



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

OPERAČNÍ VÝZKUM V ODPADOVÉM HOSPODÁŘSTVÍ: TECHNIKY REDUKCE ÚLOHY

OPERATIONAL RESEARCH IN WASTE MANAGEMENT: TASK REDUCTION TECHNIQUES

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS SUMMARY

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. František Janošák

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

BRNO 2022

ABSTRAKT

Dizertační práce se zaměřuje na redukci výpočtové náročnosti vybraných úloh modelování v odpadovém hospodářství. Jsou zde představeny dva typy optimalizačních úloh. Nejdříve je pozornost směřována na úlohy dopravní. Současné výpočetní nástroje přistupují k dopravním úlohám pomocí značně zjednodušených modelů přepravních nákladů. V práci je představen přesnější model dopravních nákladů a je popsána jeho implementaci do dlouhodobě úspěšně využívaného unikátního výpočtového nástroje NERUDA. Vylepšený nástroj poskytuje přesnější výsledky, vyžaduje však více času na výpočet. V práci jsou popsány případy, kdy původní nástroj přináší výsledky srovnatelné s vylepšeným, a je navržena metodika, jak ještě před výpočtem zjistit, zda je nutné použití přesnějších modelů.

Práce pokračuje oblastí scénářových přístupů, které mají na výstupu výrazné množství výsledků dopravních úloh. Analýza výsledků a jejich zpracování je klíčové pro další využití v praxi. Aktuálně využívaný nástroj pracuje se scénáři budoucího vývoje, kde se pro každý scénář počítá jeden výsledek. Výsledky jsou v mnoha případech velmi podobné, ale jejich kvantita brání následné analýze. V práci je popsán přístup založený na shlukové analýze, která seskupuje výsledky do kategorií a výrazně tak napomáhá jejich zpracování a interpretaci.

Druhý typ úloh je reprezentován optimalizací koncepčního návrhu spolupráce zařízení na energetické využití odpadu a teplárny. Obecně se jedná o stochastickou úlohu celočíselného nelineárního programování. V práci je představen inovativní přístup, který na základě dekompozice úlohy a jejího paralelního řešení umožňuje dosahovat vyšší přesnosti, aniž by docházelo k výraznému prodloužení výpočtového času.

KLÍČOVÁ SLOVA

Odpadové hospodářství; energetické využití odpadu; svoz odpadu; redukční techniky; optimalizační nástroj NERUDA

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANOŠŤÁK, František. Operační výzkum v odpadovém hospodářství: Techniky redukce úlohy. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137806>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Martin Pavlas.

ABSTRACT

The dissertation thesis focuses on reducing the computational complexity of selected modeling tasks in waste management. Two types of optimization tasks are presented here. First, attention is focused on transport tasks. Current computational tools approach transport tasks with greatly simplified models of transportation costs. The thesis presents a more accurate model of transportation costs and describes its implementation into the long-term successfully used unique tool NERUDA. The improved tool provides more accurate results, however, requires more computational time. The work describes cases where the original tool provides results comparable to the improved one and suggests the methodology of how to identify, even before the calculation, whether the use of optimized models is necessary.

The work continues in the area of scenario approaches, which output a significant amount of transport task results. Analysis of the results and their processing is key for further use in practice. The currently used tool works with future development scenarios where one result is calculated for each scenario. In many cases, the results are very similar, but their quantity hinders the following analysis. The thesis describes an approach based on cluster analysis, which groups the results into categories and thereby significantly aids their processing and interpretation.

The second type of tasks is represented by the optimization of the conceptual design of a waste-to-energy plant and a heating plant cooperation. In general, this is a stochastic mixed integer non-linear programming problem. The work presents an innovative approach, which, based on the decomposition of the task and its parallel solution, allows working with higher accuracy without a significant increase in computing time.

KEYWORDS

Waste management; waste-to-energy; waste collection; reduction techniques; NERUDA optimization tool

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Martina Pavlase, Ph. D. na základě vlastních poznatků získaných při studiu a konzultací s odborníky a že jsem veškeré literární a obrazové prameny správně a úplně citoval.

V Brně dne 10.8. 2022

.....

Ing. František Janošťák

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto řediteli Ústavu procesního inženýrství prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc., dr. h. c. za vytvoření podmínek pro doktorské studium, školiteli doc. Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D. za náměty i připomínky při zpracování této práce a v neposlední řadě školiteli-specialistovi Ing. Radovanu Šomplákovi, Ph.D., který mi byl velkou oporou a bez něhož by tato práce nikdy nemohla být dotažena do finální podoby.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	7
1 ÚVOD	10
1.1 LEGISLATIVA	10
2 CÍLE PRÁCE	13
3 REDUKČNÍ TECHNIKY VÝPOČTOVÝCH NÁSTROJŮ DOPRAVNÍCH ÚLOH	14
3.1 REDUKCE DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY	14
3.1.1 <i>Současný stav výpočtového nástroje NERUDA</i>	14
3.1.2 <i>Modelová dopravní úloha</i>	17
3.2 REDUKCE VÝPOČTOVÝCH SCÉNÁŘŮ	20
3.2.1 <i>Modelová úloha</i>	22
4 ZEVO INTEGROVANÉ V RÁMCI TEPLÁRENSKÉHO ZDROJE: OPTIMALIZACE KONCEPČNÍHO NÁVRHU	26
4.1 FINANČNÍ HODNOCENÍ PROJEKTU	26
4.2 MODEL ZEVO	26
4.2.1 <i>Parní kotel</i>	27
4.2.2 <i>Turbíny</i>	27
4.2.3 <i>Poptávka po teple</i>	28
4.2.4 <i>Náklady, příjmy a investice</i>	29
4.3 VÝPOČET CENY TEPLA	31
4.4 TECHNICKO-EKONOMICKÝ MODEL KOOPERACE ZAŘÍZENÍ	33
4.5 HODNOCENÍ RIZIK POTENCIÁLNÍHO PROJEKTU	34
4.6 SCÉNÁŘE	34
5 ZÁVĚR	35
6 LITERATURA	37

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Význam
CAO	Cluster Analysis Onderlička
CF	Cash Flow
CZT	System centrálního zásobování teplem
FPD	Fond pracovní doby
GAMS	Generalized Algebraic Modeling System
HN	Here-and-Now
IRR	Internal Rate of Return
JKN	Jednotkové konstantní náklady
JVN	Jednotkové variabilní náklady
KON	Model NERUDA s konstantními přepravními náklady
KOT	Kondenzační odběrová turbína
LHV	Lower Heating Value
MBÚ	Zařízení pro mechanicko-biologickou úpravu
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
PCA	Principal Component Analysis
PREKL	Překladiště
PT	Protitlaká turbína
TG	Turbogenerátor
ÚPI	Ústav procesního inženýrství
VAR	Model NERUDA s variabilními přepravními náklady
WS	Wait-and-See
ZLF	Zařízení na zpracování lehké frakce

SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Jednotky	Význam
A	%	poměr produkce odpadu ku kapacitě zpracovatelských zařízení
a_1, a_2	-	regresní koeficienty modelu turbogenerátoru
B	%	hustota zpracovatelských zařízení v síti
b	-	počet zaměstnanců ZEVO
C	-	charakteristický poměr scénáře
CF	Kč/r	peněžní tok
$D, s(F)$	Kč/t	směrodatná odchylka korigované ceny na bráně
d^D	GJ/d	poptávka po teple na bázi denního průměru
d^M	GJ/d	poptávka po teple na bázi měsíčního průměru
d_{fikt}	MW _t	zmařená pára ze ZEVO
e^{TG}	MW _e	výkon turbogenerátorů
e_{max}^{TG}	MW _e	maximální výkon turbogenerátoru
e_{min}^{TG}	MW _e	minimální výkon turbogenerátoru
F	Kč/t	korigovaná cena na bráně
FPD	h/r	roční fond pracovní doby
G	t/r	kapacita zpracovatelského zařízení
h_{max}^{TG}	t/h, MW _t	maximální hlnost turbín
h_{min}^{TG}	t/h, MW _t	minimální hlnost turbín
I	Kč	Investice ZEVO
I_B	Kč	investice parního kotle ZEVO
I_C	Kč	další investice ZEVO
I_S	Kč	investice do bunkru pro skladování odpadu v ZEVO
I_{TG}	Kč	investice do turbogenerátorů ZEVO
IRR	%	vnitřní výnosové procento
LHV	GJ/t	výhřevnost odpadu
N	r	počet let životnosti projektu
n	Kč/r	roční náklady ZEVO
n_{dif}	Kč/r	rozdíl nákladů na provoz kotlů a příjmů za prodanou elektrickou energii
$n_{dif, fikt}$	Kč/r	variabilní náklady ZEVO při kooperaci s dalším tepelným zařízením
n_{emp}	Kč/r	náklady na zaměstnance ZEVO
n_{gas}	Kč/r	náklady na zemní plyn pro ZEVO
n_{chem}	Kč/r	roční náklady na chemikálie pro správnou funkci systému čištění spalin ZEVO
n_{mai}	Kč/r	náklady na údržbu ZEVO
n_{rei}	Kč/r	reinvestice v průběhu životnosti ZEVO
n_{rez}	Kč/r	náklady spojené s nakládáním reziduí ze ZEVO
n_{tep}	Kč/r	náklady spojené s provozem kotlů
n_{var}	Kč/r	variabilní náklady spojené s výrobou tepla a elektřiny
n_{var}^{TEP}	Kč/r	n_{var} tepelného zařízení bez ZEVO
n_{var}^{ZEVO}	Kč/r	n_{var} tepelného zařízení a ZEVO
n_{wat}	Kč/r	náklady na vodu pro ZEVO

Symbol	Jednotky	Význam
p	Kč/r	roční příjmy ZEVO
p_{el}	Kč/r	příjmy za prodej el. Energie
p_{fikt}	Kč/r	fiktivní příjmy ZEVO
p_{heat}	Kč/r	příjmy za prodej tepla
p_{scr}	Kč/r	příjmy za prodej železného šrotu
p_{was}	Kč/r	příjmy za zpracování odpadu
R^*	-	koeficienty odlišnosti modelů KON a VAR
v^B	GJ/h, MW _t	tepelný výkon kotle
v_{in}^{TG}	MW _t	tepelný výkon v podobě páry vstupující do turbíny
x	t/h	množství odpadu dávkovaného na spalovací rošt (zpracovaný odpad)
x_{max}	t/h	maximální množství odpadu dávkovaného na spalovací rošt
X^{KON}, X^{VAR}	t	množství odpadu dovezené do zpracovatelského zařízení při použití modelu KON, resp. VAR
y^B, y^{TG}	MW _t	tepelný tok páry z kotlů, turbín
y^{HU}	MW _t	poptávka po teple
y_{ZEVO}^{HU}	MW _t	poptávka po teple uspokojená ZEVO
Z_{min}	%	minimální procentuální zatížení turbogenerátoru
Z	Kč	n_{dif} za celou životnost projektu ZEVO

Symbol	Jednotky	Význam
μ^{TG}, μ^B	%	elektromechanická účinnost turbogenerátorů, účinnost kotlů
φ	Kč/t	cena na bráně zpracovatelského zařízení
φ_{el}	Kč/MWh _e	cena elektrické energie
φ_{fikt}	Kč/MWh _t	fiktivní cena tepla za zmařenou páru
φ_{gas}	Kč/m ³	cena za jednotku zemního plynu
φ_{heat}	Kč/MWh _t	výkupní cena tepla
$\varphi_{heat,ZEVO}$	Kč/MWh _t	cena tepla na patě ZEVO
φ_{chem}	Kč/t odpadu	cena za chemikálie vztažená na množství odpadu
φ_{rez}	Kč/t	cena za nakládání s rezidui
φ_{scr}	Kč/t	výkupní cena železného šrotu
φ_{tep}	Kč/MW _t	náklady na provoz jednoho kotle
φ_{tra}	Kč/(t.km)	cena za dopravu
φ_{was}	Kč/t	cena na bráně ZEVO
φ_{wat}	Kč/m ³	cena za jednotku vody
φ_{zam}	-	průměrná mzda zaměstnance ZEVO
ω	%	porovnávací proměnná poptávek po teple

1 ÚVOD

V současné době se celý svět potýká s problematikou nakládání odpadu. Pozornost se zde soustředí především na jednu jeho složku, a to komunální odpad (KO). Dle (Hoornweg, 2012) v roce 2002 žilo ve městech přibližně 2,9 miliardy obyvatel, jejichž měrná produkce KO činila 233 kg odpadu na osobu ročně. Celkově se jednalo o 680 mil. tun za rok. Pro rok 2012 tato publikace odhadla nárůst obyvatel ve městech přibližně na 3 miliardy a produkci na 438 kg/osoba/r. Dle databáze statistického úřadu Evropské unie (Municipal waste statistics, 2021) vyprodukoval za rok 2020 průměrný obyvatele Evropy ročně 505 kg a obyvatel České republiky 507 kg KO. Do roku 2025 se předpokládá nárůst obyvatel měst na 4,3 miliardy a také produkce KO na 518 kg/os./r, což by znamenalo přibližně 2,2 bilionů tun KO za jeden rok. Takové množství je, při zachování současného nakládání s odpadem, dlouhodobě neudržitelné a je potřeba přijmout určitá opatření k řešení této situace, ať už z pohledu zátěže na životní prostředí, tak i potenciálu KO poskytovat zdroj jako druhotná surovina. Jedná se o závažnou problematiku, k jejímuž řešení nelze přistupovat pouze formou jednotlivců či zájmových skupin, ale je potřeba ji řešit komplexně, což vyžaduje její zahrnutí do legislativy jednotlivých členských uskupení.

1.1 Legislativa

Mnoho cílů, které jsou ukotveny v české legislativě, zabývající se odpadovým hospodářstvím (OH), vychází z několika evropských směrnic. Jedná se o 1999/31/ES o skládkách odpadu, 2008/98/ES o odpadech a 94/62/ES o obalech a obalových materiálech. Všechny vyjmenované dokumenty byly v roce 2018 upraveny směrnicemi 2018/850, 2018/851, 2018/852. Většina změn se zaměřovala na minimalizaci skládkování, maximální stabilizaci skládkovaného odpadu, větší důraz na recyklaci využitelných složek apod. Původní definice hierarchie nakládání s odpadem však zůstala stejná.

Hierarchie nakládání s odpadem

Hierarchii nakládání s odpadem je zakotvena ve směrnici 2008/98/ES, viz obr. 1. Už z její definice je vidět snaha evropské komise docílit minimalizace vzniku nového odpadu.



Obr. 1 Hierarchie nakládání s odpadem (Janošák, 2014)

Bohužel vzniku odpadu nelze předcházet absolutně, opětovné využití má také pouze omezené pole působnosti a recyklace je v současné době vhodná jen pro některé materiály, ať už z důvodu nevhodné technologie nebo finanční náročnosti (Bohm, 2010). Pro značnou část odpadu je proto recyklace či opětovné využití v současné době neuskutečnitelné. Zbývá tedy energetické využití a skládkování. Pro dodržování této hierarchie slouží tzv. cíle OH, které jsou ukotveny v české legislativě.

Cíle OH

Jednotlivé cíle OH stanovuje v České republice (ČR) zákon 541/2020 Sb. o odpadech. Tento zákon v mnoha věcech vychází ze zmiňované směrnice 2008/98/ES. Především je to vidět na příloze č. 1 tohoto zákona, kde je stanoveno pět konkrétních cílů. První tři body jsou téměř přímým přepisem z evropských směrnic, pouze doplněné o území ČR, na kterém se KO vyprodukuje. Poslední dva již evropská legislativa nespecifikuje a jde pouze o cíle stanovené ČR.

„1. Zvýšit do roku 2025 úroveň přípravy k opětovnému použití a úroveň recyklace komunálních odpadů nejméně na 55 % celkové hmotnosti komunálních odpadů vyprodukovaných na území České republiky.

2. Zvýšit do roku 2030 úroveň přípravy k opětovnému použití a úroveň recyklace komunálních odpadů nejméně na 60 % celkové hmotnosti komunálních odpadů vyprodukovaných na území České republiky.

