českej republike podobnú smernicu preberá Zákon č. 360/2022 Sb. o podpore nízkoemisných vozidiel prostredníctvom zadávania verejných zákaziek a verejných služieb v preprave cestujúcich. Referenčné obdobia sú rovnaké, ale podiely sú iné. V prvom referenčnom období musia splniť dopravné podniky (podobná kategória) 41 % a v druhom až 60 % (63).

Autora zaujala nedostatočná podpora električkového subsystemu. V prípade, že dopravné podniky nakúpia nové električky, resp. investujú do rozvoja tratí, nebudú z toho mať žiadnu výhodu. Autor si myslí, že toto je nástroj nepodpory rozvíjania udržateľnej dopravy a je tam zámer iba pre cestnú dopravu. Európska únia sa samozrejme snaží o vytlačenie emisných vozidiel, bohužiaľ sa autor domnieva, že koná neuvážene a neprogresívne. Podľa autora by mala byť väčšia podpora kapacitných subsystemov mestskej hromadnej dopravy (električky, metro,...) a malo by viesť k potlačeniu, resp. zníženiu podielu individuálnej dopravy. Touto myšlienkou by Európska únia získala menšiu viazanosť a spotrebu alternatívnych palív (elektrika, vodík,...). Bohužiaľ sa to nestane, keďže veľa štátov Európskej únie je živených automobilovým priemyslom.

Dopravný podnik v prvom referenčnom období nakúpil 31 kľbových dieselových autobusov a 63 dieselových 12-metrových autobusov. V referenčnom období nakúpil aj 4 vodíkové autobusy a 50 trolejbusov (60). Momentálne sa Dopravný podnik drží na 36 % a normu spĺňa. Podmienku polovice vozidiel s nulovými emisiami rovnako spĺňa.

Príloha D Analýza služieb linky 63 z pohľadu na kilometrový nájazd

Základnou požadovanou podmienkou od dopravcov je, aby nové vozidlo zvládlo celý priebeh linky bez problémov. Autor práce zanalyzoval všetky služby na linke 63 a vypočítal ich kilometrový nájazd. Každá služba má svoju trasu. Niekedy je to z dôvodu inej východzej zastávky, inokedy je to z dôvodu služobného spoja.

Služby sú označené 6-ciferným číslom XXXYYZ. „X“ označuje číslo linky, „Y“ označuje poradie na linke (označenie čísla služby) a posledné „Z“ označuje typ režimu. Typ režimu je pracovný deň; školský rok [1], pracovný deň; prázdniny [4], sobota [2] a nedeľa [3]. V tabuľkách D-1, D-2, D-3 sú zobrazené výsledky celkového nájazdu za 1 deň na jednotlivých službách linky 63.

Tabuľka D-1 Analýza kilometrového nájazdu na linke 63 pri režime 1

Možné trasy jazdy	Pracovný deň, školský rok										
	63011	63021	63031	63041	63051	63061	63071	63081	63091	63101	63111
Avion => Dp Trnávka			1	1	1	1		2	2	2	1
Avion => Lamač	11	11	9	10	10	10	11	5	5	5	3
Bojnická => Dp Trnávka	1	1					1				
Bojnická => Lamač		1		1		1					
Dp Trnávka => Avion		1		1	1	1	1	2	2	2	1
Dp Trnávka => Bojnická		1	1	1		1					
Dp Trnávka => Pod stanicou	1										
Ivanská cesta => Dp Trnávka		1		1		1					
Lamač => Avion	10	10	9	10	11	10	10	5	5	5	3
Lamač => Bojnická	1	1					1				
Lamač => Ivanská cesta		1		1		1					
Pod Stanicou => Avion	1										
Dp Trnávka => Hlavná stanica											
Hlavná stanica => Dp Trnávka											
Suma	337,2	357,5	268,4	329,9	314,4	329,9	327,1	155,2	155,2	155,2	92,4

Zdroj: Autor s pomocou (4)

Tabuľka D-2 Analýza kilometrového nájazdu na linke 63 pri režime 4

Možné trasy jazdy	Pracovný deň, prázdniny										
	63014	63024	63034	63044	63054	63064	63074	63084	63094	63104	63114
Avion => Dp Trnávka		1	1	1	1	1		2	2	2	1
Avion => Lamač	11	11	9	10	11	10	11	4	5	5	3
Bojnická => Dp Trnávka	1	1					1				
Bojnická => Lamač		1	1			1					
Dp Trnávka => Avion			1	1	1	1	1	2	2	2	1
Dp Trnávka => Bojnická		1	1			1					
Dp Trnávka => Pod stanicou	1										
Ivanská cesta => Dp Trnávka		1	1			1					
Lamač => Avion	10	10	9	10	11	10	10	4	5	5	3
Lamač => Bojnická	1	1					1				
Lamač => Ivanská cesta		1	1			1					
Pod Stanicou => Avion	1										
Dp Trnávka => Hlavná stanica											
Hlavná stanica => Dp Trnávka											
Suma	337,2	357,5	300,3	299,6	329,2	329,9	327,1	125,6	155,2	155,2	92,4

Zdroj: Autor s pomocou (4)

Tabuľka D-3 Analýza kilometrového nájazdu na linke 63 pri režime 2 a 3

Možné trasy jazdy	Víkend, Sviatok							
	63012/63013	63022/63023	63032/63033	63042/63043	63052/63053	63062/63063	63072/63073	63512/63513
Avion => Dp Trnávka			1	1	1	1		1
Avion => Lamač	11	11	9	9	11	10	11	2
Bojnická => Dp Trnávka	1	1					1	
Bojnická => Lamač	1	1	1					
Dp Trnávka => Avion	1	1	1	1	1	1		1
Dp Trnávka => Bojnická	1	1						
Dp Trnávka => Pod stanicou							1	
Ivanská cesta => Dp Trnávka	1	1	1					
Lamač => Avion	10	10	9	9	11	10	10	2
Lamač => Bojnická	1	1	1				1	
Lamač => Ivanská cesta	1	1	1					
Pod Stanicou => Avion							1	
Dp Trnávka => Hlavná stanica								4
Hlavná stanica => Dp Trnávka								4
Suma	357,5	357,5	314,4	270,0	329,2	299,6	337,2	62,8

Zdroj: Autor s pomocou (4)

Výsledkom analýzy služieb linky 63 z pohľadu na kilometrový nájazd sú sumy celodenných km z tabuliek D-1, D-2, D-3.

