

**MISKOLCI EGYETEM  
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR**



**A járatszervezési feladat általánosítása:  
Matematikai modell, ontológia, algoritmusok, keresési tér  
elemzés és alkalmazások**

**Tézisfüzet**

**Agárdi Anita**  
okleveles mérnökinformatikus

**Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola**  
Tématerület  
**Alkalmazott Számítástudomány**  
Témacsoport  
**Adat- és Tudásbázisok, Tudásintenzív Rendszerek**

Témavezető  
**Prof. Dr. Kovács László**  
egyetemi tanár

Társ-témavezető  
**Prof. Dr. Bányai Tamás**  
egyetemi tanár

Miskolc, 2023

## Tartalomjegyzék

<b>TARTALOMJEGYZÉK.....</b>	<b>- 1 -</b>
<b>1. BEVEZETÉS.....</b>	<b>- 2 -</b>
1.1. KITŰZÖTT KUTATÁSI CÉLOK.....	- 3 -
<b>2. A JÁRATSZERVEZÉSI FELADAT IRODALMI HÁTTERÉNEK ÁTTEKINTÉSE.....</b>	<b>- 4 -</b>
2.1. IRODALMI ÁTTEKINTÉS .....	- 4 -
<b>3. A JÁRATSZERVEZÉSI FELADAT ÁLTALÁNOSÍTÁSÁNAK MATEMATIKAI MODELLJE.....</b>	<b>- 6 -</b>
3.1. ALAPPARAMÉTEREK .....	- 6 -
3.2. ATTRIBÚTUMOK .....	- 6 -
3.3. DÖNTÉSI VÁLTOZÓ .....	- 7 -
3.4. KORLÁTOK .....	- 7 -
3.5. METRIKÁK, CÉLFÜGGVÉNY KOMPONENSEK .....	- 7 -
<b>4. AZ ÁLTALÁNOS JÁRATSZERVEZÉSI FELADAT ONTOLÓGIAI MODELLJE .....</b>	<b>- 8 -</b>
4.1. A JÁRATSZERVEZÉSI FELADAT ONTOLÓGIAI RENDSZERE .....	- 8 -
4.1.1. Az ontológia rendszer fő elemei .....	- 8 -
4.1.2. Az ontológia rendszer architektúrája.....	- 8 -
<b>5. AZ ÁLTALÁNOS JÁRATSZERVEZÉSI FELADAT REPREZENTÁCIÓS MODELLJE ÉS OPERÁTORAI .....</b>	<b>- 10 -</b>
5.1. REPREZENTÁCIÓS MODELL ELEMELK .....	- 10 -
5.2. OPTIMALIZÁCIÓS OPERÁTOROK.....	- 10 -
<b>6. KERESÉSI TÉR ELEMZÉS .....</b>	<b>- 11 -</b>
6.1. KERESÉSI TÉR ÁTTEKINTÉSE.....	- 11 -
6.1.1. Elemzési módszerek.....	- 11 -
6.2. TESZT EREDMÉNYEK.....	- 12 -
<b>7. AZ ÁLTALÁNOS JÁRATSZERVEZÉSI FELADAT ALKALMAZÁSAI.....</b>	<b>- 14 -</b>
7.1. FUTÁSI EREDMÉNYEK.....	- 15 -
7.1.1. Levélszállítás .....	- 15 -
7.1.2. Üzemen belüli anyagmozgatás: raktár és gyártóhely között .....	- 17 -
<b>8. ÖSSZEFOGLALÁS.....</b>	<b>- 19 -</b>
<b>FELHASZNÁLT IRODALOM.....</b>	<b>- 22 -</b>
<b>SAJÁT PUBLIKÁCIÓK.....</b>	<b>- 30 -</b>
A DISSZERTÁCIÓ TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK.....	- 30 -
<b>DISSZERTÁCIÓHOZ KAPCSOLÓDÓ WEBES FORRÁSOK .....</b>	<b>- 32 -</b>

## 1. Bevezetés

A logisztika egyik legfontosabb feladata a megfelelő termék, megfelelő helyre, megfelelő időben való költséghatékony szállítása. A járatszervezési feladat (Vehicle Routing Problem - VRP) egy szállítási probléma, amely a logisztika egyik leggyakoribb feladata. A járatszervezési feladat célja a vásárlók áruigényeinek kiszolgálása. A járművek egy vagy több depóból szállítják ki a termékeket a vásárlóknak, majd visszatérnek a depóba. Az ipar igényeihez alkalmazkodva az évek során a feladat számos változata alakult ki. Ilyen komponensek például az időablak, a több szint (a termékeket először a depóból az elosztóhelyekre - satellite- szállítják, majd onnan a vásárlókhöz), nyílt út, több terméktípus, több járműtípus, elektromos járművek, stb. A járatszervezési feladat a komponensektől függően lehet üzemben belüli - , üzemben kívüli szállítás, de akár egy teljes ellátási láncot is modellezhet. Mivel napjainkban egyre összetettebbé válnak a szállítási feladatok (több termék egyidejű szállítása, többféle jármű, többféle elosztóhely stb.), a tervezési és üzemeltetési feladatokhoz számítógépes támogatás szükséges.

A disszertáció célja egy általános modell és prototípus szállítási rendszer kidolgozása. A szakirodalom alapján a terület jelenlegi javaslatai csak egy-egy bizonyos szállítási feladat típusra fókuszálnak. A szakirodalomban nincs olyan rendszer, amely széles területet lefed. Kutatómunkám fő célja egy integrált általános rendszer kidolgozása. A javasolt általános rendszer tartalmazza a gyakorlatban jelenleg ismert főbb komponenseket. Ezzel az általános modellel a logisztikai rendszerekben megjelenő szállítási feladatok szinte minden típusa az általános modell altípusaként elemezhető és megoldható.

A dolgozat első része egy szakirodalmi áttekintés, amely bemutatja a járatszervezési feladat komponenseit és azokat az algoritmusokat, amelyekkel a járatszervezési feladat megoldható.

A következő fejezetben a járatszervezési feladat matematikai modelljét mutatom be. A modell többek között a következő komponenseket tartalmazza: szintek száma, járművek száma, terméktípusok száma, periodicitás, csomópontok közötti attribútumok (például csomópontok közötti távolság, biztonsági tényező stb.), járműtulajdonságok (például jármű kapacitáskorlátja, töltési idő, bérelt járművek bérleti díja stb.), időkomponensek (bepakolási, kipakolási idő, időablak stb.), termékjellemzők (például a csomópont kapacitáskorlátja), költségek (például a becsomagolási és kicsomagolási költség, a minőség-ellenőrzési költség stb.) és végül a működési paraméterek (például depóközi útvonal, szállítás, begyűjtés, nyílt útvonal stb.). A paraméterértékek tekintetében a modell lehetővé teszi statikus, sztochasztikus, fuzzy és előre jelzett adattípusok használatát.

A matematikai modell után egy ontológiai tudásbázist prezentálok, amely segít a járatszervezési probléma megtervezésében (mely termékek milyen járművekkel szállíthatók, milyen típusú termékek szállíthatók együtt, milyen típusú termékekre lehet szüksége az egyes vásárlóknak, milyen komponenseket kell használni a rendszer tervezésében).

Ezt követően bemutatom a modell reprezentációját, melyet heurisztikus algoritmusok alkalmaznak. Az alkalmazott ábrázolás a vásárlók permutációján alapul, de a tervezés során más tényezőket is figyelembe kellett vennem, mint például a különböző típusú termékek, járművek és szintek.

Az optimalizációs algoritmusok részletes keresési tér elemzéseit is bemutatja a disszertáció. Az algoritmusok két részre oszthatók: konstrukciós és javító algoritmusokra. A konstrukciós algoritmusok egy lehetséges megoldást készítenek. Lokálisan a legjobb lépést teszik meg, de a globális optimum a kizárólagos használatukkal legtöbbször nem érhető el. Futási idejük általában alacsony. A disszertációban 6 különböző konstrukciós algoritmust használtam. A javító algoritmusok iteratív módon javítanak egy vagy több lehetséges megoldást. A futási idejük általában magas. Alkalmazásukkal elérhető a globális optimum. A dolgozatban 11 különböző javító algoritmust futtattam. Mivel az általános járatszervezési modellem több célfüggvényt tartalmaz, 6 különböző többcélú optimalizálási technikát teszteltem. Megvalósítottam a vásárlók „előszűrését” is, így nem kell minden beérkező igényt kielégíteni, csak azt, ami gazdaságilag megtérül. Ezt az adatbányászatban ismert osztályozással lehet megtenni. 5 különböző osztályozási adatbányászati algoritmust vizsgáltam. A fitness landscape módszert alkalmaztam a keresési tér elemzésére. A fitness landscape technikákat felhasználva elvégeztem az operátorok és az optimalizáló algoritmusok hatékonyságának vizsgálatát.

Az elemzéshez 6 különböző séta technikát használtam. A keresési tér információelméleti szempontból is elemzésre került.

Az utolsó fejezetben bemutatom, hogy az általános rendszer alkalmas mind az üzemen belüli, mind az üzemen kívüli szállítási folyamatok megoldására. A javasolt rendszer sokoldalúságának szemléltetésére 16 prototípus rendszert mutattam be. Az elméleti és a gyakorlati teszt alapján megállapítottam, hogy a javasolt modell a szállítási feladatok széles skáláját fedi le.

## **1.1. Kitűzött kutatási célok**

A kutatásom középpontja a járatszervezési feladat általánosítása. A célom a feladat szakirodalmának áttekintése, és ez alapján egy általános járatszervezési modell megalkotása. Az általános modell alapján konkrét szállítási feladatok oldhatóak meg. Az általános modell előnye, hogy elég egyszerű megalkotni. Nem szükséges minden szállítási feladathoz új modellt, új programot írni, elég csupán a modell felparaméterezése. A kutatásom az alábbiakra terjed ki:

- A járatszervezési feladat szakirodalmának áttekintése, a különböző járatszervezési feladatok rendszerezése (komponensek, korlátok, célfüggvények).
- A szakirodalom és a logisztikai igények alapján egy általános járatszervezési modell megalkotása, a modell matematikai leírása.
- Az elkészített általános járatszervezési modell ontológiai modelljének megalkotása. Az ontológiai modellnek tartalmaznia kell a matematikai modell elemeit, és a fő komponensek (csomópontok, járművek, vásárlók) típusokkal való kiegészítéseit. A rendszernek segítenie kell a felhasználót abban, hogy az általam általánosított járatszervezési modellem komponensei és metrikái közül melyiket használja egy adott termék, adott csomóponthoz, adott járművel történő szállítása során. Szükségesnek láttam azt is, hogy a rendszer segítsen eldönteni, hogy mely termékek milyen járművekkel szállíthatók a csomópontokhoz.
- Az általános járatszervezési modell reprezentációs modelljének megalkotása. A reprezentáció segítségével a valós probléma leképezhető az optimalizáló algoritmus számára.
- A járatszervezési feladat keresési terének elemzése. A keresési tér elemzése az optimalizációs algoritmusok vizsgálatához köthető. Kutatásom célja a szakirodalomban ismert optimalizáló algoritmusok hatékonyságának elemzése. A javító heurisztikák többsége szomszédsági operátorokat alkalmaz, így a kutatási célom ezen algoritmusok operátorainak elemzése is. A járatszervezési feladat több célfüggvény komponens is tartalmazhat, így a többcélú optimalizálási technikák elemzését is szükséges elkészíteni. A kutatási célom a keresési tér elemző technikák széles körének alkalmazása a járatszervezési feladatban.
- Az általános járatszervezési modellt megoldó szoftver elkészítése. A szoftver képes a reprezentáció alapján különböző heurisztikákkal megoldani a járatszervezési feladatokat, a felhasználó járatszervezéssel kapcsolatos kérdéseinek megválaszolására az implementált ontológia alapján, és a keresési tér elemzésére.
- Egy általános modell sikeressége abban rejlik, hogy a problémák milyen széles körét fedi le. Elemzem, hogy az elkészített általános modellel mely szállítási feladatokat lehet megoldani.

## **2. A járatszervezési feladat irodalmi háttérének áttekintése**

A fejezet célja, hogy bemutassa a járatszervezési feladat (Vehicle Routing Problem - VRP) definícióját, komponenseit és a kapcsolódó szakirodalmi háttérét.

A járatszervezési feladat [1] esetén minden (potenciálisan) meglátogatandó helyet csomópontnak nevezünk. A csomópont lehet depó, vásárló, töltőállomás, elosztóhely (satellite). Minden olyan szállítóegységet járműnek nevezünk, amely termékeket szállít a csomópontok között.

Az alap járatszervezési feladat során a járműveknek a vásárlókat meg kell látogatniuk. A vásárlóknak termékigényeik vannak. Minden igényt ki kell szolgálni és minden vásárló csak egyszer látogatható meg. A járművek a depóból indulnak, felkeresik a hozzájuk rendelt vásárlókat, majd visszatérnek a depóba. A járművek nem léphetik túl a kapacitáskorlátjukat. Ha a járművek meglátogatták a vásárlókat, akkor vissza kell térniük a depóba. A célfüggvény a járművek által megtett távolság minimalizálása.

### **2.1. Irodalmi áttekintés**

A járatszervezési feladat a logisztika egy aktuális és fontos területe. Az első járatszervezési feladattal kapcsolatos cikk 1959-ben jelent, mely szerzői Dantzig és Ramser [1]. Ezt követően a 60-as és 70-es években számos cikk jelent meg, például a [2-3] publikáció.

A szállítási problémának sok paramétere lehet. Az alábbi kategorizálást választottam: csomópontok száma, típusa (depó, vásárló, töltőállomás, elosztóhely – satellite - és ezek szintjei). Szállítás esetén a járművek, termékek számáról is dönteni kell. Az igénybe vehető járműtípusok többféle komponensek használatát is magukban foglalhatják, mint például a töltőállomások használata, a bérleti díj (ha a járművek béreltek). A terméktípusok is meghatároznak komponenseket, mint a termékek és a szállításra alkalmas járművek közötti kapcsolat, de azt is, hogy ne a megtett távolság minimalizálása legyen a célfüggvény, hanem az, hogy a jármű a lehető legbiztonságosabb útvonalon haladjon át. Az üzleti logika olyan összetevőket is meghatározhat, mint az időablak (az egyes csomópontok csak egy adott időintervallumban látogathatók), vagy a bizonytalan (sztochasztikus, fuzzy) vagy múltbeli adatok kezelése (előrejelzés). Szeretném kiemelni a következő járatszervezési probléma típusokat:

- Időablakos járatszervezési feladat (Vehicle Routing Problem with Time Window) [4],
- Több időablakos járatszervezési feladat (Vehicle Routing Problem with Multiple Time Windows) [5],
- Lágy időablakos járatszervezési feladat (Vehicle Routing Problem with Soft Time Window) [6],
- Egy lerakatos járatszervezési feladat (Vehicle Routing Problem with Single Depot) [7],
- Több lerakatos járatszervezési feladat (Vehicle Routing Problem with Multiple Depot) [7],
- Nyílt utas járatszervezési feladat (Open Vehicle Routing Problem) [8],
- Több lerakatos, depóközi járatszervezési feladat (Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Inter-Depot Routes) [9],
- Kétlépcsős járatszervezési feladat (Two-Echelon Vehicle Routing Problem) [10],
- Homogén járműtípusú járatszervezési feladat (Homogeneous Fleet Vehicle Routing Problem) [11],
- Heterogén járműtípusú járatszervezési feladat (Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem) [11],
- Kapacitáskorlátos járatszervezési feladat (Capacitated Vehicle Routing Problem) [12],
- Járatszervezési feladat begyűjtéssel és kiszállítással (Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery) [13],
- Több termékes járatszervezési feladat (Vehicle Routing Problem with Multiple Product) [14],
- Járatszervezési feladat elektromos járművekkel (Electric Vehicle Routing Problem) [16],

- Periodikus járatszervezési feladat (Periodic Vehicle Routing Problem) [17],
- Járatszervezési feladat sztochasztikus termékigényekkel (Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand) [20],
- Járatszervezési feladat romlandó élelmiszer szállítással (Vehicle Routing Problem with Perishable Food Products Delivery) [36],
- Utazó ügynök feladat (Travelling Salesman Problem) [46].