3. Zvýšit do roku 2035 úroveň přípravy k opětovnému použití a úroveň recyklace komunálních odpadů nejméně na 65 % celkové hmotnosti komunálních odpadů vyprodukovaných na území České republiky.

4. Odstraňovat uložením na skládku v roce 2035 a v letech následujících nejvýše 10 % z celkové hmotnosti komunálních odpadů vyprodukovaných na území České republiky.

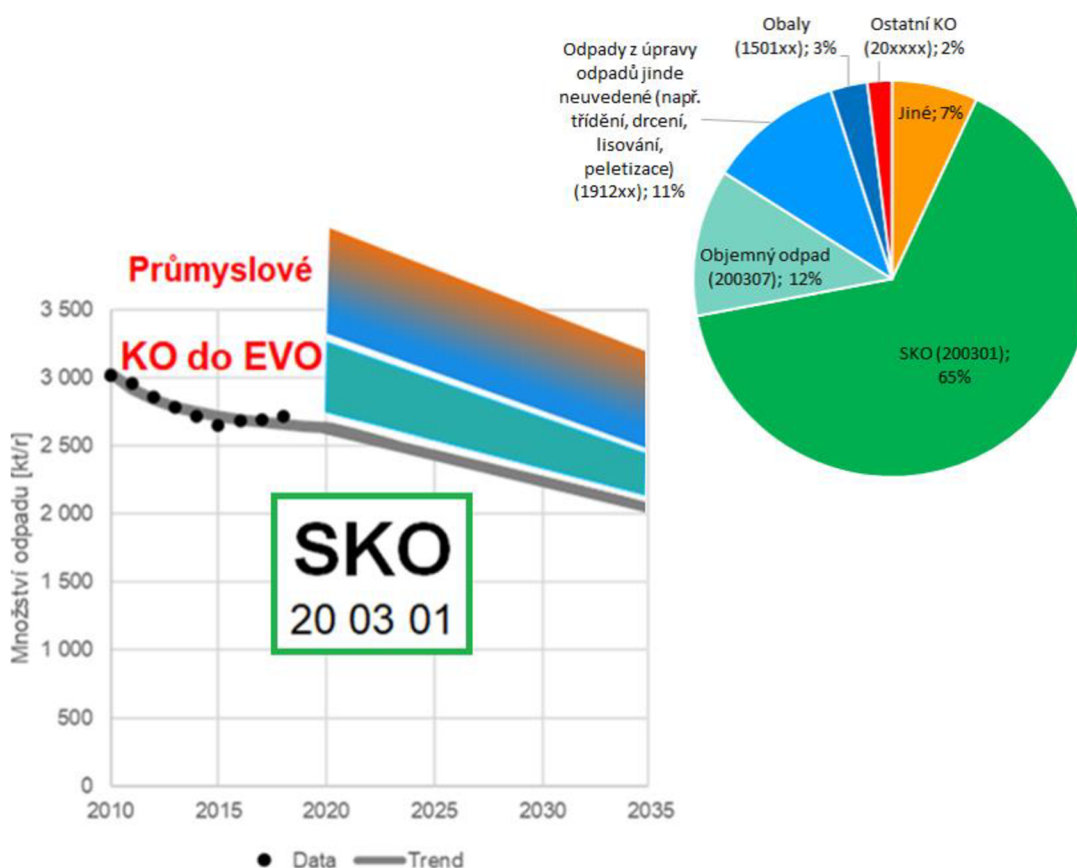
*5. Energeticky využívat v roce 2035 a v letech následujících nejvýše 25 % z celkové hmotnosti komunálních odpadů vyprodukovaných na území České republiky; toto množství může být navýšeno o rozdíl mezi množstvím komunálních odpadů, které mohly být uloženy na skládku podle bodu 4, a skutečným množstvím komunálních odpadů uložených na skládku.“
(zákon 541/2020 Sb.)*

Pro účely této práce jsou důležité právě poslední dva body. Bod 4 totiž popisuje výrazné omezení skládkování a bod 5 povoluje energetické využívání KO až do 25 % hmotnosti.

ZEVO na území ČR

Zařízení spalující odpad lze nazývat ZEVO za předpokladu, že splňuje tři podmínky, které stanovuje zákon 540/2020 Sb. Jedná se o stanovení minimální energetické účinnosti, zákaz spalování odpadu vhodného k recyklaci či opětovnému využití a podmínku, že spalovaný odpad nepotřebuje po zapálení podpurné palivo. Na území ČR se v současnosti nachází čtyři zařízení, které spalují KO a splňují podmínky pro ZEVO. Nejstarší z nich byla postavena v Brně už v roce 1905 a nyní dokáže zpracovat až 248 kt odpadu ročně (tzv. kapacita zařízení). Další zařízení vzniklo v Praze v roce 1997, které po rekonstrukci, která byla dokončena na přelomu loňského a letošního roku navýšila kapacitu na celých 330 kt/r. Jedná se o maximální dovolenou hodnotu dle současného povolení (tzv. provozní kapacita). Technická kapacita zařízení je však 394 kt/r. V roce 2019 byla podána EIA (Environmental Impact Assessment), která požaduje sjednocení provozní a technické kapacity (Sjednocení technické a roční kapacity ZEVO Malešice, 2019), k čemuž Ministerstvo životního prostředí (MŽP) podalo souhlasné stanovisko. Předpokládaný přechod ke kapacitě 394 kt/r je plánován na rok 2023. Od roku 1999 je v provozu zařízení v Liberci s kapacitou 96 kt/r. Nejnovější zařízení se nachází na okraji Plzně, které bylo vybudováno v roce 2016. Jeho současná kapacita činí 95 kt/r. Celkově má tedy ČR k dispozici zpracovatelskou kapacitu 833 kt/r.

Celková produkce KO se pohybuje pod hranicí 6 000 kt ročně. To znamená, že pokud se hodnota příliš nezmění, tak bude možnost energeticky využívat necelých 1 500 kt/r. Už dle starších odhadů (Šomplák, 2015) kapacita českých ZEVO nebude ani zdaleka stačit na pokrytí produkce spalitelných odpadů, která by mohla být energeticky využita. To potvrzuje i aktuální prognóza provedená na Ústavu procesního inženýrství (ÚPI), která odhaduje aktuální celkový potenciál hmotnostního toku pro ZEVO na 3 500 až 4 000 kt/r, viz obr. 2 (vlevo). Zároveň zachycuje i predikci tohoto toku do budoucna. Oproti tomu koláčový graf na obr. 2 (vpravo) zobrazuje podíl jednotlivých typů odpadu, které se na hmotnostním toku podílejí. Pod zkratkou SKO je zde myšlen směsný komunální odpad, což je zbytkový KO po vytřídění využitelných a nebezpečných složek. Zároveň do něj nespadá ani objemný odpad.



Obr. 2 Produkce (vlevo) a složení (vpravo) spalitelných materiálů nevyužitých odpadů

Z pohledu nutnosti zpracování odpadu významně nahrává aktuální i budoucí situace výstavbě nových ZEVO, ale stále se tyto projekty potýkají se spoustou komplikací. Není to jen částečně odmítavý postoj veřejnosti, ale samozřejmě je to i otázka ekonomické stability, kterou si takový projekt musí zajistit.

Nynější světové dění (pandemie COVID-19, válka na Ukrajině) značně přispívá k nejistotám, jak v politických rozhodnutích, tak hlavně v cenách surovin i energií. Ceny elektřiny i zemního plynu se v posledním roce výrazně zvýšily. Obě tyto komodity ovlivňují i cenu tepla. Příjmy ZEVO z prodeje tepla a elektřiny mohou činit kolem 30 % z celkových výnosů. Pokud se ceny udrží na současných hladinách, případně ještě porostou, bude to pro ekonomiku ZEVO výrazné plus. Výhodnější podmínky by také mohla přinést změna poplatku za uložení využitelného odpadu (kam spadá i KO) na skládku, jejíž hodnota by měla do roku 2029 vzrůst z 800 Kč/t na 1850 Kč/t.

Z dosavadních dat je tedy zřejmé, že výstavba nových ZEVO je vhodným krokem kupředu, která zároveň pomůže naplnit evropské legislativní normy OH. Projekty nových ZEVO jsou velmi složité a pro jejich uskutečnění je potřeba velká datová základna, která prokáže, zda vybrané místo výstavby je vhodné, ať už z hlediska odbytu vyrobené energie, tak množství odpadu v jejím okolí. Nástroje, které potřebná data přinesou, jsou dlouhodobě vyvíjeny na ÚPI. Tato práce je využívá, modifikuje a přináší nové aktualizace tak, aby byly co nejlépe použitelné na popsanou problematiku a přinesly přínos nejen pro potenciálního investora výstavby ZEVO, ale i producenty, provozovatele již postavených ZEVO apod.

Cílem dizertační práce je rozšíření existujících výpočtových nástrojů založených na pokročilých matematických metodách, které by představovaly podpůrný nástroj pro řešení komplexních úloh v OH. Konkrétně se jedná o svozové úlohy, strategické rozhodování při výstavbě nových ZEVO, případně řízení provozu existujících teplárenských zařízení v kombinaci se ZEVO, kde je potřeba zohlednit ekonomická i technologická hlediska a počítat s nejistotou budoucího vývoje.

2 CÍLE PRÁCE

Prvním tématem dizertační práce je řešení dopravních úloh. Kvalitní přístup k řešení těchto úloh poskytuje nástroj NERUDA vyvinutý na ÚPI. Po jeho důkladné diagnostice se i on dopouští některých zjednodušení, aby dosáhl řešitelnosti v přijatelném čase.

Jedním z nich je konstantní cena za dopravu odpadu mezi producenty a zpracovateli. Aby bylo možné zajistit přesnější výsledky, je potřeba implementovat do nástroje NERUDA přesnější modely dopravních nákladů, což vyžaduje změnu výpočtové sítě. Tato práce navrhuje modelovou úlohu, která porovnává původní výpočet nástroje NERUDA s novým výpočtem (presnější modely dopravních nákladů). Poukazuje na rozdíly ve výsledcích a modeluje případy, ve kterých k nim dochází.

V další části se práce zaměřuje na analýzu výsledků. Protože se NERUDA zabývá scénářovým přístupem, je potřeba analyzovat tolik výsledků, kolik je stanoveno scénářů. Jejich počet se může pohybovat v řádech stovek až tisíců. Vzhledem k počtu proměnných, jakých může úloha nabývat, je velmi těžké výsledky interpretovat. Tato práce přichází s řešením využívajícím shlukovou analýzu. Veškeré výsledky se podle zvolených kritérií rozřadí do několika skupin a může se pracovat pouze s reprezentanty těchto skupin, kterých je podstatně méně. Práce představuje modelovou úlohu, na které je představeno krok po kroku využití nástroje CAO (Cluster Analysis Onderlička) při shlukové analýze a v závěru této problematiky poukazuje na jistá omezení v případě jejího využití. Prvotní verze nástroje CAO byla vyvinuta v rámci práce (Onderlička, 2016).

Druhým tématem dizertační práce je vývoj optimalizačních modelů pro podporu strategického plánování (výstavby) a řízení provozu nových i stávajících ZEVO. Jedná se o vysoce nákladné projekty, a proto není jednoduchá jejich realizace. Potenciální investor vstupuje do rizika a požaduje odpovídající zhodnocení. Prvním úkolem v této práci je popis provozu ZEVO včetně zahrnutí ekonomických hledisek s cílem vypočítat zhodnocení celého projektu za dobu jeho životnosti. Doba životnosti se běžně pohybuje mezi 10 až 30 lety. Za takovou dobu se mohou podmínky provozu a stav trhu značně měnit a je potřeba tyto změny brát v úvahu. Tzn. je třeba jejich zahrnutí do optimalizačních modelů. Základem je vytvoření podrobného technickoekonomického modelu ZEVO, který po implementaci do vhodného softwaru bude řešitelný. Dosavadní výzkum na tomto poli problematiky ukázal, že úloha je značně rozsáhlá a bez vhodného zjednodušení či upravení úlohy bude pravděpodobně neřešitelná, případně nebude řešitelná v přijatelném čase. Někteří autoři zmínění v rešerši možná zjednodušení úlohy představili. Z pohledu výsledků se jeví tato zjednodušení jako příliš radikální.

Tato práce si stanovila za cíl vytvořit model, který bude pracovat s minimem zjednodušení, bude řešitelný a zároveň bude dostatečně průhledný z pohledu výsledků. Modelová úloha ve formě MINLP se rozdělí na menší dílčí úlohy MILP, které jsou mnohem snadněji řešitelné, a navíc se budou dávat řešit paralelně, čímž dojde k výraznému snížení výpočtové náročnosti. Celkový výsledek je pak definován sjednocením řešení dílčích úloh.

Ze dvou představených témat vyplývají konkrétní dílčí cíle práce:

- Analýza současných modelů na ÚPI
 - lokační a svozové modely (NERUDA, PIGEON) (kap. 3),
 - technickoekonomický model ZEVO a dalšího tepelného zdroje (kap. 4).
- Následná úprava modelu a implementace do vhodného softwaru.
- Nalezení přístupů vhodných k jejich řešení.

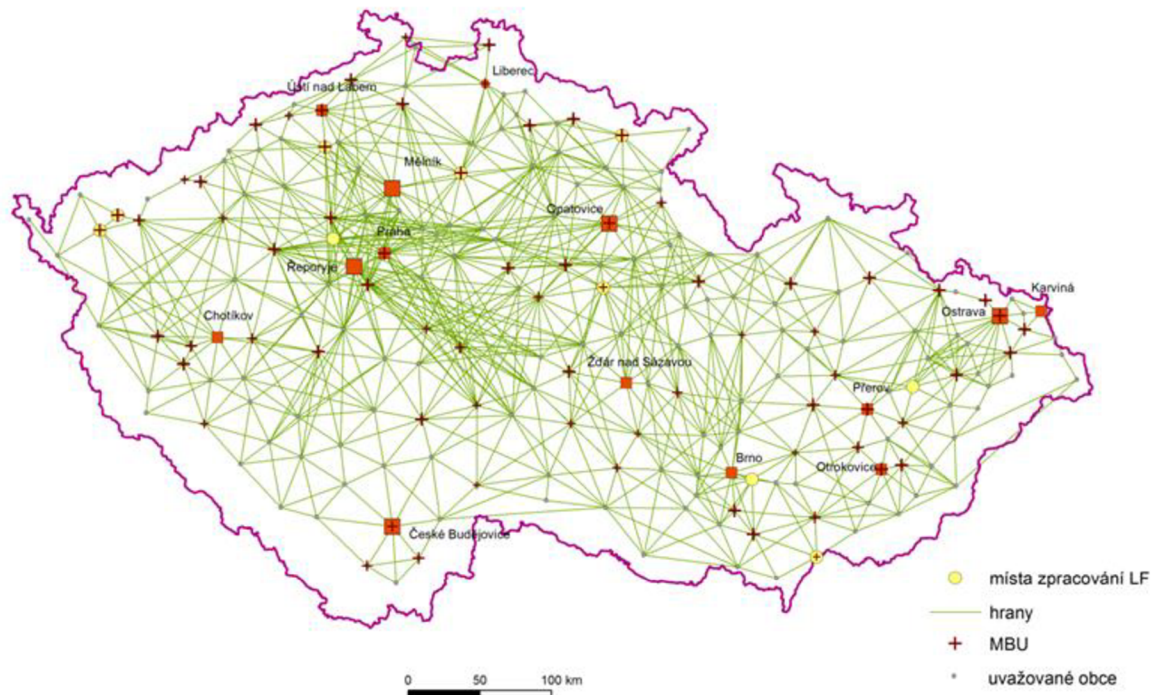
3 REDUKČNÍ TECHNIKY VÝPOČTOVÝCH NÁSTROJŮ DOPRAVNÍCH ÚLOH

3.1 Redukce dopravní infrastruktury

V této kapitole je věnována pozornost snížení výpočtové náročnosti pomocí redukce dopravní infrastruktury. Princip je ilustrován na optimalizačním nástroji NERUDA, avšak samotná metodika přístupu je obecná a přenositelná na libovolné dopravní úlohy.

