

Prehľad environmentálnych modelov, ktoré riešia problematiku prepravy

Overview of environmental models that solve the problem of transportation

Monika Ferenčáková¹

Abstrakt

V súčasnej dobe je environmentálny dopad prepravy tovaru kľúčovým aspektom efektívneho riadenia logistiky. Reverzná logistika, ako proces znovuzískavania a spracovania použitých materiálov, zohráva významnú úlohu v oblasti znižovania odpadov a minimalizácie negatívneho dopadu na životné prostredie. Tento článok sa zaoberá prehľadom vybraných environmentálnych modelov, ktoré riešia problémy spojené s prepravou v rámci reverznej logistiky. Analyzujeme rôzne prístupy, ako sú okružné úlohy s obmedzenou kapacitou a variabilnými podmienkami, pričom sa zameriavame na optimalizáciu trás a minimalizáciu emisií. Diskutujeme aj o súčasných trendoch a výzvach v oblasti výskumu, s cieľom podporiť udržateľné logistické riešenia a prax.

Kľúčové slová

Reverzná logistika, problém prepravy, životné prostredie

Abstract

In today's day and age, environmental consideration of the transport of goods is a key aspect of effective logistics management. Reverse logistics, as the process of recovering and processing used materials, plays a significant role in reducing waste and minimizing the negative impact on the environment. This article discusses an overview of selected environmental models that solve the problems associated with reverse logistics transportation. We analyse different approaches, such as round-trips with limited capacity and variable conditions, focusing on route optimization and minimizing emissions. We also discuss current trends and challenges in the field of research, in order to promote sustainable logistics solutions and practices.

Key words

Reverse logistics, vehicle routing problem, environment

JEL classification

R41, Q52

1 Úvod

Keďže znižovanie odpadu sa stáva hlavným problémom vo väčšine krajinách, koncept reverzných materiálových cyklov postupne nahrádza „jednosmerné“ vnímanie ekonomiky. Reverzná logistika je proces znovuzískavania recyklovateľných materiálov a odpadov z miesta spotreby alebo použitia na opravu, prepracovanie alebo zneškodnenie. Cieľom reverznej logistiky je okrem reklamácie, opravy, opätovného použitia aj recyklácia alebo likvidácia v zmysle platných predpisov a smerníc ekologicky žiaducim spôsobom. (Gežík, 2012)

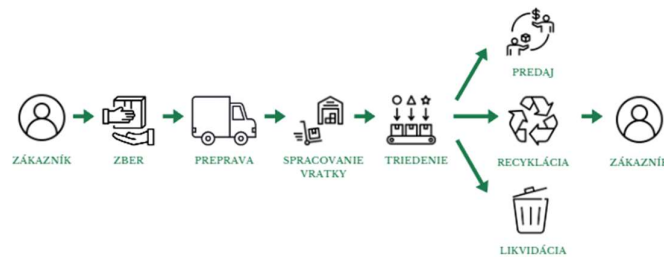
¹ Ekonomická univerzita v Bratislave, Fakulta hospodárskej informatiky, Katedra operačného výskumu, Dolnozemska cesta 1, 852 35 Bratislava, monika.ferencakova@euba.sk.

Je podmnožinou podnikovej logistiky ako vednej disciplíny, od ktorej sa odčlenila v 90. rokoch a vyvíja sa dodnes. Jej hlavné úlohy sú zber, preprava, triedenie, demontáž a spracovanie použitých výrobkov, s cieľom nájsť im nové využitie, pričom sa dbá na ekologický a ekonomický prínos. Ide o proces zasielania nechceného tovaru od zákazníka späť k výrobcovi a teda začína tam, kde mala logistika skončiť. (Škapa, 2005)

Denne smeruje veľká časť tovaru od kupujúcich späť k výrobcovi. Vzniká množstvo obalového odpadu a znehodnoteného tovaru. Zákazníci požadujú rýchle vrátenie, výmenu alebo vybavenie reklamácie a súčasne očakávajú od podnikov minimalizáciu dopadu spomínaného procesu na životné prostredie.