## 3. A járatszervezési feladat általánosításának matematikai modellje

A 2. fejezetben bemutatam, hogy a járatszervezési feladattal számos kutató foglalkozott az évek során. A publikációk zömében a járatszervezési feladat matematikai modellje is bemutatásra került. Ezen cikkekben részletezett matematikai modellek egy adott szállítási problémára fókuszáltak. A disszertáció ennek a fejezetének a célja egy általános járatszervezési feladat matematikai modelljének bemutatása.

### 3.1. Alapparaméterek

#### Pozíció gráf:

A járatszervezési feladat topológiája gráffal írható le, ahol a csomópontok pozíciókat (vásárlókat, depókat stb.), az élek pedig a pozíciók közötti szállítási kapcsolatokat jelölik.

A gráf a pozíció komponenseket és a köztük lévő kapcsolatokat tartalmazza. Feltételezhető, hogy a pozíciók több szintre bonthatók.

#### Járművek:

A rendszerben különböző típusú járművek találhatóak.

#### Termékek, szolgáltatások:

A modellben többféle termék kerül szállításra.

#### Idő:

A modellben a működést időben modellezem. Az idő különböző mértékegységekben mérhető. A periódus az ismétlési idő.

#### Érték:

A modell építőelemeihez különböző attribútum értékek (tulajdonságok) rendelhetők. Az értékészlet alapján a következő értékek különböztethetők meg:

- statikus,
- sztochasztikus,
- fuzzy,
- előre jelzett.

### 3.2. Attribútumok

A következő járatszervezési attribútumokat tartalmazza a rendszer:

- Csomópont attribútumok: a csomópontok közötti utazási idő, a csomópontok közötti távolság, a csomópontok közötti biztonsági faktor, a csomópontok közötti útvonal minősége és a csomópont típusa.
- Jármű attribútumok: az egyes járműtípusok kapacitáskorlátja terméktípusonként, üzemanyag fogyasztás, töltési idő, saját jármű vagy bérelt jármű, bérleti díj járműtípusonként és a maximális megtett távolság teli tankkal/teli feltöltéssel.
- Idő attribútumok: szolgáltatás ideje, becsomagolási idő, kicsomagolási idő, berakodási idő, kirakodási idő, termékállási idő, adminisztrációs idő, minőségellenőrzési idő, időablak.
- Termék attribútumok: csomópont kapacitáskorlátja, csomópont termékigénye, termék ára, feldolgozási sorrend, tárolási szint.
- Költség attribútumok: becsomagolási költség, kicsomagolási költség, berakodási költség, kirakodási költség, adminisztrációs költség, minőségellenőrzési költség.

- Működési paraméter attribútumok: depóközi útvonal, szállítás, begyűjtés, lágy időablak, nyitott útvonal.

### 3.3. Döntési változó

A döntési változó értéke 0 vagy 1 lehet. 7 indexe van, amelyek a következők:  $i_1$ : a kiindulópont szintje,  $i_2$ : a végpont szintje,  $j_1$ : a kezdőpont indexe az  $i_1$  szinten belül,  $j_2$ : a végpont indexe az  $i_2$  szinten belül,  $k$ : jármű indexe,  $t$ : az idő indexe és  $m$ : a termék indexe.

$$\lambda_{j_1, j_2}^{i_1, i_2, k, t, m} = \begin{cases} 1, & \text{ha a } k. \text{ jármű a } t. \text{ periódusban az } i_1 \text{ szinten található } j_1 \text{ csomópontból,} \\ & \text{az } m. \text{ terméket szállítja az } i_2 \text{ szinten található } j_2 \text{ csomópontba} \\ 0, & \text{különbén.} \end{cases}$$

### 3.4. Korlátok

A korlátok az optimalizálás fontos jellemzői. Ahhoz, hogy érvényes megoldást kapjunk, különféle korlátokat kell meghatározni.

- 1. korlát: Az  $i$ . szintű csomópontokat periódusonként legfeljebb egyszer kell kiszolgálni egy  $m$  termékkel.
- 2. korlát: Ez a korlát nem kötelező, és csak akkor kell figyelembe venni, ha időablak van megadva. Ha időablakot definiálunk, akkor két eset lehetséges, a nehéz időablak és a lágy időablak. Nehéz időablak esetén az időablakot mindenképpen figyelembe kell venni, míg a lágy időablak optimalizálási paraméter.
- 3. korlát: A járművek egy felsőbb szintű csomópontból indulnak, majd az alacsonyabb szintű csomópontok meglátogatása után egy felsőbb szintű csomópontba mennek. Ez a korlát nem kötelező, és csak akkor nem teljesül, ha a rendszer egyetlen szintet tartalmaz.
- 4. korlát: Ez a korlát kötelező, mindig figyelembe kell venni a termékek szállítása során. A járművek nem léphetik túl a kapacitáskorlátjukat.
- 5. korlát: Ez a korlát kötelező, mindig figyelembe kell venni a termékek szállítása során. A csomópontok kapacitáskorlátját figyelembe kell venni.
- 6. korlát: A szállítási élek száma (minden szinten) nem haladhatja meg az egyes szinteken elérhető járművek számát. Ez a korlát kötelező.
- 7. korlát: Ez az alkörút eliminációra vonatkozó korlát, és kötelező.
- 8. korlát: A korlát kötelező. Az útvonal folytonosságára vonatkozik. Minden  $j$  csomópontnál a bejövő élek számának meg kell egyeznie a kimenő élek számával.
- 9. korlát: A korlát kötelező. A járműveket egy bizonyos távolság megtétele után fel kell tölteni, ezért a járműveknek meg kell látogatniuk a töltőállomást.
- 10. korlát: A korlát nem kötelező, csak a termékek rögzített sorrendjének meghatározásakor kell figyelembe venni. Az egyes pozíciókra érkező termékek fix sorrendűek lehetnek, egymás után kell megérkezniük.
- 11. korlát: A korlát nem kötelező. A modell csak akkor veszi figyelembe, ha vannak olyan termékek, amelyeket nem lehet együtt szállítani.

### 3.5. Metrikák, célfüggvény komponensek

A metrikákból célfüggvény komponensek képezhetők. Az én esetemben a metrikák többségénél a cél a minimalizálás. A rendszer a következő metrikákat tartalmazza: útvonal hossza, szállított érték, becsomagolási költség, kicsomagolási költség, berakodási költség, kirakodási költség, adminisztrációs költség, minőségellenőrzési költség, üzemanyag fogyasztás, jármű bérleti díja, csomópontok közötti biztonság, útvonal minősége, útvonal idő, becsomagolási idő, kicsomagolási idő, rakodási idő, termék állási ideje, adminisztrációs idő, minőségellenőrzési idő, üzemanyag töltési idő, csomópontoknál a járművek várakozási ideje, időablak túllépése és a meg nem látogatott vásárlók száma.



## **4. Az általános járatszervezési feladat ontológiai modellje**

Az ontológia a tudás ábrázolásának szabványos eszköze. Ez a kifejezés a filozófiából származik, ahol a létezés szisztematikus leírását jelenti. Az ontológia egy témakört, annak fogalmait és a fogalmak közötti kapcsolatokat írja le. Célja nem csupán az információk bemutatása az emberek számára, hanem az információ tartalmának gépi feldolgozása. A leggyakoribb általános ontológiai nyelv az OWL, amelyet a World Web Consortium (W3C) fejlesztett ki. Az OWL nagyobb mértékben segíti a webtartalom automatikus gépi értelmezését, mint az XML, RDF és RDF-séma (RDF-S). Az OWL bővített szókinccset és formális szemantikát is kínál [48,49].

### **4.1. A járatszervezési feladat ontológiai rendszere**

A szakirodalomban bemutatott ontológiai rendszerek egy része konkrét logisztikai feladatokra korlátozódik, például monitoring szolgáltatás [57], városi logisztika [58], vészhelyzeti logisztika [61], gyártási rendszer [62], hűtött áruk [63]. Vannak olyan ontológiai modellek is, amelyek megpróbálják lefedni a teljes logisztikai folyamatot. Azonban nekem ettől eltérő rendszerre volt szükségem, így egy általánosabb rendszert dolgoztam ki. A rendszernek segítenie kell a felhasználót abban, hogy az általam általánosított járatszervezési modellem komponensei és metrikái közül melyiket használja egy adott termék, adott csomóponthoz, adott járművel történő szállítása során. Szükségesnek láttam azt is, hogy a rendszer segítsen eldönteni, hogy mely termékek milyen járművekkel szállíthatók a csomópontokhoz.

#### **4.1.1. Az ontológia rendszer fő elemei**

Az ontológiák előnye, hogy a rendszerek együtt tudnak működni, így a rendszerem kiegészíthető egy másik által kidolgozott logisztikai modellel. A kidolgozott mintarendszer tartalmazza a matematikai modellben részletezett gráf leíró, járműveket, termékeket, időt, értékeket (statikus, sztochasztikus, fuzzy, előre jelzett értékek) és attribútumokat (csomópontok, járművek, idő, termékek, költségek, működési paraméter). Ezenkívül metrikák is szerepelnek a modellben. A mintarendszerben az ontológiai fogalmak szabályalapú érvényesítést tesznek lehetővé. Az ontológia modell fő komponensei a következők:

- Node osztály: a termékeket csomópontok között szállítják a járművek.
- Product osztály: a termékeket járművekkel szállítják egyik csomópontból a másikba.
- Vehicle osztály: termékek szállítására alkalmas.
- Component osztály: olyan komponenseket tartalmaz, amelyek a járatszervezési feladatok során használhatók. A komponensek fő típusuk szerint kategorizálhatóak, de ez a felhasználó számára transzparens. A következő kategóriákat tartalmazza a rendszer:
  - CostComponents,
  - FunctionalParameterComponents,
  - NodeComponents,
  - ProductComponents,
  - TimeComponents,
  - VehicleComponents.
- Metrics osztály: szállítási feladatok során használható metrikákat tartalmaz.

#### **4.1.2. Az ontológia rendszer architektúrája**

Az ontológiai modellt az optimalizáló modulba is integráltam, mivel a modell lehetővé teszi a szabályalapú validálást az üzemén kívüli szállítási feladatokhoz. Így a modell alkalmazását programozó-baráttá készítettem, mivel az ontológiai specifikus lekérdezések (DL Query, SPARQL

Query) helyett a felhasználónak csak egy JSON-leíró kell megadnia, amelyet minden programozó ismer, az emberek számára is egyszerűen olvasható.

Az ontológia rendszert úgy alakítottam ki, hogy kétféle felhasználó kezelhesse. Az egyik felhasználó (szakértő felhasználó), aki megfelelő informatikai és logisztikai ismeretekkel rendelkezik. Ez a fajta felhasználó a következőket végzi: követelmények azonosítása, majd fogalmak gyűjtése, ontológia létrehozása és elemzése. Ez a felhasználó az ontológiát az ontológia szerkesztőn keresztül éri el, ahol implementálhatja azt. A másik felhasználó a végfelhasználó, aki megfelelő logisztikai ismeretekkel rendelkezik. A felhasználó Java program és JSON leíró segítségével kérdéseket tesz fel a rendszernek. A Java program lekérdező motor rétege SPARQL lekérdezéseket generál, ezáltal információkat nyer ki az ontológiából, és a Java program válaszol a felhasználónak. Az ontológiai réteg magából az RDF / OWL fájlból és a következtető motorból áll.

Az ontológiai rendszernek nem kell megadnia a JSON-leíró összes tagját, lehetőség van az egyes komponensek (Node, Product, Vehicle) elhagyására.

Az ontológiai mintarendszer segít a szállítási feladatok létrehozásában. Ha a felhasználó tudja, hogy a szállítási feladat során milyen típusú csomópontokat szükséges felkeresni, akkor a rendszer segít megmondani, hogy mely termékek szállíthatók a csomópontba vagy el a csomópontból, és milyen korlátok és célfüggvény komponensek használhatók a szállítási feladat során. Ha a felhasználó tudja, hogy mely termékekre korlátozódik a szállítás, a rendszer segít eldönteni, hogy milyen típusú járműveket lehet használni a feladat során. Ha a szállítási feladat során ismert a járművek típusa, a rendszer válasza, hogy milyen termékek szállíthatók a járművel, milyen korlátok, célfüggvény komponensek vonhatók be az optimalizálásba. Ha a rendszer bemeneti paramétere a csomópont és a jármű típusa, akkor a rendszer válasza az alábbi: a csomópontba szállítandó és onnan elszállítandó lehetséges termékek típusa, a járművek, a lehetséges járatszervezési feladat komponensek és a lehetséges célfüggvény komponensek. Ha a rendszer csomópontokat és termékeket kap bemenetként, akkor az egyéb termékeket, járműtípusokat, járatszervezési komponenseket és célfüggvény komponenseket adja vissza. Ha a járművek és termékek listája adott, akkor a rendszer válasza az alábbi: a csomópontba szállítható termékek, a csomópontból szállítható termékek, a lehetséges egyéb járművek listája, a járatszervezési komponensek és a célfüggvény komponensek. Ha egy csomópont, egy jármű és egy termék is meg van adva a lekérdezéskor, akkor a rendszer termékekkel, járművekkel, a járatszervezési komponensekkel és célfüggvény metrikákkal válaszol.