Príloha E Analýza silných a slabých stránok vodíkového pohonu v MHD

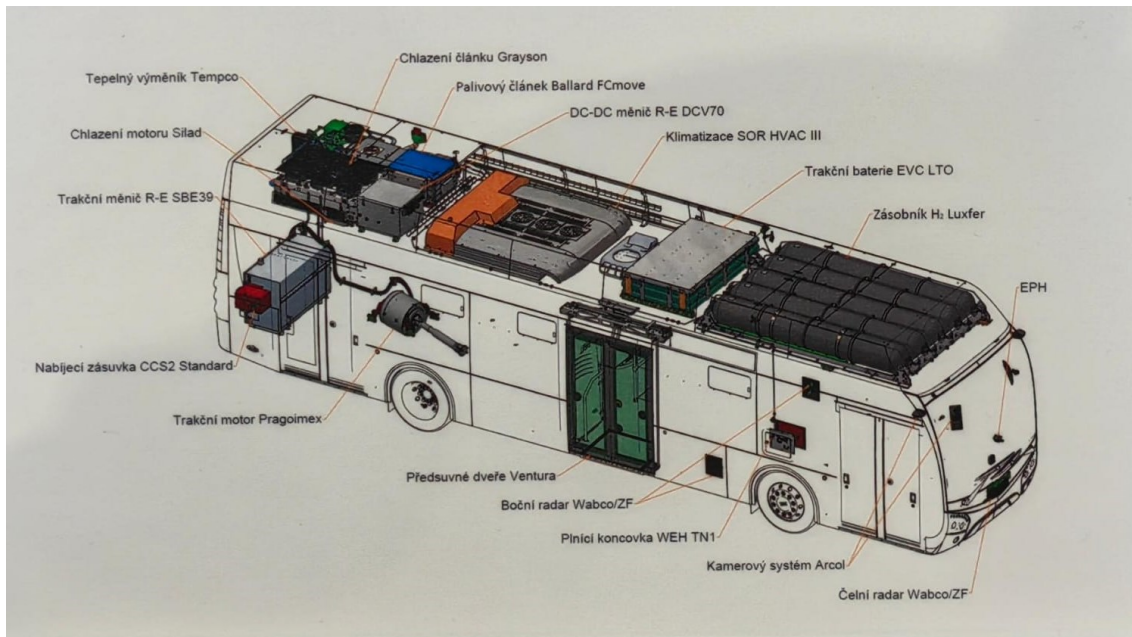
Medzi hlavné silné stránky patria, ako pre každé nízkoemisné vozidlo, výhody zo zákona o podpore ekologických vozidiel, nízkoemisný dopravný prostriedok... Samozrejme treba dodať, že aj každý dopravný prostriedok, oproti drážnym dopravným prostriedkom, má výhodu v znížených nákladoch na zácviak vodičov. Tieto vlastnosti sa budú opakovať pri každom nízkoemisnom dopravnom prostriedku. Analýza silných a slabých stránok je uvedená v tabuľke E-1.

Tabuľka E-1 Analýza silných a slabých stránok vodíkového pohonu

Analýza silných a slabých stránok	<i>Pozitívne vplyvy</i>	<i>Negatívne vplyvy</i>
	Silné stránky	Slabé stránky
<i>Interný pôvod</i>	<ul style="list-style-type: none">- Tichý dopravný prostriedok- Lepšie vlastnosti oproti elektrobusom- Väčší vozový park (väčší odber vodíka) → nižšia cena (zmluvná)	<ul style="list-style-type: none">- Vysoké náklady- Obmedzená infraštruktúra- Nízka efektívnosť výroby vodíka
	Príležitosti	Hrozby
<i>Externý pôvod</i>	<ul style="list-style-type: none">- Rozvoj obnoviteľných zdrojov energie- Investície do podpory vodíkového pohonu	<ul style="list-style-type: none">- Konkurencia od iných technológií- Nestabilita vodíkovej ekonomiky- Logistické procesy

Zdroj: Autor

Medzi silné stránky vodíkových autobusov sa zaraďujú vlastnosti ako nízke emisie hluku alebo lepšie vlastnosti oproti elektrobusom alebo drážnym vozidlám (trolejbusy). Vodíkové autobusy sú v podstate tvorené systémom elektrobusov (trakčné batérie, trakčný menič, elektromotor,...), ale k tomuto systému je pripojená vodíková technológia (zásobníky vodíka, palivový článok, chladenie palivového článku,...). Približnú štruktúru je možné vidieť na obr. E-1. Na obrázku E-1 je zobrazený autobus SOR NSF 12.



Obrázok E-1 Predstavenie fungovania vodíkového pohonu

Zdroj: (64) s úpravou autora

Oproti elektrobussen síce dojazdom nevyklnú, ale vo väčšine je rovnaký. Najväčšia výhoda je vo forme dopĺňania energie. Vodík sa do autobusov dopĺňa oveľa rýchlejšie a efektívnejšie vo vzťahu k dojazdu ako pri dobíjaní elektrobussen. Ďalšia výhoda je korelácia medzi hmotnosťou príslušenstva na pohon a obsaditeľnosťou. Čím vyšší dojazd, tým menšia obsaditeľnosť. Táto korelácia platí iba pri elektrobussen, ale pri vodíkových autobusoch neexistuje až v takej sile.

Hlavnou nevýhodou sú vysoké náklady. Najväčšou položkou je samotné palivo. Cena zatiaľ v oblasti Bratislavy stagnuje/stúpa aj z dôvodu obmedzenej infraštruktúry. Výhodou by bolo vybudovanie vlastnej plničky v areáli DPB, kde by mohla byť znížená cena vodíka. Slabou stránkou je aj nízka efektívnosť výroby vodíka. V súčasnosti môže byť jeho výroba energeticky náročná a často závislá od fosílnych palív, čo môže znížiť celkový environmentálny prínos. Záverom slabých stránok je aj potrebné vybavenie. Vodíkové autobusy musia byť opravované iba v antistatickej dielni. To znamená, že je potreba pre dané vozidlá zrekonštruovať dielne.

Medzi základné príležitosti patrí rozvoj obnoviteľných zdrojov energie. Rastúci dôraz na obnoviteľné zdroje energie môže podporiť vývoj ekologicky udržateľného vodíka, čo by mohlo znížiť negatívne vplyvy vodíkových autobusov. Zároveň sa podporou tohto systému zvýši technologický vývoj. Väčšia konkurencia v segmente prináša nové riešenia negatívnych vlastností. Do ďalšej podpory je možné zahrnúť podporu výroby zeleného vodíka či výstavbu plničiek.

Medzi hrozby autor zaraďuje konkurenciu od iných technológií. Oproti elektrobusom (prevádzkové náklady, dobíjanie na konečných zastávkach), trolejbusom s nezávislým zdrojom energie (dobíjanie počas jazdy pod trolejmi, prevádzkové náklady), ale aj CNG vozidlám (dojazd, prevádzkové náklady) má tento pohon negatívne vlastnosti. Medzi ďalšie hrozby autor zaraďuje nestabilitu vodíkovej ekonomiky, ale aj logistické procesy. Tieto hrozby môžu priamo ovplyvniť ekonomickú udržateľnosť, efektívnosť a konkurencieschopnosť.

Príloha F Analýza silných a slabých stránok elektrobusu v MHD

Autor pre zavedenie elektrobusu do MHD spracoval vstupnú analýzu silných a slabých stránok. Analýza silných a slabých stránok je uvedená v tabuľke F-1.

Tabuľka F-1 Analýza silných a slabých stránok analýza elektrobusu

Analýza silných a slabých stránok	<i>Pozitívne vplyvy</i>	<i>Negatívne vplyvy</i>
	Silné stránky	Slabé stránky
<i>Interný pôvod</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Tichý dopravný prostriedok - Oproti drážnym vozidlám sa nemusia vodiči zaúčať - Možnosť dobíjať elektrickú energiu na končených zastávkach - Menší výkon batérií → menšia hmotnosť → väčšia obsaditeľnosť 	<ul style="list-style-type: none"> - Menší dojazd - Vykurovanie formou dieselgenerátora, resp. zmenšenie dojazdu - Závislosť na nabíjaciach zariadeniach - Riziko technologického zastarania - Zníženie dojazdu v zimných mesiacoch
	Príležitosti	Hrozby
<i>Externý pôvod</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Rozvoj nabíjaciach technológií - Dotácie (Čerpanie fondov na kúpu vozidiel a výstavbu infraštruktúry) 	<ul style="list-style-type: none"> - Životnosť batérií pri opakovanom dobíjaní - Zvýšenie odberu el. energie (zvýšenie emisií z elektrární s neobnoviteľným zdrojom energie) - Vysoké počiatočné náklady - Konkurencia efektívnosti oproti autobusom s vyšším dojazdom

Zdroj: Autor

Medzi hlavné silné stránky patrí vyššia obsaditeľnosť a možnosť nabíjania na miestach na to určených (napr. obratisko). Oproti elektrobusem s vyššou kapacitou má tento typ

elektrobusov väčšiu obsaditeľnosť z dôvodu menšieho zaťaženia akumulátorov. Bohužiaľ to má aj nevýhodu, a to v menšom dojazde. Samozrejme je to výber medzi obsaditeľnosťou a dojazdom. Nevýhodu dojazdu je možné eliminovať sieťou rýchlonabíjačiek.

