

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Bisera Š. Andrić Gušavac

**OPTIMIZACIJA RUTA U TRETIRANJU
POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA**

- doktorska disertacija -

Beograd, 2020.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ORGANIZATIONAL SCIENCES

Bisera Š. Andrić Gušavac

**ROUTE OPTIMIZATION IN AGRICULTURAL
LAND TREATMENT**

- doctoral dissertation -

Belgrade, 2020.

Mentor:

dr Milan Martić, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu Fakultet organizacionih nauka

Članovi komisije:

dr Gordana Savić, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu Fakultet organizacionih nauka

dr Radojka Maletić, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu Poljoprivredni fakultet

Datum odbrane:

Naslov doktorske disertacije: Optimizacija ruta u tretiranju poljoprivrednog zemljišta**Rezime:**

Predmet istraživanja doktorske disertacije je tretiranje poljoprivrednog zemljišta, odnosno kreiranje i izbor efikasnih ruta. Pregledom literature uočeno je da su u oblasti poljoprivrede rešavani različiti lokacijski problemi, problemi alokacije i rutiranja. Značajnu ulogu u odgovornom planiranju korišćenja poljoprivrednih resursa ima i prepoznavanje i rešavanje raznih optimizacionih problema koji se javljaju u procesu eksploatacije, o čemu svedoči i veliki broj istraživanja koja se bave primenom metoda operacionih istraživanja u ovoj oblasti. Problem koji se rešava se sastoji od izvršenja jedne vrste operacije na isparcelisanom poljoprivrednom zemljištu koje je potrebno tretirati korišćenjem avijacije. Karakteristike problema su: zemljište je isparcelisano i takve je površine da ga je nemoguće obraditi jednim preletom aviona; postoji nehomogena flota aviona i više potencijalnih letelišta koja se mogu koristiti za uzletanje i sletanje aviona; jednim preletom je moguće obraditi više parcela u zavisnosti od kapaciteta aviona. Proučavani problem se sastoji u određivanju optimalnih ruta za dati broj aviona koji se koriste za tretiranje isparcelisanog poljoprivrednog zemljišta hemikalijama. Ovaj NP (*Nondeterministic Polynomial*) težak problem je prikazan na grafu i predstavlja specijalnu varijantu problema rutiranja vozila (*The Vehicle Routing Problem - VRP*) sa više depoa gde se generiše transportni plan za homogeni proizvod (hemikalije korišćene za tretiranje zemljišta) sa različitih lokacija ponude (letelišta) do različitih lokacija potražnje (parcele) uz minimalne troškove.

Da bi se jedno zemljište, podeljeno na parcele, efikasno tretiralo uz pomoć avijacije, potrebno je: izabrati letelišta koja će se koristiti za uzletanje i sletanje i odrediti alokaciju parcela letelištima, odrediti način preleta svake parcele (obrada parcele, tj. izvršenje operacije nad parcelom) i redosled tretiranja parcela. Deo rešenja problema je i određivanje broja potrebnih aviona, kao i struktura same flote.

Kompleksnost problema i primeri većih dimenzija usloveli su formulisanje specijalne heuristike za rešavanje opisanog problema. Heuristikom su rešeni primeri većih dimenzija. Primenom razvijene specijalne heuristike dobijaju se planovi obrade - odnosno skup ruta kojima će poljoprivredni avion obraditi sve parcele na jednom poljoprivrednom zemljištu. Metoda obavljanja podataka (*Data Envelopment Analysis – DEA*) primenjena je za poređenje više planova obrade istog problema (dobijenih primenom heuristike) i određivanje relativno efikasnih planova, a u okviru jednog efikasnog plana obrade primenom DEA metode su određene relativno efikasne rute. U oba slučaja primenjen je CCR DEA izlazno orijentisani

model. Predloženi pristupi su testirani na primerima različitih dimenzija i pokazalo se da se primenom DEA metode može oceniti efikasnost i izabrati planovi obrade i rute koje će se koristiti za tretiranje poljoprivrednog zemljišta.

Ključne reči: Optimizacija u poljoprivredi, Problem rutiranja vozila, Problem rutiranja vozila sa više depoa, Specijalna heuristika, DEA metoda, Efikasnost ruta.

Naučna oblast: Tehničke nauke

Uža naučna oblast: Operaciona istraživanja

UDK:

Title of doctoral dissertation: Route optimization in agricultural land treatment

Summary:

The subject of this research is the agricultural land treatment, i.e. determination and selection of efficient routes in the treatment of agricultural land. The review of available literature proved that in the field of agriculture, different location problems, problems of allocation and routing are being solved. Identification and solving various optimization problems that arise in the treatment of the agricultural land have an important role in responsible planning of agricultural resources and its usage, which is confirmed in large number of studies that deal with the application of operational research methods in this field.

The problem that is solved consists of performing one type of operation on a parceled agricultural land using agricultural aviation. The characteristics of the problem are: the land is divided into parcels; the surface of the whole land can not be processed by a single plane overflight; a non-homogeneous fleet of aircraft is used; there exists several potential airfields that can be used as landing sites; processing of several parcels can be done with one overflight (depending on the capacity of the aircraft). The studied problem consists of determining the optimal routes for a given set of aircraft used for chemical treatment of arable agricultural land divided into parcels. This NP (Nondeterministic Polynomial) problem is represented on a graph and represents a specific variant of the multidepot vehicle routing problem (VRP) where a min-cost plan for the transportation of a homogeneous product (chemicals used for land treatment) from different supply locations (airfields) to different demand locations (agricultural parcels) should be generated.

In order to effectively treat an agricultural land divided into parcels using agricultural aviation, it is necessary to: choose the airfields for take-offs and to determine the parcel allocation to the airfields, determine the treatment way for each parcel and sequence of parcel treatment. Part of the solution of the problem is to determine the number of required aircrafts, as well as the structure of the fleet itself.

The complexity of the problem and large dimensions of the problem examples have led to the formulation of a special heuristics. These examples of larger dimensions are solved using formulated heuristics. The application of the special heuristics results in processing plans - that is, a set of routes the agricultural aircraft will take and process all the parcels on one agricultural land. DEA (Data Envelopment Analysis) method is applied to compare multiple processing plans (obtained using heuristics) and to determine relatively efficient plans. Relatively efficient routes are determined within one efficient processing plan, also by using

DEA method. In both cases, an output-oriented DEA model is applied. The proposed approaches are tested on examples of different dimensions and it is shown that, by applying the DEA method, the efficiency and selection of cultivation plans and routes that will be used for the treatment of agricultural land can be evaluated.

Keywords: Optimization in agriculture, Vehicle routing problem, Vehicle routing problem with multiple depots, Special heuristics, DEA method, Route efficiency.

Scientific Area: Technical Sciences

Specific Scientific Area: Operations Research

UDK:

SADRŽAJ

LISTA SLIKA	I
LISTA TABELA	II
LISTA GRAFIKA	III
1. UVOD	4
1.1. PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA	5
1.2. POLAZNE HIPOTEZE	6
1.3. METODE ISTRAŽIVANJA	7
1.4. NAUČNI DOPRINOSI ISTRAŽIVANJA	7
1.5. STRUKTURA RADA	7
2. OPTIMIZACIONI PROBLEMI TRETIRANJA POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA - PREGLED STANJA	10
2.1. PROBLEMI VEZANI ZA OBRADU I NAČIN OBRADE POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA	11
2.2. PROBLEMI VEZANI ZA ZAŠTITU ŽIVOTNE SREDINE I ZDRAVLJA LJUDI.....	16
2.3. PROBLEMI VEZANI ZA NAVODNJAVANJE	18
2.4. PROBLEMI VEZANI ZA LANCE SNABDEVANJA U POLJOPRIVREDI.....	19
2.5. PROBLEM RUTIRANJA U OBLASTI POLJOPRIVREDE	20
2.6. PROBLEMI LOKACIJE U OBLASTI POLJOPRIVREDE.....	21
2.7. OSTALE PRIMENE.....	23
2.8. PREGLED STANJA U OBLASTI U REPUBLICI SRBIJI	27
3. PROBLEMI RUTIRANJA	32
3.1. FORMULACIJA OSNOVNOG VRP MODELA	33
3.2. PROŠIRENJA VRP MODELA.....	34
3.3. PROBLEMI LOKACIJE I RUTIRANJA	41
3.4. PRISTUPI REŠAVANJU PROBLEMA RUTIRANJA	44
3.4.1. Egzaktne metode.....	45
3.4.2. Aproksimativni algoritmi	46
3.4.3. Heurističke metode	47
4. DEA METODA - OSNOVNI KONCEPTI I MODELI	58
4.1. DEA MODELI.....	59
4.1.1. Osnovni DEA model.....	59
4.2. IMPLEMENTACIJA DEA METODE	63
5. OPTIMIZACIJA RUTA U TRETIRANJU POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA	64
5.1. OPIS PROBLEMA OBRADE POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA KORIŠĆENJEM POLJOPRIVREDNE AVIJACIJE.....	64
5.2. GRAFOVSKI PRIKAZ PROBLEMA	67
5.3. SPECIJALNA HEURISTIKA ZA GENERISANJE RUTA PRI TRETIRANJU POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA	70
5.4. NUMERIČKI EKSPERIMENTI SA REALNIM PODACIMA	74
5.4.1. Analiza uticaja optimizacije ruta na smanjenje emisije štetnih gasova	80
5.5. PRIMENA DEA METODE ZA IZBOR EFIKASNIH RUTA	83
5.5.1. Poređenje više planova obrade istog problema	90

5.5.2. Poređenje ruta u okviru jednog plana obrade	96
6. ZAKLJUČAK.....	103
6.1. DOPRINOSI I HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA.....	104
6.2. PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA	105
LITERATURA	108
BIOGRAFIJA I BIBLIOGRAFIJA	126
PRILOG 1	133
PRILOG 2	144
PRILOG 3	148

Lista slika

Slika 2.1: Formiranje ulazaka i izlazaka sa blokova (ulazne tačke su u skladu sa smerom kazaljke na satu) (Hameed i dr., 2013).....	26
Slika 2.2: Lanac snabdevanja integrisanih operacija u poljoprivredi (Sorensen i Bochtis, 2010)	27
Slika 3.1: Opšti model VRP-a	32
Slika 3.2: Osnovni problemi VRP i njihovi odnosi (Toth i Vigo, 2001)	36
Slika 3.3: Primer spajanja ruta kod Klark-Rajtovog algoritma	51
Slika 5.1: Načini kretanja poljoprivrednih aviona pri radu (Jakovljević, 2006)	65
Slika 5.2: Moguće tačke ulaska aviona pri obradi parcele koje definišu varijantu obrade parcele	66
Slika 5.3: Problem obrade dve parcele u jednoj ruti	66
Slika 5.4: Grafovski prikaz problema (uključeno je jedno letelište) (prilagođeno iz Andric Gusavac i dr., 2019)	69
Slika 5.5: Mapa zemljišta sa ucrtanim parcelama i letelištima (prilagođeno od strane autora na originalnoj mapi zemljišta).....	77

Lista tabela

Tabela 2.1: Broj radova prema tipu	10
Tabela 2.2: Broj radova prema časopisima i kategorije časopisa	10-11
Tabela 2.3: Pregled radova koji se bave problemima vezanim za obradu poljoprivrednog zemljišta.....	12-16
Tabela 2.4: Pregled radova koji se bave problemima vezanim za zaštitu životne sredine i zdravlja ljudi	17
Tabela 2.5: Pregled radova koji se bave problemima vezanim za navodnjavanje	18-19
Tabela 2.6: Pregled radova koji se bave problemima vezanim za lance snabdevanja	20
Tabela 2.7: Izabrane primene problema rutiranja u poljoprivredi	21
Tabela 2.8: Izabrane primene teorije lokacije u poljoprivredi (prilagođeno iz (Lucas i Chhajed, 2004))	22
Tabela 2.9: Pregled radova koji se bave problemima lokacije	23
Tabela 5.1: Specijalna heuristika za rešavanje problema obrade poljoprivrednog zemljišta korišćenjem poljoprivredne avijacije - algoritam	71
Tabela 5.2: Proračuni rastojanja od svakog letelišta do svih varijanti obrade svake parcele..	75
Tabela 5.3: Konačna dodela parcele sa određenom varijantom obrade letelištu.....	75
Tabela 5.4: Kapaciteti aviona korišćeni u eksperimentima kod heuristike I deo (prilagođeno iz Andric Gusavac i dr., 2019).....	76
Tabela 5.5: Kapaciteti aviona korišćeni u eksperimentima kod heuristike II deo (Andric Gusavac i dr., 2019)	76
Tabela 5.6: Rezultati eksperimenata I deo – rute i dužine (prilagođeno iz Andric Gusavac i dr., 2019)	78
Tabela 5.7: Rezultati eksperimenata II deo – rute i dužine (prilagođeno iz Andric Gusavac i dr., 2019)	78
Tabela 5.8: Vreme izvršavanja (prilagođeno iz Andric Gusavac i dr., 2019).....	79
Tabela 5.9: Koeficijenti emisije ugljenika za različite izvore goriva i jedinice za konverziju energije (Boustead i Hancock, 1979; Fluck, 1992).....	82
Tabela 5.10: Odabrana rešena instanca	82
Tabela 5.11: Elementarne rute za instancu	83
Tabela 5.12: Pregled primene DEA u oceni efikasnosti ruta	85-88
Tabela 5.13: Rešenje problema - plan obrade dobijen specijalnom heuristikom	90-91
Tabela 5.14: Ulazni podaci za poređenje više planova obrade.....	92
Tabela 5.15: Deskriptivna statistika – primer poređenja planova obrade	92
Tabela 5.16: Rang planova obrade na osnovu indeksa efikasnosti.....	93
Tabela 5.17: Projekcija promene ulaza za planove obrade	94
Tabela 5.18: Projekcija promene izlaza za planove obrade	95
Tabela 5.19: Statistika projekcije promene ulaza za planove obrade	95
Tabela 5.20: Statistika projekcije promene izlaza za planove obrade	96
Tabela 5.21: Ulazni podaci za poređenje ruta	98
Tabela 5.22: Deskriptivna statistika – primer poređenja ruta.....	98
Tabela 5.23: Rang ruta na osnovu indeksa efikasnosti	99
Tabela 5.24: Projekcija promena ulaza za rute	100
Tabela 5.25: Projekcija promena izlaza za rute	101
Tabela 5.26: Statistika projekcije promene ulaza za rute.....	101
Tabela 5.27: Statistika projekcije promene izlaza za rute	102

Lista grafika

Grafik 5.1: Relativna efikasnost planova obrade	93
Grafik 5.2: Relativna efikasnost ruta	99

1. UVOD

Zbog ekstenzivnog korišćenja, obradivo zemljište je sve lošijeg kvaliteta, sve više je zagađeno, a posledica je da ga ima sve manje. Efektivno upravljanje poljoprivredom je neophodno kako bi se produžila produktivnost zemljišta, s obzirom da je svetska populacija sve veća, a stopa iskorišćenja zemljišta raste u skladu sa rastom populacije.

Problemi efektivnog upravljanja mogu da se rešavaju metodama operacionih istraživanja. Operaciona istraživanja počela su da se primenjuju u poljoprivredi ranih pedesetih godina. Waugh (1951) je prvi predložio korišćenje linearnog programiranja za optimizaciju stočne ishrane. Može se primetiti da je George B. Dantzig objavio svoj prvi rad vezan za linearno programiranje 1948. (Dantzig, 1948), samo četiri godine pre publikacije Waugh-a. Operaciona istraživanja su tokom proteklih decenija pomogla da se shvati kompleksno funkcionisanje sistema poljoprivrede, kao i da upravljaju ovim sistemima na efikasan način (Weintraub i Romero, 2006).

Problemi vezani za obradu i način obrade poljoprivrednog zemljišta su veoma česti u literaturi. Rešavaju se problemi vezani za podelu obradive površine na kulture, planiranje useva, a sve češće i rotacija useva – gde se podrazumevaju odluke o vrstama biljaka koje se sade na jednom obradivom zemljištu, na način gde se u svakom periodu (ili svakih nekoliko perioda) sadi druga vrsta biljke. Problemi ove vrste najčešće se modeliraju linearnim i mešovitim celobrojnim programiranjem (Boboev i dr., 2019; Albornoz i dr., 2019; Aljanabi i dr., 2018), kao i višekriterijumskim ciljnim programiranjem (Srivastava i Singh, 2017). Takođe su aktuelni problemi izbora strategija obrađivanja/neobrađivanja zemljišta na nivou farme radi izbegavanja degradacije tla, a ovi problemi se najčešće modeliraju linearnim i mešovitim linearnim programiranjem (Boboev i dr., 2019; Bavorova i dr., 2018). Kod svih ovih tipova problema uzima se kao faktor odlučivanja i područje gde se zemljište nalazi – sušno ili ne, raspoloživost vode za navodnjavanje, raspoloživost energetskih i svih ostalih resursa, i sl. Što se tiče problema efikasnosti i tehničke efikasnosti poljoprivrede, primenjuje se DEA metoda (Muhtarom i dr., 2019; Li i dr., 2018).

Često se rešavaju problemi određivanja optimalnih ruta za poljoprivredna vozila (uključujući i robote) na poljoprivrednom zemljištu, a rešavaju se genetskim algoritmima (Mahmud i dr., 2019; Mahmud i dr., 2018; Gracia i dr., 2014), kao i modifikovanim Klark-

Rajtovim algoritmom (Seyyedhasani i Dvorak, 2017). U oblasti poljoprivrede su rešavani i različiti lokacijski problemi, problemi alokacije i rutiranja. Specifične odlike ovih problema su širok delokrug i velike dimenzije problema, više, često suprotstavljenih kriterijuma i kompleksnost problema (Lucas i Chhajed, 2004). Veliki je broj primera u literaturi gde se raznovrsni problemi iz oblasti poljoprivrede prepoznaju kao lokacijski, alokacijski i/ili problemi rutiranja i rešavaju optimizacijom: određivanje lokacije postrojenja za preradu sirove gume, lokaciju stanica za prikupljanje gume od pojedinaca i rute za transport sirove gume do postrojenja za preradu (Nambiar i dr., 1981); upravljanje flotom vozila u oblasti poljoprivrede uključujući alokaciju resursa, raspoređivanje, rutiranje, praćenje vozila i materijala u realnom vremenu (Sorensen i Bochtis, 2010); određivanje redosleda kojim automatizovana vozila posećuju parcele (blokove) zemljišta (Hameed i dr., 2013); planiranje putanja za izvođenje operacija na poljoprivrednom zemljištu (Jin i Tang, 2010), itd.

1.1. Predmet i cilj istraživanja

Predmet istraživanja doktorske disertacije je, u širem smislu, eksploatacija poljoprivrednog zemljišta, a u užem smislu kreiranje i izbor efikasnih ruta prilikom obrade poljoprivrednog zemljišta.

Centralni problem istraživanja doktorske disertacije je optimizacija ruta u tretiranju poljoprivrednog zemljišta. Pored ostalih načina, zemljište se tretira iz vazduha - poljoprivrednom avijacijom. Karakteristike problema su: zemljište je isparcelisano i takve je površine da ga je nemoguće obraditi jednim preletom aviona; postoji nehomogena flota aviona i više potencijalnih letelišta koja se mogu koristiti za uzletanje i sletanje aviona; jednim preletom je moguće obraditi više parcela u zavisnosti od kapaciteta aviona. Da bi se jedno zemljište podeljeno na parcele efikasno obradilo uz pomoć avijacije, potrebno je odrediti: koja letelišta (od unapred zadatih potencijalnih lokacija) će se koristiti za uzletanje i sletanje, alokaciju parcela letelištima, način preleta svake parcele (obrada parcele, tj. izvršenje operacije nad parcelom) i redosled obrade parcela. Opisani istraživački problem spada u klasu problema kombinatorne optimizacije i posmatra se kao sveobuhvatni problem lokacije, alokacije i rutiranja; i to kao specijalni slučaj rutiranja sa više depoa. Kompleksnost problema i nemogućnost egzaktnog rešavanja instanci velikih dimenzija zahteva razvijanje heurističkog pristupa za njegovo rešavanje. Primena heurističkih metoda omogućava generisanje više ruta, i ukoliko je potrebno izabrati rute na osnovu više kriterijuma, moguće

je izvršiti njihovo poređenje na osnovu ocene efikasnosti. U tom slučaju se može primeniti DEA metoda.

Osnovni ciljevi istraživanja su:

1. Određivanje dopustivih i optimalnih rešenja – planova obrade kojima se određuju rute za obradu isparcelisanog zemljišta upotrebom avijacije kao i
2. Poređenje dobijenih planova obrade i ruta u okviru plana na osnovu indeksa efikasnosti.

Na osnovu osnovnog cilja i problema istraživanja proizilaze specifični ciljevi:

3. Definisanje problema određivanja ruta kao lokacijsko-alokacijskog problema rutiranja vozila sa više depoa,
4. Razvoj i implementacija novog heurističkog algoritma za njegovo rešavanje,
5. Testiranje i validacija algoritma na primerima velikih dimenzija problema,
6. Određivanje relevantnih kriterijuma za ocenu efikasnosti generisanih planova obrade i ruta u okviru jednog plana,
7. Komparativna analiza i ocena efikasnosti generisanih planova obrade i
8. Komparativna analiza i ocena efikasnosti ruta u okviru efikasnog plana obrade.

Rešavanjem definisanog problema se istovremeno postiže i društveni cilj istraživanja koji se može definisati kao kroz poboljšanje stepena očuvanja životne sredine i briga o održivom razvoju poljoprivrede, kao jednom od prirodnih resursa. To se postiže optimalnim načinom obrade zemljišta koji direktno obezbeđuje smanjenje potrošnje goriva i na taj način i smanjenje izduvnih gasova koji zagađuju životnu sredinu. Sa druge strane, poljoprivreda utiče na bogatstvo jedne zemlje, kako u ekonomskom tako i u ekološkom smislu i optimalno upravljanje poljoprivredom je važan faktor razvoja celokupne privrede. Poljoprivredna avijacija može obezbediti smanjenje troškova operacija koje je neophodno izvršiti kod obrade poljoprivrednog zemljišta.

1.2. Polazne hipoteze

U skladu sa definisanim predmetom i ciljem istraživanja definisane su hipoteze doktorske disertacije.

Opšta hipoteza u istraživanju je:

H0. Primenom metoda i tehnika operacionih istraživanja moguće je unaprediti načine tretiranja poljoprivrednog zemljišta.

Opšta hipoteza se razrađuje kroz posebne i pojedinačne hipoteze:

H1. Problem određivanja ruta pri tretiranju isparcelisanog poljoprivrednog zemljišta ima karakteristike lokacijskog, alokacijskog i problema rutiranja sa više depoa.

H2. Moguće je razviti heuristički pristup za generisanje ruta pri tretiranju isparcelisanog poljoprivrednog zemljišta.

H3. Moguće je izabrati rute za obradu isparcelisanog zemljišta na osnovu ocene efikasnosti skupa generisanih ruta.

1.3. Metode istraživanja

Od opštih metoda, u disertaciji se koriste metode prikupljanja i analize postojećih naučnih pristupa i rezultata u oblasti poljoprivrede. Takođe su prikupljeni, analizirani i sistematizovani naučni rezultati u oblasti rešavanja različitih varijanti optimizacionih problema u ovoj oblasti. U formulisanju postavljenog problema kojim se unapređuje način tretiranja poljoprivrednog zemljišta koristi se metodologija operacionih istraživanja. Za probleme većih dimenzija, za koje egzaktne metode ne mogu da nađu rešenje u razumnom vremenu, razvijena je heuristika za rešavanje, a za ocenu efikasnosti ruta koristi se tehnika matematičkog modeliranja - analiza obavljanja podataka.

1.4. Naučni doprinosi istraživanja

U disertaciji će se ostvariti sledeći naučni doprinosi:

- detaljan pregled primene operacionih istraživanja u poljoprivredi, posebno u oblasti tretiranja poljoprivrednog zemljišta,
- definisanje složenog realnog problema operacionih istraživanja koji ima karakteristike lokacijskog, alokacijskog i problema rutiranja sa više depoa u oblasti tretiranja poljoprivrednog zemljišta,
- razvoj heurističkog algoritma za rešavanje problema velikih dimenzija,
- primena adekvatnih DEA modela za ocenu i izbor efikasnih ruta.

Društveni doprinos ogleda se u primeni predloženog pristupa kao podrške održivom i odgovornom planiranju korišćenja poljoprivrednog zemljišta.

1.5. Struktura rada

U uvodnom, prvom poglavlju doktorske disertacije opisan je predmet i cilj istraživanja doktorske disertacije. Nakon toga postavljene su opšta i posebne hipoteze, a na kraju

poglavlja predstavljene su metode istraživanja kao i struktura rada, u okviru koga su ukratko opisana sva poglavlja disertacije.

Opsežan pregled stanja u oblasti - optimizacioni problemi kod tretiranja poljoprivrednog zemljišta dat je u okviru drugog poglavlja. S obzirom na veliki broj radova koji se tiču primene metoda i tehnika u oblasti poljoprivrede, radovi su sistematizovani u šest grupa u skladu sa problemom koji se u radu obrađuje (problemi obrade i načina obrade poljoprivrednog zemljišta, problemi vezani za živonu sredinu, problemi vezani za navodnjavanje, problemi vezani za lance snabdevanja, problemi lokacije i rutiranja u oblasti poljoprivrede). U okviru ovog poglavlja dat je i pregled radova za svaku od posmatranih oblasti, a za svaki rad dat je opis problema koji se analizira u radu, kao i tip modela i pristup rešavanju definisanom problemu. U okviru ovog poglavlja dat je i pregled stanja u oblasti u Republici Srbiji.

U trećem poglavlju date su teorijske osnove osnovnog modela problema rutiranja i osnove izabranih proširenja ovog modela. Opisani su i problemi lokacije i rutiranja, koji podrazumevaju da se paralelno sa izborom optimalne lokacije razmatraju i rute kojima vozila obilaze korisnike. Na kraju poglavlja prikazani su i osnovni pristupi rešavanju datih problema (egzaktne i heurističke metode, aproksimativni algoritmi).

U okviru poglavlja 4. dati su osnovni koncepti merenja efikasnosti kao i prikaz metode za ocenu efikasnosti realnih sistema koji koriste više ulaza za proizvodnju više raznorodnih izlaza. Neparametarska metoda koja je kreirana za ocenu efikasnosti neprofitnih sistema i jedinica odlučivanja je analiza obavijanja podataka – DEA (DEA - *Data Envelopment Analysis*). Teoretska osnova i izlazno orijentisani DEA modeli linearnog programiranja su detaljno prikazani. Jedna od osnovnih prednosti DEA metode je mogućnost određivanja ciljanih vrednosti ulaza i izlaza što je prikazano u ovom poglavlju. Na kraju ovog poglavlja ukratko su dati koraci koje je neophodno sprovesti u proceduri ocene efikasnosti primenom DEA metode.

Peto poglavlje predstavlja srž doktorske disertacije. U ovom poglavlju detaljno je opisan realan optimizacioni problem obrade poljoprivrednog zemljišta korišćenjem poljoprivredne avijacije. Egzaktno rešavanje problema moguće je samo za male dimenzije, tako da je u disertaciji formulisana i prikazana specijalna heuristika za rešavanje problema obrade poljoprivrednog zemljišta korišćenjem poljoprivredne avijacije, poštujući pri tome svojstva i specifičnosti ovog problema. Predstavljena heuristika je modifikacija dobro poznatog Klark-

Rajtovog algoritma (Clarke i Wright, 1964) i prilagođena je opisanom problemu. Rešenja – planovi obrade dobijena heuristikom su prikazana u okviru podpoglavlja Numerički eksperimenti sa realnim podacima (podpoglavlje 5.4.). Primenom rešenja dobijenih heuristikom postiže se direktna ekološka korist koja se manifestuje uštedama u emisiji karbon dioksida, t.j. smanjenju karbonskog otiska. Smanjenje emisije štetnih gasova koje se postiže optimizacijom korišćenja avijacije u tretiranju poljoprivrednog zemljišta prikazano je takođe u podpoglavlju 5.4.

U podpoglavlju 5.5. data je primena DEA metode kod problema tretiranja poljoprivrednog zemljišta. DEA metoda je prvo primenjena za izbor efikasnih planova obrade (skupa ruta kojima se tretira jedno poljoprivredno zemljište) postavljenog problema, a zatim je korišćena za izbor efikasnih ruta u okviru jednog plana obrade postavljenog problema. Primenom DEA metode obezbeđeno je dobijanje efikasnih planova obrade i efikasnih ruta koje se primenjuju u praksi, a značajno je i da je izvršena analiza na koje izlaze i ulaze (i u kojoj meri) je moguće uticati (povećati, smanjiti), a da i neefikasni planovi i rute postanu efikasni.

Istraživanjem su potvrđene sve postavljene hipoteze istraživanja, što je i opisano u zaključku u poglavlju šest, gde je dat prikaz rezultata istraživanja i zaključna razmatranja zajedno sa naučnim i stručnim doprinosima disertacije. Posebno su istaknuti dalji pravci istraživanja, koji se tiču ne samo modifikacije postojećeg pristupa uvođenjem dodatnih parametara, već i primene definisanog istraživanja u drugim, srodnim, oblastima.

Na kraju doktorske disertacije prikazana je korišćena literatura, biografija i bibliografija, kao i prilozi.

2. OPTIMIZACIONI PROBLEMI TRETIRANJA POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA - PREGLED STANJA

Metode i tehnike operacionih istraživanja se opsežno primenjuju za rešavanje problema u oblasti poljoprivrede. Modeliranje, kao osnovni alat u nauci o poljoprivrednim sistemima, razvili su naučnici koji rade u različitim oblastima tokom proteklih šest decenija (Jones i dr., 2017).

U ovom poglavlju dat je pregled literature koja se odnosi na rešavanje optimizacionih problema u oblasti poljoprivrede. Ukupan broj radova (uključujući i knjige i doktorske disertacije) koji je pregledan iz ove oblasti je preko 200, a izabrani su radovi iz perioda 2014-2019. godine. Prikazan je pregled radova koji su objavljeni u časopisima koji se nalaze na SCI i SCIE listi prema KOBSON-u (Kobson, 2019).

U tabeli 2.1 data je struktura radova prema tipu izvora.

Tabela 2.1: Broj radova prema tipu

Tip reference	Broj referenci
Knjiga	16
Poglavlje u knjigama	11
Zbornici radova	7
Doktorske disertacije	1
Radovi u časopisima	224

U tabeli 2.2 prikazani su časopisi iz kojih je pregledan i analiziran najveći broj radova u disertaciji. Za svaki časopis data je kategorija kojoj pripada i pozicija u okviru kategorije (Kobson, 2019).

Tabela 2.2: Broj radova prema časopisima i kategorije časopisa

Časopis	Broj radova	Kategorija i pozicija časopisa u okviru kategorije
“Computers and Electronics in Agriculture”	22	Agriculture, Multidisciplinary (7/57) Computer Science, Interdisciplinary Applications (39/105)
“Journal of Cleaner Production”	14	Engineering, Environmental (7/50) Environmental Sciences (21/242) Green & Sustainable Science & Technology (6/37)
“Sustainability (Switzerland)”	8	Environmental Sciences (121/242) Environmental Studies (51/109) Green & Sustainable Science & Technology (23/37)

Tabela 2.2: Broj radova prema časopisima i kategorije časopisa - nastavak

Časopis	Broj radova	Kategorija i pozicija časopisa u okviru kategorije
“European Journal of Operational Research”	7	Operations Research & Management Science (12/84)
“Land Use Policy”	6	Environmental Studies (25/109)
“Agricultural Economics (Czech Republic)”	5	Agricultural Economics & Policy (13/17) Economics (258/353)
“Science of the Total Environment”	5	Environmental Sciences (27/242)
“Agricultural Systems”	4	Agriculture, Multidisciplinary (3/57)
“Agricultural Water Management”	4	Agronomy (10/87) Water Resources (12/90)
“Ecological Indicators”	4	Environmental Sciences (49/242)
“Energy”	4	Energy & Fuels (18/97) Thermodynamics (4/59)
“Environmental Science and Pollution Research”	4	Environmental Sciences (83/242)
“Journal of Environmental Management”	4	Environmental Sciences (48/242)
“Journal of Irrigation and Drainage Engineering”	4	Agricultural Engineering (5/14) Engineering, Civil (57/128) Water Resources (52/90)

Radovi koji su analizirani u disertaciji sistematizovani su prema grupama problema koji se rešavaju iz oblasti poljoprivrede. U nastavku ovog poglavlja dat je pregled radova za svaku od posmatranih oblasti, prikazane su tabele sa opisom problema, kao i tipom modela i pristupom rešavanju definisanom problemu.

2.1. Problemi vezani za obradu i način obrade poljoprivrednog zemljišta

Problemi vezani za obradu i način obrade poljoprivrednog zemljišta su veoma česti u literaturi. Rešavaju se problemi vezani za podelu obradive površine na kulture, planiranje useva, a sve češće i rotacija useva – gde se podrazumevaju odluke o vrstama biljaka koje se sade na jednom obradivom zemljištu, na način gde se u svakom periodu (ili svakih nekoliko perioda) sadi druga vrsta biljke. Problemi ove vrste najčešće se modeliraju linearnim i mešovitim celobrojnim programiranjem (Boboev i dr., 2019; Albornoz i dr., 2019; Aljanabi i dr., 2018), kao i višekriterijumskim ciljnim programiranjem (Srivastava i Singh, 2017). Takođe su aktuelni problemi izbora strategija obrađivanja/neobrađivanja zemljišta na nivou farme radi izbegavanja degradacije tla, a ovi problemi se najčešće modeliraju linearnim i mešovitim linearnim programiranjem (Boboev i dr., 2019; Bavorova i dr., 2018). Kod svih ovih tipova problema uzima se kao faktor odlučivanja i područje gde se zemljište nalazi –

sušno ili ne, raspoloživost vode za navodnjavanje, raspoloživost energetskih i svih ostalih resursa i sl. Što se tiče problema ocene i uporedne analize efikasnosti u poljoprivredi, najčešće se primenjuje tehnika matematičkog programiranja - analiza obavijanja podataka (Charnes, Cooper i Rhodes, 1978) (DEA-Data Envelopment Analysis) (Muhtarom i dr., 2019; Li i dr., 2018). U tabeli 2.3 prikazani su radovi koji se bave problemima vezanim za obradu poljoprivrednog zemljišta, a rešavaju se navedenim metodama i tehnikama.

Tabela 2.3: Pregled radova koji se bave problemima vezanim za obradu poljoprivrednog zemljišta

PROBLEMI VEZANI ZA OBRADU I NAČIN OBRADE POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA			
R. br.	Referenca	Problem/Grupa problema	Model i pristup rešavanju
1	Carvajal i dr., 2019	planiranje useva; strateške i taktičke odluke u lancu snabdevanja šećernom trskom	stohastički optimizacioni model; Sample Average Approximation method (SAA) (Monte Carlo)
2	Boboev i dr., 2019	podela obradive površine na kulture, konzervacioni sistemi poljoprivrede - sistem rotacije useva (izvodljivost; istraživanje finansijskih prednosti sistema sadnje raznovrsnih biljaka u odnosu na sadnju samo jedne biljke)	model linearnog programiranja; egzaktno
3	Albornoz i dr., 2019	podela obradive površine na pravougaone delove (homogene zone upravljanja)	model linearnog programiranja; algoritam generisanja kolona
4	Grados i Schrevens, 2019	procena uticaja poljoprivredne proizvodnje krompira na životnu sredinu i ocena eko-efikasnosti posmatranih agrosistema	DEA, DEA softver
5	Muhtarom i dr., 2019	analiza efikasnosti i produktivnosti poljoprivredne proizvodnje	DEA, DEA softver
6	Udias i dr., 2018	identifikacija i odabir optimalnih poljoprivrednih strategija radi povećanja poljoprivrednog rasta	višekriterijumska optimizacija; <i>open software Decision Support System</i> (DSS), egzaktno, genetski algoritmi
7	Kirylyuk-Dryjska i Beba, 2018	raspodela budžeta za ruralni razvoj Evropske Unije na regione	model linearnog programiranja; egzaktno
8	Dunnett i dr., 2018	problem raspodele korišćenja zemljišta radi dodeljivanja prioriteta za intervencije u poljoprivredi	višekriterijumski optimizacioni model; korišćenje alata <i>Climate Smart Agricultural Prioritization (CSAP) toolkit</i>
9	Smith i dr., 2018	problem prelaska na 100% organsku proizvodnju i procena posledica na poljoprivrednu proizvodnju	model linearnog programiranja; egzaktno (GAMS softver za optimizaciju)
10	Kocjančič i dr., 2018	planiranje poljoprivredne proizvodnje primenom emergy pristupa - problem u mlekarstvu	model linearnog programiranja, višekriterijumska analiza, ciljno programiranje
11	Bavorova i dr., 2018	izbor strategija obrađivanja/neobrađivanja zemljišta na nivou farme radi izbegavanja degradacije tla	model linearnog programiranja; egzaktno

Tabela 2.3: Pregled radova koji se bave problemima vezanim za obradu poljoprivrednog zemljišta - nastavak

R. br.	Referenca	Problem/Grupa problema	Model i pristup rešavanju
12	Rodriguez-Verde i dr., 2018	problem proizvodnje smeše; problem dobijanja životinjskog đubriva mešanjem više vrsta đubriva	model linearnog programiranja; heuristika (<i>Optiblender tool</i>)
13	Aljanabi i dr., 2018	podela obradive površine na kulture i alokacija otpadnih voda	mešovito celobrojno nelinearno programiranje
14	Zhong i dr., 2018	problem prenamene poljoprivrednog zemljišta za proizvodnju bioenergije	višekriterijumski model mešovitog linearnog programiranja metoda ϵ ograničenja
15	Vasu i dr., 2018	identifikacija karakteristika zemljišta i procena pogodnosti zemljišta za sadnju određenih useva (komparativna procena uz primenu nekoliko metoda)	parametarska metoda, Storie index, metoda višekriterijumske evaluacije pogodnosti zemljišta
16	Talukder i dr., 2018	procena održivosti poljoprivrednih sistema	analiza višekriterijumskog odlučivanja
17	Iocola i dr., 2018	procena održivosti organske proizvodnje povrća	višekriterijumska analiza
18	Musakwa, 2018	identifikacija zemljišta pogodnog za primenu poljoprivrednih reformi	geo-informacioni sistemi, analiza višekriterijumskog odlučivanja
19	Qureshi i dr., 2018	izbor vrste useva radi održive poljoprivredne proizvodnje	fazi višekriterijumsko odlučivanje
20	Ma i dr., 2018	problem određivanja redosleda operacija (poslova) u proizvodnji pšenice	dinamičko programiranje
21	Nuppenau, 2018	problem rotacije useva	dinamičko programiranje
22	Kung, 2018	okvir za održivi razvoj poljoprivrede	dinamičko programiranje
23	Rybczewska-Błazejowska i Gierulski, 2018	procena eko-efikasnosti poljoprivredne proizvodnje u 28 država EU	DEA, DEA softver
24	Li i dr., 2018	evaluacija efikasnosti i potencijala za poboljšanje u poljoprivrednom sektoru Kine	DEA, DEA softver
25	Khoshroo i dr., 2018	poboljšanje energetske efikasnosti s obzirom na smanjenje emisije CO ₂ u proizvodnji repe	DEA, DEA softver
26	Moutinho i dr., 2018a	efikasnost u evropskom poljoprivrednom sektoru	DEA, DEA softver
27	Masuda, 2018	energetska efikasnost intenzivne proizvodnje pirinča u Japanu	DEA, DEA softver
28	Staniszewski, 2018	procena održivosti intenzifikacije poljoprivrede u Evropskoj Uniji	DEA, DEA softver
29	Abbas i dr., 2018	novi pristup za procenu energetske efikasnosti i održivosti proizvodnje pšenice	DEA, DEA softver
30	Cobo i dr., 2018	razvoj indikatora efikasnosti sistema u produženju životnog veka korišćenja organskog otpada	višekriterijumski model mešovitog linearnog programiranja; egzaktno

Tabela 2.3: Pregled radova koji se bave problemima vezanim za obradu poljoprivrednog zemljišta - nastavak

R. br.	Referenca	Problem/Grupa problema	Model i pristup rešavanju
31	Mosleh i dr., 2017	podela obradive površine na kulture; alokacija obradive površine i vodnih resursa	višekriterijumski model ciljnog programiranja; egzaktno (Lindo software)
32	Priya i Geetha, 2017	upravljanje resursima potrebnim za uzgoj biljaka (voda, đubrivo, hranljive materije)	algoritam minimizacije resursa baziran na dinamičkom programiranju
33	Herrera-Cáceres i dr., 2017	planiranje žetve u proizvodnji maslinovog ulja (određivanje redosleda žetve različitih parcela)	mešovito linearno programiranje; egzaktno, heuristika
34	Zhang i dr., 2017	problem uzgoja poljoprivrednih kultura u sušnim područjima	linearno razlomljeno programiranje, stohastičko programiranje; egzaktno
35	Afzal i dr., 2017	raspoređivanje energetskih resursa u poljoprivrednoj proizvodnji	celobrojno programiranje; metoda grananja i ograničavanja
36	Singh, 2017	problem alokacije vodnih i zemljišnih resursa za poljoprivrednu proizvodnju	linearno programiranje; egzaktno
37	Srivastava i Singh, 2017	alokacija poljoprivrednog zemljišta na različite useve	fazi višekriterijumsko ciljno programiranje; egzaktno
38	Filippi i dr., 2017	problem izbora miksa useva radi najboljeg iskorišćenja obradive površine	linearno programiranje; egzaktno
39	Capitanescu i dr., 2017	problem određivanja vrste i rasporeda sadnje useva uz uključivanje ograničenja vezanih za životnu sredinu i planiranje useva	mešovito linearno programiranje; egzaktno
40	You i Hsieh, 2017	problem planiranja proizvodnje organskog povrća (vrsta i raspored sadnje)	model linearnog programiranja; egzaktno, heuristika
41	Galán-Martín i dr., 2017	podela obradive površine na kulture; alokacija kišnih i navodnjavanih obradivih površina	višekriterijumska optimizacija, metoda ϵ ograničenja
42	Li i dr., 2017b	problem selekcije useva i alokacije vodnih resursa	mešovito linearno programiranje
43	Talukder i dr., 2017	metodološki prístup za procenu održivosti poljoprivrede	analiza višekriterijumskog odlučivanja
44	Godoy-Durán i dr., 2017	ocena eko-efikasnost malih farmi koje se bave hortikulturom	DEA; DEA softver
45	Khanjarpanah i dr., 2017	procena efikasnosti lokacija-kandidata za održivu, najmanje rizičnu setvu trave za proizvodnju bio-goriva	DEA (model ocene unakrsne efikasnosti); DEA softver
46	Toma i dr., 2017	ocena efikasnosti poljoprivrede u zemljama evropske unije u cilju boljeg planiranja i upravljanja	<i>bootstrap</i> -DEA; DEA softver
47	Vlontzos i dr., 2017	procena održivosti poljoprivrednog sektora pomoću indeksa eko-efikasnosti	DEA; DEA softver
48	Pokhrel i Soni, 2017	analiza tehničke efikasnosti farmi za različite načine žetve pirinča	DEA; DEA softver
49	Murtaza i Thapa, 2017	procena tehničke efikasnosti proizvođača jabuka	DEA; DEA softver
50	Pieralli, 2017	problem razvoja indikatora za ocenu kvaliteta zemljišta	linearno programiranje; egzaktno

Tabela 2.3: Pregled radova koji se bave problemima vezanim za obradu poljoprivrednog zemljišta - nastavak

R. br.	Referenca	Problem/Grupa problema	Model i pristup rešavanju
51	Nidumolu i dr., 2016	problem izbora useva u skladu sa prognoziranim vremenskim uslovima	linearno programiranje; egzaktno
52	Rocco i Morabito, 2016	planiranje proizvodnje useva (proizvodnja paradajza): konceptualna shema i matematički model	linearno programiranje; egzaktno
53	Jana i dr., 2016	planiranje poljoprivredne proizvodnje	fazi ciljno programiranje; Monte Carlo simulacija, genetski algoritmi
54	Zhang i dr., 2016	podela obradive površine na pravougaone zone upravljanja u poljoprivredi	mešovito celobrojno linearno programiranje; <i>Arcpy (ArcGIS)</i> i MATLAB softver, Kriging interpolacija
55	Bueno-Delgado i dr., 2016	Android aplikacija za problem izbora đubriva za poljoprivrednu proizvodnju	linearno programiranje; egzaktno
56	Singh i dr., 2016	pregledni rad; planiranje navodnjavanja korišćenjem površinskih i podzemnih voda	dinamičko, linearno, nelinearno programiranje; genetski algoritmi
57	St John i dr., 2016	problem projektovanja koridora za migraciju jelena uz planiranje žetve	određivanje optimalnih koridora, mešovito celobrojno programiranje; egzaktno
58	Montgomery i dr., 2016	evaluacija pogodnosti zemljišta za poljoprivrednu proizvodnju	geo-informacioni sistemi, meko računanje
59	Cabrini i Calcaterra, 2016	evaluacija ekonomskih i ekoloških uticaja podele obradive površine na kulture	kompromisno programiranje
60	Diban i dr., 2016	optimizacija plana setve biljaka sa ciljem minimalne emisije štetnih gasova	dinamičko programiranje
61	Galán-Martín i dr., 2015	problem određivanja optimalnog plana setve	linearno programiranje; GAMS softver
62	Naudin i dr., 2015	problem korišćenja biomase za ishranu stočnog fonda i đubrenje obradivih površina	linearno programiranje; egzaktno
63	Alfandari i dr., 2015	problem upravljanja planom setve (periodi uzgoja i periodi odmora obradivih parcela)	celobrojno programiranje; metoda grananja i odsecanja
64	Das i dr., 2015	podela obradive površine na kulture; alokacija zemljišnih i vodnih resursa za poljoprivrednu proizvodnju sa navodnjavanjem	linearno programiranje; egzaktno
65	Singh, 2015	upravljanje zemljišnim i vodnim resursima u sušnim područjima	linearno programiranje; egzaktno
66	Baglivi i dr., 2015	podela obradive površine na kulture	nelinearno programiranje; egzaktno
67	Atici i Podinovski, 2015	procena efikasnosti poljoprivrednih jedinica različite specijalizacije	DEA; DEA softver
68	Gadanakis i dr., 2015	razvoja alata za procenu održivog intenziviranja poljoprivredne proizvodnje	DEA; DEA softver

Tabela 2.3: Pregled radova koji se bave problemima vezanim za obradu poljoprivrednog zemljišta - nastavak

R. br.	Referenca	Problem/Grupa problema	Model i pristup rešavanju
69	Nowak i dr., 2015	procena tehničke efikasnosti poljoprivrede u zemljama EU	DEA; DEA softver
70	Kočišová, 2015	procena relativne tehničke efikasnosti poljoprivrede u EU	DEA; DEA softver
71	Souza i Gomes, 2015	procena ekonomske efikasnosti poljoprivrede	DEA; DEA softver
72	Mirza i dr., 2015	procena tehničke efikasnosti farmi pšenice	DEA; DEA softver
73	Gadanakis i dr., 2015	problem procene indikatora održivosti obradivih površina	DEA; DEA softver
74	Ward i dr., 2014	problem ishrane, urbana poljoprivreda	linearno programiranje
75	Prišenk i dr., 2014	upravljanje poljoprivrednom proizvodnjom	linearno programiranje, ciljno programiranje; egzaktno

2.2. Problemi vezani za zaštitu životne sredine i zdravlja ljudi

Efikasno korišćenje i planiranje stope potrošnje prirodnih resursa sprečava dalje pogoršanje kvaliteta životne sredine u budućnosti. Paralelno sa planiranjem budućih aktivnosti, ključno je pokušati i da se ukloni ili umanja postojeća šteta gde i kada je moguće. Za tu svrhu matematičko programiranje nudi ceo spektar tehnika modeliranja interakcije čoveka i životne sredine i svih aktivnosti vezanih za prirodne resurse i njihovo korišćenje, kako bi se pronašli alternativni pravci delovanja i kako bi se dobila optimalna rešenja za raznovrsne probleme.