A bemutatott ontológia modellt a Java optimalizáló rendszerembe integráltam. A rendszerem tehát tartalmaz egy optimalizálási modult és egy ontológiai modult. Az ontológia és az optimalizáló modul közötti kapcsolat a következő: a felhasználó először az ontológia modult használja, és kérdéseket tesz fel az ontológiának. A kérdések JSON formátumúak, majd txt formátumban adja meg a rendszer a kérdésekre a választ. Ezt követően lehet használni az optimalizáló modult, ahol az ontológiai rendszer eredményét lehet figyelembe venni a járatszervezési feladat komponensek létrehozásához. Ezután be lehet állítani az egyes optimalizálási algoritmusok paramétereit (itt is megadható egy JSON-fájl). Így a rendszer JSON formátumban adja meg az optimalizálás eredményét.

## **5. Az általános járatszervezési feladat reprezentációs modellje és operátorai**

Ebben a fejezetben bemutatom azt a reprezentációs modellt és kiértékelési stratégiát, amelyet az implementált optimalizáló algoritmusaim használnak az általános járatszervezési modell megoldására. A reprezentáció segítségével a valós probléma leképezhető az optimalizáló algoritmus számára. Az általános járatszervezési modellemhez a szakirodalom alapján saját reprezentációs módszert dolgoztam ki, és részleteztem, hogy milyen operátorokat alkalmaztam.

### **5.1. Reprezentációs modell elemek**

A rendszer a következő reprezentációs modell elemeket tartalmazza:

- A csomópontok sorrendjét leíró vektor: Egy permutációt használok a csomópontok sorrendjének leírására. A listában a csomópontokat pozícióindex jelöli. A permutáció hossza megegyezik a csomópontok számával.
- A járművek-csomópontok-termékek hozzárendelését leíró mátrix: Az előző permutációs vektorral ellentétben ez egy hozzárendelés. Ez azt jelenti, hogy az egyes számok itt az egyes járműveket jelölik, csak itt a számok többször is megjelennek. A hozzárendelés hossza megegyezik a csomópontok számának és a rendszerben lévő terméktípusok számának szorzatával.
- Járművek-töltőállomások hozzárendelését leíró vektor: Azt határozza meg, hogy melyik töltőállomáshoz fognak tartozni az egyes járművek. A hossza megegyezik a járművek számával.
- A járművek–felsőbb szintű csomópontok hozzárendelését leíró vektor: A hozzárendelési vektor hossza megegyezik az aktuális szinten lévő járművek számával, mivel a járművekhez egy kezdő és egy végcsomópont van hozzárendelve.
- Szintet leíró vektor: A csomópontok sorrendjét leíró vektorokat, a jármű-csomópont-termék hozzárendelését leíró mátrixokat, a járművek-töltőállomások hozzárendelését leíró vektorokat, valamint a járművek-felsőbb szintű csomópontok hozzárendelését leíró vektorokat tartalmazza.
- Periódust leíró vektor: A szinteket leíró mátrixokat tartalmazza.
- Megoldást leíró vektor: A periódust leíró vektorokat tartalmazza.

### **5.2. Optimalizációs operátorok**

Az optimalizálás során az operátorok egy vagy több meglévő megoldásból egy vagy több új megoldást hoznak létre. Az alkalmazott operátorok nagyban befolyásolják az optimalizáló algoritmusok hatékonyságát. A következő operátorokat használtam:

- Csomópontok sorrendjét leíró vektor: Itt permutációs reprezentációs módot használok, ahol a csomópontok sorszámait az ábrázolási mód tartalmazza. Ennél a reprezentációnál szomszédsági operátort és keresztezési operátort használtam. Az alábbi operátorokat alkalmaztam: élcseré (2-opt) [70], részleges megfeleltetésű keresztezés (Partially Matched Crossover - PMX) [71], sorrendi keresztezés (Order Crossover - OX) [71], ciklikus keresztezés (Cycle Crossover – CX) [71].
- Járművek-csomópontok-termékek hozzárendelését leíró mátrix: Itt egy "újra generálást" használok, így a szomszéd véletlenszerűen generált új mátrix lesz.
- Járművek-töltőállomások hozzárendelését leíró vektor: Itt "újra generálást" használok, így a szomszéd véletlenszerűen generált új vektor lesz.
- A járművek–felsőbb szintű csomópontok hozzárendelését leíró vektor: Itt "újra generálást" használok, így a szomszéd véletlenszerűen generált új vektor lesz.

## 6. Keresési tér elemzés

Ebben a fejezetben a reprezentáció és az optimalizálás hatékonysága közötti kapcsolatot mutatom be a keresési térben. Viszonylag kevés kutató foglalkozott az évek során a keresési tér elemzéssel. Ennek valószínűleg az az oka, hogy a kutatók jellemzően kizárólag a felületi hatékonyság vizsgálatára koncentrálnak, a belső optimalizációs folyamatokat azonban nem elemzik. A témaválasztás másik fontos oka, hogy a legtöbb esetben a (lokális) optimum értéket ad hoc módszerrel keresik, a megtalált optimum minőségét nem elemzik. A publikációkban az összehasonlítások csak gyakorlati tesztek. Sajnos a legtöbb kutató nem vizsgálja és nem demonstrálja, hogy a kidolgozott módszer (algoritmus hangolása, megfelelő paraméterek kiválasztása, implementációs trükkök stb.) miért jobb a meglévő módszereknél. Ezt a technikát "versenyvizsgálatnak" is nevezik. Ezzel szemben a viselkedési modellek azt mutatják meg, hogy egy adott lokális keresés mitől hatékonyabb, mint a többi. A viselkedési modellek lehetővé teszik a meglévő lokális keresési algoritmusok hatékonyságának javítását. [77]

### 6.1. Keresési tér áttekintése

A keresési tér tárgya optimalizáló algoritmusok vizsgálata. A metaheurisztika gyakran valamilyen keresési vagy navigációs iteráción alapul. Az iterációs ciklus törzse a következő elemeken alapul [73,108]:

- Algoritmus független elemek:
  - Lehetséges állapotok halmaza.
  - Távolság alapú szomszédság.
  - Fitness, célfüggvény.
  - Kódolás és ábrázolás.
- Algoritmus specifikus elemek:
  - Átmeneti szabály, amely lehetséges szomszédos állapotpontok közül következő állapotpontot választja ki.
  - Leállási feltétel.
  - A kezdeti állapotpont vagy véletlenszerűen generált megoldás (állapotpont), vagy valamilyen konstrukciós heurisztika által adott megoldás (állapotpont).

A keresési tér elemzés segítségével összehasonlítható a különböző keresési tér ábrázolási módok hatékonysága. Ez segít levonni a következő következtetéseket [109]:

- Két keresési tér közötti különbségek összehasonlítása: probléma két vagy több különböző reprezentációs módszerrel: eltérő reprezentáció, eltérő mutációs operátor, eltérő célfüggvény stb.
- Algoritmusválasztás: a keresési tér navigáció elemzése.
- A paraméterek tuningolása: a kiválasztott algoritmushoz legmegfelelőbb paraméterek meghatározása (például a szomszédsági operátorok, populáció mérete).
- Paraméterek vezérlése futás közben: mi az optimális szomszédsági operátor.

#### 6.1.1. Elemzési módszerek

A keresési tér vizsgálatának analitikai módszerei két kategóriába sorolhatók, a kimerítő keresésre és a sztochasztikus, mintavételen alapuló technikákra [73].

##### Kimerítő keresés

Ez az elemzés adja a legteljesebb képet a keresési térről, de csak kisebb problémákra vethető be és a gyakorlatban nehezen alkalmazható. A kimerítő keresés fő előnye a teljesség. A keresési idő (futási idő) magas, de az elemzés teljes. [73]

### Sztochasztikus, mintavételen alapuló technikák

Az elemzések során leggyakrabban a sztochasztikus módszereket alkalmazzák. Előnyük a kimerítő kereséssel szemben a gyorsaság. Hátránya viszont, hogy elfogultak, használatukkal nem lehet elérni teljes eredményt. [73]

Eddig kétféle mintagenerálási technikát alkalmaztak a szakirodalomban [73]:

- A trajektória alapú mintavétel, amely az optimalizálási módszerek trajektóriája, és folyamatos megoldásjelölteket állít elő.
- A felfedezésen alapuló mintavételi stratégiák, amelyek szórt mintákat generálnak. Az eljárások kiegészíthetők rekombinációs operátorokkal vagy lokális szomszédság operátorokkal.

### Trajektória alapú mintavétel

A mintavételezett trajektóriák útvonalat hoznak létre a keresési térben, vagy más szóval szomszédos állapotpontok (megoldásjelöltek) sorozatát. A módszert sétának (walk) is nevezik.

A séta (walk) egy véletlenszerű megoldásjelöltől indul, és a szomszédsági keresést használja a szomszédos megoldásjelöltek előállításához. A szomszédsági keresés típusától függően többféle séta lehetséges [74]:

- A véletlen séta (random walk) során egy állapotpont véletlenszerűen kerül kiválasztásra a szomszédok halmazából.
- Az adaptív séta (adaptive walk) során a jobb állapotpont (szomszéd) kerül kiválasztásra. Itt több stratégiát is lehet használni annak kiválasztására, hogy melyik jobb szomszéd állapotpontot válasszuk, például bármelyik jobb megoldást, legjobbat a jobb szomszédok közül, legrosszabbat a jobb szomszédok közül.
- A fordított adaptív séta (reverse adaptive walk) során a rosszabb szomszéd kerül kiválasztásra. Ez az adaptív séta fordítottja.
- Az emelkedő-lejtő (uphill-dowhill walk) során először adaptív sétát hajt végre az algoritmus, majd ha a lépés során nem található jobb keresési tér pont (megoldást), akkor fordított adaptív sétát végez, amíg jobb keresési tér pontot nem talál.
- A semleges séta (neutral walk) kiválaszt egy szomszédot, akinek a fitness értéke megegyezik az aktuális állapot fitness értékével (és próbálja növelni a távolságot a kiindulási megoldástól).

## **6.2. Teszt eredmények**

Céлом különböző többcélú optimalizálási technikák, heurisztikus optimalizálási algoritmusok és szomszédsági operátorok vizsgálata a keresési tér elemzés szempontjából. Általában a keresési tér minősége és reprezentációja az optimalizálási feladat természetétől függ. Az ebben a fejezetben bemutatott feladat egy többszintes járatszervezési feladat (Multi-Echelon VRP) a következő tulajdonságokkal: 4 szint, 5 csomópont a depó szinten, 10 csomópont az első szintű elosztó (satellite) szintjén, 10 csomópont a második szintű elosztó (satellite) szintjén és 15 csomópont a vásárló szintjén. Összesen tehát a csomópontok száma 40. A rendszer 1 típusú terméket tartalmaz, és feltételezem, hogy csak egy periódus van. Minden szinten 2-2 jármű található, összesen 8. A csomópontok tulajdonságai közül a következő tényezőket veszi figyelembe a teszt adatsor: a csomópontok közötti utazási idő, a csomópontok közötti távolság és a csomópontok közötti útvonal minősége. A járművek tulajdonságai között a következő komponenseket vettem figyelembe: kapacitás korlát, üzemanyag fogyasztás és bérleti díj. Az időbeli attribútumok közül a mintarendszer a következőket tartalmazza: berakodási idő, kirakodási idő, adminisztrációs idő. A termékek attribútumai közül a csomópontok termékigényét használtam. A költségek attribútumok közül a

következők kerültek be a rendszerbe: berakodási költség, kirakodási költség, adminisztrációs költség és minőségellenőrzési költség. A kiszállítás, mint működési paraméter is alkalmazásra került. A következő metrikákat használtam: az útvonal hossza, üzemanyag fogyasztás, jármű bérleti díja, útvonal minősége, útvonalidő és meg nem látogatott vásárlók.

Az 1. táblázatban összefoglalom, hogy melyek a hatékony többcélú optimalizálási technikák és melyek a hatékony heurisztikák a mérés során. Ezenkívül a gyenge többcélú optimalizálási technikák és a gyenge heurisztikák is szerepelnek a táblázatban. Az eredmények azt mutatják, hogy a szimulált hűtés és a tabu keresési algoritmusok adták a legjobb eredményeket.

<b>Többcélú optimalizálási technika elemzése</b>	
<b>Hatékony többcélú optimalizálási technika</b>	WGCM, WPM, WESM
<b>Hatékony heurisztika</b>	SA_FI, SA_G, SA_NI, SA_NN, TS_AI, TS_FI, TS_G, TS_NN, FCHC_NN, AS_C, RBVAS_C
<b>Gyenge többcélú optimalizálási technika</b>	WSM, PR
<b>Gyenge heurisztika</b>	FA, FA_C, HS, HS_C

**1. táblázat: Többcélú optimalizálási technika elemzése**

A 2. táblázat bemutatja, hogy mely heurisztikák hatékonyak és melyek gyengék. Az iteratív heurisztikus algoritmusok akkor hatékonyak, ha a megoldások változóak, tehát a tér jól van leképezve. A fitness értékek a megoldások közötti távolságok átlagával változnak. Az eredmények azt mutatják, hogy a szimulált hűtés, tabu keresés és hangya algoritmusok adták a legjobb eredményeket.

<b>Iteratív heurisztikák elemzése</b>	
<b>Hatékony iteratív heurisztika</b>	ACS, AS, ESAS, FCHC, GA, MMAS, RBVAS, SA, TS
<b>Gyenge iteratív heurisztika</b>	FA, HS

**2. táblázat: Iteratív heurisztikák elemzése**

A 3. táblázat az operátorok hatékonyságát mutatja be a séta (walk) technika elemzéssel. Az egyes sétákkal való elemzés során arra a következtetésre jutottam, hogy a 2-opt és a részleg megfeleltetésű keresztezési (PMX) operátorok sokkal hatékonyabbak, mint a ciklus keresztezés (CX) és a sorrendi keresztezés (OX) operátorok.

<b>Operátor elemzés (sétákkal)</b>		
	<b>Hatékony operátor</b>	<b>Gyenge operátor</b>
<b>Véletlen séta (Random walk)</b>	2-opt, OX, PMX	
<b>Adaptív séta (Adaptive walk)</b>	2-opt	CX, OX
<b>Fordított adaptív séta (Reverse adaptive walk)</b>	2-opt	CX
<b>Emelkedő-lejtő séta (Uphill-downhill walk)</b>		
<b>Semleges séta (Neutral walk)</b>	PMX	CX, OX
<b>Fordított semleges séta (Reverse neutral walk)</b>	PMX, 2-opt	

**3. táblázat: Operátor elemzés (sétákkal)**

## **7. Az általános járatszervezési feladat alkalmazásai**

Ebben a fejezetben esettanulmányokat mutatok be, amelyek az általános járatszervezési feladatok gyakorlati alkalmazhatóságát prezentálom.