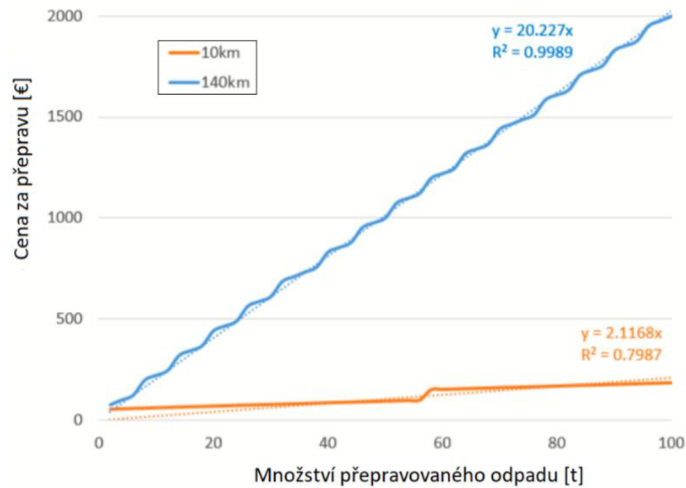
3.1.1 Současný stav výpočtového nástroje NERUDA

Optimalizační nástroj NERUDA je jedním z významných softwarů věnující se dopravním úlohám OH. Mnoho zpracovatelských úloh se potýká s výpočetní náročností. Ve velké míře je problém řešen zjednodušováním modelů dopravních nákladů. Podobně je to řešeno i v nástroji NERUDA. Dopravní náklady jsou definované jako konstantní hodnota za přepravu jedné tuny komodity (odpadu) na vzdálenost jednoho kilometru. Dále se označuje tato konstanta jako jednotkové konstantní náklady (JKN). Díky tomuto předpokladu je možnost modelovat dopravní infrastrukturu pomocí orientovaného ohodnoceného grafu, tzv. reálné sítě. Příklad dopravní infrastruktury pro celou ČR bez zobrazení orientace ukazuje obr. 3.



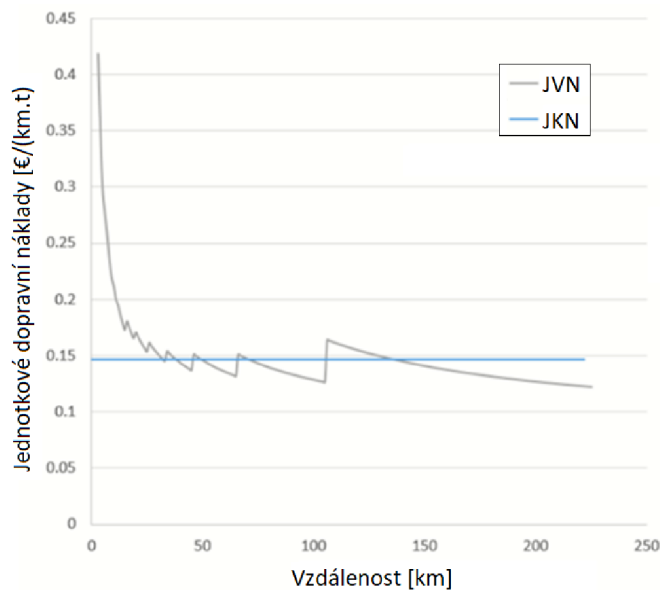
Obr. 3 Reálná síť silniční infrastruktury ČR

Dopravní náklady ale nezávisí pouze na přepravované vzdálenosti a množství komodity, ale odvíjí se od celkové délky dopravní trasy a dalších aspektech jako je např. délka úseku zpoplatněného mýtem. Tuto situaci je nejlépe možno ilustrovat pomocí výsledků pokročilých dopravních modelů zobrazených na obr. 4 a z něj vycházejícího obr. 5.



Obr. 4 Dopravní náklady v závislosti na celkové vzdálenosti trasy

Na obr. 4 jsou zobrazeny dopravní náklady související s převozem SKO na trase o délce 10 km a 140 km společně s jejich lineárním proložením. Pro jednoduchost se uvažuje proložení definované pouze směrnici bez absolutního členu. Křivky vycházejí z výsledků pokročilých dopravních modelů definovaných v (Gregor, 2019). Na základě těchto křivek je možnost odvodit tzv. jednotkové variabilní náklady (JVN) na přepravu, viz obr. 5.

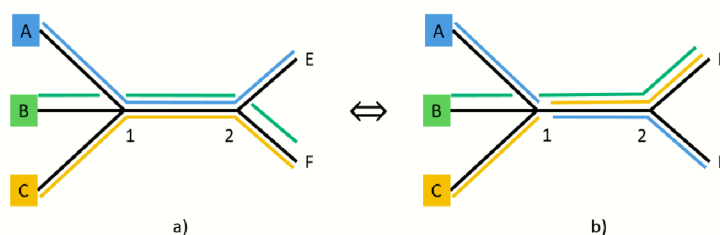


Obr. 5 Srovnání variabilních a konstantních jednotkových nákladů

Z obr. 5 lze vyčíst, že JVN se snižují s celkovou vzdáleností přepravní trasy. Jednotlivé skoky v grafu jsou způsobeny definovanou pracovní dobou, omezeným počtem vozidel, typem provozu (dvousměnný, třisměnný) apod. V případě přepravy vyššího množství odpadu na velkou vzdálenost je tedy nutné rozšířit vozový park o další vozidlo (vyšší investice) nebo počítat s delší pracovní dobou, jelikož vozidlo bude muset jet dvakrát. Obě tyto varianty se promítnou na výsledných jednotkových dopravních nákladech.

Pro porovnání je do obr. 5 implementována průměrná hodnota JVN (modrá úsečka). Ta se přibližně shoduje s expertním odhadem JKN. I přes tento fakt, zůstává otázkou, jak velkého zkreslení výsledků se díky zmíněným zjednodušením dosáhne a zda budou pro danou úlohu přijatelné, či nikoli.

Ke zjištění odpovědi bylo nutno obohatit nástroj NERUDA o JVN. Využití JVN vyžaduje informaci o celkové vzdálenosti trasy, kterou nelze na základě reálné sítě dopravní struktury získat. Vychází to z problematiky tzv. stékání přepravované komodity, viz obr. 6.

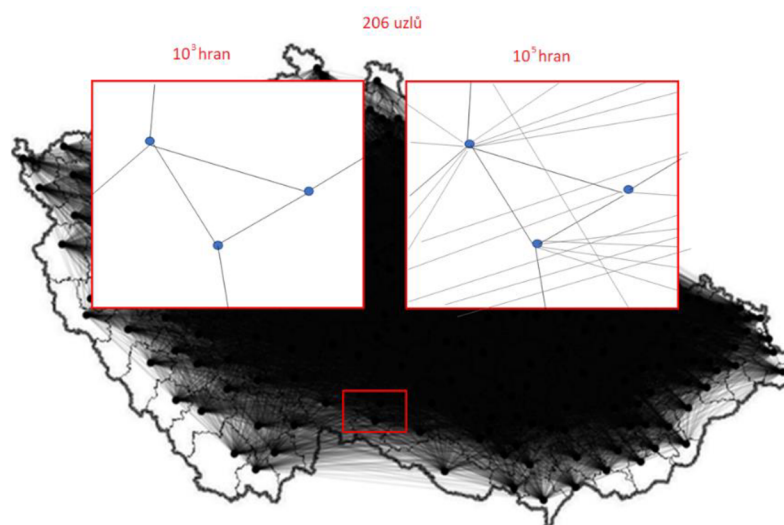


Obr. 6 Stékání komodity

Obr. 6 znázorňuje tři producenty komodity (A, B, C), kteří přepravují komoditu ke konečnému zpracovateli (E, F). Jakmile dojde v bodě 1 k seskupení všech tří toků a následnému rozdělení v bodě 2, tak se ztrácí informace o původním vlastníku komodity. Pokud skončí u zpracovatelů stejné množství komodity, tak z pohledu účelové funkce nástroje NERUDA jsou situace a) a b) ekvivalentní.

Přístup s reálnou sítí eviduje vždy pouze směr toku komodity a její množství na aktuální hraně. Z pohledu dopravních nákladů urazí zelená komodita v případě a) trasu B-F. Pro tuto trasu by měly být definovány JVN. Dosavadní přístup však pracuje pouze s informací, že zelená komodita urazila trasu B-1, pak směs veškerých komodit urazila trasu 1-2 a nakonec směs komodit (žlutá, zelená) urazila trasu 2-F. Místo, aby se pro každou komoditu spočítaly JVN, lze spočítat JVN pouze pro přímé úseky, ze kterých se celková trasa skládá. Dopravní náklady by byly určeny dobře pouze pro komoditu, která by byla přepravovaná po přímém úseku (Šomplák, 2019). Proto byla definována nová síť popisující dopravní infrastrukturu. Síť, ve které jsou všechny trasy modelovány jako přímé úseky. Jedná se o bipartitní síť.

Bipartitní síť je zkonstruována tak, aby existovala pro každého producenta komodity jedinečný přímý úsek ke každému spotřebiteli. Z podstaty popisu je zřejmé, že bipartitní síť bude obsahovat mnohem větší počet hran. Grafické znázornění bipartitní sítě pro ČR (206 ORP) a 100 možných zpracovatelů je na obr. 7. Částečně jsou přes mapu bipartitní sítě umístěny dva různé výřezy. Oba znázorňují stejnou oblast, ale na prvním (vlevo) je zobrazeno propojení uzlů reálné sítě a na druhém (vpravo) síť bipartitní.



Obr. 7 Bipartitní síť silniční infrastruktury ČR (10^5 hran) vs. původní reálná síť (10^3 hran)

3.1.2 Modelová dopravní úloha

Úloha byla definována na silniční síti ČR. Zároveň byl však kladen důraz na obecnost, takže výsledky by měly být použitelné i na jiné územní oblasti. Pro účely dalšího vysvětlování se NERUDA nad reálnou sítí bude označovat jako úloha KON (dopravní náklady počítány na základě JKN) a nad bipartitní sítí jako úloha VAR (dopravní náklady počítány na základě JVN). Úloha VAR poskytuje přesnější výsledky, ale pokud se nebudou výrazně lišit od výsledků úlohy KON je snaha zůstat u ní kvůli výpočtovému času.

3.1.2.1 Definice dopravní sítě

Úloha je motivována nakládáním s SKO v ČR. Síť ČR disponuje 206 ORP, u kterých se předpokládá produkce komodity. V tomto případě se jedná o SKO. Ve zvolených uzlech sítě jsou uvažována zařízení na zpracování SKO (např. ZEVO, skládka, MBÚ). Pro účely testování se jednalo pouze o jeden typ zařízení. Suma kapacit všech zařízení byla volena v rozmezí 1 000 – 5 000 kt za rok. Byly vytvořeny 3 varianty rozmístění zařízení, které se odlišovaly kapacitou a jejich počtem v síti.

Také byla stanovena hustota zařízení v síti. Vždy bylo zvoleno určité procento z celkového počtu uzlů, které definovalo počet zařízení. Toto procento nabývalo hodnot 1, 5 a 9 %. Rozmístění zařízení bylo definováno náhodně. V každém uzlu sítě je uvažován producent sledované komodity. Celková produkce dané komodity byla volena jako procentuální část z celkové kapacity všech zařízení. Byly uvažovány hodnoty 10, 40 a 70 %. Stejně jako u kapacit byly uvažovány 3 varianty sítě producentů, které se odlišovaly poměrem jejich produkce.

Důležitým faktorem pak byla cena na bráně (cena, kterou si účtuje zařízení za zpracování odpadu) jednotlivých zařízení. Pro tyto účely byla cena generována z normálního rozdělení se střední hodnotou 2 000 Kč a směrodatnou odchylkou 100, 300, 500 Kč. V poslední řadě se měnila průměrná cena za přepravu 1 tuny odpadu na jeden kilometr. Jakožto klíčový parametr u ní bylo stanoveno 5 úrovní, a to 2, 15, 30, 60, 100 Kč/t/km. Společně s proměnnými parametry náhodnosti pro zařízení a producenty bylo vytvořeno 14 580 různých vstupních datových sad pro danou úlohu. Různé kombinace vstupních dat se dále budou označovat jako scénáře.

Na takto definované síti se jedná o tzv. facility location problem, kde veškerá zařízení mají pevně stanovenou kapacitu a cenu za zpracování. Optimalizuje se celková cena za dopravu a zpracování, kde jako hlavní neznámá figuruje množství zpracovaného odpadu v jednotlivých zařízeních.

3.1.2.2 Dílčí výsledky

Pro všechny scénáře definované výše byla spočítána úloha KON a VAR. Výsledkem každé úlohy je celková cena za dopravu, celková cena za zpracování, informace o tom, v jakém zařízení odpad skončil a kolik ho bylo přepravováno na jaké hraně sítě.

Celkový počet proměnných úlohy VAR byl podle předpokladů vyšší než u KON a stejně tak i časová náročnost výpočtu, viz tab. 1. Výpočet byl proveden na PC s 64bitovým operačním systémem Win10, 8jádrovým procesorem o frekvenci 3,4 GHz a paměti RAM 16Gb. Optimalizační software byl GAMS (Generalized Algebraic Modeling System). Jako řešič byl využit CPLEX.

Tab. 1 Počet proměnných a časová náročnost výpočtu modelů pro testovací úlohu

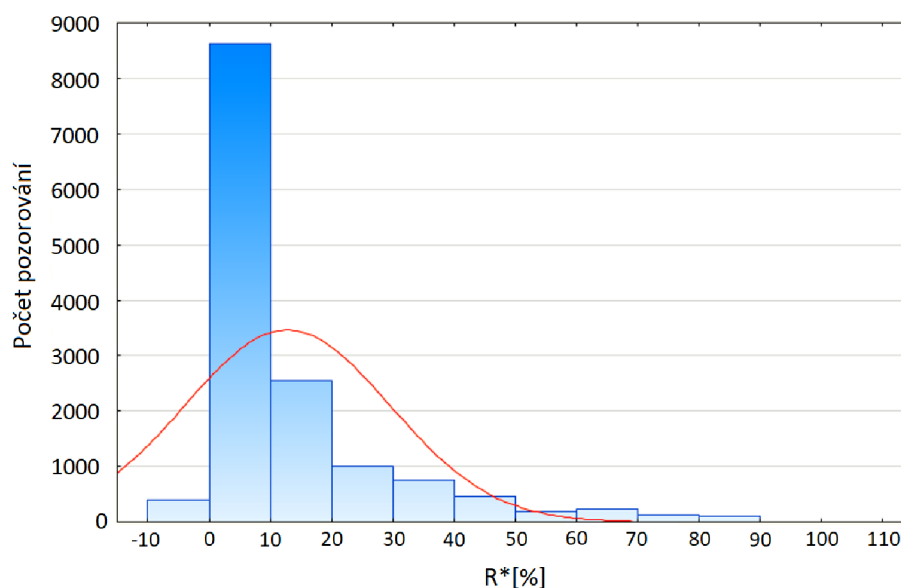
Model	Počet proměnných [-]	Čas vytváření modelu [ms]	Výpočetní čas [ms]	Celkový čas [ms]
KON	10 653	58 475	387	58 862
VAR	128 137	391 265	1 211	392 476

Celkový výpočetní čas se skládá z času potřebného na vytváření modelu a času samotného výpočtu. Pod pojmem vytváření modelu je myšleno zpracování rovnic do vhodného formátu pro výpočet. Tento krok, stejně tak i jako samotný výpočet, provádí automaticky software GAMS. Z pohledu náročnosti výpočtu se jeví varianta KON jako vhodnější, ale výpočtová náročnost není jediným parametrem, podle kterého je vhodné se rozhodovat. Nejdůležitějším parametrem je samozřejmě kvalita výsledků.