Analýza jednotlivých prvkov reverznej logistiky sa dostáva do popredia nie len ako súčasť manažérskeho rozhodovania ale aj ako téma minimalizácie nákladov a environmentálnych otázok. Problematike sa okrem samotných podnikov vo veľkej miere venuje aj Európska únia, ktorá prostredníctvom grantov podporuje výskum u oblasti ekológie, riadenia spätných tokov a celkovej recyklácie. Tento článok je zameraný na časť reverznej logistiky, ktorá sa venuje problémom riešiacich prepravu.

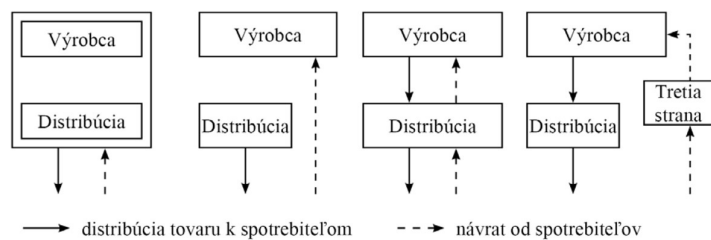
Obr. 1: Reverzná logistika



Zdroj: Vlastné spracovanie

Je viacero možností ako sa produkt môže dostať od zákazníka späť do výroby. V tomto procese môže byť zapojených niekoľko subjektov avšak počiatkový a konečný uzol je vopred stanovený. Na obrázku nižšie sú uvedené 4 typy možnej realizácie tohto procesu:

Obr. 2: Typy realizácie spätného toku do výroby



Zdroj: Gežík, 2023

Okružné úlohy sú NP ťažké problémy logistického plánovania, ktoré sa zaoberajú optimalizáciou trás alebo ciest, ktoré prechádzajú cez množstvo bodov alebo uzlov a vracajú sa naspäť do pôvodného bodu. Sú istým priesečníkom bin packing problému a úlohy obchodného cestujúceho. V rámci reverznej logistiky to v praxi znamená, že tieto úlohy v reverznej logistike riešia presun od zákazníkov smerom do výroby. Tieto úlohy orientované na klasickú distribúciu a reverznú logistiku nie sú veľmi odlišné. Jediným rozdielom je smer posunu, teda či sa jedná o distribúciu alebo zber.

Medzi najznámejšie formulácie okružných úloh patria:

- úloha o obchodnom cestujúcom – nájdenie najkratšej cesty medzi všetkými miestami v dopravnej sieti pri minimalizácii počtu najjazdených kilometrov, pričom ich kapacita je neobmedzená.

- úloha čínskeho poštára – nájdenie najkratšej cesty po všetkých komunikáciách v dopravnej sieti pri minimalizácii počtu najjazdených kilometrov,

- úloha rozvozu, resp. zvozu materiálu (ang. Vehical routing problem) – nájdenie najefektívnejšieho rozvozu, resp. zvozu materiálu z centra do miest odberu tovaru pri dodržaní kapacitných ohraničení. (Mieresová , 2013)

Rozvozený problém, známi aj pod názvom Vehical routing problem (VRP), je jedným z najviac študovaných tém o oblasti operačného výskumu. Jedná sa o kombinatorický optimalizačný problém, ktorý vznikol ako generalizácia problému obchodného cestujúceho. Jeho úlohou je nájsť také minimálne trasy vozidla optimálne trasy vozidla tak, aby bol každý vrchol grafu navštívený práve raz a vozidlo ukončilo trasu v rovnakom stredisku, z ktorého trasu začalo, pričom musia byť dodržané vopred známe kapacitné obmedzenia vozidiel. (Čičková 2013)

Cieľom je doručenie tovaru z centrálnych depo na zákazníkov alebo v prípade reverznej logistiky zber tovaru od zákazníkov späť do výroby, pri minimalizácii celkových nákladov na prepravu. S minimalizáciou nákladov na prepravu je spojených viacero vedľajších cieľov ako je minimalizácia dopadu na životné prostredie či zvýšenie rýchlosti procesu vrátenia tovaru a zlepšenia zákazníckeho servisu.