- Pékárúk szállítása: a pékáru szállítása azt jelenti, hogy a pékségekben a kenyerek és péksütemények kerülnek kiszállításra. Ennek a szállítási feladatnak az a jellemzője, hogy a rendszer csak egy depót és több vásárlót tartalmaz. Nincs szükség elosztóhelyekre, mert a pékségek az üzletek közelében találhatók.
- Rövid szavatosságú élelmiszerek szállítása: nagyon hasonlít a pékáruk szállításához, hasonló attribútumok jellemzik. A különbség, hogy itt nem gyakori a begyűjtés, csak a kiszállítás, és a periódus érték is nagyobb, mint a pékáruk esetén pl. heti egyszeri szállítás. A begyűjtés a zöldségeknél és gyümölcsöknél lehet fontos.
- Hűtött termékek (pl. tejtermékek, hús) szállítása: ez a szállítási feladat nagyon hasonlít a rövid szavatosságú élelmiszerek szállításához, de itt csak speciális járművekkel lehet a termékeket kiszállítani. A periódus értéke is kicsi (pl. napi szállítás), mert romlandó termékekről van szó.
- Tartós élelmiszerek szállítása: ez a feladat a pékáruk kiszállításához áll közel, abban különbözik, hogy nincs begyűjtés, csak kiszállítás. A periódus időnek magas érték adható (pl. havi vagy éves szállítás). Ez a feladat gyakran már nem csak egy depót tartalmaz, hanem több depót. Ezenkívül elosztóhelyeket (satellite) is tartalmazhat, akár több szinten is, például a külföldről érkező termékek esetében. A működési paraméternél a nyílt útvonal is lehetséges, ez főként vasúti szállításra vonatkozhat. Ennél a szállításnál depóközi útvonal is előfordulhat.
- Italok (üdítőitalok, alkohol) szállítása: ez a feladat hasonló a pékáruk és a tartós élelmiszerek szállításához. Csupán néhány eltéréssel bír a feladat. A pékárukhoz hasonlóan itt is lehetséges a kiszállítás és begyűjtés kombinációja, valamint a termékek többszintű, különböző típusú járművekkel történő szállítása.
- Tartályszállítás: tartályszállítás során a folyékony termékeket tartályokban szállítják. Ilyen folyékony termékek lehetnek például az alábbiak: víz, benzin, tej, olaj stb. Ehhez speciális járművekre van szükség. Ekkor általában csak egyfajta termék szállítható egyszerre.
- Tartós termékek szállítása: a tartós termékek szállítása megegyezik az italok szállításával, annyi különbséggel, hogy legtöbbször csak kiszállítás történik, a begyűjtés nem gyakori.
- Szemétszállítás: a szemétszállítás eltér a korábbi szállítási feladatoktól. Ez a feladat magába foglalja a háztartásokból származó szemét és az egyes gyárakból és irodaházakból származó szemét szállítását a szemételepre.
- Levélszállítás (belföldi, külföldi): a levélszállítás a fenti feladatoktól teljesen eltér. Ez a feladat azt jelenti, hogy a küldeményt a posta kézbesíti a feladótól a címzetthez.
- Csomagszállítás (belföldi, külföldi): a csomagok esete nagyon hasonló a levelek esetéhez. A különbség itt az, hogy a csomópontok közötti útvonal minősége nagyon fontos szempont a törekeny, terjedelmes, értékes csomagok miatt.
- Pénzszállítás: a pénzszállítás a járatszervezés speciális esete. A pénzszállítás azt jelenti, hogy a pénzt postahivatalokba, üzletbe, bankokba szállítják, vagy onnan elszállítják. A pénzt speciális pénzszállító járművel kell szállítani, biztonsági őrökkel, felszereléssel.
- Reklámújságok szállítása: a reklámújságokat a legtöbb esetben nem a posta kézbesíti. Ennél a feladatnál a csomópontok néhány szintje különböztethető meg attól függően, hogy milyen reklámújságról van szó (pl. nagy bevásárlóközpont, helyi bolt). A reklámújságokat időszakosan kézbesítik, pl. hetente, havonta. Általában egyfajta járművel szállítják őket.
- Újságok szállítása: az újságok kézbesítésével kapcsolatban két fő eset különböztethető meg. Az egyik az, hogy amikor előfizet az újságra, azt házhoz szállítják. A másik eset az, amikor az újságot az újságárusokhoz (vagy üzletkehez) szállítják el a szállítók.
- Utazásszervezés: az utazási iroda utazásszervezése egy teljesen speciális járatszervezési feladatnak tekinthető. Nincsenek szintek, minden csomópont egyenlő, tehát a feladat egyszintű. A csomópontok közötti utazási idő kulcsfontosságú tényező. A csomópontok

közötti biztonsági tényező szintén fontos, ami lehetővé teszi az utasok számára, hogy minél biztonságosabb területen utazzanak. A csomópontok közötti útvonal minősége is fontos lehet. A cél, hogy az útvonal minősége minél jobb legyen. A rendszerben minden csomópont egyforma.

- Üzemen belüli anyagmozgatás: raktár és gyártóhely között: az üzemen belüli anyagmozgatási folyamatok nagyban különböznek az üzemen kívüli anyagmozgatási folyamatoktól. Itt a szintes rendszerben a depó a raktároknak, az egyes gyártóhelyek a vásárlóknak felelnek meg. Elosztóhely (satellite) nincs, az anyagmozgatás csak a raktár és a gyártóhelyek között történik.
- Üzemen belüli anyagmozgatás: raktárban: az üzemen belüli anyagmozgatási feladat (raktári átrendezés) hasonló a raktár és a gyártási egységek közötti anyagmozgatáshoz, de sok tekintetben különbözik is. Itt nincsenek privilegizált csomópontok, így nincsenek szintek (sem depó, sem elosztóhely - satellite), minden pozíció egyenlőnek számít, a szállítás bármely pozícióból bármely pozícióba megtörténhet.
- Üzemen belüli anyagmozgatás: szállítás egyéb helyekre: ez az eset abban különbözik a raktár és a gyártóegységek közötti anyagmozgatástól, hogy itt nincs begyűjtés, mivel itt az a cél, hogy a raktár különböző helyeiről kiszállítsák a termékeket egy meghatározott csomópontra, ahonnan harmadik fél helyszínére szállítják ki a termékeket.
- Betegszállítás: a betegszállítás eltér az eddig tárgyalt esetektől, ennél a feladatnál nem termékek, hanem a betegek szállítása történik.
- Karbantartás: a karbantartás is nagyon eltér az eddig bemutatott esetektől. Itt minden csomópontot meg kell látogatni. Az egyes karbantartó csapatok által végzett karbantartási tevékenységek ideje is különböző lehet.

## 7.1. Futási eredmények

Ebben az alfejezetben két esettanulmányon keresztül mutatom be az általános járatszervezési modellel megvalósító program teszteredményeit. A modellel 2 speciális szállítási feladattal teszteltem. Az első a *levélszállítás*, a második pedig az *üzemen belüli anyagmozgatás: raktár és gyártóhely között*. Azért választottam ezt a két feladatot, mert mindkét probléma gyakori szállítási feladat, és a két feladat paramétereit nagyon eltérők.

### 7.1.1. Levélszállítás

A 4. táblázat a postai küldeményekre vonatkozó adatsorom alap paramétereit foglalja össze.

Paraméter	Érték	Paraméter	Érték
Szintek száma	4	Negyedik szintű csomópontok elhelyezkedése	[600,700]
Első szinthez tartozó csomópontok száma	5	Töltőállomások száma	2
Első szintű csomópontok elhelyezkedése	[0,100]	Töltőállomások elhelyezkedése	[1000,1100]
Második szinthez tartozó csomópontok száma	10	Periódusok száma	1
Második szintű csomópontok elhelyezkedése	[200,300]	Terméktípusok száma	1
Harmadik szinthez tartozó csomópontok száma	10	Járművek száma (szintenként)	2
Harmadik szintű csomópontok elhelyezkedése	[400,500]	Bérelt járművek száma	0
Negyedik szinthez tartozó csomópontok száma	15		

**4. táblázat: Levélszállítási feladat alap paramétereit**



Az 5. táblázat szerint a csomópontok négy különböző szinten helyezkednek el. Azért választottam ennyi szintet, mert minden egyes levél (többnyire külföldi levél) több elosztóponton megy keresztül, miközben a feladótól a címzetthez kerül. A levelek kézbesítése különböző járművekkel lehetséges. A címzetthez közel feltételezhetően autóval kézbesítik, így töltőállomásra is szükség van. A probléma nem tesz különbséget a levéltípusok között, így gyakorlatilag csak egyfajta árut tartalmaz a rendszer.

Paraméter	Érték	Paraméter	Érték
Adminisztrációs költség	statikus, [10,50]	Minőségellenőrzési költség	statikus, [10,50]
Berakodási költség	statikus, [10,50]	Kirakodási költség	statikus, [10,50]

**5. táblázat: Levélszállítási feladat költséggel kapcsolatos paraméterei**

A 6. táblázat szemlélteti a levélkézbesítés során előforduló költségparamétereket. Ezek az adminisztráció, be- és kirakodás és minőségellenőrzési költség.

Paraméter	Érték	Paraméter	Érték
Útvonal állapota	statikus, [100,500]	Csomópontok közötti idő	statikus, [10,100]
Csomópontok közötti távolság	statikus, koordináta alapú		

**6. táblázat: Levélszállítási feladat csomóponttal kapcsolatos paraméterei**

A csomópontok paramétereit a 6. táblázat tartalmazza. A távolság és az idő szinte minden szállítási feladatban nagyon fontos tényező. Az útvonal állapota elsősorban az autós közlekedés szempontjából fontos (kivéve repülővel és vasúton történő szállítás).

Paraméter	Érték	Paraméter	Érték
Csomópont termékigénye	statikus, [10,100]	Berakodási idő	statikus, [30, 50]
Adminisztrációs idő	statikus, [30, 50]	Kirakodási idő	statikus, [30, 50]

**7. táblázat: Levélszállítási feladat termékkel kapcsolatos paraméterei**

A termékekhez kapcsolódó attribútumok közül (7. táblázat) a legfontosabb a csomópont termékigénye, azaz, hogy hány levelet kell eljuttatni egy csomóponthoz. Továbbá nagyon fontos az adminisztrációs, be- és kirakodási idő.

Paraméter	Érték	Paraméter	Érték
Jármű kapacitáskorlátja	statikus, [10000, 50000]	Jármű üzemanyag-fogyasztása	statikus, [10, 100]

**8. táblázat: Levélszállítási feladat járművel kapcsolatos paraméterei**

A járművekkel kapcsolatos paraméterek közül (8. táblázat) fontos a jármű kapacitáskorlátja. A kapacitáskorlát ennél a probléma típusnál viszonylag nagy, mert maguk a levelek kicsik. Az üzemanyag fogyasztás is nagyon fontos, szinte minden szállítási feladat fő paraméterének tekinthető.

A metrikák (célfüggvény komponensek) közül a rendszerem a következőket tartalmazza: útvonal hossza, üzemanyag fogyasztás, útvonal állapota, útvonal ideje, a meg nem látogatott csomópontok száma. Ezek azok a paraméterek, amelyek a legtöbb szállítási feladat során előfordulnak.

### 7.1.2. Üzemen belüli anyagmozgatás: raktár és gyártóhely között

Az üzemen belüli anyagmozgatás a raktár és a gyártóhely között szintén gyakori szállítási feladat, minden gyártás során előfordul.

Paraméter	Érték	Paraméter	Érték
Szintek száma	2	Töltőállomások elhelyezkedése	[1000,1100]
Első szintű csomópontok száma	1	Periódusok száma	1
Első szintű csomópontok elhelyezkedése	[0,100]	Terméktípusok száma	1
Második szintű csomópontok száma	25	Járművek száma (szintenként)	2
Második szintű csomópontok elhelyezkedése	[0,100]	A bérelt járművek száma	0
Töltőállomások száma	2		

**9. táblázat: Üzemen belüli anyagmozgatási feladat (raktár és a gyártóhely között) alap paramétereit**

A feladat alap paramétereit a 9. táblázat szemlélteti. A rendszer csak két szintet tartalmaz, az első szinten a raktár és a második szinten a termelőegységek. A járművek töltést igényelhetnek, a járművek lehetnek elektromos járművek is, így a rendszeremben töltőállomás is található.

Paraméter	Érték	Paraméter	Érték
Adminisztrációs költség	statikus, [10,50]	Minőségellenőrzési költség	statikus, [10,50]
Berakodási költség	statikus, [10,50]	Kirakodási költség	statikus, [10,50]
Becsomagolási költség	statikus, [10,50]	Kicsomagolási költség	statikus, [10,50]

**10. táblázat: Üzemen belüli anyagmozgatási feladat (raktár és a gyártóhely között) költséggel kapcsolatos paramétereit**

A költségparamétereket a 10. táblázat szemlélteti. A szállítás során felmerülhetnek adminisztrációs, be- és kirakodási költségek, valamint minőségellenőrzési költségek.

Paraméter	Érték	Paraméter	Érték
Csomópontok közötti távolság	statikus, koordináta alapú	Csomópontok közötti idő	statikus, [100,500]

**11. táblázat: Üzemen belüli anyagmozgatási feladat (raktár és a gyártóhely között) csomóponttal kapcsolatos paramétereit**

A csomóponttal kapcsolatos paraméterek közül (11. táblázat) csak kettőt vettem figyelembe (ezek minden szállítási feladatnál fontosak): a csomópontok közötti távolságot és az útvonal idejét.

Paraméter	Érték	Paraméter	Érték
Csomópont termékigénye	statikus, [10,100]	Minőségellenőrzési idő	statikus, [30,50]
Adminisztráció idő	statikus, [30,50]	Szolgáltatás ideje	statikus, [30,50]
Berakodási idő	statikus, [30,50]	Kirakodási idő	statikus, [30,50]
Csomagolási idő	statikus, [30,50]	Kicsomagolási idő	statikus, [30,50]

**12. táblázat: Üzemen belüli anyagmozgatási feladat (raktár és a gyártóhely között) csomóponttal kapcsolatos paramétereit**

A termékekkel kapcsolatos paramétereket a 12. táblázat tartalmazza. Itt is a klasszikus szállítással kapcsolatos paramétereket vettem figyelembe: csomópont áruigénye, adminisztrációs, be- és kirakodási idő, minőségellenőrzés. A szolgáltatás ideje valójában a gyártás idejét jelenti.

<b>Paraméter</b>	<b>Érték</b>	<b>Paraméter</b>	<b>Érték</b>
Jármű kapacitáskorlátja	statikus, [10000,50000]	Maximális távolság teli tankkal/teljes feltöltéssel	statikus, [50000,100000]
Jármű üzemanyag fogyasztása	statikus, [10,100]	Jármű töltési ideje	statikus, [10,30]

**13. táblázat: Üzemen belüli anyagmozgatási feladat (raktár és a gyártóhely között) járművel kapcsolatos paraméterei**

A járművek attribútumai (13. táblázat) a klasszikus szállítási feladatok szerinti paraméterek: A jármű kapacitáskorlátja, az üzemanyag fogyasztás (kisebb járművekkel szállítás az üzemen belül), teli tankkal megtehető távolság (üzemanyagszint) és a töltési idő.

A metrikák közül csak az útvonal hosszát vettem figyelembe.