Autori Weintraub i Romero u radu (Weintraub i Romero, 2006) daju pregled radova iz oblasti primene operacionih istraživanja u oblasti poljoprivrede, a jedna od oblasti je i modeliranje interakcije između poljoprivrede i životne sredine. Što se tiče procene eko-efikasnosti poljoprivrede i poljoprivrednih regiona, koristi se DEA metoda (Cecchini i dr., 2018; Varela-Candamio i dr., 2018). U tabeli 2.4 izdvojeni su neki aktuelni radovi iz prethodnih pet godina.

Tabela 2.4: Pregled radova koji se bave problemima vezanim za zaštitu životne sredine i zdravlja ljudi

PROBLEMI ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE I ZDRAVLJA LJUDI			
R.br.	Referenca	Problem/Grupa problema	Model i pristup rešavanju
1	Nguyen i dr., 2018	evaluacija maksimalnog smanjenja GHG emisije u zavisnosti od primenjene strategije smanjenja klimatskih promena	linearno programiranje; egzaktno
2	Nor i dr., 2018	problem određivanja smeše đubriva	mešovito celobrojno nelinearno programiranje
3	Cecchini i dr., 2018	analiza efikasnosti životne sredine i procena troškova smanjenja CO2 na farmama muznih krava	DEA; DEA softver
4	Varela-Candamio i dr., 2018	uloga javnih subvencija za efikasnost i ekološku adaptaciju poljoprivrede	DEA; DEA softver
5	He i dr., 2018	sveobuhvatna ekološka efikasnost društveno-ekonomskih sektora u Kini	DEA; DEA softver
6	Rybczewska-Błażejowska i Masternak-Janus, 2018	procena eko-efikasnosti poljskih regiona	DEA; DEA softver
7	Moreno-Moreno i dr., 2018	procena operativne i ekološke efikasnosti poljoprivrede u Latinskoj Americi	DEA; DEA softver
8	Chaloob i dr., 2018	merenje ekonomske i ekološke efikasnosti poljoprivrednih zona u Iraku	DEA; DEA softver
9	Zhang i Wang, 2018	procena ruralnog finansijskog ekološkog okruženja zasnovanog na AHP-DEA modelu	DEA; DEA softver
10	Moutinho i dr., 2018b	ekonomske-ekološka efikasnost evropske poljoprivrede	DEA; DEA softver
11	Fei i Lin, 2017	efikasnost emisije CO2 u poljoprivrednom sektoru	DEA; DEA softver
12	Lijó i dr., 2017	procena eko-efikasnosti fabrika biogasa	DEA; DEA softver
13	Mghirbi i dr., 2017	upravljanje zaštitom biljaka u poljoprivredi uz smanjenje rizika od toksičnosti pesticida	linearno programiranje; egzaktno
14	Naz i dr., 2017	upravljanje energetske resursima u ruralnim područjima	mešovito linearno programiranje; metoda grananja i ograničavanja
15	Gephart i dr., 2016	planiranje ishrane (dijete) uz minimizaciju uticajana nekoliko aspekata životne sredine	linearno programiranje; egzaktno
16	Nabavi-Pelesarai i dr., 2016	procena energetske efikasnosti i smanjenje efekta staklene bašte u proizvodnji pšenice	DEA; DEA softver
17	Pang i dr., 2016	procena eko-efikasnosti poljoprivrede u Kini	DEA; DEA softver

2.3. Problemi vezani za navodnjavanje

Upravljanje poljoprivredom zahteva i istovremeno upravljanje vodnim resursima koji su neophodni za funkcionisanje svake aktivnosti u poljoprivredi. Veoma je važno naglasiti i da poljoprivreda zahteva potrošnju velike količine vode za navodnjavanje. S obzirom da vodni resursi nisu uvek dostupni u meri u kojoj je to zahtevano za nesmetano odvijanje aktivnosti u poljoprivredi, a neke oblasti su i sušne (vode ima u veoma malim količinama, ili je neoma uopšte) veoma je važno posvetiti se i rešavanju problema koji se tiču navodnjavanja. U radu (Bjorndal i dr., 2004) prikazuje se uloga operacionih istraživanja u upravljanju vodnim resursima i daje se pregled primena operacionih istraživanja u ovoj oblasti. U tabeli 2.5 dat je pregled radova iz primene operacionih istraživanja za rešavanje problema u navodnjavanju koji su objavljeni u poslednjih pet godina. Problemi korišćenja voda (podzemnih i nadzemnih) za navodnjavanje modeliraju se najčešće nelinearnim programiranjem (Núñez-López i dr., 2019; Ahmed i dr., 2017; Rubio-Castro i dr., 2016), a problemi procene efikasnosti upotrebe vode u poljoprivredi DEA metodom (Geng i dr., 2019; Mu i dr., 2016). Radovi koji su dati u ovom pregledu tiču se samo problema navodnjavanja, odnosno korišćenja vode u poljoprivredi, a nisu dati radovi koji se bave isključivo vodnim resursima (ribarstvo i vodoprivreda), jer ne spadaju u predmet istraživanja ovog pristupnog rada.

Tabela 2.5: Pregled radova koji se bave problemima vezanim za navodnjavanje

PROBLEMI VEZANI ZA NAVODNJAVANJE			
R.br.	Referenca	Problem/Grupa problema	Model i pristup rešavanju
1	Núñez-López i dr., 2019	problem korišćenja vode i đubriva u poljoprivredi	mešovito celobrojno nelinearno programiranje; metoda ϵ ograničenja
2	Razzaq i dr., 2019	povećanje efikasnosti korišćenja podzemnih voda: neformalna tržišta podzemnih voda	DEA; DEA softver
3	Yan, 2019	investiciona efikasnost zaštite voda u ruralnim područjima	DEA; DEA softver
4	Geng i dr., 2019	procena efikasnosti upotrebe vode u poljoprivredi	DEA; DEA softver
5	Aljanabi i dr., 2018	problem raspodele pročišćenih otpadnih voda za navodnjavanje (podela obradive površine na kulture)	mešovito celobrojno nelinearno programiranje; <i>Algorithms for coNTinuous/Integer Global Optimization of Nonlinear Equations</i> (ANTIGONE)
6	Zhang i Guo, 2018	alokacija vodnih poljoprivrednih resursa	dvofazno mešovito celobrojno linearno programiranje
7	Robert i dr., 2018	problem navodnjavanja podzemnim vodama	stohastičko dinamičko programiranje

Tabela 2.5: Pregled radova koji se bave problemima vezanim za navodnjavanje - nastavak

R.br.	Referenca	Problem/Grupa problema	Model i pristup rešavanju
8	Ahmed i dr., 2017	problem upravljanja usevima u skladu sa različitim strategijama navodnjavanja	nelinearno programiranje
9	Li i dr., 2017a	alokacija vode za navodnjavanje	fazi višekriterijumsko nelinearno programiranje; egzaktno (Lingo)
10	Jiang i dr., 2016	problem alokacije i korišćenja vode za navodnjavanje	nelinearno programiranje
11	De Corte i Sörensen, 2016	optimizacija distributivne mreže vode	mešovito celobrojno nelinearno programiranje; heuristika
12	Rubio-Castro i dr., 2016	dizajn mreže korišćenja vode u poljoprivredi	nelinearno programiranje; GAMS softver
13	Singh i dr., 2016	planiranje korišćenja površinskih i podzemnih voda za navodnjavanje	dinamičko programiranje, genetski algoritmi, linearno programiranje, nelinearno programiranje
14	Mu i dr., 2016	efikasnost korišćenja vodnih resursa u poljoprivredi	DEA; DEA softver
15	Arredondo-Ramírez i dr., 2015	sistem upravljanja vodom u poljoprivredi: sakupljanje, ponovno korišćenje i distribucija	višekriterijumsko mešovito celobrojno nelinearno programiranje; metoda ϵ ograničenja
16	Kheybari i Salehpour, 2015	problem navodnjavanja pirinčanih polja	linearno programiranje, nelinearno programiranje; egzaktno
17	Bournaris i dr., 2015	problem korišćenja vode za navodnjavanje i ekološki prihvatljivih odluka u planiranju poljoprivredne proizvodnje	višekriterijumsko matematičko programiranje
18	Neji i Turki, 2015	razgraničenje poljoprivredne površine navodnjavane prečišćenom otpadnom vodom	kompromisno programiranje

2.4. Problemi vezani za lance snabdevanja u poljoprivredi

Metode i tehnike operacionih istraživanja se opsežno primenjuju na rešavanje problema u različitim lancima snabdevanja u oblasti poljoprivrede. Interesantan pregled radova u ovoj oblasti dat je u radu Higinisa i drugih (Higgins i dr., 2010). Autori u pomenutom radu ističu da se za rešavanje problema u lancima snabdevanja u poljoprivredi mora primeniti sveobuhvatan pristup, a kao jedan od razloga navode i dužinu posmatranog vremenskog perioda.

Klimatske promene, degradacija prirodnih resursa (poljoprivreda kao jedan od njih) i globalna tržišta su faktori koji utiču na snabdevanje poljoprivrednim proizvodima (Higgins i dr., 2010). U tabeli 2.6 izdvojeni su neki aktuelni radovi iz prethodnih pet godina, a problemi se najčešće modeliraju mešovitim celobrojnim programiranjem (Sarker i dr., 2019; Rentizelas i dr., 2018).

Tabela 2.6: Pregled radova koji se bave problemima vezanim za lance snabdevanja

LANCI SNABDEVANJA			
R.br.	Referenca	Problem/Grupa problema	Model i pristup rešavanju
1	Sarker i dr., 2019	optimizacija lanca snabdevanja obnovljivom biomasom i bioplinom: određivanje lokacije postrojenja za preradu	mešovito linearno programiranje; genetski algoritmi
2	Hu i dr., 2018	problem distribucije kvarljive robe	mešovito linearno programiranje; lokalno pretraživanje
3	Rentizelas i dr., 2018	projektovanje optimalnog lanca snabdevanja za održivu preradu plastičnih proizvoda koji se koristi u poljoprivredi	mešovito linearno programiranje; egzaktno (GAMS softver)
4	Hoo i dr., 2018	identifikacija lanca snabdevanja biogasom u skladu sa zahtevima: industrije, komercijalne zone ili stambene oblasti	nelinearno programiranje
5	de Keizer i dr., 2017	problemi kreiranja logističke mreže za kvarljive proizvode	mešovito linearno programiranje; egzaktno
6	Soto-Silva i dr., 2017	upravljanje lancem snabdevanja svežim proizvodima za preradu	mešovito linearno programiranje; egzaktno (ILOG-OPL)
7	Stich i dr., 2017	problem korišćenja ostataka biomase iz poljoprivrede, stočarstva i šumarstva: količina, tehnički potencijal za proizvodnju energije i troškovi proizvodnje električne energije iz ovih ostataka	linearno programiranje, (binarno); Gurobi softver
8	Yang, 2017	upravljanje lancem snabdevanja poljoprivrednim proizvodima	neuronske mreže
9	Accorsi i dr., 2016	upravljanje lancima snabdevanja poljoprivrednim proizvodima	linearno programiranje; Gurobi softver
10	Soysal i dr., 2014	upravljanje lancem snabdevanja hranom (primer lanac snabdevanja govedinom)	višekriterijumsko linearno programiranje, metoda ϵ ograničenja

2.5. Problem rutiranja u oblasti poljoprivrede

Dantzig i Ramser su uveli ovaj problem pre više od pedeset godina (Dantzig i Ramser, 1959). Oni su opisali slučaj iz prakse isporuke benzina servisnim stanicama i bili su prvi koji su formulisali ovaj problem kao optimizacioni problem. Nekoliko godina kasnije, Clarke i Wright predložili su efektivnu proždrljivu heuristiku za rešavanje problema. Nakon ova dva rada, pojavilo se puno radova u kojima su data optimalna i približna rešenja različitih verzija problema rutiranja (Toth i Vigo, 2001).

U tabeli 2.7 dat je pregled radova koji se bave problemom rutiranja u poljoprivredi. Najčešće se rešavaju problemi određivanja optimalnih ruta za poljoprivredna vozila (uključujući i robote) na poljoprivrednom zemljištu, a rešavaju se genetskim algoritmima (Mahmud i dr., 2019; Mahmud i dr., 2018; Gracia i dr., 2014), kao i modifikovanim Klark-Rajtovim algoritmom (Seyyedhasani i Dvorak, 2017).

Tabela 2.7: Izabrane primene problema rutiranja u poljoprivredi

PROBLEMI RUTIRANJA			
R.br.	Referenca	Problem / Grupa problema	Pristup rešavanju
1	Mahmud i dr., 2019	određivanje optimalne putanje robota za tretiranje biljaka pesticidima	genetski algoritmi
2	Mahmud i dr., 2018	određivanje optimalne putanje robota za tretiranje biljaka pesticidima	genetski algoritmi
3	Seyyedhasani i Dvorak, 2018a	ažuriranje ruta za vozila na poljoprivrednom zemljištu	
4	Jiang i dr., 2018	alokacija poljoprivrednih resursa i rutiranje vozila za isporuku	algoritam za učenje zasnovan na ideji o jačanju imunog sistema
5	Seyyedhasani i Dvorak, 2018b	određivanje optimalnih ruta poljoprivrednih vozila	TABU pretraživanje
6	Seyyedhasani i Dvorak, 2017	određivanje optimalnih ruta poljoprivrednih vozila	modifikovani Clark-Wright, TABU pretraživanje
7	Conesa-Muñoz i dr., 2016	određivanje optimalnih ruta poljoprivrednih vozila	heuristika
8	Gracia i dr., 2014	problem sakupljanja i transporta biomase	genetski algoritmi

2.6. Problemi lokacije u oblasti poljoprivrede

Istraživači takođe uspešno primenjuju, modifikuju i poboljšavaju postojeće lokacijske modele u oblasti poljoprivrede. U radu (Lucas i Chhaged, 2004) dat je ne samo pregled radova iz ove oblasti, već su prikazane i specifične odlike lokacijskih problema u poljoprivredi. Autori u pomenutom radu prepoznaju odlike kao što su: širok delokrug i velike dimenzije problema, više (često suprotstavljenih) kriterijuma i kompleksnost problema. U radu (Lucas i Chhaged, 2004) je data interesantna tabela sa odabranim radovima, gde se na jednom mestu može videti kratak opis problema koji je rešavan, tip modela koji je formulisan, metoda rešavanja i neke specifičnosti samog problema, a u tabeli 2.8 prikazani su izabrani radovi iz ovog preglednog rada.

Tabela 2.8: Izabrane primene teorije lokacije u poljoprivredi (prilagođeno iz (Lucas i Chhajed, 2004))

Tema / Autori	Opis problema	Tip modela	Procedura rešavanja	Karakteristike
Skladištenje žita u Južnom Brazilu (Bornstein i de Castro Villela, 1990)	Optimalna lokacija skladišta za žito, lokacija servisnih stanica	Formulisan je lokacijski model, zatim je modeliran kao problem ranca	Nije data	Ekonomija obima Politički, ekonomski i socijalni aspekt
Industrija soje (D'Souza, 1988)	Optimalni broj, veličina i lokacija fabrika za preradu soje	Formulisan je LP transportni model sa pretovarom	Komercijalni LP softveri	Velike dimenzije, 57 regiona Ekonomija obima Više vrsta proizvoda
Industrija mlečnih proizvoda u Kanadi (Pooley, 1994)	Problem zatvaranja nekoliko postrojenja	Formulisan je kao model mešovitog celobrojnog programiranja	Komercijalni paket: Super Lindo	Analiza korišćenja više depoa Predviđanje prodaje za 3, 5 i 10 godina

Lokacijski problemi u oblasti poljoprivrede uglavnom uključuju lokaciju više postrojenja i uključuju ograničenja kapaciteta. Nakon određivanja lokacije, određuju se i korisnici kojima će se roba dostavljati, tako da se lokacija često dopunjuje i alokacijskim odlukama. Na taj način rešavaju se lokacijsko-alokacijski problemi, gde su upravljačke odluke broj postrojenja, njihova lokacija i alokacija korisnika postrojenjima (Gelders i dr., 1987). U tabeli 2.9 dat je pregled radova koji se bave problemom lokacije u poljoprivredi u poslednjih pet godina.

Lokacijsko-alokacijski problemi se često proširuju uključivanjem problema rutiranja i na taj način formulišu se lokacijsko-alokacijski problemi rutiranja. U radu (Nambiar i dr., 1981) autori formulišu matematički model kojim određuju lokaciju postrojenja za preradu sirove gume, lokaciju stanica za prikupljanje gume od pojedinaca i rute za transport sirove gume do postrojenja za preradu. U radu je dat realan primer za Maleziju koja je jedna od najvećih proizvođača sirove gume.

U današnje vreme sve više se vodi računa o problemima vezanim za životnu sredinu. Posebna pažnja se posvećuje zagađenju i veliki naponi se uloženi na smanjenje zagađenja, i na nalaženje takvih lokacija za postrojenja – zagađivače koja će doprineti smanjenju budućeg zagađenja. U radu (Karkazis i dr., 1992) se razmatra lokacija postrojenja – zagađivača u određenoj oblasti. Posebno se razmatra i uticaj vetra koji raspršuje zagađeni vazduh, a uzimaju se u obzir i smerovi duvanja vetra.

Tabela 2.9: Pregled radova koji se bave problemima lokacije

PROBLEMI LOKACIJE			
R.br.	Referenca	Problem / Grupa problema	Model i pristup rešavanju
1	Hu i dr., 2019	određivanje mreže servisera za održavanje poljoprivrednih mašina	ANP, BSC
2	Sarker i dr., 2018	problem lokacije postrojenja za proizvodnju biometan gasa	mešovito celobrojno nelinearno programiranje; heuristika
3	Selim i dr., 2018	problem izbora lokacije za uzgoj avokada	geo-iformacioni sistemi, analiza višekriterijumskog odlučivanja
4	Jeong i dr., 2018	izbor lokacije postrojenja za proizvodnju biomase	geo-informacioni sistemi, analiza višekriterijumskog odlučivanja; <i>fuzzy-DEcision-MAking Trial and Evaluation Laboratory (F-DEMATEL)</i>
5	Etemadnia i dr., 2015	problem lokacije veleprodajnih objekata u lancu snabdevanja voćem i povrćem	mešovito celobrojno linearno programiranje; heuristika

U nastavku su detaljnije opisani i neki radovi iz perioda pre 2014. godine, a koji su izabrani zbog specifičnosti problema koji obrađuju, a koji je direktno povezan sa temom disertacije.

2.7. Ostale primene

Autori Weintraub i Romero u radu (Weintraub i Romero, 2006) daju pregled radova iz oblasti primene operacionih istraživanja u oblasti poljoprivrede i šumarstva. Radove iz oblasti poljoprivrede su sistematizovali prema problemima planiranja na mikro nivou (farme), problemima planiranja na regionalnom nivou, modeliranju interakcije između poljoprivrede i životne sredine, problemima koji uključuju rizik i neizvesnost i na kraju je dat pregled radova koji uključuju više kriterijuma u upravljanju poljoprivredom.

Hayashi u radu (Hayashi, 2000) daje pregled izabranih radova primene višekriterijumskog odlučivanja na probleme iz oblasti poljoprivrede. Glavni doprinos rada je klasifikacija i evaluacija kriterijuma i atributa korišćenih za modeliranje poljoprivrednih sistema. U radu su prikazane pregledne tabele sa podacima o izabranim radovima u oblasti planiranja poljoprivrede na lokalnom i regionalnom nivou sa njihovim opisom, korišćenim atributima u problemima selekcije, kao i ciljevima i kriterijumima. U radu (Hayashi, 2007) dat je pregled višekriterijumske analize primenjene na problem izbora sistema upravljanja poljoprivredom. Posebna pažnja se pridaje kriterijumima koji se koriste uključujući i uticaj

poljoprivrede na životnu sredinu i daje se pregled kriterijuma koji su korišćeni u izabranim radovima. U radovima Hayashi-ja interesantno je što je dat pregled kriterijuma i njihov broj, kao i metode rešavanja u svakom od izabranih radova, pa je moguće na jednom mestu pogledati koje su sve kriterijume istraživači koristili za određene probleme.

Simulacioni modeli za planiranje useva pomažu da se kvantifikuju efekti na životnu sredinu (erozija tla ili korišćenje pesticida) koji se javljaju kao posledica različitih načina upravljanja poljoprivredom. Različiti tipovi optimizacionih modela koriste se da bi se odredila rešenja koja će zadovoljiti kako ekonomske zahteve, tako i „zahteve“ okruženja i kako bi se dobila održiva rešenja (Pacini i dr., 2004). Noviji pokušaji da se povežu poljoprivreda i životna sredina uključuju geoinformacione sisteme koji prepoznaju i kvantifikuju prostornu dimenziju koja je u osnovi mnogih modela za planiranje u poljoprivredi. Spajanjem geoinformacionih sistema sa metodama operacionih istraživanja, prvenstveno matematičkog programiranja, dovodi do prostornih sistema za podršku odlučivanju (*Spatial Decision Support Systems*) (Zekri i Boughanmi, 2007). Schneider i McCarl (2003) koriste nelinearne modele i kombinuju model regionalnog planiranja upravljanja poljoprivredom sa modelom za smanjivanje efekta staklene bašte.

Veza između poljoprivrede i životne sredine uključuje više različitih kriterijuma odlučivanja (ekonomski, kriterijumi vezani za okruženje, socijalni), tako da je u analizu uključen veliki broj kriterijuma (Marchamalo i Romero, 2007; Zekri i Boughanmi, 2007). U radu (Marchamalo i Romero, 2007) autori istovremeno razmatraju problem proizvodnje električne energije i problem planiranja korišćenja zemljišta, a uključuju i korišćenje više kriterijuma i nekoliko stejkholdera. U ovom radu se naglašava problem izbora ulaznih podataka i analiza postojećeg stanja, dok je procedura samog rešavanja jednostavna i uključuje rešavanje nekoliko linearnih modela.

Od kada se pojavila neparametarska tehnika ocene efikasnosti – analiza obavijanja podataka (*Data envelopment analysis* DEA) krajem sedamdesetih godina prošlog veka, u velikom broju radova je ova metoda primenjena kod istraživanja efikasnosti poljoprivrednih jedinica. Jedan od primera primene je i analiza farmi u gradu Navara u Španiji (Iraizoz i dr., 2003).

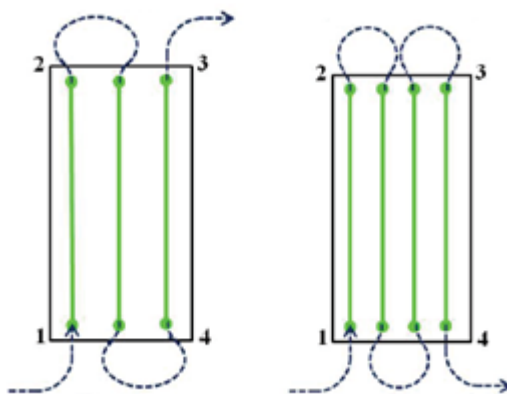
Autori u radu (Agrell i dr., 2004) prikazuju sistem za podršku odlučivanju (SZPO) koji pomaže kod planiranja regionalnog poljoprivrednog razvoja u jednoj od regija u Keniji. SZPO je baziran na modelu agro-ekoloških zona, odnosno ranije razvijenom optimizacionom

modelu koji obezbeđuje agro-ekološku i ekonomsku procenu kod različitih tipova iskorišćenja zemljišta, uključujući proizvodnju hrane, pošumljavanje ili stvaranje pašnjaka. Autori proširuju model uvođenjem i višekriterijumske optimizacije koja olakšava analizu odnosa između različitih kriterijuma odlučivanja.

Kako bi se donele dobre odluke u poljoprivredi neophodno je uzeti u obzir i kriterijume vezane za biološke, tehničke, društvene sisteme i kriterijume vezane za životnu sredinu, a istovremeno se ne sme ispustiti iz vida da svi ovi kriterijumi mogu biti i međusobno suprotstavljeni (Romero i Rehman, 2003).

U radu (Romero, 2000) autor predlaže model upravljanju rizikom u problemima alokacije poljoprivrednih resursa. Predloženi model razlikuje se od klasičnih modela upravljanja rizikom u sledećem: poljoprivredne kompanije se ne sagledavaju samo kroz finansije, rizik sa kojim se suočavaju zaposleni u poljoprivredi ima multidimenzionalni karakter (analizira se i profitabilnost i bezbednost useva), itd.

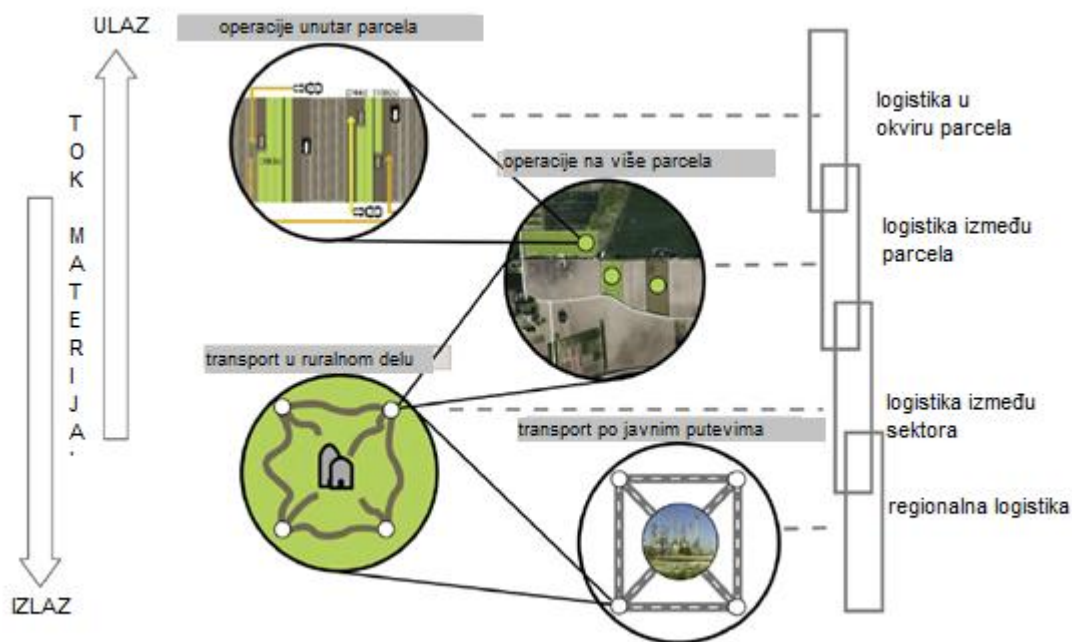
Obrada poljoprivrednog zemljišta sve više se radi primenom automatizovanih robota i korišćenjem bespilotnih letelica (dronova). Obrada zemljišta odnosi se na sadnju, raspršivanje različitih hemikalija za zaštitu useva, kontrolu kvaliteta useva i slično. Efikasna obrada zemljišta vozilima koja se koriste u poljoprivredi podrazumeva potpuno prekrivanje (sejanje, tretiranje hemikalijama) zemljišta. Neophodno je obezbediti takav kapacitet vozila da se omogući autonomni rad na celoj površini. U radu (Hameed i dr., 2013) autori razvijaju pristup planiranju pokrivanja zemljišta poljoprivrednim operacijama gde se uključuju prepreke na samom zemljištu koje se obrađuje. Autori dele zemljište na poligone i formiraju staze unutar svakog poligona, zatim dele poligone na blokove, gde svaki blok čine staze bez prepreka. Autori uzimaju prepreke na zemljištu kao razdelne linije za blokove koji će se zatim obrađivati kao celine. Na kraju koriste i genetske algoritme da bi odredili redosled kojim automatizovana vozila (roboti) posećuju blokove. Autori tvrde da ovaj problem može biti formulisan kao optimizacioni problem gde se minimizira ukupna razdaljina između povezanih blokova. Autori formiraju ulazne tačke na blokove u skladu sa smerom kazaljke na satu (slika 2.1).



Slika 2.1: Formiranje ulazaka i izlazaka sa blokova (ulazne tačke su u skladu sa smerom kazaljke na satu) (Hameed i dr., 2013)

U radu (Sorensen i Bochtis, 2010) prikazan je metodološki okvir za primenu upravljanja flotom vozila (*Fleet Management System FMS*) u oblasti poljoprivrede. Ovaj okvir uključuje podršku odlučivanju i optimizaciju operacija koje se izvršavaju flotom poljoprivrednih mašina (neautonomnih ili autonomnih). FMS obezbeđuje da se flotom vozila upravlja na optimalan način koji podrazumeva optimalnu alokaciju resursa, raspoređivanje, rutiranje, praćenje vozila i materijala u realnom vremenu i osigurava blagovremeno izvođenje operacija na terenu i ispunjavanje naloga kupaca.

U poljoprivredi se koriste veoma skupe mašine i oprema, a za efikasnu obradu potrebno je koristiti i po nekoliko vrsta mašina. Da bi se isplatilo ulaganje u ovu opremu, potrebno je da stopa njenog iskorišćenja bude što veća, a to se može ostvariti samo pažljivim planiranjem i izvršavanjem operacija. Planiranje operacija koje koriste mašine i opremu uglavnom uključuje četiri faze koje su povezane: žetva, uklanjanje biomase sa obrađenih parcela, transport u ruralnom delu i transport po javnim putevima (slika 2.2). Potrebno je koristiti više vrsta mašina i opreme za efikasno izvršavanje operacija u okviru ove četiri faze kao npr. transportne mašine ili mašine za istovar. Da bi ceo sistem imao visoke performanse, potrebno je uskladiti operacije i korišćenje opreme u svakoj fazi pojedinačno i tokom preklapanja faza (Sorensen i Bochtis, 2010).



Slika 2.2: Lanac snabdevanja integriranih operacija u poljoprivredi (Sorensen i Bochtis, 2010)

Operaciona istraživanja, a pogotovu linearno programiranje se primenjuje kod određivanja minimalnih troškova proizvodnje stočne hrane i određivanja stočnog fonda. Kada se stočni fond računa na nivou pojedinačnih farmi, uzima se u obzir više kriterijuma (npr. troškovi, balansirana ishrana) i rešavaju se višekriterijumski problemi (Rehman i Romero, 1984; Czyzak i Slowinski, 1991; Tozer i Stokes, 2001). Kod rešavanja problema stočne ishrane često se strogo specificiraju granice nutritivnih komponenti. Neke relaksacije ovog problema mogu dovesti do smanjenja troškova koji neće uticati na kvalitet ishrane, a ovaj tip problema su se rešavali fazi matematičkim programiranjem (Czyzak, 1989) i interaktivnim višekriterijumskim programiranjem (Lara i Romero, 1994).

U novije vreme istraživači rešavaju problem ishrane uzimajući u obzir i brigu o životnoj sredini, tako da se kao kriterijum uzima minimizacija troškova uz minimalni uticaj na životnu sredinu (npr. minimizacija otpuštanja azota na farmama). Ovakvi problemi su uspešno rešavani korišćenjem višekriterijumskog razlomljenog programiranja (Castrodeza i dr., 2005; Penà i dr., 2007).

2.8. Pregled stanja u oblasti u Republici Srbiji

U Republici Srbiji metode i tehnike operacionih istraživanja se primenjuju za rešavanje raznorodnih problema u oblasti poljoprivrede. Srbija je zemlja sa velikim potencijalom i kapacitetima za poljoprivredu. Poljoprivreda je osnova srpske privrede i predstavlja okosnicu

razvoja zemlje. Autori u radu (Sokolovic i dr., 2014) navode da je to jedini sektor sa pozitivnim spoljnotrgovinskim bilansom, koji predstavlja 21% ukupnog izvoza.

Zemljom, kao oskudnim resursom, mora se upravljati na odgovarajući način, a Republika Srbija trenutno je u tranziciji iz zemljišta u potpunom državnom vlasništvu u privatno vlasništvo, gde se nailazi na mnoštvo prepreka (Gucevic i dr., 2016).

U ovom poglavlju data je analiza objavljenih radova autora iz Srbije prema vrsti problema koji se analizira u radovima.

Problemi vezani za obradu i način obrade poljoprivrednog zemljišta

Nužnost istraživanja i analize tehnički tehnoloških sistema u poljoprivrednom vazduhoplovstvu u Srbiji proizilazi iz ekonomske važnosti njegovog daljeg razvoja. Može se reći da se vazduhoplovstvo ne koristi na odgovarajući način (prosečni let aviona je 36 sati u poslednjih pet godina) i nema jasan pravac razvoja (Jakovljević i Đević, 2006; Jakovljević, 2006), te je potrebno izvršiti sistematsku analizu parametara koji će dodatno uticati na izbor, uključujući broj, vrste aviona i obim njihove primene.

U radu (Pap, 2008) je formulisan i primenjen matematički model celobrojnog programiranja za optimalni plan poljoprivredne proizvodnje na farmi u zapadnoj Vojvodini. Obrađen je problem rotacije useva.

Izbor optimalnog traktorskog mašinskog agregata u procesima obrade zemljišta za različite tehnologije obrade poljoprivrednog zemljišta primenom linearnog programiranja prikazana je u (Mileusnić i dr., 2010). Autori su formulisali četiri modela i egzaktno ih rešili.

Kvalitet usluge poljoprivredne mehanizacije predstavlja jedan od osnovnih faktora za uspešnu poljoprivrednu proizvodnju. U tom smislu, postoji jasna potreba za definisanjem tačnog pokazatelja kvaliteta ovih mašina, na osnovu kojeg bi se moglo utvrditi koja je mašina optimalna za različite radne uslove (Miodragovic i dr., 2012). U radu (Miodragovic i dr., 2012) formiran je model za procenu efikasnosti traktora kao tipičnog predstavnika poljoprivredne mehanizacije, efikasnost je definisana upotrebom teorije fazi skupova, a pouzdanost, održivost i funkcionalnost koriste se kao pokazatelji efikasnosti.

Metodologija koja se zasniva na višeslojnim neuronskim mrežama predložena je (Ćulibrk i dr., 2012) za automatsko otkrivanje i nadgledanje malih vodenih područja na obradivom zemljištu, koristeći multispektralne satelitske snimke. U područjima koja su preplavljena vodom višak vode značajno oštećuje ili potpuno uništava biljke, smanjujući na taj način

prosečan prinos. Automatsko otkrivanje (preplavljenih) useva oštećenih kombinovanim dejstvom kiše i porasta podzemne omogućava dobru procenu prinosa.

Stopa iskorišćenja zemljišta raste u skladu sa rastom populacije, tako da je danas, zbog ekstenzivnog korišćenja, obradivo zemljište sve lošijeg kvaliteta i sve je više zagađeno, a posledica toga je da ga ima sve manje (Andrić Gušavac i Stanojević, 2015).

Autori u radu (Kostić i dr., 2016) dokazuju mogućnosti korišćenja originalnih uređaja za merenje otpora obrade tla, gde su polje podelili na tri jednake parcele na kojima su primenjene tri vrste obrađivanja tla. Kako bi se efikasno upravljalo zemljištem kao ograničavajući faktori uzeti su: promenljivost svojstava tla (horizontalna, vertikalna), vremenska dinamika i složenost procesa praćenja i predviđanja.

U disertaciji (Todorovic, 2018) analiziraju se proizvodnja koja se obavlja na porodičnim gazdinstvima. Cilj istraživanja je pronalaženje ekonomski efikasnih modela ratarske proizvodnje na ovim gazdinstvima. Takođe su identifikovani proizvodni resursi koji predstavljaju ograničavajuće faktore za ekonomsku efikasnost ratarske proizvodnje, a poboljšanjem proizvodne prakse dovelo do smanjenja upotrebe postojećih resursa, što bi dovelo do povećanja efikasnosti. Analiza efikasnosti urađena je primenom DEA metode.

Savremeno društvo se suočava sa problemima koji su usko povezani sa korišćenjem energije i proizvodnje hrane. Autori u radu (Đokić i dr., 2019) istražuju ekonomsku i energetska efikasnost korišćenja soje u Srbiji i utvrđuju povezanost između ova dva pokazatelja korišćenjem DEA metode.

Poljoprivredne kompanije često uzgajaju desetine useva na stotinama polja, a jedan od glavnih zadataka u poljoprivredi je odlučivanje koja će se kultura zasaditi. Ovaj složen problem rešen je primenom genetskih algoritama (Marko i dr., 2019).

U radu (Mileusnic i dr., 2019) predstavljena su dva različita pristupa u analizi procene veka traktora, kao jednih od najčešće korišćenih pogonskih jedinica na poljoprivrednim farmama. Prva se zasniva na teoriji pouzdanosti, a druga na relevantnom iskustvu koja su implementirana u ASABE (*American Society of Agricultural and Biological Engineers*) standardima. Autori zaključuju da se na ovaj način može značajno poboljšati celokupna organizacija sistema traktora i mašina na farmi i da pouzdanost i dostupnost opadaju tokom vremena dok se troškovi održavanja povećavaju.

Problemi vezani za zaštitu životne sredine i zdravlja ljudi

Metoda za procenu i poboljšanje efikasnosti rada poljoprivrednih bioplinskih postrojenja prikazana je u radu (Djatkov i dr., 2014). Kao buduće pravce istraživanja autori navode da je potrebno da se metoda prilagodi ostalim vrstama postrojenja za bioplin i proširi na ekološke i socio-ekonomske aspekte rada bioplinskih postrojenja.

U radu (Zekić i dr., 2018) primenjena je faktorska analiza, sa četiri faktora: stepen modernizacije poljoprivrede koji indirektno utiče na životnu sredinu, stepen intenziviranja poljoprivredne proizvodnje sa direktnim uticajem na životnu sredinu, zagađenje vazduha iz poljoprivrede i energija, a rezultati su korišćeni kao varijable u PROMETHEE metodi kako bi se zemlje rangirale prema uticaju poljoprivrede na životnu sredinu.

Problem rutiranja u oblasti poljoprivrede

Efektivno upravljanje poljoprivredom je neophodno (obrađivo zemljište sve lošijeg kvaliteta) kako bi se produžila produktivnost zemljišta. Korišćenje poljoprivredne avijacije u obradi zemljišta je često jedini mogući način obrade/tretiranja, zbog karakteristika zemljišta koje često onemogućavaju obradu sa tla. U radu (Andrić Gušavac i Stanojević, 2015) prikazan je matematički model optimizacije primene poljoprivredne avijacije u tretiranju obradivog zemljišta, a navedeni problem modelira se kao specijalni slučaj VRP-a.

Problem transporta šećerne repe autori u radu (Anokić i dr., 2019) rešavaju formulisanjem nove varijante VSP (*Vehicle Scheduling Problem*) problema sa heterogenim skupom vozila (*Vehicle Scheduling Problem with Heterogeneous Vehicles - VSP-HV*). Formulisan je model mešovitog celobrojnog kvadratnog programiranja i problemi malih dimenzija rešeni su u solveru LINGO 17, a za problemi većih dimenzija rešeni su metodom promenljivih okolina (*Variable Neighborhood Search - VNS*).

Problemi lokacije u oblasti poljoprivrede

Autori u radu (Andrić Gušavac i dr., 2013) primenjuju jednostavni lokacijski problem (*Simple Plant Location Problem – SPLP*) u jednoj kompaniji u Srbiji kako bi utvrdili broj poljoprivrednih aerodroma koje će se koristiti za tretiranje poljoprivrednog zemljišta. Istovremeno alociraju parcele aerodromima. Kako navode autori, rezultati istraživanja mogli bi poslužiti kao početna osnova za buduću optimizaciju u poljoprivrednom vazduhoplovstvu,

gde bi rešenja mogla povećati produktivnost i smanjiti snabdevanje energijom i daju smernice za buduća istraživanja.

Primena metoda operacionih istraživanja imala je veliki uspeh tokom godina, uključujući modeliranje i rešavanje različitih problema sa lokacijom. Industrija prirodnih resursa, posebno poljoprivredni sektor, je značajan faktor rasta u zemljama u razvoju. U radu (Andrić Gušavac i dr., 2014a; Andrić Gušavac i dr., 2014b) prikazana je primena problema lokacije sa uključenim ograničenjima za kapacitet u poljoprivrednom sektoru.

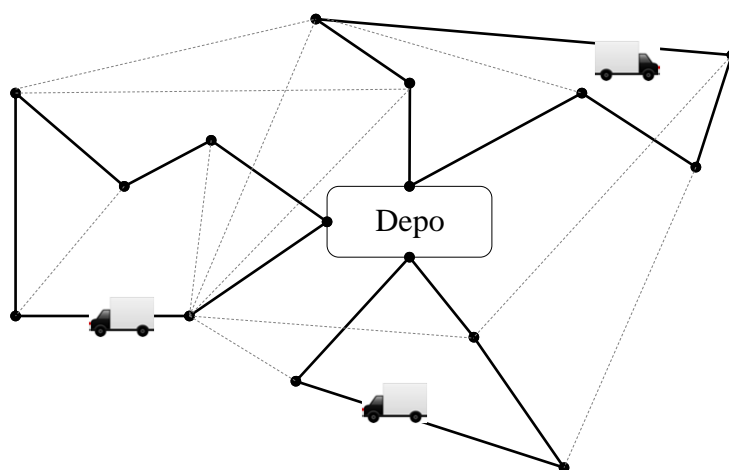
3. PROBLEMI RUTIRANJA

Problem rutiranja vozila u svom osnovnom obliku predstavlja određivanje optimalnih ruta vozila koja kreću iz jednog (centralnog) depoa i transportuju robu do (potrošačkih) centara, pri čemu se koristi više vrsta vozila ili jedno vozilo više puta. Za ovaj problem se u literaturi mogu naći i nazivi planiranje maršrute vozila i raspoređivanje (upućivanje) vozila (Vujošević i dr., 1996).

Cilj kod rešavanja problema rutiranja je da se pronade takav skup ruta koji će minimizirati ukupno pređeno rastojanje. Pretpostavke koje se moraju ispuniti su:

- skup ruta mora uključiti sve korisnike,
- svaki korisnik se može posetiti samo jedanput,
- svaka ruta mora početi i završiti se u depou.