Odlišnost výsledků obou přístupů se dá kvantifikovat z několika pohledů. Jedním z nich je posuzovat rozdíly z hlediska celkové ceny za dopravu, zpracování či jejich součtu. Z pohledu lokální optimalizační úlohy není ani jeden ze zmíněných parametrů postačující. Pro porovnání odlišnosti modelů byla vytvořena porovnávací proměnná R^* , která definuje, jak se modely lišily v rámci toho, v jakém zařízení byl odpad zpracován. Výpočet pro jednotlivý scénář vypadá následovně:

$$R^* = \frac{1}{|I|} \sum_{i=1}^I \frac{|X_i^{KON} - X_i^{VAR}|}{X_i^{KON} + X_i^{VAR}}, \quad (1)$$

kde X_i^{KON} , resp. X_i^{VAR} , je množství odpadu, které skončilo v zařízení i pro model KON, resp. VAR, a I je množina všech zařízení ($|I|$ je mohutnost množiny I). Pokud R^* nabývá nízkých hodnot, není potřeba rozlišovat mezi výsledky modelů KON a VAR. Lokalizace zpracování SKO se téměř neliší, ale hodnota účelové funkce se samozřejmě lišit může. V případě, že R^* nabývá vyšších hodnot, pak by se mělo přistoupit k výsledkům z modelu VAR. Histogram na obr. 8 ukazuje, že v některých scénářích se výsledky modelů liší téměř o 100 %. V těchto případech je nevhodné použít model KON.



Obr. 8 Procentuální rozdíl R^* pro jednotlivé scénáře

Výsledky naznačují, že procentuální odchylka R^* se v téměř 80 % případů pohybuje pod úrovní 20 % a v 62 % se pohybuje dokonce pod úrovní 10 %. Sloupec histogramu od -10 do 0 zobrazuje čisté nuly, tedy případy, kdy modely KON a VAR byly z pohledu R^* totožné (2,7 %). Pro tyto scénáře je tedy KON model zcela dostatečný.

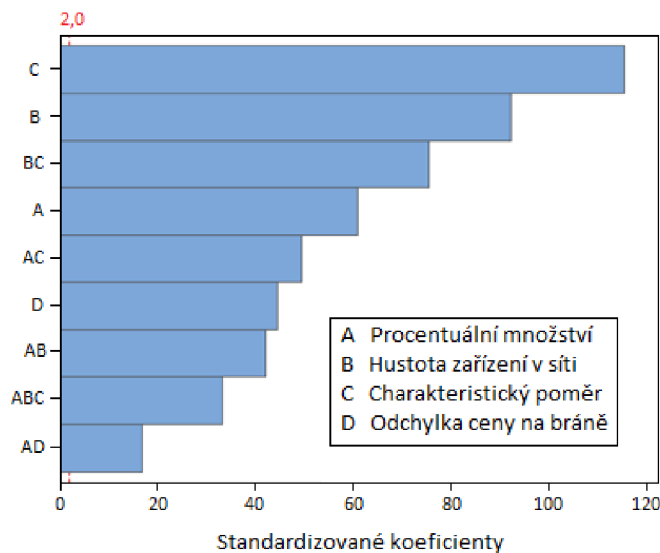
Dosavadní výzkum na poli redukce výpočetní náročnosti poukázal na fakt, že pro některé zpracovatelské úlohy, nebo přesněji pro některé okrajové podmínky úlohy, není potřeba zabývat se složitými dopravními modely a je možné přejít ke konstantní ceně za dopravu na reálné dopravní síti, která neobsahuje extrémně velké množství hran. Volba složitějšího modelu nebude mít vliv na rozmístění většiny zařízení.

Cílem této práce je poskytnout doporučení vhodného modelu dle hodnoty R^* ještě před výpočtem. Z tohoto důvodu byl vytvořen tzv. charakteristický poměr scénáře C , jehož výpočet je definován pomocí následujících vztahů

$$F_i = \frac{\varphi_i \cdot G_i}{\sum_{i=1}^I G_i}, \quad (2)$$

$$C = \frac{s(E)}{\varphi_{tra}}, \quad (3)$$

kde φ_i je cena na bráně i -tého zařízení, G_i je kapacita i -tého zařízení, tedy F_i bude pro další účely označováno jako korigovaná cena na bráně. Dále $s(F)$ je směrodatná odchylka korigovaných cen na bráně a φ_{tra} je cena za dopravu 1 tuny komodity na vzdálenost 1 km. Z definice jasně vyplývá, že nemůže popisovat veškerou charakteristiku scénáře, takže nelze odhadnout R^* jen s tímto parametrem. Pro odhad bylo proto použito i surových parametrů, které byly v předchozím textu popsány jako parametry definující síť, viz začátek kapitoly 3.1.2. Regresní model parametru R^* vznikl na základě faktorové analýzy těchto parametrů. Obr. 9 zobrazuje Paretův graf pro významné parametry.



Obr. 9 Paretův graf standardizovaných koeficientů modelu odchylky D

Faktorová analýza předpokládá, že veškeré parametry do ní vstupující nebudou vzájemně korelované, což bylo testováno v programu STATISTICA pomocí Spearmanova koeficientu pořadové korelace.

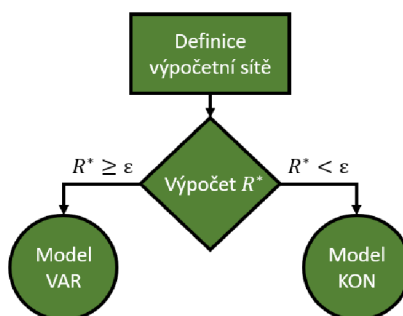
Nejlepší dosavadní model difference R^* , který se podařilo vytvořit, dosahoval koeficientu determinace 0,64, popisoval tedy 64 % z celkové variability. Tato hodnota by pravděpodobně mohla být zlepšena použitím metod strojového učení, např. neuronových sítí.

Dosavadním výzkumem se tedy prokázala závislost výsledků na zvoleném modelu NERUDA (VAR, KON). Byl vytvořen regresní model na základě vlastností zvolené sítě úlohy, ze kterého plyne vztah (4).

$$R^* = -9.77 + 0.13066 \cdot A + 1.8412 \cdot B + 0.03102 \cdot C + 0.03682 \cdot D - 0.02224 \cdot A \cdot B - 0.000222 \cdot A \cdot C - 0.000352 \cdot A \cdot D + 0.09648 \cdot B \cdot C - 0.001013 \cdot A \cdot B \cdot C. \quad (4)$$

Pro podobné úlohy je tedy vhodné řídit se před jejich samotným řešením rozhodovacím diagramem, viz obr. 10. Prvním úkolem je definice výpočetní sítě. Ta zahrnuje rozmístění jednotlivých uzlů, zařízení,

jejich kapacitu apod. Díky těmto datům lze určit parametry sítě (A, B, C, D) a dopočítat R^* ze vztahu (4). Následuje velmi důležitý krok, a to určit, zda je hodnota R^* dostatečně malá, aby postačoval pro výpočet modelem KON. V diagramu (obr. 10) je to symbolizováno pomocí hraniční hodnoty ε . Její hodnota se může pro různé úlohy výrazně lišit. V případě, že byly údaje o výpočetní síti definovány na základě ne příliš přesných dat, pak i výsledky budou nepřesné, a to pro variantu KON i VAR. V tomto případě je tedy možné ponechat ε na vyšší úrovni. Pokud je však definice sítě provedena velice kvalitně, pak je vhodné ponechat ε spíše nižší, aby se tato kvalita promítla i do finálních výsledků NERUDA.



Obr. 10 Rozhodovací strom pro výběr vhodného modelu

Dosavadní přístup se však dá využít pouze v případě, že všechny parametry sítě jsou známy. Tedy nelze použít pro úlohy, které pouze uvažují o výstavbě nových zařízení. Výpočet pro předem nedefinované síť je v praxi velmi často vyžadovaný. Právě analýza stavu, kdy nejsou přesně definovány parametry, otevírají možnosti dalšímu výzkumu, který je již nad rámec této práce.

3.2 Redukce výpočtových scénářů

V této kapitole se vychází z výpočtů softwaru NERUDA, který uvažuje klasickou síť (viz obr. 3). Zde je stanovena jednotková cena za km neohledně na délku trasy (JKN). V některých situacích se ukázalo, že zvolený přístup je zcela postačující a má proto smysl zavést takové zjednodušení. Podrobně byla problematika popsána výše u obr. 3. Bipartitní síť se v této části neuvažuje.

Tato kapitola se věnuje převážně problematice zpracování výsledků. Výsledek výpočtového nástroje NERUDA zahrnuje optimální rozvoz dané komodity, v tomto případě odpadu, jejího zpracování a z toho plynoucí ceny na bráně jednotlivých zpracovatelských zařízení. Údajů, které jsou důležitými charakteristikami, vstupujících do modelu je mnoho a nelze s jistotou určit jejich správnou hodnotu. Ať už z důvodu nedostatku dosavadních dat nebo nejistoty budoucího vývoje. Proto se přechází ke scénářovému přístupu, kdy se vstupní hodnoty pohybují v definovaném rozmezí, případně se uvažují jako několik diskrétních hodnot. To vede na problém, který lze řešit z pohledu optimalizace dvěma základními způsoby, a to přístupem „Here-and-Now“ (HN) nebo „Wait-and-See“ (WS). Vstupní hodnoty se potom označují jako náhodná veličina.

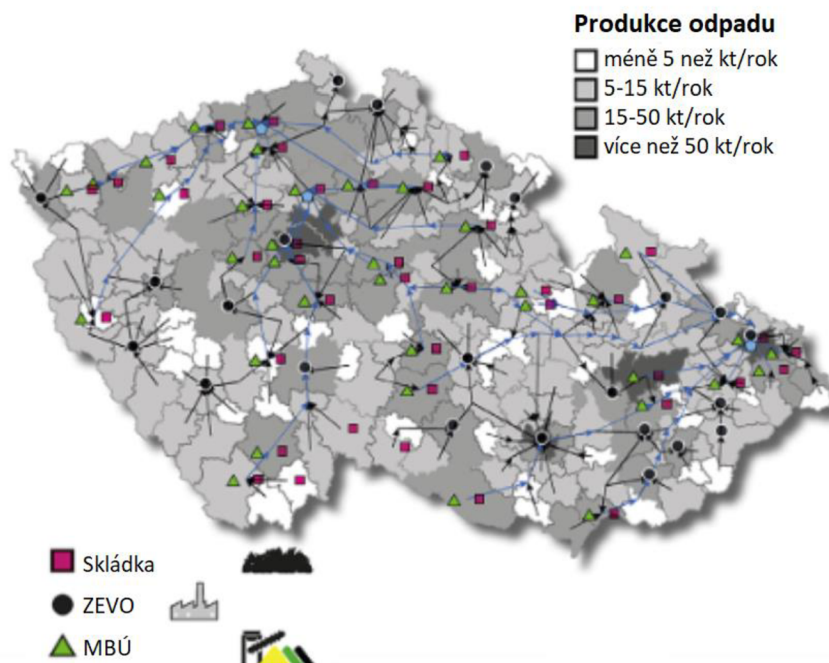
Přístup WS čeká na realizaci náhodné veličiny ξ (poplatek za skládkování, poptávka po teple, kapacita nových zařízení apod.) a až po jeho realizaci teprve reaguje. To znamená, že se při výpočtu předpokládá znalost budoucího vývoje.

Oproti tomu se HN snaží nalézt řešení, které bude vzhledem ke všem možným realizacím nejrobustnější. Ať tedy nastane jakákoliv možná realizace, tak v konečném důsledku by mělo takto vzniklé rozhodnutí poskytovat rozumné řešení. Avšak pro konkrétní realizaci ξ nemusí být v žádném případě nejlepší.

Pokud je přístupováno k úloze formou HN, bude výsledkem jediné řešení, které z hlediska zadaných vstupních proměnných splňuje podmínky optima. Zde je ovšem potřeba položit si několik důležitých

otázek. Která proměnná měla největší vliv, že právě toto řešení je optimální? Jednalo se o vliv kombinace proměnných? Změní se výsledek, pokud dojde k malé změně vstupních parametrů? A pokud ano, tak které to jsou a jaká je šance, že se do budoucna opravdu budou měnit. Je zřejmé, že u dlouhodobých projektů, které mají fungovat značné časové období do budoucna nemusí být přístup HN dostatečně uspokojivý, protože vstupní parametry je v rámci delšího časového horizontu velice těžké odhadnout, což platí i pro scénáře budoucího vývoje. Důležité je tedy znát odpověď na výše zmíněné otázky a až na základě nich se rozhodnout, zda je výsledek opravdu vhodný. Protože HN funguje jako „černá skříňka“, do které není příliš vidět, je v některých případech vhodnější přejít k metodě WS, která podá odpovědi na otázky, co se stane v případech, kdy se změní některé proměnné.

Metoda WS dokáže poskytnout výsledek pro jednotlivé scénáře, ale vzhledem k jejich počtu je velice obtížné výsledky pro každý scénář zpracovat. Výsledek jediné kombinace nastavení vstupních parametrů (jeden scénář) dává vždy relativně přehledný náhled na situaci, která v něm nastala, jak je vidět na následujícím obr. 11.



Obr. 11 Zobrazení vhodných lokalit a pohybu komodit pro zvolený scénář (Šomplák ,2019)

Problém je, že těchto výsledků, v tomto případě map, je stejné množství jako výpočetních scénářů. Počet těchto scénářů se odvíjí od počtu proměnných a predikce jejich změny v závislosti na vývoji aktuálního dění a expertních analýz. V uvažovaném případě této práce je počet scénářů roven 500. Každý výsledek se může v některých ohledech lišit. Analýza výsledků pro 500 scénářů, která se snaží odhalit, co vedlo právě k tomuto výsledku, není zrovna nejvhodnější způsob. Odhalit, co vedlo k danému výsledku nemusí být elementární úloha a opakovat ji pro větší množství scénářů může vést k nepřijatelné časové náročnosti. Zdaleka ne všechny výsledky se od sebe odlišují nějak výrazně a pro danou osobu (potenciálního investora nových zařízení, starostu obce apod.) nemusí být tento rozdíl podstatný, jelikož se jejich oblasti zájmu vůbec netýká. To celé vede k myšlence, že by se podle oblasti zájmu daly výsledky rozřadit do několika skupin. Členové každé skupiny by si z jistého hlediska/hledisek byli výrazně podobní. Zároveň by se, ale odlišovaly od členů v ostatních skupinách. Tyto úvahy vedou na použití shlukové analýzy, která může s dělením na jednotlivé skupiny výrazně pomoci.

Cílem této kapitoly je poukázat na vhodnou metodiku, která by byla podkladem pro manažerské rozhodování v oblasti OH a splňovala by dva základní předpoklady.

1. Jednotlivá řešení jsou dostatečně „průhledná“ z pohledu analýzy výsledku.
2. Počet výsledných řešení se pohybuje v řádu jednotek, aby bylo snadné se v nich orientovat a dělat na jejich základech potřebné závěry.

3.2.1 Modelová úloha

Pro modelovou úlohu byl vybrán případ řešený pomocí nástroje NERUDA v roce 2019 a jeho komplexní výsledky. Nastavení okrajových podmínek výpočtu při jeho zpracování nemusí odpovídat současnému stavu (viz níže kapacity a ceny). Z pohledu vytvářené metodiky je toto nepodstatné. Předmětem zájmu je celá ČR společně s několika oblastmi v Sasku, Bavorsku a Rakousku. Úlohu producentů odpadu zde zastávaly ORP a hlavní město Praha. ČR k letošnímu roku 2022 disponuje 205 ORP, ale celkově do výpočtu vstupovalo 209 uzlů a zpracovatelů, kde zbylé tvořily agregované rakouské, bavorské, saské obce a Praha.

Jako zpracovatelé odpadu byly ve výpočtu uvažovány všechny druhy již zmíněných zařízení. Jmenovitě se jednalo o MBÚ (113), skládky (146), ZLF (2), PREKL (209, i mimo území ČR) a ZEVO. ZEVO bylo celkem 35. Jednalo se jednak o existující zařízení, ale zahrnuty byly i potencionální projekty na výstavbu. Pro všechny byly definovány kapacity a jejich umístění v síti. Obdobně byly definovány parametry pro ostatní zařízení. Stejně jako u ZEVO byla některá zařízení pouze uvažovaná pro výstavbu. Na základě výpočtového scénáře tedy nemusela být k výstavbě doporučena.