## 8. Összefoglalás

A disszertáció központjában egy logisztikai feladat, a járatszervezési feladat (Vehicle Routing Problem -VRP) áll. Az alap járatszervezési feladat esetében a cél a vásárlók áruigényeinek kielégítése. A járművek egy vagy több lerakattól szállítják ki a termékeket a vásárlóknak, majd visszatérnek a lerakatra. A szakirodalom alapján a feladat számos változatát vizsgálták az évek során, és számos megoldási változatot dolgoztak ki a speciális esetekre. Dolgozatom első részében szakirodalmi kutatást végeztem, ahol bemutattam az eddig megjelent járatszervezési komponenseket. A következő részben egy általános modellel szembeni általános követelményeket elemeztem. Bemutattam a probléma matematikai modelljét, beleértve a változókat, korlátokat, célfüggvényeket. A matematikai modell után egy ontológiai modellt részleteztem a járatszervezési feladat optimalizálásának a vezérlésének megtervezéséhez. Az ontológia segítségével többek között leírható, hogy milyen típusú termékek milyen járművekkel szállíthatók, milyen típusú termékek szállíthatók együtt, milyen típusú termékekre lehet szüksége az egyes vásárlóknak, milyen komponenseket kell használni a rendszer kialakításánál. Ezt követően felvázoltam az alkalmazott optimalizálási algoritmusokkal és kiértékeléssel kapcsolatos formalizmust.

A disszertációban különböző optimalizáló algoritmusok hatékonyságát elemeztem. A heurisztikus algoritmusok két részre oszthatók: konstrukciós és javító algoritmusokra. A konstrukciós algoritmusok egy lehetséges megoldást készítenek. Lokálisan a legjobb lépéseket teszik meg, de kizárólagos használatukkal legtöbbször nem érhető el a globális optimum. Futási idejük általában alacsony. A disszertációban a következő konstrukciós algoritmusokat használtam: véletlen pont beszúrása (Arbitrary Insertion), legolcsóbb pont beszúrása (Cheapest Insertion), legtávolabbi pont beszúrása (Farthest Insertion), Greedy, legközelebbi pont beszúrása (Nearest Insertion), legközelebbi szomszéd algoritmus (Nearest Neighbor). A javító algoritmusok iteratív módon javítanak egy vagy több lehetséges megoldást. Futási idejük általában magas. Alkalmazásukkal lehetséges a globális optimumot elérni. A disszertációban a következő javító algoritmusokat használtam: Ant Colony System, Ant System, Elitist Strategy of Ant System, szentjánosbogár algoritmus (Firefly Algorithm), First Choice Hill Climbing, genetikai algoritmus (Genetic Algorithm), harmónia keresés (Harmony Search), MAX-MIN Ant System, részecskeraj optimalizálás (Particle Swarm Optimization), Rank Based Version of Ant System, szimulált lehűtés (Simulated Annealing), tabu keresés (Tabu Search). Ebben a lépésben az egyes többcélú optimalizálási technikák és a heurisztikus algoritmusok hatékonyságát elemeztem. A disszertációban a következő többcélú optimalizálást alkalmaztam: Bounded Objective Function Method, Pareto rangsorolás (Pareto Ranking), súlyozott exponenciális összeg módszer (Weighted Exponential Sum Method), súlyozott globális kritérium módszer (Weighted Global Criterion Method), súlyozott összeg módszer (Weighted Product Method), súlyozott összeg módszer (Weighted Sum Method). Elvégeztem az egyes szomszédsági operátorok elemzését is: élcseré (2-opt), sorrendi keresztezés (Order Crossover), ciklus keresztezés (Cycle Crossover), részleges megfeleltetésű keresztezés (Partially Matched Crossover). Az elemzés során megállapítottam, hogy a konstrukciós algoritmusok javítása jobbnak bizonyult, mint a véletlenszerűen generált megoldások javítása. Az operátorok elemzése során az élcseré (2-opt) és a részleges megfeleltetésű keresztezés (Partially Matched Crossover) operátorok hatékonyabbnak bizonyultak, mint a ciklus keresztezés (Cycle Crossover) és a sorrendi keresztezés (Order Crossover). Bemutattam azt is, hogy a javasolt általános modell sokféle szállítási feladatot képes kezelni. Megfelelő minőségű eredményt kaptam a gyakorlati példákra.

A tudományos eredményeket 5 tézisben foglaltam össze.

### 1. tézis:

Kidolgoztam egy új általános járatszervezési modellt, amely alkalmas (mind a célfüggvény, mind a korlátok tekintetében) különböző típusú szállítási problémák megoldására. A modellben 4 alapkomponeus található, amelyekhez kapcsolódóan különböző attribútumok határozhatók meg. Az alap komponensek az alábbiak: gráf leírók, járművek, termékek, szolgáltatások és az idő. Az alapkomponeusok közötti kapcsolatokat függvényekkel határoztam meg. Ebben az új modellben a kapcsolatok 6 nagy csoportba csoportosíthatóak, melyek az alábbiak: a csomópontokkal, járművekkel, idővel, termékekkel, költségekkel és működési paraméterekkel kapcsolatos komponensek. Ennek a komplex járatszervezési modellnek az egyik újdonsága az egyetlen komplex döntési változó, amely a hagyományos járatszervezési modellek döntési változóinak széles skáláját tartalmazza. A komplex járatszervezési problémák megoldásainak különböző korlátjai vannak. A modell 11 korlátot és 23 metrikát tartalmaz.

Kapcsolódó publikációim: [P/1], [P/5], [P/6], [P/8], [P/16], [P/17], [P/22], [P/23], [P/24], [P/25].

### 2. tézis:

Új ontológiai rendszer megközelítést készítettem az általános járatszervezési problémára az OWL modellezési nyelv segítségével. Az elkészített ontológia rendszert szabályalapú validáláshoz használtam. A rendszer tartalmazza a járatszervezési feladat általános modelljének alap komponenseit, a köztük lévő lehetséges kapcsolatokat (komponenseket) és a metrikákat. A rendszer alap komponenseit további alosztályokkal (terméktípusok alkategóriái, járműtípusok és csomóponttípusok) bővítettem. Létrehoztam egy ontológia rendszert, amely rugalmasan és hatékonyan támogatja a döntést az alábbiakkal kapcsolatosan:

- A csomópontokba/csomópontokból történő szállítás során használható járatszervezési komponensek kiválasztása.
- A csomópontokba szállítható termékek kiválasztása.
- A járatszervezési metrikák kiválasztása, amelyek a csomópontokba/csomópontokból történő szállítás során használhatók.
- A csomópontokból szállítható termékek kiválasztása.
- Az egyes termékek szállítására alkalmas járművek kiválasztása.
- Az együtt szállítható termékek kiválasztása.
- A járatszervezési komponensek kiválasztása, amelyek az egyes járművek során használhatók.
- A járatszervezési metrikák kiválasztása, amelyek az egyes járművek során használhatók.
- Az adott járművekkel szállítható termékek kiválasztása.

Kapcsolódó publikációim: [P/2], [P/24].

### 3. tézis:

Megalkottam az általános járatszervezési probléma újszerű reprezentációját. A reprezentációs modell a következő elemeket tartalmazza:

- A csomópontok sorrendjét leíró vektor,
- A járművek-csomópontok-termékek hozzárendelését leíró mátrix,
- Járművek-töltőállomások hozzárendelését leíró vektor,
- A járművek-felsőbb szintű csomópontok hozzárendelését leíró vektor,
- Szintet leíró vektor,
- Periódust leíró vektor,
- Megoldást leíró vektor.

*Bemutattam és elemeztem a heurisztikus algoritmusok keresési operátorait.*

*A csomópontok sorrendjét leíró vektorra általam alkalmazott operátorok (a szakirodalom alapján) a következők:*

- *Élcseré (2-opt),*
- *Részleges megfeleltetésű keresztezés (Partially Matched Crossover - PMX),*
- *Sorrendi keresztezés (Order Crossover - OX),*
- *Ciklikus keresztezés (Cycle Crossover – CX).*

*A járművek-csomópont-termékek hozzárendelését leíró mátrixra, a járművek–felsőbb szintű csomópontok hozzárendelését leíró vektorra és a járművek-töltőállomások hozzárendelését leíró vektorra alkalmazott operátor az alábbi:*

- *“Újra generálás” operátor.*

*A járatszervezési feladat általános modelljének reprezentációjának kiértékelését is elvégeztem.*

*Kapcsolódó publikációim: [P/1], [P/5], [P/6], [P/8], [P/10], [P/15], [P/16], [P/17], [P/21], [P/22], [P/23].*

#### **4. tézis:**

*Analitikusan elemeztem az általános járatszervezési feladat optimalizálásához tartozó keresési teret. A keresési tér vizsgálat során először a többcélú optimalizálási technikák és a heurisztikus algoritmusok hatékonyságát elemeztem. Ezután elemeztem az operátorok hatékonyságát: élcseré (2-opt), részleges megfeleltetésű keresztezés (Partially Matched Crossover - PMX), sorrendi keresztezés (Order Crossover - OX), ciklikus keresztezés (Cycle Crossover – CX). Az operátorok elemzése során különböző séta technikákat alkalmaztam: véletlen séta (random walk), adaptív séta (adaptive walk), fordított adaptív séta (reverse adaptive walk), emelkedő-lejtő séta (uphill-dowhill walk), semleges séta (neutral walk), fordított semleges séta (reverse adaptive walk). A keresési teret információelmélet alapján is elemeztem. Az operátorok fitness felhő elemzését is elvégeztem.*

*A vizsgált minta alapján megállapítható, hogy a következő többcélú optimalizálási technikák hatékonyak: súlyozott globális kritérium módszer (Weighted Global Criterium Method - WGCM), súlyozott szorzat módszer (Weighted Product Method - WPM), súlyozott exponenciális összeg módszer (Weighted Exponential Sum Method - WESM). Az elvégzett elemzések alapján megállapítható, hogy a következő heurisztikus módszerek hatékonyak a járatszervezési problémákra: szimulált hűtés (Simulated Annealing - SA), tabu keresés (Tabu Search - TS), First Choice Hill Climbing (FCHC), genetikus algoritmus (Genetic Algorithm - GA), Rank Based Version of Ant System (RBVAS). A mérések során azt is megfigyeltem, hogy a konstrukciós algoritmusok megoldásainak javítása hatékonyabbnak bizonyult, mint a véletlenszerűen generált megoldások javítása. A mérések során azt is megállapítottam, hogy az élcseré (2-opt), és a részleges megfeleltetésű keresztezés (Partially Matched Crossover - PMX) operátorok hatékonyabbak, mint a sorrendi keresztezés (Order Crossover - OX) és a ciklikus keresztezés (Cycle Crossover – CX) operátorok.*

*Kapcsolódó publikációim: [P/3], [P/4], [P/7], [P/9], [P/11], [P/12], [P/13], [P/18].*

#### **5. tézis:**

*Megállapítottam, hogy az általános járatszervezési modell a gyakorlatban fontos szállítási feladatok széles körét képes kezelni. A teszt futások során megfelelő minőségű gyakorlati megoldásokat kaptam, mely alátámasztja a kidolgozott módszer alkalmazhatóságát.*

*Kapcsolódó publikációim: [P/1], [P/2], [P/15].*

## **Felhasznált irodalom**

---

- [1] Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1), 80–91
- [2] Stricker, R. (1970). Public sector vehicle routing: the Chinese Postman Problem (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [3] Christofides, N. (1976). The vehicle routing problem. *Revue française d'automatique, informatique, recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle*, 10(V1), 55-70.
- [4] Cordeau, J. F., Laporte, G., & Mercier, A. (2001). A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational research society*, 52(8), 928-936.
- [5] Belhaiza, S., Hansen, P., & Laporte, G. (2014). A hybrid variable neighborhood tabu search heuristic for the vehicle routing problem with multiple time windows. *Computers & Operations Research*, 52, 269-281.
- [6] Taillard, É., Badeau, P., Gendreau, M., Guertin, F., & Potvin, J. Y. (1997). A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows. *Transportation science*, 31(2), 170-186.
- [7] Salhi, S., & Nagy, G. (1999). A cluster insertion heuristic for single and multiple depot vehicle routing problems with backhauling. *Journal of the operational Research Society*, 50(10), 1034-1042.
- [8] Brandão, J. (2004). A tabu search algorithm for the open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 157(3), 552-564.
- [9] Crevier, B., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2007). The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes. *European journal of operational research*, 176(2), 756-773.
- [10] Hemmelmayr, V. C., Cordeau, J. F., & Crainic, T. G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for two-echelon vehicle routing problems arising in city logistics. *Computers & operations research*, 39(12), 3215-3228.
- [11] Gendreau, M., Laporte, G., Musaraganyi, C., & Taillard, É. D. (1999). A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 26(12), 1153-1173.
- [12] Ralphs, T. K., Kopman, L., Pulleyblank, W. R., & Trotter, L. E. (2003). On the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical programming*, 94(2-3), 343-359.
- [13] Ai, T. J., & Kachitvichyanukul, V. (2009). A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Operations Research*, 36(5), 1693-1702.
- [14] Kabcome, P., & Mouktonglang, T. (2015). Vehicle routing problem for multiple product types, compartments, and trips with soft time windows. *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, 2015.
- [15] Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & Bektaş, T. (2015). The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations. *International Journal of Production Economics*, 164, 366-378.
- [16] Schneider, M., Stenger, A., & Goeke, D. (2014). The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. *Transportation Science*, 48(4), 500-520.
- [17] Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., Lahrichi, N., & Rei, W. (2012). A hybrid genetic algorithm for multidepot and periodic vehicle routing problems. *Operations Research*, 60(3), 611-624.
- [18] Stavropoulou, F., Repoussis, P. P., & Tarantilis, C. D. (2019). The Vehicle Routing Problem with Profits and consistency constraints. *European Journal of Operational Research*, 274(1), 340-356
- [19] Huang, Y. H., Blazquez, C. A., Huang, S. H., Paredes-Belmar, G., & Latorre-Núñez, G. (2019). Solving the Feeder Vehicle Routing Problem using ant colony optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 520-535
- [20] Bertazzi, L., & Secomandi, N. (2018). Faster rollout search for the vehicle routing problem with stochastic demands and restocking. *European Journal of Operational Research*, 270(2), 487-497
- [21] Fernández, E., Roca-Riu, M., & Speranza, M. G. (2018). The shared customer collaboration vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 265(3), 1078-1093
- [22] Nucamendi-Guillén, S., Angel-Bello, F., Martínez-Salazar, I., & Cordero-Franco, A. E. (2018). The cumulative capacitated vehicle routing problem: New formulations and iterated greedy algorithms. *Expert Systems with Applications*, 113, 315-327
- [23] Archetti, C., Fernández, E., & Huerta-Muñoz, D. L. (2017). The flexible periodic vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 85, 58-70
- [24] Reihaneh, M., & Ghoniem, A. (2019). A branch-and-price algorithm for a vehicle routing with demand allocation problem. *European Journal of Operational Research*, 272(2), 523-538
- [25] Baniamerian, A., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). Modified variable neighborhood search and genetic algorithm for profitable heterogeneous vehicle routing problem with cross-docking. *Applied Soft Computing*, 75, 441-460