Problem rutiranja vozila je našao široku primenu prilikom izbora efikasnih strategija za smanjenje operativnih troškova unutar distribucionih mreža. Tipična primena problema rutiranja je u određivanju ruta npr. vozila za distribuciju i prikupljanje robe i dobara, vozila gradske čistoće, vozila za prevoz radnika, taksi vozila, ili rutiranja vozila prodavaca i lica koja se bave održavanjem objekata koji se nalaze na različitim lokacijama. U slučaju primene problema rutiranja vozila na koncept povratne logistike, proizvodi se, radi popravke, servisa ili reciklaže, otpremaju od korisnika do odgovarajućih depoa za popravku, pri čemu, svojim kretanjem kreiraju odgovarajuće rute. Na slici 3.1 prikazan je problem rutiranja vozila sa jednim depoom.



Slika 3.1: Opšti model VRP-a

U problemu rutiranja vozila podrazumeva se formiranje ruta s minimalnim troškovima, pri čemu svaka od njih počinje i završava se u depou. Svi korisnici bi trebalo da budu opsluženi tačno jednom, pri čemu se mora voditi računa o kapacitetu vozila (Giosa i dr., 2002).

Prilikom rešavanja problema rutiranja vozila javlja se niz ograničenja, a rešenje se dobija na osnovu postavljanja jednog ili više kriterijuma. Često su ovi kriterijumi i suprotstavljeni, a najčešće korišćeni su:

- minimizacija ukupnih transportnih troškova, koji su u funkciji dužine rute i fiksnih troškova korišćenja vozila,
- minimizacija broja vozila sa ciljem opsluživanja svih korisnika,
- usklađivanje ruta u zavisnosti od vremena puta i opterećenja vozila,
- minimizacija penala koji se javljaju pri delimičnom opsluživanju korisnika.

Istraživanja danas su usmerena na algoritme koji pružaju mogućnost pronalaženja što boljeg rešenja uz zadovoljenje određenih vremenskih ograničenja, da bi bili primenljivi za stvarne probleme čije efikasno rešavanje ima veliki uticaj na strategiju kompanija koje su vezane za distribuciju i logistiku (Kumar i Panneerselvam, 2012). Što se tiče složenosti ovog problema, on spada u NP-teške probleme. Postoji čitava jedna klasa dobro struktuiranih problema kombinatorne optimizacije za koje postoje egzaktni algoritmi, ali su svi oni neefikasni, jer imaju eksponencijalnu složenost. Polinomni egzaktni algoritmi za ove probleme do danas nisu pronađeni, pri čemu još nije dokazano da li oni postoje ili ne postoje. Ovakva klasa se naziva NP-klasom i njeni članovi se teorijski mogu identifikovati korišćenjem rezultata tzv. teorije računске složenosti koja je počela intenzivno da se razvija u ranim 70-tim godinama prošlog veka, i to u okviru računarskih nauka. Ova teorija precizno definiše osobine “teških” problema iz klase NP.

U nastavku rada dati su odabrani matematički modeli rutiranja, počevši od formulacije osnovnog modela rutiranja vozila.

3.1. Formulacija osnovnog VRP modela

Problem rutiranja vozila može se definisati preko grafova. Zadat je kompletan graf $G = (N, E)$, $N = \{0, 1, \dots, n\}$, $E \subseteq \{(i, j) \mid i \in N, j \in N\}$. Čvor 0 označava depo. Sa $C = N \setminus \{0\}$ označen je skup korisnika, t.j. skup čvorova bez depoa. Radi formulisanja matematičkog modela, uvodi se notacija:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{grana } (i, j) \text{ je uključena u rutu} \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases}, \quad i, j \in N,$$

c_{ij} - vrednost (dužina, težina) svake grane grafa $(i, j) \in E$, uobičajeno je da je $c_{ij} = c_{ji}$,

Matematički model problema rutiranja (Miller i dr., 1960):

$$\min \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

p.o.

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in C \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in C \quad (3.3)$$

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, \quad \forall (i, j) \in E, \quad i, j \neq 0 \quad (3.4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, j) \in E \quad (3.5)$$

Ograničenja (3.2) i (3.3) obezbeđuju da se svaki korisnik posećuje tačno jedanput. Ograničenje (3.4) obezbeđuje eliminaciju podkontura koje ne sadrže depo, a u_i predstavljaju pomoćne realne promenljive dodeljene svakom čvoru (osim depoa) i predstavljaju ukupan broj svih korisnika koji se nalaze na istoj turi do korisnika i . Broj ruta u ovom modelu nije unapred fiksiran.

3.2. Proširenja VRP modela

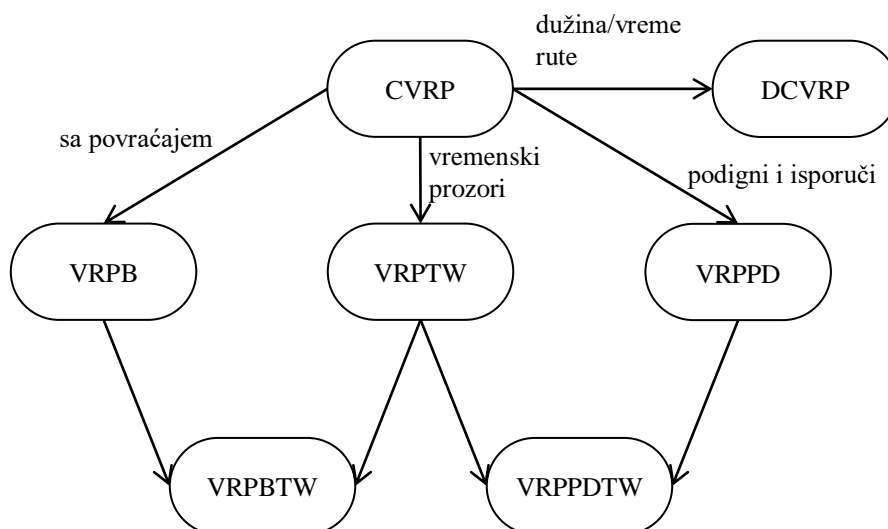
U ovom poglavlju biće prikazani neki od standardnih matematičkih modela rutiranja vozila. Rešenje VRP problema predstavlja skup ruta, pri čemu je potrebno zadovoljiti potrebe korisnika i minimizirati troškovi transporta. Nekada se može desiti da se ne mogu zadovoljiti potrebe svih korisnika i u ovakvim slučajevima količine koje je potrebno isporučiti ili prikupiti mogu biti smanjene ili se može odrediti podskup korisnika čije potrebe neće biti zadovoljene. Formulirani su i matematički modeli problema rutiranja koji uključuju i mnoge specifičnosti problema koje se javljaju u praksi, a ove specifičnosti uključene su u modele rutiranja vozila koji su ukratko opisani u nastavku..

Postoji nekoliko različitih standardnih modela rutiranja vozila:

- VRP sa ograničenim kapacitetom (*Capacitated Vehicle Routing Problem - CVRP*) – svako vozilo i depo ima ograničen kapacitet;

- VRP sa vremenskim prozorima (*Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW*) – svaki korisnik mora biti uslužen u odgovarajućem vremenu;
- VRP problem sa više depoa (*Multi-Depot Vehicle Routing Problem - MDVRP*) – dobavljač koristi više depoa kako bi snabdeo korisnike;
- VRP problem sa prikupljanjem i isporučivanjem proizvoda (*Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery - VRPPD*) – korisnici mogu vratiti neki proizvod. Ukoliko su u ovaj model uključene i vremenski prozori, dobija se VRP problem sa prikupljanjem i isporučivanjem proizvoda i sa vremenskim prozorima (*Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery and with Time Windows - VRPPDTW*).
- VRP problem sa podeljenim usluživanjem (*Split Delivery Vehicle Routing Problem - SDVRP*) – više vozila može uslužiti jednog korisnika;
- Stohastički VRP (*Stochastic Vehicle Routing Problem - SVRP*) – neke vrednosti, kao što su broj korisnika, njihove potrebe, vreme usluživanja ili vreme putovanja) su slučajne;
- Periodični VRP (*Period Vehicle Routing Problem - PVRP*) – isporuke mogu biti vršene samo u nekim određenim vremenskim periodima;
- Problem rutiranja vozila sa povratnim isporukom (*Vehicle Routing Problem with Backhauls - VRPB*) – nakon izvršenih svih isporuka vozilo preuzima višak od potrošača. Ukoliko su u ovaj model uključene i vremenski prozori, dobija se VRP problem sa povratnim isporukom i sa vremenskim prozorima (*Vehicle Routing Problem with Backhauls and with Time Windows - VRPBTW*).
- Problem rutiranja vozila sa ograničenjem maksimalnog puta ili vremenskog trajanja (*Distance-Constrained - DCVRP*).

Svaki od navedenih problema ima svoje varijacije, te se, stoga, u literaturi mogu naći i problemi kao što je VRPPD problem sa jednim vozilom, sa više vozila i sl. Na slici 3.2 prikazane su vrste problema rutiranja vozila i veze između njih.



Slika 3.2: Osnovni problemi VRP i njihovi odnosi (Toth i Vigo, 2001)

U nastavku rada detaljnije su opisani neki od najpoznatijih modela.

A. Problem rutiranja vozila sa ograničenim kapacitetom - CVRP

Kod CVRP-a poznata je flota identičnih vozila čiji su kapaciteti ograničeni i poznati su su korisnici koji imaju određene zahteve. Vozila obilaze i opslužuju zadate lokacije (korisnike) u okviru svojih kapaciteta (Toth i Vigo, 2001). Cilj je da se pronađe takav skup ruta koji će minimizirati ukupno pređeno rastojanje. Pretpostavke koje se moraju ispuniti su iste kao u 3.1.

Radi formulisanja matematičkog modela uvodi se notacija (prikazane su samo novouvedene oznake):

q_i - tražnja i - tog korisnika, $i \in N \setminus \{0\}$,

Q - kapacitet vozila koja se nalaze u depou.

Matematički model problema rutiranja sa ograničenim kapacitetom (Toth i Vigo, 2001):

$$\min \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij} \quad (3.6)$$

p.o.

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in C \quad (3.7)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in C \quad (3.8)$$

$$u_i - u_j + Qx_{ij} \leq Q - q_j, \quad \forall (i, j) \in E, \quad i, j \neq 0 \quad (3.9)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, j) \in E \quad (3.10)$$

Ograničenja (3.7) i (3.8) obezbeđuju da se svaki korisnik posećuje samo jedanput. Ograničenje (3.9), pored toga što obezbeđuje da se kapacitet ne prekorači, istovremeno obezbeđuje i eliminaciju podkontura koje ne sadrže depo, a u_i su pomoćne realne promenljive dodeljene svakom čvoru (osim depoa) koje predstavljaju ukupnu potražnju svih korisnika koji se nalaze na istoj turi do korisnika i . Pored navedenog, neophodno je da bude ispunjen i uslov da je $q_i \leq u_i \leq Q, i \in C$. Broj ruta ni u ovom modelu nije unapred fiksiran.

*B. Problem rutiranja vozila sa ograničenim kapacitetom i vremenskim prozorima –
CVRPTW*

Ukoliko postoji i predefinisani vremenski period u kome se proizvod mora isporučiti korisniku, ovaj problem naziva se problem rutiranja vozila sa ograničenim kapacitetom i vremenskim ograničenjem ili sa vremenskim prozorima (*Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Window – CVRPTW*). Problem rutiranja vozila sa vremenskim ograničenjima znatno usložnjava rešavanje problema, ali potreba za takvim modelima je uslovljena time što u praksi korisnici često zahtevaju vremenski okvir (najranije i najkasnije vreme) pružanja usluge.

Vremenska ograničenja mogu biti jaka i slaba. Kod jakih vremenskih ograničenja zahteva se da vreme isporučivanja korisniku bude tačno između najranijeg i najkasnijeg vremena. Ukoliko vozilo stigne na lokaciju korisnika pre najranijeg vremena isporuke, ono mora sačekati sa pružanjem usluge do početka najranijeg vremena usluge. S druge strane kod slabih vremenskih ograničenja za dolazak vozila ranije ili kasnije nego što je predviđeno računaju se kazne u obliku penala koje isporučilac plaća korisniku.

Cilj CVRPTW je sa najmanjim troškovima opslužiti određen broj kupaca u predefinisanom vremenskom periodu, pritom vodeći računa o kapacitetu vozila i ograničenjima vezanim za trajanje puta svakog vozila.

Da bi formulisali matematički model problema CVRPTW uvodimo sledeću notaciju (prikazane su samo novouvedene oznake):

V - skup vozila čiji su kapaciteti Q ,

q_i - tražnja i - tog korisnika, $i \in N \setminus \{0\}$,

s_i - vreme usluživanja kod i -tog korisnika, $i \in N \setminus \{0\}$,

$[a_i, b_i]$ - vremenski okvir vezan za i -tog korisnika, usluga se mora izvršiti unutar ovog vremenskog okvira,

$[a_0, b_0]$ - vremenski okvir vezan za depo,

t_{ij} - vreme putovanja od i -tog do j -tog korisnika,

$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{vozilo } k \text{ kreće se od korisnika } i \text{ do korisnika } j \text{ (uključujući } i \text{ i depo),} \\ 0, & \text{u suprotnom,} \end{cases}$,

$i \neq j, i, j \in N$,

y_{ik} - vremenski trenutak pristizanja k -tog vozila do i -tog korisnika, $i \in N \setminus \{0\}$,

Matematički model CVRPTW minimizacije troškova može se predstaviti kao (Zulvia i dr., 2012):

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in V} c_{ij} x_{ijk} \quad (3.11)$$

p.o.

$$\sum_{k \in V} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1, \forall i \in N \quad (3.12)$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} \left(q_i \sum_{j \in N} x_{ijk} \right) \leq Q, \forall k \in V \quad (3.13)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} = 1, \forall k \in V \quad (3.14)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ihk} - \sum_{j \in N} x_{hjk} = 0, \forall h \in N \setminus \{0\}, \forall k \in V \quad (3.15)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i0k} = 1, \forall k \in V \quad (3.16)$$

$$\sum_{i, j \in S, i \neq j} x_{ijk} \leq |S| - 1, \forall k \in V, S \subseteq N \setminus \{0\}, 2 \leq |S| \leq (n-1)/2, \quad (3.17)$$

$$y_{ik} + s_i + t_{ij} - K(1 - x_{ijk}) \leq y_{jk}, \forall i \in N, \forall j \in N \setminus \{0\}, \forall k \in K \quad (3.18)$$

$$a_i \leq y_{ik} \leq b_i, \forall i \in N, \forall k \in V \quad (3.19)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (3.20)$$

Prva grupa ograničenja (3.12) obezbeđuje da se svaki korisnik posećuje tačno jedanput. Ograničenje (3.13) obezbeđuje da nijedno vozilo nije utovareno količinom većom od

njegovog kapaciteta. Ograničenja (3.14), (3.15), (3.16) i (3.17) obezbeđuju da svako vozilo napušta depo, odlazi do korisnika i vraća se u depo. Ograničenja (3.15) su ograničenja protoka, tj. obezbeđuju da svako vozilo koje dođe do korisnika mora i da ode od tog korisnika. Ograničenja (3.17) kod jednog vozila obezbeđuju eliminaciju podkontura koje ne sadrže depo. Ograničenja (3.18) označavaju da vozilo k ne može da stigne do korisnika j pre vremena $y_{ik} + s_i + t_{ij}$ ukoliko ono putuje od korisnika i do korisnika j . K u ovom ograničenju predstavlja veliku pozitivnu skalarnu vrednost. Ograničenje (3.19) obezbeđuje da je ispoštovan vremenski okvir, a (3.20) označava da je x binarna veličina. Za slučaj nehomogenog voznog parka, parametar Q postaje $Q_k, k \in V$. Za svako vozilo $k \in V$ se određuje ruta.

S obzirom da VRP pripada grupi NP teških problema, jasno je da i njegovo proširenje CVRPTW pripada grupi NP teških problema.

C. Problem rutiranja vozila sa više depoa – MDVRP

Problem rutiranja vozila sa više depoa (*Multi-Depot Vehicle Routing Problem* MDVRP) podrazumeva postojanje više depoa kod problema rutiranja i alokacije. Ukoliko bi korisnici bili klasterovani po depoima, problem bi mogao biti rešen rešavanjem nekoliko VRP-a.

Kao i u problemima rutiranja sa jednim depoom, i u problemu rutiranja vozila sa više depoa, bolje rešenje je ono koje obezbeđuje manje rastojanje koje je potrebno da svako pojedinačno vozilo pređe, kraće vreme usluživanja korisnika, viši nivo efikasnosti i niže troškove isporuke. Jedan od ciljeva može biti i smanjenje broja vozila koji će uslužiti konačan broj korisnika, što dovodi do smanjenja ukupnih troškova u lancu snabdevanja.

Notacija koja će biti korišćena u matematičkom modelu problema rutiranja sa više depoa je:

V - skup svih vozila,

I - skup depoa,

J - skup korisnika,

n - broj korisnika,

r_k - fiksni troškovi korišćenja vozila $k \in V$,

V_i - kapacitet depoa $i \in I$,

d_j - tražnja korisnika $j \in J$,

Q_k - kapacitet vozila (ili rute) $k \in V$,

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ako je korisnik } j \text{ alociran depou } i \\ 0, & \text{u suprotnom,} \end{cases}, i \in I, j \in J$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{ako tačka } i \text{ prethodi tački } j \text{ na ruti } k, i, j \in I \cup J \\ 0, & \text{u suprotnom,} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{ako je uspostavljen depo } i \\ 0, & \text{u suprotnom,} \end{cases}, i \in I$$

u_{lk} - pomoćna promenljiva kod ograničenja za eliminaciju podkontura u ruti vozila k , $l \in J, k \in V$

Matematički model MDVRP-a (prilagođeno iz Surekha i Sumathi, 2011):

$$\min \sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} \sum_{k \in V} c_{ij} x_{ijk} + \sum_{k \in V} r_k \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \quad (3.21)$$

p.o.

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} = 1, j \in J \quad (3.22)$$

$$\sum_{j \in J} d_j \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} \leq Q_k, k \in V \quad (3.23)$$

$$u_{lk} - u_{jk} + n x_{ljk} \leq n - 1, l, j \in J, k \in V \quad (3.24)$$

$$\sum_{j \in I \cup J} x_{ijk} - \sum_{j \in I \cup J} x_{jik} = 0, k \in V, i \in I \cup J \quad (3.25)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, k \in V \quad (3.26)$$

$$\sum_{j \in J} d_j z_{ij} \leq V_i, i \in I \quad (3.27)$$

$$-z_{ij} + \sum_{u \in I \cup J} (x_{iuk} + x_{ujk}) \leq 1, i \in I, j \in J, k \in V \quad (3.28)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, i \in I, j \in J, k \in V \quad (3.29)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, i \in I, j \in J \quad (3.30)$$

$$u_{lk} \geq 0, l \in J, k \in V \quad (3.31)$$

Funkcijom cilja (3.21) se minimiziraju ukupni troškovi isporuke i troškovi korišćenja vozila. Skup ograničenja (3.22) obezbeđuju da se svaki korisnik opslužuje samo jednim vozilom (sa samo jedne rute). Skup ograničenja (3.23) obezbeđuje da se ne prekorači

kapacitet vozila. Ograničenja koja obezbeđuju eliminaciju podkontura koje ne sadrže depo data su sa (3.24). Ograničenja protoka data su sa (3.25). Skupom ograničenja (3.26) obezbeđuje se da se svaka ruta izvrši najviše jednom (obezbeđuje se da svako vozilo krene sa najviše jednog depoa, t.j. obezbeđuje se da svaka ruta sadrži samo jedan depo). Ograničenja vezana za kapacitet depoa data su sa (3.27). Ograničenja (3.28) obezbeđuju da se korisnik može alocirati depou samo ako postoji ruta koja vodi od depoa do korisnika. Ograničenja (3.29-3.30) obezbeđuju binarnost promenljivih. Pomoćne promenljive su nenegativne (3.31).

U slučajevima kada postoji veliki broj skladišta iz kojih se korisnici snabdevaju, bez razmatranja ograničenja kapaciteta, donosiocima odluka je teško da odrede koji korisnik će biti uslužen iz kog skladišta. Stoga se, najčešće, pre rutiranja i vremenskog planiranja snabdevanja vrši klasterovanje korisnika, odnosno korisnici se grupišu prema razdaljini između njih i skladišta.

3.3. Problemi lokacije i rutiranja

Problemi lokacije i rutiranja (LRP) podrazumevaju da se paralelno sa izborom optimalne lokacije razmatraju i rute koje vozila prave dok obilaze korisnike. LRP modelima bavio se veliki broj istraživača i autora. Neki autori svoja istraživanja vezana za LRP zasnivaju na uopštavanju klasičnog transportno-lokacijskog problema koji uključuje izbor optimalne lokacije objekta uz minimizaciju troškova transporta između potencijalne lokacije i čvorova koji obilaze vozila i koja pri tome rade opsluživanje istih. U savremenim preduzećima, menadžeri logistike zajedno sa ostalim menadžerima u preduzeću, moraju donositi odluke koje se odnose na lokacije fabrika, skladišta i distributivnih centara. U zavisnosti od lokacije korisnika, njega je potrebno dodeliti određenom uslužnom području, te je stoga, potrebno da menadžeri donose i odluke koje se odnose na alokaciju korisnika. Osim navedenog, potrebno je da menadžeri donose i odluke koje se odnose na plan transportnih ruta koje povezuju korisnike, sirove materijale, fabrike, skladišta i sl. Ove odluke smatraju se veoma važnim za poslovanje preduzeća i celokupnog lanca snabdevanja u kome ono posluje, jer direktno utiču na uslugu koja se pruža korisnicima i na ukupne troškove.

U literaturi postoji veliki broj matematičkih modela za rešavanje problema izbora lokacija i rutiranja, kao i kombinovanih problema koji rešavaju i lokacije i rutiranje. Ovi problemi predstavljaju područje istraživanja lokacija na kojima bi trebalo da se nađu objekti, kao što su fabrike, distributivni centri i prodajna mesta, a u slučaju povratnog lanca logistike i centri u koje se vraćaju korišćeni proizvodi, fabrike u kojima se oni popravljaju i centri u koje se

dopremaju proizvodi i delovi proizvoda koji se ne mogu popraviti ili ponovo koristiti i sl. i u kojima je posebna pažnja posvećena problemu rutiranja vozila.

Matematički model za problem lokacije, alokacije i rutiranja dat je u nastavku. Ovaj matematički model je modifikacija modela za probleme rutiranja sa više depoa, a modifikacija se ogleda u donošenju odluke i o lokaciji depoa.

Notacija koja će biti korišćena data je u nastavku (prikazane su samo novouvedene oznake):

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{ako je depo } i \text{ uspostavljen,} \\ 0, & \text{u suprotnom,} \end{cases}$$

f_i - trošak postavljanja depoa $i \in I$,

Matematički model problema lokacije i rutiranja (Wu i dr., 2002):

$$\min \sum_{i \in I} f_i y_i + \sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} \sum_{k \in V} c_{ij} x_{ijk} + \sum_{k \in V} r_k \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \quad (3.32)$$

p.o.

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} = 1, \quad j \in J \quad (3.33)$$

$$\sum_{j \in J} d_j \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} \leq Q_k, \quad k \in V \quad (3.34)$$

$$u_{lk} - u_{jk} + n x_{ljk} \leq n - 1, \quad l, j \in J, \quad k \in V \quad (3.35)$$

$$\sum_{j \in I \cup J} x_{ijk} - \sum_{j \in I \cup J} x_{jik} = 0, \quad k \in V, \quad i \in I \cup J \quad (3.36)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, \quad k \in V \quad (3.37)$$

$$\sum_{j \in J} d_j z_{ij} - V_i y_i \leq 0, \quad i \in I \quad (3.38)$$

$$-z_{ij} + \sum_{u \in I \cup J} (x_{iuk} + x_{ujk}) \leq 1, \quad i \in I, \quad j \in J, \quad k \in V \quad (3.39)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, \quad j \in J, \quad k \in V \quad (3.40)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad i \in I \quad (3.41)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, \quad j \in J \quad (3.42)$$

$$u_{lk} \geq 0, \quad l \in J, \quad k \in V \quad (3.43)$$

Funkcijom cilja (3.32) se minimiziraju ukupni troškovi uspostavljanja depoa, ukupni troškovi isporuke i troškovi otpreme vozila. Skup ograničenja (3.33) obezbeđuju da se svaki korisnik opslužuje samo jednim vozilom (sa samo jedne rute). Skup ograničenja (3.34) obezbeđuje da se ne prekorači kapacitet vozila. Ograničenja koja obezbeđuju eliminaciju podkontura data su sa (3.35). Ograničenja protoka data su sa (3.36). Skupom ograničenja (3.37) obezbeđuje se da se svaka ruta izvrši najviše jednom. Skupom ograničenja (3.38) obezbeđuje se da svako vozilo krene sa najviše jednog depoa, t.j. obezbeđuje se da svaka ruta sadrži samo jedan depo. Ograničenja vezana za kapacitet uspostavljenih depoa data su sa (3.39). Ograničenja (3.40) obezbeđuju da se korisnik može alocirati depou samo ako postoji ruta koja vodi od depoa do korisnika. Ograničenja (3.40) - (3.42) obezbeđuju binarnost promenljivih. Pomoćne promenljive su nenegativne (3.43).

Naravno, postoje slučajevi u kojima lokacijski problemi nemaju aspekt rutiranja i ovakve probleme nije adekvatno rešavati korišćenjem pristupa LRP. Neki istraživači ističu razliku u ciljevima između lokacijskih i problema rutiranja, s obzirom da lokacijski problemi predstavljaju strateške, a problemi rutiranja taktičke probleme.

Određivanje ruta predstavlja taktički problem, jer su potrebe i mogućnosti za njihovim svakodnevnim menjanjem potpuno opravdane i primenljive, dok se, naravno, problemi određivanja lokacija, rešavaju jednom i njihova rešenja treba da budu primenljiva i da daju rezultate u dužem vremenskom periodu. Takođe, neki autori smatraju da ova dva problema ne treba izučavati kombinovano, s obzirom da su oni različito orijentisani. Još jedan razlog zbog koga mnogi praktičari pribegavaju korišćenju lokacijskog problema, a ne kombinovanog problema lokacije i rutiranja, je zato što je rešavanje klasičnog lokacijskog problema znatno lakše.

Naravno, problemi lokacije i rutiranja su povezani i sa klasičnim lokacijskim problemima i sa problemima rutiranja vozila. Zapravo, oba ova problema se mogu posmatrati kao posebni slučajevi LRP problema. U slučaju kada su svi korisnici direktno povezani sa skladištem, problem lokacije i rutiranja postaje standardni lokacijski problem. U slučaju kada fiksiramo lokaciju depoa, problem se svodi na klasičan problem rutiranja vozila. Problemi lokacije i rutiranja predstavljaju probleme koji su predmet izučavanja distributivnog menadžmenta koji se mogu modelirati kao problemi kombinatorne optimizacije i predstavljaju NP teške probleme. U novije vreme, za rešavanje problema distributivnog menadžmenta koriste se integrisani pristupi koji se povezuju sa logističkim problemima.

3.4. pristupi rešavanju problema rutiranja

Za male dimenzije problema razvijaju se egzakti algoritmi koji se baziraju na opštim principima metode grananja i ograničavanja (*Branch and Bound method*) (Land i Doig, 1960, Eiselt i Sandblom, 2004, Toth i Vigo, 2001), grananja i odsecanja (*Branch and Cut method*) (Ceselli, 2003, Ceselli i Righini, 2005, Belenguer i dr., 2010) i metode odsecajućih ravni (*Cutting plane method*) (Gomory, 1963, Toth i Vigo, 2001). Ove metode garantuju dobijanje egzaktnih rešenja, ali za probleme velikih dimenzija ne mogu naći optimalno rešenje u razumnom vremenu.

Za probleme koji su NP teški razvijaju se metode rešavanja koje se baziraju na heurističkim principima. Heurističke metode ne garantuju nalaženje optimalnog rešenja u razumnom vremenu. Razvijene su specijalne heuristike koje imitiraju spontane optimizacione procese u prirodi (genetski algoritmi (Holland, 1992, Cvetković i dr., 1996, Krčevinac i dr., 2013), mravlji algoritmi (Dorigo i Caro, 1999), kolonije pčela (Pham i dr., 2006)), a neke se baziraju na veštačkoj inteligenciji (tabu pretraživanje (Glover, 1986), neuronske mreže (Zurada, 1992), genetski algoritmi).

Što se tiče rešavanja realnih problema, izuzetno je važno da se oni reše u realnom vremenu. Generalno, razlikuju se dva pravca za razvoj efikasnih algoritama - heuristički i aproksimativni algoritmi. Heuristike daju, u najvećem broju slučajeva, optimalno ili približno rešenje. Približno rešenje je ono rešenje kada je vrednost kriterijumske funkcije približno jednaka optimalnoj vrednosti. Međutim, u opštem slučaju, kod primene heuristika nema garancije da se dobija optimalno rešenje, a često se ne može proceniti ni koliko je dobijeno rešenje daleko od optimalnog (Vujošević, 2012). Za razliku od heuristika, aproksimativne metode garantuju tačnost optimalnog rešenja sa nekom greškom, a greška se računa u odnosu na optimalnu vrednost kriterijumske funkcije.

Za neke probleme iz klase NP postoje efikasni aproksimativni algoritmi (polinomne složenosti), dok za ostale ne postoje. Iskustva u primeni aproksimativnih i heurističkih algoritama daju ogromnu prednost heuristikama, pogotovu heuristikama u kombinaciji sa aproksimativnim algoritmima. Iako su aproksimativni algoritmi teorijski izazovni, praktično su potisnuti heuristikama.

Računska složenost nekog algoritma (Krčevinac i dr., 2013) meri se ukupnim brojem "elementarnih koraka" koji se ostvaruju u okviru algoritma kako bi se rešio posmatrani problem. Algoritam ima računsku složenost $O(f(n))$ u slučaju da, za svaki konkretni primer

problema proizvoljne “dimenzije” n , važi da je ukupni broj elementarnih koraka algoritma $\leq Cf(n)$, gde je C pozitivna konstanta, a f neka realna funkcija. Pojmovi elementarnog koraka i dimenzije problema nisu jednoznačno definisani, već zavise od vrste problema. U slučaju da je $f(n)$ polinom po n , tada je algoritam polinoman, a u suprotnom on je eksponencijalan. Polinomni algoritmi se smatraju računski efikasnim, dok eksponencijalni to ne moraju da budu, jer često ne mogu da u razumnom vremenu reše probleme velikih dimenzija. Da bi heuristički algoritmi bili efikasni, treba da budu polinomni.

Egzaktni algoritmi se mogu primenjivati za rešavanje dobro strukturiranih problema kombinatorne optimizacije, međutim, takvi algoritmi najčešće su neefikasni, zbog toga što imaju eksponencijalnu složenost. Ova klasa problema se naziva NP-klasom. Za efikasno rešavanje problema iz klase NP za sada koriste pogodno definisane heurističke metode.

3.4.1. Egzaktne metode

Egzaktne metode, na osnovu odgovarajućih teorijskih razmatranja, garantuju nalaženje optimalnog rešenja ili konvergenciju ka tom rešenju. Ove metode uvek polaze od precizno formulisanog matematičkog modela koji dovoljno dobro odražava prirodu problema koji se rešava (Krčevinać i dr., 2013), a problemi za koje se mogu precizno formulisati matematički modeli nazivaju se dobro strukturiranim. Metode optimizacije za rešavanje kombinatornih problema zasnivaju se na pristupu nabiranja (Vujošević, 2012). U ovom pristupu se generišu potencijalna rešenja problema i računaju odgovarajuće vrednosti kriterijumske funkcije. Vrednosti kriterijumske funkcije se upoređuju i zaključuje se koje je najbolje rešenje. Ove metode se nazivaju metodama pretraživanja, jer traže najbolje rešenje u dopustivoj oblasti. Postoje dva načina da se pretraži konačan skup dopustivih rešenja: potpunim nabiranjem (eksplicitna enumeracija) ili posrednim nabiranjem (implicitna enumeracija). Potpunim nabiranjem se direktno ispituje svako dopustivo rešenje, a posrednim nabiranjem se ispituje relativno mali broj dopustivih rešenja uz primenu različitih pravila kojima se smanjuje broj rešenja koja se ispituju.

Klasični pristupi za egzaktno rešavanje kombinatornih problema su metoda grananja i ograničavanja i dinamičko programiranje. Metoda grananja i ograničavanja (*Branch and Bound method*) je egzaktna metoda koja se zasniva na principu dekompozicije - *podeli pa vladaj*: originalni dopustivi skup se podeli na podskupove i ispituju se dobijeni podskupovi. Ako se početnom podelom dobije podskup koji je računski suviše teško pretražiti, potrebno je

i takav podskup podeliti na njegovce podskupove. Termin *grananje* označava podelu dopustivog skupa na podskupove i na odlučivanje koji će se od njih ispitivati u narednoj iteraciji, dok termin *ograničavanje* predstavlja određivanje granica za vrednosti kriterijumske funkcije na razmatranom skupu rešenja. U svakoj iteraciji određuju se granice, t.j. računaju se i gornja i donja granica za vrednost kriterijumske funkcije na razmatranom skupu. Metoda grananja i odsecanja (*Branch and Cut method*) koristi niz relaksacija početnog problema. Kada u problemu celobrojnog linearog programiranja izostavimo uslov celobrojnosti i rešimo relaksacioni problem, ako je rešenje relaksacionog problema celobrojno, tada je i rešenje početnog problema celobrojno. Ideja metode je u formiranju linearne nejednačine (naziva se i odsecajuća ravan) koja zadovoljava sva celobrojna dopustiva rešenja početnog problema. Više o metodama videti u (Land i Doig, 1960; Cvetković i dr., 1996; Eiselt i Sandblom, 2004; Toth i Vigo, 2001, Vujošević, 2012).

3.4.2. Aproksimativni algoritmi

Aproksimativni algoritmi su razvijeni kao odgovor na nemogućnost rešavanja velikog broja optimizacionih problema. Johnson (1974) je jedan od prvih autora koji je formalizovao koncept aproksimativnih algoritama. Autori u (Hochbaum, 1996) konstatuju da ako je optimalno rešenje nedostižno, razumno je žrtvovati optimalnost zarad “dobrog” dopustivog rešenja koje je računski efikasno. Naravno, bilo bi najbolje da se žrtvuje što manje (optimalnosti), a da se dobije što više (efikasnosti).

Algoritmi koji će sa prihvatljivom verovatnoćom brzo pronaći neko približno rešenje zovu se približni (aproksimativni) algoritmi. U zadacima optimizacije, približnim algoritmima se pokušava naći optimalno ili dopustivo rešenje za koje je vrednost kriterijumske funkcije što bliže vrednosti koju bi dobila za optimalno rešenje (Vujošević, 2012).

NP teški problem su rešavani metodama celobrojnog programiranja ili heuristikama. Problem kod metoda celobrojnog programiranja je što ove metode ne mogu garantovati da li će dodatnih pet minuta vremena utrošenih za izvršavanje obrezbediti značajno bolje rešenje ili da li pet dodatnih dana neće obezbediti poboljšanje rešenja (Hochbaum, 1996).

Kada se postavi pitanje o načinu rešavanja nekog problema, do sada su se odgovori uglavnom svodili na odabir ili neke od egzaktnih ili neke od heurističkih metoda u zavisnosti od kompleksnosti problema.

Egzaktne i heurističke metode često se posmatraju u dve odvojene kategorije. Takvo stanje onemogućuje unakrsnu razmenu ideja razvijenih i primenjenih kod egzaktnih ili heurističkih

algoritama. Najbolje bi bilo da postoji jedna metoda rešavanja koja bi se „prebacila“ sa potpunog pretraživanja na nepotpuno u momentu kada se dimenzije problema povećaju (Hochbaum, 1996).

Egzaktne i heurističke metode su se svrstavale u potpuno različite kategorije, što je imalo nekoliko (uslovno rečeno) mana:

- obeshrabruje se ukrštanje ideja algoritama za egzaktne i za heurističke metode,
- zahteva se primena heuristike u momentu kada se dimenzije problema postanu prevelike za egzaktno rešavanje,
- pažnja se ne usmerava na mogućnost ujedinjenja egzaktnih i heurističkih metoda (Hooker, 2015).

U radu (Hooker, 2015) autor naglašava da postoji deo strukture koja je ista kod egzaktnih i heurističkih metoda. Većina algoritama oba tipa su specijalni slučajevi strategija za rešavanje primala i duala problema. Ako bi se metode objedinile, to bi donelo neke prednosti:

- strukturna sličnost ovih metoda može dovesti do formulacije algoritama koji mogu raditi i u egzaktnom i heurističkom modu,
- povećaće se broj algoritama (više ideja).

3.4.3. Heurističke metode

Heuristički algoritmi trebalo bi da imaju jednu važnu osobinu – da budu računski efikasni, t.j. da nađu rešenje u razumnom vremenu. Većina realnih problema su slabo strukturirani, tj. imaju vrlo kompleksnu strukturu sa velikim brojem raznovrsnih ograničenja. Često je nemoguće matematički formalizovati (u potpunosti) ovakva ograničenja, pa je posledica toga da se ne može formirati precizni matematički model. Praktični problemi mogu sadržati i elemente neizvesnosti, neodređenosti i subjektivne procene, zahtevati zadovoljenje više od jednog cilja, što ih sve može učiniti veoma teškim i za modeliranje i za rešavanje. Osim toga, i kod nekih dobro strukturiranih problema može se desiti da, u slučaju velikih dimenzija, egzaktne metode ne mogu da nađu optimalno rešenje u razumnom vremenu (Krčevinac i dr., 2013).

Sredinom 60-tih godina prošlog veka počele u okviru operacionih istraživanja da se razvijaju tzv. heurističke metode ili heuristike, koje pokušavaju da prevaziđu prethodno opisane poteškoće. Primena heuristika pri rešavanju problema ne garantuje nalaženje optimalnog rešenja, iz razloga što ne koriste klasično formalizovane matematičke postupke.

Međutim, kod ovih metoda moguća je implementacija zdravorazumskih pravila koja često imitiraju proces ljudskog mišljenja, oslanjajući se na pozitivno ljudsko iskustvo i intuiciju (Krčevinac i dr., 2013).

Iako u početku potcenjivane, heurističke metode su danas postale jedan od uobičajenih načina, a ponekad i jedini način, za rešavanje mnogobrojnih i raznorodnih kompleksnih realnih problema. Pri tome je presudnu ulogu odigrao nagli razvoj računarske tehnike koji je omogućio izvršavanje velikog broja računskih operacija nad obimnim skupovima podataka u razumnom vremenu, pa time i rešavanje problema velikih dimenzija.

Osim toga, od sredine 80-tih godina prošlog veka se intenzivno razvija i široko primenjuje čitav niz sistematizovanih heurističkih metodologija, tzv. opštih heuristika koje daju opšta uputstva za rešavanje problema, nezavisno od specifičnosti njegove strukture.

Termin "heuristika" potiče od starogrčke reči "heuriskein" – što znači "naći" ili "otkriti" (Čuveni Arhimedov uzvik "Eureka!" predstavlja prošlo vreme ovog glagola.)

Heuristički algoritmi imaju sledeće osobine:

- korišćenjem zdravorazumske logike, intuicije i prethodne prakse u rešavanju problema, formalizuju se najrazličitija inteligentna pravila. Primena ovih pravila tokom procesa nalaženja rešenja, može se obezbediti da rešenja u proseku budu dovoljno bliska optimalnom rešenju. Drugim rečima, pri formiranju neke heuristike treba težiti da se implementiraju takva pravila koja omogućuju njeno "dobro" prosečno ponašanje,

- rade u razumnom vremenu, tj. računski su efikasni,
- jednostavnost,
- robusna, ukoliko dođe do malih promena parametara problema, heuristika ne menja drastično svoje ponašanje,
- poseduju mogućnost generisanja većeg broja "dobrih" rešanja (korisnik može izabrati rešenje koje mu je, u skladu sa nekim dodatnim kriterijumima, najprihvatljivije),
- mogućnost interaktivnog rada, gde korisnik može interaktivno da utiče, u većoj ili manjoj meri, na proces dobijanja rešenja donoseći bitne odluke u nekim koracima heuristike, itd.

Heurističke procedure se često koriste i kao deo egzaktnih algoritama u cilju ubrzavanja procesa nalaženja optimalnih rešenja, gde heuristike teže da smanje ukupan broj iteracija koje su potrebne da se dođe do optimalnog rešenja.

Jedna od uobičajenih klasifikacija heurističkih metoda vrši se prema njihovom opštem pristupu rešavanju problema. U nastavku je navedeno nekoliko heuristika iz ove klasifikacije koje se često javljaju u praksi (Krčevinac i dr., 2013):

1. Konstruktivne metode – kod ovih metoda generiše se samo jedno dopustivo rešenje problema koje, primenom odgovarajućih inteligentnih pravila, treba da bude blisko optimalnom rešenju. Pri tome se mogu koristiti dva principa:

- princip “proždrljivosti” (na engleskom “greedy”) kod koga se, od trenutno mogućih izbora u svakoj iteraciji bira “najbolji” u skladu sa nekim lokalnim kriterijumom i
- princip “gledanja unapred” koji, među trenutno mogućim izborima u svakoj iteraciji, prepoznaje one koji mogu da dovedu do formiranja lošeg krajnjeg rešenja. Ovo je razlog zašto je potrebno izbegavati ovakve izbore.

Konstruktivne metode se obično koriste za probleme kod kojih je relativno teško formirati neko njegovo dopustivo rešenje.

2. Metode lokalnog pretraživanja – iz iteracije u iteraciju generišu niz dopustivih rešenja problema, pri tome teže da rešenja budu sve bolja i bolja. U svakoj iteraciji se pretražuje “okolina” trenutnog rešenja i, u skladu sa nekim lokalnim kriterijumom, u toj okolini se bira sledeće rešenje u ovom nizu. Početno dopustivo rešenje niza može generisati slučajno ili formirati primenom neke konstruktivne metode (simulirano kaljenje, tabu pretraživanje), a u nekim slučajevima i uzeti iz prakse.

3. Evolutivne metode – ove metode generišu više dopustivih rešenja problema u svakoj iteraciji, ova rešenja čine tzv. “populaciju”, pri čemu se teži da svaka sledeće formirana populacija bude u proseku bolja od prethodne (genetski algoritmi).

4. Metode dekompozicije – na heuristički način “razbijaju” problem na više podproblema koji su manjih dimenzija od početnog problema. Ovi podproblemi se zatim odvojeno, heuristički ili egzaktno, rešavaju.

5. Induktivne metode – koriste principe metoda razvijenih za manje i jednostavnije probleme kako bi rešili veći i složeniji problem (istog tipa). Induktivne metode se često izvode iz egzaktnih metoda - ako se ograniči vreme rada egzaktne metode grananja i ograničavanja, ona se može smatrati induktivnom heuristikom.

Heurističke metode se mogu podeliti i na specijalne i opšte. Specijalne heuristike se formulišu za specijalne vrste optimizacionih problema u skladu sa svojstvima i specifičnosti tih problema.

Međutim, od sredine 80-tih godina prošlog veka počinju da se razvijaju tzv. opšte heuristike. To su heurističke metodologije opšteg karaktera koje se mogu primeniti na bilo koji problem kombinatorne optimizacije.

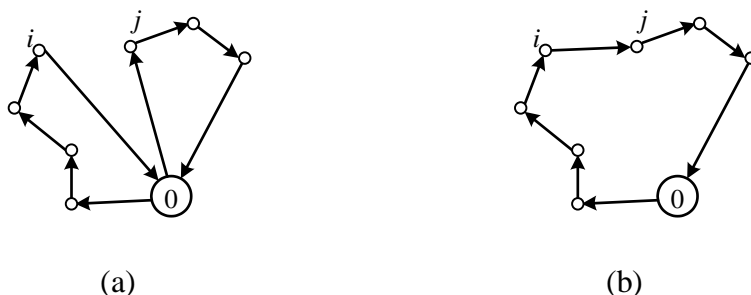
Za rešavanje problema rutiranja vozila predlaže se nekoliko grupa heuristika (Toth i Vigo, 2001). One se mogu klasifikovati u dve klase: klasične heuristike (heuristike u ovom radu) i metaheuristike. Većina metoda koje se danas koriste pripadaju prvoj klasi i one izvršavaju relativno ograničenu ispitivanje prostora pretraživanja i uobičajeno daju dobra rešenja, a mogu se i lako modifikovati kako bi uzele u obzir ograničavajuće faktore iz realnog sistema. Kod metaheuristika fokus je na sveobuhvatnijem pretraživanju dopustive oblasti. Kvalitet rešenja koje daju metaheuristike mnogo je bolji nego kod klasičnih heuristika.