Medzi ďalšie nevýhody patrí zníženie dojazdu v zimných mesiacoch. Samotné zníženie dojazdu spôsobuje aj vykurovanie vozidla, ale veľkú časť zníži samotná zima. Skúsenosti si autor prevzal zo situácie v Osle z roku 2023. Oslo prevádzkuje rovnaký model, len s väčšou kapacitou akumulátorov. Model má dojazd 250 km (kapacita akumulátorov 520 kWh). V Osle je priemerná teplota 1/-3 (deň/noc) a spôsobila zníženie dojazdu o 30 až 40 % (dojazd okolo 100 km).

Medzi príležitosti patrí rozvoj nabíjacích technológií. Záleží na dopravnom podniku a jeho infraštruktúre. Druhou príležitosťou je využitie dotácií na nákup nových vozidiel, ale aj výstavba potrebnej infraštruktúry.

Hrozby sú rovnaké ako pre každý elektrický dopravný prostriedok. Autor do hrozieb zahrnul zvýšenie spotreby elektrickej energie. Toto priamo nadväzuje na spôsob výroby elektrickej energie. V prípade väčšej preferencie neobnoviteľných zdrojov energií nastáva zvýšenie emisií. Medzi ďalšie hrozby autor zaraďuje vysoké počiatkové náklady (peňažné i časové), ale aj konkurenciu v efektívnosti oproti autobusom so zvýšeným dojazdom (úprava cestovných poriadkov z dôvodu nabíjania, nižší vykurovací výkon,...).

Príloha G Optimalizácia počtu a času nabíjania elektrobusev na obratisku AVION

Optimalizácia nákladov pri elektrobusech má 2 základné parametre. Počet nabíjání a čas nabíjania. Čas nabitia priamo súvisí aj so spotrebou energie. Čím dlhšie sa bude elektrobús nabíjať, tým viac elektrickej energie sa minie. Veľkosť minutej elektrickej energie ovplyvňuje aj výkon nabíjačky.

Počet nabíjání samozrejme priamo koreluje so spotrebou energie, tzn. čím viac sa bude nabíjať, tým väčšia spotreba elektrickej energie bude. Treba poznamenať, že pri opakovaných rýchlonabíjaniach akumulátora sa neobnoví celková kapacita. Tým pádom sa zníži dojazd. Autor tento problém v modeli ošetril 10 % stratou pri nabíjaní.

Modelovanie prebiehalo v programe Microsoft Excel. Základné premenné parametre sú uvedené v tabuľke G-1.

Tabuľka G-1 Základné parametre modelu

Parameter	Jednotka
Spotreba elektrobusev	kWh·km ⁻¹
Cena elektrickej energie	€/kWh
Kapacita akumulátora	kWh
Nabíjací výkon nabíjačky	kW

Zdroj: Autor

Modelovanie prebieha pre každú službu zvlášť. Vzhľadom na rozsiahlosť tabuľky (modelovanie pre celý deň) a s cieľom prehľadnosti a použiteľnosti v diplomovej práci, sa autor rozhodol vložiť iba časť tabuľky. Celková veľkosť by podľa názoru autora neprinesla žiadny úžitok. V tabuľke G-2 je znázornený prvý krok.

Tabuľka G-2 Modelovanie jazdy vozidla na službe 63011

	63011	9				10				11			
		0	15	30	45	0	15	30	45	0	15	30	45
Lamač => Avion	10		29			2					29		
Avion => Lamač	11	13					37			13			
Bojnická => Dp Trnávka	1												
Dp Trnávka => Pod	1												
Lamač => Bojnická	1												
Pod Stanicou => Avion	1												

Zdroj: Autor s pomocou (4)

Autor modeloval trasu na celý deň. V prvom stĺpci tabuľky 2 sú znázornené trasy danej služby. Druhý stĺpec znázorňuje koľkokrát danú trasu vykoná. V ďalších stĺpcoch sú znázornené odchody (zelené podfarbenie) a príchody (modré podfarbenie) na konečné zastávky. Autor v kapitole 2.2.4 určil možné nabíjanie v obratisku Avion. Preto si autor v pomocnej tabuľke G-3 zvýraznil iba príchody na obratisko Avion pomocou čísla 1.

Tabuľka G-3 Označenie príchodov na obratisko Avion

	63011	9				10				11			
		0	15	30	45	0	15	30	45	0	15	30	45
Lamač => Avion	10					1							
Avion => Lamač	11	1								1			
Bojnická => Dp Trnávka	1												
Dp Trnávka => Pod	1												
Lamač => Bojnická	1												
Pod Stanicou => Avion	1												

Zdroj: Autor

Tabuľka G-3 pomáha pri výpočte spotreby. Dôvodom označenia príjazdu na konečnú zastávku číslom 1 je výpočet spotreby.

Zmena v tabuľke G-4 oproti predchádzajúcim tabuľkám je druhý stĺpec. Druhý stĺpec zobrazuje celkovú spotrebu elektrickej energie na jednotlivých trasách. Tabuľka 4 zobrazuje výsledok násobenia stĺpcov jednotlivých časových sektorov v tabuľke G-3 so stĺpcom spotreby v tabuľke G-4.

Tabuľka G-4 Výpočet spotreby elektrickej energie na službe 63011

	63011	9				10				11			
		0	15	30	45	0	15	30	45	0	15	30	45
Lamač => Avion	19,24	0	0	0	0	19,24	0	0	0	0	0	0	0
Avion => Lamač	19,24	19,24	0	0	0	0	0	0	0	19,24	0	0	0
Bojnická => Dp Trnávka	0,2964	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dp Trnávka => Pod stanicou	8,06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lamač => Bojnická	18,59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pod Stanicou => Avion	7,41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Zdroj: Autor

Dôležité je zdôrazniť, že výpočet a celkový model je diskretný, nie spojitý. Spotreba sa odpočíta až po odjazdení celej trasy. Dôvod autorovho rozhodnutia je jednoduchý. Základná

myšlienka tohto modelu je optimalizovať nabíjanie elektrobusu na obratisku Avion, to znamená, že autor nepotrebuje vedieť presný úbytok spotreby v danom čase.