Definice scénářů

Výše bylo zmíněno, že modelová úloha se počítala opakovaně pro 500 různých kombinací vstupních hodnot parametrů (kapacita ZEVO, poplatky na bráně jednotlivých zařízení). Tyto hodnoty se generovaly na základě vhodného pravděpodobnostního rozdělení. Poplatky na bráně byly generovány na základě dat z (Šomplák, 2014). Převážná většina byla modelována pomocí rovnoměrného pravděpodobnostního rozdělení. Skládkovací poplatek byl zafixován na hodnotě 2500 Kč/t. Kapacita ZEVO bylo pro každý scénář upravována multiplikativním koeficientem 1,2 nebo 1,5.

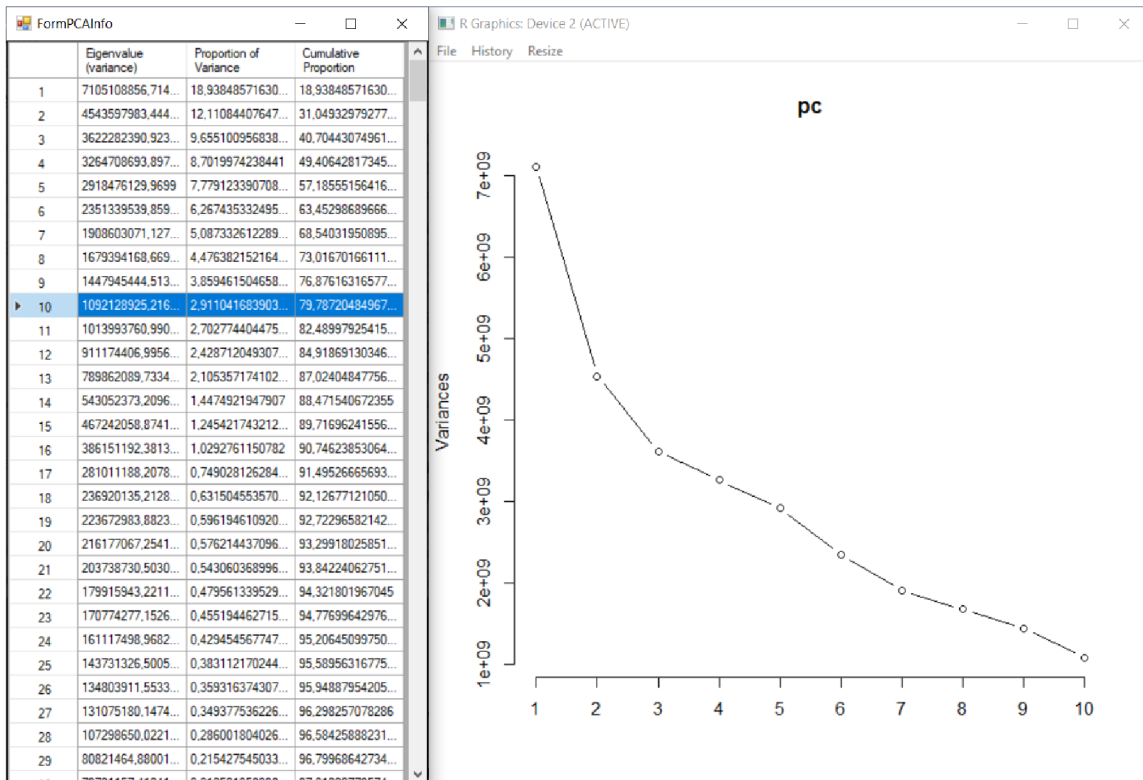
Výsledky výpočtového nástroje NERUDA

Pro zpracování výsledků byl využit nástroj CAO (Onderlička, 2016) pro shlukovou analýzu. Software byl postupně přizpůsoben přesně na formát, ve kterém je možné zpracovat výsledky z nástroje NERUDA.

Celkové výsledky všech proměnných vystupují ze softwaru NERUDA ve formě textového dokumentu „postproc.txt“. Pro shlukování je možnost si vybrat pouze některé proměnné, podle kterých se má shlukovat. Je možné brát v úvahu pouze některá zařízení nebo část z celého územního celku.

Pro následující příklad byly ponechány všechny typy zařízení v celé ČR (společně s několika obcemi v zahraničí). Počet proměnných je vzhledem k typům zařízení a jejich hustému rozložení značný. V tomto případě se jedná o 531 proměnných.

Vysoký počet proměnných ztěžuje jejich interpretaci, proto je vhodné využít metodu hlavních komponent (PCA – Principal Component Analysis). Tato metoda vytváří nové proměnné (komponenty), které jsou lineární kombinací původních proměnných, jsou vzájemně nezávislé, jejich počet je nižší, ale zároveň popisují variabilitu výsledků s minimem ztráty informace. PCA je zabudována v softwaru CAO, kde tlačítkem „Zobrazit scree plot“ jsou v tabulce zobrazeny jednotlivé komponenty, včetně informace, kolik daná komponenta popisuje původní variability a zároveň je vykreslen indexový graf (scree plot), viz obr. 12. Podle těchto dvou indikátorů se určuje vhodný počet komponent.



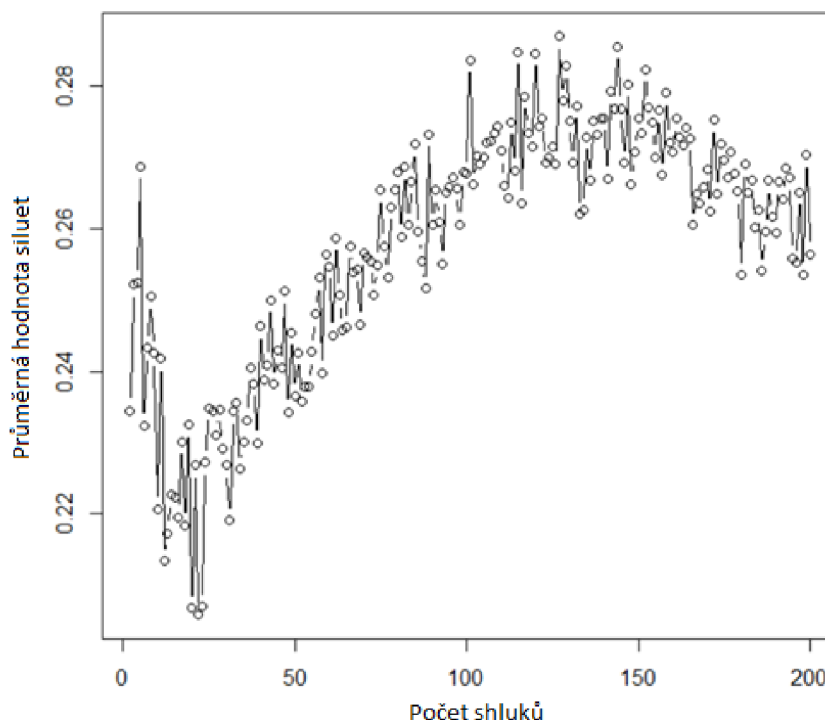
Obr. 12 Tabulka komponent z PCA (vlevo) a scree graf (vpravo)

Indexový graf z obr. 12 zobrazuje závislost jednotlivých komponent na vysvětlované variabilitě. Při odvození počtu proměnných dle grafu se postupuje dle jeho směrnice. Čím více se směrnice blíží nule, tím méně informace (popisované variability) další komponenta přináší. Hledá se tedy bod grafu, kde se náhle zvýší hodnota směrnice, oproti předchozí lineární části. V zobrazeném případě je těžké tento zlom jednoznačně určit, tak je vhodné postupovat pomocí tabulky, kde se najde řádek s požadovanou hodnotou popisované variability a z něj se odečte počet komponent. Samozřejmě, že čím vyšší hodnota je požadována, tím hodnotnější jsou výsledky, zároveň však jde o redukci proměnných, takže je nutné mezi těmito kritérii udělat vyhovující kompromis. Publikace (Hair, 2010) uvádí, že minimum popisované variability musí být alespoň 60 %, což na obr. 12 odpovídá 6 komponentám. Je to ale doporučení minima, volba tedy závisí čistě na požadovaném výsledku. Z hlediska menší ztráty informace je pro další analýzu ponecháno 10 komponent. Samozřejmě by se dalo uvažovat i o vyšším počtu komponent, ale z výpočetních důvodů byl limit komponent v softwaru CAO omezen právě na hodnotu 10. V případě, že počet komponent nevysvětluje dostatečnou variabilitu dat, je potřeba zvážit, zda je procento vysvětlované variability 10 komponentami dostatečné (v tomto případě necelých 80 %), případně omezit počet původních proměnných. Tlačítko „Zachovej vybrané proměnné“ určí počet komponent, které se zachovají pro shlukovou analýzu.

Shluková analýza je provedena pomocí metody k-means. Jedná se o nehierarchickou iterační metodu shlukování, která požaduje předem zvolený počet shluků. Metoda konverguje, ale výsledek závisí na počáteční inicializaci. Modul k-means je součástí nástroje CAO. Umožňuje volit počet shluků, ale i inicializací, které jsou k těmto shlukům využity.

Hodnocení kvality shluků je provedeno pomocí siluet, kde silueta popisuje „kvalitu“ přiřazení jednotlivého člena shluku k danému shluku. Nabývá hodnot od -1 do 1, kdy 1 symbolizuje správné zařazení do shluku a -1 naopak. Podrobnější popis siluet je popsán v (Rousseeuw, 1986).

Modul k-means CAO umí průměrné hodnoty shluků vykreslit, pro jednotlivé počty shluků, aby měl uživatel jednodušší rozhodování, který počet zvolit, viz obr. 13.



Obr. 13 Průměrná hodnota siluet pro dané počty shluků

Celkově vstupovalo do shlukové analýzy 500 scénářů. Počet shluků byl zvolen od 2 do 200. Je vidět, že průměrná hodnota siluet je maximálně kolem 0,25, což svědčí o tom, že zvolená data nelze vhodně rozdělit do několika skupin tak, aby se dal daný shluk charakterizovat nějakými společnými rysy.

Jeden z výstupů CAO je excelovský soubor obsahující přehled o počtu scénářů, jejich rozdělení do shluků s definovaným reprezentantem, a také hodnoty siluet pro jednotlivé prvky shluku (scénáře).

Na tomto příkladu bylo jednak ukázáno, že v některých případech nelze shluková analýza rozumně využít, a tedy rozdělit výsledky nástroje NERUDA do několika skupin. Minimálně to nelze pro tyto výsledky, ve kterých se uvažují veškeré proměnné (cena i kapacita všech typů zpracovatelských zařízení ve všech krajích). Samotný přístup zpracování výsledků pomocí shlukové analýzy má za určitých podmínek využití, musí se ovšem omezit počet proměnných.

Karlovarský kraj

Pro další postup byla provedena eliminace množství proměnných. Dále se tedy neuvažuje celá ČR, ale pouze Karlovarský kraj. Byl vybrán proto, jelikož se jedná o kraj, ve kterém není ZEVO, ale v modelu je uvažována možná výstavba v obci Cheb. Jde sice o výrazné zjednodušení, ale z pohledu praxe to dává smysl, jelikož analýza jednotlivých krajů ČR může být hodnotným zdrojem pro jednotlivé hejtmány, případně pro firmy operující v OH pouze na menším území.

Vzhledem k tomu, že počet proměnných je snížen zmenšením uvažovaného území, tak ve shlukované analýze byla ponechána cena na bráně zařízení i kapacita. V případě Karlovarského kraje se ukázalo, že pro shlukování stačí ponechat pouze 4 komponenty, které popisují přes 99 % variability dat.

Dále byla použita metoda shlukování k-means a došlo k vyčíslení hodnot průměrných siluet pro jednotlivé shluky. Maximální hodnota vychází při počtu 22 shluků, ale už při pouhých 4 shlucích je

průměrná hodnota siluet téměř 0,93. Vzhledem ke snaze minimalizovat počet shluků, ale zároveň mít co nejvyšší hodnotu siluet byly dle expertního odhadu zvoleny 4 shluky. Množství prvků ve shluku je popsáno v tab. 2.

Tab. 2 Počet prvků ve shlucích

Shluk	1	2	3	4
Počet prvků (scénářů)	41	409	40	10
Procentuální zastoupení prvků [%]	8,2	81,8	8	2

Výsledky některých scénářů mohou být velmi podobné a při podrobnější analýze je možné zjistit, že v tomto případě se mnoho výsledků z druhého shluku v ničem neliší. Toto zjištění je samo o sobě velice důležité. Pokud jsou některé výsledky jsou pro danou oblast zájmu totožné, je třeba je identifikovat a duplicitu odstranit. Další zpracování nemusí proběhnout pro každý výsledek, ale pouze pro ty, které jsou odlišné. Zde je však potřeba pamatovat na fakt, že výsledek se několikrát opakoval, a proto je potřeba mu přisuzovat větší váhu.

Společný prvek výsledků je také důležitou informací, která může případným investorům pomoci při rozhodování. Například v tomto případě shluk 4 popisuje výsledky, kde byla provedena výstavba ZEVO v obci Cheb. Jedná se pouze o 2 % z celkového počtu scénářů, což reálné výstavbě příliš nenahrává.

V tab. 3 jsou připojeny veškeré závislosti průměrných siluet pro dané počty shluků pro všechny kraje. Je očividné, že výsledky některých krajů nejsou pro tuto analýzu vhodné, avšak pro některé kraje může tento přístup zajistit značné zjednodušení. Navíc díky představenému nástroji CAO je pro tyto úlohy provedení shlukové analýzy velmi jednoduché a časově nenáročné, proto je vhodné ji učinit.

Tab. 3 Doporučený počet shluků pro jednotlivé kraje

Kraj	Počet shluků	Průměrná hodnota siluet
Praha	5	1
Jihočeský	2	0,84
Jihomoravský	2	0,94
Karlovarský	4	0,93
Královéhradecký	4	0,63
Liberecký	4	0,76
Moravskoslezský	3	0,90
Olomoucký	2	0,78
Pardubický	7	0,83
Plzeňský	11	0,70
Středočeský	16	0,54
Ústecký	2	0,93
Vysočina	4	0,92
Zlínský	9	0,69

4 ZEVO INTEGROVANÉ V RÁMCI TEPLÁRENSKÉHO ZDROJE: OPTIMALIZACE KONCEPČNÍHO NÁVRHU

Druhá skupina úloh, kterou se dizertační práce zabývá, se soustředí na koncepční návrh ZEVO a jeho integraci do systému s dalším teplárenským zdrojem. Při výběru vhodné lokality pro výstavbu nového ZEVO je třeba brát v úvahu dva základní parametry: dostupnost odpadu a odbyt tepla. Odpad se generuje ve veškerých obydlených oblastech a otázkou je pouze jeho množství. Problém může představovat omezený odbyt tepla, jelikož příjmy z prodeje tepla činí téměř čtvrtinu celkových příjmů a u menších kapacit může toto číslo ještě narůstat. Nejedná se tedy o zanedbatelnou položku a zajištěný odbyt tepla je z hlediska ekonomiky velkou výhodou. V ČR jsou v podstatě dvě základní možnosti odbytu tepla. Je to napojení na CZT nebo k průmyslovým objektům.

Tam, kde se nacházejí tepelné sítě s odběrem tepla, už musí existovat tepelné zařízení, které poptávku po teple naplňuje. Úloha se tedy rozšiřuje na modelování existujícího tepelného zařízení a zároveň jeho kooperaci s nově uvažovaným ZEVO, tzv. integrovaný systém ZEVO s teplárnou. Jelikož velikost sítě (poptávka po teple) je známa a taktéž cena tepla, která je v ČR uvažována konstantní po celý rok, vede to ke snížení počtu proměnných.