3.4.3.1. Heuristike za rešavanje VRP

Heuristike koje se koriste za rešavanje problema rutiranja vozila mogu se klasifikovati u tri kategorije. Konstruktivne heuristike postepeno dolaze do dopustivog rešenja uz troškove kao kriterijum, ali ne uključuju fazu poboljšanja rešenja. U dvofaznim heuristikama, problem se dekomponuje na dve komponente, radi se klasterovanje čvorova u dopustive rute i konstruisanje ruta, a postoji mogućnost i uključivanja povratne veze među fazama. Dvofazne heuristike mogu se podeliti na dve grupe: metode kada se radi prvo klasterovanje, a onda se konstruišu rute i metode kada se prvo konstruišu rute, a onda se radi klasterovanje. U treću kategoriju spadaju metode poboljšavanja, koje pokušavaju da poboljšaju neko dopustivo rešenje. Više o klasičnim heuristikama može se videti u (Laporte i Semet, 2001; Laporte i dr., 2000; Toth i Vigo, 2001; Toth i Vigo, 2014).

Klark-Rajtov algoritam (Clarke i Wright, 1964) predstavlja jednu od najpoznatijih i najprimenjivanijih tehnika rešavanja problema rutiranja. Klark i Rajt su 1964. godine predložili algoritam koji se bazira na principu proždrljivosti. Prvo se konstruiše početno rešenje gde je broj ruta jednak broju potrošača i algoritam polazi od tog početnog rešenja. Početno rešenje se formira tako što se po jedno vozilo upućuje iz depoa do jednog potrošača, a zatim se vraća u depo. Zatim se interaktivno, iz koraka u korak spajaju po dve rute čijim se spajanjem postiže najveća ušteda, a da pri tome ostanu zadovoljena ograničenja zadatka.

Na slici 3.3 prikazan je jednostavan primer spajanja ruta $(0, \dots, i, 0)$ i $(0, j, \dots, 0)$ u jednu rutu $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$, tako što se iz rešenja isključe grane $(i, 0)$ i $(0, j)$ i uključi grana (i, j) . Ovim spajanjem se ostvaruje ušteda $S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$.



Slika 3.3: Primer spajanja ruta kod Klark-Rajtovog algoritma

Klark-Rajtov algoritam

1. Inicijalizacija:

1) Konstruisati elementarne rute $(0, i, 0)$, $\forall i = 1, \dots, n$, i odrediti dužinu svih ruta

$$F = \sum_{i \in C} c_{0i} + c_{i0} .$$

2) Izračunati uštede S_{ij} , $\forall (i, j) \in E$, $i \neq j$ koristeći formulu $S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$, $\forall (i, j) \in E$, $i \neq j$.

3) Sortirati uštede u nerastućem redosledu.

2. Za svaki element sortirane liste ušteda:

1) Odrediti:

- da li su i i j u različitim rutama prvi i/ili¹ poslednji čvorovi, t.j. da li postoje dve rute od kojih jedna sadrži granu $(i, 0)$, a druga granu $(0, j)$,
- da li je zbir kapaciteta te dve rute manji od kapaciteta vozila.

2) Ako da:

- povezati ove dve rute, tako što se iz rešenja izbacuju grane $(i, 0)$ i $(0, j)$ i formira se nova grana (i, j) . Primer povezivanja dve rute prikazan je na slici 3.3.
- smanjiti ukupnu dužinu ruta za S_{ij} , tj. $F \leftarrow F - S_{ij}$,
- izračunati kapacitet nove rute kao zbir kapaciteta ruta od kojih je formirana,
- eliminisati grane starih ruta.

Stop kada se više ne mogu formirati nove rute.

¹Ukoliko je zadati graf neusmeren i $c_{ij} = c_{ji}$, $\forall (i, j) \in E$, orijentacija ruta se može menjati i to neće uticati na vrednost funkcije cilja. U tom slučaju je svejedno da li su čvorovi i i j prvi ili poslednji u ruti. Ukoliko ovaj uslov nije ispunjen potrebno je strogo voditi računa da je i poslednji čvor u svojoj ruti, a j prvi u svojoj ruti.

3.4.2.2. Metaheuristike

U ovom poglavlju će biti ukratko izložene osnovne karakteristike četiri najpopularnije opšte heuristike: simuliranog kaljenja, tabu pretraživanja, metode promenljivih okolina i genetskih algoritama. Prve tri od njih baziraju se na principu lokalnog pretraživanja, koji je opisan u nastavku teksta, dok je poslednja evolutivnog tipa.

Princip lokalnog pretraživanja

Princip lokalnog pretraživanja, primenjen na rešavanje problema kombinatorne optimizacije koji se u najopštijem slučaju mogu prikazati kao

$$\min_{x \in X} f(x) \quad (3.47)$$

podrazumeva definisanje neke strukture okolina u prostoru dopustivih rešenja X gde se svakom $x \in X$ pridružuje neki podskup $N(x) \subseteq X$, $x \notin N(x)$, koji se naziva okolinom dopustivog rešenja x , a njeni članovi su susedi od x . U lokalnom pretraživanju se polazi od proizvoljne tačke x_1 iz X kao od početnog rešenja, pa se u svakoj iteraciji n pretražuje okolina $N(x_n)$ trenutnog rešenja x_n . Tada se u njoj pronalazi sused koji predstavlja sledeće rešenje x_{n+1} , korišćenjem nekog definisanog pravila izbora. Više o principu lokalnog pretraživanja može se naći u (Krčevinac i dr., 2013).

Simulirano kaljenje

Simulirano kaljenje opšta heuristika bazirana na principu lokalnog pretraživanja koja je inspirisana simulacijom procesa fizičkog hlađenja (kaljenja) rastopljenog materijala, a kombinuje princip determinističke metode spuštanja sa probablističkim Monte Karlo pristupom. U svakoj od iteracija ova heuristika generiše nekog suseda iz okoline trenutne tačke (na slučajan način), i prihvata ga kao sledeću tačku pretraživanja. Ovaj proces se obavlja i u slučaju poboljšanja i u slučaju pogoršanja vrednosti funkcije cilja. Osnove ove metode dali su autori u (Kirkpatrick i dr., 1983).

Algoritam metode može se prikazati na sledeći način:

Inicijalizacija. Izabрати početno rešenje $x_1 \in X$

$$x^* = x_1, f^* = f(x_1).$$

Iterativni korak. Za $n = 1, 2, \dots$

Naći na slučajan način neko x iz okoline $N(x_n)$ trenutnog rešenja x_n .

Ako $f(x) \leq f(x_n)$, tada $x_{n+1} = x$.

Ako $f(x) < f^*$, tada $x^* = x$ i $f^* = f(x)$.

Ako $f(x) > f(x_n)$, izabрати slučajan broj p uniforman na $[0,1]$.

Ako $p \leq p_n$, tada $x_{n+1} = x$.

Ako $p > p_n$, tada $x_{n+1} = x_n$.

Kraj. Ako je zadovoljen kriterijum zaustavljanja, staje se, a x^* se uzima za aproksimaciju optimalnog rešenja.

Vrednost p_n je verovatnoća prihvatanja pogoršanja funkcije cilja u iteraciji n . Više o metodi videti u (Cvetković i dr., 1996; Krčevinac i dr., 2013; Toth i Vigo, 2001).

TABU pretraživanje

Osnovni koncept Tabu pretraživanja (*tabu search* TP) kao heurističke metodologije za rešavanje problema kombinatorne optimizacije predložen je u radu (Glover, 1986).

TP se bazira na principu lokalnog pretraživanja i koristi tzv. adaptivnu memoriju, tj. pamćenje nekih podataka o prethodnim fazama procesa pretraživanja. Ova memorija zatim utiče na izbor sledećih tačaka u procesu pretraživanja. Naime, u svakoj iteraciji n čuva se neka istorija H prethodnog pretraživanja. Okolina $N(x_n)$ trenutne tačke x_n se modifikuje (redukuje ili proširuje) u zavisnosti od istorije H i na taj način formira skup $N(x_n, H)$ svih kandidata za sledeću tačku pretraživanja x_{n+1} . Pošto ovaj skup ponekad može biti suviše veliki da bi se mogao efikasno pretražiti, bira se neki njegov manji podskup $N'(x_n)$. Sada se tačka x_{n+1} određuje kao najbolja u ovom podskupu u odnosu na funkciju cilja iz (3.73), tj. važi da je $f(x_{n+1}) \leq f(x)$ za svako $x \in N'(x_n)$. Pogodnim definisanjem $N(x_n, H)$ mogu se, kao kandidati za sledeću tačku pretraživanja, favorizovati oni susedi tačke x_n koji imaju ili nemaju karakteristike sadržane u istoriji H . Pošto se pomak u tačku x_{n+1} vrši i u slučaju kada je $f(x_{n+1}) \geq f(x_n)$ TP dozvoljava i uspinjuće pomake i tako izbegava zaglavljivanje u lokalnim minimumima.

Sumirajući prethodno izloženo, TP metoda se može u najopštijem obliku prikazati na sledeći način:

Inicijalizacija. Izabrati početno rešenje $x_1 \in X$; $x^* = x_1$, $f^* = f(x_1)$; Istorija H je prazna.

Iterativni korak. Za $n = 1, 2, \dots$

Definisati aktivnu okolinu $N(x_n, H)$ tačke x_n u odnosu na istoriju H .

Generisati podskup $N'(x_n) \subseteq N(x_n, H)$.

Odrediti x_{n+1} minimizacijom funkcije $f(x)$ na $N'(x_n)$.

Ako $f(x_{n+1}) < f(x^*)$, tada $x^* = x_{n+1}$ i $f^* = f(x_{n+1})$.

Ažurirati istoriju H .

Kraj. Ako je ispunjen kriterijum zaustavljanja, staje se, a x^* se uzima za aproksimaciju optimalnog rešenja.

Najvažniji deo TP metodologije predstavlja definisanje odgovarajuće adaptivne memorije, tj. načina formiranja i ažuriranja istorije H . U osnovnoj verziji TP koristi se samo kratkoročna memorija kod koje u svakoj iteraciji H pamti karakteristike tačaka generisanih u neposrednoj prošlosti. Takvo H se formalno definiše uvođenjem pojma tzv. tabu liste. Tabu lista T dužine L predstavlja listu koja sadrži jednu ili više izabranih karakteristika (nazvanih atributima) od zadnjih L neposredno izvedenih pomaka ili njima odgovarajućih obrnutih pomaka. Više o metodi videti u (Cvetković i dr., 1996; Krčevinac i dr., 2013; Toth i Vigo, 2001).

Metoda promenljivih okolina

Metoda promenljivih okolina (*Variable neighborhood search* - VNS) spada u jednu od novijih heurističkih metodologija za rešavanje problema (3.47) (Hansen i Mladenović, 2001). Ova metoda se bazira na principu lokalnog pretraživanja pri čemu se u svakoj iteraciji može vršiti sistematsko prestrukturiranje okoline trenutne tačke, kako bi se pronašla sledeća tačka. Naime, ova metodologija polazi od konačnog niza $N_1, N_2, \dots, N_{k_{\max}}$ unapred zadatih struktura (tipova) okolina. Svaka od ovih struktura N_k definiše okolinu $N_k(x)$ neke dopustive tačke x iz X . U svakoj iteraciji n generiše se tačka x_{n+1} koja je bolja od trenutne tačke x_n i to na sledeći način:

Prvo se u okolini $N_1(x_n)$ slučajno bira jedna tačka x' koja se, zatim, "poboljšava" primenom neke metode spuštanja (Krčevinac i dr., 2013). Ta metoda, polazeći od x' , tokom lokalnog pretraživanja dozvoljava samo silazeće pomake, pa se zato zaustavlja u nekom

lokalnom minimumu x'' . Ako je x'' bolje od x_n , ono predstavlja x_{n+1} . U suprotnom, ovaj proces se ponavlja u okolini $N_2(x_n)$ i, po potrebi, nadalje prema redosledu tipova okolina, sve dok se u nekoj okolini ne nađe bolja tačka koja se uzima za x_{n+1} . Ako ni u jednoj od k_{\max} okolina ovakva tačka nije nađena, čitav ovaj ciklus pretraživanja se ponavlja, počevši opet od $N_1(x_n)$.

Osnovna verzija MPO pristupa može se u opštem slučaju formalnije prikazati u obliku:

Inicijalizacija. Izabrati početno rešenje $x_1 \in X$.

Iterativni korak. Za $n = 1, 2, \dots$

- Postaviti $k = 1$.
- Sve dok je $k \leq k_{\max}$ ponavljati sledeće korake:
- Generisati na slučajan način neko x' iz $N_k(x_n)$.
- Polazeći od x' primeniti neku metodu spuštanja i označiti sa x'' tako dobijeni lokalni minimum.
- Ako je $f(x'') < f(x_n)$, tada $x_{n+1} = x''$ i ide se na sledeći iterativni korak $n+1$
- Ako je $f(x'') \geq f(x_n)$, tada
 - za $k = k_{\max}$, postaviti $k = 1$;
 - za $k < k_{\max}$ postaviti $k = k + 1$.

Kraj. Ako je ispunjen kriterijum zaustavljanja staje se, a x_n se uzima za aproksimaciju optimalnog rešenja.

Iako metoda promenljivih okolina dozvoljava, tokom svojih iteracija, prelasku samo u bolje tačke, kontrolisano korišćenje različitih tipova okolina trenutne tačke omogućava izbegavanje zaglavljivanja u lokalnim minimumima, kao i diverzifikaciju, tj. globalno širenje pretraživanja na nove oblasti prostora X . Ova faza diverzifikacije se, u svakoj iteraciji, smenjuje sa fazom intenzifikacije u kojoj se vrši lokalno poboljšanje slučajno izabrane tačke x' , pri čemu se pretraživanje ograničava na manji deo prostora x' koji sadrži neki lokalni minimum problema.

Kriterijum zaustavljanja kod ove metode može da ima različite oblike: metoda se zaustavlja ako njeno ukupno vreme izvršenja prelazi maksimalno dozvoljeno vreme, ili ako je ukupan broj iterativnih koraka metode veći od zadate vrednosti, itd.

Genetski algoritmi

Prve ideje o genetskim algoritmima javile su se 70-ih godina prošlog veka u okviru tzv. teorije adaptivnih sistema. U teoriji adaptivnih sistema proučavaju se modeli efikasnog adaptivnog ponašanja nekih bioloških sistema. Genetski algoritmi su prvobitno kreirani da simuliraju proces genetske evolucije jedne populacije jedinki, a uključujući dejstvo okruženja i genetske operatore. U ovom procesu je svaka jedinka okarakterisana hromozomom koji predstavlja njen genetski kôd. Primenom genetskih operatora na hromosome jedinki iz populacije koje su (u većoj meri) prilagođene okruženju te jedinke se dalje međusobno reprodukuju. Na taj način stvara se nova generacija jedinki koja je prilagođenija od prethodne generacije. Prosečna prilagođenost članova populacije se povećava iz generacije u generaciju ponavljanjem opisanog procesa (Cvetković i dr., 1996, Krčevinac i dr., 2013).

Genetski algoritmi se mogu koristiti za optimizaciju nelinearnih funkcija, i kao opšta heuristička metodologija za rešavanje problema (3.47).

Tako primenjen genetski algoritam (GA) se, s obzirom da koristi analogiju sa genetskim sistemima, dosta razlikuje od prethodno opisanih opštih heuristika, a bazira se na sledećim principima: U prostoru dopustivih rešenja X svakom rešenju problema dodeljuje se, na tačno definisani način, jedan niz konačne dužine nad nekom konačnom azbukom simbola koji se naziva kôd ovog rešenja. Formirani skup kodova svih dopustivih rešenja iz X predstavlja prostor tih kodiranih rešenja \bar{X} . Sada GA pretraživanjem generiše tačke, ne direktno u prostoru X , već u prostoru kodiranih rešenja \bar{X} . Populacija kod GA je generisan skup više tačaka iz \bar{X} (u svakoj iteraciji), na način što tumači neko rešenje iz X kao jedinku, a kôd te jedinke je njen hromozom. Naime, u nekoj iteraciji n razmatra se trenutna populacija $P_n = \{x_1^n, \dots, x_N^n\}$, $x_i^n \in \bar{X}$, $i = 1, \dots, N$, gde je N zadati broj tačaka populacije. Za svaku tačku $x_i^n \in P_n$ određuje se njena "pogodnost" $F(x_i^n)$, gde je F tzv. funkcija pogodnosti definisana kao $F: \bar{X} \rightarrow R$. Pogodnost neke tačke iz trenutne populacije analogna je meri prilagođenosti odgovarajuće jedinke trenutnom stanju okruženja. Najčešće je, za svako $x \in \bar{X}$, $F(x) = -f(d(x))$, gde je f funkcija cilja problema (3.47), a $d(x)$ dekodirana vrednost od x , tj. ono rešenje iz X čiji je kôd jednak x . Sada se slučajno biraju one tačke iz P_n koje imaju veću pogodnost, pa se na njih na slučajan način deluje operatorima. Operatori su definisani po uzoru na genetske operatore u biološkim sistemima i na taj način se generiše nova populacija $P_{n+1} = \{x_1^{n+1}, \dots, x_N^{n+1}\}$ koja predstavlja sledeću generaciju u procesu pretraživanja.

Procedura genetskih algoritama se može u najopštijem obliku preciznije prikazati na sledeći način (Krčevinac i dr., 2013):

Inicijalizacija.

- Definisati prostor kodiranih rešenja \bar{X} i funkciju pogodnosti $F(x)$.
- Izabrati početnu populaciju $P_1 = \{x_1^1, \dots, x_N^1\} \subseteq \bar{X}$.
- $f^* = \min \{f(d(x_i^1)), i = 1, \dots, N\}$, $x^* = \arg f^*$.

Iterativni korak. Za $n = 1, 2, \dots$

- Odrediti pogodnost $F(x)$ za svaku tačku x_i^n , $i = 1, \dots, N$ iz trenutne populacije P_n .
- Generisati $P_{n+1} = \{x_1^{n+1}, \dots, x_N^{n+1}\} \subseteq \bar{X}$ slučajnim delovanjem genetskih operatora za slučajno izabrane tačke iz P_n koje imaju veću pogodnost.
- $f_{\min} = \min \{f(d(x_i^{n+1})), i = 1, \dots, N\}$.

Ako $f_{\min} < f^*$, tada $f^* = f_{\min}$ i $x^* = \arg f_{\min}$.

Kraj. Ako je ispunjen uslov zaustavljanja staje se, a x^* se uzima za aproksimaciju optimalnog rešenja.

Za rešavanje postavljenog problema tretiranja poljoprivrednog zemljišta u doktorskoj disertaciji korišće se heuristički pristup.

4. DEA METODA - OSNOVNI KONCEPTI I MODELI

Efikasnost se meri kao odnos ulaza i izlaza:

$$Efikasnost = \frac{izlaz}{ulaz}$$

t.j., ostvarivanje što većih rezultata (izlaza) uz što manje ulaganje (ulaze).

U realnim sistemima najčešće imamo slučaj da se proizvodi više raznorodnih proizvoda (izlaza) uz učešće više raznorodnih sirovina (ulaza). Kada se pristupa merenju efikasnosti ovih sistema, nemoguće je doneti zaključak o nivou uspešnosti, odnosno efikasnosti, na osnovu samo nekoliko (parcijalnih) pokazatelja. Farrell (1957) definiše meru tehničke efikasnosti (Farelova mera) koja dozvoljava uključivanje više ulaza (ili više izlaza) u analizu. Međutim, sve do razvoja DEA (*Data Envelopment Analysis*) metode (analiza obavljanja podataka) kao metodologije za procenu efikasnosti nije bilo moguće istovremeno uključiti više ulaza (odnosno više izlaza) u analizu.

Autori Charnes, Cooper i Rhodes (1978) definisali su osnovni model analize obavljanja podataka, koja je prvenstveno služila za merenje efikasnosti škola i bolnica (neprofitni sektor). Kasnije DEA metoda počinje da se koristi za merenje efikasnosti u svim oblastima gde se za proizvodnju koristi više ulaza, a kao izlaz se dobija više raznorodnih izlaza. Mera efikasnosti koja se dobije za jedinice odlučivanja (*DMU Decision Making Unit*) je relativna, jer se meri efikasnost svake jedinice u odnosu na ostale (sve jedinice odlučivanja u posmatranom skupu) i na taj način vrednost indeksa efikasnosti zavisi i od broja ulaza i njegove strukture, i od broja izlaza i strukture izlaza, a naravno i od broja samih jedinica odlučivanja.

Granica efikasnosti predstavlja (empirijski) maksimum izlaza koji je dobijen za svaku DMU i to korišćenjem postojećih ulaza ili (empirijski) minimum ulaza potreban za dobijanje postojećeg nivoa izlaza. Granica efikasnosti se ponaša kao obvojnica (*envelope*) za neefikasne jedinice i odatle potiče i naziv same metode. Zaključuje se da je DMU efikasna ako se nalazi na granici efikasnosti, u suprotnom je relativno neefikasna.

DEA metoda je primenjena veliki broj puta kao alat za upravljanje kako za kontrolu tako i za dijagnozu stanja (Yu i Chen, 2011).

Jedinica odlučivanja jeste efikasna ako su ispunjena sledeća dva uslova (Charnes i dr., 1994; Savić, 2012):

- može se povećati bilo koji izlaz jedinice odlučivanja, a da se istovremeno ne povećava niti jedan ulaz, a ne smanjuje se niti jedan od ostalih izlaza;
- može se smanjiti bilo koji ulaz jedinice odlučivanja, a da se istovremeno ne povećava niti jedan od ostalih ulaza, a ne smanjuje se niti jedan izlaz.

Osobine DEA metode (Charnes i dr., 1978) su da se kod ove metode određuje pojedinačna mera relativne efikasnosti za svaku jedinicu odlučivanja (DMU), sama analiza uključuje više ulaza i više izlaza, egzogene i kategorijske promenljive, kao i vrednosne ocene za parametar je moguće uključiti u analizu, rešenje su mere efikasnosti koje su Pareto optimalne, nije neophodno da se definišu a priori cene i težine za parametar, primenjeni kriterijumi pri ocenjivanju za svaku DMU su u potpunosti jednaki i ne zahteva se funkcionalna forma odnosa ulaz-izlaz.

4.1. DEA modeli

Osnovni DEA model dali su autori u radu (Charnes i dr., 1978), a kasnije su DEA modeli proširivani i modifikovani. Osnovni DEA model i njegova proširenja dati su u ovom poglavlju.

Kako bi se analiza uradila uspešno, potrebno je imati raspoložive podatke o svim vrednostima ulaza i izlaza za svaku jedinicu odlučivanja, a njihove vrednosti moraju biti pozitivne; analiza uključuje i interese samog analitičara; jedinice mere za parametre ulaza (ili izlaza) ne moraju biti jednorodne; indeks efikasnosti bi trebalo da poštuje princip da se teži smanjenju ulaza i povećanju izlaza. Navedene pretpostavke date su u (Cooper i dr., 2000).

4.1.1. Osnovni DEA model

Osnovni DEA model sa konstantnim prinosom (CCR DEA ratio model) na obim predložen je u radu (Charnes i dr., 1978).

Za svaku jedinicu odlučivanja DMU_k , $k=1, \dots, n$ rešava se sledeći model:

$$(Max) h_k = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (4.1)$$

p.o.

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.2)$$

$$u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (4.3)$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.4)$$

gde su:

- x_{ij} – posmatrani iznos ulaza i -te vrste za j -tu DMU ($x_{ij} > 0$);
- y_{rj} – posmatrani iznos izlaza r -te vrste za j -tu DMU ($y_{rj} > 0$);
- h_k – relativna efikasnost DMU $_k$;
- u_r – težinski koeficijent za r -ti izlaz;
- v_i – težinski koeficijent za i -ti ulaz (Martić i Savić, 2001).

U datom modelu (CCR DEA model) minimizira se relativna efikasnost (h_k) na taj način što se dodeljuje vrednost nepoznatim u_r i v_i . Pretpostavka je da je prinos na obim konstantan (CRS - *Constant Return to Scale*), a povećanje ulaza rezultuje povećanju izlaza koji je proporcionalan (Guan i Chen, 2012). DMU $_k$ je relativno efikasna ukoliko je indeks efikasnosti jednak 1. DMU $_k$ je relativno neefikasna ako je indeks efikasnosti h_k manji od 1. Indeks efikasnosti pokazuje za koliko DMU $_k$ treba da smanji svoje ulaze (u procentima) da bi ona postala efikasna (Savić, 2012).

Da bi se primenio CCR model neophodno je izabrati da li se maksimizira izlaz ili minimizira ulaz (Melo i dr., 2018).

Međusobno poređenje težinskih koeficijenata se ne preporučuje, zato što su vrednosti težina izračunate na osnovu skale gde su date mere vrednosti ulaza i izlaza. Vrednosti težinskih koeficijenata bi trebalo da zadovolje uslov da je za svaku DMU odnos težinske sume izlaza i težinske sume ulaza manji ili jednak od 1 (Savić, 2012). U DEA modelu sa konstantnim prinosom težinski koeficijenti mogu imati samo nenegativne vrednosti (4.3 i 4.4), a ova ograničenja mogu biti modifikovana tako što se dodeli mala pozitivna vrednost (ε) za donju granicu.

Model (4.1-.4.4) je nelinearan, i može se svesti na ekvivalentan linearni model (4.5-4.9) pomoću Charnes-Cooper-ovih transformacija (Cooper i dr., 2000). U nastavku je dat transformisani model.

$$(Max) h_k = \sum_{r=1}^s u_r y_{rk} \quad (4.5)$$

p.o.

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1 \quad (4.6)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (4.7)$$

$$u_r \geq \varepsilon, \quad r=1, 2, \dots, s \quad (4.8)$$

$$v_i \geq \varepsilon, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (4.9)$$

U modelu (4.5-4.9) maksimizira se virtuelni izlaz za DMU_k, a virtuelni ulaz je istovremeno jednak 1 (Savić, 2012). U istraživanjima je neophodno i analizirati rešenje dualnog DEA modela radi tumačenja vrednosti dualnih težina λ , a dualni CCR model glasi:

$$(Min) Z_k - \varepsilon \left(\sum_{r=1}^s s_r^+ + \sum_{i=1}^m s_i^- \right) \quad (4.10)$$

p.o.

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot y_{rj} - s_r^+ = y_{rk}, \quad r=1, 2, \dots, s \quad (4.11)$$

$$Z_k \cdot x_{ik} - \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} - s_i^- = 0, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (4.12)$$

$$\lambda_j, s_r^+, s_i^- \geq 0; \quad j=1, 2, \dots, n, \quad r=1, 2, \dots, s, \quad i=1, 2, \dots, m, \quad Z_k \text{ -neograničeno} \quad (4.13)$$

gde su:

- Z_k - faktor intenziteta - pokazuje na koji nivo je potrebno da DMU_k smanji sve izlaze (proporcionalno) da bi postala efikasna;
- s_i^- i s_r^+ – dopunske promenljive - pokazuju za koliko je moguće da se za DMU_k smanji i -ti ulaz i poveća r -ti izlaz (za svaki pojedinačno) da bi DMU_k postala efikasna;

- λ_j – dualna težina - pokazuje važnost koja je dodeljena DMU_j pri formiranju kompozitne jedinice na granici efikasnosti;
- ε – mali pozitivni broj.

Ako je DMU_k angažovala minimum ulaza, tada faktor inteziteta Z_k ima vrednost 1 i samo λ_k ima pozitivnu vrednost (od svih λ_j ($j= 1, 2, \dots, n$), a u suprotnom, DMU_k nije efikasna. Faktor intenziteta pokazuje da bi DMU_k bila efikasna, trebalo bi da smanji sve ulaze (proporcionalno za $(1 - Z_k) * 100\%$), a da pri tom zadrži postojeći nivo izlaza.

Ograničenja (4.12) pokazuju da se ili smanjivanjem vrednosti Z_k ili povećanjem vrednosti s_i^- može postići smanjivanje ulaznih faktora k -te DMU.

DMU_k je potpuno efikasna (*full efficiency*), ako i samo ako, su za optimalno rešenje ($\lambda^*, s^{+*}, s^{-*}, Z_k^*$) modela (4.10-4.13) ispunjeni sledeći uslovi:

$$Z_k^* = 1 \quad (4.14)$$

$$s^{+*} = s^{-*} = 0 \quad (4.15)$$

Uslov 4.14 se odnosi na radijalnu meru efikasnosti (često tehnička efikasnost). Ako je $Z_k^* = 1$, a neka od dopunskih promenljivih ima pozitivnu vrednost, DMU_k je granična tačka, ali nije efikasna, t.j. DMU_k je “slabo efikasna” (*weak efficiency*). Samo ako u optimalnom rešenju dualnog DEA modela postoji $(m + s - 1)$ pozitivna dualna težina λ_j tada je neka neefikasna DMU potpuno obavijena (Martić, 1999).

Optimalno rešenje modela (4.10-4.13) koristi se za određivanje ciljane vrednosti za DMU:

$$X_k' = Z_k^* X_k - s^{-*}, i = 1, 2, K, m \quad (4.16)$$

$$Y_k'' = Y_k^* + s^{+*}, i = 1, 2, K, s \quad (4.17)$$

gde su

- X_k' – m -dimenzioni vektor ulaza;
- Y_k'' – s -dimenzioni vektor izlaza.

gde su X_k'' i Y_k'' su vektori ciljanih vrednosti ulaza i izlaza za k -tu jedinicu odlučivanja kako bi ona bila efikasna.

Procenjeni iznos neefikasnosti r -tog izlaza dat je razlikom $\Delta X_k = X_k - X_k''$, a procenjeni iznos neefikasnosti i -tog ulaza dat je razlikom $\Delta Y_k = Y_k'' - X_k$. Da bi neefikasna DMU_k postala efikasna, datim razlikama se direktno može izračunati koliko bi bilo potrebno promeniti ulaze i/ili izlaze.

4.2. Implementacija DEA metode

Implementacija metode analize obavljanja podataka može se podeliti u četiri osnovne faze: (1) izbor jedinica o kojima se odlučuje; (2) izbor ulaza i izlaza; (3) rešavanje DEA modela i (4) analiza i tumačenje rešenja (Martić, 1999). Autori u radu (Emrouznejad i Witte, 2010) definišu tzv. Kuperov unificirani proces za neparamatarske projekte (*COOPER framework*) kojim je osnovni postupak implementacije DEA metode podeljen na 6 faza (Savić, 2012):

1. Definicija koncepata i ciljeva;
2. Strukturiranje podataka;
3. Izbor modela;
4. Upoređivanje performansi;
5. Evaluacija i
6. Rezultati i primena rezultata.

Prve dve faze pretpostavljaju dobru pripremu za ocenu efikasnosti, a odnose se na definisanje ciljeva analize i razumevanje načina na koji se donose odluke.

Da bi se DEA metoda uspešno primenila i dala rezultate koji će pomoći da se unapredi poslovni proces, potrebno je, na prvom mestu, dobro definisati ciljeve i strukturirati podatke koji su neophodni za primenu metode. Tek nakon pripreme podataka, izvrši se izbor adekvatnog modela za procenu efikasnosti, a u okviru ove faze, definišu se svi ulazi i svi izlazi. Nakon primene modela nad realnim podacima, potrebno je pripremiti i izveštaje koji će na razumljiv način pomoći donosiocima odluke da unaprede svoje poslovanje.

5. OPTIMIZACIJA RUTA U TRETIRANJU POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA

5.1. Opis problema obrade poljoprivrednog zemljišta korišćenjem poljoprivredne avijacije

Zemljište je podeljeno na parcele na kojima je potrebno izvršiti operaciju tretiranja hemikalijama primenom poljoprivredne avijacije. Pretpostavke pri rešavanju ovakvog problema su:

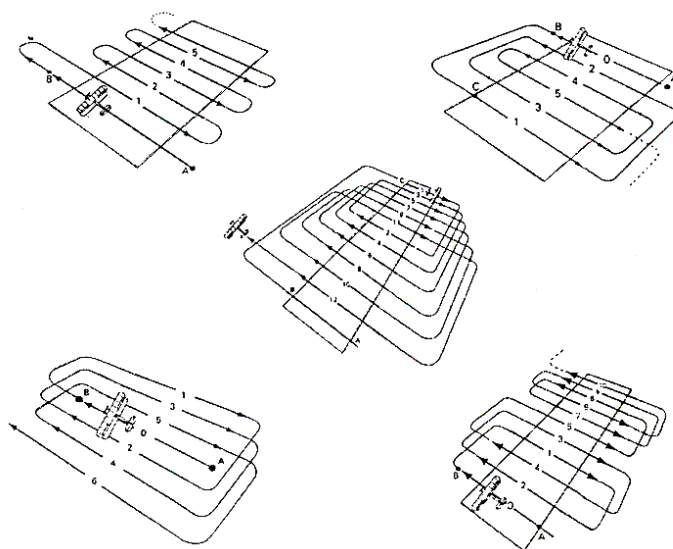
1. Poznat je broj i površina parcela koje je potrebno obraditi;
2. Flota poljoprivrednih aviona je raznorodna (raspolože se sa avionima različitih kapaciteta i nosivosti);
3. Postoji više potencijalnih letelišta koja se mogu koristiti za uzletanje i sletanje aviona;
4. Postoji više ulazno/izlaznih pozicija aviona za svaku parcelu.

Rešenje problema ovog tipa potrebno je da da odgovor na sledeća istraživačka pitanja:

- *Koja letelišta će se koristiti – biti aktivna i koje parcele će se obrađivati sa kog letelišta?*
- *Ako je avion takve nosivosti da se jednim preletom može obraditi više parcela, na koji način će avion obići ove parcele?*

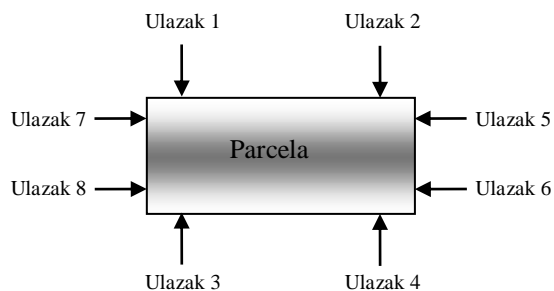
Ovako definisan zadatak pripada klasi lokacijsko-alokacijskih problema, ali u kombinaciji sa određivanjem optimalnih ruta. Ovakvi problemi su do sada izučavani u literaturi (Ghani i dr., 2015; Nambiar i dr., 1981). U radu (Andrić Gušavac i dr., 2013) je primenjen jednostavan lokacijski model na primeru poljoprivrednog gazdinstva podeljenog na 256 parcela sa devet potencijalnih lokacija za letelišta. Autori su dali lokacijsko-alokacijsko rešenje za sve parcele, a u radu (Andrić Gušavac i dr., 2014b) primenjen je jednostavan lokacijski model sa ograničenim kapacitetom letelišta i data su uporedna rešenja primene modela iz oba objavljena rada (Andrić Gušavac i dr., 2013; Andrić Gušavac i dr., 2014b). Međutim, u ovim radovima ne uzima se u obzir kapacitet aviona, tako da se kao rešenje dobija samo lokacija letelišta i alokacija parcela letelištima. Nedostatak je što se pretpostavlja da se jedna parcela može obrađivati sa više letelišta. Postoje situacije kada parcele koje je potrebno obraditi nisu locirane jedna pored druge i ako preostane neobrađen mali deo jedne parcele avion bi morao da jedan let utroši samo radi obrade tog neobrađenog dela.

Još jedna specifičnost posmatranog problema koja nije uzeta u obzir u radovima (Andrić Gušavac i dr., 2013; Andrić Gušavac i dr., 2014b) jeste način obrade samih parcela. Na slici 5.1 je prikazano nekoliko načina kretanja poljoprivrednih aviona pri obradi parcela (Jakovljević, 2006).



Slika 5.1: Načini kretanja poljoprivrednih aviona pri radu (Jakovljević, 2006)

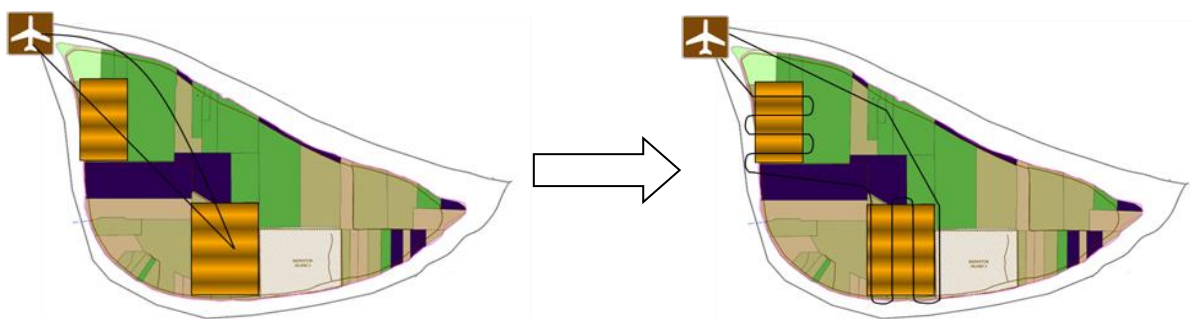
Obrada zemljišta (parcela) najčešće se u praksi vrši na način koji je prvi prikazan na slici 5.1. Pri ovakvom načinu obrade leti se najkraće pri zaokretima, a na taj način se i troši najmanje goriva čime se direktno smanjuju troškovi obrade. Na osnovu slike 5.1. uočavaju se dve ključne tačke pri obradi parcele – tačka ulaska aviona na parcelu i tačka izlaska aviona sa parcele. Položaj tačke izlaska aviona sa parcele je uslovljena odabirom tačke ulaska i vrstom aviona kojim se vrši obrada. Vrsta aviona određuje i širinu zahvata pri obradi i na taj način se, nakon definisane tačke ulaska na parcelu, može odrediti i tačka izlaska. Tačka izlaska aviona sa parcele bitna je zbog određivanja redosleda obrade parcela, odnosno sledeće parcele koju će isti avion obraditi. Na osnovu ovakvog načina kretanja aviona pri radu definisane su moguće tačke ulaska aviona na jednu parcelu pri njenoj obradi. Ulazne tačke aviona na parcelu određuju i sve varijante obrade te parcele kojih može biti više. Na primer, na slici 5.2 prikazan je slučaj kada može biti realizovano osam različitih preleta parcele.



Slika 5.2: Moguće tačke ulaska aviona pri obradi parcele koje definišu varijantu obrade parcele

Na osnovu određenih tačaka ulaska na parcelu i načina preleta same parcele možemo odrediti i tačku izlaska aviona sa date parcele. Ovi različiti načini preleta parcele i moguće tačke ulaska i izlaska sa parcele dodatno komplikuju problem.

Čak i pri najjednostavnijem slučaju sa slike 5.2, kada je potrebno obraditi samo jednu parcelu, broj varijanti preleta je osam. Kada se povećaju dimenzije problema uočava se da avion može obraditi više parcela ukoliko to kapaciteti aviona dozvoljavaju i ukoliko se nad tim parcelama vrši ista operacija obrade. Na slici 5.3 predstavljen je jednostavan problem obrade dve parcele sa jednog letelišta. Čak i pri ovakvom jednostavnom primeru vidi se da je broj načina obrade ove dve parcele jednim preletom sa već utvrđenog letelišta 64 ($8 \cdot 8 = 64$).



Slika 5.3: Problem obrade dve parcele u jednoj ruti

Da bi se jedno zemljište podeljeno na parcele efikasno obradilo uz pomoć avijacije, potrebno je odrediti:

- lokaciju letelišta koja će se koristiti za obradu,
- alokaciju parcela letelištima,
- varijante obrade za sve parcele,
- redosled obrade parcela (rutu) za svaki avion koji se koristi.

Kada se određuju lokacije za letelišta moguće su dve situacije: kada su potencijalne lokacije za neko zemljište već određene i potrebno je samo odabrati jednu ili više lokacija i kada je potrebno prvo odrediti potencijalne lokacije za letelišta. Za uspešno rešavanje problema odabira potencijalnih lokacija potrebno je uzeti u obzir puno faktora koji utiču na odabir, a u radu (Blackwell i dr., 2009) autori analiziraju rizike od sudara aviona sa divljim životinjama i prikazuju načine za premošćavanje ovih problema. Ova analiza je posebno značajna za odabir lokacije letelišta u nepristupačnim predelima. Moguća je i situacija da avion poleti sa jednog, a sleti na drugo letelište, pod uslovom da su ova letelišta sličnih karakteristika.

Problemi optimizacije tretiranja zemljišta hemikalijama na poljoprivrednom zemljištu mogu se formulirati kao optimizacioni problemi, npr. može se minimizirati ukupni trošak koji bi obuhvatao: fiksne troškove letelišta (koji treba da uključe i fiksne troškove angažovanja aviona i pilota) i varijabilne troškove utrošenog goriva i hemikalija.

Kao bitan faktor može se razmatrati i vreme za koje se mora realizovati tretiranje svih parcela. Različito je planiranje realizacije celokupnog posla ukoliko je raspoloživ samo jedan dan ili je na raspolaganju više dana, i to može da utiče i na broj letelišta i na broj aviona koje je potrebno angažovati.

5.2. Grafovski prikaz problema

Jedan ovako kompleksan problem je potrebno dobro analizirati i sagledati sve njegove specifičnosti kako bi se mogao rešiti. Grafovski prikaz problema daje izuzetno dobar uvid u sve njegove specifičnosti. U nastavku rada dat je opis grafa pridruženog opisanom problemu (Andric Gusavac i dr., 2019).

Dati su:

P - skup parcela;

A - skup aviona;

L - skup letelišta;

$V(p, a), p \in P, a \in A$ - skup varijanti tretiranja parcele p avionom a ($V(p, a)$). Svaka varijanta $V(p, a)$ je definisana izborom parcela $p \in P$, aviona $a \in A$ i tačkama ulaska aviona na parcelu.

Težinski graf $G = (N, E, D, B)$ je pridružen problemu na sledeći način:

Skup čvorova N , $|N| = |L| + \sum_{p \in P} \sum_{a \in A} |V(p, a)|$, definisan je na sledeći način:

- svako letelište $l \in L$ je predstavljeno čvorom u G ;
- za svaku parcelu $p \in P$ i za svaki avion $a \in A$ za koje je $V(p, a) \neq \emptyset$, svako $v \in V(p, a)$ je predstavljeno kao čvor u G .

Skup lukova E je definisan na sledeći način:

- za svako letelište $l \in L$ i svaku parcelu $p \in P$ i svaki avion $a \in A$ za koje $V(p, a) \neq \emptyset$, postoje lukovi (l, v) i (v, l) za svaki čvor $v \in V(p, a)$;
- za svake dve parcele $p_1, p_2 \in P$ i svaki avion $a \in A$ za koji $V(p_1, a) \neq \emptyset$ i $V(p_2, a) \neq \emptyset$, postoji luk (v_1, v_2) za svako v_1 i v_2 takav da $v_1 \in V(p_1, a)$ i $v_2 \in V(p_2, a)$ i postoji let aviona a sa parcele p_1 tretirane varijantom preleta v_1 do parcele p_2 tretirane varijantom preleta v_2 koji je tehnički moguć.

Skup težina čvorova D , $D = \{d_v: v \in N\}$

- svakom čvoru $v \in N \setminus L$, koji odgovara parceli $p \in P$ i avionu $a \in A$ (tj. $v \in V(p, a)$), pridružen je pozitivan broj - težina d_v koji predstavlja dužinu leta aviona a preko parcele p tretirane varijantom preleta v (u dužnim jedinicama mere);
- za svaki čvor $v \in L$, $d_v = 0$.

Skup težina lukova B , $B = \{b_{vw}, (v, w) \in E\}$

- svakom luku $(v, w) \in E$, gde $v \in L$ i $w \in V(p, a)$, pridružen je pozitivan broj - težina b_{vw} koji predstavlja dužinu leta (u dužnim jedinicama mere) aviona a sa letelišta v do parcele p tretirane varijantom w ;
- svakom luku $(v, w) \in E$, gde $v \in V(p, a)$ i $w \in L$, pridružen je pozitivan broj - težina b_{vw} i predstavlja dužinu leta (u dužnim jedinicama mere) aviona a od parcele p tretirane varijantom v do letelišta w ;
- svakom luku $(v, w) \in E$, gde $v \in V(p_1, a)$ i $w \in V(p_2, a)$, pridružen je pozitivan broj - težina b_{vw} koja predstavlja dužinu leta aviona a od parcele p_1 tretirane varijantom v do parcele p_2 tretirane varijantom w .