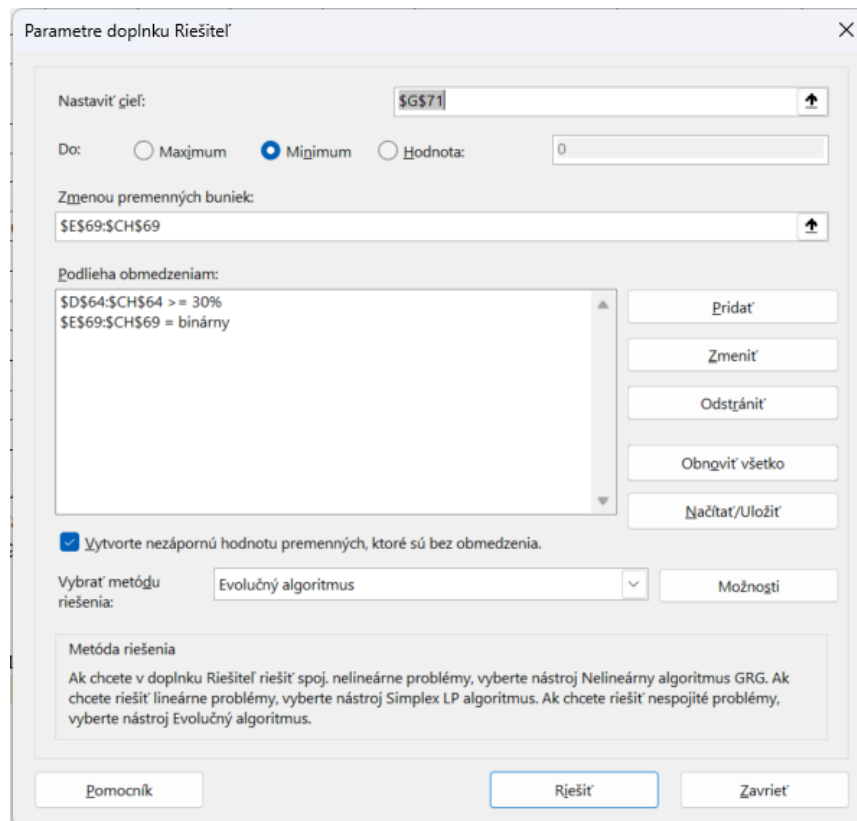
Tabuľka G-5 predstavuje základný súbor parametrov pre excelovú funkciu Riešiteľ. Nachádza sa tam jednotlivý aktuálny stav kapacity akumulátora (závislý na príchode na konečné zastávky). Druhý riadok popisuje približný dojazd na základe kapacity akumulátorov. Tretí riadok popisuje možný čas nabíjania. Podmienkou bol minimálne 10-minútový prestoj. Druhou autorovou podmienkou je nabíjanie 75 % možného času. Túto podmienku stanovil na základe predpokladu možného meškania, nábehu nabíjania a iných možných činiteľov. Druhá podmienka je zahrnutá až vo výpočte nabíjacieho výkonu (o 15 % času znížený). Posledný riadok je pripravený pre binárne premenné, ktoré značia, či sa dané vozidlo v daný okamžik bude nabíjať (1) alebo nie (0).

Tabuľka G-5 Príprava podkladov pre funkciu riešiteľ

	Základné parametre	9				10				11			
		0	15	30	45	0	15	30	45	0	15	30	45
Približná kapacita [kWh]	240	484,40	511,40	511,40	511,40	491,14	491,14	491,14	491,14	470,88	470,88	470,88	470,88
Približný dojazd [km]	120	241,40	254,85	254,85	254,85	244,76	244,76	244,76	244,76	234,66	234,66	234,66	234,66
Približné % akumulátora [%]	100	80,47%	84,95%	84,95%	84,95%	81,59%	81,59%	81,59%	81,59%	78,22%	78,22%	78,22%	78,22%
Možný čas nabíjania [min]	10	16	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0
Výkon nabíjania [kW]	600	30	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0
Nabíjanie [1 - nabíja; 0 - nenabíja]	-	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Drooj: Autor

Riešiteľ je doplnková funkcia v programe Microsoft Excel, ktorá sa používa na vyhľadávanie optimálnej maximálnej/minimálnej hodnoty účelovej funkcie na základe podmienok a dosadení premenných hodnôt. Účelová funkcia (nastaviť cieľ) je optimalizácia počtu nabíjaní. Cieľom je minimalizovať. Za premenné hodnoty, autor dosadí posledný riadok v tabuľke G-5. Jednou z podmienok zadaných do riešiteľa je, že do premenných sa budú zadávať iba binárne čísla. Druhou podmienkou je, že percento elektrobusu nemôže klesnúť pod 30 %. Od spoločnosti SOR sa autor dozvedel, že je potrebné počítať s tým, že vozidlo môže využiť iba 80 % kapacity akumulátora. Zvyšných 20 % slúži ako ochrana akumulátora. Celý vyplnený riešiteľ je zobrazený obr. G-1. Autor by rád dodal, že sa jedná o suboptimálny výsledok.



Obrázok G-1 Parametre riešiteľa

Zdroj: Autor

Príloha H Analýza silných a slabých stránok trolejbusu s nezávislým zdrojom energie

Autor pre trolejbusy s nezávislým zdrojom energie spracoval vstupnú analýzu silných a slabých stránok. Analýza je uvedená v tabuľke H-1.

Tabuľka H-1 Analýza silných a slabých stránok trolejbusov s nezávislým zdrojom energie

Analýza silných a slabých stránok	<i>Pozitívne vplyvy</i>	<i>Negatívne vplyvy</i>
	Silné stránky	Slabé stránky
<i>Interný pôvod</i>	<ul style="list-style-type: none">- Tichý dopravný prostriedok- Jazda mimo trolejové vedenie- Nízke prevádzkové náklady oproti ostatným druhom dopravy.- Nabíjanie počas jazdy	<ul style="list-style-type: none">- Obmedzený dojazd na akumulátor- Závislosť na infraštruktúre- Investičné náklady
	Príležitosti	Hrozby
<i>Externý pôvod</i>	<ul style="list-style-type: none">- Technologický pokrok- Podpora vlády- V prípade vybudovanej trolejbusovej siete jednoduchosť zavedenia	<ul style="list-style-type: none">- Životnosť akumulátorov pri opakovanom dobíjaní- Vysoké počiatkové náklady- Náročnosť údržby

Zdroj: Autor

V oblasti silných stránok figurujú klasické kladné vlastnosti, ako napríklad, že ide o tichý dopravný prostriedok. V tomto prípade autor dopĺňa, že ide o situácie pri jazde na akumulátor alebo po udržiavaných trolejových tratiach. Samozrejme, že hluk pri prejazde cez výhybky je výrazne väčší. Oproti konvenčným trolejbusom je tu výhoda jazdy mimo trolejové vedenie. Druhým veľkým plusom je aj nabíjanie akumulátorov počas jazdy. V prípade elektrobusu je potrebné dané vozidlá odstaviť a nechať nejakú dobu nabíjať, v tomto prípade vozidlo môže jazdiť ako trolejbus a popri tom dobíjať akumulátory. Pod pojmom nízke prevádzkové náklady autor myslel cenu energie, ktorá sa pohybuje $0,18934 \text{ €} \cdot \text{kWh}^{-1}$ (64).

Slabé stránky sú hlavne v oblasti závislosti na infraštruktúre (trolejové vedenie), ktoré priamo súvisí s nízkym dojazdom trolejbusu. Takisto tento systém potrebuje pomerne veľké

investičné náklady, ako napr. priestor vo vozovni na vybalancovanie akumulátorov, natrolejovacie striedky, nabíjacie troleje, a podobne.

Medzi príležitosťami autor začlenil technologický pokrok (väčší záujem → väčší vývoj), možné získanie dotácií od vlády na nákup a výstavbu infraštruktúry. Poslednou príležitosťou, v prípade dostatočne rozvinutej trolejbusového subsystému, je väčšia jednoduchosť zavádzania systému.