4.1 Finanční hodnocení projektu

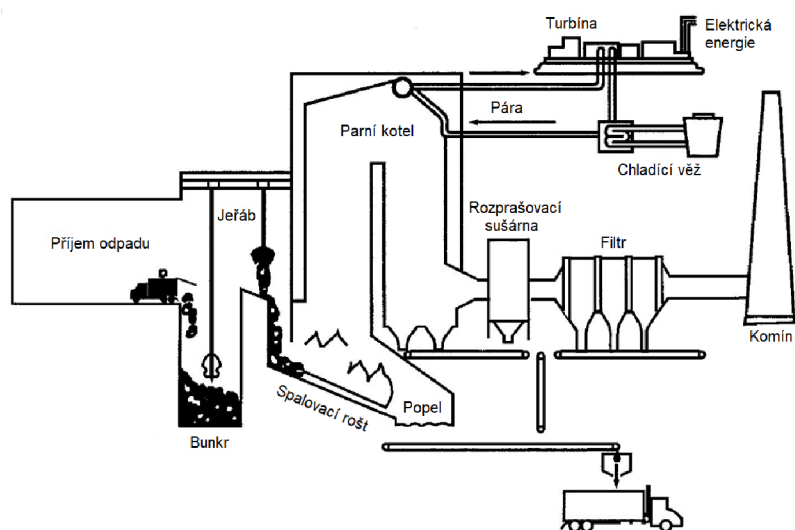
Klíčovým parametrem ke zhodnocení investice projektu je zvolení vhodné charakteristiky, která ho výstižně popíše. V dizertační práci se používá vnitřní výnosové procento (IRR – Internal Rate of Return).

$$I = \sum_{r=1}^N \frac{CF_r}{(1 - IRR)^r} \quad (5)$$

kde I je počáteční investice vložená do projektu, CF_r je peněžní tok v roce r , N je délka životnosti projektu. Zmíněný vzorec lze použít pouze v případě, že všechny toky CF_r nabývají kladné hodnoty.

4.2 Model ZEVO

V této kapitole je kladen důraz na sestavení modelu, jehož úkolem je stanovení dat potřebných pro výpočet IRR a také stanovení vhodných scénářů. V první řadě je potřeba představit schéma zařízení, podle kterého se celý model bude konstruovat. Zjednodušené schéma ZEVO je znázorněno na obr. 14.



Obr. 14 Zjednodušené schéma ZEVO (Waste-to-Energy Resource Recovery, 2010)

Základem celého modelu je kapacita G zvoleného zařízení neboli množství odpadu, které je schopno s instalovanou technologií zpracovat za rok. Běžně se uvádí v kt za rok. Ve světě se lze setkat

s rozmezím kapacit v řádu jednotek kt za rok až po stovky. Pro účely dizertační práce bude stanoveno rozmezí pro kapacitu od 10–300 kt. Toto omezení pramení hlavně z podmínek ČR, na kterou je tato práce směřována. Větší kapacity by v ČR mohly mít problém s uplatněním vyrobeného tepla a získáváním dostatečného množství odpadu, který by pravděpodobně musel být svážen z velkých vzdáleností. Z kapacity pramení hned první podmínka modelu

$$x \leq \frac{G}{FPD}, \quad (6)$$

kde x symbolizuje množství odpadu dávkovaného na spalovací rošt za hodinu a FPD je fond pracovní doby. Běžně se pohybuje kolem 8 000 hodin za rok a vyjadřuje plánovaný počet hodin, který má být zařízení za rok v provozu. Celkově má nepřestupný rok 8 760 hodin, takže 760 hodin (přibližně 1 měsíc) připadá na odstávky zařízení, ať už z důvodu pravidelné údržby nebo i náhlých odstávek z důvodu poruchy.

4.2.1 Parní kotel

Vztah (6) vyjadřuje omezení dávkování odpadu na spalovací rošt. Provozní parametry kotle definují několik dalších podmínek. Jedná se o omezení minimálního dávkování odpadu, definované spojnicí AF. Přesná hranice závisí na zvoleném spalovacím roštu, ale pro podmínky modelu se uvažuje hodnota rovna 60 % z maximálního možného dávkování, viz (7).

$$x \geq 0,6 \cdot x_{max}. \quad (7)$$

Omezení v podobě maximálního a minimálního výkonu je ošetřeno výpočtem samotného tepelného výkonu uvolněného na roštu a celkového vyrobeného tepla, jelikož omezení vyplývá z dávkování.

$$v^B = x \cdot LHV \cdot \eta^B, \quad (8)$$

kde v^B je tepelný výkon kotle, η^B je jeho účinnost a LHV je odhadnutá výhřevnost odpadu. Její hodnota je odhadnuta pomocí nástroje Justine, viz (Szásziová, 2017). Použitý odhad výhřevnosti odpadu v ČR je stanoven na 9,2 GJ/t. Účinnost se uvažuje jako konstanta, i když je její hodnota závislá na aktuálním tepelném výkonu. Ze zkušeností z reálných provozů byla hodnota zvolena na 84,5 %.

4.2.2 Turbíny

Vyrobena pára může být distribuována přímo do tepelné sítě, ale obvykle část, případně veškerá, je vedena na turbínu/y. Základní typy turbín, se kterými se v předmětné oblasti běžně využívají, jsou kondenzační odběrová (KOT), KOT s odpojitelým kondenzačním stupněm a protitlaká (PT).

Důsledný matematický model by zahrnoval mnoho proměnných, a proto se ve většině dosavadních prací značně zjednodušuje. V závislosti na dostupných datech získaných z různých studií je potřeba rozlišovat u turbín mnoho parametrů (výkon, množství vstupující páry, zatížení turbíny, tlak v odběrové síti a podíl vstupující a vystupující páry z prvního stupně KOT), které z pohledu následného modelování vedou na komplikované nelineární vztahy. Přes několik mírných zjednodušení se podařilo odvodit vztah

$$e^{TG} = \sum_{i=1}^2 a_i \cdot v_{in,i-1}^{TG}, \quad (9)$$

kde e^{TG} je výkon turbíny, a_i jsou regresní koeficienty a $v_{in,i-1}^{TG}$ je množství protékající páry (proměnná modelu). Regresní koeficient a_2 byl zvolen tak, aby nebyl závislý na kapacitě ZEVO. Koeficient a_1 zahrnuje i proměnnou účinnost v závislosti na výkonu turbíny. Oproti předchozím komplikovaným vztahům je tento výrazně jednodušší, ale nezahrnuje informaci o protitlaku v odběrové síti CZT. To znamená, že pro každý protitlak musí být vytvořeny nové regresní modely před výpočtem.

Minimální množství vstupující páry v_{min} je definované pomocí minimálního možného zatížení z_{min} .

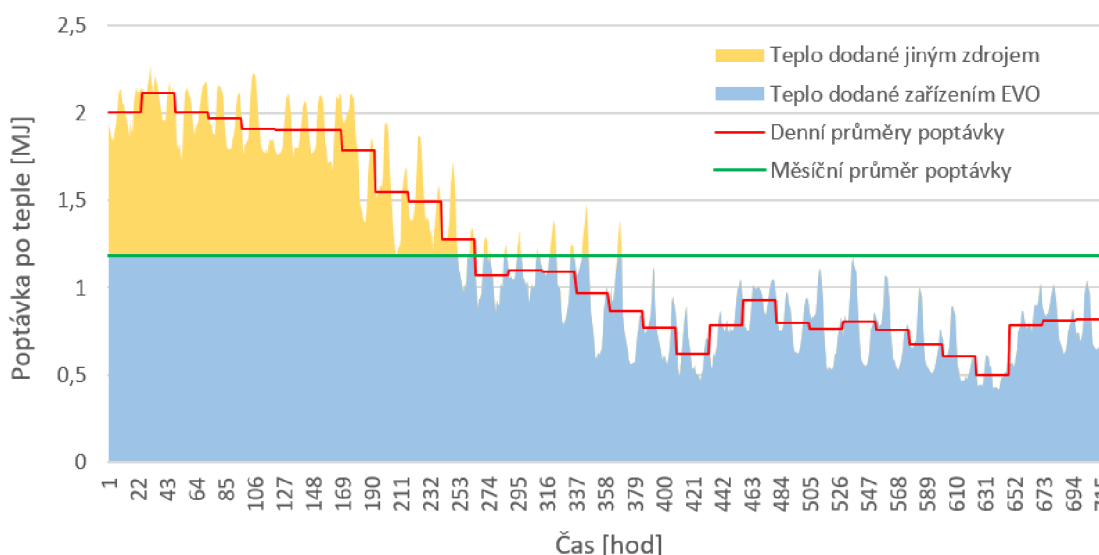
$$e_{min}^{TG} = e_{max}^{TG} \cdot z_{min}, \quad (10)$$

kteřé se běžně pohybuje kolem 40 %. U modelování KOT se postupuje jako při výpočtu dvou navazujících PT, kde každá část je počítaná zvlášť. Problém nastává v případech, kdy je uvažováno s možným vypínáním turbín. V takovém případě je třeba ošetřit nereálné stavy jako například provoz pouze druhého stupně nebo samostatný provoz prvního stupně u KOT s neoddělitelným kondenzačním stupněm, což se řeší pomocí binárních proměnných.

Protitlaké turbíny se uplatňují převážně u malých zařízení, oproti tomu KOT najdou uplatnění i u větších zařízení. Je to hlavně díky možnosti přepínání orientace z tepla na elektrickou energii. U větších zařízení často dochází k případům, kdy vyrobené teplo není kam uplatnit a jediná šance je jeho transformace na elektrickou energii, po které je přece jen poptávka celý rok stabilnější.

4.2.3 Poptávka po teple

Výstupní pára z turbín, nebo přímo z kotlů, nakonec putuje do sítě CZT k dalšímu využití. Poptávka po teple je uvažována jako známý parametr. Běžně se lze setkat s datovou základnou na měsíční úrovni, která může být pro modely postačující. V některých člancích se dokonce pracuje s modely na roční bázi, ale pro přesnější výsledky je potřeba uchýlit se k bázi týdenní, denní či hodinové. Chyba, která vznikne zanedbáním dat na nižší časové úrovni než měsíční, lze popsat pomocí obr. 15.



Obr. 15 Výkyvy poptávky po teple za jeden měsíc ve zvolené lokalitě

Zelenou čarou je zobrazena průměrná měsíční dubnová poptávka po teple ve vybraném městě ČR. Za předpokladu, že ZEVO je na ni dimenzované, tak představuje zelená čára také maximální možný tepelný výkon, které je zařízení schopno do sítě dodat. To znamená, že zařízení je schopno distribuovat pouze část tepla označenou modře. V tomto případě se jedná o 80 % z celkové měsíční poptávky. Zbylé teplo (označeno žlutě) pak musí dodat jiný zdroj, což znamená jistou finanční ztrátu. Naopak ve druhé části měsíce vzniká finanční ztráta tím, že hodnota reálné poptávky je pod uvažovanou úrovní a zařízení tedy nemůže distribuovat veškeré vyrobené teplo. Tyto nepřesnosti se práce snaží eliminovat přechodem k poptávce na denní bázi, u které nedosahuje chyba tak velkých hodnot (viz červená čára).

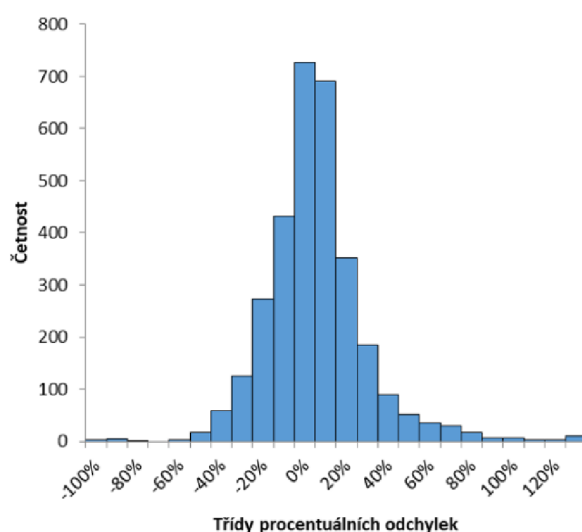
U některých sítí CZT se lze setkat se situací, že nejsou k dispozici hodinová, případně denní data (nedostupnost z důvodu citlivosti dat, nedostatečného měření atd.). Další postup tedy zahrnuje tvorbu odhadu těchto dat, který povede ke zvýšení celkové přesnosti modelu. Zmíněný problém je řešený

pomocí pravděpodobnostních rozdělání, které se snaží simulovat denní průběh poptávky na základě měsíčních průměrů.

ÚPI disponuje daty poptávky po teple na denní bázi z několika reálných provozů. Celkově je k dispozici 3 114 hodnot poptávky ze čtyř lokalit v období 2012–2015. Pro všechna data se vytvořila porovnávací proměnná ω , která je definovaná pomocí (11).

$$\omega = \frac{d^D - d^M}{d^M}, \quad (11)$$

kde d^D , resp. d^M , je denní průměr poptávky po teple získané z denních, resp. měsíčních dat. d^D i d^M jsou hodnoty v GJ/d. Histogram těchto odchylek je vidět na obr. 16.



Obr. 16 Histogram procentuálních odchylek denních dat od měsíčních průměrů

Tvarem se histogram blíží normálnímu rozdělení pouze okrajově a ani po odstranění podezřelých a odlehlých hodnot nedošlo k výraznému zlepšení. Jelikož zmíněná data popisují celý rok, přešlo se k myšlence, že pro každý měsíc se vygeneruje zvlášť jiné pravděpodobnostní rozdělení. Tento přístup se ukázal jako schůdnější, jak nakonec potvrdily i statistické testy normality. Pro většinu měsíců se ukázalo, že data by se dala modelovat pomocí normálního rozdělení, ale v některých měsících byl tento předpoklad bohužel vyvrácen. Je tedy nutné další přezkoumání, zda se jedná pouze o chyby v měření nebo je potřeba přestoupit k jinému pravděpodobnostnímu rozdělení. Prozatím se bude poptávka modelovat normálním rozdělením. Výsledná data poptávky potřebná pro výpočet se poté snadno odhadnou pomocí vztahu (12).

$$d^D = d^M \cdot [1 + N(\mu, \sigma^2)], \quad (12)$$

kde $N(\mu, \sigma^2)$ je normální rozdělení o střední hodnotě μ a směrodatné odchylce σ . V případě, že je potřeba se zabývat lokalitou se sítí CZT, která nedisponuje nebo z jiných důvodů nemohla poskytnout přesnější než měsíční hodnoty poptávky po teple, je možné vygenerovat data na denní bázi převážně pomocí normálního rozdělení. Díky těmto datům se lze vyhnout nepřesnostem způsobeným zanedbáním výkonových špiček/propadů v poptávce po teple.

4.2.4 Náklady, příjmy a investice

Většina z potřebných vztahů pro technický výpočet byla uvedena v předchozích částech, následující text se zabývá jejich propojením s finanční stránkou věci, jejíž výsledkem je očekávaný roční peněžní tok potřebný pro výpočet IRR.

První část tvoří celkové roční náklady, které se dají poskládat do jediného vztahu, viz (13).

$$n = n_{rez} + n_{gas} + n_{chem} + n_{wat} + n_{emp} + n_{rei} + n_{mai}, \quad (13)$$

kde n_{rez} jsou náklady spojené s nakládáním reziduí, n_{gas} jsou náklady na zemní plyn, n_{chem} představuje náklady na chemikálie potřebné pro správnou funkci systému čištění spalin, n_{wat} jsou náklady na vodu, n_{emp} značí náklady na zaměstnance, n_{rei} představuje náklady na potřebné reinvestice v průběhu životnosti a n_{mai} symbolizuje náklady na údržbu ZEVO. Většina nákladů je vztažena na jednotku zpracovaného odpadu x , viz rovnice (14).

$$n_{rez} + n_{gas} + n_{chem} + n_{wat} = x \cdot (0,236 \cdot \varphi_{rez} + 2 \cdot \varphi_{gas} + \varphi_{chem} + 0,6 \cdot \varphi_{wat}), \quad (14)$$

kde φ pro indexy $rez, gas, chem, wat$ vyjadřují ceny za jednotku dané komodity. Náklady na zaměstnance jsou dány vztahem (15).

$$n_{emp} = 12 \cdot b \cdot \varphi_{zam}, \quad (15)$$

Kde φ_{zam} jsou měsíční náklady na jednoho zaměstnance a b je počet zaměstnanců potřebný na provoz zařízení definovaný vztahy (16) a (17). Počet zaměstnanců vychází z kapacity zařízení C .

$$b = 0,07 \cdot C + 13,3 \text{ pro } C \leq 80, \quad (16)$$

$$b = 52 \text{ pro } C > 80. \quad (17)$$

Náklady na reinvestice jsou stanoveny procentuálně k celkové počáteční investici a týkají se pouze některých let, takže jejich vztah lze vyjádřit pouze k danému roku (Ucekaj, 2010). Stejně tak i výše nákladů na údržbu je definována procentuálně, ale její výše se dělí podle toho, zda se jedná o stavební část nebo o část strojní. Hodnota stavební části, ze které se odvozují náklady na údržbu zařízení, zůstává konstantní, zatímco hodnota strojní části je zvyšována reinvesticemi, které byly do té doby provedeny.