- [26] Atefi, R., Salari, M., Coelho, L. C., & Renaud, J. (2018). The open vehicle routing problem with decoupling points. *European Journal of Operational Research*, 265(1), 316-327
- [27] Archetti, C., Savelsbergh, M., & Speranza, M. G. (2016). The vehicle routing problem with occasional drivers. *European Journal of Operational Research*, 254(2), 472-480
- [28] Sabar, N. R., Bhaskar, A., Chung, E., Turky, A., & Song, A. (2019). A self-adaptive evolutionary algorithm for dynamic vehicle routing problems with traffic congestion. *Swarm and evolutionary computation*, 44, 1018-1027
- [29] Ran LIU, Yangyi TAO, Xiaolei XIE (2019): An adaptive large neighborhood search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and synchronized visits *Computers & Operations Research Vol 101*, 250-262
- [30] Poonthalir, G., & Nadarajan, R. (2018). A fuel efficient green vehicle routing problem with varying speed constraint (F-GVRP). *Expert Systems with Applications*, 100, 131-144.
- [31] Bodin, L., Mingozzi, A., Baldacci, R., & Ball, M. (2000). The rollon–rolloff vehicle routing problem. *Transportation Science*, 34(3), 271-288.
- [32] Salavati-Khoshghalb, M., Gendreau, M., Jabali, O., & Rei, W. (2019). An exact algorithm to solve the vehicle routing problem with stochastic demands under an optimal restocking policy. *European Journal of Operational Research*, 273(1), 175-189
- [33] Toffolo, T. A., Christiaens, J., Van Malderen, S., Wauters, T., & Berghe, G. V. (2018). Stochastic local search with learning automaton for the swap-body vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 89, 68-81
- [34] Hu, Z. H., Sheu, J. B., Zhao, L., & Lu, C. C. (2015). A dynamic closed-loop vehicle routing problem with uncertainty and incompatible goods. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 273-297
- [35] Pop, P. C., Kara, I., & Marc, A. H. (2012). New mathematical models of the generalized vehicle routing problem and extensions. *Applied Mathematical Modelling*, 36(1), 97-107
- [36] Song, B. D., & Ko, Y. D. (2016). A vehicle routing problem of both refrigerated-and general-type vehicles for perishable food products delivery. *Journal of Food Engineering*, 169, 61-71
- [37] Talarico, L., Sörensen, K., & Springael, J. (2015). Metaheuristics for the risk-constrained cash-in-transit vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 244(2), 457-470
- [38] Bae, H., & Moon, I. (2016). Multi-depot vehicle routing problem with time windows considering delivery and installation vehicles. *Applied Mathematical Modelling*, 40(13-14), 6536-6549
- [39] Defryn, C., & Sörensen, K. (2017). A fast two-level variable neighborhood search for the clustered vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 83, 78-94
- [40] Drexl, M. (2013). Applications of the vehicle routing problem with trailers and transshipments. *European Journal of Operational Research*, 227(2), 275-283
- [41] Bektaş, T., Gouveia, L., Martínez-Sykora, A., & Salazar-González, J. J. (2019). Balanced vehicle routing: Polyhedral analysis and branch-and-cut algorithm. *European Journal of Operational Research*, 273(2), 452-463
- [42] Ke, L., & Feng, Z. (2013). A two-phase metaheuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 40(2), 633-638
- [43] Talarico, L., Springael, J., Sörensen, K., & Talarico, F. (2017). A large neighbourhood metaheuristic for the risk-constrained cash-in-transit vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 78, 547-556
- [44] Cheng, R., Gen, M., & Tozawa, T. (1995). Vehicle routing problem with fuzzy due-time using genetic algorithms. *Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems*, 7(5), 1050-1061
- [45] Bent, R. W., & Van Hentenryck, P. (2004). Scenario-based planning for partially dynamic vehicle routing with stochastic customers. *Operations Research*, 52(6), 977-987
- [46] Lin, S. (1965). Computer solutions of the traveling salesman problem. *Bell System Technical Journal*, 44(10), 2245-2269.
- [47] Caceres-Cruz, J., Arias, P., Guimarans, D., Riera, D., & Juan, A. A. (2014). Rich vehicle routing problem: Survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 47(2), 1-28.
- [48] Matthew Horridge, Holger Knublauch, Alan Rector, Robert Stevens, Chris Wroe, Simon Jupp, Georgina Moulton, Nick Drummond, Sebastian Brandt (2011): *A Practical Guide To Building OWL Ontologies Using Protege 4 and CO-ODE Tools*, Edition 1.3, The University Of Manchester.
- [49] OWL: <http://www.w3c.hu/forditasok/OWL/REC-owl-features-20040210.html> (Last accessed: 2022.12.30.)
- [50] IRI, URI, URL, URN and their differences <https://fusion.cs.uni-jena.de/fusion/blog/2016/11/18/iri-uri-url-urn-and-their-differences/> (Last accessed: 2022.12.30.)
- [51] OWL: <http://www.w3c.hu/forditasok/OWL/REC-webont-req-20040210.html> (Last accessed: 2022.12.30.)
- [52] Smith, S. F., & Becker, M. A. (1997, March). An ontology for constructing scheduling systems. In *Working Notes of 1997 AAAI Symposium on Ontological Engineering* (pp. 120-127). AAAI Press.
- [53] Himoff, J., Rzevski, G., & Skobelev, P. (2006, May). Magenta technology multi-agent logistics i-Scheduler for road transportation. In *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and*



multiagent systems (pp. 1514-1521).

- [54] Lian, P., Park, D. W., & Kwon, H. C. (2007, December). Design of logistics ontology for semantic representing of situation in logistics. In *Second Workshop on Digital Media and its Application in Museum & Heritages (DMAMH 2007)* (pp. 432-437). IEEE.
- [55] Dong, H., Hussain, F. K., & Chang, E. (2008, October). Transport service ontology and its application in the field of semantic search. In *2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (Vol. 1, pp. 820-824)*. IEEE.
- [56] Hoxha, J., Scheuermann, A., & Bloehdorn, S. (2010, September). An approach to formal and semantic representation of logistics services. In *Proceedings of the Workshop on Artificial Intelligence and Logistics (AILog), 19th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2010), Lisbon, Portugal* (pp. 73-78).
- [57] Xu, D., Wijesooriya, C., Wang, Y. G., & Beydoun, G. (2011). Outbound logistics exception monitoring: A multi-perspective ontologies' approach with intelligent agents. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 13604-13611.
- [58] Anand, N., Yang, M., van Duin, J. R., & Tavasszy, L. (2012). GenCLOn: An ontology for city logistics. *Expert Systems with Applications*, 39(15), 11944-11960.
- [59] De Oliveira, K. M., Bacha, F., Mnasser, H., & Abed, M. (2013). Transportation ontology definition and application for the content personalization of user interfaces. *Expert Systems with Applications*, 40(8), 3145-3159.
- [60] Daniele, L., & Pires, L. F. (2013). An ontological approach to logistics. *Enterprise interoperability, research and applications in the service-oriented ecosystem, IWEI*, 13, 199-213.
- [61] Zhang, L., Jiang, D., Zeng, Y., Ning, Y., & Wang, Q. (2014). Exploring Ontology-driven Modeling Approach for Multi-agent Cooperation in Emergency Logistics. *JCP*, 9(2), 285-294.
- [62] Fumagalli, L., Pala, S., Garetti, M., & Negri, E. (2014, September). Ontology-based modeling of manufacturing and logistics systems for a new MES architecture. In *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems* (pp. 192-200). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [63] Wang, Y., Yi, J., Zhu, X., Luo, J., & Ji, B. (2015). Developing an ontology-based cold chain logistics monitoring and decision system. *Journal of Sensors*, 2015.
- [64] Glöckner, M., & Ludwig, A. (2017). LoSe ODP-an ontology design pattern for logistics services. *Advances in Ontology Design and Patterns*, 32, 131.
- [65] Li, S. T., Hsieh, H. C., & Sun, I. W. (2003, May). An Ontology-based Knowledge Management System for the Metal Industry. In *WWW (Alternate Paper Tracks)*
- [66] Kachitvichyanukul, V., Sombuntham, P., & Kunnapapdeelert, S. (2015). Two solution representations for solving multi-depot vehicle routing problem with multiple pickup and delivery requests via PSO. *Computers & Industrial Engineering*, 89, 125-136.
- [67] Wang, S., Lu, Z., Wei, L., Ji, G., & Yang, J. (2016). Fitness-scaling adaptive genetic algorithm with local search for solving the Multiple Depot Vehicle Routing Problem. *Simulation*, 92(7), 601-616.
- [68] Wang, S., Wang, X., Liu, X., & Yu, J. (2018). A bi-objective vehicle-routing problem with soft time windows and multiple depots to minimize the total energy consumption and customer dissatisfaction. *Sustainability*, 10(11), 4257.
- [69] Zhou, L., Baldacci, R., Vigo, D., & Wang, X. (2018). A multi-depot two-echelon vehicle routing problem with delivery options arising in the last mile distribution. *European Journal of Operational Research*, 265(2), 765-778.
- [70] Englert, M., Röglin, H., & Vöcking, B. (2007, January). Worst case and probabilistic analysis of the 2-Opt algorithm for the TSP. In *SODA* (pp. 1295-1304).
- [71] Hussain, A., Muhammad, Y. S., Nauman Sajid, M., Hussain, I., Mohamd Shoukry, A., & Gani, S. (2017). Genetic algorithm for traveling salesman problem with modified cycle crossover operator. *Computational intelligence and neuroscience*, 2017.
- [72] Wright, S. (1932). The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding, and selection in evolution (Vol. 1, pp. 356-366).
- [73] Erik Pitzer (2013): *Applied Fitness Landscape Analysis*, PhD dissertation, JOHANNES KEPLER UNIVERSITÄT LINZ, Technisch-Naturwissenschaftliche Fakultät
- [74] Pitzer, E., & Affenzeller, M. (2012). A comprehensive survey on fitness landscape analysis. In *Recent advances in intelligent engineering systems* (pp. 161-191). Springer, Berlin, Heidelberg
- [75] Mattfeld, D. C., Bierwirth, C., & Kopfer, H. (1999). A search space analysis of the job shop scheduling problem. *Annals of Operations Research*, 86, 441-453.
- [76] Ventresca, M., Ombuki-Berman, B., & Runka, A. (2013, April). Predicting genetic algorithm performance on the vehicle routing problem using information theoretic landscape measures. In *European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization* (pp. 214-225). Springer, Berlin, Heidelberg.

- [77] Watson, J. P. (2010). An introduction to fitness landscape analysis and cost models for local search. In Handbook of metaheuristics (pp. 599-623). Springer, Boston, MA.
- [78] Humeau, J., Liefoghe, A., Talbi, E. G., & Verel, S. (2013). ParadisEO-MO: From fitness landscape analysis to efficient local search algorithms. *Journal of Heuristics*, 19(6), 881-915.
- [79] Merz, P., & Freisleben, B. (1999). Fitness landscapes and memetic algorithm design. *New ideas in optimization*, 245-260.
- [80] Hordijk, W. (1996). A measure of landscapes. *Evolutionary computation*, 4(4), 335-360.
- [81] Verel, S., Collard, P., & Clergue, M. (2007). Measuring the evolvability landscape to study neutrality. arXiv preprint arXiv:0709.4011.
- [82] Ochoa, G., Tomassini, M., Vérel, S., & Darabos, C. (2008, July). A study of NK landscapes' basins and local optima networks. In Proceedings of the 10th annual conference on Genetic and evolutionary computation (pp. 555-562).
- [83] Marmion, M. E., Dhaenens, C., Jourdan, L., Liefoghe, A., & Verel, S. (2011, January). On the neutrality of flowshop scheduling fitness landscapes. In International Conference on Learning and Intelligent Optimization (pp. 238-252).
- [84] Ochoa, G., Qu, R., & Burke, E. K. (2009, July). Analyzing the landscape of a graph based hyper-heuristic for timetabling problems. In Proceedings of the 11th Annual conference on Genetic and evolutionary computation (pp. 341-348).
- [85] Vassilev, V. K., Fogarty, T. C., & Miller, J. F. (2000). Information characteristics and the structure of landscapes. *Evolutionary computation*, 8(1), 31-60
- [86] Tavares, J., Pereira, F. B., & Costa, E. (2008). Multidimensional knapsack problem: A fitness landscape analysis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 38(3), 604-616.
- [87] Pitzer, E., & Affenzeller, M. (2012). A comprehensive survey on fitness landscape analysis. In Recent advances in intelligent engineering systems (pp. 161-191).
- [88] Stadler, P. F. (2002). Fitness landscapes. In *Biological evolution and statistical physics* (pp. 183-204). Springer, Berlin, Heidelberg
- [89] Uludağ, G., & Uyar, A. Ş. (2009, September). Fitness landscape analysis of differential evolution algorithms. In 2009 Fifth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control (pp. 1-4).
- [90] Merz, P., & Freisleben, B. (2001). Memetic algorithms for the traveling salesman problem. *Complex Systems*, 13(4), 297-346
- [91] Merz, P. (2004). Advanced fitness landscape analysis and the performance of memetic algorithms. *Evolutionary Computation*, 12(3), 303-325
- [92] Chicano, F., Daolio, F., Ochoa, G., Vérel, S., Tomassini, M., & Alba, E. (2012, September). Local optima networks, landscape autocorrelation and heuristic search performance. In International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (pp. 337-347).
- [93] Pitzer, E., & Affenzeller, M. (2012). A comprehensive survey on fitness landscape analysis. In Recent advances in intelligent engineering systems (pp. 161-191).
- [94] Tayarani-N, M. H., & Prügel-Bennett, A. (2016). An analysis of the fitness landscape of travelling salesman problem. *Evolutionary computation*, 24(2), 347-384.
- [95] Mathias, K., & Whitley, D. (1992). Genetic operators, the fitness landscape and the traveling salesman problem. In PPSN (pp. 221-230).
- [96] Fonlupt, C., Robilliard, D., & Preux, P. (1997, April). Fitness landscape and the behavior of heuristics. In *Evolution Artificielle* (Vol. 97, p. 56).
- [97] Wang, S., Zhu, Q., & Kang, L. (2006, May). Landscape properties and hybrid evolutionary algorithm for optimum multiuser detection problem. In International Conference on Computational Science (pp. 340-347).
- [98] Lu, G., Li, J., & Yao, X. (2011, April). Fitness-probability cloud and a measure of problem hardness for evolutionary algorithms. In European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization (pp. 108-117).
- [99] Wang, S., Zhu, Q., & Kang, L. (2006, May). Landscape properties and hybrid evolutionary algorithm for optimum multiuser detection problem. In International Conference on Computational Science (pp. 340-347).
- [100] Tayarani-N, M. H., & Prügel-Bennett, A. (2016). An analysis of the fitness landscape of travelling salesman problem. *Evolutionary computation*, 24(2), 347-384.
- [101] Belaidouni, M., & Hao, J. K. (2000, September). An analysis of the configuration space of the maximal constraint satisfaction problem. In International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (pp. 49-58).
- [102] Collard, P., Verel, S., & Clergue, M. (2007). Local search heuristics: Fitness cloud versus fitness landscape.