Medzi hrozby autor začlenil životnosť akumulátorov, ktoré sa často nabíjajú. Vysoké počiatkové náklady autor už vysvetlil pri slabých stránkach. Takisto autor podotýka nutnosť mať aspoň 60 % trasy linky pod trolejovým vedením. Poslednou hrozbou je náročnosť údržby. Treba si uvedomiť, že trolejbusy sú drážne vozidlá, ktoré vyžadujú jednotlivé schválenia a údržbu. Takisto je potrebná údržba infraštruktúry.

Príloha I Metaheuristický výber trolejovej nabíjacej troleji v trase zst. Patrónka – Lamač

Trasu od zst. Patrónka až po Lamač si autor rozdelil do jednotlivých úsekov podľa kapitoly 1.2.4. Na obr. I-1 sú zvýraznené jednotlivé úseky. Tabuľka I-1 popisuje farebné úseky z obr. I-1.



Obrázok I-1 Rozdelenie úsekov na trase zst. Patrónka – Lamač

Zdroj: Autor s pomocou (2)

Tabuľka I-1 Parametre úsekov na trase zst. Patrónka - Lamač

Parametre úseku	Zelený úsek	Červený úsek	Modrý úsek	Fialový úsek	Žltý úsek
<i>Označenie</i>	5	4	3	2	1
<i>Dĺžka úseku [km]</i>	0,47	1,2	2,53	1,6	1,5
<i>Stúpanie</i>	Áno	Áno	Nie	Áno	Áno
<i>Dostupná meniareň</i>	Nie	Nie	Nie	Áno (Hroboňová)	
<i>Potrebné výhybky (rozjazdové)</i>	Nie	Nie	Nie	Áno (1 ks)	
<i>Potrebné výhybky (zjazdové)</i>	Nie	Nie	Nie	Áno (1 ks)	

Potrebné kríženia trolejového vedenia	Nie	Nie	Nie	Áno (1ks)	Áno (3 ks)
Potrebné natrolejovacie striešky	Áno (2 ks)	Áno (2 ks)	Áno (2 ks)	Áno (1 ks)	
Doplnok na trase	Nabíjanie na konečnej zastávke	-	-	Na trase sa nachádza časť trolejového vedenia	

Zdroj: Autor

Autor stanovil v kapitole 2.6.3 podmienku 60/40 (jazda napájaná pomocou trolejového vedenia/akumulátor). Pri aktuálnom stave je potrebné postaviť min. 2,25 km. Autor usudzuje, že úseky sa budú musieť kombinovať a úseky v kombinácii budú dlhšie ako je minimum. Autor skráti dané úseky podľa posúdenia efektívnosti. Ceny jednotlivých dielov a stavieb autor uviedol v tabuľke I-2. Ceny boli skalkulované po konzultácii so spoločnosťou Elektrizace železnic Praha a.s.

Tabuľka I-2 Ceny trolejového vedenia

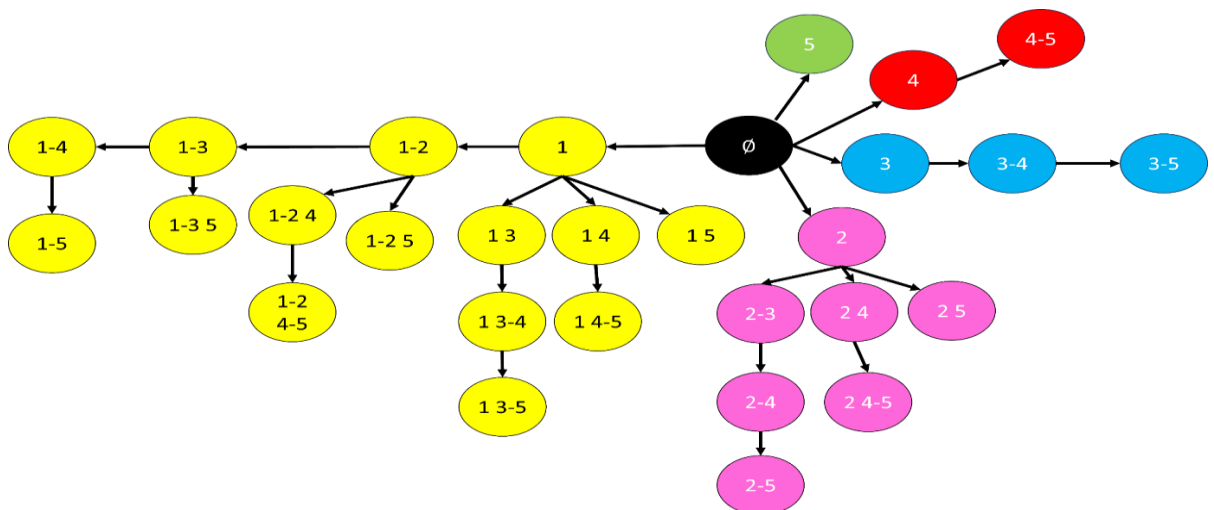
Položka	Cena materiálu [CZK]	Cena práce [CZK]	Výsledná cena [€]
Náklad na výstavbu 1 km trolejového vedenia	19 500 000		769 139,75
Výhybka rozjazdová elektrická (montáž + zariadenie)	387 400	257 660	25 443,14
Zjazdová výhybka	165 600	88 700	10 030,37
Kríženie trolejbus-trolejbus	126 071	85 000	8 325,29
Strieška pre natrolejenie zberačov	18 500	10 000	1 124,13
Kontajnerová meniareň	48 955 000		1 930 935,2

Zdroj: Autor s využitím (20)

Autor zdôrazňuje, že výsledná cena bude odlišná z dôvodu cenovej politiky vo výberových riadeniach. Dané ceny sú projektovo vhodné do štúdií (zámerne vyššie). Samostatná výsledná cena bude závisieť na podrobnej projektovej dokumentácii (druh výkopových prác, povolenia,...). Ceny pre výhybky, križenia a trolejové striedky sú zložené zo zariadenia a montáže. Pre zjazdovú výhybku autor zvolil typ ťahovej výhybky. Ponúkala sa možnosť podvesnej, ale tie sa už nepoužívajú. Pri osobnej konzultácii bolo autorovi odporučené využiť ťahovú výhybku.

Nacenenie kontajnerovej meniarne je menší problém. Cena je veľmi závislá na danej situácii. Cenu ovplyvňuje výkon meniarne, časť rozvodnej energetiky a dĺžka napájacích káblov. Pri projektovej príprave sa vytvára energetický výpočet. V energetickom výpočte sa počíta prevádzka vozidiel (počet vozidiel), výškový profil (stúpanie, klesanie, rovina), počet a medzné vzdialenosti medzi zástavkami (časté rozjazdy, rekuperácia) a ďalšie. Daný energetický výpočet stanoví výkon meniarne a aj počet vývodných káblov (počet izolovaných úsekov). Autor daný energetický výpočet nebude zahrňovať. Dôvod je, že to nie je hlavným predmetom diplomovej práce a dané ceny sú iba projektové. Cena meniarne pochádza z projektu trolejbusovej dopravy v Prahe.

Na riešenie problému si autor zvolil exaktnú metódu prehľadávania stromu podmnožín. Na obr. I-2 je zobrazený strom podmnožín. Jednotlivé množiny predstavujú úseky trate z tabuľky I-1.