Riešenie problému VRP je náročné kvôli ich NP-ťažkosti, čo obmedzuje efektívnosť matematických metód na riešenie väčších problémov. Z tohto dôvodu sa často využívajú heuristiky a metaheuristiky v praktických aplikáciách, pretože reálne problémy môžu mať obrovský rozsah (napr. zber stoviek vratných tovarov z desiatok domácností, či zberných miest s množstvom vozidiel a obmedzeniami). (Braekers, Ramaekers, Nieuwenhuys, 2016)

Rozšírené verzie VRP zahŕňajú viaceré varianty, ktoré sa snažia reflektovať rôzne reálne podmienky doručovacieho procesu. (Škerlíková, 2012)

Medzi tieto varianty radíme:

- Okružné úlohy s limitovanou kapacitou vozidiel (Capacited VRP),
- Okružné úlohy s viacerými distribučnými centrami (Multi - depot VRP),
- Periodické okružné úlohy (Periodic VRP),
- Okružné úlohy s možnosťou rozdelenia dodávky (Split delivery VRP),
- Okružné úlohy s náhodnými prvkami (Stochastic VRP),
- Okružné úlohy s doručovaním a následným zberom (VRP with backhauls),
- Okružné úlohy s možnosťou vrátenia tovaru (VRP with pick-up and delivering),
- Okružné úlohy s časovými obmedzeniami (VRP with time windows).

2 Vybrané environmentálne modely z oblasti prepravy

Klasickým príkladom rozšírenia úlohy VRP je bežný **kapacitný VRP** (ang. Capacitated Vehicle Routing Problem – CVRP), kde každé vozidlo má jednu trasu, presne stanovenú jeho kapacitu a existuje len jedno depo. (Praveen, Keerthika, Sivapriya, Sarankumar, Boddu, Bhasker, 2022)

Jeho cieľom je nájsť práve tie trasy, pri ktorých sa minimalizujú náklady na prepravu a súčasne neprekračuje kapacita vozidla, ktoré obsluhuje danú trasu. Tento problém má množstvo variantov a komplexných vylepšení, ktoré sa snažia riešiť rôzne reálne problémy s doručovaním a logistikou. Jednou z týchto variant sú Environmentálne okružné úlohy s obmedzenou kapacitou, ktorých cieľ je smerovaný k minimalizácii emisií CO₂, vypúšťaných do ovzdušia pri preprave.

Modifikácia bežného **CVRP s dôrazom na zníženie emisií CO₂** sa odlišuje vo svojom hlavnom cieľovom kritériu. Namiesto zamerania sa na celkovú prejdenú vzdialenosť vozidlami alebo dobu jazd, nový cieľ je minimalizácia emisií CO₂ a označujeme ho ako EVRP (ang. Emissions Vehicle Routing Problem – Vehicle Category). Tento prístup berie do úvahy, že spotreba paliva závisí od celkovej hmotnosti vozidla počas jazdy, ich maximálnej nosnosti, a účinnosti spotreby paliva. (Brezina, Šofránková, 2016)

Matematický model úlohy EVRP-VC:

Celkový súčet spotrebovaného paliva:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} p \left(d_{ij} (a_k x_{ijk} + b_k q_{ijk}) \right) \quad (1)$$

Ohraničujúce podmienky:

$$\sum_{i \in I} x_{ijk} = \sum_{i \in I} x_{jik} \quad k \in K, j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijk} = y_{jk} \quad k \in K, j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} y_{jk} = 1 \quad j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} x_{0jk} = y_{jk} \quad k \in K \quad (5)$$

$$u_i - u_j + n \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq n - 1 \quad i \in I, j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} \pi_j y_{jk} = Q_k \quad k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} q_{ijk} - \sum_{i \in I} q_{jik} = \pi_j y_{jk} \quad k \in K, j \in J \quad (8)$$

$$q_{ijk} \leq Q_k x_{ijk} \quad i \in I, k \in K, j \in J \quad (9)$$

$$q_{ijk} \geq 0 \quad i \in I, k \in K, j \in J \quad (10)$$

$$u_i \geq 0 \quad i \in I \quad (11)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad i \in I, k \in K, j \in J \quad (12)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad i \in I, k \in K \quad (13)$$

kde:

- n - počet uzlov vrátane štartovacieho uzla,
- m - počet vozidiel,
- i - predstavuje označenie uzlu výjazdu vozidla (hodnota 0 je štartovací uzol),
- j - predstavuje uzly príjazdu vozidla,
- k - index vozidiel,
- d_{ij} - vzdialenosti medzi uzlami,

- π_j - požadovaný dopyt zákazníka v uzle j ,
- π_0 - požadovaný nulový dopyt v štartovacom uzle je 0,
- a_k - spotreba na kilometer,
- b_k - spotreba paliva na tonu nákladu,
- Q_k - nosnosť vozidla,
- y_{jk} - určujú, či je alebo nie je uzol j zásobovaný vozidlom k ,
- x_{ijk} - určujú smerovanie vozidla medzi uzlami,
- q_{ijk} - spojité premenná užitočného zaťaženia prepravovaného vozidlom k po trase

Klasické obmedzenia kapacitného problému prepravy sú zahrnuté v ohraničeniach. Obmedzenia určujú aj kapacitné obmedzenia (prebraté z CVRP), avšak bol rozšírený o vzťahy (8) až (10), ktoré zohľadňujú hmotnosť prenášanú vozidlom po trasách rozvozu. (Brezina, Šofránková, 2016)

Okružné úlohy s viacerými skladmi (ang. Multi - depot VRP - MDVRP) je modifikáciou úlohy VRP, pri ktorej predpokladáme, že sa disponuje s viac ako jedným skladom. Ak sú zákazníci blízko skladom, každý sklad má svojich zákazníkov. Ak nie, úloha sa musí modifikovať. Každý sklad má vlastné vozidlá, ktoré obsluhujú len zákazníkov z toho skladu a potom sa vracia. (Škerlíková, 2012)

Cieľom úlohy MDVRP je minimalizovať počet vozidiel, potrebný čas, nájsť najkratšie trasy a pritom zohľadniť množstvo a kapacitu skladov a vozidiel. Riešenie je možné, ak každá trasa spĺňa požiadavky a začína a končí v tom istom sklade. Realizácia tohto cieľa má priamy vplyv aj na životné prostredie, keďže efektívne využitie vozidiel a optimalizované trasy vedú k zníženiu emisií CO₂ a obmedzeniu spotreby paliva. Týmto spôsobom sa prispieva k udržateľnejším logistickým riešeniam a šetrnejšiemu prístupu k životnému prostrediu.

Najdôležitejšie hypotézy tohto problému sú:

- počet dostupných vozidiel je vopred určený,
- kapacita vozidla je pevne definovaná,
- počet a umiestnenie skladov je vopred definovaný,
- počet a lokalita zákazníkov sú vopred definované,
- maximálna rýchlosť vozidla je pevná,
- náklady na dopravu každého vozidla závisia od prejdenej vzdialenosti,
- dopravná sieť sa považuje za symetrickú.

(Mirabi, Shokrib, Sadeghieh, 2016)

Každý deň sa odosiela veľké množstvo vráteného tovaru späť k výrobcovi. **Okružné úlohy s možnosťou vrátenia tovaru** (ang. VRP with pick-up and delivering - VRPSDP) sa stal jednou z najdôležitejších oblastí riadenia logistiky najmä u veľkoobchodov. Táto úloha je obmenou klasickej VRP úlohy. Táto úloha ale predpokladá, že zákazník môže pri doručení komodity aj komoditu vrátiť, pričom sa musí zmestiť do vozidla. Okrem veľkoobchodov sa tento model využíval aj pri jednoduchom rozvoze napr. nápojov, kedy vodič súčasne vezme do vozidla aj prázdne sklenené fľaše do výroby, kde sa môžu znovu zaradiť do výrobného procesu po úprave. Táto dodatočná obmena môže viesť k zväčšeniu prejdenej vzdialenosti vozidiel či potrebe väčšieho množstva vozidiel. (Dethloff, 2001)