Druhá část zahrnující finance je příjmová, opět je možno zapsat celkové roční příjmy pomocí jediného vztahu, viz vztah (18).

$$p = p_{scr} + p_{was} + p_{heat} + p_{el}, \quad (18)$$

kde p_{scr} jsou příjmy za prodej železného šrotu, p_{was} za zpracování odpadu, p_{heat} za prodej tepelné energie v podobě páry či horké vody a p_{el} za prodej elektrické energie. Po rozepsání (18) se dojde ke vztahům (19) až (21).

$$p_{scr} + p_{was} = x \cdot (0,06 \cdot \varphi_{scr} + \varphi_{was}), \quad (19)$$

$$p_{heat} = y^{HU} \cdot \varphi_{heat}, \quad (20)$$

$$p_{el} = e \cdot \varphi_{el}, \quad (21)$$

kde φ pro indexy $scr, was, heat, el$ vyjadřují cenu za jednotlivé komodity a y_{HU} vyjadřuje množství páry, která putuje ke spotřebitelům (HU – heat user).

Celkový tok peněz CF jde tedy vyjádřit prostým rozdílem příjmů a nákladu. Jediné, co je potřeba dopočítat, aby mohlo být vyjádřeno IRR, je celková investice potřebná na výstavbu zařízení, viz (22).

$$I = I_B + I_{TG} + I_S + I_C, \quad (22)$$

kde celková investice I se skládá z investice potřebné na kotel I_B , turbínu I_{TG} , bunkr ke skladování odpadu I_S a další potřebné investice I_C . Investice I_B, I_{TG}, I_S jsou uvedeny zvlášť, jelikož parametry kotle, turbíny a bunkru nejsou nutně vázány na kapacitu, i když ze zvolené kapacity vyplývá jejich jisté

doporučení. Investice I_C zahrnují například samotnou stavbu zařízení, systém na čištění spalin a další náklady, které se přímo vztahují ke kapacitě, a proto jsou uvedeny takto souhrnně.

Nyní už se lze vrátit k výpočtu IRR (kap. 4.1), kde se akorát CF_T nahraní rozdílem nákladů a příjmů ze vztahů (13) a (18) pro každý rok provozu.

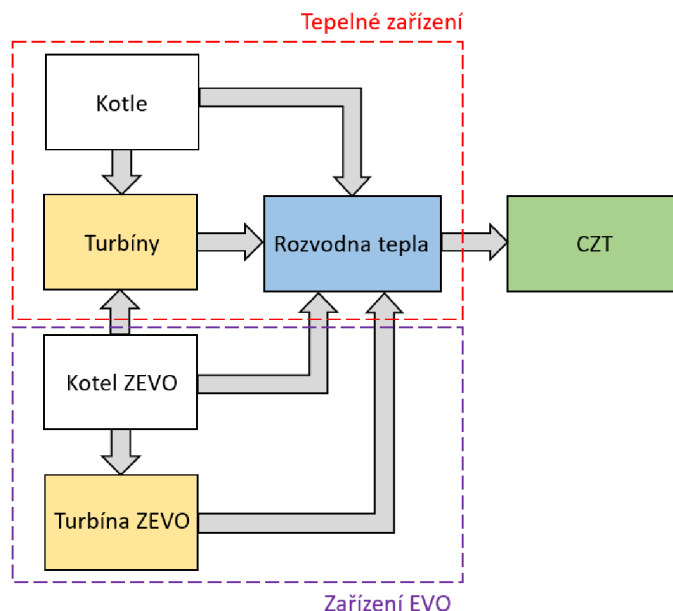
Problémy při modelování jsou velmi často způsobeny nedostatečnou datovou základnou. Při pohledu na všechny dosavadně sepsané vztahy tvoří největší problém získání následujících dat: výhřevnost odpadu, cena za zpracování odpadu, cena za prodej tepla.

Výhřevnost odpadu a její predikce je získána z nástroje JUSTINE. Cena za zpracování neboli cena na bráně ZEVO, je určena z výsledků nástroje NERUDA. Poslední špatně určitelnou hodnotou je cena tepla. Doposud se volila na základě expertních odhadů a konzultací přímo s danou lokalitou. Součástí této práce je navrhnout nástroj na její určení. Vzhledem k tomu, že se neuvažuje, že by vzniklo ZEVO doslova na zelené louce bez napojení na CZT, byl vyvinut postup na její výpočet využívající znalosti tepelného zařízení, které stojí v potenciálním místě budoucí výstavby ZEVO.

4.3 Výpočet ceny tepla

V této fázi už se kalkuluje s dalším tepelným zařízením. Pro výpočet stačí uvažovat pouze velmi zjednodušeně, že zařízení je vybaveno určitým počtem kotlů, turbín a má definovanou síť CZT s danou poptávkou. K této síti se připojí ZEVO. Zjednodušené schéma obecného propojení tepelného zařízení a ZEVO je zobrazeno na obr. 17.

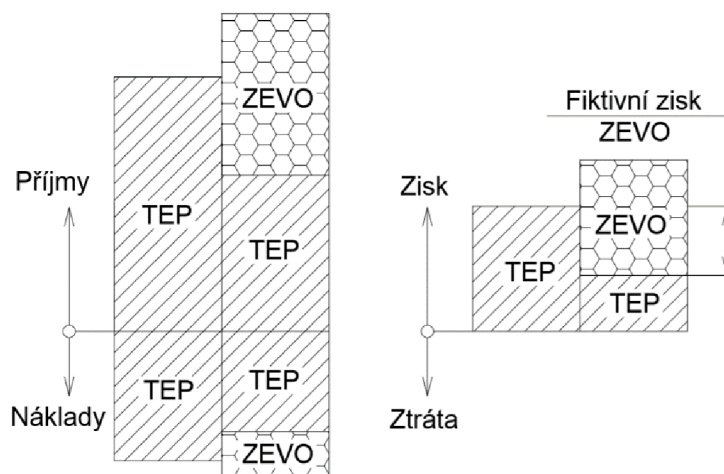
Je potřeba přesně definovat, zda ZEVO bude využívat turbíny patřící k jinému tepelnému zařízení nebo bude používat pouze svoji turbínu. Pokud je k dispozici více sítí CZT, je nutné vymezit, do které z nich bude ZEVO dodávat teplo (například z pohledu parametrů páry). Veškerá pára, kterou ZEVO vyrobí, však putuje do CZT přes rozvodnu tepelného zařízení, které ji až poté posílá dále. Cena tepla, která je cílem tohoto výpočtu, není ta pro konečného spotřebitele, ale jedná se o cenu na patě ZEVO. Jde tedy o vyjádření hodnoty, kterou si ZEVO může za prodej tepla nárokovat.



Obr. 17 Schéma připojení ZEVO k jinému tepelnému zařízení

Princip celého výpočtu tkví v myšlence přerozdělení zisku. Při připojení ZEVO přijde původní tepelné zařízení o část poptávky po teple. Zároveň se mu ale sníží variabilní náklady v podobě spotřebovaného paliva a obecně sníženým provozem kotlů. Většinou ušetřené náklady bývají na podstatně nižší úrovni

než ztracené příjmy za prodané teplo. Celkový ušlý zisk tedy musí být kompenzován ZEVO. Zobrazení principu je na obr. 18.



Obr. 18 Výnosy/náklady a zisk/ztráta samostatného tepelného zařízení (TEP) a jeho koexistenci se ZEVO (Janošák, 2016)

Jak je vidět z obrázku, tak při stejné ceně tepla, za jakou ji prodává tepelné zařízení, by pro ZEVO vznikl relativně velký zisk, který však jde rozdělit do dvou částí. Jedna popisuje reálný zisk ZEVO a druhá musí být odevzdána tepelnému zařízení (fiktivní zisk, viz obr. 18), aby byla zachována jeho ekonomická neutralita. Společně s kolegy na ÚPI byl vyvinut nástroj, který se snaží spočítat reálný zisk ZEVO (Janošák, 2018).

Úloha se skládá ze dvou částí. V první části se spočítá celkový zisk z prodeje tepla dosavadního zařízení a následně se spočítá zisk pro společný chod zařízení se ZEVO. Podstata spočívá v tom, že se počítají pouze variabilní náklady spojené s výrobou potřebného tepla a elektřiny, viz rovnice (23).

$$n_{var} = n_{tep} - p_{el}, \quad (23)$$

kde p_{el} , jsou stejně jako u ZEVO příjmy za prodej elektřiny a n_{tep} jsou variabilní náklady spojené s výrobou tepla z kotlů tepelného zařízení (např. zemní plyn, černé uhlí).

Následně se výpočet opakuje s připojeným ZEVO. Příjmy za elektřinu jsou doplněny o člen zahrnující vyrobenou elektrickou energii ZEVO. Člen nákladů n_{var} se snižuje, jelikož část poptávky po teple převzalo ZEVO. Je důležité přesně zjistit, o jakou část se jednalo, jelikož je možné, že podmínka minimálního výkonu kotlů tepelného zařízení způsobí, že společně se ZEVO vyrobí více tepla, než je poptávka po něm. Potom by mělo dojít k tomu, že upřednostňováno bude teplo z tepelného zařízení. Současně se tedy uvažuje fiktivní CZT pro modelování přebytků tepla, tzv. jeho maření.

Kromě možného toku páry ze ZEVO na turbíny případně do rozvodny tepla je zavedeno další fiktivní CZT, do kterého může dodávat pouze ZEVO. Aby bylo toto fiktivní zakončení skutečně využíváno, je ve výpočtu zhodnoceno fiktivní cenou za teplo. Tato fiktivní cena má tak nízkou úroveň, že nedojde ke zkreslení výsledků v podobě dodávky tepla. Avšak i tato úroveň stačí na to, aby byl tok využíván. To znamená, že do předchozího vztahu přibude nový člen, viz rovnice (24).

$$p_{fikt} = d_{fikt} \cdot \varphi_{fikt}, \quad (24)$$

kde d_{fikt} je proměnná vyjadřující kolik tepelné energie vyrobené ZEVO bylo zmařeno ve fiktivním toku a φ_{fikt} je fiktivní prodejní cena za tuto energii. Tímto způsobem se spočítají náklady z první a druhé části (n_{var}^{TEP} a n_{var}^{ZEVO}), které se následně odečtou, viz vtaž (25):

$$n_{dif} = n_{var}^{TEP} - n_{var}^{ZEVO} = p_{el} - p_{el}^{ZEVO} - n_{tep} + n_{tep}^{ZEVO} - d_{fikt} \cdot \varphi_{fikt}. \quad (25)$$

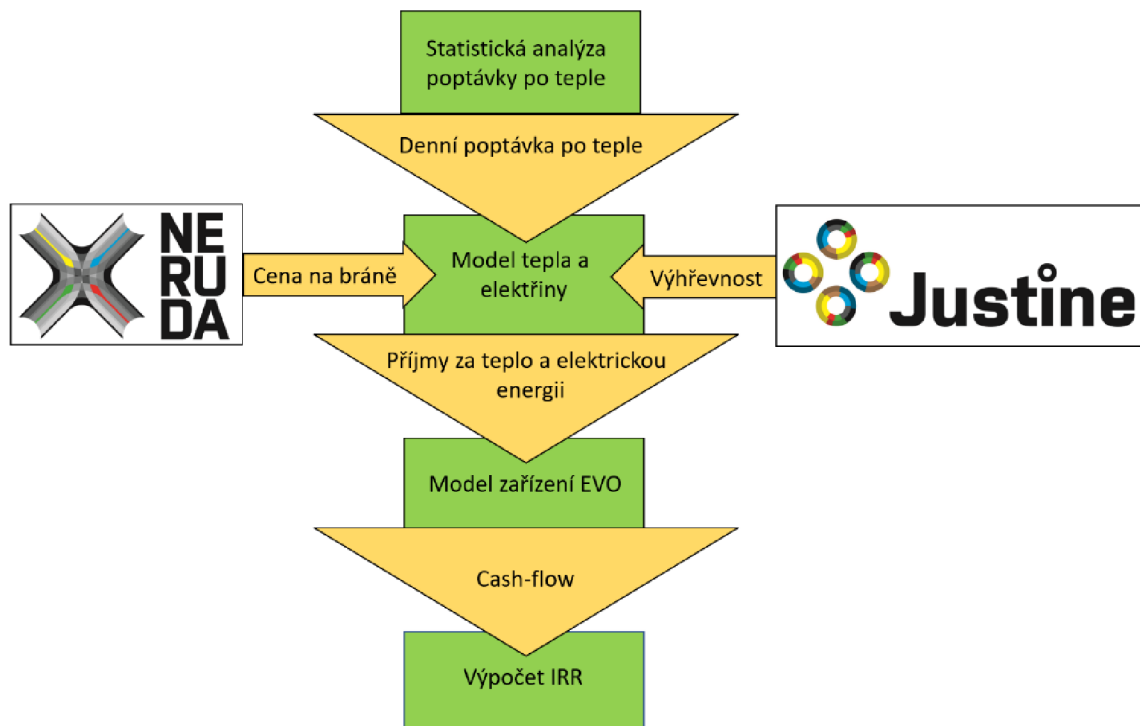
Po eliminaci nereálného příjmu vzniklého fiktivním CZT se dojde k hodnotě n_{dif} , která přesně popisuje zisk za teplo a prodanou elektřinu, který si může ZEVO nárokovat. V případě, že je potřeba dopočítat cenu tepla na patě ZEVO, stačí využít vztah (26).

$$\varphi_{heat,ZEVO} = \frac{n_{dif}}{y_{ZEVO}^{HU}}, \quad (26)$$

kde y_{ZEVO}^{HU} vyjadřuje množství páry, která byla dodána ze ZEVO do reálného CZT. Pro účely této práce je však postačující znát hodnotu n_{dif} . Z přístupu lze vidět, že není potřeba znát cenu tepla, za kterou tepelné zařízení teplo poskytuje. Jedná se zde o úsporu v podobě nákladů na palivo tepelného zařízení.

4.4 Technicko-ekonomický model kooperace zařízení

V následující kapitole bude podrobně rozepsáno celkové schéma výpočtu IRR pro ZEVO, které se plánuje připojit ke stávajícímu teplárenskému zařízení. Schéma výpočtu je zobrazeno na následujícím obr. 19. Více o nástrojích NERUDA a Justine je uvedeno v příloze této práce.



Obr. 19 Výpočtové schéma celého modelu

Princip spočívá v odhadu poptávky po teple, která se převede na denní průměry (viz sekce Poptávka po teple v kap 4.2). Pokud se jedná o data na bázi kratších časových úseků (hodiny, dny, týdny), pak se jedná o elementární úlohu. Pokud jsou data dostupná pouze za delší časové úseky, pak je potřeba přistoupit k odhadu pomocí statistického rozdělení. Dále se za pomoci dostupných nástrojů NERUDA a Justine odhadne cena na bráně a výhřevnost odpadu (viz sekce Náklady, příjmy a investice v kap. 4.2). Pak se přechází k modelu tepla a elektřiny, který zahrnuje veškeré informace o tepelném zařízení (počet kotlů, typ paliva, cena paliva, počet turbín a jejich výkonové křivky, viz sekce Parní kotel a Turbíny z kap. 4.2) a rovněž se zvolí možná kapacita ZEVO. Výsledkem je hodnota n_{dif} , která je složena z příjmů za elektrickou a tepelnou energii, kterou si může ZEVO nárokovat (viz kap. 4.3). Tato hodnota je potom vstupní do modelu ZEVO, kde už jsou brány v potaz veškeré vztahy zmíněné dříve (kap. 4.2, kap. 4.3). Výhodou je, že hodnota n_{dif} nahradí součet $p_{heat} + p_{el}$, takže není třeba ho znovu

v modelu uvažovat. Výsledkem jsou peněžní toky v jednotlivých letech, které vstupují do výpočtu IRR. Matematický zápis modelu je podrobně popsán v dizertační práci.