Obrázok I-2 Strom podmnožín

Zdroj: Autor

Autor si zvolil 2 podmienky, ktoré daná podmnožina (resp. prienik dvoch množín) spĺňa. Prvou je splnenie podmienky jazdy pod trolejovým vedením. Min. bol nastavený na

60 % (min. postaviť trolejového vedenia v dĺžke 2,25 km). 60 % je myslených v jednom smere jazdy. Druhá podmienka sú minimálne náklady.

Splnenie prvej podmienky nie je problém. Pre splnenie podmienky je potrebná výstavba trolejového vedenia aspoň na min. 2 úsekoch. Podmienka vyradila okrem všetkých samostatných množín aj prienik 1,5; 2,5; 4,5.

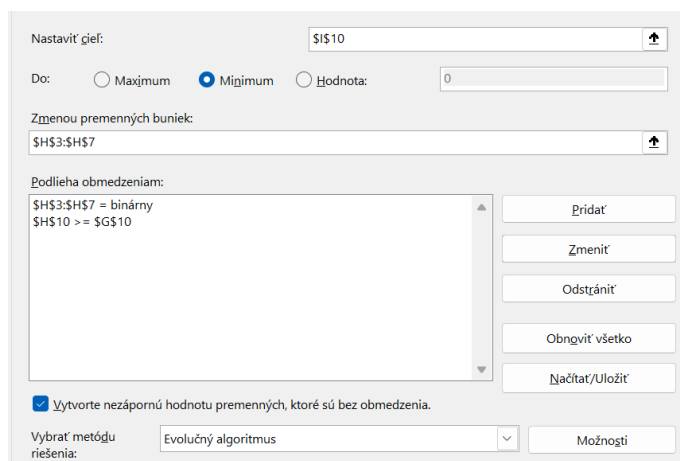
Autor pre splnenie druhej podmienky využil funkciu „riešiteľ“ v Exceli. Výpočtová tabuľka je uvedená v tabuľke I-3.

Tabuľka I-3 Výpočtová tabuľka

Číslo úseku	Vzdialenosť	Cena	Zvolený úsek
1	1,5	1 215 283,14	0
2	1,6	1 275 546,53	0
3	2,53	3 879 107,03	0
4	1,2	2 856 151,16	0
5	0,47	2 292 430,88	0

Zdroj: Autor s pomocou (20)

Stĺpec „zvolený úsek“ je tzv. premenný. Do daného stĺpca Excel vkladá binárne premenné tak, aby sa splnila podmienka 60 % a min. nákladov. Naprogramovaný riešiteľ je zobrazený na obr. I-4.



Obrázok I-3 Naprogramovaný riešiteľ pre druhú podmienku

Zdroj: Autor

Výsledkom je potreba výstavby trolejového vedenia na úsekoch 1 a 2 (výsledná cena by bola 2 490 829,67 €). Výstavba trolejového vedenia by bola vo vzdialenosti 3,1 km. Pre zaujímavosť, v prípade zmeny podmienok, kde by sa všade musela postaviť meniareň, by bolo optimálne postaviť trolejové vedenie na úseku 3 (výsledná cena by bola 3 879 107,03 €).

Príloha J Analýza silných a slabých stránok CNG pohonu v MHD

Autor pre pohon CNG na využitie v oblasti MHD spracoval vstupnú analýzu silných a slabých stránok analýzu. Analýza je uvedená v tabuľke I-1.

Tabuľka J-1 Analýza silných a slabých stránok CNG vozidiel

Analýza silných a slabých stránok	<i>Pozitívne vplyvy</i>	<i>Negatívne vplyvy</i>
	Silné stránky	Slabé stránky
<i>Interný pôvod</i>	<ul style="list-style-type: none">- Ekonomická výhodnosť- Čistá alternatíva- Dostupnosť paliva	<ul style="list-style-type: none">- Investičné náklady- Infraštruktúra
	Príležitosti	Hrozby
<i>Externý pôvod</i>	<ul style="list-style-type: none">- Podpora vlády- Rastúci dopyt- Technologický pokrok	<ul style="list-style-type: none">- Konkurencia od iných alternatív- Vysoké počiatočné náklady- Nestálosť cien CNG- Regulačné zmeny

Zdroj: Autor

Autor zaradil do silných stránok tri výhody. Autor pod pojmom ekonomická výhodnosť uvažoval, že CNG má veľký potenciál byť najlacnejšou alternatívou vo vzťahu k dojazdu na jednu nádrž. CNG autobusy sú čistou alternatívou ku dieselovým autobusom. Majú podobné parametre a zaraďujú sa ako najlepšia alternatíva. Posledná výhoda poukazuje na to, že CNG patrí medzi najdostupnejšie palivá.

Slabá stránka CNG pohonu sa týka skôr nákladového charakteru. Prechod na CNG autobusy si vyžaduje investície do nových vozidiel, poprípade prerobenie starších vozidiel. Druhým nákladom je vybudovanie infraštruktúry na dopĺňanie CNG. Na Slovensku sú cca 3 čerpacie stanice na CNG, takže vo veľa prípadoch je nutné si vybudovať vlastnú čerpaciu stanicu.

Podobne ako aj pri iných druhoch pohonu je možné na tento typ získať dotácie. Z dôvodu platnosti zákona o podpore ekologických vozidiel je pre niektoré podniky táto voľba veľmi výhodná. V oblasti CNG pohonov je pomerne veľká konkurencia (Solaris, SOR, Iveco,...), a preto sa stále prináša technologický pokrok.

Medzi hrozby autor zaraďuje konkurenciu. Veľkú podporu získava elektrický pohon a čím ďalej, tým väčšiu aj vodík. CNG je, podľa autora, aj napriek veľmi dobrým vlastnostiam neviditeľný. Veľkou hrozbou je aj nestálosť cien, ktoré sa každý týždeň menia. Je to aj z toho dôvodu, že CNG sa nevyrába, ale dováža sa. Cena závisí od daných predajcov. Poslednú hrozbu autor pridáva z jedného dôvodu. Zmeny v environmentálnych a emisných reguláciách môžu mať vplyv na atraktivitu CNG autobusov a ich konkurencieschopnosť voči iným alternatívam. Veľmi rýchlo sa môžu vyškrtnúť zo zákona a v prípade väčšej investície do tohto systému bude investícia nevyužitá a prepadnutá.

Príloha K Vývoj cien pohonných hmôt

Vodík je na Slovensku vyrábaný niekoľkými spoločnosťami. Autor sa spojil so spoločnosťou Messer Tatragas, spol. s r. o. Daná spoločnosť dodáva vodík do DPB. Cena vodíka závisí priamo úmerne na cene elektrickej energie (80 % ceny vodíka ovplyvňuje cena elektrickej energie). Zvyšných 20 % sú investičné náklady do zariadení. Keď sa bude uvažovať o cene elektrickej energie (vrátane distribučných poplatkov) 180 €·MWh⁻¹, tak výrobná cena vodíka je 14 až 16 €·kg⁻¹. V prípade, že by klesla cena elektrickej energie na 20 €·MWh⁻¹, tak by výrobná cena bola 3,5 až 5,5 €·kg⁻¹. Priemerná cena na Slovensku podľa Štatistického úradu SR vo februári bola 21,6 €·kg⁻¹ (42).

Autor sa spojil pri zisťovaní analýzy cien CNG so spoločnosťou SPP s.r.o. CNG sa nevyrába, ale kupuje. Hlavnú zmenu cien môže spôsobiť nákupná cena CNG plynu. Medzi ďalšie variabilné faktory patrí cena elektrickej energie. CNG sa stláča a na kompresiu je potrebná elektrická energia. Priemerná cena na Slovensku podľa Štatistického úradu SR vo februári bola 1,601 €·kg⁻¹ (45).