- [103] Müller, C. L., & Sbalzarini, I. F. (2011, April). Global characterization of the CEC 2005 fitness landscapes using fitness-distance analysis. In European Conference on the Applications of Evolutionary Computation (pp. 294-303).
- [104] Preux, P., Robilliard, D., & Fonlupt, C. (1997). Fitness Landscapes of Combinatorial Problems And The Performance Of Search Algorithms
- [105] Czech, Z. J. (2008, April). Statistical measures of a fitness landscape for the vehicle routing problem. In 2008 IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing(pp. 1-8).
- [106] Jones, T., & Forrest, S. (1995). Fitness distance correlation as a measure of problem difficulty for genetic algorithms. In Proc. 6th Internat. Conf. on Genetic Algorithms.
- [107] Merz, P., & Freisleben, B. (1998, September). Memetic algorithms and the fitness landscape of the graph bi-partitioning problem. In International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (pp. 765-774).
- [108] Fonlupt, C., Robilliard, D., Preux, P., & Talbi, E. G. (1999). Fitness landscapes and performance of meta-heuristics. In Meta-Heuristics (pp. 257-268).
- [109] Sébastien Verel (2013): Fitness Landscapes and Graphs: Multimodularity, Ruggedness and Neutrality, Université Nice Sophia Antipolis / CNRS, France, DOLPHIN team - INRIA Lille-Nord Europe, <http://www-lisic.univ-littoral.fr/~verel/talks/2tut16-verel.pdf> (Last accessed: 2022.12.30.)
- [110] HEURISTIC OPTIMIZATION, Search Space Analysis <http://iridia.ulb.ac.be/~stuetzle/Teaching/HO12/Slides/Lecture12.pdf> (Last accessed: 2022.12.30.)
- [111] Rogier Hans Wuijts (2018): Investigation of the Traveling Thief Problem, Utrecht University, Master Thesis
- [112] Smith, T., Husbands, P., & O'Shea, M. (2002). Fitness landscapes and evolvability. *Evolutionary computation*, 10(1), 1-34.
- [113] Lokketangen, A., Oppen, J., Oyola, J., & Woodruff, D. L. (2012). An attribute based similarity function for VRP decision support. *Decision making in manufacturing and services*, 6(1-2).
- [114] Wang, K. P., Huang, L., Zhou, C. G., & Pang, W. (2003, November). Particle swarm optimization for traveling salesman problem. In Proceedings of the 2003 international conference on machine learning and cybernetics (IEEE cat. no. 03ex693) (Vol. 3, pp. 1583-1585). IEEE.
- [115] Moustafa, A., Abdelhalim, A. A., Eltawil, A. B., & Fors, N. (2013). Waste collection vehicle routing problem: case study in Alexandria, Egypt. In The 19th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (pp. 935-944). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [116] Golden, B. L., Assad, A. A., & Wasil, E. A. (2002). Routing vehicles in the real world: applications in the solid waste, beverage, food, dairy, and newspaper industries. In The vehicle routing problem (pp. 245-286). Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [117] Boonkleaw, A., Suthikarnnarunai, N., & Srinon, R. (2009, October). Strategic planning and vehicle routing algorithm for newspaper delivery problem: Case study of morning newspaper, bangkok, thailand. In Proceedings of the world congress on engineering and computer science (Vol. 2, pp. 1067-1071).
- [118] Osaba, E., Yang, X. S., Diaz, F., Onieva, E., Masegosa, A. D., & Perallos, A. (2017). A discrete firefly algorithm to solve a rich vehicle routing problem modelling a newspaper distribution system with recycling policy. *Soft Computing*, 21(18), 5295-5308.
- [119] Boonkleaw, A., Suthikarnnarunai, N., & Srinon, R. (2010). Strategic planning for newspaper delivery problem using vehicle routing algorithm with time window (VRPTW).
- [120] Maden, W., Eglese, R., & Black, D. (2010). Vehicle routing and scheduling with time-varying data: A case study. *Journal of the Operational Research Society*, 61(3), 515-522.
- [121] Hsu, C. I., Hung, S. F., & Li, H. C. (2007). Vehicle routing problem with time-windows for perishable food delivery. *Journal of food engineering*, 80(2), 465-475.
- [122] Chen, H. K., Hsueh, C. F., & Chang, M. S. (2009). Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products. *Computers & operations research*, 36(7), 2311-2319.
- [123] Song, B. D., & Ko, Y. D. (2016). A vehicle routing problem of both refrigerated-and general-type vehicles for perishable food products delivery. *Journal of food engineering*, 169, 61-71.
- [124] Osvald, A., & Stirn, L. Z. (2008). A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food. *Journal of food engineering*, 85(2), 285-295.
- [125] Zhang, Y., & Chen, X. D. (2014). An optimization model for the vehicle routing problem in multi-product frozen food delivery. *Journal of applied research and technology*, 12(2), 239-250.
- [126] Talarico, L., Sörensen, K., & Springael, J. (2015). Metaheuristics for the risk-constrained cash-in-transit vehicle routing problem. *European Journal of operational research*, 244(2), 457-470.
- [127] Ghannadpour, S. F., & Zandiyeh, F. (2020). A new game-theoretical multi-objective evolutionary approach for cash-in-transit vehicle routing problem with time windows (A Real life Case). *Applied Soft Computing*, 106378.

- [128] Bocewicz, G., Nielsen, P., & Banaszak, Z. (2018, September). Declarative modeling of a milk-run vehicle routing problem for split and merge supply streams scheduling. In *International Conference on Information Systems Architecture and Technology* (pp. 157-172). Springer, Cham.
- [129] Keskinurk, T., & Yildirim, M. B. (2011, June). A genetic algorithm metaheuristic for bakery distribution vehicle routing problem with load balancing. In *2011 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications* (pp. 287-291). IEEE.
- [130] Tunjongsirigul, B., & Pongchairerks, P. (2010, May). A genetic algorithm for a vehicle routing problem on a real application of bakery delivery. In *2010 2nd International Conference on Electronic Computer Technology* (pp. 214-217). IEEE.
- [131] Derigs, U., & Grabenbauer, G. (1993). Intime-A new heuristic approach to the vehicle routing problem with time windows, with a bakery fleet case. *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, 13(3-4), 249-266.
- [132] Privé, J., Renaud, J., Bector, F., & Laporte, G. (2006). Solving a vehicle-routing problem arising in soft-drink distribution. *Journal of the Operational Research Society*, 57(9), 1045-1052.
- [133] Stolk, J., Mann, I., Mohais, A., & Michalewicz, Z. (2013). Combining vehicle routing and packing for optimal delivery schedules of water tanks. *OR Insight*, 26(3), 167-190.
- [134] Hollis, B. L., Forbes, M. A., & Douglas, B. E. (2006). Vehicle routing and crew scheduling for metropolitan mail distribution at Australia Post. *European Journal of Operational Research*, 173(1), 133-150.
- [135] Wasner, M., & Zäpfel, G. (2004). An integrated multi-depot hub-location vehicle routing model for network planning of parcel service. *International journal of production economics*, 90(3), 403-419.
- [136] Pérez, E. S., Yopez, L. A., & de la Mota, I. F. (2010, July). Simulation and optimization of the pre-hospital care system of the National University of Mexico using travelling salesman problem algorithms. In *SummerSim* (pp. 364-370).
- [137] Xiao, L., Dridi, M., Hajjam El Hassani, A., Fei, H., & Lin, W. (2018). An improved cuckoo search for a patient transportation problem with consideration of reducing transport emissions. *Sustainability*, 10(3), 793.
- [138] Li, J., Li, T., Yu, Y., Zhang, Z., Pardalos, P. M., Zhang, Y., & Ma, Y. (2019). Discrete firefly algorithm with compound neighborhoods for asymmetric multi-depot vehicle routing problem in the maintenance of farm machinery. *Applied Soft Computing*, 81, 105460.
- [139] Rashidnejad, M., Ebrahimnejad, S., & Safari, J. (2018). A bi-objective model of preventive maintenance planning in distributed systems considering vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 120, 360-381.
- [140] Dhahri, A., Zidi, K., & Ghedira, K. (2015). A variable neighborhood search for the vehicle routing problem with time windows and preventive maintenance activities. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 47, 229-236.
- [141] Xie, B., Li, Y., & Jin, L. (2013). Vehicle routing optimization for deicing salt spreading in winter highway maintenance. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 945-953.
- [142] Kizilates, G., & Nuriyeva, F. (2013). On the nearest neighbor algorithms for the traveling salesman problem. In *Advances in Computational Science, Engineering and Information Technology* (pp. 111-118). Springer, Heidelberg.
- [143] Rosenkrantz, D. J., Stearns, R. E., & Lewis, II, P. M. (1977). An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem. *SIAM journal on computing*, 6(3), 563-581.
- [144] Nilsson, C. (2003). Heuristics for the traveling salesman problem. *Linköping University*, 38, 00085-9.
- [145] Braun, H. (1990, October). On solving travelling salesman problems by genetic algorithms. In *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature* (pp. 129-133). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [146] Zhou, J., Xiao, H., Wang, H., & Dai, H. N. (2016, July). Parallelizing simulated annealing algorithm in many integrated core architecture. In *International Conference on Computational Science and Its Applications* (pp. 239-250). Springer, Cham.
- [147] Tsubakitani, S., & Evans, J. R. (1998). Optimizing tabu list size for the traveling salesman problem. *Computers & Operations Research*, 25(2), 91-97.
- [148] Marini, F., & Walczak, B. (2015). Particle swarm optimization (PSO). A tutorial. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 149, 153-165.
- [149] Wang, K. P., Huang, L., Zhou, C. G., & Pang, W. (2003, November). Particle swarm optimization for traveling salesman problem. In *Proceedings of the 2003 international conference on machine learning and cybernetics* (IEEE cat. no. 03ex693) (Vol. 3, pp. 1583-1585). IEEE.
- [150] Zhang, L., Liu, L., Yang, X. S., & Dai, Y. (2016). A novel hybrid firefly algorithm for global optimization. *PloS one*, 11(9), e0163230.
- [151] Osaba, E., Carballedo, R., Yang, X. S., & Diaz, F. (2016). An evolutionary discrete firefly algorithm with novel operators for solving the vehicle routing problem with time windows. In *Nature-Inspired Computation in Engineering*, pp. 21-41. Springer, Cham.

- [152] Jati, G. K. (2011). Evolutionary discrete firefly algorithm for travelling salesman problem. In Adaptive and intelligent systems, pp. 393-403. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [153] Bouzidi, M., & Riffi, M. E. (2014). Adaptation of the Harmony Search Algorithm to solve the Travelling Salesman Problem. Journal of Theoretical & Applied Information Technology, 62(1), pp. 154-160.
- [154] Boryczka, U., & Szwarc, K. (2019). The adaptation of the harmony search algorithm to the ATSP with the evaluation of the influence of the pitch adjustment place on the quality of results. Journal of Information and Telecommunication, 3(1), 2-18.
- [155] Blum, C. (2005). Ant colony optimization: Introduction and recent trends. Physics of Life reviews, 2(4), 353-373.
- [156] Stützle, T., & Dorigo, M. (1999). ACO algorithms for the traveling salesman problem. Evolutionary algorithms in engineering and computer science, 4, 163-183.
- [157] Bullnheimer, B., Hartl, R. F., & Strauss, C. (1997). A new rank based version of the Ant System. A computational study.
- [158] Ökonometria /Elméleti jegyzet/ Nagy Lajos, Balogh Péter (2013): <https://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/handle/123456789/3619> (Last accessed: 2022.12.30.)
- [159] Barta Gergő: Idősorok elemzése, [http://www.cs.bme.hu/nagyadat/timeseries-gergo\\_barta.pdf](http://www.cs.bme.hu/nagyadat/timeseries-gergo_barta.pdf) (Last accessed: 2022.12.30.)
- [160] Nwogu, E. C., Iwueze, I. S., & Nlebedim, V. U. (2016). Some tests for seasonality in time series data. Journal of Modern Applied Statistical Methods, 15(2), 24.
- [161] Applied Time Series Analysis, <https://online.stat.psu.edu/stat510/> (Last accessed: 2022.12.30.)
- [162] Tratar, L. F., & Strmčnik, E. (2016). The comparison of Holt–Winters method and Multiple regression method: A case study. Energy, 109, 266-276.
- [163] Genre, V., Kenny, G., Meyler, A., & Timmermann, A. (2013). Combining expert forecasts: Can anything beat the simple average?. International Journal of Forecasting, 29(1), 108-121.
- [164] Ostertagová, E., & Ostertag, O. (2011, September). The simple exponential smoothing model. In The 4th International Conference on Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems, Technical University of Košice, Slovak Republic, Proceedings of conference (pp. 380-384).
- [165] Rasmussen, R. (2004). On time series data and optimal parameters. Omega, 32(2), 111-120.
- [166] Bai, Y., Jin, X., Wang, X., Su, T., Kong, J., & Lu, Y. (2019). Compound autoregressive network for prediction of multivariate time series. Complexity, 2019.
- [167] Géczy-Papp Renáta: Autoregresszív és mozgóátlag folyamatok, [http://gtk.unimiskolc.hu/files/8791/D%C3%B6nt%C3%A9sel%C5%91k%C3%A9sz%C3%ADt%C3%A9s+m%C3%B3dszer\\_tana+2.pdf](http://gtk.unimiskolc.hu/files/8791/D%C3%B6nt%C3%A9sel%C5%91k%C3%A9sz%C3%ADt%C3%A9s+m%C3%B3dszer_tana+2.pdf) (Last accessed: 2022.12.30.)
- [168] Wei, W. W. (2018). Multivariate time series analysis and applications. John Wiley & Sons.
- [169] Jason Brownlee: A Gentle Introduction to Autocorrelation and Partial Autocorrelation, <https://machinelearningmastery.com/gentle-introduction-autocorrelation-partial-autocorrelation/>
- [170] Prof. Dr. habil. Kosztyán Zsolt Tibor: Kvantitatív módszerek, <https://kmt.gtk.uni-pannon.hu/kzst/oktatas/km/levelezo/KM01.pptx> (Last accessed: 2022.12.30.)
- [171] Wei, W. W. (2006). Time series analysis. In The Oxford Handbook of Quantitative Methods in Psychology: Vol. 2.
- [172] Jason Brownlee: Time Series Forecasting Performance Measures With Python, <https://machinelearningmastery.com/time-series-forecasting-performance-measures-with-python/> (Last accessed: 2022.12.30.)
- [173] Adhikari, R., & Agrawal, R. K. (2013). An introductory study on time series modeling and forecasting. arXiv preprint arXiv:1302.6613.
- [174] Bodon Ferenc, Buza Krisztián (2014): Adatbányászat, <http://www.cs.bme.hu/nagyadat/bodon.pdf> (Last accessed: 2022.12.30.)
- [175] Pang-Ning Tan, Michael Steinbach, Vipin Kumar. Bevezetés az adatbányászatba. <https://gyires.inf.unideb.hu/KMITT/a04/> (Last accessed: 2022.12.30.)
- [176] Safavian, S. R., & Landgrebe, D. (1991). A survey of decision tree classifier methodology. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 21(3), 660-674.
- [177] Szabó Adrienn: Random Forests - Véletlen erdők, <https://docplayer.hu/11299587-Random-forests-veletlen-erdok.html> (Last accessed: 2022.12.30.)
- [178] Zhao, Y., & Zhang, Y. (2008). Comparison of decision tree methods for finding active objects. Advances in Space Research, 41(12), 1955-1959.
- [179] Zhang, S., Li, X., Zong, M., Zhu, X., & Wang, R. (2017). Efficient knn classification with different numbers of nearest neighbors. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 29(5), 1774-1785.