Cieľom tejto úlohy je minimalizácia počtu využitých vozidiel a nimi prejdenej vzdialenosti, pričom nesmie byť prekročená kapacita vozidiel pri doručovaní ani preberaní tovaru. (Škerlíková, 2012)

Matematický model úlohy VRPPD

Celkový súčet precestovanej vzdialenosti

$$\text{Min } z = \sum_{i \in J_0} \sum_{j \in J_0} \sum_{v \in V} C_{ij} x_{ijv} \quad (14)$$

Ohraničujúce podmienky:

$$\sum_{i \in J_0} \sum_{v \in V} x_{ijv} = 1 \quad (j \in J) \quad (15)$$

$$\sum_{i \in J_0} x_{isv} = \sum_{i \in J_0} x_{sjv} \quad (s \in J, v \in V) \quad (16)$$

$$l'_v = \sum_{i \in J_0} \sum_{v \in V} D_j x_{ijv} \quad (v \in V) \quad (17)$$

$$l_j \geq l'_v - D_j + P_j - M(1 - x_{0jv}) \quad (j \in J, v \in V) \quad (18)$$

$$l_j \geq l_i - D_j + P_j - M(1 - \sum_{v \in V} x_{ijv}) \quad (i \in J, j \in J, j \neq i) \quad (19)$$

$$l'_v \leq C \quad (v \in V) \quad (20)$$

$$l_j \leq C \quad (j \in J) \quad (21)$$

$$\pi_j \geq \pi_i + 1 - n(1 - \sum_{v \in V} x_{ijv}) \quad (i \in J, j \in J, j \neq i) \quad (22)$$

$$\pi_j \geq 0 \quad (j \in J) \quad (23)$$

$$x_{ijv} \in \{0, 1\} \quad (i \in J_0, j \in J_0, v \in V) \quad (24)$$

kde:

- J - množina všetkých prevádzok zákazníkov,
- J_0 - množina všetkých uzlov, t. j. miest zákazníkov a depa,
- V - množina všetkých vozidiel,
- C - kapacita vozidla,
- C_{ij} - vzdialenosť medzi uzlami,
- D_j - dodacia suma zákazníka
- n - počet uzlov, t. j. $n = |J_0|$
- P_j - množstvo vyzdvihnutej dodávky od zákazníka,
- M - veľké číslo,
- L'_v - náklad vozidla pri odchode zo skladu,
- l_j - náklad vozidla po servise zákazníka,
- π_j - premenná používaná na obmedzenie vedľajších ciest,
- x_{ijv} - binárna premenná udávajúca, či vozidlo cestuje priamo z uzla i do uzla j alebo nie

Medzi posledný typ úloh riešiacich prepravu stojí za spomenutie ešte **okružné úlohy s časovými oknami** (ang. VRP with time windows - VRPTW). Toto rozšírenie sa podobá klasickému modelu rozvozu a zvozu, ale s tým, že každý zákazník má stanovený určitý časový interval, v ktorom očakáva doručenie alebo vrátenie tovaru. Tento interval sa nazýva plánovací

horizont. Cieľ tejto úlohy je veľmi podobný ostatným obmenám a to minimalizovať počet vozidiel, ich prejdenú vzdialenosť a čas čakania pri dodržiavaní týchto časových intervalov. (Škerlíková, 2012)

Oproti klasickému rozvozu a zvozu má táto úloha dodatočné obmedzenia:

- Riešenie je neprípustné, ak je zákazník obslužený mimo stanoveného časového intervalu.
- Ak vozidlo dorazí k zákazníkovi predtým, ako má byť obslužený, spôsobí to čakací čas na trase.
- Každá trasa musí začínať a končiť v stanovenom časovom intervale v rámci skladu.
- Pri časových oknách s penalizáciou, oneskorené doručenie neznamená neprípustné riešenie, ale je penalizované pridaním dodatočných hodnôt do celkového riešenia.