Pre zistenie analýzy cien elektrickej energie autor oslovil spoločnosť Slovenské elektrárne. Cena elektrickej energie závisí od odhadu po dopyte po elektrike, plánovaných nových zdrojov energie, prípadne odstavovaní zdrojov a najmä od cien paliva, ktoré elektrárne používajú. Jedná sa hlavne o cenu plynu, uhlia a emisných povoleniek.

Príloha L Saatyho metóda výpočtu váh

Na výpočet váh existujú rôzne metódy (bodovacia metóda, Fullerova metóda,...). Autor sa ale rozhodol pre Saatyho metódu, a to z dôvodu odporúčenia od vedúceho práce, ale aj kvôli presnosti preferencie medzi kritériami.

Základom Saatyho metódy je Saatyho matica. Jednotlivé preferencie sú subjektívne a každý má vlastné hodnoty. V praxi sa využíva skupina odborníkov a výsledné preferencie tvoria priemer preferencií jednotlivých členov skupiny. Autor oslovil expertov z DPB ohľadom dosadenia preferencií do Saatyho matice. Dosadené preferencie od DPB autor doplnil do tabuľky L-1.

Tabuľka L-1 Saatyho matica

	Prevádzkové náklady na rok	Cena vozidla / životnosť	Cena infraštruktúry / životnosť	Splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.	Využitelnosť dopravného prostriedku alebo infraštruktúry mimo linku 63
Prevádzkové náklady na rok	1	1	1	1/5	7
Cena vozidla / životnosť	1	1	1	1/5	7
Cena infraštruktúry / životnosť	1	1	1	1/5	7
Splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.	5	5	5	1	9
Využitelnosť dopravného prostriedku alebo infraštruktúry mimo linku 63	1/7	1/7	1/7	1/9	1

Zdroj: Autor s pomocou (65)

Výpočet váh je vypočítaný cez geometrický priemer riadku. V programe Excel autor pre všetky riadky využíva funkciu GEOMEAN. Každý priemer každého riadku je vydelený celkovým súčtom všetkých geometrických priemerov. Týmto postupom autorovi vyšli jednotlivé váhy uvedené v tabuľke L-2.

Tabuľka L-2 Výpočet váh zo Saatyho matice

	Geometrický priemer	Váha
Prevádzkové náklady na rok	1,07	<u>0,143</u>
Investičné náklady (10%)	1,07	<u>0,143</u>
Celkové emisie za rok	1,07	<u>0,143</u>
Celkové emisie za rok	4,08	<u>0,545</u>
Celkové emisie za rok	0,20	<u>0,027</u>
Σ	7,49	

Zdroj: Autor s pomocou (47)

Na overenie logického a súvislého priradovania preferencií medzi jednotlivými kritériami autor vykonal konzistenciu matice. Pre Saatyho metódu sa používa index konzistencie. Čím je tento koeficient menší (kladný), tým sú porovnania konzistentnejšie, a tým sú spoľahlivejšie výsledky metód. Výpočet prebieha násobením jednotlivých prvkov Saatyho matice vypočítanou váhou. Týmto spôsobom upravenú maticu autor zobrazil v tabuľke L-3. Zvýraznený riadok v tabuľke 3 charakterizuje súčet všetkých prvkov v matici. Označuje sa aj λ .

Tabuľka L-3 Úprava Saatyho matice

	Prevádzkové náklady na rok	Cena vozidla / životnosť	Cena infraštruktúry / životnosť	Splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.	Využitelnosť dopravného prostriedku alebo infraštruktúry mimo linku 63	Σ
Prevádzkové náklady na rok	0,143	0,143	0,143	0,029	1,000	1,458
Cena vozidla / životnosť	0,143	0,143	0,143	0,029	1,000	1,458
Cena infraštruktúry / životnosť	0,143	0,143	0,143	0,029	1,000	1,458
Splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.	0,714	0,714	0,714	0,143	1,286	3,572
Využitelnosť dopravného prostriedku alebo infraštruktúry mimo linku 63	0,020	0,020	0,020	0,016	0,143	0,220
				Σ		<u>8,165</u>

Zdroj: Autor s pomocou (47)

Koeficient CR (Consistency Ratio) sa vypočíta podľa vzorca L-1. CR autorovi vyšlo 0,706, čo značí, že porovnania sú relatívne konzistentné a dôveryhodné.

$$CR = \frac{(\lambda - n) / (n - 1)}{RI} \quad (L-1)$$

kde:

CR = ukazovateľ konzistencie [-],

λ = hodnota matice [-],

n = počet kritérií [-],

RI = konzistentná náhodná konzistentnosť pre danú veľkosť matice porovnaní (1,12 pre maticu so 4 kritériami (66)) [-].

Príloha M TOPSIS metóda

Autor v kapitole 3.3 používa na rozhodnutie o ideálnej variante metódu TOPSIS. Autor v kapitole 3.3 popísal začiatkový postup práce TOPSIS metódy. Po pretransformovaní matice na maximalizačné kritéria je nutné transformovať prvky tabuľky na normalizačné hodnoty. Túto transformáciu autor vykonal pomocou vzorca M-1 (47). Výsledky sú zobrazené v tabuľke M-1.

$$r_{ij} = \frac{y}{1 \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_{ij})^2}} \quad (\text{M-1})$$

kde:

r_{ij} = prvok normalizovanej kritériálnej matice [-],

y_{ij} = pôvodný prvok [-].

Tabuľka M-1 Transformácia na normalizačné hodnoty

	Prevádzkové náklady na rok	Cena vozidla / životnosť	Cena infraštruktúry / životnosť	Splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.	Využitelnosť dopravného prostriedku alebo infraštruktúry mimo linku 63
Variant 1	0,00	0,00	0,44	0,40	0,19
Variant 2	0,43	0,26	0,38	0,40	0,38
Variant 3	0,43	0,26	0,41	0,40	0,38
Variant 4	0,43	0,28	0,38	0,40	0,38
Variant 5	0,43	0,28	0,41	0,40	0,38
Variant 6	0,39	0,60	0,00	0,40	0,58
Variant 7	0,31	0,59	0,44	0,20	0,19

Zdroj: Autor s pomocou (47)

Ďalším krokom je transformácia prvku matice na váženú kritériálnu maticu. Výpočet prebieha formou násobenia každého prvku príslušnou váhou daného kritéria. Výsledná matica obsahuje minimálnu a maximálnu hodnotu pre každé kritérium. Súbor maximálnych hodnôt tvorí ideálny variant a súbor minimálnych hodnôt bazálny variant. Výsledné varianty sú zobrazené v tabuľke M-2.

Tabuľka M-2 Ideálny a bazálny variant

	Ideálna	Bazálna
Prevádzkové náklady na rok	0,06	0,00
Cena vozidla / životnosť	0,09	0,00
Cena infraštruktúry / životnosť	0,06	0,00
Splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.	0,22	0,11
Využitelnosť dopravného prostriedku alebo infraštruktúry mimo linku 63	0,02	0,01

Zdroj: Autor s pomocou (47)

Ideálny a bazálny variant pomáhajú vypočítať vzdialenosť od ideálneho variantu. Autor počítal vzdialenosť pre ideálny i bazálny variant. Vzdialenosť je určená ako rozdiel medzi

prvkom váženej kriteriálnej matice a odpovedajúcim prvkom v bazálnom alebo ideálnom variante. Výsledky sú zobrazené v tabuľke M-3 a M-4. Výpočet potrebných indexov D_i^+ a D_i^- autor počítal podľa vzorca M-2 (47).