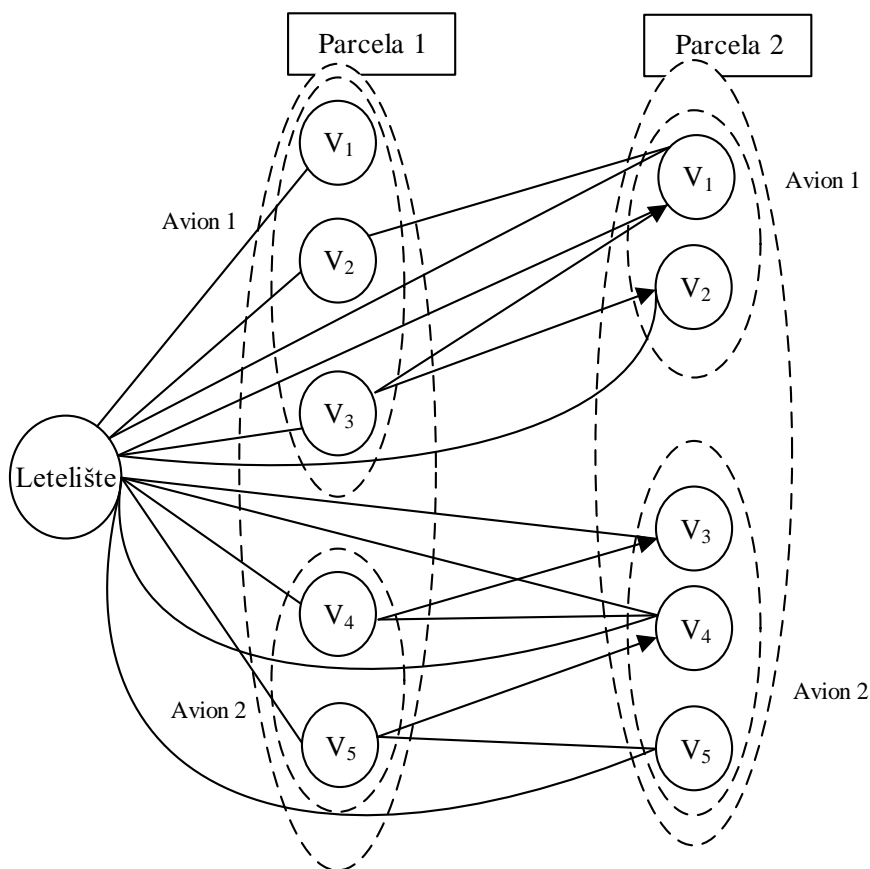
Da bi se definisani problem rešio, potrebno je:

Naći podskup A' skupa aviona A i familije kontura $F = \{C_a, a \in A' \subseteq A\}$ takve da:

- C_a je kontura (ciklus) u grafu G koja sadrži samo jedan čvor (koji predstavlja letelište) iz L ,
- za svako $a_1, a_2 \in A'$, konture C_{a_1} i C_{a_2} nemaju zajednički čvor (koji predstavlja parcelu) iz $N \setminus L$;

- za svaku parcelu $p \in P$ postoji samo jedan čvor iz $\cup_{a \in A} V(p, a)$ koji pripada konturi iz familije F ;
- za svako $a \in A'$, ukupna težina (u litrima) hemikalija koje su potrebne za tretiranje parcela koje pripadaju konturi C_a ne prekoračuje kapacitet rezervoara hemikalija aviona a ;
- za svako $a \in A'$ ukupna dužina rute (konture) C_a (određena kao suma težina njenih čvorova i lukova) potražuje količinu goriva (u litrima) koja ne prekoračuje kapacitet rezervoara za gorivo aviona a ;
- ukupni troškovi svih kontura familije F (ukupni troškovi aktivacije letelišta plus ukupni troškovi potrošenog goriva) su minimizovani.

Graf predstavljen na slici 5.4 prikazuje jedno letelište i dve parcele. Različite vrste aviona se mogu koristiti za tretiranje parcela, te se za svaku parcelu i za svaki avion (avioni se mogu razlikovati po kapacitetima i veličinama zahvata) mogu definisati različite varijante obrade parcela $V(p, a)$.



Slika 5.4: Grafovski prikaz problema (uključeno je jedno letelište) (prilagođeno iz Andric Gusavac i dr., 2019)

Sa grafa sa slike 5.4 može se uočiti da čvor v_1 (parcela 1) nije povezan ni sa jednim čvorom parcele 2, t.j., za avion 1 ne postoji let koji je moguć sa parcele 1 tretirane na način 2 do parcele 2 tretirane bilo kojim načinom. Sa druge strane, orijentisan luk (v_4, v_3) pokazuje da postoji let aviona 2 sa parcele 1 tretirane načinom 4 do parcele 2 tretirane načinom 3, ali ne i *vice versa*. Neorijentisan luk $\{v_4, v_4\}$ ukazuje da su tehnički mogući letovi aviona 2 između parcela 1 tretirane na način 4 i parcele 2 tretirane na način 4 u oba smera.

Različite vrste aviona se mogu koristiti za tretiranje parcela, te se za svaku parcelu i za svaki avion (avioni se mogu razlikovati po kapacitetima i veličinama zahvata) mogu definisati različite varijante obrade parcela. Jedan avion može obraditi jednu parcela na više načina (varijanti obrade).

Graf G može biti definisan u saradnji sa ekspertima i iskusnim pilotima, koji će, u skladu sa prethodno definisanim pravilima, odrediti koji letovi između parcela, t.j. između njihovim varijanti obrade su tehnički mogući. Na ovaj način se može smanjiti maksimalni broj lukova u grafu G kako bi graf odgovarao realnom problemu.

Grafofski prikaz problema dao je odličan uvid u sve specifičnosti problema i poslužio kao osnova za formulisanje heurističkog algoritma.

5.3. Specijalna heuristika za generisanje ruta pri tretiranju poljoprivrednog zemljišta

U nastavku je prikazana specijalna heuristika koja je konstruisana za rešavanje problema obrade zemljišta korišćenjem poljoprivredne avijacije, poštujući pri tome svojstva i specifičnosti ovog problema koji su prikazani u poglavlju 5.1, a formalizovani u poglavlju 5.2. Predstavljena heuristika je modifikacija dobro poznatog Klark-Rajtovog algoritma (Clarke i Wright, 1964) i prilagođena je opisanom problemu. Razvijena heuristika prikazana u nastavku urađena je pod pretpostavkama koje su date u poglavlju 5.2.

Da bi se jedno zemljište podeljeno na parcele efikasno obradilo uz pomoć avijacije, potrebno je odrediti (korišćene su oznake uvedene u poglavlju 5.2):

- letelišta $l \in L$ koja će se koristiti za obradu - koja letelišta se koriste za tretiranje zemljišta,
- alokaciju parcela $p \in P$ letelištima $l \in L$,
- varijante obrade $v \in V(p, a)$, $p \in P$, $a \in A$ za svaku parcelu,
- redosled obrade parcela (rutu) C_a za svaki avion $a \in A' \subseteq A$ koji se koristi.

Na taj način se određuje skup ruta sa minimalnim ukupnim troškovima (u ove troškove su uključeni ukupni troškovi aktivacije letelišta i ukupni troškovi potrošnje goriva), takvih da:

- svaka ruta $C_a, a \in A' \subseteq A$ počinje i završava se na istom letelištu $l \in L$ (mora se utvrditi i koja će letelišta biti korišćena - aktivirana);
- svaka parcela $p \in P$ mora biti opslužena samo jednim avionom $a \in A' \subseteq A$ kako bi se izbegla delimično zadovoljena potražnja;
- ukupna težina hemikalija isporučenih na ruti ne sme da bude veća od kapaciteta rezervoara za hemikalije dodeljenog aviona a ;
- ukupna težina goriva potrošenog na ruti ne sme da bude veća od kapaciteta rezervoara za gorivo dodeljenog aviona a ;
- svaka ruta C_a sadrži samo jedno letelište l ;
- svaka parcela p pripada samo jednoj ruti C_a (sa tačno određenom varijantom obrade) i na toj ruti se može pojaviti samo jednom (izbeći formiranje podkontura);
- jedan avion a dodeljen je samo jednoj ruti C_a i jedna ruta C_a može biti dodeljena samo jednom avionu a .

U nastavku je detaljno opisana formulisana heuristika (Andric Gusavac i dr., 2019).

Tabela 5.1: Specijalna heuristika za rešavanje problema obrade poljoprivrednog zemljišta korišćenjem poljoprivredne avijacije - algoritam

Faza I	
Pridruživanje parcela letelištima	
Korak 1.1	<p>Određivanje elementarnih ruta</p> <p>Za svako letelište $l \in L$, svaku parcelu $p \in P$ i svaki čvor koji odgovara toj parceli $v \in V(p, a)$, formirati elementarnu rutu koju odgovarajući avion a može da opsluži što se tiče kapaciteta goriva i hemikalija i izračunati njen trošak.</p> <p>Trošak elementarne rute izračunava se na sledeći način:</p> $s(b_{lv} + b_{vl} + d_v)g_a$, gde su: <ul style="list-style-type: none"> s - cena goriva [n.j./l], $b_{lv}, l \in L, v \in V(p, a)$ - dužina leta aviona od letelišta do parcele [jedinica dužine] $b_{vl}, v \in V(p, a), l \in L$ - dužina leta avioan od parcele do letelišta [jedinica dužine] $d_v, v \in V(p, a)$ - dužina leta aviona nad parcelom za vreme operacije tretiranja [jedinica dužine] $g_a, a \in A$ - potrošnja goriva [l/ jedinici dužine]

Korak 1.2	<p>Određivanje elementarnih ruta sa minimalnim troškovima po avionima</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Za svako letelište $l \in L$ i svaku parcelu $p \in P$, za svaki avion $a \in A$ koji može da obrađuje ovu parcelu među elementarnim rutama $v \subseteq V(p, a)$ koje odgovaraju čvorovima parcele za ovaj avion, naći onu $v_{ap} \in V(p, a)$ koja ima minimalni trošak. 2. Za svako letelište $l \in L$ i svaku parcelu $p \in P$, od svih izabranih elementarnih ruta v_{ap} kojima odgovaraju minimalni troškovi po avionima, naći onu $v_p \in V(p, a)$ koja ima maksimalni trošak.
Korak 1.3	<p>Dodela parcela letelištima</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Dodeliti parcelu onom letelištu za koje je ovaj maksimalni trošak minimalan.

Faza II

Formiranje ruta aviona za jedno letelište

Korak 2.1	<p>Određivanje trenutnog letelišta Kao trenutno letelište izabrati ono kome je dodeljen najveći broj parcela.</p>
Korak 2.2	<p>Formiranje početnog skupa elementarnih ruta Formirati skup S elementarnih ruta koje odgovaraju trenutnom letelištu. Skup S sadrži, za svaku dodeljenu parcelu p i svaki avion a ove parcele, elementarnu rutu koja odgovara onom čvoru parcele za onaj avion koji ima minimalni trošak.</p>
Korak 2.3	<p>Formiranje liste ušteta Za svaki par čvorova (q, r) za koji važi:</p> <ul style="list-style-type: none"> • čvorovi q i r pripadaju elementarnim rutama iz S kojima odgovaraju različite parcele; • čvorovima q i r odgovara isti avion; • postoji luk (q, r) u grafu mogućih letova, <p>formirati uštedu $a + b - e$, gde je a trošak leta od q do trenutnog letelišta, b trošak leta od trenutnog letelišta do r, a e trošak leta od q do r. Ako je $a + b - e > 0$, tada par (q, r) staviti na listu zajedno sa iznosom odgovarajuće uštede.</p>
Korak 2.4	<p>Sortiranje liste ušteta Sortirati elemente liste ušteta prema nerastućem iznosu uštede.</p>

Korak 2.5	<p>Formiranje ruta za avione za trenutno letelište</p> <p>Proći kroz celu sortiranu listu ušteda tretirajući trenutni par čvorova na sledeći način:</p> <p>Ako se trenutno razmatra par čvorova (q, r) sa liste kome odgovara avion a, tada su moguća dva slučaja:</p> <p><u>Slučaj 1</u></p> <p>Ako još nije formirana trenutna ruta za avion a, ispitati da li se spajanjem elementarnih ruta uz S koje odgovaraju čvorovima q i r dobija ruta koju avion a može da opsluži što se tiče kapaciteta goriva i hemikalija.</p> <p>Ako može, ove elementarne rute se spajaju u rutu koja predstavlja početnu rutu P_a za avion a. Zatim se eliminiše svaki sledeći par u listi ušteda koji:</p> <ul style="list-style-type: none"> - angažuje avion različit od aviona a, i - bar jedan čvor u paru angažuje parcelu koja odgovara čvorovima q ili r. <p>Zatim se prelazi na sledeći par u listi ušteda, ako postoji.</p> <p><u>Slučaj 2</u></p> <p>Neka postoji ranije formirana trenutna ruta P_a aviona a. Ako je trenutno razmatrani par oblika (w, f) ili (l, w), gde važi:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ni jedan čvor iz P_a ne odgovara parceli čvora w; - f je prvi čvor posle letelišta, a l zadnji čvor pre letelišta u ruti P_a, <p>tada ispitati da li se spajanjem elementarne rute čvora w iz S sa rutom P_a (preko f ili l) dobije ruta koju avion a može da opsluži u odnosu na kapacitete goriva i hemikalija.</p> <p>Ako može, ovo spajanje se vrši i predstavlja novo P_a. Zatim se eliminiše svaki sledeći par u listi ušteda koji angažuje avion različit od a i bar jednom njegovom čvoru odgovara parcela čvora w.</p> <p>Zatim se prelazi na sledeći par u listi ušteda ako postoji.</p>
Korak 2.6	<p>Formiranje konačnih ruta za avione za trenutno letelište</p> <p>Posle prolaska kroz kompletnu listu ušteda rute P_a se smatraju konačnim rutama za avione a.</p> <p>Skup S elementarnih ruta se ažurira na sledeći način:</p> <ul style="list-style-type: none"> - za svaku parcelu čiji se čvor javlja u nekoj konačnoj ruti P_a, izbrisati iz S sve elementarne rute koje joj odgovaraju; - za svaki avion a koji ima konačnu rutu P_a, izbrisati iz S sve elementarne rute kojima odgovara ovaj avion. <p>Ako je posle ažuriranja skup S neprazan, onda formirati konačne rute za neke od aviona za koje u koraku 2.6 nisu formirane konačne rute, i to sledećom procedurom:</p> <ul style="list-style-type: none"> - U skupu s izabrati elementarnu rutu koja ima minimalan trošak, pri čemu ovoj ruti odgovara parcela p' i avion a'. Ova ruta predstavlja konačnu rutu $P_{a'}$ aviona a'. Zatim iz skupa S izbrisati sve elementarne rute koje odgovaraju parceli p' ili avionu a'. <p>Ovu proceduru ponoviti sve dok skup S ne postane prazan.</p>

Faza III

Generisanje ruta aviona po svim letelištima

Ako su sva tri prethodna skupa neprazna, ide se na Korak 1.3.

Ako je bar jedan od njih prazan skup, tokom algoritma formirane konačne rute P_a aviona a predstavljaju približno rešenje problema i algoritam staje.

Ako je skup svih netretiranih parcela prazan, ovim rutama su opslužene sve parcele i ovo rešenje je dopustivo.

Ako je skup svih aviona koji su neiskorišćeni prazan ili su formirane rute za sva letelišta, može se desiti da dobijeno rešenje nije dopustivo, t.j. postoje neke parcele koje nisu opslužene.

Kako bi se ispitala efikasnost specijalne heuristike korišćena je platforma JetBrains Platform (JetBrains, 2018) (ova platforma se najviše koristi za programiranje u programskom jeziku Python) i kodirano je u jeziku Python (verzija 3.5). Python kod za prikazanu specijalnu heuristiku dat je u Prilogu 1.

5.4. Numerički eksperimenti sa realnim podacima

Kako bi se testirala formulisana heuristika, izabran je realni primer jednog isparcelisanog poljoprivrednog zemljišta. Mapa ovog zemljišta prikazana je na slici 5.5. Zemljište prikazano na mapi podeljeno je na 245 parcela, a postoji sedam lokacija za letelišta. Prikupljanje podataka za ovo isparcelisao zemljište urađeni je tako što su sa mape izračunate sve četiri koordinate svake parcele i koordinate svih letelišta. Ovi podaci složeni su u MS Excel tabelu, a deo te tabele prikazan je u prilogu 2. Koordinate su date u obliku para (x,y) . Koordinate parcele koriste se kao koordinate tačaka ulaska i izlaska aviona sa parcele (prikaz tačaka ulaska i izlaska za jednu parcelu videti na slici 5.2). Za sva letelišta data je samo jedna koordinata (takođe u obliku uređenog para), zanemaruje se dužina zemljišta sa kog se uzleće, jer je to veoma mala dužina za let aviona, tako da ne bi uticala na troškove. Za svaku parcelu izračunata je ukupna dužina (što ujedno prestavlja i dužinu leta aviona pri tretiranju parcele), kao i potražnja za hemikalijama kojima se parcela tretira.

Postoje četiri tipa aviona (razlikuju se po kapacitetu rezervoara za gorivo i po tipu aviona) koji se koriste za tretiranje. Pošto je jedan avion vezan za jednu rutu i nemoguće je obraditi svih 245 parcela sa malim brojem aviona, pripremljeni su podaci za 40 aviona. Moguće je

uneti bilo koji kapacitet za svaki od ovih aviona kao ulazni podatak i sa tim podacima rešavati problem. Za svaki avion u Excel fajlu dati su sledeći podaci: oznaka aviona, kapacitet rezervoara za gorivo i kapacitet rezervoara za hemikalije (videti prilog 2).

Određivanje elementarnih ruta sa minimalnim troškovima po avionima, kao i dodela parcela letelištima u skladu sa kriterijumom definisanim u fazi I heuristike urađeno je takođe u MS Excel-u. U tabeli 5.2 dat je deo Excel tabele gde su izračunata rastojanja od svih varijanti svake parcele do svih potencijalno aktivnih letelišta. Dimenzije problema koji se rešava direktno utiču i na dimenzije ulaznih podataka, a kompletna *Excel* tabela sa pomenutim rastojanjima može izračunati na sledeći način:

$$\text{Broj parcela} * \text{Broj letelišta} * \text{Broj varijanti obrade}$$

U slučaju rešavanja problema sa 245 parcela i tri letelišta dimenzija *Excel* tabele sa ulaznim podacima je $245 * 12$, tako da je, kao ilustracija, u slučaju primera sa četiri parcele i dva letelišta, prikazan samo deo tabele sa izračunatim rastojanjima (tabela 5.2.). Ovi proračuni su urađeni za svaki tip aviona, tako da se broj *Excel sheet*-ova sa svim ulaznim podacima neophodnim za rešavanje problema množi i sa brojem aviona.

Tabela 5.2: Proračuni rastojanja od svakog letelišta do svih varijanti obrade svake parcele

Oznaka parcela	LETELISTE 1				LETELISTE 2			
	Varijanta 1	Varijanta 2	Varijanta 3	Varijanta 4	Varijanta 1	Varijanta 2	Varijanta 3	Varijanta 4
C1	17.28	19.55	17.42	19.46	12.25	14.59	12.45	14.49
C2	18.82	19.75	19.09	20.13	13.42	14.50	13.83	15.16
C3	19.21	20.13	19.30	20.53	13.70	14.65	13.85	15.40
C4	19.78	20.82	19.89	21.20	14.12	15.27	14.32	16.01
...

Dodela parcela letelištima urađena je takođe u MS Excel-u, na osnovu zadatog kriterijuma automatski se parcela sa određenom varijantom dodeljuje letelištu. Primer dela Excel tabele sa dodelom prikazana je u tabeli 5.3.

Tabela 5.3: Konačna dodela parcele sa određenom varijantom obrade letelištu

Ukupan trošak	Parcela	Varijanta	Leteliste
92.97	C1	Varijanta 1	LETELISTE 1
106.15	C2	Varijanta 1	LETELISTE 1
107.81	C3	Varijanta 1	LETELISTE 1
115.86	C4	Varijanta 1	LETELISTE 1
...

Pošto se ulazni podaci vezani za parcele razlikuju u zavisnosti od tipa aviona kojim se vrši tretiranje, u MS Excel fajlu kreirani su posebni *sheet*-ovi sa podacima o parcelama za svaki tip aviona: oznaka parcele, koordinate parcela tačaka ulaska i tačaka izlaska sa parcele (ove tačke definišu varijante obrade), ukupna dužina svake parcele i potražnja za hemikalijama svake parcele.

Pripremljene su instance sa realnim podacima sledećih dimenzija: 245 parcela, četiri varijante obrade za svaku parcelu i sedam potencijalnih lokacija za letelišta. Ulazni podaci su pripremljeni (videti prilog 2) u MS Excel-u i sređeni u formatu kakav je potreban kao ulaz za programiranu heuristiku. Na osnovu koordinata parcela, u okviru programirane heuristike u Python-u, izračunavaju su razdaljine (upotrebljena je Euklidska metrika) između svake dve koordinate parcela, odnosno između svake dve varijante obrade za svaki par parcela.

Korišćeno je do 40 aviona za eksperimente, a njihovi kapaciteti dati su u tabeli 5.4.

Tabela 5.4: Kapaciteti aviona korišćeni u eksperimentima kod heuristike I deo (prilagođeno iz Andric Gusavac i dr., 2019)

Avion	A1, A4, A5, A8, A9, A12, A13, A16, A17, A20, A21, A24, A25, A28, A29, A32, A33, A36, A37, A40	A2, A6, A10, A14, A18, A22, A26, A30, A34, A38	A3, A7, A11, A15, A19, A23, A27, A31, A35, A39
Kapacitet rezervoara za gorivo	250	200	150

Za rešavanje instanci čije su dimenzije i rešenja prikazani u tabelama 5.6 i 5.7 korišćeni su avioni kapaciteta prikazanih u tabeli 5.5

Tabela 5.5: Kapaciteti aviona korišćeni u eksperimentima kod heuristike II deo (Andric Gusavac i dr., 2019)

Oznaka aviona	Kapacitet rezervoara za gorivo (l) (korišćeni za eksperimente predstavljene u tabeli 5.6)	Kapacitet rezervoara za gorivo (l) (korišćeni za eksperimente predstavljene u tabeli 5.7)
A1	250	50
A2	200	60
A3	150	70
A4	250	60

Podaci koji su korišćeni za eksperimente su iz realnog primera jedne kompanije u čijem vlasništvu je isparcelisano poljoprivredno zemljište. Na slici 5.5 je data mapa ovog zemljišta

sa ucrtanim parcelama i letelištima. Letelišta su na mapi označena krugovima (postoji devet letelišta), a parcele su ograničene linijama. Parcele su podeljene u četiri grupe (oznake C, B, V i M), a unutar svake parcele je upisan broj. Na ovaj način je svaka parcela dobila jedinstvenu oznaku koja se sastoji od jednog slova i dodeljenog broja.



Slika 5.5: Mapa zemljišta sa ucrtanim parcelama i letelištima (prilagođeno od strane autora na originalnoj mapi zemljišta)

Ovaj realan primer je korišćen za testiranje formulisane specijalne heuristike. Formulisana specijalna heuristika je dala rešenje – plan obrade za maksimalne dimenzije ovog realnog problema od 245 parcela, a formulisane su 4 varijante obrade i korišćeno je do 40 aviona. Izvršeno je više stotina eksperimenata, a u nastavku su izdvojeni neki rezultati za karakteristične instance.

Izabrane su četiri instance čije su karakteristike (broj parcela, broj varijanti obrade, broj aviona i broj letelišta) prikazane u tabeli 5.6. Ove instance su izabrane zbog malih dimenzija kako bi prikaz rezultata bio pregledan. U istoj tabeli data su i rešenja – rute $L-P_{ij}-L$, gde L označava letelište sa kog se poleće i na koje sleće avion nakon tretiranja parcela na ruti, parcele su označene sa P_{ij} , gde i označava broj parcele, a j označava varijantu obrade te parcele. Kod ovih instanci planovi obrade se dobijaju tako da se sve parcele mogu obraditi u jednoj ili dve rute, što znači da su potrebni jedan ili dva aviona, baš zbog dovoljnog

kapaciteta aviona. Kapaciteti aviona A1, A2, A3 i A4 koji su korišćeni u eksperimentima čiji su rezultati prikazani u tabeli 5.6 su: 250, 200, 150 i 250 respektivno.

Radi daljeg testiranja pretpostavljeni su (fiktivni) manji kapaciteti za avione, a rešavane su instance istih dimenzija kao u tabeli 5.6. Kapaciteti aviona A1, A2, A3 i A4 koji su korišćeni u eksperimentima čiji su rezultati prikazani u tabeli 5.7 su: 50, 60, 70 i 60 respektivno. Kapaciteti aviona zavise od vrste aviona i dati su unapred, ali u ovom slučaju, smanjivanje je izvršeno radi testiranja heuristike, bez obzira što avioni takvih kapaciteta ne postoje u praksi. Rezultati eksperimenata kada su korišćeni manji kapaciteti aviona prikazani su u tabeli 5.7.

Tabela 5.6: Rezultati eksperimenata I deo – rute i dužine (prilagođeno iz Andric Gusavac i dr., 2019)

Problem #	Karakteristike				Rešenja – planovi obrade dobijena heuristikom		
	Broj parcela	Broj varijanti obrade	Broj aviona	Broj letelišta	Ruta	Dužina rute	Avion
1	2	4	4	1	L-P13-P24-L	31.21	A3
2	4	4	4	1	L-P13-P33-P43-P24-L	50.20	A3
3	5	4	4	1	L-P13-P33-P43-P53-P24-L	64,81	A3
4	6	3	4	1	L-P31-P41-P53-P61-L L-P11-P23-L	77,46 40,41	A2 A1

Tabela 5.7: Rezultati eksperimenata II deo – rute i dužine (prilagođeno iz Andric Gusavac i dr., 2019)

Problem #	Karakteristike				Rešenja – planovi obrade dobijena heuristikom		
	Broj parcela	Broj varijanti obrade	Broj aviona	Broj letelišta	Ruta	Dužina rute	Avion
1	2	4	4	1	L-P13-P24-L	31.21	A3
2	4	4	4	1	L-P13-P33-P43-L L-P23-L	36,12 26,34	A3 A2
3	5	4	4	1	L-P43-P53-L L-P23-P33-L L-P11-L	39,07 33,97 16,66	A3 A2 A1
4	6	3	4	1	L-P53-P61-L L-P33-P43-L L-P11-P23-L	45,07 43,74 40,41	A2 A1 A4

Formulisana specijalna heuristika je uspela da generiše plan obrade za najveće dimenzije razmatranog problema. Vremena izvršavanja su kratka, čak za dimenzije problema od 245 parcela, 4 varijante obrade, 40 aviona i 3 letelišta vreme izvršavanja je manje od 30 minuta. U radu (Andric Gusavac i dr., 2019) prikazani problem je rešavan i egzaktno i heuristikom i prikazana su vremena izvršavanja i za egzaktna i za rešenja dobijena heuristikom. Autori su u ovom radu pokazali da su vremena izvršavanja kod heuristike značajno manja, a takođe je pokazano da se egzaktna rešenja mogu dobiti samo za male dimenzije problema. Očigledno je da egzaktno rešavanje ne bi moglo da doprinese rešavanju realnih problema, baš zbog nemogućnosti dobijanja rešenja za veće dimenzije problema (videti u Andric Gusavac i dr., 2019). U tabeli 5.8. data su vremena izvršavanja heuristike za 14 izabranih instanci različitih dimenzija razmatranog problema.

Tabela 5.8: Vreme izvršavanja (prilagođeno iz Andric Gusavac i dr., 2019)

Problem #	Karakteristike				Vreme izvršavanja
	Broj parcela	Broj varijanti obrade	Broj aviona	Broj letelišta	Specijalna heuristika
1	2	4	4	1	< 1 sec
2	3	4	4	1	< 1 sec
3	4	4	4	1	< 1 sec
4	5	4	4	1	< 1 sec
5	6	3	4	1	< 1 sec
6	7	3	4	1	< 1 sec
7	10	4	4	1	< 1 sec
8	50	4	10	2	< 5 sec
9	100	4	10	2	20-40 sec
10	100	4	20	2	60-80 sec
11	150	4	35	2	10-15 min
12	190	4	30	1	10-30 min
13	198	4	40	1	10-30 min
14	245	4	40	3	20-30 min

U prilogu 3 dat je primer kompletnog rešenja, t.j. plana obrade koji se dobija primenom formulisane heuristike za primer dimenzija: 2 parcele, 4 varijante obrade, 4 aviona, 1 letelište. Primer manjih dimenzija je odabran, jer prikaz kompletnog plana obrade za veće dimenzije problema zauzima veoma veliki broj strana.

5.4.1. Analiza uticaja optimizacije ruta na smanjenje emisije štetnih gasova

Efekat staklene bašte je prouzrokovan je emisijom štetnih gasova u zemljinu atmosferu (*GHG greenhouse gases*) koji najčešće nastaju određenim ljudskim aktivnostima. Osnovni gasovi odgovorni za nastanak efekta staklene bašte su ugljen-dioksid, metan, azot-oksidi i dr. Karbonski otisak predstavlja ukupnu količinu GHG emisija, odnosno gasova koji izazvaju efekat staklene bašte, koji direktno ili indirektno mogu nastati kao posledica različitih vidova industrijske proizvodnje i predstavlja meru našeg uticaja na klimatske promene i životnu sredinu, a izražava se u tonama ili kilogramima ekvivalenata ugljen-dioksida (Mešić i dr., 2018).

O ozbiljnosti problema karbonskog otiska najbolje govori činjenica da je 2000. godine ukupna svetska godišnja emisija ugljen dioksida u atmosferu iznosila oko sedam milijardi tona, a predviđa se da će 2050. godine, emisija dostići oko dvadeset milijardi tona, u zavisnosti od privrednog rasta i zakonodavstva iz oblasti ekologije.

Predvodnice naglog porasta količine emisije ugljen-dioksida su Severna Amerika i Azija, koje čine 24% ukupnih planetarnih emisija. Sjedinjene Američke Države su na prvom mestu, zatim ide Kina, Kanada, Meksiko, Rusija, Indija i Saudijska Arabija, dok se u državama Evropske unije beleži stagnacija emisije ugljen-dioksida ili znatno sporiji rast. Ukoliko ne dođe do stagnacije ili pada štetnih emisija u zemljinu atmosferu, predviđa se da se u budućnosti usled globalnih klimatskih promena, može doći do klimatskih katastrofa većih razmera, što uključuje, poplave, topljenje glečera, povećan rizik od suša, povećanje nivoa mora, gubitak bioraznolikosti, pretnju ljudskom zdravlju te značajne štete ekonomskom sektoru (Mirt, 2015).

Karbonski otisak se sastoji iz primarnog i sekundarnog dela (Wiedmann, 2006). Pod primarnim otiskom se podrazumeva količina direktnih GHG emisija koje se oslobađaju sagorevanjem fosilnih goriva, uključujući i energiju koja se koristi u domaćinstvu te gorivo koje se potroši tokom upotrebe ličnog prevoza. Zapravo, primarni otisak je otisak na koji možemo imati direktnog uticaja. Sekundarni otisak predstavlja količinu indirektnih GHG emisija (vezani su za proizvodnju i transport svih proizvoda).

Do globalnog zagrevanja, odnosno klimatskih promena, koje uzrokuje čovek, izazvane su oslobađanjem određenih vrsta gasova u atmosferu, gde je dominantan gas sa efektom staklene bašte ugljen-dioksid odnosno CO₂. Ovaj gas se emituje u atmosferu kad god se desi upotreba i spaljivanje fosilnih goriva u domaćinstvima, fabrikama ili elektranama. Pored ugljen-dioksida i drugi gasovi, koji izazivaju efekat staklene bašte su takođe važni, npr. Metan, CH₄, koji se emituje sa poljoprivrednih deponija, koji je po kilogramu čak jači i do 35 puta od ugljen-dioksida. Osim pomenutih gasova tu su i rashladni gasovi koji su nekoliko hiljada puta potentniji od CO₂.

Savremene kompanije, učesnici lanca snabdevanja, na različite načine mogu doprineti očuvanju životne sredine, zemljine atmosfere i drugih dobara: prilikom izbora materijala; uticaj na proizvodni proces; upotreba proizvoda; recikliranje i ponovna upotreba; produžavanje životnog veka proizvoda i delova (Mirt, 2015).

Karbonski otisak predstavlja 54% ukupnog ekološkog otiska čovečanstva i ujedno predstavlja komponentu sa najbržom tendencijom rasta. Od 1961. godine, karbonski otisak se povećao čak jedanaest puta, tako da bi kao jedan od najvažnijih koraka, koje je neophodno preduzeti u cilju zaustavljanja prekoračenja mogućnosti koje planeta Zemlja pruža (Wiedmann, 2006).

U poljoprivredi emisija štetnih gasova obuhvata i emisiju nastalu pri proizvodnji đubriva, pesticida, navodnjavanju, obradi zemljišta i transportu.

Povećanje koncentracije gasova staklene bašte u atmosferi izaziva globalno zagrevanje. Povećanje efekta staklene bašte izražava se karbonskim otiskom. Metodologije za izračunavanje karbonskog otiska se konstantno razvijaju i ističu se kao jedan od važnih alata za upravljanje efektom staklene bašte (Pandey i Agrawal, 2014). Još uvek ne postoji jedan standard koji će se koristiti za merenje ovih efekata, postoje različiti načini merenja i izračunavanja koji se koriste u različitim studijama. Autori Pandey i Agrawal (2014) u svom radu daju pregled najčešće korišćenih metoda merenja karbonskog otiska.

Veoma je teško kvantifikovati karbonski otisak samo po jednom entitetu, gde se pod entitetom podrazumeva svaki prodni ili antropološki uticaj, tako da još uvek nema podataka (Pandey i Agrawal, 2014) o pojedinačnom uticaju. Za izračunavanje otiska potrebno je proceniti količinu GHG emitovanog/uklonjenog u životnom ciklusu proizvoda, gde životni ciklus uključuje sve faze uključene u proizvod kao što je njegova proizvodnja od donošenja sirovina do finalnog pakovanja, distribucije, potrošnje/upotrebe i do završne faze odlaganja.

Podaci o emisiji su u literaturi izraženi u kilogramima karbonske emisije koristeći koeficijente emisije za širok spektar izvora goriva (tabela 5.9.). Iako se koeficijenti konverzije razlikuju prema izvoru goriva (npr. različite vrste uglja imaju različite koeficijente konverzije), za pojednostavljenje je korišćena prosečna vrednost (Lal, 2004).

Tabela 5.9: Koeficijenti emisije ugljenika za različite izvore goriva i jedinice za konverziju energije (Boustead i Hancock, 1979; Fluck, 1992)

Izvori goriva / energetske jedinice	Emisija ugljenika (kg CE)
<i>(a) Jedan kg goriva</i>	
Dizel	0.94
Ugalj	0.59
Gas	0.85
Ulje	1.01
LPG	0.63
Prirodni gas	0.85
<i>(b) Jedinice</i>	
Milion kalorija (mcal)	93.5×10^{-3}
Gigadzul (GJ)	20.15
BTU	23.6×10^{-6}
Kilovat sat (kW h)	7.25×10^{-2}
Konjskih snaga	5.41×10^{-2}

Smanjenje emisije štetnih gasova koja se postiže optimizacijom korišćenja avijacije u tretiranju poljoprivrednog zemljišta može se uočiti na jednom od rešenih primera datih u poglavlju 5.4. Izabrana je instanca sa 6 parcela, 3 varijante obrade, 4 aviona i jednim letelištem. U tabeli 5.10. dat je plan obrade za ovu instancu.

Tabela 5.10: Odabrana rešena instanca

Karakteristike				Plan obrade dobijen heuristikom	
Broj parcela	Broj varijanti obrade	Broj aviona	Broj letelišta	Dužina rute	Avion
6	3	4	1	77,46	A2
				40,41	A1

Ukoliko se ova instanca problema tretira avionom na način da se svaka parcela obradi posebno (obrađuju se elementarne rute) dobijaju se elementarne rute date u tabeli 5.11. U

tabeli su date samo elementarne rute za avion A1; iako se elementarne rute razlikuju u zavisnosti od aviona kojim se tretira parcela, razlike su neznatne i neće pokazati veliku razliku u smanjenju emisije štetnih gasova.

Tabela 5.11: Elementarne rute za instancu

Karakteristike				Plan obrade – elementarne rute	
Broj parcela	Broj varijanti obrade	Broj aviona	Broj letelišta	Dužina rute	Avion
6	3	4	1	25,50	A1
				27,25	
				28,01	
				29,00	
				30,31	
				31,37	

Ušteda u dužini pređenog leta može se izračunati na veoma jednostavan način:

$$\text{Ušteda} = (\text{Ukupna dužina svih elementarnih ruta} / \text{Ukupna dužina dobijena heuristikom}) * 100 \\ = (171,44 / (77,46 + 40,41)) * 100 = 145,45 \%$$

Jedini podatak koji je nađen, a koji tačno pokazuje količinu emisije po pređenom kilometru je (Clayton i dr., 2018):

U proseku, jedna vazдушna milja (1,6 km) proizvede 53,3 funti (24,17 kg) karbon dioksida.

$$\text{Ušteda} = (\text{Ukupna dužina svih elementarnih ruta} * 24,17 / \text{Ukupna dužina dobijena heuristikom} * 24,17) * 100 = 145,45 \%$$

Ako bi se primenilo bilo koje rešenje dobijeno heuristikom, uštede u emisiji karbon dioksida bi bile veoma velike, a samim tim, smanjio bi se i karbonski otisak.

5.5. Primena DEA metode za izbor efikasnih ruta

Od početka devedesetih godina XX veka, DEA metoda je, zajedno sa ostalim tehnikama, počela da se koristi u istraživanjima javnog transporta kako bi se uporedili ishodi (Singh i dr., 2018). U velikom broju objavljenih radova ocenjuje se efikasnost ruta u javnom transportu, npr. autori u radu (Singh i dr., 2018) koriste DEA metodu za procenu performansi kao

efikasnosti autobuskih ruta u gradu Allahabad. Na taj način autori su utvrdili koje su rute efikasne, a koje su neefikasne, i kako se neefikasne mogu transformisati u efikasne rute u skladu sa mestima društvenog prioriteta.

U tabeli 5.12. izdvojeni su radovi objavljeni u renomiranim časopisima koji se bave temom ocene efikasnosti ruta. U većini radova analiziraju se rute u javnom gradskom transportu, dok su rute u vazdušnom saobraćaju obrađene u samo dva rada (Shao i Sun, 2016; Chiou i Chen, 2006). U tabeli 5.12. takođe su prikazani i ulazni i izlazni faktori koje su autori koristili u svojim istraživanjima.

Tabela 5.12: Pregled primene DEA u oceni efikasnosti ruta

Referenca	DEA model	Problem	Ulazi (<i>U</i>)	Izlazi (<i>I</i>)
Singh i dr., 2018	CRS DEA model, VRS DEA model i Malmkvistovi DEA indeksi	Rute u mreži gradskog transporta	U1: Dužina ruta (km)	I1: broj mesta koja imaju socijalni prioritet (bolnice, škole, i slično) I2: broj stanovnika duž rute
Melo i dr., 2018	Slack-Based Measure (SBM) model	Koridori za transport soje (od farmera do glavnih nacionalnih izvoznih luka)	U1: potrošnja goriva U2: zasađeno područje	I1: prevežena količina žetve I2: kapacitet skladišta na farmi I3 - neželjeni izlaz: smrtnost I4 - neželjeni izlaz: faktor odlaganja (raspolaganje proizvodnom imovinom nakon završetka većine ekonomskih ciklusa) I5 - neželjeni izlaz: emisija štetnih gasova I6 - neželjeni izlaz: kapacitet skladišta van farme
Güner i dr., 2016	CCR ulazno orijentisan model	Rute u mreži gradskog transporta	Model 1 - operativna efikasnost U1: broj autobusa U2: potrošnja goriva (n.j.) U3: dužina rute (km) Model 2 - efikasnost usluge U1: frekventnost (broj povratnih ruta u toku jednog radnog dana) U2: vremenski raspon usluge na jednoj ruti u toku jednog radnog dana U3: broj stanica po kilometru U4: odstupanje od najkraće udaljenosti (razlika između dužine rute i najkraćeg puta kojim se može preći put automobilom) U5: vreme prelaska rute	Model 1 - operativna efikasnost I1: nepovezano putovanje (iskorišćen put na jednom tranzitnom vozilu bez obzira na vrstu plaćene tarife) Model 2 - efikasnost usluge I1: nepovezano putovanje (iskorišćen put na jednom tranzitnom vozilu bez obzira na vrstu plaćene tarife)

Tabela 5.12: Pregled primene DEA u oceni efikasnosti ruta - nastavak

Referenca	DEA model	Problem	Ulazi (U)	Izlazi (I)
Deng i Yan, 2019	NEBM (<i>Network Epsilon-Based Measures</i>) model - dvofazni model	Rute u mreži gradskog transporta Model 1 - evaluacija racionalnosti mreže ruta	<p>Model 1</p> <p>Ulazi faze 1:</p> <p>U1: broj stanica</p> <p>U2: dužina rute</p> <p>U3: direktnost rute</p> <p>U4: preklapanje autobuskih linija</p> <p>U5: preklapanje autobuskih linija sa linijama metroa</p> <p>Ulazi faze 2:</p> <p>U1: maksimalna brzina u saobraćajnom špicu</p> <p>U2: maksimalna brzina van saobraćajnog špica</p> <p>U3: pokrivenost naselja</p> <p>U4: zaposlenost</p> <p>U5: povezanost autobuskih linija</p> <p>U6: povezanost sa metro linijama</p>	<p>Model 1</p> <p>Izlazi faze 1:</p> <p>I1: pokrivenost naselja</p> <p>I2: zaposlenost</p> <p>I3: povezanost autobuskih linija</p> <p>I4: povezanost sa metro linijama</p> <p>Izlaz faze 2:</p> <p>I1: godišnji prosek vožnji po danu</p>
		Rute u mreži gradskog transporta Model 2 - procena efikasnosti frekventnosti	<p>Model 2</p> <p>Ulazi faze 1:</p> <p>U1: broj autobusa</p> <p>U2: broj vozača</p> <p>U3: operativno dnevno vreme</p> <p>Ulazi faze 2:</p> <p>U1: stopa dolaska na vreme u saobraćajnom špicu</p> <p>U2: stopa dolaska na vreme van saobraćajnog špica</p> <p>U3: frekvencija u saobraćajnom špicu</p> <p>U4: frekvencija van saobraćajnog špica</p>	<p>Model 2</p> <p>Izlazi faze 1:</p> <p>I1: frekvencija u saobraćajnom špicu</p> <p>I2: frekvencija van saobraćajnog špica</p> <p>Izlaz faze 2:</p> <p>I1: godišnji prosek vožnji po danu</p>

Tabela 5.12: Pregled primene DEA u oceni efikasnosti ruta - nastavak

Referenca	DEA model	Problem	Ulazi (U)	Izlazi (I)
Zhang i dr., 2018	Mešoviti DEA-SFA (Stochastic Frontier Analysis) model	Efikasnost rada gradskog autobusa u različitim periodima dana	U1: korigovane cene prevoza (u skladu sa troškovima osoblja, amortizacijom vozila, itd.) U2: trošak čekanja U3: trošak vezan za pouzdanost da će vozilo doći na vreme U4: trošak provredenog vremena u vozilu	I1: broj putnika po kilometru I2: ukupan prihod
Adhikari i dr., 2018	Izlazno orijentisani VRS DEA model	Rute u mreži gradskog transporta	U1: troškovi radne snage po vozilu po danu U2: troškovi goriva po vozilu po danu U3: operativni troškovi (servis, održavanje) po vozilu po danu	I1: prosečan broj putnika po vozilu po danu I2: profit po vozilu po danu I3: emisija štetnih gasova
Shao i Sun, 2016	Dvofazni DEA model: efikasnost sistema, efikasnost alokacije resursa, efikasnost transporta putnika i efikasnost teretnog transporta	Rute u vazdušnom saobraćaju	Ulazi u fazi alokacije: U1: broj letova Međufazne mere: Raspoloživi broj sedišta Raspoloživi transportni kapacitet	Izlazi vezani za funkciju transporta putnika I1: protok putnika I2: izlazi vezani za funkciju teretnog transporta
Zhu i dr., 2016	Trofazna DEA	Rute u mreži gradskog transporta	U1: radna snaga (broj zaposlenih vozača) U2: potrošnja goriva U3: broj vozila	I1: broj pređenih kilometara po vozilu I2: poslovni prihodi I3: prosečna radna brzina I4: prosečna stopa tačnosti
Yu i Chen, 2011	FNDEA (proširenje mrežnog modela) model; ulazno orijentisani model (proizvodnja) i izlazno orijentisani model (potrošnja)	Rute u vazdušnom saobraćaju	Ulazi: U1: troškovi osoblja U2: troškovi goriva U3: troškovi aviona Međufazni ulazi potrošnje: U1: broj letova U2: broj pređenih milja po jednom mestu u avionu	Međufazni izlazi proizvodnje: I1: broj letova I2: broj pređenih milja po jednom mestu u avionu Izlazi: I1: broj pređenih milja po putniku I2: broj ukrcanih putnika

Tabela 5.12: Pregled primene DEA u oceni efikasnosti ruta - nastavak

Referenca	DEA model	Problem	Ulazi (U)	Izlazi (I)
Yu i Chen, 2011	FNDEA (proširenje mrežnog modela) model; ulazno orijentisani model (proizvodnja) i izlazno orijentisani model (potrošnja)	Rute u vazдушnom saobraćaju	Ulazi: U1: troškovi osoblja U2: troškovi goriva U3: troškovi aviona Međufazni ulazi potrošnje: U1: broj letova U2: broj pređenih milja po jednom mestu u avionu	Međufazni izlazi proizvodnje: I1: broj letova I2: broj pređenih milja po jednom mestu u avionu Izlazi: I1: broj pređenih milja po putniku I2: broj ukrcanih putnika
Yan i dr., 2010	Izlazno orijentisani BCC model	Rute u mreži gradskog transporta	Operativna efikasnost: U1: broj autobuskih stanica U2: broj vozila U3: dužina autobuske linije U4: učestalost Servisna efikasnost: U1: vozilo/kilometara U2: prosečna dužina puta između stanica U3: pouzdanost rasporeda vožnje U4: prosečna dužina vožnje	Operativna efikasnost: I1: godišnji prihod Servisna efikasnost: I1: broj putnika godišnje
Lin i dr., 2010	EXO-CAT DEA model	Kurirski avio ekspres	U1: radna snaga U2: dužina rute (potrošnja goriva) U3: kapacitet vozila	I1: broj isporučenih dokumenata I2: broj isporučenih kutija I3: broj preuzetih dokumenata I4: broj preuzetih kutija
Chiou i Chen, 2006	BCC DEA model	Rute u vazдушnom saobraćaju	U1: troškovi goriva U2: troškovi osoblja U3: trošak aviona (troškovi održavanja, troškovi amortizacije, kamate)	Troškovna efikasnost: I1: broj letova I2: broj pređenih milja po jednom mestu u avionu Uslužna efikasnost: I3: broj pređenih milja po putniku I4: broj putnika po ukrcavanju

Primenom razvijene specijalne heuristike prikazane u poglavlju 5.3. omogućava se dobijanje planova obrade - odnosno ruta kojima će poljoprivredni avion obraditi sve parcele na jednom poljoprivrednom zemljištu. Na ovaj način se za jednu instancu generiše više ruta kojima se tretiraju sve parcele, gde broj ruta u okviru jednog plana zavisi od dimenzija ulaznih podataka. Rešenja problema, t.j. planovi obrade su dobijena na osnovu jednog kriterijuma – minimalnih ukupnih troškova tretiranja. Ukoliko je potrebno izabrati rute na osnovu više kriterijuma, s obzirom da se za jedno isparcelisano poljoprivredno zemljište dobije više ruta, moguće je izvršiti njihovo poređenje na osnovu ocene efikasnosti i u tom slučaju se može primeniti DEA metoda.