Riešenie je akceptovateľné iba vtedy, ak všetky trasy obsluhujú zákazníkov jednou trasou a vozidlá opúšťajú sklad čo najskôr. Tento spôsob pomáha minimalizovať zbytočný čakací čas a prispieva k efektívnemu využitiu vozidiel, čo je prospešné pre životné prostredie.

3 Záver

Zvýšený dôraz na ochranu životného prostredia viedol k hľadaniu efektívnejších spôsobov riadenia dopravy, čím vznikla úzka väzba s problémami spojenými s Vehicle Routing Problem (VRP). Optimalizácia dopravy v rámci VRP umožňuje minimalizovať emisie CO₂ a znižovať množstvo spotrebovanej energie pri efektívnom plánovaní trás a riešiť problémy zvozu odpadu k recyklácii. VRP sa tak stáva dôležitým nástrojom na dosiahnutie cieľov zníženia environmentálneho zaťaženia prostredia a podporuje snahy o udržateľnosť v rámci logistiky a dopravy, čo koreluje s právnymi normami týkajúcimi sa ochrany životného prostredia a spoločenského tlaku na ich dodržiavanie. Je však dôležité poznamenať, že firmy často prezentujú svoje záujmy o životné prostredie iba na povrchu a skutočné zlepšenia sú často implementované kvôli zníženiu nákladov a zvýšeniu zisku.

Príspevok bol spracovaný v rámci riešenia výskumného projektu VEGA – 1/0120/23 „Environmentálne modely ako nástroj ekologicke-ekonomických rozhodnutí“

Literatúra

1. Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the Art Classification and Review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300–313. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
2. Brezina, I., Šofráňková, B. (2016). Znižovanie emisií v okružných úlohách: Reducing Emissions in Vehicle Routing Problems. *Časopis znalostní společnosti*, 1(4), 11-25. ISSN 2336-2561. Dostupné z: http://jks.euin.org/sites/default/files/jks_2016_01_011-025_Brezina_Sofrankova.pdf
3. Čičková, Z. (2013). *Riešenie okružných ciest* [Habilitationná práca, Ekonomická univerzita v Bratislave].
4. Dethloff, J. (2001). Vehicle routing and reverse logistics: The vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up. *OR Spektrum*, 23(1), 79–96. <https://doi.org/10.1007/pl00013346>
5. Gežík, P. (2012). *Reverzná logistika a Reverzná logistika a jej modely* [PDF súbor]. Dostupné z: <http://www.fhi.sk/files/katedry/kove/veda-vyskum/prace/2012/Gezik2012d.pdf>
6. Mieresová, L. (2013). *Okružné úlohy s viacerými ohraničeniami* [PDF súbor]. Dostupné z: http://www.fhi.sk/files/katedry/kove/veda-vyskum/prace/2013/Mieresova_Lucia.pdf

7. Mirabi, M., Shokri, N., & Sadeghieh, A. (2016). Modeling and Solving the Multi-depot Vehicle Routing Problem with Time Window by Considering the Flexible end Depot in Each Route. *International Journal of Supply and Operations Management*, 3(3), 1373-1390. doi: 10.22034/2016.3.02
8. Praveen, V., Keerthika, Dr. P., Sivapriya, G., Sarankumar, A., & Bhasker, B. (2022). Vehicle routing optimization problem: A study on capacitated vehicle routing problem. *Materials Today: Proceedings*, 64, 670–674. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.185>
9. Škapa, R. (2005). *Reverzní Logistika*. Masarykova univerzita.
10. Škerlíková, Z. (2012). *Okružné úlohy s dodatočnými ohraničeniami* [Dizertačná práca, Ekonomická univerzita v Bratislave].