- [180] Ren, J., Lee, S. D., Chen, X., Kao, B., Cheng, R., & Cheung, D. (2009, December). Naive bayes classification of uncertain data. In 2009 Ninth IEEE International Conference on Data Mining (pp. 944-949). IEEE.
- [181] Powers, D. M. (2020). Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. arXiv preprint arXiv:2010.16061.
- [182] Cheng, R., Gen, M., & Tozawa, T. (1995). Vehicle routing problem with fuzzy due-time using genetic algorithms. *Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems*, 7(5), 1050-1061.
- [183] Bansal, S., & Katiyar, V. (2014). Integrating Fuzzy and Ant Colony System for Fuzzy Vehicle Routing Problem with Time Windows. arXiv preprint arXiv:1411.3806
- [184] Dror, M., & Trudeau, P. (1986). Stochastic vehicle routing with modified savings algorithm. *European Journal of Operational Research*, 23(2), 228-235.)
- [185] Balogh Sándor (2009) Többszemponú gazdasági döntéseket segítő Genetikus Algoritmus kidolgozása és alkalmazásai, Phd értekezés, Kaposvári Egyetem, Gazdaságtudományi Kar, Informatika Tanszék
- [186] Kuang-HuaChang (2015) Chapter 5 - Multiobjective Optimization and Advanced Topics, *Design Theory and Methods Using CAD/CAE, The Computer Aided Engineering Design Series*, 325-406
- [187] Arora, J. S. (2004). *Multiobjective Optimum Design Concepts and Methods. Introduction to Optimum Design*, 543-563.
- [188] Marler, R. T., & Arora, J. S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and multidisciplinary optimization*, 26(6), 369-395.
- [189] Ghoseiri, K., & Ghannadpour, S. F. (2010). Multi-objective vehicle routing problem with time windows using goal programming and genetic algorithm. *Applied Soft Computing*, 10(4), 1096-1107.

## Saját publikációk

---

### A disszertáció témakörében megjelent publikációk

#### I. Tudományos folyóiratcikk:

nemzetközi folyóiratban:

[P/1] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2022). Mathematical Model for the Generalized VRP Model, SUSTAINABILITY 14 (18) Paper: 11639 **SCOPUS INDEXED Q1, IF=3,889**

[P/2] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2022). Ontology Support for Vehicle Routing Problem, APPLIED SCIENCES-BASEL, 12(23), Paper:12299, **SCOPUS INDEXED Q2, IF=2,838**

[P/3] L Kovács, A Agárdi, T Bányai (2020). Fitness Landscape Analysis and Edge Weighting-Based Optimization of Vehicle Routing Problems, PROCESSES 8 (11), Paper: 1363 **SCOPUS INDEXED Q2, IF=2,753**

[P/4] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2021). An Attraction Map Framework of a Complex Multi-Echelon Vehicle Routing Problem with Random Walk Analysis, APPLIED SCIENCES-BASEL, 11 (5), Paper: 2100 **SCOPUS INDEXED Q2, IF=2,474**

[P/5] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2019). Two - Echelon Vehicle Routing Problem with Recharge Stations, TRANSPORT AND TELECOMMUNICATION 20 (4), 305–317 **SCOPUS INDEXED Q2**

[P/6] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2019). Optimization of Multi-Depot Periodic Vehicle Routing Problem with Time Window, ACADEMIC JOURNAL OF MANUFACTURING ENGINEERING 17 (4), 96-108 **SCOPUS INDEXED Q3**

[P/7] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2021). Comparison of the walk techniques for fitness state space analysis in vehicle routing problem, ACTA POLYTECHNICA 61, 672-683. **SCOPUS INDEXED Q3**

[P/8] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2021). Ant Colony Algorithms For The Vehicle Routing Problem With Time Window, Period And Multiple Depots, MANUFACTURING TECHNOLOGY 21, 422-433. **SCOPUS INDEXED Q3**

[P/9] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2021). The Fitness Landscape Analysis of The Ant Colony System Algorithm in Solving a Vehicle Routing Problem, ACADEMIC JOURNAL OF MANUFACTURING ENGINEERING 19 (2), 85-89. **SCOPUS INDEXED Q3**

[P/10] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2021). Using Time Series and Classification in Vehicle Routing Problem, INTERNATIONAL JOURNAL OF PERFORMABILITY ENGINEERING 17 (1), 14-25. **SCOPUS INDEXED Q4**

[P/11] A Agárdi (2023). Fitness Landscape Analysis of Population-Based Heuristics in Solving a Complex Vehicle Routing Problem, LECTURE NOTES IN MECHANICAL ENGINEERING Vehicle and Automotive Engineering 4, 667-677. **SCOPUS INDEXED Q4**

[P/12] A Agárdi (2023). Analysis of the Multi-Objective Optimisation Techniques in Solving a Complex Vehicle Routing Problem, LECTURE NOTES IN MECHANICAL ENGINEERING Vehicle and Automotive Engineering 4, 678-693. **SCOPUS INDEXED Q4**

[P/13] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2021). Neutrality of Vehicle Routing Problem, INTERNATIONAL JOURNAL OF PERFORMABILITY ENGINEERING 17 (10), 848-857. **SCOPUS INDEXED Q4**

magyar folyóiratban idegen nyelven:

[P/14] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2019). Investigation of Convergence Properties of Ant Colony Based Algorithms, ADVANCED LOGISTIC SYSTEMS: THEORY AND PRACTICE 13 (2), 5-20.

[P/15] A Agárdi (2022). Software for the generalization of the Vehicle Routing Problem, PRODUCTION SYSTEMS AND INFORMATION ENGINEERING 10 (3), 41-52.

magyar folyóiratban magyarul:

- [P/16] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2019). Időablakos járatszervezési probléma megoldása populációs heurisztikus algoritmusokkal, GÉPGYÁRTÁS 58 (1-2), 17-25
- [P/17] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2018). Az időablakos járatszervezési probléma optimalizálása, GÉPGYÁRTÁS 57 (1-2), 6-14
- [P/18] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2020). Fitness landscape elemzési technikák áttekintése, MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE 10 (4), 214-218.
- [P/19] A Agárdi (2019). A többlelakatos időablakos járatszervezési feladat matematikai és ontológiai modellje, MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE 9 (4), 293-300.
- [P/20] A Agárdi (2018). A többlelakatos utazó ügynök probléma megoldása lokális optimalizálással MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE 8 (1), 3-8.

**II. Konferenciák konferenciakötetben**

idegen nyelven:

- [P/21] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2019). Optimization of Complex Vehicle Routing Problems, 12th International Doctoral Students Workshop on Logistics, 107-112.
- [P/22] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2019). Optimization of automatized picking process, SACI 2019 : IEEE 13th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics : PROCEEDINGS, 364-369.
- [P/23] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2019). Vehicle routing in drone-based package delivery services, Solutions for Sustainable Development: Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Solutions for Sustainable Development (ICSSD 2019), 151-159.
- [P/24] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2020). The mathematical and ontology model of the Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Time Window, 13th International Doctoral Students Workshop on Logistics, 23-30.

magyarul:

- [P/25] A Agárdi, L Kovács, T Bányai (2019). A hangya kolónia optimalizáció hatékonyságának vizsgálata a járatszervezési probléma megoldásában, Műszaki tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2019 : konferencia előadása, 5-8
- [P/26] A Agárdi (2018). A többlelakatos járat szervezési probléma optimalizálási lehetőségei, 15 éves PEME XVI. PhD - Konferenciájának előadásai, 5-14
- [P/27] A Agárdi (2018). Optimális lerakat meghatározása a több ügynökös egy lerakatos utazó ügynök probléma megoldásában, Tavasz Szél 2018 = Spring Wind 2018 : Tanulmánykötet, 525-534

**III. További tudományos közlemény:**

- [P/28] A Agárdi (2019). A járatszervezési probléma megoldása autonóm, elektromos járművek esetén, DIÁKTUDOMÁNY: A MISKOLCI EGYETEM TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI MUNKÁIBÓL XII, 50-55
- [P/29] A Agárdi (2018). A több ügynökös utazó ügynök probléma megoldása lokális optimalizálással, DIÁKTUDOMÁNY: A MISKOLCI EGYETEM TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI MUNKÁIBÓL XI, 53-58
- [P/30] A Agárdi (2018). A több lerakatos, periodikus, időablakos járatszervezési probléma optimalizálása, Diplomamunka, Miskolci Egyetem
- [P/31] A Agárdi (2017). Klaszterezési és evolúciós technikák alkalmazása az utazó ügynök probléma megoldásában, Szakdolgozat, Miskolci Egyetem



## **Disszertációhoz kapcsolódó webes források**

---

### Mellékletek:

[A/1] Meaning of the components of the general Vehicle Routing Problem model, the ontology model and evaluation of the representation mode:

[https://drive.google.com/file/d/1qBL1AiwFd1U4wQ6kgEML0o7Amzj\\_cja1/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1qBL1AiwFd1U4wQ6kgEML0o7Amzj_cja1/view?usp=sharing)

[A/2] Additional components of the ontology system:

[https://drive.google.com/file/d/1fg2aXSRKkgkS\\_w9TG-VsgqqZDdxVTbfl/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1fg2aXSRKkgkS_w9TG-VsgqqZDdxVTbfl/view?usp=sharing)

[A/3] Test results of the ontology knowledge base:

[https://drive.google.com/file/d/1MFMryefOadfkCDoheFZxnAYrIH9b1h\\_Z/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1MFMryefOadfkCDoheFZxnAYrIH9b1h_Z/view?usp=sharing)

[A/4] The representation of the Vehicle Routing Problem in the literature:

<https://drive.google.com/file/d/1wb-H6gUJiCTWeeY1wQmkbCXzPwnLaS5n/view?usp=sharing>

[A/5] The representation of the generalized route description model of the Vehicle Routing Problem (examples):

<https://drive.google.com/file/d/13R8yHlaf81NbPUOWOsZ65Cj51u5axhRU/view?usp=sharing>

[A/6] Optimization algorithms:

<https://drive.google.com/file/d/1NlmQD2DfKnYfmc9mcPzhlRwn2BJ8OBhs/view?usp=sharing>

[A/7] Time series algorithms:

[https://drive.google.com/file/d/1VKL\\_3stJy\\_4VHDAiFycVHQBo86Z\\_f3e/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1VKL_3stJy_4VHDAiFycVHQBo86Z_f3e/view?usp=sharing)

[A/8] Classification algorithms:

<https://drive.google.com/file/d/1k3gdSaW8zCGDoUM93mc90m9iBtzF6YYC/view?usp=sharing>

[A/9] Handling fuzzy and stochastic data:

[https://drive.google.com/file/d/1A63gQHhb796TZ-flX8b7\\_tlNOqEXy5ft/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1A63gQHhb796TZ-flX8b7_tlNOqEXy5ft/view?usp=sharing)

[A/10] Single - and Multi-Objective Optimization:

<https://drive.google.com/file/d/1RJRLei6kx87GQZoPbsSuqcz67OsOx59/view?usp=sharing>

[A/11] Applications of the general model of the Vehicle Routing Problem: tables:

<https://drive.google.com/file/d/1PjtEiBdrr29MCgEy8Qx3qoeOXvctNHL4/view?usp=sharing>

[A/12] The tables of the analysis of fitness landscape:

<https://drive.google.com/file/d/1fZFQujHEdX3hita-ivDRKxW6HcZhGAVJ/view?usp=sharing>

[A/13] Overview of ontology systems:

<https://drive.google.com/file/d/1HHbRfCwHzlO7yDJmLptxpeRispsWt3ls/view?usp=sharing>

### Teszt eredmények:

[W/1] Multi-Objective Optimization:

<https://drive.google.com/file/d/1gy-5n8TBwT8IwcthyYJN-4Y1HmhYyUWOI/view?usp=sharing>

[W/2] Analysis of the solutions of heuristic algorithms:

[https://drive.google.com/file/d/1x48Nbd02\\_bF6iNin5fZ9zNLSKTunRBSZ/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1x48Nbd02_bF6iNin5fZ9zNLSKTunRBSZ/view?usp=sharing)

[W/3] Analysis of the iteration of the iterative heuristic algorithms:

<https://drive.google.com/file/d/1SnLvoznz0lBkto0XDn9jZsLcufzHXDZx/view?usp=sharing>

[W/4] Analysis of the iteration of the iterative heuristic algorithms:

<https://drive.google.com/file/d/1c2EMGmu2UtxjR13R6bKdzUIuGtRIYE05/view?usp=sharing>

[W/5] Operator analysis (with walks):

<https://drive.google.com/file/d/1ZQisWitH9NUcbj8REhBtNAQbGNQ7b4tc/view?usp=sharing>

[W/6] Operator analysis (with walks):

[https://drive.google.com/file/d/1VKUL5nhpdx-ACdQMABcXUdBAp\\_FXu4L/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1VKUL5nhpdx-ACdQMABcXUdBAp_FXu4L/view?usp=sharing)

[W/7] Random walk analysis (with information content analysis):

[https://drive.google.com/file/d/1MQFVW1GNhC-o\\_pa-l4zx6aZHs8OBn99l/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1MQFVW1GNhC-o_pa-l4zx6aZHs8OBn99l/view?usp=sharing)

[W/8] Analysis of the filtered search space:

<https://drive.google.com/file/d/1mPXBOa-8oB1oOoZJvNt7wHDsNv-wWgNf/view?usp=sharing>

[W/9] Fitness Cloud:

[https://drive.google.com/file/d/1S\\_Jk9hGA7huE9-M6beRB5-0BAAvOF6rW/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1S_Jk9hGA7huE9-M6beRB5-0BAAvOF6rW/view?usp=sharing)