Prvo istraživačko pitanje koje je postavljeno vezano za primenu DEA metode je: koje rute iz jednog plana obrade kojim se pokrivaju sve parcele su relativno efikasne? Međutim, tokom analize primene DEA metode u objavljenim radovima, kao i analize samog problema koji se analizira i rešava u ovoj disertaciji, nametnulo se još jedno istraživačko pitanje: pošto je moguće generisati više planova obrade za jednu instancu problema (gde se bira jedan ulazni parametar koji će se menjati i tako dobijati različiti planovi), koji planovi obrade iz skupa svih su relativno efikasni? Na osnovu prethodno izvršene analize, izabrani su sledeći koraci u primeni DEA metode:

1. Poređenje više planova obrade istog problema;
2. Poređenje ruta u okviru jednog plana obrade.

Prvi korak je poređenje više planova obrade istog problema i određivanje relativno efikasnih planova. Na ovaj način se iz skupa više rešenja (planova obrade) može izabrati jedno i to relativno efikasno i ono se primeniti u praksi. Takođe je moguće izvršiti analizu relativno neefikasnih planova obrade i videti kolike promene na ulaze i/ili izlaze je potrebno izvršiti kako bi i ti planovi postali relativno efikasni. Sledeći korak je poređenje ruta u okviru jednog plana, t.j. odabir jednog relativno efikasnog plana obrade i primena DEA metode za analizu ruta u okviru njega (napomena: DEA metodu je moguće primeniti za odabir ruta na bilo koji plan obrade iz koraka 1). Sada je moguće izabrati relativno efikasne rute u okviru jednog plana, i na taj način odabrati i rute koje će prvo izvršiti u praksi, a zatim je moguće izvršiti analizu relativno neefikasnih ruta i sagledati šta se može promeniti u njihovim ulazima i/ili izlazima kako bi i te rute postale relativno efikasne.

U nastavku je dat primer za primenu DEA metode, prvo na određivanje relativno efikasnih planova obrade iz datog skupa, a zatim na određivanje relativno efikasnih ruta u

okviru jednog (izabranog) plana. Za rešavanje primera izabran je CCR DEA izlazno orijentisani model, a korišćen je softverski alat DEA-Solver-LV 8.0 (DEA Solver LV 8.0, 2019).

5.5.1. Poređenje više planova obrade istog problema

Pripremljene su instance sa realnim podacima sledećih dimenzija: 100 parcela, četiri varijante obrade za svaku parcelu i u rešavanje je uključen različiti broj raspoloživih aviona za tretiranje. Svi planovi obrade su generisani formulisanom heuristikom (poglavlje 5.3) i rešeno je 19 primera. Jedan generisani plan (dimenzije instance: 100 parcela, 21 raspoloživi avion) prikazan je u tabeli 5.13. U tabeli 5.13. mogu se videti rezultati za jednu instancu – plan obrade, a ovi rezultati dobijeni su za svaki od 19 primera. Kao konstantan ulazni parametar odabran je broj parcela koje je potrebno tretirati, a menjan je ulazni parametar - broj raspoloživih aviona kako bi se dobili različiti planovi. Svaki od 19 planova dobijen je za instancu sledećih dimenzija: 100 parcela i 21-40 aviona, menjanjem broja raspoloživih aviona. Korišćeni su podaci iz realnog primera prikazanog na slici 5.5. i objašnjenog u poglavlju 5.4.

Tabela 5.13: Rešenje problema - plan obrade dobijen specijalnom heuristikom

Oznaka rute	Oznaka aviona	Parcele u ruti	Kapacitet aviona [l]	Ukupna obrađena površina [km ²]	Ukupan trošak tretiranja parcela [n.j.]	Učešće efektivnog leta u ukupnom predjenom putu [%]
r1	A1	B6 - B11 - B12 - C32 - C57 - C2	250	56	1054,3	53,12
r2	A10	C24 - C53 - C78	250	26	604	43,05
r3	A11	C5 - C7 - C3	200	29	447,1	64,86
r4	A12	C66 - C73 - C26 - C28 - C59 - C58 - C16	150	71	1085	65,44
r5	A13	C8 - C12 - C42 - C52 - C77	250	44	815	53,99
r6	A14	C9 - C11	200	17	346,1	49,12
r7	A15	C37 - C68 - C69 - C79 - C34 - C64 - C15	150	66	1151,4	57,32
r8	A16	C72 - C50 - C75	250	37	733,2	50,46
r9	A17	C21 - C49 - C48 -	200	26	552,6	47,05
r10	A18	C39 - C25 - C55 - C43 - C6	150	43	692,2	62,12
r11	A19	C14 - C20 - C46 - C44	250	36	649,7	55,41

Tabela 5.13: Rešenje problema - plan obrade dobijen specijalnom heuristikom - nastavak

Oznaka rute	Oznaka aviona	Parcele u ruti	Kapacitet aviona [l]	Ukupna obrađena površina [km ²]	Ukupan trošak tretiranja parcela [n.j.]	Učešće efektivnog leta u ukupnom predjenom putu [%]
r12	A2	C13 - C22 - C29 - C36 - C65 - C35	200	62	1032,9	60,03
r13	A20	C1 - C4	200	16	307,3	52,07
r14	A21	C19 - C45 - C70 - C38	250	46	775,9	59,29
r15	A3	C17 - B8 - B9 - B10 - B13 - B14 - B15 - B4	150	92	1400,2	65,70
r16	A4	C18 - B3 - B2 - B1 - C80	250	57	1044,3	54,58
r17	A5	C40 - C23 - C51 - C47 - C10	200	47	779,8	60,27
r18	A6	B16 - B17 - B18 - B19 - B7 - B5	150	39	830,1	46,98
r19	A7	C41 - C27 - C56 - C81	250	42	822,2	51,08
r20	A8	C67 - C71 - C74 - C76	200	41	729,3	56,22
r21	A9	C54 - C30 - C31 - C62 - C33 - C63 - C61 - C60	150	95	1351,3	70,30

Kako bi se videlo koji planovi obrade su efikasni, primeniće se DEA metoda. Svaki plan se posmatra kao jedna DMU, a odlučeno je da se menja broj raspoloživih aviona koje je moguće koristiti za tretiranje obradive površine. Na ovaj način generisano je 19 planova obrade koja su sva data u obliku prikazanom u tabeli 5.13. Na osnovu analize parametara koji su dobijeni u okviru plana, predloženi su ulazi i izlazi za primenu DEA metode:

Ulazi:

1. Ukupan raspoloživi kapacitet svih aviona - $U1$
2. Ukupan trošak tretiranja svih parcela - $U2$

Izlazi:

1. Ukupan iskorišćeni kapacitet svih aviona - $I1$
2. Procentualno učešće efektivnog leta u ukupnom predjenom putu – $I2$

Ulazni podaci za numerički primer koji se rešava DEA metodom prikazani su u tabeli 5.14. (planovi obrade su označeni sa R1-R19). Na osnovu ulaznog parametra - broja raspoloživih aviona dobija se ukupan raspoloživi kapacitet svih aviona $U1$. Ulaz $U1$ se dobija kao suma pojedinačnih kapaciteta svih raspoloživih aviona. Ukupan trošak tretiranja svih

parcela *U2* jeste suma troškova tretiranja svih ruta u okviru plana obrade, ukupan iskorišćeni kapacitet svih aviona *II* je suma pojedinačnih kapaciteta svih angažovanih aviona, a procentualno učešće efektivnog leta u ukupnom pređenom putu *I2* je suma efektivnog leta u svakoj ruti u okviru plana.

Tabela 5.14: Ulazni podaci za poređenje više planova obrade

DMU	<i>U1</i> Ukupan raspoloživi kapacitet svih aviona	<i>U2</i> Ukupan trošak tretiranja svih parcela	<i>II</i> Ukupan iskorišćeni kapacitet svih aviona	<i>I2</i> Procentualno učešće efektivnog leta u ukupnom pređenom putu
R1	4300	17203,9	4300	57,43
R2	4650	16461,1	3600	60,02
R3	4900	16950,3	3900	58,29
R4	5100	16950,3	3900	58,29
R5	5250	17133,1	4250	57,67
R6	5500	17118,3	4200	57,72
R7	5700	17118,3	4200	57,72
R8	5850	17156,8	4000	57,59
R9	6100	17156,8	4000	57,59
R10	6300	17156,8	4000	57,59
R11	6450	16919,5	3700	58,39
R12	6700	17156,4	4300	57,59
R13	6900	17156,4	4300	57,59
R14	7050	16858,1	3850	58,61
R15	7300	18357	4750	53,82
R16	7500	18357	4750	53,82
R17	7650	17014,3	3750	58,07
R18	7900	17014,3	3750	58,07
R19	8100	17014,3	3750	58,07

Urađena je deskriptivna statistika i prikazana je u tabeli 5.15.

Tabela 5.15: Deskriptivna statistika – primer poređenja planova obrade

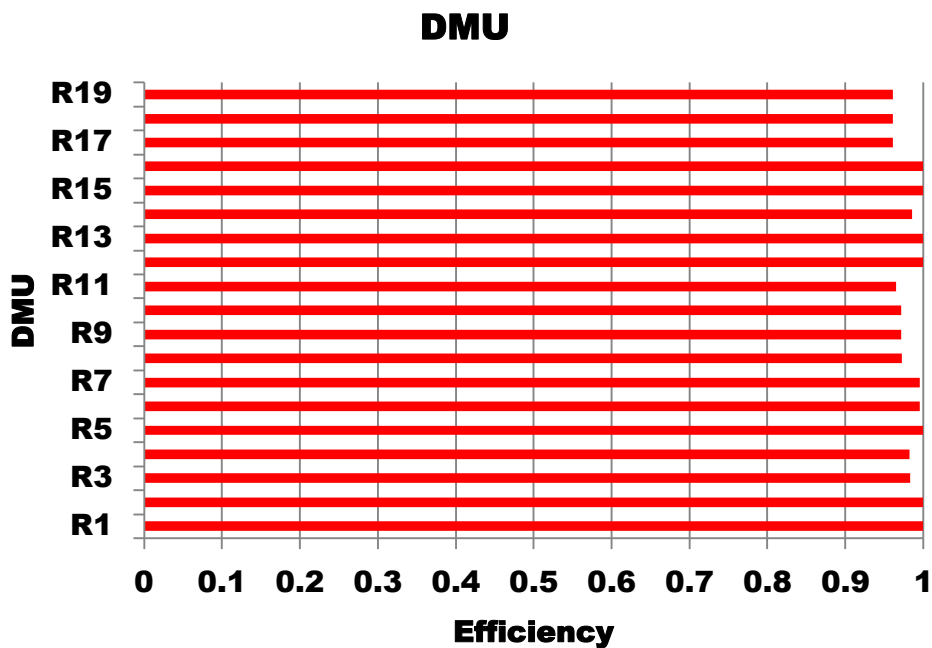
	<i>U1</i> Ukupan raspoloživi kapacitet svih aviona	<i>U2</i> Ukupan trošak tretiranja svih parcela	<i>II</i> Ukupan iskorišćeni kapacitet svih aviona	<i>I2</i> Procentualno učešće efektivnog leta u ukupnom pređenom putu
Max	8100	18357	4750	60,02
Min	4300	16461,1	3600	53,82
Average	6273,68	17171,2	4065,79	57,57
SD	1115,01	438,81	319,15	1,41

Na osnovu dobijenog indeksa efikasnosti sva rešenja – planovi obrade su rangirana (tabela 5.16). Broj relativno efikasnih planova je šest, a relativno neefikasnih 13.

Tabela 5.16: Rang planova obrade na osnovu indeksa efikasnosti

R.br.	DMU	Indeks efikasnosti	Rang
1	R1	1	1
2	R2	1	1
12	R12	1	1
13	R13	1	1
15	R15	1	1
16	R16	1	1
5	R5	0,9999	7
6	R6	0,9959	8
7	R7	0,9955	9
14	R14	0,9854	10
3	R3	0,9829	11
4	R4	0,9826	12
8	R8	0,9722	13
9	R9	0,9718	14
10	R10	0,9718	14
11	R11	0,9654	16
17	R17	0,9613	17
18	R18	0,9613	17
19	R19	0,9613	17

Na grafiku 5.1 prikazana je relativna efikasnost planova obrade.



Grafik 5.1: Relativna efikasnost planova obrade

Na osnovu relativne efikasnosti planova obrade dobijenih DEA metodom moguće je uočiti na koje ulaze i/ili izlaze relativno neefikasnih planova obrade je potrebno uticati (smanjiti ih ili povećati) kako bi ti planovi postali relativno efikasni. U tabelama 5.17. i 5.18. prikazana je projekcija promene ulaza i/ili izlaza kako bi plan obrade (DMU) koji nije efikasan postao relativno efikasan. Za planove koji su relativno efikasni promene su nula.

Tabela 5.17: Projekcija promene ulaza za planove obrade

R. br.	DMU	Indeks efikasnosti	Rang	U1 Ukupan raspoloživi kapacitet svih aviona			U2 Ukupan trošak tretiranja svih parcela		
				Parametar	Projekcija	Razlika (%)	Parametar	Projekcija	Razlika (%)
1	R1	1	1	4300	4300	0	17203.9	17203.9	0
2	R2	1	1	4650	4650	0	16461.1	16461.1	0
3	R3	0.9829	11	4900	4900	0	16950.3	16950.3	0
4	R4	0.9826	12	5100	5100	0	16950.3	16950.3	0
5	R5	0.9999	7	5250	5250	0	17133.1	17133.1	0
6	R6	0.9959	8	5500	5500	0	17118.3	17118.3	0
7	R7	0.9955	9	5700	5700	0	17118.3	17118.3	0
8	R8	0.9722	13	5850	5850	0	17156.8	17156.8	0
9	R9	0.9718	14	6100	6077.63	-0.37	17156.8	17156.8	0
10	R10	0.9718	14	6300	6077.63	-3.53	17156.8	17156.8	0
11	R11	0.9654	16	6450	5227.88	-18.9	16919.5	16919.5	0
12	R12	1	1	6700	6700	0	17156.4	17156.4	0
13	R13	1	1	6900	6700	-2.9	17156.4	17156.4	0
14	R14	0.9854	10	7050	5506.57	-21.9	16858.1	16858.1	0
15	R15	1	1	7300	7300	0	18357	18357	0
16	R16	1	1	7500	7500	0	18357	18357	0
17	R17	0.9613	17	7650	5415	-29.2	17014.3	17014.3	0
18	R18	0.9613	17	7900	5415	-31.5	17014.3	17014.3	0
19	R19	0.9613	17	8100	5415	-33.1	17014.3	17014.3	0

Ulaz 2 (ukupan trošak tretiranja svih parcela u okviru jednog plana obrade) nije potrebno menjati kako bi plan obrade postao relativno efikasan, a ulaz 1 (raspoloživi kapacitet svih aviona) može se smanjivati samo za kod osam relativno neefikasnih planova (od ukupno 13) kako bi postali efikasni. Mnogo veći uticaj imaju izlazi, što je i očekivano, s obzirom da je primenjen izlazno orijentisani DEA model.

Kada se uporede rezultati dobijeni za planove obrade R12 i R13 iz tabele 5.17, vidi se da su izlazi za oba plana isti, ali se ulaz 1 razlikuje, na osnovu čega se može zaključiti da plan R13 nije efikasan, iako ima indeks efikasnosti 1. Ovo je slučaj tzv. "lažne efikasnosti", jer je za R13 ispunjen potreban uslov (4.14), ali ne i dovoljan (4.15).

Tabela 5.18: Projekcija promene izlaza za planove obrade

R. br.	DMU	Indeks efikasnosti	Rang	I1 Ukupan iskorišćeni kapacitet svih aviona			I2 Procentualno učešće efektivnog leta u ukupnom pređenom putu		
				Parametar	Projekcija	Razlika (%)	Parametar	Projekcija	Razlika (%)
1	R1	1	1	4300	4300	0	57.43	57.43	0
2	R2	1	1	3600	3600	0	60.02	60.02	0
3	R3	0.9829	11	3900	3967.8	1.74	58.29	59.30	1.74
4	R4	0.9826	12	3900	3969.25	1.78	58.29	59.32	1.78
5	R5	0.9999	7	4250	4250.53	0.01	57.67	57.67	0.01
6	R6	0.9959	8	4200	4217.36	0.41	57.72	57.95	0.41
7	R7	0.9955	9	4200	4218.89	0.45	57.72	57.98	0.45
8	R8	0.9722	13	4000	4114.38	2.86	57.59	59.23	2.86
9	R9	0.9718	14	4000	4116.07	2.90	57.59	59.26	2.90
10	R10	0.9718	14	4000	4116.07	2.90	57.59	59.26	2.90
11	R11	0.9654	16	3700	3832.8	3.59	58.39	60.49	3.59
12	R12	1	1	4300	4300	0	57.59	57.59	0
13	R13	1	1	4300	4300	0	57.59	57.59	0
14	R14	0.9854	10	3850	3906.88	1.48	58.61	59.47	1.48
15	R15	1	1	4750	4750	0	53.82	53.82	0
16	R16	1	1	4750	4750	0	53.82	53.82	0
17	R17	0.9613	17	3750	3900.93	4.02	58.07	60.41	4.02
18	R18	0.9613	17	3750	3900.93	4.02	58.07	60.41	4.02
19	R19	0.9613	17	3750	3900.93	4.02	58.07	60.41	4.02

S obzirom da je dobijeno više planova obrade za jedan problem, podaci koji su dobijeni u projekciji promene ulaza i izlaza (tabele 5.17 i 5.18) mogu da pomognu pri izboru koji plan se može primeniti u praksi. Prvi izbor u praksi bi bili planovi obrade kojima je indeks efikasnosti jednak 1, ali svim ostalim planovima koji imaju indeks manji od 1 može se indeks efikasnosti povećati i na taj način ti planovi mogu postati relativno efikasni i kao takvi se primeniti u praksi pri tretiranju zemljišta. U tabelama 5.17 i 5.18 vide se promene za pojedinačne ulaze i izlaze koje je potrebno realizovati, a u tabelama 5.19 i 5.20 data je statistika za projekciju promena.

Tabela 5.19: Statistika projekcije promene ulaza za planove obrade

	Rezultat	Rang	U1 Ukupan raspoloživi kapacitet svih aviona			U2 Ukupan trošak tretiranja svih parcela		
			Parametar	Projekcija	Razlika (%)	Parametar	Projekcija	Razlika (%)
Average	0.9846	9	6273.68	5714.98	-7.45	17171.2	17171.2	0
Max	1	17	8100	7500	0	18357	18357	0
Min	0.9613	1	4300	4300	-33.15	16461.1	16461.1	0
St Dev	0.0156	6.2805	1145.57	846.97	12.36	450.83	450.83	0

Tabela 5.20: Statistika projekcije promene izlaza za planove obrade

	Rezultat	Rang	I1 Ukupan iskorišćeni kapacitet svih aviona			I2 Procentualno učešće efektivnog leta u ukupnom pređenom putu		
			Para- metar	Projek- cija	Razlika (%)	Para- metar	Projek- cija	Razlika (%)
Average	0.9846	9	4065.79	4126.99	1.59	57.57	58.5	1.59
Max	1	17	4750	4750	4.02	60.02	60.49	4.02
Min	0.9613	1	3600	3600	0	53.82	53.82	0
St Dev	0.0156	6.2805	327.89	290.08	1.62	1.45	1.96	1.62

Prosečno povećanje ili smanjenje ulaza i izlaza za sve planove pokazuje da, u proseku, nisu potrebne velike promene ulaza i izlaza da bi relativno neefikasni planovi obrade postali relativno efikasni. Najveća promena, t.j. smanjenje parametra je za ulaz 1 koji predstavlja kapacitet aviona i iznosi skoro 7,5%. Kapacitet aviona se ne može smanjivati za određeni procenat, jer svaki avion ima svoj određeni kapacitet koji se ne može menjati, međutim ova informacija nam pokazuje da je potrebno smanjiti kapacitet aviona, kako bi planovi obrade postali relativno efikasni. U praksi je jedino moguće kao ulaz uključiti avione sa manjim kapacitetom, pa opet rešiti problem. Oba izlaza je potrebno povećati za nešto više od 1,5% kako bi se indeks efikasnosti plana obrade povećao.

5.5.2. Poređenje ruta u okviru jednog plana obrade

Uspešna operativna politika i planiranje pojedinih ruta zavisi od temeljnog razumevanja njihovih performansi i ekonomskih karakteristika. Veliki broj studija o ocenjivanju performansi avio-kompanija tretirala je kompanije kao DMU, a ne pojedinačne rute; stoga im može nedostajati uvid u probleme rada svake rute (Chiou i Chen, 2006), a u pomenutom radu autori tretiraju svaku pojedinačnu rutu kao DMU.

Nakon prvog koraka u primeni DEA analize na problem odabira planova obrade i ruta za tretiranje poljoprivrednog zemljišta koji podrazumeva poređenje više planova obrade istog problema, prelazi se na sledeći korak. Sada je potrebno izabrati jedan od planova obrade iz skupa svih dobijenih u poglavlju 5.5.1 i, pomoću DEA metode, porediti rute u okviru tog jednog plana i izabrati relativno efikasne rute.

Plan obrade koji je izabran za primenu DEA metode za odabir ruta je primer sa 100 parcela i 21 raspoloživim avionom. Generisani plan obrade za ovaj primer dat je u tabeli 5.13. Ovaj plan iz skupa 19 je izabran zato što je on relativno efikasan, što je pokazano u poglavlju 5.5.1.

U ovde predloženom pristupu za ocenu efikasnosti ruta u okviru jednog plana obrade korišćen je klasičan izlazno orjentisan CCR DEA model, a predloženi ulazi i izlazi za primenu DEA metode dati su u nastavku.

Ulazi:

1. Kapacitet aviona - $U1$
2. Ukupan trošak tretiranja parcela u ruti - $U2$

Izlazi:

1. Ukupna tretirana površina parcela u ruti – $I1$
2. Procentualno učešće efektivnog leta u ukupnom pređenom putu – $I2$

Kapacitet aviona $U1$ predstavlja ukupan raspoloživi kapacitet rezervoara za gorivo jednog aviona i uslovljava ukupan put koji avion može da preleti. Ukupan trošak tretiranja parcela u ruti $U2$ predstavlja ukupan trošak leta aviona od/do letelišta, trošak leta između svih parcela u ruti, kao i trošak preleta svake parcele u ruti pri njenom tretiranju.

Ukupna tretirana površina parcela u jednoj ruti $I1$ predstavlja zbir površine svake parcele u jednoj ruti. Avion pri tretiranju parcela u jednoj ruti mora i da leti od/do letelišta kao i da preleti razdaljinu između svake parcele u ruti, a od ukupnog leta aviona u jednoj ruti, samo deo leta koji se odnosi na tretiranje parcela u ruti predstavlja efektivan let. U skladu sa navedenim, kao izlaz 2 odabrano je procentualno učešće efektivnog leta u ukupnom pređenom putu – $I2$.

Ulazni podaci za numerički primer prikazani su u tabeli 5.21. (rute su označene sa r1-r21). Primer je urađen za instancu sledećih dimenzija: 100 parcela i 21 avion. Dobijeno rešenje – plan obrade uključuje 21 rutu kojima se pokrivaju (tretiraju) sve parcele.

Tabela 5.21: Ulazni podaci za poređenje ruta

DMU	<i>U1</i> Kapacitet aviona	<i>U2</i> Ukupan trošak tretiranja parcela u ruti	<i>I1</i> Ukupna tretirana površina parcela u ruti	<i>I2</i> Procentualno učešće efektivnog leta u ukupnom pređenom putu
r1	250	1054,3	56	53,12
r2	250	604	26	43,05
r3	200	447,1	29	64,86
r4	150	1085	71	65,44
r5	250	815	44	53,99
r6	200	346,1	17	49,12
r7	150	1151,4	66	57,32
r8	250	733,2	37	50,46
r9	200	552,6	26	47,05
r10	150	692,2	43	62,12
r11	250	649,7	36	55,41
r12	200	1032,9	62	60,03
r13	200	307,3	16	52,07
r14	250	775,9	46	59,29
r15	150	1400,2	92	65,70
r16	250	1044,3	57	54,58
r17	200	779,8	47	60,27
r18	150	830,1	39	46,98
r19	250	822,2	42	51,08
r20	200	729,3	41	56,22
r21	150	1351,3	95	70,30

Urađena je deskriptivna statistika, odnosno date su minimalne i maksimalne ocene, srednje vrednosti i standardna devijacija (tabela 5.22).

Tabela 5.22: Deskriptivna statistika – primer poređenja ruta

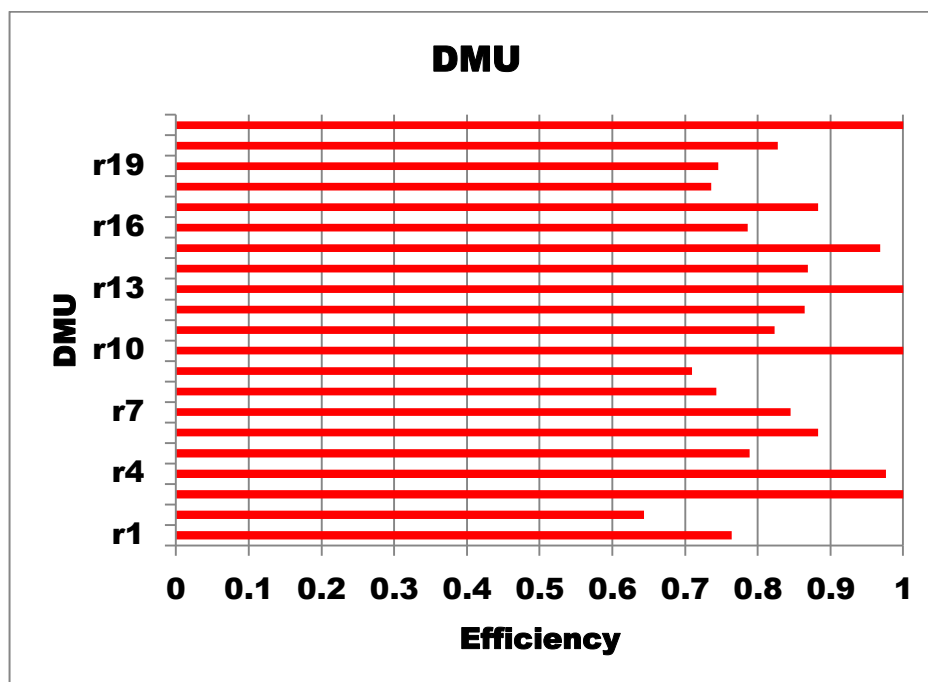
	<i>U1</i> Kapacitet aviona	<i>U2</i> Ukupan trošak tretiranja parcela u ruti	<i>I1</i> Ukupna tretirana površina parcela u ruti	<i>I2</i> Procentualno učešće efektivnog leta u ukupnom pređenom putu
Max	250	1400,2	95	70,30
Min	150	307,3	16	43,05
Average	204,76	819,23	47,05	56,12
SD	40,55	289,41	20,83	6,94

Na osnovu dobijenog indeksa efikasnosti rute su rangirane (tabela 5.23). Broj relativno efikasnih ruta je četiri, a relativno neefikasnih 17.

Tabela 5.23: Rang ruta na osnovu indeksa efikasnosti

R.br.	DMU	Indeks efikasnosti	Rang
3	r3	1	1
10	r10	1	1
13	r13	1	1
21	r21	1	1
4	r4	0,9767	5
15	r15	0,9684	6
17	r17	0,8834	7
6	r6	0,8831	8
14	r14	0,8692	9
12	r12	0,8647	10
7	r7	0,8452	11
20	r20	0,8279	12
11	r11	0,8235	13
5	r5	0,7889	14
16	r16	0,7859	15
1	r1	0,7644	16
19	r19	0,746	17
8	r8	0,7429	18
18	r18	0,736	19
9	r9	0,7094	20
2	r2	0,6437	21

Na grafiku 5.2 prikazana je relativna efikasnost ruta u okviru plana obrade.



Grafik 5.2: Relativna efikasnost ruta

U tabelama 5.24 i 5.25 data je projekcija promena za ulaze i izlaze za neefikasne rute. Za rute koje su relativno efikasne promene su nula.

Tabela 5.24: Projekcija promena ulaza za rute

R. br.	DMU	Indeks efikasnosti	Rang	U1 Kapacitet aviona			U2 Ukupan trošak tretiranja parcela u ruti		
				Parametar	Projekcija	Razlika (%)	Parametar	Projekcija	Razlika (%)
1	r1	0.7644	16	250	169.95	-32.02	1054.3	1054.3	0
2	r2	0.6437	21	250	195.17	-21.93	604	604	0
3	r3	1	1	200	200	0	447.1	447.1	0
4	r4	0.9767	5	150	150	0	1085	1085	0
5	r5	0.7889	14	250	184.55	-26.17	815	815	0
6	r6	0.8831	8	200	200	0	346.1	346.1	0
7	r7	0.8452	11	150	150	0	1151.4	1151.4	0
8	r8	0.7429	18	250	189.04	-24.39	733.2	733.2	0
9	r9	0.7094	20	200	197.17	-1.42	552.6	552.6	0
10	r10	1	1	150	150	0	692.2	692.2	0
11	r11	0.8235	13	250	193.16	-22.7	649.7	649.7	0
12	r12	0.8647	10	200	171.32	-14.33	1032.9	1032.9	0
13	r13	1	1	200	200	0	307.3	307.3	0
14	r14	0.8692	9	250	186.75	-25.3	775.9	775.9	0
15	r15	0.9684	6	150	150	0	1400.2	1351.3	-3.49
16	r16	0.7859	15	250	170.59	-31.76	1044.3	1044.3	0
17	r17	0.8834	7	200	186.54	-6.73	779.8	779.8	0
18	r18	0.736	19	150	150	0	830.1	830.1	0
19	r19	0.746	17	250	184.16	-26.34	822.2	822.2	0
20	r20	0.8279	12	200	189.24	-5.38	729.3	729.3	0
21	r21	1	1	150	150	0	1351.3	1351.3	0

Projekcija je analiza koja je važna za relativno neefikasne rute i na osnovu pokazatelja i njihove vrednosti koji su dati u ovoj analizi može se uočiti koji ulazi i/ili izlazi se mogu povećati/smanjiti i za koliko za svaku neefikasnu rutu tako da ta ruta postane relativno efikasna. Na primer, za rutu 20 (r20 u tabeli 5.25.) čiji je indeks efikasnosti 0,8279 ($41/49,52=0,8279$) potrebno je povećati oba izlaza za nešto više od 20% i tada bi ova ruta postala relativno efikasna. Kako bi sve parcele bile tretirane, potrebno je realizovati sve generisane rute u okviru plana obrade.

Tabela 5.25: Projekcija promena izlaza za rute

R. br.	DMU	Indeks efikasnosti	Rang	I1 Ukupna tretirana površina parcela u ruti			I2 Procentualno učešće efektivnog leta u ukupnom pređenom putu		
				Parametar	Projekcija	Razlika (%)	Parametar	Projekcija	Razlika (%)
1	r1	0.7644	16	56	73.26	30.83	53.12	69.49	30.83
2	r2	0.6437	21	26	40.39	55.35	43.05	66.87	55.35
3	r3	1	1	29	29	0	64.86	64.86	0
4	r4	0.9767	5	71	73.99	4.21	65.44	66.7	2.38
5	r5	0.7889	14	44	55.77	26.76	53.99	68.43	26.76
6	r6	0.8831	8	17	19.61	15.34	49.11	55.62	13.23
7	r7	0.8452	11	66	79.22	20.04	57.32	67.82	18.32
8	r8	0.7429	18	37	49.80	34.61	50.46	67.93	34.60
9	r9	0.7094	20	26	36.65	40.97	47.05	66.33	40.97
10	r10	1	1	43	43	0	62.12	62.12	0
11	r11	0.8235	13	36	43.72	21.44	55.41	67.29	21.44
12	r12	0.8647	10	62	71.7	15.64	60.02	69.42	15.64
13	r13	1	1	16	16	0	52.07	52.07	0
14	r14	0.8692	9	46	52.92	15.04	59.29	68.20	15.04
15	r15	0.9684	6	92	95	3.26	65.70	70.30	6.99
16	r16	0.7859	15	57	72.53	27.25	54.58	69.46	27.25
17	r17	0.8834	7	47	53.20	13.20	60.27	68.23	13.20
18	r18	0.736	19	39	53.88	38.15	46.98	63.83	35.86
19	r19	0.746	17	42	56.30	34.05	51.08	68.48	34.05
20	r20	0.8279	12	41	49.52	20.78	56.22	67.90	20.78
21	r21	1	1	95	95	0	70.30	70.30	0

Podaci koji su dobijeni u projekciji promene svakog ulaza i svakog izlaza za rute (tabele 5.24. i 5.25.) mogu da pomognu pri izboru koja ruta se prva može realizovati u praksi. Rutama koje imaju indeks efikasnosti manji od 1 može se indeks povećati i na taj način te rute mogu postati relativno efikasne i kao takve se primeniti u praksi pri tretiranju zemljišta. U tabelama 5.26. i 5.27. data je statistika za projekciju promena.

Tabela 5.26: Statistika projekcije promene ulaza za rute

	Rezultat	Rang	U1 Kapacitet aviona			U2 Ukupan trošak tretiranja parcela u ruti		
			Parametar	Projekcija	Razlika (%)	Parametar	Projekcija	Razlika (%)
Average	0.8504	10.7143	204.76	177.03	-11.36	819.23	816.90	-0.17
Max	1	21	250	200	0	1400.2	1351.3	0
Min	0.6437	1	150	150	-32.02	307.3	307.3	-3.49
St Dev	0.1088	6.6117	41.55	19.58	12.69	296.56	291.92	0.76

Tabela 5.27: Statistika projekcije promene izlaza za rute

	Rezultat	Rang	<i>I1</i> Ukupna tretirana površina parcela u ruti			<i>I2</i> Procentualno učešće efektivnog leta u ukupnom pređenom putu		
			Para- metar	Projek- cija	Razlika (%)	Para- metar	Projek- cija	Razlika (%)
Average	0.8504	10.7143	47.05	55.26	19.85	56.12	66.28	19.65
Max	1	21	95	95	55.35	70.30	70.30	55.35
Min	0.6437	1	16	16	0	43.05	52.07	0
St Dev	0.1088	6.6117	21.34	21.69	15.63	7.11	4.64	15.47

U slučaju izbora ruta, najmanja prosečna promena ulaza i izlaza je u slučaju parametra *U1* koji predstavlja ukupan raspoloživi kapacitet aviona, a tada bi rute postale relativno efikasne. Međutim, isto kao i kod primera za ocenu i odabir plana obrade prikazanog u poglavlju 5.5.1, kapacitet aviona ne može se smanjiti za određeni procenat, jer je kapacitet unapred dat, ali je moguće u analizu kao ulaze uključiti avione sa manjim kapacitetom. Što se tiče ostalih ulaza i izlaza, prosečna promena za *U2* je izuzetno mala (oko 0,2%), dok su prosečne promene za izlaze skoro 20%. Moguće je da su ove veće prosečne promene posledica većeg rastojanja između parcela, tako da avion, ustvari, nema dovoljno kapaciteta goriva da obiđe i tretira veći broj parcela, a samim tim i veću površinu. Predlog za prevazilaženje ovog problema je grupisanje parcela poljoprivrednog zemljišta u veće parcele, za šta bi bila potrebna detaljnija analiza međusobnog položaja i površina postojećih parcela. Na ovaj način avion bi manje goriva trošio na let koji nije efektivan, a koji podrazumeva “prazan hod”, t.j. let između parcela koje je potrebno tretirati. U ovom slučaju bi sigurno trebalo voditi računa i o maksimalnoj površini grupisanih parcela, kako se ne bi došlo u situaciju da avion ne može da obradi jednim preletom novu i veću (grupisanu) parcelu. Takođe bi se moglo analizirati šta se događa kada se u rešavanje datog problema uključe avioni većeg kapaciteta.

DEA metodom je istražen uticaj različitih parametara vezanih za: različite planove obrade, odnosno skupove ruta kojima se tretira jedno poljoprivredno zemljište i rute u okviru jednog plana na efikasnost analiziranih planova i efikasnost ruta. Interesantno je da su prosečne promene izlaza *I1* za rute koje nisu relativno efikasne skoro 20%, a skoro 20% je i promena izlaza *I2*. Ovi parametri ukazuju da su parcele udaljene od samog letelišta i da avion troši veliki deo leta na let koji nije efektivan. Predlog za prevazilaženje ove situacije je uvođenje još jednog letelišta ili premeštanje postojećeg bliže parcelama koje je potrebno tretirati.

6. ZAKLJUČAK

Poljoprivredno zemljište na kome se sadi neka kultura potrebno je, sem setve (sadnje) same kulture, i tretirati određenim hemikalijama radi uništavanja korova i raznih štetočina. Tretiranje jednog poljoprivrednog zemljišta moguće je izvršiti zemljišnom mehanizacijom (npr. traktorima) ili je moguće tretirati ga iz vazduha (npr. poljoprivrednom avijacijom). Efikasnije je tretirati zemljište iz vazduha, jer se u tom slučaju ne uništava deo zemljišta pri prelasku zemljišne mehanizacije preko njega. U slučaju kada je zemljište podeljeno na parcele i postoje delovi zemljišta koji se ne tretiraju ili postoje određene prepreke na zemljištu, tada je problem određivanja načina tretiranja tog isparcelisanog zemljišta veoma složen. U ovoj disertaciji predložen je pristup za rešavanje problema načina tretiranja isparcelisanog zemljišta koji obuhvata određivanje ruta kojima će se parcele obilaziti poljoprivrednom avijacijom i nad njima se izvršiti operacija tretiranja hemikalijama. Za rešavanje opisanog problema predložen je heuristički algoritam koji je razvijen i implementiran za rešavanje opisanog problema. Primenom razvijene specijalne heuristike koja se oslanja na Klark-Rajtov algoritam ušteda (Clarke i Wright, 1964) određene su: lokacije letelišta koja će se koristiti za uzletanje i sletanje, alokacija svih parcela letelištima, način preleta svake parcele (obrada parcele, tj. izvršenje operacije nad parcelom) i redosled obrade parcela.

Primenom predloženog heurističkog algoritma omogućava se dobijanje planova obrade, odnosno skupa ruta kojima će poljoprivredni avion obraditi sve parcele na jednom poljoprivrednom zemljištu, a kao kriterijum se koriste ukupni troškovi. Međutim, ukoliko je potrebno izabrati rute na osnovu više kriterijuma, moguće je izvršiti njihovo poređenje na osnovu ocene efikasnosti, a u tom slučaju primenjena je DEA metoda. DEA je neparametarska metoda koja uzima u obzir više kriterijuma, a primena DEA metode urađena je u dva pravca:

1. Poređenje više planova obrade istog problema;
2. Poređenje ruta u okviru jednog plana obrade.

Formulisanim heuristikom, za jedan problem, je generisano više planova obrade koji su posmatrani kao jedinice odlučivanja pri oceni efikasnosti. Za rešavanje problema ocene efikasnosti odabran je CCR DEA izlazno orijentisani model kako bi se analizom utvrdilo za koliko je potrebno poboljšati performanse posmatranih planova. Na osnovu rezultata izabrani su relativno efikasni planovi.

Nakon rešavanja problema ocene efikasnosti generisanih planova obrade, DEA metoda se koristi i za ocenu efikasnosti ruta u okviru jednog odabranog efikasnog plana obrade. U ovom slučaju rute se posmatraju kao jedinice odlučivanja. Za rešavanje ovog problema ocene efikasnosti takođe je odabran CCR DEA izlazno orijentisani model, a na osnovu rezultata izabrane su relativno efikasne rute.

Cilj analize efikasnosti je bio da se vidi da li može optimizacijom ruta da se dođe do efikasnih rešenja. Rezultati koji su dobijeni primenom DEA metode pokazuju da specijalna heuristika formulisana za određivanje optimalnih ruta za avione pri tretiranju poljoprivrednog zemljišta daje dobre rezultate, s obzirom da sva prikazana rešenja koja se dobijaju sa različitim ulaznim parametrima imaju indeks efikasnosti u intervalu od 0,9613 do 1.

6.1. Doprinosi i hipoteze istraživanja

Jedan od doprinosa ove doktorske disertacije je detaljan pregled postojećeg znanja u ovoj oblasti i sistematizacija prema predloženom kriterijumu – odnosno prema tipu problema. Pregled je rađen u oblasti primene operacionih istraživanja u poljoprivredi, gde su analizirani svi radovi koji se bave problemima usko vezanim za obradu i način obrade (uključujući i operaciju tretiranja) poljoprivrednog zemljišta, problemi rutiranja, lokacije u poljoprivredi, itd. Poseban osvrt urađen je na pregled stanja u Republici Srbiji, odnosno analizirani su radovi čiji su autori iz Srbije.

Sledeći doprinos je prepoznavanje, a zatim i detaljno definisanje složenog problema operacionih istraživanja koji je rešavan u ovoj disertaciji. Na osnovu opisa problema, prepoznate su njegove karakteristike kao lokacijskog, alokacijskog i problema rutiranja sa više depoa.

Još jedan od doprinosa doktorske disertacije je predložena metodologija načina rešavanja problema u oblasti tretiranja poljoprivrednog zemljišta primenom metoda i tehnika operacionih istraživanja. S obzirom na složenost problema i velike dimenzije realnog primera, razvijen je heuristički algoritam za rešavanje, koji je modifikacija Klark-Rajtovog (Clarke i Wright, 1964) algoritma ušteda. Ova razvijena, implementirana i primenjena specijalna heuristika omogućava dobijanje ruta, odnosno načina na koji je potrebno tretirati jedno isparcelisano zemljište i to na osnovu jednog kriterijuma. Da bi se uključilo više kriterijuma, predložena je primena DEA metode, koja omogućava upravo primenu i odlučivanje na osnovu više kriterijuma. Na ovaj način, rešenja (planovi obrade) koja su dobijena primenom heurističkog algoritma se još jednom podvrgavaju proveru, i to proveru

njihove relativne efikasnosti i nakon toga se u praksi mogu primeniti oni planovi obrade koji su relativno efikasni.

S obzirom da je moguće dobiti više planova obrade za određenu dimenziju problema, DEA metoda se pokazala izuzetno korisnom, jer se njenom primenom, a na osnovu više kriterijuma, dolazi do izbora efikasnih planova obrade iz skupa heuristikom generisanih planova. Nakon izbora jednog efikasnog plana obrade, dolazi se do skupa ruta koje je potrebno primeniti u praksi kako bi se operacija tretiranja na jednom zemljištu u potpunosti izvršila. Prepoznato je da se u skupu ruta takođe mogu identifikovati efikasne rute i izvršiti analiza neefikasnih u cilju dostizanja njihove efikasnosti. Na ovaj način zaokruženo je celokupno istraživanje, koje je obuhvatilo više različitih metoda i rešavanje problema sa više aspekata, tako da je ovaj doprinos takođe jedan od ključnih doprinosa disertacije.