4.5 Hodnocení rizik potenciálního projektu

Veškeré výpočty jsou postaveny pouze na předpokladech vývoje budoucí situace. Odhad budoucího vývoje na takovou dobu, jako je životnost celého zařízení, je téměř nemožný, proto se při modelování přistupuje k tzv. stochastickému programování, kde stochastickou proměnnou jsou právě nejistoty v podobě poptávky po teple, ceny energií atd. Podrobně se problematikou stochastického programování zabývá (Kall, 1994).

V případě optimalizace provozu ZEVO se maximalizuje zisk. Neznámé jsou kapacita zařízení, typ kotle, počet turbín a jejich hltnost, ale také množství páry vyrobené v kotli a jeho rozvod na turbíny či ke spotřebitelům, případně množství odpadu dávkované na spalovací rošt. Stochastická proměnná (vektor) v podobě náhodné veličiny ξ představuje poptávku po teple, cenu za elektrickou energii, množství svezeneho odpadu apod. Jedná se tedy o úlohu stochastického programování, která se řeší zpravidla metodou HN nebo WS, které byly lehce představeny v kapitole 3.2. Z této kapitoly také vyplývá, že je vhodné se uchýlit spíše ke scénářovému přístupu WS.

Komplikace zmíněného přístupu nastávají při definování možných scénářů. Po důkladné analýze současné situace a budoucího vývoje je možnost určit o jaké scénáře se bude jednat, ale krizovým místem je stanovení pravděpodobnosti, s níž nastanou. Otevírají se sice možnosti v podobě ekvidistantního nastavení pravděpodobnosti, ale po interpretaci na danou problematiku se jeví značně nevhodné. Podrobněji jsou scénáře rozebrány v kapitole 4.6.

4.6 Scénáře

Výše definovaná problematika se týká pouze jednoho scénáře. Takový výpočet by byl vhodný jen v případě, kdy jsou známy přesné informace o budoucím vývoji a zároveň je předem daná kapacita ZEVO. Ve vazbě na kapitolu 4.5, se tedy jedná o druhý stupeň stochastického programování. V mnoha případech se však neřeší problematika, jak správně řídit provoz ZEVO, aby bylo dosaženo co největšího zisku, ale problematika, jakou kapacitu zvolit. Navíc se objevuje nejistota v budoucím vývoji výhřevnosti odpadu, ceny a poptávky po teple nebo dostupnosti odpadu.

Nejdůležitějším krokem při volbě scénářů je jejich definice. To znamená určení parametrů, u kterých je do budoucna velice těžké předpovědět jejich vývoj, a tedy se odhadnuté hodnoty mohou lišit natolik, že tato změna bude mít zásadní vliv na výslednou ekonomiku a provoz. Na základě dosavadních zkušeností byly vybrány jako nejdůležitější parametry: výhřevnost, výše skládkovacího poplatku, cena za elektrickou energii a poptávka a cena po teple.

U všech zmíněných parametrů se předpokládá konečný počet realizací. Tedy při výpočtu by se dalo postupovat podle vztahu dle scénářového přístupu, ale je potřeba definovat pravděpodobnost s jakou daný parametr bude nabývat určité hodnoty. Definovat tuto hodnotu je u mnoha z nich složité. Často se proto používá ekvidistantní dělení pravděpodobnosti, což může vést ke značnému zkreslení odhadu.

Proto tato práce přichází s přístupem plné enumerace všech navržených scénářů, i když to značně zvýší výpočtovou náročnost. V rámci této práce byl ve spolupráci s kolegy ÚPI vytvořen výpočtový nástroj HPPC (heat-and-power plants cooperation) (Janoščík, 2018), jehož podstata a tvorba byla představena v kapitole 4. Taktéž došlo k vývoji nástroje Parallel GAMS (Janoščík, 2019), který umožňuje vhodně rozdělit výpočty scénářů na jednotlivá jádra procesoru a počítat je paralelně, což výrazně snižuje výpočetní čas u představené úlohy.

5 ZÁVĚR

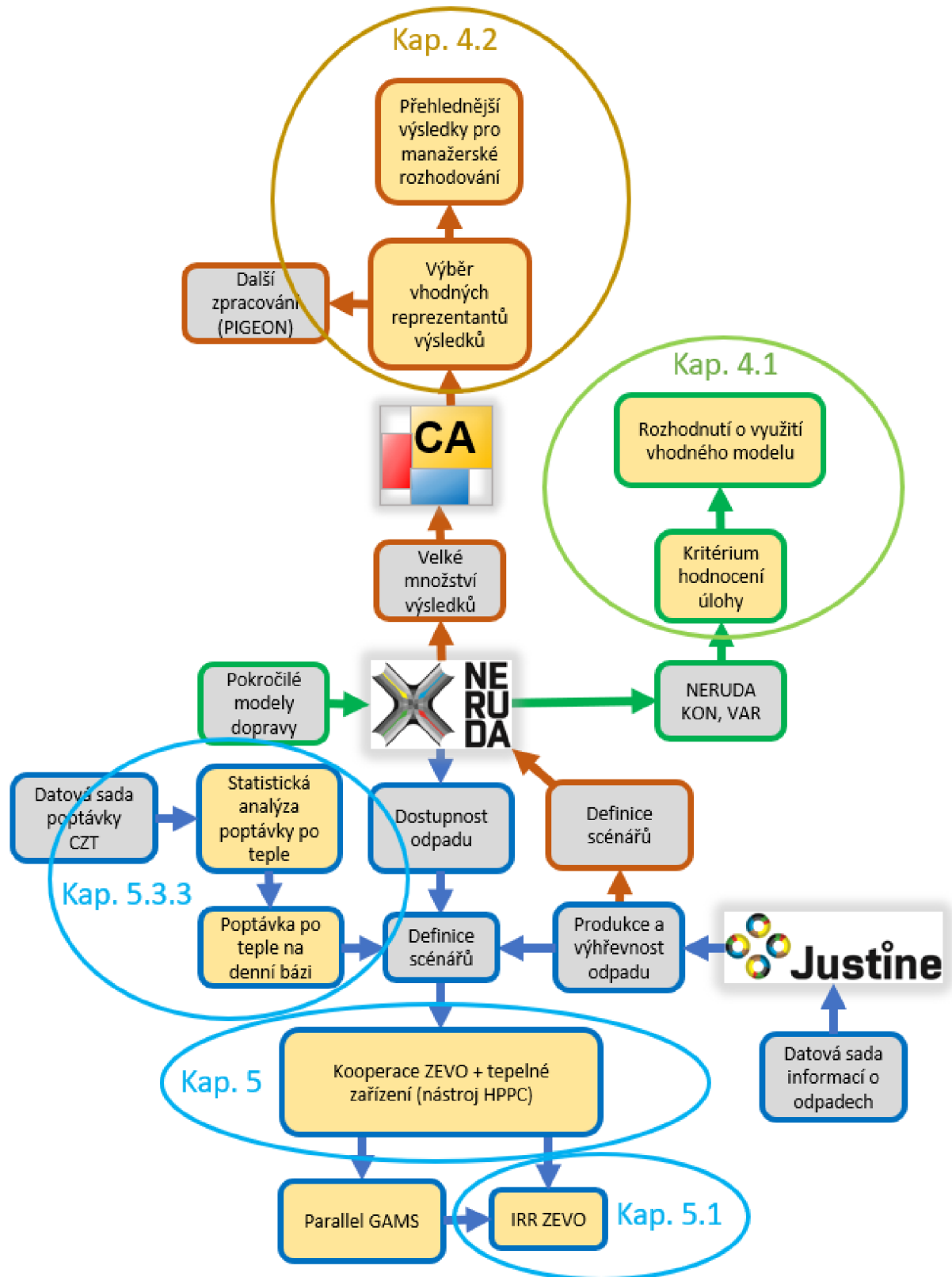
V této dizertační práci byl představen příspěvek autora v aktuální problematice OH, který spočívá ve využití znalostí operačního výzkumu pro vývoj prakticky použitelných výpočtových nástrojů pro koncepční plánování a hodnocení ekonomické udržitelnosti vybraných systémů nakládání s odpady. Byly zde popsány dva základní problémy.

První rozšiřuje dlouhodobě vyvíjený nástroj NERUDA a zahrnuje dva dílčí podproblémy. Oba se týkají dopravní úloh. Jejich důležitým výstupem je cena definovaná pro jednotlivé producenty odpadu. Bohužel řešení dopravní úlohy nástrojem NERUDA z tohoto pohledu nedává jasné řešení (víceznačnost). Modelově totiž dochází v jednotlivých uzlech ke stékání a roztékání toků odpadu, tím se ztrácí informace o celkovém toku odpadu od producenta ke zpracovateli. Pro odhad variability výsledků (míra víceznačnosti) byl navržen nástroj PIGEON. Jeho výpočet je poměrně náročný a při úlohách obsahující více scénářů ho není možné aplikovat na všechny, viz hnědá větev na obr. 20. Snížení rozsahu této úlohy je možné důkladnou analýzou výsledků NERUDA a jejich rozřazením do určitých skupin. V rámci této práce byl představen přístup rozřazení pomocí shlukové analýzy. Za pomoci nástroje CAO je zde ilustrován podrobný postup vytvoření shluků a jejich následná kvalifikace, viz kap. 3.2. Rozdělení na jednotlivé shluky je v některých případech nevhodné, zvláště pokud se jedná o rozsáhlé úlohy, ale v mnoha případech se jeví jako vhodný prostředek ke snazší interpretaci výsledků či jejich využití v jiných výpočetních nástrojích.

Další představený typ úlohy je taktéž spjatý s výpočtovým nástrojem NERUDA. V minulých letech došlo k významným pokrokům z hlediska vývoje technickoekonomických modelů dopravy. V rámci nich lze vyčíslit cenu za dopravu komplexnějším způsobem. Její implementace do modelu není jednoduchá, a proto je potřeba analyzovat, zda její využití přinese významný vliv na konečné výsledky. Aplikace přesnějšího modelu dopravní ceny do nástroje NERUDA vyžadovala jeho modifikaci. V práci byla definována modelová úloha, na které byl demonstrován vliv modifikace nástroje NERUDA na výpočetní čas a výsledky, viz kap. 3.1 (zelená větev na obr. 20). Ukázalo se, že výpočtová náročnost narostla a v některých případech došlo k výrazné změně výsledků. U výsledků, ve kterých ke změně nedošlo, není potřeba přecházet k modifikovanému nástroji NERUDA. Autor v této práci navrhnul postup, kterým lze tyto případy identifikovat a již před výpočtem se vhodně rozhodnout jakou variantu nástroje NERUDA použít.

Druhý problém, který byl v práci popsán, se týká modelování koncepce nového ZEVO integrovaného do existujícího teplárenského zdroje, viz modrá větev na obr. 20 (kap. 4). Výstupem je nástroj pro plánování integrace ZEVO do sítí CZT a komplexní posouzení potenciálu uplatnění vyrobeného tepla, které má výrazný vliv na jeho ekonomiku. Nástroj je schopen posoudit dosavadní stav teplárenského provozu a možnosti integrace ZEVO. V návaznosti na to definuje změnu v provozních podmínkách, která tím nastane. To mimo jiné znamená, že se model dá použít i pro analýzu současného provozu s následným doporučením změn samostatných teplárenských systémů bez integrace ZEVO. V práci byl popsán postup při vytváření vhodného modelu a představeny přístupy k možným vyhodnocení výsledků. Byly zde zmíněny možnosti stochastického programování HN a WS, které se však z hlediska robustnosti řešení nemusí jevit jako nejvhodnější. Doporučen byl přístup plné enumerace v rámci zvolených scénářů, který vyžaduje kvalitní výpočtový nástroj s dostatečnou přesností, ale zároveň není výpočtově náročný. V rámci této práce byla vytvořena první verze takového nástroje. Vzhledem k jeho výpočtové náročnosti bylo využito možné dekompozice úlohy na dílčí celky, které potom mohly být řešeny paralelně.

Pro snadnější paralelizaci výpočtu byl vytvořen nástroj Parallel GAMS, který zajistí optimální rozložení úloh na jednotlivá jádra procesoru a výrazně zredukuje výpočtovou náročnost celé úlohy.



Obr. 20 Schéma dizertační práce

6 LITERATURA

BOHM, Robert A., David H. FOLZ, Thomas C. KINNAMAN a Michael J. PODOLSKY, 2010. The costs of municipal waste and recycling programs. *Resources, Conservation and Recycling*. **54**(11), 864-871. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2010.01.005

ČR. *Zákon č. 541/2020 Sb. ze dne 23.12.2020 o odpadech*. 2020

GREGOR, J. Pokročilé modely logistiky v odpadovém hospodářství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 180 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

HAIR, Joseph F., William C. BLACK, Barry J. BABIN a Rolph E. ANDERSON, 2010. *Multivariate Data Analysis*. 7th Edition. New York: Pearson. ISBN 978-0138132637.

HOORNWEG, Daniel a Perinaz BHADA-TATA, 2012. *What a waste: a global review of solid waste management*. Urban development series. Knowledge papers no. 15. Washington, D.C.: World Bank.

JANOŠŤÁK, F. Aplikace optimalizace pro návrh subsystémů energetických celků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 23 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

JANOŠŤÁK, F. Modely toků v síti pro odpadové hospodářství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 43 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

JANOŠŤÁK, František, PUTNA, Ondřej a Martin PAVLAS, 2018. V020 HPPC; *Tool for investment project optimization and operation optimization with focus on efficient energy utilization*. web Ústav proceňování inženýrství www.upi.fme.vutbr.cz. URL: <http://upi.fme.vutbr.cz/>. (software)

JANOŠŤÁK, František, TALPA, Jaroslav, PAVLAS, Martin, ŠOMPLÁK, Radovan a Jiří GREGOR, 2019. CO & PG; *Softwarová implementace redukčních technik pro wait and see přístup*. web Ústav proceňování inženýrství http://www.upi.fme.vutbr.cz/media/software/dms_spetep_wp1_r1.rar. URL: <http://upi.fme.vutbr.cz/>. (software)

KALL, Peter and Stein W. WALLACE. *Stochastic Programming*. 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 1994, 326 p. ISBN 978-0471951087.

Municipal waste statistics, 2021. *Eurostat: Statistics Explained* [online]. [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics

ONDERLIČKA, T. Aplikace shlukové analýzy na reálných datech: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav matematického inženýrství, 2016. 35 s. Vedoucí práce RNDr. Libor Žak, Ph.D.

ROUSSEUW, Peter J., 1987. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. **20**, 53-65. ISSN 03770427. Dostupné z: doi:10.1016/0377-0427(87)90125-7

Sjednocení technické a roční kapacity ZEVO Malešice, 2019. Cenia [online]. [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUIBX01aUDQ4M196YXBpczFWUERPQ181MTg3NDU0OTQ3ODQ0MDQxNzAwLnBkZg/MZP483_zapis1VP.pdf

SZÁSZIOVÁ, L. Analýza interakcí v odpadovém hospodářství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 93 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

ŠOMPLÁK, Radovan, Martin PAVLAS, Jiří KROPÁČ, 2015. Projekt MŽP s názvem Návrh optimální sítě zařízení k nakládání s odpady v rámci celé ČR včetně stanovení potřebných kapacit těchto zařízení ve všech krajích, příloha 1.1.2 Návrh optimální sítě zařízení v krajích a v ČR, EY Česká republika, 2015.

ŠOMPLÁK, Radovan, Martin PAVLAS, Vlastimír NEVRLÝ, Michal TOUŠ a Pavel POPELA, 2019. Contribution to Global Warming Potential by waste producers: Identification by reverse logistic modelling. *Journal of Cleaner Production*. **208**, 1294-1303. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.165

UCEKAJ, V. Analýza možností nakládání s komunálními odpady v rámci mikroregionu. Brno, 2010. 153 s. Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

Waste-to-Energy Resource Recovery, 2010. *Earth habitat* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://earthhabitat.wordpress.com/2010/02/25/waste-to-energy-resource-recovery-plant-in-broward-county-florida/>