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (w_{ij} - H_j)^2} \quad (M-2)$$

kde:

d_i = vzdialenosti medzi hodnotami alternatív a ideálnym variantom a bazálnym variantom v rámci jednotlivých kritérií [-],

w_{ij} = prvok matice[-],

H_j = prvok ideálnej alebo bazálnej alternatívy

Tabuľka M-3 Výpočet vzdialenosti od ideálneho variantu

	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Variant 6	Variant 7
Prevádzkové náklady na rok	-0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,02
Cena vozidla / životnosť	-0,09	-0,05	-0,05	-0,04	-0,04	0,00	0,00
Cena infraštruktúry / životnosť	0,00	-0,01	0,00	-0,01	0,00	-0,06	0,00
Splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,11
Využitelnosť dopravného prostriedku alebo infraštruktúry mimo linku 63	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	-0,01
D_i^+	0,106	0,050	0,049	0,046	0,046	0,063	0,111

Zdroj: Autor s pomocou (47)

Tabuľka M-4 Výpočet vzdialenosti od bazálneho variantu

	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Variant 6	Variant 7
Prevádzkové náklady na rok	0,00	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,04
Cena vozidla / životnosť	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,09	0,08
Cena infraštruktúry / životnosť	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06	0,00	0,06
Splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,00
Využitelnosť dopravného prostriedku alebo infraštruktúry mimo linku 63	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
D_i^-	0,126	0,141	0,143	0,142	0,144	0,150	0,114

Zdroj: Autor s pomocou (47)

Posledným krokom je výpočet relatívneho ukazovateľa. Väčšia hodnota relatívneho ukazovateľa určuje výhodnejšiu alternatívu. Relatívny ukazovateľ sa vypočíta podľa vzorca M-3 (47).

$$c = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (M-3)$$

kde:

c = relatívny ukazovateľ [-],

d_i^+ = vzdialenosti medzi hodnotami alternatív a ideálnym variantom [-],

d_i^- = vzdialenosti medzi hodnotami alternatív a bazálnym variantom [-].

Výsledky autor uviedol v tabuľke M-4. V tabuľke M-4 sú zelenou farbou vyznačené prvé tri najvýhodnejšie varianty.

Tabuľka M-5 Výpočet relatívneho ukazovateľa

Varianty riešenia	Di+	Di-	Relatívny ukazovateľ
Variant 1	0,106	0,126	0,542
Variant 2	0,050	0,141	0,739
Variant 3	0,049	0,143	0,744
Variant 4	0,046	0,142	0,755
Variant 5	0,046	0,144	0,760
Variant 6	0,063	0,150	0,703
Variant 7	0,111	0,114	0,508

Zdroj: Autor s pomocou (47)

Príloha N WSA metóda

Autor v kapitole 3.3 používa na rozhodnutie o ideálnom variante metódu WSA. V kapitole 3.3 autor popísal začiatkový postup práce WSA metódy. Podobne ako pri TOPSIS metóde sa musia transformovať minimalizačné kritéria na maximalizačné. Po transformácii autor vyhľadal ideálny a bazálny variant. Hodnotu ideálneho variantu autor dohľadal ako maximum v riadku daného kritéria. Bazálny sa získa podobným postupom, ale je hľadané minimum. Výsledky ideálneho a bazálneho variantu autor zobrazil v tabuľke N-1.

Tabuľka N-1 Ideálny a bazálny variant WSA metódy

	Ideálna	Bazálna
Prevádzkové náklady na rok	2 239 872,17	0,00
Cena vozidla / životnosť	853 855,00	0,00
Cena infraštruktúry / životnosť	62 270,74	0,00
Splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.	2,00	1,00
Využitelnosť dopravného prostriedku alebo infraštruktúry mimo linku 63	3,00	1,00

Zdroj: Autor s pomocou (47)

Varianty sa získavali pre transformáciu matice na normalizovanú kritériálnu maticu. Normalizovaná matica sa vypočíta podľa vzorca N-1 (47). Dosiahnuté výsledky autor zaznamenal v tabuľke N-2.

$$r_{ij} = \frac{y_{ij} - D_j}{H_j - D_j} \quad (N-1)$$

kde:

r_{ij} = prvok normalizovanej kritériálnej matice [-],

y_{ij} = prvok pôvodnej kritériálnej matice [-],

H/D_j = prvok ideálnej alebo bazálnej alternatívy.

Tabuľka N-2 Kritériálna matica

Váha		Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Variant 6	Variant 7
0.14	Prevádzkové náklady na rok	0,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,89	0,72
0.14	Cena vozidla / životnosť	0,00	0,43	0,43	0,47	0,47	1,00	0,98
0.14	Cena infraštruktúry / životnosť	1,00	0,86	0,93	0,86	0,93	0,00	1,00
0.54	Splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
0.03	Využitelnosť dopravného prostriedku alebo infraštruktúry mimo linku 63	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	0,00

Zdroj: Autor s pomocou (47)

Posledným krokom je výpočet relatívneho ukazovateľa. Výpočet prebieha ako skalárny súčet váh a všetkých prvkov normalizovanej kritériálnej matice (pre dané kritérium). Celkové výsledky WSA analýzy autor uviedol v tabuľke N-3.

Tabuľka N-3 Výsledky WSA

Variant 1	0,687
Variant 2	0,885
Variant 3	0,895
Variant 4	0,890
Variant 5	0,900
Variant 6	0,842
Variant 7	0,386

Zdroj: Autor s pomocou (47)

Príloha O Postup dosadzovania preferencií kritérií

Elektronická príloha je nahratá na priloženom CD s názvom príloha O.

Jednotlivé preferencie sa zadávajú do matice do vyznačených zelených políčok, vid' obr. O-1. Vždy sa zadáva hlavná preferencia a jej prevrátená hodnota. Napr. kritérium „Cena vozidla / životnosť“ je absolútne preferované pred kritériom „Cena infraštruktúry / životnosť“. Zadávať sa bude hodnota „9“ a „1/9“. Hodnota 9 sa zapíše do riadku „Cena vozidla / životnosť“ stĺpca „Cena infraštruktúry / životnosť“. V priloženom Excel súbore je to pozícia E6. Prevrátená hodnota „1/9“ sa zapíše do riadku „Cena infraštruktúry / životnosť“ a stĺpca „Cena vozidla / životnosť“. V priloženom Excel súbore je to pozícia D7.

	Prevádzkové náklady na rok	Cena vozidla / životnosť	Cena infraštruktúry / životnosť	Splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.	Využitelnosť dopravného prostriedku alebo infraštruktúry mimo linku 63
Prevádzkové náklady na rok	1				
Cena vozidla / životnosť		1			
Cena infraštruktúry / životnosť			1		
Splnenie podmienok zákona 214/2021 Z. z.				1	
Využitelnosť dopravného prostriedku alebo infraštruktúry mimo linku 63					1

Význam zadaných hodnôt	
Hodnota s_{ij}	Vzťah kritérií i a j
1	i a j sú rovnocenné
3	i je slabšie preferované pred j
5	i je silno preferované pred j
7	i je veľmi silno preferované pred j
9	i je absolútne preferované pred j

Obrázok O-1 Saatyho matica

Zdroj: Autor s pomocou (47)