Društveni doprinos disertacije ogleda se u primeni predloženog pristupa kao podrške održivom i odgovornom planiranju korišćenja poljoprivrednih resursa. Smanjivanje emisije štetnih gasova koji direktno utiču na smanjivanje karbonskog otiska postiže se primenom rešenja koja se dobijaju formulisanom specijalnom heuristikom, što je od izuzetnog ekološkog značaja.

Na osnovu dobijenih rezultata istraživanja i njihove analize i diskusije dokazane su posebne hipoteze. Na osnovu opisa i grafovskog prikaza problema dokazana je hipoteza da problem određivanja ruta pri tretiranju isparcelisanog poljoprivrednog zemljišta ima karakteristike lokacijskog, alokacijskog i problema rutiranja sa više depoa. Razvijena heuristika primenjena na realnim primerima dokazuje hipotezu da je moguće razviti heuristički pristup za generisanje ruta pri tretiranju isparcelisanog poljoprivrednog zemljišta. Posebna hipoteza da je moguće je izabrati rute za obradu isparcelisanog zemljišta na osnovu ocene efikasnosti skupa generisanih ruta je dokazana odabirom DEA modela i njegovom primenom na generisanim planovima obrade.

Dokazivanjem posebnih hipoteza dokazana je i opšta hipoteza koja glasi da je primenom metoda i tehnika operacionih istraživanja moguće unaprediti načine tretiranja poljoprivrednog zemljišta.

6.2. Pravci budućih istraživanja

U oblasti upravljanja poljoprivrednim zemljištem, u današnje vreme najveću primenu imaju bespilotne letelice - dronovi. Dronovi su prvenstveno napravljeni za potrebe vojske, a

kasnije su se pojavili dronovi i za civilnu upotrebu u poljoprivredi, građevinarstvu, rudarstvu, itd. Dronovi se koriste u poljoprivredi da bi se farmerima omogućilo lakše upravljanje zemljištem. Umesto obilazaka velikih farmerskih površina, moguće je na vrlo jednostavan način "obići" parcelu koristeći bespilotne letelice. Korišćenjem dronova vrši se analiza zemljišta i optimizacija resursa koji se koriste za poboljšanje zdravlja biljaka ili samog zemljišta, na taj način se smanjuju ukupni troškovi upravljanja zemljištem i povećava se kvalitet biljaka. Pristup predložen u ovoj disertaciji bi mogao da se primeni na određivanje ruta za dronove.

Dron se koristi tako što mu se unapred odredi ruta koju će preleteti, podese se svi parametri vezani za letenje, parcela se slika i nakon toga se prebacuje na platformu koja ce povezati sve te slike. Ograničenje koje se mora zadovoljiti je ograničeno vreme letenja, jer dronovi koriste baterije koje se mogu dopunjavati samo na zemlji, u njihovoj bazi. Dron najčešće slika nekoliko stotina fotografija koje se preko sofvera povezuju. Kada se slike spoje, prebacuje se kao jedna na softver koji analizira sliku prema utvrđenim pravilima. Na taj način se dobijaju odgovori vezani za stanje biljaka na parceli i dobijena analiza se dalje prosleđuje korisnicima (farmeru ili dron operateru). Dronovi otkrivaju bolesti zemljišta i biljaka i time upozoravaju farmera šta sve treba da uradi i koje tretiranje da primeni da bi se bolesti otklonile. Osim bolesti, pomaže i u pronalaženju štetočina, korova, vodoležju (pojava vode na parceli), kao i brojanju biljaka i dron se pokazao kao veoma koristan.

Što se tiče ostalih oblasti prirodnih resursa, kod šumarstva se pristup može primeniti kod gašenja šumskih požara, kada je potrebno što pre doći na kritična mesta. U radu (Mersheeva i Friedrich, 2012) autori ukazuju da u slučaju kada prvi tim zadužen za gašenje požara stigne na lokaciju, brzi pregled slika napravljenih dronovima može biti izuzetno koristan. Nakon toga, dronovi mogu u kontinuitetu snimati oblast zahvaćenu požarima i na taj način obezbediti kontinualni monitoring. Autori u ovom radu predlažu dve nove metode, od čega je jedna bazirana na Klark-Rajtovom algoritmu i njima određuju rute letenja.

U radu (Wang i dr., 2014) autori se fokusiraju na određivanje ruta u slučajevima šumskih požara i predlažu jedna model podataka koji podržava određivanje ruta sa obilaženjem prepreka u oblasti koja se analizira. Ovaj algoritam je veoma koristan jer omogućuje izbegavanje prepreka pri gašenju požara.

Predloženi pristup određivanju ruta može se, uz određene modifikacije u skladu sa specifičnostima same oblasti, primeniti u svim oblastima prirodnih resursa gde je potrebno uraditi neko snimanje ili tretiranje zemljišta (poljoprivrednog, šumskog).

Dalji pravci istraživanja bi bili sledeći:

- Analiza i utvrđivanje dodatnih parametara (npr. ograničeni vremenski period za realizaciju operacija tretiranja) i sprovođenje više eksperimenata;
- Primena formulisane heuristike u drugim oblastima, npr. gašenje požara u šumarstvu, prskanje komaraca i slično;
- Značajno je i istraživanje koje može ići u pravcu analize lokacija aerodroma: lokacija aerodroma može se odrediti tako što se odabere iz skupa potencijalnih lokacija, a mogu se i direktno odrediti lokacije za aerodrome (na bilo kojoj lokaciji). Ova analiza je naročito važna za analizu lokacija aerodroma u nepristupačnim područjima;
- Istraživanje i analiza efekata grupisanja parcela poljoprivrednog zemljišta u veće parcele (uz detaljnu analizu međusobnog položaja i površina postojećih parcela), kao bi se procenat efektivnog leta aviona što više povećao;
- Razvijanje metodološkog okvira rešavanja problema u oblasti tretiranja poljoprivrednog zemljišta primenom operacionih istraživanja u smeru kvantifikacije faktora koji pokazuju raskorak između ekonomskih efekata iskorišćenja poljoprivrednih resursa i neželjenih negativnih uticaja eksploatacije na životnu sredinu.

U oblasti ocenjivanja efikasnosti ruta moguće je primeniti modifikovane DEA modele koji bi omogućili:

- da neki od ulaza (npr. kapacitet aviona) budu egzogeno fiksirani;
- da se u analizu efikasnosti uključe još neki ulazi ili izlazi npr. vreme tretiranja parcela, kao i da se uvedu ograničenja na značajnost pojedinih ulaza i izlaza;
- da se rangiraju i efikasne jedinice na osnovu indeksa efikasnosti;

Negativni uticaji na životnu sredinu, kao što je emisija štetnih gasova se može uključiti pri primeni DEA metode kao jedan od izlaza koji bi se tretirao kao neželjeni izlaz. Na taj način bi se smanjio negativni uticaj tretiranja poljoprivrednog zemljišta i proverila efikasnost planova obrade i samih ruta i sa stanovišta brzine i efikasnosti tretiranja zemljišta (ekonomski efekat) i sa stanovišta uticaja na životnu sredinu (ekološki efekat).

LITERATURA

1. Abbas A., Iqbal T., Ahmad M., Yousaf K., Elahi E., Yang M. (2018). Implementation of a novel approach for the evaluation of energy efficiency, management needs and sustainability of wheat production. *Fresenius Environmental Bulletin* 27,10, 6695-6703.
2. Accorsi R., Cholette S., Manzini R., Pini C., Penazzi S. (2016). The land-network problem: Ecosystem carbon balance in planning sustainable agro-food supply chains. *Journal of Cleaner Production* 112, 158-171. DOI:10.1016/j.jclepro.2015.06.082
3. Adhikari A., Basu S., Biswas I., Banerjee A., Sengupta P.P. (2018). A route efficiency analysis using Shannon entropy-based modified DEA method and route characteristics investigation for urban bus transport in India. *INFOR* 56,3, 332-359. DOI:10.1080/03155986.2017.1393727
4. Afzal M., Naeem M., Iqbal M., Sharif M., Huang Q. (2017). Efficient energy resource scheduling for sustainable diversified farming. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 9,4, -. DOI:10.1063/1.4997031
5. Agrell, P., Stam, A., Fischer, G., (2004). Interactive multi-objective agro-ecological land use planning: The Bungoma Region in Kenya. *European Journal of Operational Research* 158, 1, 194–217.
6. Ahmed S.S., Abd-Elmegeed M.A., Abd-Eldayem A.W. (2017). Nonlinear cropping pattern optimization in Egypt under different release scenarios from high Aswan DAM. *Journal of Engineering and Applied Science* 64,6, 443-463.
7. Albornoz V.M., Ñanco L.J., Sáez J.L. (2019). Delineating robust rectangular management zones based on column generation algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture* , -. DOI:10.1016/j.compag.2019.01.045
8. Alfandari L., Plateau A., Schepler X. (2015). A branch-and-price-and-cut approach for sustainable crop rotation planning. *European Journal of Operational Research* 241,3, 872-879. DOI:10.1016/j.ejor.2014.09.066
9. Aljanabi A.A., Mays L.W., Fox P. (2018). Optimization model for agricultural reclaimed water allocation using mixed-integer nonlinear programming. *Water (Switzerland)* 10,10, -. DOI:10.3390/w10101291
10. Andrić Gusavac B., Stanojević M., Cangalović M. (2019): Optimal treatment of agricultural land – special multi-depot vehicle routing problem. *Agric. Econ. – Czech*, 65: 569-578.
11. Andrić Gušavac B., Stojanović D., Sokolović, Ž. (2014a). Application Of Some Locational Models in Natural Resources Industry-Agriculture Case. *Revista Română de Statistică-Supliment nr*, 83.
12. Andrić Gušavac, B., Stanojević, M. Modeliranje problema korišćenja poljoprivredne avijacije. *SYM-OP-IS 2015, PROCEEDINGS (ZBORNIK RADOVA)*, 15-18.09.2015. Srebrno jezero, Srbija, pp. 349-351.
13. Andrić-Gušavac, B., Stojanović, D., Jakovljević, S., (2013). Simple Plant Location Model in Agriculture Aviation in Serbia. *XI Balkan Conference on Operational Research – BALCOR 2013, book of papers, Belgrade & Zlatibor, 7-11 september 2013*, ISBN 978-86-7680-285-2, pp. 321-327.

14. Andrić-Gušavac, B., Stojanović, D., Sokolović, Ž., (2014b). Application of some locational models in natural resources industry - agriculture case. XIII International Symposium of Organizational Sciences „New Business Models and Sustainable Competitiveness“ SymOrg 2014, Proceedings (CD), FON, Zlatibor, 6-10.jun. 2014, ISBN: 978-86-7680-295-1, pp. 1241-1248.
15. Anokić A., Stanimirović Z., Davidović T., Stakić Đ. (2019). Variable neighborhood search based approaches to a vehicle scheduling problem in agriculture. *International Transactions in Operational Research* 27,1, 26-56. DOI:10.1111/itor.12480
16. Arredondo-Ramírez K., Rubio-Castro E., Nápoles-Rivera F., Ponce-Ortega J.M., Serna-González M., El-Halwagi M.M. (2015). Optimal design of agricultural water systems with multiperiod collection, storage, and distribution. *Agricultural Water Management* 152, 161-172. DOI:10.1016/j.agwat.2015.01.007
17. Atici K.B., Podinovski V.V. (2015). Using data envelopment analysis for the assessment of technical efficiency of units with different specialisations: An application to agriculture. *Omega (United Kingdom)* 54, 72-83. DOI:10.1016/j.omega.2015.01.015
18. Baglivi A., Fiorese G., Guariso G., Uggè C. (2015). Valuing crop diversity in biodiesel production plans. *Energy* 93, 2351-2362. DOI:10.1016/j.energy.2015.10.080
19. Bavorova M., Imamverdiyev N., Ponkina E. (2018). Farm-level economics of innovative tillage technologies: the case of no-till in the Altai Krai in Russian Siberia. *Environmental Science and Pollution Research* 25,2, 1016-1032. DOI:10.1007/s11356-017-9268-y
20. Belenguer J.M., Benavent E., Prins C., Prodhon C., Calvo R.W., (2010). “A Branch-and-Cut method for the Capacitated Location-Routing Problem”, Spain.
21. Bjørndal, T., Lane, D., Weintraub, A., (2004). Operational research models and the management of fisheries and aquaculture: A review. *European Journal of Operational Research* 156, 3, 533–540.
22. Blackwell, B. F., DeVault, T. L., Fernández-Juricic, E., & Dolbeer, R. A. (2009). Wildlife collisions with aircraft: a missing component of land-use planning for airports. *Landscape and Urban Planning*, 93(1), 1-9.
23. Boboev H., Djanibekov U., Bekchanov M., Lamers J. P.A., Toderich K. (2019). Feasibility of conservation agriculture in the Amu Darya River Lowlands. *Central Asia. International Journal of Agricultural Sustainability* 17,1, 60-77. DOI:10.1080/14735903.2018.1560123
24. Bornstein, C. T., de Castro Villela, P. R. (1990). Warehouse location in a developing country: Problems in formulating the problem. *European journal of operational research*, 49(2), 222-229.
25. Bournaris T., Papathanasiou J., Manos B., Kazakis N., Voudouris K. (2015). Support of irrigation water use and eco-friendly decision process in agricultural production planning. *Operational Research* 15,2, 289-306. DOI:10.1007/s12351-015-0178-9
26. Boustead, I., Hancock, G. F. (1979). *Handbook of industrial energy analysis*.
27. Bueno-Delgado M.V., Molina-Martínez J.M., Correoso-Campillo R., Pavón-Mariño P. (2016). Ecofert: An Android application for the optimization of fertilizer cost in fertigation. *Computers and Electronics in Agriculture* 121, 32-42. DOI:10.1016/j.compag.2015.11.006

28. Cabrini S.M., Calcaterra C. P. (2016). Modeling economic-environmental decision making for agricultural land use in Argentinean Pampas. *Agricultural Systems* 143, 183-194. DOI:10.1016/j.agsy.2015.12.016
29. Capitanescu F., Marvuglia A., Navarrete Gutiérrez T., Benetto E. (2017). Multi-stage farm management optimization under environmental and crop rotation constraints. *Journal of Cleaner Production* 147, 197-205. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.01.076
30. Carvajal J., Sarache W., Costa Y. (2019). Addressing a robust decision in the sugarcane supply chain: Introduction of a new agricultural investment project in Colombia. *Computers and Electronics in Agriculture* 157, 77-89. DOI:10.1016/j.compag.2018.12.030
31. Castrodeza, C., Lara, P., Penà, T., (2005). Multicriteria fractional model for feed formulation: Economic, nutritional and environmental criteria. *Agricultural Systems* 86, 1, 76–96.
32. Cecchini L., Venanzi S., Pierri A., Chiorri M. (2018). Environmental efficiency analysis and estimation of CO2 abatement costs in dairy cattle farms in Umbria (Italy): A SBM-DEA model with undesirable output. *Journal of Cleaner Production* 197, 895-907. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.06.165
33. Ceselli A. (2003). Two exact algorithms for the capacitated p-median problem. *Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Society*, 1:319–340.
34. Ceselli A., Righini A., (2005). A branch-and-price algorithm for the capacitated p-median problem. *Networks*, 45(3):125–142.
35. Chalooob I.Z., Ramli R., Nawawi M.K.M. (2018). Measuring economic and environmental efficiency for agricultural zones in Iraq using data envelopment analysis. *International Journal of Information and Decision Sciences* 10,3, 235-248. DOI:10.1504/IJIDS.2018.093922
36. Charnes, A., Cooper, W. W., Lewin, A. Y., Seiford, L. M. (1994). *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology and Application*. Kluwer Academic Publishers.
37. Charnes, A., Cooper, W. W., Rhodes, E. (1978). *A Data Envelopment Analysis Approach to Evaluation of the Program Follow through Experiment in US Public School Education* (No. MSRR-432). Carnegie-Mellon Univ Pittsburgh Pa Management Sciences Research Group.
38. Chiou, Y. C., Chen, Y. H. (2006). Route-based performance evaluation of Taiwanese domestic airlines using data envelopment analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 42(2), 116-127.
39. Clarke, G., Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4), 568-581.
40. Cobo S., Dominguez-Ramos A., Irabien A. (2018). Trade-Offs between Nutrient Circularity and Environmental Impacts in the Management of Organic Waste. *Environmental Science and Technology* 52,19, 10923-10933. DOI:10.1021/acs.est.8b01590
41. Conesa-Muñoz J., Pajares G., Ribeiro A. (2016). Mix-opt: A new route operator for optimal coverage path planning for a fleet in an agricultural environment. *Expert Systems with Applications* 54, 364-378. DOI:10.1016/j.eswa.2015.12.047

42. Cooper, W.W., Seiford, L. M., Tone, K. (2000). *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*, Kluwer Academic Publishers: Boston.
43. Čulibrk D., Lugonja P., Minić V., Crnojević V. (2012). Water-stressed crops detection using multispectral worldview-2 satellite imagery. *International Journal of Artificial Intelligence* 9,0, 123-139.
44. Cvetković D., Čangalović M., Dugošija D., Kovačević-Vučjić V., Simić S., Vuleta J., (1996). *Kombinatorna optimizacija*, Društvo operacionih istraživača Jugoslavije, Beograd.
45. Czyzak, P., (1989). Multicriteria agricultural problem solving under uncertainty. *Foundations of Control Engineering* 14, 22, 61–80.
46. Czyzak, P., Slowinski, R., (1991). Solving multi-objective diet optimization problem under uncertainty. In Korhonen, P., Lewandowski, A., Wallenius, J. (eds) *Multiple Criteria Decision Support*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 273–282.
47. Dantzig, G. B. (1948). Programming in a linear structure. In *Bulletin of the American Mathematical Society* (Vol. 54, No. 11, pp. 1074-1074). 201 CHARLES ST, PROVIDENCE, RI 02940-2213: AMER MATHEMATICAL SOC.
48. Dantzig, G. B., Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.
49. Das B., Singh A., Panda S.N., Yasuda H. (2015). Optimal land and water resources allocation policies for sustainable irrigated agriculture. *Land Use Policy* 42, 527-537. DOI:10.1016/j.landusepol.2014.09.012
50. De Corte A., Sörensen K. (2016). An iterated local search algorithm for multi-period water distribution network design optimization. *Water (Switzerland)* 8,8, -. DOI:10.3390/w8080359
51. de Keizer M., Akkerman R., Grunow M., Bloemhof J.M., Haijema R., van der Vorst J.G.A.J. (2017). Logistics network design for perishable products with heterogeneous quality decay. *European Journal of Operational Research* 262,2, 535-549. DOI:10.1016/j.ejor.2017.03.049
52. DEA Solver LV 8.0. (2019), preuzeto sa: [http://extras.springer.com/2007/978-0-387-45281-4/DEA-SOLVER-LV8\(2014-12-05\).xlsm](http://extras.springer.com/2007/978-0-387-45281-4/DEA-SOLVER-LV8(2014-12-05).xlsm), 15/10/2019
53. Deng Y., Yan Y. (2019). Evaluating Route and Frequency Design of Bus Lines Based on Data Envelopment Analysis with Network Epsilon-Based Measures. *Journal of Advanced Transportation* 2019, -. DOI:10.1155/2019/5024253
54. Diban P., Abdul Aziz M.K., Foo D.C.Y., Jia X., Li Z., Tan R.R. (2016). Optimal biomass plantation replanting policy using dynamic programming. *Journal of Cleaner Production* 126, 409-418. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.03.097
55. Djatkov, D., Effenberger, M., Martinov, M. (2014). Method for assessing and improving the efficiency of agricultural biogas plants based on fuzzy logic and expert systems. *Applied energy*, 134, 163-175.
56. Đokić, D., Jurjević, Ž., Popović, R., Savić, M. (2019). Is there a correlation between economic and energy use efficiency in soybean production?. *Custos e Agronegocio*.

57. Dorigo, M., Di Caro, G. (1999). Ant colony optimization: a new meta-heuristic. In Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406) (Vol. 2, pp. 1470-1477). IEEE.
58. D'Souza, G. E. (1988). Structure of the US Soybean processing industry in the 1990s. *Agribusiness* 4(1), 11-23.
59. Dunnett A., Shirsath P.B., Aggarwal P.K., Thornton P., Joshi P.K., Pal B.D., Khatri-Chhetri A., Ghosh J. (2018). Multi-objective land use allocation modelling for prioritizing climate-smart agricultural interventions. *Ecological Modelling* 381, 23-35. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2018.04.008
60. Eiselt, H. A., Sandblom, C. L. (2004). *Decision Analysis, Location Models, and Scheduling Problems*. Springer Berlin Heidelberg.
61. Emrouznejad, A., Witte, K. (2010). COOPER-framework: A unified process for non-parametric projects. *European Journal of Operational Research*, 207, 1573–1586.
62. Etemadnia H., Goetz S.J., Canning P., Tavallali M.S. (2015). Optimal wholesale facilities location within the fruit and vegetables supply chain with bimodal transportation options: An LP-MIP heuristic approach. *European Journal of Operational Research* 244,2, 648-661. DOI:10.1016/j.ejor.2015.01.044
63. Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)*, 120(3), 253-281.
64. Fei R., Lin B. (2017). Technology gap and CO2 emission reduction potential by technical efficiency measures: A meta-frontier modeling for the Chinese agricultural sector. *Ecological Indicators* 73, 653-661. DOI:10.1016/j.ecolind.2016.10.021
65. Filippi C., Mansini R., Stevanato E. (2017). Mixed integer linear programming models for optimal crop selection. *Computers and Operations Research* 81, 26-39. DOI:10.1016/j.cor.2016.12.004
66. Fluck RC. Energy in farm production. In: Fluck RC, editor. *Energy in world agriculture*. 6th ed. New York: Elsevier; 1992. p. 218– 67.
67. Gadanakis Y., Bennett R., Park J., Areal F.J. (2015). Evaluating the Sustainable Intensification of arable farms. *Journal of Environmental Management* 150, 288-298. DOI:10.1016/j.jenvman.2014.10.005
68. Galán-Martín A., Pozo C., Guillén-Gosálbez G., Antón Vallejo A., Jiménez Esteller L. (2015). Multi-stage linear programming model for optimizing cropping plan decisions under the new Common Agricultural Policy. *Land Use Policy* 48, 515-524. DOI:10.1016/j.landusepol.2015.06.022
69. Galán-Martín Á., Vaskan P., Antón A., Esteller L.J., Guillén-Gosálbez G. (2017). Multi-objective optimization of rainfed and irrigated agricultural areas considering production and environmental criteria: a case study of wheat production in Spain. *Journal of Cleaner Production* 140, 816-830. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.06.099
70. Gelders, L. F., Pintelon, L. M., Van Wassenhove, L. N. (1987). A location-allocation problem in a large Belgian brewery. *European Journal of Operational Research*, 28(2), 196-206.
71. Geng Q., Ren Q., Nolan R.H., Wu P., Yu Q. (2019). Assessing China's agricultural water use efficiency in a green-blue water perspective: A study based on data

- envelopment analysis. *Ecological Indicators* 96, 329-335.
DOI:10.1016/j.ecolind.2018.09.011
72. Gephart J.A., Davis K.F., Emery K.A., Leach A.M., Galloway J.N., Pace M.L. (2016). The environmental cost of subsistence: Optimizing diets to minimize footprints. *Science of the Total Environment* 553, 120-127. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.02.050
 73. Ghani, N. E. A., Shariff, S. S. R., & Zahari, S. M. (2015, May). Optimization of location routing inventory problem with transshipment. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1660, No. 1, p. 050043). AIP Publishing.
 74. Giosa, I. D., Tansini, I. L., Viera, I. O. (2002). New assignment algorithms for the multi-depot vehicle routing problem. *Journal of the operational research society*, 53(9), 977-984.
 75. Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research*, 13(5), 533-549.
 76. Godoy-Durán Á., Galdeano- Gómez E., Pérez-Mesa J.C., Piedra-Muñoz L. (2017). Assessing eco-efficiency and the determinants of horticultural family-farming in southeast Spain. *Journal of Environmental Management* 204, 594-604.
DOI:10.1016/j.jenvman.2017.09.037
 77. Gomory, R. E. (1963). An algorithm for integer solutions to linear programs. *Recent advances in mathematical programming*, 64, 260-302.
 78. Gracia C., Velázquez-Martí B., Estornell J. (2014). An application of the vehicle routing problem to biomass transportation. *Biosystems Engineering* 124, 40-52.
DOI:10.1016/j.biosystemseng.2014.06.009
 79. Grados D., Schrevens E. (2019). Multidimensional analysis of environmental impacts from potato agricultural production in the Peruvian Central Andes. *Science of the Total Environment* 663, 927-934. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.01.414
 80. Guan, J., & Chen, K., (2012). Modeling the relative efficiency of national innovation systems. *Research Policy*, 41(1), 102-115.
 81. Gucevic J.P., Milicevic D.M., Vasovic O.P., Djokic V.A. (2016). Creation of land fund for the purpose of land management in the Republic of Serbia. *Survey Review* 48,346, 31-39.
 82. Güner S., Coşkun E. (2016). Determining the best performing benchmarks for transit routes with a multi-objective model: the implementation and a critique of the two-model approach. *Public Transport* 8,2, 205-224. DOI:10.1007/s12469-016-0125-z
 83. Hameed, I., Bochtis, D., Sørensen, C. A. G. (2013). An optimized field coverage planning approach for navigation of agricultural robots in fields involving obstacle areas. *International Journal of Advanced Robotic Systems*,10(231), 1-9.
 84. Hansen P., Mladenović N. (2001). "Variable neighborhood search: Principles and applications", *European Journal of Operational Research*, Vol. 130, pp. 449- 467.
 85. Hayashi, K. (2000). Multicriteria analysis for agricultural resource management: A critical survey and future perspectives. *European Journal of Operational Research* 122, 2, 486-500.
 86. Hayashi, K. (2007). Dealing with multiple objectives in agriculture. In Weintraub, A., Romero, C., BJORNDAL, T., EPSTEIN, R. (eds) *Handbook of Operations Research in Natural Resources*. Springer, New York, pp. 17-31.

87. He Q., Han J., Guan D., Mi Z., Zhao H., Zhang Q. (2018). The comprehensive environmental efficiency of socioeconomic sectors in China: An analysis based on a non-separable bad output SBM. *Journal of Cleaner Production* 176, 1091-1110. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.11.220
88. Herrera-Cáceres C., Pérez-Galarce F., Álvarez-Miranda E., Candia-Véjar A. (2017). Optimization of the harvest planning in the olive oil production: A case study in Chile. *Computers and Electronics in Agriculture* 141, 147-159. DOI:10.1016/j.compag.2017.07.017
89. Higgins, A. J., Miller, C. J., Archer, A. A., Ton, T., Fletcher, C. S., McAllister, R. R. J. (2010). Challenges of operations research practice in agricultural value chains. *Journal of the Operational Research Society*, 61(6), 964-973.
90. Hochbaum, D. S. (1996). *Approximation algorithms for NP-hard problems*. PWS Publishing Co.
91. Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press.
92. Hoo P.Y., Hashim H., Ho W.S. (2018). Opportunities and challenges: Landfill gas to biomethane injection into natural gas distribution grid through pipeline. *Journal of Cleaner Production* 175, 409-419. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.11.193
93. Hooker, J. N. (2015). Toward unification of exact and heuristic optimization methods. *International Transactions in Operational Research*, 22(1), 19-48.
94. Hu W., Toriello A., Dessouky M. (2018). Integrated inventory routing and freight consolidation for perishable goods. *European Journal of Operational Research* 271,2, 548-560. DOI:10.1016/j.ejor.2018.05.034
95. Hu Y., Xiao S., Wen J., Li J. (2019). An ANP-multi-criteria-based methodology to construct maintenance networks for agricultural machinery cluster in a balanced scorecard context. *Computers and Electronics in Agriculture* 158, 1-10. DOI:10.1016/j.compag.2019.01.031
96. Iocola I., Campanelli G., Diacono M., Leteo F., Montemurro F., Persiani A., Canali S. (2018). Sustainability assessment of organic vegetable production using a qualitative multi-attribute model. *Sustainability (Switzerland)* 10,10, -. DOI:10.3390/su10103820
97. Iraizoz, B., Rapun, M., Zabaleta, I. (2003). Assessing the technical efficiency of horticultural production in Navarra, Spain. *Agricultural Systems* 78, 3, 387-403.
98. Jakovljević S., (2006): *Optimizacija tehničko-tehnoloških sistema poljoprivredne avijacije Srbije*. (doktorska disertacija). Univerzitet u Beogradu.
99. Jakovljević, S., Đević, M. (2006). Optimization of technical and technological systems of agricultural aviation. *Agricultural Engineering*, vol. 31(2), pp.113-121.
100. Jana R.K., Sharma D.K., Chakraborty B. (2016). A hybrid probabilistic fuzzy goal programming approach for agricultural decision-making. *International Journal of Production Economics* 173, 134-141. DOI:10.1016/j.ijpe.2015.12.010
101. Jeong J.S., Ramírez-Gómez Á. (2018). Optimizing the location of a biomass plant with a fuzzy-DEcision-MAking Trial and Evaluation Laboratory (F-DEMATEL) and multi-criteria spatial decision assessment for renewable energy management and long-term sustainability. *Journal of Cleaner Production* 182, 509-520. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.12.072

102. JetBrains (2018) Python IDE for Professional Developers. Accessed 11 July 2018
103. Jiang Y., Hao K., Cai X., Ding Y. (2018). An improved reinforcement-immune algorithm for agricultural resource allocation optimization. *Journal of Computational Science* 27, 320-328. DOI:10.1016/j.jocs.2018.06.011
104. Jiang Y., Xu X., Huang Q., Huo Z., Huang G. (2016). Optimizing regional irrigation water use by integrating a two-level optimization model and an agro-hydrological model. *Agricultural Water Management* 178, 76-88. DOI:10.1016/j.agwat.2016.08.035
105. Jin, J., & Tang, L. (2010). Optimal coverage path planning for arable farming on 2D surfaces. *Transactions of the ASABE*, 53(1), 283.
106. Johnson, D. S. (1974). Approximation algorithms for combinatorial problems. *Journal of computer and system sciences*, 9(3), 256-278.
107. Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., ... & Keating, B. A. (2017). Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural systems*, 155, 240-254.
108. Karkazis, J., Boffey, T. B., Malevris, N. (1992). Location of facilities producing airborne pollution. *Journal of the Operational Research Society*, 313-320.
109. Khanjarpanah H., Pishvae M.S., Seyedhosseini S.M. (2017). A risk averse cross-efficiency data envelopment analysis model for sustainable switchgrass cultivation location optimization. *Industrial Crops and Products* 109, 514-522. DOI:10.1016/j.indcrop.2017.09.005
110. Kheybari S., Salehpour R. (2015). The optimization of the paddy field irrigation scheduling using mathematical programming. *Water Science and Technology: Water Supply* 15,5, 1048-1060. DOI:10.2166/ws.2015.062
111. Khoshroo A., Izadikhah M., Emrouznejad A. (2018). Improving energy efficiency considering reduction of CO2 emission of turnip production: A novel data envelopment analysis model with undesirable output approach. *Journal of Cleaner Production* 187, 605-615. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.03.232
112. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.
113. Kiryluk-Dryjska E., Beba P. (2018). Region-specific budgeting of rural development funds—An application study. *Land Use Policy* 77, 126-134. DOI:10.1016/j.landusepol.2018.05.029
114. Kobson, Konzorcijum biblioteka Srbije za objedinjenu nabavku (KoBSON). (2019). preuzeto sa sajta <http://kobson.nb.rs/kobson.82.html> tokom perioda mart-jun 2019.
115. Kočišová K. (2015). Application of the DEA on the measurement of efficiency in the EU countries. *Agricultural Economics (Czech Republic)* 61,2, 51-62. DOI:10.17221/107/2014-AGRICECON
116. Kocjančič T., Debeljak M., Žgajnar J., Juvančič L. (2018). Incorporation of emergy into multiple-criteria decision analysis for sustainable and resilient structure of dairy farms in Slovenia. *Agricultural Systems* 164, 71-83. DOI:10.1016/j.agsy.2018.03.005
117. Kostić, M. M., Rakić, D. Z., Savin, L. Đ., Dedović, N. M., Simikić, M. Đ. (2016). Application of an original soil tillage resistance sensor in spatial prediction of selected soil properties. *Computers and electronics in agriculture*, 127, 615-624.

118. Krčevinac, S., Čangalović, M., Kovačević-Vujčić, V., Matrić, M., Vujošević, M. (2013). Operaciona istraživanja 1, Fakultet organizacionih nauka, Beograd.
119. Kumar S., Panneerselvam R. (2012). A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants. *Intelligent Information Management*, Vol. 4 No. 3, pp. 66-74. doi: 10.4236/iim.2012.43010.
120. Kung C.-C. (2018). A dynamic framework of sustainable development in agriculture and bioenergy. *Agricultural Economics (Czech Republic)* 64,10, 445-455. DOI:10.17221/281/2017-AGRICECON
121. Lal, R. (2004). Carbon emission from farm operations. *Environment international*, 30(7), 981-990.
122. Land, A. H. Doig, A. G. (1960). An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 497-520.
123. Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J. Y., Semet, F. (2000). Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International transactions in operational research*, 7(4-5), 285-300.
124. Laporte, G., Semet, F. (2001). Classical heuristics for the capacitated VRP. In *The vehicle routing problem* (pp. 109-128). Society for Industrial and Applied Mathematics.
125. Lara, P. Romero, C., (1994). Relaxation of nutrient requirements on livestock rations through interactive multigoal programming. *Agricultural Systems* 45, 4, 443-453.
126. Li M., Fu Q., Singh V. P., Ma M., Liu X. (2017a). An intuitionistic fuzzy multi-objective non-linear programming model for sustainable irrigation water allocation under the combination of dry and wet conditions. *Journal of Hydrology* 555, 80-94. DOI:10.1016/j.jhydrol.2017.09.055
127. Li N., Jiang Y., Mu H., Yu Z. (2018). Efficiency evaluation and improvement potential for the Chinese agricultural sector at the provincial level based on data envelopment analysis (DEA). *Energy* 164, 1145-1160. DOI:10.1016/j.energy.2018.08.150
128. Li Q., Hu G., Jubery T.Z., Ganapathysubramanian B. (2017b). A farm-level precision land management framework based on integer programming. *PLoS ONE* 12,3, -. DOI:10.1371/journal. Pone.0174680
129. Lijó L., Lorenzo-Toja Y., González-García S., Bacenetti J., Negri M., Moreira M.T. (2017). Eco-efficiency assessment of farm-scaled biogas plants. *Bioresource Technology* 237, 146-155. DOI:10.1016/j.biortech.2017.01.055
130. Lin E.T.J., Lan L.W., Hsu C.S.T. (2010). Assessing the on-road route efficiency for an air-express courier. *Journal of Advanced Transportation* 44,4, 256-266. DOI:10.1002/atr.125
131. Lucas, M. T., Chhajer, D. (2004). Applications of location analysis in agriculture: a survey. *Journal of the Operational Research Society*, 55(6), 561-578.
132. Ma L., Zhang Y., Ma M., Fan Y., Zhao H. (2018). Model of combine trans-regional operation scheduling. *International Agricultural Engineering Journal* 27,3, 52-60.
133. Mahmud M.S.A., Abidin M.S.Z., Mohamed Z. (2018). Solving an agricultural robot routing problem with binary particle swarm optimization and a genetic algorithm. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* 7,5, 521-527. DOI:10.18178/ijmerr.7.5.521-527

134. Mahmud M.S.A., Abidin M.S.Z., Mohamed Z., Rahman M.K.I.A., Iida M. (2019). Multi-objective path planner for an agricultural mobile robot in a virtual greenhouse environment. *Computers and Electronics in Agriculture* 157, 488-499.
DOI:10.1016/j.compag.2019.01.016
135. Marchamalo, M. Romero, C., (2007). Participatory decision-making in land use planning: An application in Costa Rica. *Ecological Economics* 63, 4, 740–748.
136. Marko O., Crnojević V., Pavlović D., Deb K. (2019). Optimisation of crop configuration using NSGA-III with categorical genetic operators. *GECCO 2019 Companion - Proceedings of the 2019 Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, 223-224. DOI:10.1145/3319619.3321912
137. Martić, M., (1999). Analiza obavijenih podataka sa primenama, Doktorska disertacija. Beograd: Srbija.
138. Martić, M., Savić, G. (2001). An application of DEA for comparative analysis and ranking of regions in Serbia with regards to social-economic development. *European Journal of Operational Research*, 132(2), 343-356.
139. Masuda K. (2018). Energy efficiency of intensive rice production in Japan: An application of data envelopment analysis. *Sustainability (Switzerland)* 10,1, -. DOI:10.3390/su10010120
140. Melo I.C., Junior P.N.A., Perico A.E., Guzman M.G.S., Rebelatto D.A.N. (2018). Benchmarking freight transportation corridors and routes with data envelopment analysis (DEA). *Benchmarking* 25,2, 713-742. DOI:10.1108/BIJ-11-2016-0175
141. Mersheeva, V., & Friedrich, G., (2012). Routing of Multiple Micro UAVs for Rescue Missions. na.,
https://www.researchgate.net/profile/Vera_Mersheeva/publication/232723755_Routing_of_Multiple_Micro_UAVs_for_Rescue_Missions/links/0fcfd5090261b2f303000000.pdf
142. Mešić T., Andrić Gušavac B., Panić B., Popović M., Marinović M., (2018). Karbonski otisak u lancima snabdevanja. 13. Međunarodno savetovanje Rizik i bezbednosni inženjering, Kopaonik, 09 - 11. januar 2018, pp. 39-45, ISBN 978-86-6211-112-8
143. Mghirbi O., Le Grusse P., Fabre J., Mandart E., Bord J.-P. (2017). OptiPhy, a technical-economic optimisation model for improving the management of plant protection practices in agriculture: a decision-support tool for controlling the toxicity risks related to pesticides. *Environmental Science and Pollution Research* 24,8, 6951-6972.
DOI:10.1007/s11356-016-6775-1
144. Mileusnić Z.I., Petrović D.V., Dević M.S. (2010). Comparison of tillage systems according to fuel consumption. *Energy* 35,1, 221-228.
DOI:10.1016/j.energy.2009.09.012
145. Mileusnić, Z., Tanasijević, M., Miodragović, R., Dimitrijević, A., Urošević, M. (2019). Tractor Lifetime Assessment Analysis. *Journal of Agricultural Sciences*, 25(2), 197-204.
146. Miller, C. E., Tucker, A. W., Zemlin, R. A. (1960). Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM (JACM)*, 7(4), 326-329.

147. Miodragović, R., Tanasijević, M., Mileusnić, Z., Jovančić, P. (2012). Effectiveness assessment of agricultural machinery based on fuzzy sets theory. *Expert Systems with Applications*, 39(10), 8940-8946.
148. Mirt, D.. (2015). *Uticaj Savremene industrije na okoliš*, Ekonomski fakultet, Pula.
149. Mirza F.M., Najam N., Mehdi M., Ahmad B. (2015). Determinants of technical efficiency of wheat farms in Pakistan. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 52,2, 577-582.
150. Montgomery B., Dragičević S., Dujmović J., Schmidt M. (2016). A GIS-based Logic Scoring of Preference method for evaluation of land capability and suitability for agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 124, 340-353.
DOI:10.1016/j.compag.2016.04.013
151. Moreno-Moreno J.-J., Velasco Morente F., Sanz Diaz M.T. (2018). Assessment of the operational and environmental efficiency of agriculture in Latin America and the Caribbean. *Agricultural Economics (Czech Republic)* 64,2, 74-88.
DOI:10.17221/260/2016-AGRICECON
152. Mosleh Z., Salehi M.H., Amini Fasakhodi A., Jafari A., Mehnatkesh A., Esfandiarpoor Borujeni I. (2017). Sustainable allocation of agricultural lands and water resources using suitability analysis and mathematical multi-objective programming. *Geoderma* 303, 52-59. DOI:10.1016/j.geoderma.2017.05.015
153. Moutinho V., Madaleno M., Macedo P., Robaina M., Marques C. (2018a). Efficiency in the European agricultural sector: environment and resources. *Environmental Science and Pollution Research* 25,18, 17927-17941. DOI:10.1007/s11356-018-2041-z
154. Moutinho V., Robaina M., Macedo P. (2018b). Economic-environmental efficiency of European agriculture – A generalized maximum entropy approach. *Agricultural Economics (Czech Republic)* 64,10, 423-435. DOI:10.17221/45/2017-AGRICECON
155. Mu L., Fang L., Wang H., Chen L., Yang Y., Qu X.J., Wang C.Y., Yuan Y., Wang S.B., Wang Y.N. (2016). Exploring Northwest China's agricultural water-saving strategy: Analysis of water use efficiency based on an SE-DEA model conducted in Xi'an, Shaanxi Province. *Water Science and Technology* 74,5, 1106-1115.
DOI:10.2166/wst.2016.286
156. Muhtarom A., Haryanto T., Istifadah N. (2019). Analysis of productivity efficiency of food plant agriculture in East Java based on DEA index. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 10,1, 420-443.
157. Murtaza G., Thapa G.B. (2017). Factors affecting technical efficiency of small-scale apple farms in Balochistan Plateau, Pakistan. *Journal of Mountain Science* 14,4, 782-794. DOI:10.1007/s11629-016-3937-z
158. Musakwa W. (2018). Identifying land suitable for agricultural land reform using GIS-MCDA in South Africa. *Environment, Development and Sustainability* 20,5, 2281-2299. DOI:10.1007/s10668-017-9989-6
159. Nabavi-Pelesaraei A., Hosseinzadeh-Bandbafha H., Qasemi-Kordkheili P., Kouchaki-Penchah H., Riahi-Dorcheh F. (2016). Applying optimization techniques to improve of energy efficiency and GHG (greenhouse gas) emissions of wheat production. *Energy* 103, 672-678. DOI:10.1016/j.energy.2016.03.003

160. Nambiar, J. M., Gelders, L. F., Van Wassenhove, L. N. (1981). A large scale location-allocation problem in the natural rubber industry. *European Journal of Operational Research*, 6(2), 183-189.
161. Naudin K., Bruelle G., Salgado P., Penot E., Scopel E., Lubbers M., de Ridder N., Giller K.E. (2015). Trade-offs around the use of biomass for livestock feed and soil cover in dairy farms in the Alaotra lake region of Madagascar. *Agricultural Systems* 134, 36-47. DOI:10.1016/j.agsy.2014.03.003
162. Naz M.N., Naeem M., Iqbal M., Imran M. (2017). Economically efficient and environment friendly energy management in rural area. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 9,1, -. DOI:10.1063/1.4973713
163. Neji H.B.B., Turki S.Y. (2015). GIS - based multicriteria decision analysis for the delimitation of an agricultural perimeter irrigated with treated wastewater. *Agricultural Water Management* 162, 78-86. DOI:10.1016/j.agwat.2015.08.020
164. Nguyen H.T., Aviso K.B., Le D.Q., Kojima N., Tokai A. (2018). A linear programming input–output model for mapping low-carbon scenarios for Vietnam in 2030. *Sustainable Production and Consumption* 16, 134-140. DOI:10.1016/j.spc.2018.07.004
165. Nidumolu U.B., Lubbers M., Kanellopoulos A., van Ittersum M.K., Kadiyala D.M., Sreenivas G. (2016). Engaging farmers on climate risk through targeted integration of bio-economic modelling and seasonal climate forecasts. *Agricultural Systems* 149, 175-184. DOI:10.1016/j.agsy.2016.09.011
166. Nor N.A.M., Man S.H.C., Baharulrazi N., Yunus N.A. (2018). Optimisation of model-based fertiliser formulation for sustainable agriculture. *Chemical Engineering Transactions* 63, 49-54. DOI:10.3303/CET1863009
167. Nowak A., Kijek T., Domańska K. (2015). Technical efficiency and its determinants in the European Union agriculture. *Agricultural Economics (Czech Republic)* 61,6, 275-283. DOI:10.17221/200/2014-AGRICECON
168. Núñez-López J.M., Hernández-Calderón O.M., Ponce-Ortega J.M., Cervantes-Gaxiola M.E., Rubio-Castro E. (2019). Optimal Design of Sustainable Agricultural Water Networks. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 7,1, 440-457. DOI:10.1021/acssuschemeng.8b03901
169. Nuppenau E.-A. (2018). Soil fertility management by transition matrices and crop rotation: On spatial and dynamic aspects in programming of ecosystem services. *Sustainability (Switzerland)* 10,7, -. DOI:10.3390/su10072213
170. Pacini, C., Giesen, G., Wossink, A., Omodei-Zorini, L., Huirne, R., (2004). The EU's Agenda 2000 reform and the sustainability of organic farming in Tuscany: Ecological-economic modeling at field and farm level. *Agricultural Systems* 80, 2, 171–197.
171. Pandey, D., & Agrawal, M. (2014). Carbon footprint estimation in the agriculture sector. In *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 1* (pp. 25-47). Springer Singapore.
172. Pang J., Chen X., Zhang Z., Li H. (2016). Measuring eco-efficiency of agriculture in China. *Sustainability (Switzerland)* 8,4, -. DOI:10.3390/su8040398
173. Pap Z. (2008). Crop rotation constraints in agricultural production planning. *SISY 2008 - 6th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*, DOI:10.1109/SISY.2008.4664951

174. Penà, T., Castrodeza, C., Lara, P., (2007). Environmental criteria in pig diet formulation with multi-objective fractional programming. In Weintraub, A., Romero, C., Bjorndal, T., Epstein, R. (eds) *Handbook of Operations Research in Natural Resources*. Springer, New York, pp. 53–68.
175. Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koç, E., Otri, S., Rahim, S., Zaidi, M. (2006). The bees algorithm—a novel tool for complex optimisation problems. In *Intelligent Production Machines and Systems* (pp. 454-459). Elsevier Science Ltd.
176. Pieralli S. (2017). Introducing a new non-monotonic economic measure of soil quality. *Soil and Tillage Research* 169, 92-98. DOI:10.1016/j.still.2017.01.015
177. Pokhrel A., Soni P. (2017). Performance analysis of different rice-based cropping systems in tropical region of Nepal. *Journal of Environmental Management* 197, 70-79. DOI:10.1016/j.jenvman.2017.03.035
178. Pooley, J. (1994). Integrated production and distribution facility planning at Ault Foods. *Interfaces*, 24(4), 113-121.
179. Prišenk J., Turk J., Rozman Č., Borec A., Zrakić M., Pažek K. (2014). Advantages of combining linear programming and weighted goal programming for agriculture application. *Operational Research* 14,2, 253-260. DOI:10.1007/s12351-014-0159-4
180. Priya N., Geetha G. (2017). Dynamic programming based resource optimization in agricultural big data for crop yield maximization. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 14,9, 4464-4470. DOI:10.1166/jctn.2017.6762
181. Qureshi M.R.N., Singh R.K., Hasan M.A. (2018). Decision support model to select crop pattern for sustainable agricultural practices using fuzzy MCDM. *Environment, Development and Sustainability* 20,2, 641-659. DOI:10.1007/s10668-016-9903-7
182. Razzaq A., Qing P., Naseer M.A.U.R., Abid M., Anwar M., Javed I. (2019). Can the informal groundwater markets improve water use efficiency and equity? Evidence from a semi-arid region of Pakistan. *Science of the Total Environment* 666, 849-857. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.02.266
183. Rehman, T. Romero, C., (1984). Multiple-criteria decision-making techniques and their role in livestock ration formulation. *Agricultural Systems* 15, 1, 23–49.
184. Rentizelas A., Shpakova A., Mašek O. (2018). Designing an optimised supply network for sustainable conversion of waste agricultural plastics into higher value products. *Journal of Cleaner Production* 189, 683-700. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.04.104
185. Robert M., Bergez J.-E., Thomas A. (2018). A stochastic dynamic programming approach to analyze adaptation to climate change – Application to groundwater irrigation in India. *European Journal of Operational Research* 265,3, 1033-1045. DOI:10.1016/j.ejor.2017.08.029
186. Rocco C.D., Morabito R. (2016). Production and logistics planning in the tomato processing industry: A conceptual scheme and mathematical model. *Computers and Electronics in Agriculture* 127, 763-774. DOI:10.1016/j.compag.2016.08.002
187. Rodriguez-Verde I., Regueiro L., Lema J.M., Carballa M. (2018). Blending based optimisation and pretreatment strategies to enhance anaerobic digestion of poultry manure. *Waste Management* 71, 521-531. DOI:10.1016/j.wasman.2017.11.002
188. Romero, C. Rehman, T., (2003). *Multiple Criteria Analysis for Agricultural Decisions*. Elsevier, Amsterdam.

189. Romero, C., (2000). Risk programming for agricultural resource allocation: A multidimensional risk approach. *Annals of Operations Research* 94, 1–4, 57–68.
190. Rubio-Castro E., Ponce-Ortega J.M., Cervantes-Gaxiola M.E., Hernández-Calderón O.M., Ortiz-del-Castillo J.R., Milán-Carrillo J., Hernández-Martínez J.F., Meza-Contreras J.A. (2016). Optimal design of integrated agricultural water networks. *Computers and Chemical Engineering* 84, 63-82.
DOI:10.1016/j.compchemeng.2015.08.006
191. Rybaczewska-Błazejowska M., Gierulski W. (2018). Eco-efficiency evaluation of agricultural production in the EU-28. *Sustainability (Switzerland)* 10,12, -.
DOI:10.3390/su10124544
192. Rybaczewska-Błazejowska M., Masternak-Janus A. (2018). Eco-efficiency assessment of Polish regions: Joint application of life cycle assessment and data envelopment analysis. *Journal of Cleaner Production* 172, 1180-1192.
DOI:10.1016/j.jclepro.2017.10.204
193. Sarker B.R., Wu B., Paudel K. P. (2018). Optimal number and location of storage hubs and biogas production reactors in farmlands with allocation of multiple feedstocks. *Applied Mathematical Modelling* 55, 447-465. DOI:10.1016/j.apm.2017.11.010
194. Sarker B.R., Wu B., Paudel K. P. (2019). Modeling and optimization of a supply chain of renewable biomass and biogas: Processing plant location. *Applied Energy* , 343-355.
DOI:10.1016/j.apenergy.2019.01.216
195. Savić G., (2012). Komparativna analiza efikasnosti u finansijskom sektoru, Doktorska disertacija, Fakultet organizacionih nauka u Beogradu.
196. Schneider, U. McCarl, B., (2003). The Agricultural Sector and Greenhouse Gas Mitigation Model (ASMGHG). Department of Agricultural Economics, Texas A&M University, Galveston, USA.
197. Selim S., Koc-San D., Selim C., San B.T. (2018). Site selection for avocado cultivation using GIS and multi-criteria decision analyses: Case study of Antalya, Turkey. *Computers and Electronics in Agriculture* 154, 450-459.
DOI:10.1016/j.compag.2018.09.038
198. Seyyedhasani H., Dvorak J.S. (2017). Using the Vehicle Routing Problem to reduce field completion times with multiple machines. *Computers and Electronics in Agriculture* 134, 142-150. DOI:10.1016/j.compag.2016.11.010
199. Seyyedhasani H., Dvorak J.S. (2018a). Dynamic rerouting of a fleet of vehicles in agricultural operations through a Dynamic Multiple Depot Vehicle Routing Problem representation. *Biosystems Engineering* 171, 63-77.
DOI:10.1016/j.biosystemseng.2018.04.003
200. Seyyedhasani H., Dvorak J.S. (2018b). Reducing field work time using fleet routing optimization. *Biosystems Engineering* 169, 1-10.
DOI:10.1016/j.biosystemseng.2018.01.006
201. Shao Y., Sun C. (2016). Performance evaluation of China's air routes based on network data envelopment analysis approach. *Journal of Air Transport Management* 55, 67-75.
DOI:10.1016/j.jairtraman.2016.01.006

202. Singh A. (2015). Land and water management planning for increasing farm income in irrigated dry areas. *Land Use Policy* 42, 244-250. DOI:10.1016/j.landusepol.2014.08.006
203. Singh A. (2017). Optimal allocation of water and land resources for maximizing the farm income and minimizing the irrigation-induced environmental problems. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 31,5, 1147-1154. DOI:10.1007/s00477-016-1326-3
204. Singh A., Panda S.N., Saxena C.K., Verma C.L., Uzokwe V.N.E., Krause P., Gupta S.K. (2016). Optimization modeling for conjunctive use planning of surface water and groundwater for irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 142,3, -. DOI:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000977
205. Singh P., Singh A.K., Singh P., Kumari S., Sangaiah A.K. (2018). Multimodal data modeling for efficiency assessment of social priority based urban bus route transportation system using GIS and data envelopment analysis. *Multimedia Tools and Applications* , 1-19. DOI:10.1007/s11042-018-6147-6
206. Smith L.G., Jones P.J., Kirk G.J.D., Pearce B.D., Williams A.G. (2018). Modelling the production impacts of a widespread conversion to organic agriculture in England and Wales. *Land Use Policy* 76, 391-404. DOI:10.1016/j.landusepol.2018.02.035
207. Sokolovic D., Radovic J., Lusic Z., Simic A. (2014). Agriculture, forage crops and grasslands in Serbia: Production and breeding. *Quantitative Traits Breeding for Multifunctional Grasslands and Turf* , 17-30. DOI:
208. Sorensen, C. G., Bochtis, D. D. (2010). Conceptual model of fleet management in agriculture. *Biosystems Engineering*, 105(1), 41-50.
209. Soto-Silva W.E., González-Araya M.C., Oliva-Fernández M.A., Plà-Aragonés L.M. (2017). Optimizing fresh food logistics for processing: Application for a large Chilean apple supply chain. *Computers and Electronics in Agriculture* 136, 42-57. DOI:10.1016/j.compag.2017.02.020
210. Souza G.D.S., Gomes E.G. (2015). Improving agricultural economic efficiency in Brazil. *International Transactions in Operational Research* 22,2, 329-337. DOI:10.1111/itor.12055
211. Soysal M., Bloemhof-Ruwaard J.M., Van Der Vorst J.G.A.J. (2014). Modelling food logistics networks with emission considerations: The case of an international beef supply chain. *International Journal of Production Economics* 152, 57-70. DOI:10.1016/j.ijpe.2013.12.012
212. Srivastava P., Singh R.M. (2017). Agricultural land allocation for crop planning in a canal command area using fuzzy multiobjective goal programming. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 143,6, -. DOI:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001175
213. St John R., Öhman K., Tóth S.F., Sandström P., Korosuo A., Eriksson L.O. (2016). Combining spatiotemporal corridor design for reindeer migration with harvest scheduling in Northern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 31,7, 655-663. DOI:10.1080/02827581.2016.1195441

214. Staniszewski J. (2018). Attempting to measure sustainable intensification of agriculture in countries of the European Union. *Journal of Environmental Protection and Ecology* 19,2, 949-957. DOI:
215. Stich J., Ramachandran S., Hamacher T., Stimming U. (2017). Techno-economic estimation of the power generation potential from biomass residues in Southeast Asia. *Energy* 135, 930-942. DOI:10.1016/j.energy.2017.06.162
216. Surekha, P., & Sumathi, S. (2011). Solution to multi-depot vehicle routing problem using genetic algorithms. *World Applied Programming*, 1(3), 118-131.
217. Talukder B., Blay-Palmer A., Hipel K.W., vanLoon G.W. (2017). Elimination method of multi-criteria decision analysis (MCDA): A simple methodological approach for assessing agricultural sustainability. *Sustainability (Switzerland)* 9,2, -. DOI:10.3390/su9020287
218. Talukder B., Hipel K.W., vanLoon G.W. (2018). Using multi-criteria decision analysis for assessing sustainability of agricultural systems. *Sustainable Development* 26,6, 781-799. DOI:10.1002/sd.1848
219. Todorović, S. Z. (2018). Ekonomska efikasnost različitih modela ratarske proizvodnje na porodičnim gazdinstvima (Doctoral dissertation, Univerzitet u Beogradu- Poljoprivredni fakultet).
220. Toma P., Miglietta P. P., Zurlini G., Valente D., Petrosillo I. (2017). A non-parametric bootstrap-data envelopment analysis approach for environmental policy planning and management of agricultural efficiency in EU countries. *Ecological Indicators* 83, 132-143. DOI:10.1016/j.ecolind.2017.07.049
221. Toth, P., Vigo, D. (2001). The vehicle routing problem. *Society for Industrial and Applied Mathematics*.
222. Toth, P., Vigo, D. (Eds.). (2014). *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
223. Tozer, P. Stokes, J., (2001). A multi-objective programming approach to feed ration balancing and nutrient management. *Agricultural Systems* 67, 3, 201–215.
224. Udias A., Pastori M., Dondeynaz C., Carmona Moreno C., Ali A., Cattaneo L., Cano J. (2018). A decision support tool to enhance agricultural growth in the Mékrou river basin (West Africa). *Computers and Electronics in Agriculture* 154, 467-481. DOI:10.1016/j.compag.2018.09.037
225. Varela-Candamio L., Calvo N., Novo-Corti I. (2018). The role of public subsidies for efficiency and environmental adaptation of farming: A multi-layered business model based on functional foods and rural women. *Journal of Cleaner Production* 183, 555-565. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.02.109
226. Vasu D., Srivastava R., Patil N.G., Tiwary P., Chandran P., Kumar Singh S. (2018). A comparative assessment of land suitability evaluation methods for agricultural land use planning at village level. *Land Use Policy* 79, 146-163. DOI:10.1016/j.landusepol.2018.08.007
227. Vlontzos G., Niavis S., Pardalos P. (2017). Testing for environmental Kuznets curve in the EU agricultural sector through an Eco-(in)efficiency index. *Energies* 10,12, -. DOI:10.3390/en10121992

228. Vujošević, M. (2012). Metode optimizacije u inženjerskom menadžmentu. Akademija inženjerskih nauka Srbije i Fakultet organizacionih nauka Univerziteta u Beogradu, 161.
229. Vujošević, M., Stanojević, M., Mladenović, N. (1996). Metode optimizacije: mrežni, lokacijski i višekriterijumski modeli. Društvo operacionih istraživača Jugoslavije.
230. Wang, Z., Zlatanova, S., Moreno, A., Van Oosterom, P., & Toro, C. (2014). A data model for route planning in the case of forest fires. *Computers & Geosciences*, 68, 1-10.
231. Ward J.D., Ward P.J., Mantzioris E., Saint C. (2014). Optimising diet decisions and urban agriculture using linear programming. *Food Security* 6,5, 701-718.
DOI:10.1007/s12571-014-0374-0
232. Waugh, F., (1951). The minimum-cost dairy feed. *Journal of Farm Economics* 33, 3, 299–310.
233. Weintraub, A., & Romero, C. (2006). Operations research models and the management of agricultural and forestry resources: a review and comparison. *Interfaces*, 36(5), 446-457.
234. Weintraub, A., Romero, C. (2006). Operations research models and the management of agricultural and forestry resources: a review and comparison. *Interfaces*, 36(5), 446-457.
235. Wiedmann, T., (2006), Carbon footprint and input-output analysis - an introduction. *Economic System Research*, vol. 21, str. 175-186.
236. Wu, T. H., Low, C., Bai, J. W. (2002). Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems. *Computers & Operations Research*, 29(10), 1393-1415.
237. Yan J. (2019). Spatiotemporal analysis for investment efficiency of China's rural water conservancy based on DEA model and Malmquist productivity index model. *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 21, 56-71.
DOI:10.1016/j.suscom.2018.11.004
238. Yan Y., Guo X., Liu C. (2010). Performance evaluation of bus transit routes based on the BCC model. *Proceedings of the Conference on Traffic and Transportation Studies, ICTTS 383*, 705-711. DOI:10.1061/41123(383)67
239. Yang, W. (2017). Supply Chain Management of Agricultural Products Based on Competitive Neural Network and SVM. *Boletín Técnico*, 55(4), 492-499.
240. You P.-S., Hsieh Y.-C. (2017). A computational approach for crop production of organic vegetables. *Computers and Electronics in Agriculture* 134, 33-42.
DOI:10.1016/j.compag.2016.11.003
241. Yu M.-M., Chen P.-C. (2011). Measuring air routes performance using a fractional network data envelopment analysis model. *Central European Journal of Operations Research* 19,1, 81-98. DOI:10.1007/s10100-009-0131-1
242. Zekić S., Kleut Ž., Matkovski B., Đokić D. (2018). Determining agricultural impact on environment: Evidence for eu-28 and Serbia. *Outlook on Agriculture* 47,2, 116-124.
DOI:10.1177/0030727018768016
243. Zekri, S. Boughanmi, H., (2007). Modeling the interactions between agriculture and the environment. In (Weintraub, A. i dr., 2007)

244. Zhang C., Guo P. (2018). An inexact CVaR two-stage mixed-integer linear programming approach for agricultural water management under uncertainty considering ecological water requirement. *Ecological Indicators* 92, 342-353. DOI:10.1016/j.ecolind.2017.02.018
245. Zhang C., Li M., Guo P. (2017). Two-stage stochastic chance-constrained fractional programming model for optimal agricultural cultivation scale in an arid area. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 143,9, -. DOI:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001216
246. Zhang K., Xu ME Y., Sun D. (2018). A mixed frontier model for urban bus performance evaluation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport* 171,2, 65-74. DOI:10.1680/jtran.15.00123
247. Zhang L., Wang W. (2018). Study on evaluation of rural financial ecological environment based on AHP-DEA model. *Journal of Advanced Oxidation Technologies* 21,2, -. DOI:10.26802/jaots.2018.09832
248. Zhang X., Jiang L., Qiu X., Qiu J., Wang J., Zhu Y. (2016). An improved method of delineating rectangular management zones using a semivariogram-based technique. *Computers and Electronics in Agriculture* 121, 74-83. DOI:10.1016/j.compag.2015.11.016
249. Zhong J., Yu T.E., Clark C.D., English B.C., Larson J.A., Cheng C.-L. (2018). Effect of land use change for bioenergy production on feedstock cost and water quality. *Applied Energy* 210, 580-590. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.09.070
250. Zhu W., Yang X., Preston J. (2016). Efficiency measurement of bus routes and exogenous operating environment effects on efficiency. *Transportation Planning and Technology* 39,5, 464-483. DOI:10.1080/03081060.2016.1174364
251. Zulvia, F. E., Kuo, R. J., Hu, T. L. (2012). Solving CVRP with time window, fuzzy travel time and demand via a hybrid ant colony optimization and genetic algorithm. In *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation* (pp. 1-8). IEEE.
252. Zurada, J. M. (1992). *Introduction to artificial neural systems* (Vol. 8). St. Paul: West publishing company.

Biografija i bibliografija

Bisera Andrić Gušavac rođena je 17.05.1977. godine u Beogradu. Osnovnu i srednju školu završila je u Beogradu. Fakultet organizacionih nauka upisala je 1997. godine. Diplomirala je 2003. godine na odseku za Industrijsko inženjerstvo sa srednjom ocenom 8.38. Diplomski rad na temu „Primena linearnog programiranja na određivanje optimalnog asortimana proizvodnje u hemijskoj industriji” odbranila je pod mentorstvom prof. dr Milana Martića, sa ocenom 10.

Bisera Andrić Gušavac je kao stipendista francuske vlade, od 2003. do 2005. godine pohađala Specijalizovan master Industrijskog inženjerstva u organizaciji prestižnog francuskog fakulteta École Centrale Paris, na francuskom jeziku. Ove studije je završila specijalističkim radom „Upravljanje zalihama sirovina u preduzeću Politika a.d.” (na francuskom i srpskom jeziku) sa ocenom 17,00/20,00.

Nakon toga, 2005. godine upisuje magistarske studije na Fakultetu organizacionih nauka, a 2010. godine se prebacuje na doktorske studije, izorno područje Operaciona istraživanja.

Bisera Andrić Gušavac je počela da radi 19.11.2003. godine na Fakultetu organizacionih nauka u Laboratoriji za operaciona istraživanja „Jovan Petrić” kao demonstrator na predmetu Operaciona istraživanja i stručni saradnik u Laboratoriji, a kasnije je počela da drži vežbe iz predmeta Operaciona istraživanja 1 i Operaciona istraživanja 2. Prvi put je birana u zvanje asistenta 1. februara 2011., a drugi put 1. februara 2015. godine. Aktivno je, zajedno sa predmetnim profesorima, učestvovala u razvoju programa novog izbornog predmeta na osnovnim akademskim studijama Optimizacija korišćenja prirodnih resursa, a uključena je u nastavu predmeta Poslovna analitika i optimizacija na Master studijama. Učestvuje u realizaciji nastave na predmetu Metode predviđanja i odlučivanja na master studijama Računarstvo u društvenim naukama na Univerzitetu u Beogradu, koje su razvijene kao rezultat Tempus projekta INCOMING.

Učestvovala je u realizaciji sledećih naučnoistraživačkih i stručnih projekata:

- Pešaljević M., Suknović M., Trajković A., Andrić B. i drugi: „Uvođenje sistema menadžmenta kvaliteta u Politiku a.d., Fakultet organizacionih nauka, Beograd, 2010.
- Projekat MNTR broj 13016 „Napredno planiranje i raspoređivanje”, 2008 -2010.

- Tempus projekat INCOMING (Interdisciplinary Curricula in Computing to Meet Labor Market Needs), broj projekta 530155-TEMPUS-1-2012-1-EE-TEMPUS-JPCR, 2014-2015.
- Distribution Network Optimization, Support to SME Development in Serbia Fund of the European Union Contract Number C31178/ECBS-2014-08-09/02, 2014-2015.

Bila je član Organizacionih odbora na sledećim domaćim i međunarodnim simpozijumima:

- X međunarodni simpozijum Fakulteta organizacionih nauka SymOrg, Zlatibor 2006. godine.
- XXXIV Simpozijum o operacionim istraživanjima SymOpIs, Beograd - Zlatibor 2007.
- Balkanska konferencija o operacionim istraživanjima BALCOR, Beograd - Zlatibor 2007.
- XL Simpozijum o operacionim istraživanjima SymOpIs 2013, Beograd - Zlatibor 2013.
- XI Balkanska konferencija o operacionim istraživanjima, BALCOR 2013, Beograd - Zlatibor 2013.
- XVI međunarodni simpozijum Fakulteta organizacionih nauka SymOrg, Zlatibor 2016.
- XIII Balkanska konferencija o operacionim istraživanjima, BALCOR 2018, Beograd 2018.
- XLVI Simpozijum o operacionim istraživanjima SymOpIs 2019, Kladovo 2019.

U studentskim anketama za vrednovanje pedagoškog rada saradnika Bisera Andrić Gušavac svake školske godine je ocenjena visokim ocenama (u 2015. godini je nagrađena kao jedan od pet najbolje ocenjenih asistenata - prosečne ocene 4,93/5,00 i 4,86/5,00).

Bisera Andrić Gušavac je autor ili koautor više od 40 radova koji su većinom objavljeni na međunarodnim i na konferencijama sa međunarodnim učešćem. Koautor je zbirke zadataka „Operaciona istraživanja 2” i zbirke zadataka i praktikuma „Operaciona istraživanja 1” koje se koriste kao udžbenici na istoimenim predmetima. Oba udžbenika koriste se i na predmetima Master studija.

Knjige i poglavlja u knjigama

- Martić M., Stanojević M., Makajić-Nikolić D., Kuzmanović M., Savić G., Panić B., **Andrić Gušavac B.**: Operaciona istraživanja 2, Zbirka zadataka, FON, Beograd, 2009. Strana 231. Recenzenti: prof. dr Mirko Vujošević, prof. dr Mirjana Čangalović, ISBN: 978-86-7680-210-7

- Martić M., Stanojević M., Makajić-Nikolić D., Savić G., Kuzmanović M., Panić B., **Andrić Gušavac B.**: Operaciona istraživanja 1, Zbirka zadataka sa praktikumom, FON, Beograd, 2015. Recenzenti: prof. dr Mirjana Čangalović, prof. dr Vera Kovačević-Vujčić, prof. dr Mirko Vujošević

Radovi u tematskom zborniku vodećeg međunarodnog značaja (M13)

- Popović M.J., **Andrić Gušavac B.Š.**, Katić A.S. (2020) Multiattribute Methods as a Means for Solving Ecological Problems in Water Resources—Lake Pollution. In: Mladenović N., Sifaleras A., Kuzmanović M. (eds) Advances in Operational Research in the Balkans. Springer Proceedings in Business and Economics. Springer, Cham

Poglavlje u monografiji međunarodnog značaja (M14)

- Kuzmanović, M., **Andrić Gušavac, B.**, Martić, M., "Assessing Customer Value for New Products using conjoint analysis", 18 Chapter in: K. Grzybowska, M.K. Wyrwicka (Eds.), Knowledge Management and Organizational Culture of Global Organization, Publishing House of Poznan University of Technology, Poznan, Poland, 2011, <http://publikacije.logistika-produkcija.pl/en/monographs/monographs-2011/79-knowledge-management-and-organizational-culture-of-global-organization-.html>
- **Gušavac, B. A.**, Stojanović, D., Kuzmanović, M. (2014). Conjoint-Based Approach to Location Choice in the Retail Industry: Conceptual Framework. Innovative Management and Firm Performance: An Interdisciplinary Approach and Cases, p: 385- 401. Editor: Maja Levi-Jakšić, Slađana Barjaktarović Rakočević, Milan Martić, Plagrove Macmillan, Hampshire.

Radovi u vrhunskim međunarodnim časopisima (M21)

- Kuzmanovic, Marija, Gordana Savic, **Bisera Andric Gusavac**, Dragana Makajic-Nikolic, and Biljana Panic. "A Conjoint-based approach to student evaluations of teaching performance." Expert Systems with Applications 40, no. 10 (2013): 4083-4089, ISSN: 0957-4174

Radovi u međunarodnim časopisima (M23)

- **Andric Gusavac, B.**, Stanojevic, M., & Cangalovic, M. (2019). Optimal treatment of agricultural land—special multi-depot vehicle routing problem. Agricultural Economics, 65(12), 569-578.
- Kuzmanović M., **Andrić Gušavac B.**, Martić M., "Using conjoint analysis to identify key factors influencing customer value", Technics technologies education management-TTEM, (2012), vol. 7 br. 4, str. 1698-1706, ISSN: 1840-1503

Radovi u časopisima međunarodnog značaja verifikovanih posebnom odlukom (M24)

- Kuzmanović, M., **Andrić Gušavac, B.**, Martić, M., "Determining Customer Value Dimensions: A Conjoint Analysis Approach", Research in Logistics & Production No. 3/2011 (October), pp. 139-150. ISSN (Print): 2083-4942. ISSN (Online): 2083-4950
- **Andrić Gušavac B.**, Dragana Stojanović, Sokolović Ž, Application in Some Locational Models in Natural Resources Industry – Agriculture case. (2014). Romanian Statistical

Review – Supplement, Romanian Statistical Review – Supplement, 8, pp. 82 - 93, 2359 – 8972, 1065701.

Radovi u vodećim časopisima nacionalnog značaja (M51)

- Popović, Milena, Marija Kuzmanović, and **Bisera Andrić Gušavac**. "The agency dilemma: Information asymmetry in the 'principal-agent' problem." *Management-časopis za teoriju i praksu menadžmenta* 17, no. 62 (2012): 11-17.

Saopštenja sa međunarodnih skupova štampani u celini (M33)

- **Andrić B.**, Makajić-Nikolić D., Stevanović B., Vujošević M.: "Modelling Inventory Control Process Using Coloured Petri Nets", 7th Balkan Conference on Operational Research, May 25 - 28, 2005, Constanta, Romania, ISBN: 973-8303-69-9, http://fmi.unibuc.ro/balkan-conf/CD/Section1/Andric_%20Makajic-Nikolic_%20Stevanovic_%20Vujosevic%20.pdf
- Kuzmanović, M., Martić, M., **Andrić Gušavac, B.**, "Using Conjoint Analysis to Assess Customer Value in the Product Development Process", Proceedings of EMC 2011 - I International Symposium „Engineering Management and Competitiveness“, Technical faculty “Mihajlo Pupin” Zrenjanin, University of Novi Sad, June 24 - 25, 2011, pp. 353-358. ISBN: 978-86-7672-135-1
- Tomašević I., Stojanović D., Simeunović B., Radović M., **Andrić Gušavac, B.**, "Creating Value in Higher Education Institutions, 14th International Toulon-Verona Conference on Quality and Service Sciences, 1-3.09.2011., Alicante, Spain, Proceedings, septembar, 2011, (USB izdanje)
- Jankulović, Aleksandar, Vladimir Škorić, **Bisera Andrić Gušavac**, and Mimoza Jovanovska Bogdanoska. "Obstacles in Operations Management Knowledge Transfer in Secondary Schools: Case of Serbia.", *Knowledge as Business Opportunity: Proceedings of the Management, Knowledge and Learning International Conference 2011*.
- Jakovljević, S., **Andrić Gušavac, B.**, "Optimization of agriculture aviation in Republic of Serbia", 1st International Symposium and 10th Balkan Conference on Operational Research – BALCOR 2013, book of papers, September 22 - 24, 2011, Thessaloniki, Greece.
- **Andrić-Gušavac, B.**, Stojanović, D., Jakovljević, S., Simple Plant Location Model in Agriculture Aviation in Serbia, XI Balkan Conference on Operational Research – BALCOR 2013, book of papers, Belgrade & Zlatibor, 7-11 september 2013, ISBN 978-86-7680-285-2 strana 321-327.
- **Andrić-Gušavac, B.**, Stojanović, D., Sokolović, Ž., „Application of some locational models in natural resources industry - agriculture case“, XIII International Symposium of Organizational Sciences „New Business Models and Sustainable Competitiveness“ SymOrg 2014, Proceedings (CD), FON, Zlatibor, 6-10.jun. 2014, ISBN: 978-86-7680-295-1, strana 1241-1248.
- **Andrić Gušavac, B.**, Stanojević, M., "Optimization of Multilayer Lobbying", 2014 Global Business Conference, Dubrovnik, 01-04 October, 2014, Institut za inovacije, Zagreb, Pages 15-21, ISSN 1848-2252
- Makajic-Nikolic D, Panic B, **Бисера Андрић - Гушавац**, Kovacevic I, Learning about the bullwhip effect using colored Petri net simulator, International Conference on

- Education in Mathematics, Science & Technology (ICEMST), International Conference on Education in Mathematics, Science & Technology (ICEMST), pp. 40 - 48, 978-605-61434-4-1, Трпска, 23. - 26. Apr, 2015
- Katić, A., **Andrić Gušavac B.**, Popović, M.: Zaštita jezera Vrutci od zagađenja izazvanog dugoročnim uticajem ljudskog faktora,- Proceedings of XI International conference on risk and safety engineering, Kopaonik 2016., pp.30-39. ISBN: 978-86-6211-102-9
 - **Bisera Andrić - Gušavac**, Popović M, Katić A, Multiattribute methods as a means for solving lake pollution problems, XV International symposium Reshaping the Future Through Sustainable Business Development and Entrepreneurship SymOrg 2016, XV International symposium Reshaping the Future Through Sustainable Business Development and Entrepreneurship SymOrg 2016, pp. 565 - 571, 519.8, 978-86-7680-326-2, Srbija, 10. - 13. Jun, 2016
 - **Bisera Andrić - Gušavac**, Dragana Stojanović, Dealing with Problems in Natural Resources Industry, Proceedings of 7th Annual Global Business Conference, Proceedings of 7th Annual Global Business Conference, pp. 10 - 16, 1848-2252, Hrvatska, 28. Sep - 01. Oct, 2016
 - A. Stojkoski, B. **Andrić - Gušavac**, B. Panić, M. Marinović, M. Popović, Mogući problemi kod transporta radioaktivnog otpada, 12. međunarodno savetovanje rizik i bezbednosni inženjering, pp. 59 - 65, 978-86-6211-107-4, Kopaonik, 9 - 11. Jan, 2017
 - Teodora Mešić, **Bisera Andrić Gušavac**, Biljana Panić, Milena Popović, Minja Marinović, Karbonski otisak u lancima snabdevanja, Rizik i bezbednosni inženjering – Kopaonik 2018, pp. 39 - 45, 978-86-6211-112-8, Kopaonik, 9 - 11. Jan, 2018
 - Neda Đorđević, **Bisera Andrić Gušavac**, Biljana Panić, Benefits of The Application of Network Planning Technique for River Mlava Water Course, XVI International symposium doing business in the digital age: challenges, approaches and solutions symposium proceedings, pp. 115 - 122, 978-86-7680-361-3, Zlatibor, 7. - 10. Jun, 2018

Saopštenja sa međunarodnih skupova štampani u izvodu (M34)

- Stojanović D., **Andrić B.**, Marinković S.: “Ranking key factors in location transportation companies using AHP”, 8th Balkan Conference on Operational Research, September 14-17, 2007, Belgrade-Zlatibor, Serbia, Volume of Abstracts, pp 88, ISBN: 978-86-7680-126-8.
- **Andrić Gušavac B.**, Stojanović D., Kuzmanović M.: Conceptual Framework for Location Choice in Retail Industry using Conjoint Analysis, XII International Symposium of Organizational Sciences “Innovative Management & Business Performance” SYMORG 2012, Zbornik abstrakata i CD, FON, Beograd, 5-9.jun. 2012. ISBN: 978-86-7680-255-5, pp. 1357-1364.

Saopštenja sa skupa nacionalnog značaja štampana u celini (M63)

- **Andrić B.**, Stanojević M., Makajić-Nikolić D., Martić M.: „Modeliranje sistema planiranja u Duga Holding IBL”, SYM-OP-IS 2003, XXX Simpozijum o operacionim istraživanjima, Herceg Novi, 30.09-03.10. 2003., strane 339-342, ISBN 89-80593-33-8

- **Andrić B.**, Stojanović D., Stevanović B.: „Sistem izbora dobavljača”, SYM-OP-IS 2005, XXXII Simpozijum o operacionim istraživanjima, Vrnjačka Banja, 27-30. septembar 2005, strane 383-386, ISBN: 86-403-0685-0
- Makajić-Nikolić D., Stanojević M., **Andrić B.**: „Uticaj raspodele fiksnih troškova na optimizaciju proizvodnog programa“, X Međunarodni simpozijum „Promene organizacije i menadžmenta - izazovi evropskih integracija“, SYMORG 2006, Zbornik apstrakata i radova na CD-u, Zlatibor, 7-10. jun 2006. ISBN: 86-7680-086-3
- Simeunović B., Nešević D., Stojanović D., **Andrić B.**: „Tehnike savremene proizvodnje” X Međunarodni simpozijum „Promene organizacije i menadžmenta - izazovi evropskih integracija“, SYMORG 2006, Zbornik apstrakata i radova na CD-u, Zlatibor, 7-10. jun 2006. ISBN: 86-7680-086-3
- Makajić-Nikolić D., **Andrić B.**, Stanojević M., Pavlović P.: „Simulacija rada semafora pomoću Petrijevih mreža“, SYM-OP-IS 2006, XXXIII Simpozijum o operacionim istraživanjima, Banja Koviljača, 03-06. oktobar 2006, strane 433-436, ISBN: 86-82183-07-2
- **Andrić B.**, Stojanović D.: „Problemi lokacije uslužnih objekata“, XI Međunarodni simpozijum „Menadžment i društvena odgovornost”, SYMORG 2008, Zbornik apstrakata i radovana CD-u, Beograd, 10-13. septembar 2008., strane 1-8, ISBN: 978-86-7680-160-2
- Stojanović D., **Andrić B.**: „Model izbora lokacije filijale banke“, VI Skup privrednika i naučnika „Operacioni menadžment i evropske integracije“, SPIN 08, Zbornik radova, FON, Beograd, 06 – 07. novembar 2008., strane 146-150, ISBN: 978-86-7680-164-0
- **Andrić Gušavac B.**, Gušavac J., Stojanović D., „Organizacija pripreme proizvodnje u Politika a.d.”, XII međunarodni simpozijum „Organizacione nauke i menadžment znanja“ SYMORG 2010, Zbornik apstrakata u radova na CD-u, 9-12. jun 2010, Zlatibor, strane 115-116, ISBN: 978-86-7680-215-9
- **Andrić Gušavac B.**, Gušavac J, Andrić D.: „Razvoj novog proizvoda kao projekat“, YUPMA 2010, XIV Internacionalni simpozijum iz projektnog menadžmenta, Zlatibor, 14-16. maj 2010, strane 409-413, ISBN: 978-86-86385-07-9
- **Andrić Gušavac, B.**, Andrić, D., Kuzmanović, M., „Kreiranje slobodnog tržišnog prostora primenom blue ocean strategije”, Zbornik radova XV Internacionalnog simpozijuma iz upravljanja projektima YUPMA 2011, Zlatibor, 10-12. jun 2011, strane 539-543. ISBN: 978-86-86385-08-6
- Kuzmanović, M., **Andrić Gušavac, B.**, Stojanović, D., „Primena strateških poteza za sticanje prednosti u pregovorima”, Zbornik radova XV Internacionalnog simpozijuma iz upravljanja projektima, YUPMA 2011, Zlatibor, 10-12. jun 2011, strane 245-249. ISBN: 978-86-86385-08-6
- Jakovljević S., **Andrić Gušavac B.**: „Model for optimization of agricultural aircraft“, SYM-OP-IS 2011, XXXVIII Simpozijum o operacionim istraživanjima, Zlatibor, 04-07. oktobar 2011, pp 535-538, ISBN: 978-86-403-1168-7
- Đurović M., Kuzmanović M., **Andrić Gušavac B.**: „Agencijska dilema: analiza problema ‘poslodavac-unajmljenik’“, SYM-OP-IS 2011, XXXVIII Simpozijum o operacionim istraživanjima, Zlatibor, 04-07. oktobar 2011, strane 455-458, ISBN: 978-86-403-1168-7
- **Andrić Gušavac B.**, Stojanović D., Tomašević I., Simeunović B., „Neke mogućnosti unapređenja sistema poslovne inteligencije procesom grupnog odlučivanja” XL

Simpozijum o operacionim istraživanjima – SYMOPIS 2013, Zbornik radova, Zlatibor, 9-12 septembar 2013, ISBN 978-86-7680-286-9 strane 55- 60.

- Sokolović Ž., Čangalović M., **Andrić Gušavac B.**, Ispitivanje efikasnosti metode promenljivih okolina za rešavanje problema neprekidne globalne optimizacije, XLI Simpozijum o operacionim istraživanjima, Divčibare, Srbija, 16-19.09.2014., ISBN: 978-86-7395-325-0
- **Andrić Gušavac B.**, Stanojević M., Modeliranje problema korišćenja poljoprivredne avijacije, XLII Simpozijum o operacionim istraživanjima, Srebrno jezero, Srbija, 15-18. septembar 2015, ISBN 978-86-80593-55-5, strane 348-351.
- Mitić J., **Andrić Gušavac B.**, Popović M., Nikolić A., Strateško upravljanje šumskim bogatstvom primenom matematičkog programiranja, Zbornik radova Sym-Op-Is 2016, Tara 2016, ISBN: 978-86-335-0535-2, pp. 371-375.
- Ana Katić, **Bisera Andrić Gušavac**, Model optimizacije smanjenja zagađenosti vodnih resursa jezera Vrutci, Zbornik radova Sym-Op-Is 2016, Tara 2016, ISBN: 978-86-335-0535-2, pp. 371-375.
- M. Marinović, M. Popović, **B. Andrić - Gušavac**, Koncept upravljanja rizicima u uvođenju ERP rešenja u javni sektor, 3. međunarodna konferencija upravljanje znanjem i informatika, 3. međunarodna konferencija upravljanje znanjem i informatika, pp. 124 - 133, Kopaonik, 13 - 14. Jan, 2017
- M. Popović, **B. Andrić - Gušavac**, M. Marinović, Pregled modela za ocenu efikasnosti rada nastavnika, 3. međunarodna konferencija upravljanje znanjem i informatika, 3. međunarodna konferencija upravljanje znanjem i informatika, pp. 157 - 165, Kopaonik, 13 - 14. Jan, 2017
- I. Lavrnica, M. Marinović, M. Popović, **B. Andrić - Gušavac**, Solar storm attacks, effects and public awareness: A case study of the republic Of Serbia, Zbornik radova Sym-Op-Is 2017, Zbornik radova Sym-Op-Is 2017, pp. 451 - 455, 978-86-7488-135-4, Zlatibor, 25 - 28. Sep, 2017

Prilog 1

Specijalna heuristika – Python kod

Modul *consts.py*

```
START_ROW_AVIONI = 2
BR_AVIONA = 20

START_ROW_LETELISTA = 3
BR_LETELISTA = 1

START_ROW_PARCELE = 3
START_COL_PARCELE = 3

BR_VAR_ULASKA = 4
BR_VAR_IZLASKA = 4

BR_PARCELA = 96

START_ROW_OGRANICENJA = 2
BR_OGRANICENJA = 2
```

Modul *letelista_loader.py*

```
from openpyxl import load_workbook

import Utils
from Model import Leteliste
from consts import START_ROW_LETELISTA, BR_LETELISTA

wb = load_workbook(Utils.FILE_NAME)
sheet = wb['Letelista']

def ucitaj_letelista():
    letelista = []

    for row in sheet.iter_rows(min_row=START_ROW_LETELISTA,
max_row=START_ROW_LETELISTA + BR_LETELISTA - 1):
        l = Leteliste(row[1].value, row[2].value)
        letelista.append(l)

    return letelista
```

Modul *avioni_loader.py*

```
from openpyxl import load_workbook

import Utils
from Model import Avion
from consts import START_ROW_AVIONI, BR_AVIONA

wb = load_workbook(Utils.FILE_NAME)
sheet = wb['Avioni']

def ucitaj_avione():
    avioni = []

    for row in sheet.iter_rows(min_row=START_ROW_AVIONI, max_row=START_ROW_AVIONI +
BR_AVIONA - 1):
        a = Avion(row[0].value, row[1].value, row[2].value, row[3].value)
        avioni.append(a)

    return avioni
```

Modul *parcele_loader.py*

```
from openpyxl import load_workbook

import Utils
from Model import Parcela
from Model import Varijanta
from consts import START_COL_PARCELE, START_ROW_PARCELE, BR_VAR_IZLASKA,
BR_VAR_ULASKA, BR_PARCELA

wb = load_workbook(Utils.FILE_NAME)

def ucitaj_parcele(avioni, parcele_za_leteliste):
    parcele = []
    for x in range(1, len(avioni) + 1):
        sheet = wb['P_A' + str(x)]

        # citanje varijanti ulaska i izlaska po specificiranim iznosima
        for index, row in enumerate(
            sheet.iter_rows(min_row=START_ROW_PARCELE, max_row=START_ROW_PARCELE +
                BR_PARCELA - 1)):

            if row[1].value not in parcele_za_leteliste:
                continue

            p = Parcela(row[1].value, avioni[x - 1])

            rb = 1
            for i in range(START_COL_PARCELE - 1, START_COL_PARCELE + BR_VAR_ULASKA * 2 - 1,
                2):

                tacka_ulaska = (row[i].value, row[i + 1].value)
                tacka_izlaska = (row[i + BR_VAR_IZLASKA * 2].value, row[i + BR_VAR_IZLASKA * 2
                    + 1].value)
                v = Varijanta(p, tacka_ulaska, tacka_izlaska, rb)
                p.dodaj_varijantu(v)
                rb += 1

            # citanje duzine i hemikalija
            p.duzina = row[START_COL_PARCELE + BR_VAR_ULASKA * 2 + BR_VAR_IZLASKA * 2 -
                1].value
            p.potraznja_za_hemikalijama = row[
                START_COL_PARCELE + BR_VAR_ULASKA * 2 + BR_VAR_IZLASKA * 2].value

            parcele.append(p)

    return parcele

def ucitaj_oznake_parcela_za_leteliste(leteliste):
    sheet = wb['KonacnaDodela']

    dodeljene_parcele = []

    for index, row in enumerate(sheet.iter_rows(min_row=START_ROW_PARCELE,
        max_row=START_ROW_PARCELE + BR_PARCELA - 1)):
        if row[1].value == leteliste:
            dodeljene_parcele.append(row[0].value)

    return dodeljene_parcele
```


Modul *ogranicenja_loader.py*

```
from openpyxl import load_workbook

import Utils
from consts import START_ROW_OGRANICENJA, BR_OGRANICENJA

wb = load_workbook(Utils.FILE_NAME)
sheet = wb['Ogranicenja']

def učitaj_ogranicenja():
    ogranicenja = []

    for row in sheet.iter_rows(min_row=START_ROW_OGRANICENJA,
max_row=START_ROW_OGRANICENJA + BR_OGRANICENJA - 1):
        ogranicenja.append((row[1].value, row[2].value))

    return ogranicenja
```

Modul *Utils.py*

```
import sys
import math

import GUI
from Model import Ruta

FILE_NAME = GUI.uzmi_naziv_fajla()

def odstojanje(xa, ya, xb, yb):
    dist = math.sqrt((xa - xb) ** 2 + (ya - yb) ** 2)
    return round(dist, 2)

def izracunaj_odstojanja_varijanti(parcele, leteliste):
    for p in parcele:
        for v in p.varijante:
            v.leteliste_ulaz = odstojanje(v.tacka_ulaska[0], v.tacka_ulaska[1], leteliste.x,
leteliste.y)
            v.izlaz_leteliste = odstojanje(v.tacka_izlaska[0], v.tacka_izlaska[1],
leteliste.x, leteliste.y)

def vrati_najkracu_varijantu(parcela):
    duzina_najkrace = sys.float_info.max
    najkraca = None
    for v in parcela.varijante:
        if (v.leteliste_ulaz + parcela.duzina + v.izlaz_leteliste) < duzina_najkrace:
            duzina_najkrace = (v.leteliste_ulaz + parcela.duzina + v.izlaz_leteliste)
            najkraca = v

    return najkraca, duzina_najkrace

def izracunaj_najkrace_varijante(parcele):
    for p in parcele:
        p.najkraca_varijanta, p.ukupna_duzina = vrati_najkracu_varijantu(p)

    return parcele

def kreiraj_elementarne_rute(parcele):
```

```

el_rute = []
for p in parcele:
    r = Ruta()
    if (p.ukupna_duzina * p.avion.potrosnja) <= p.avion.kapacitet_gorivo \
        and p.potraznja_za_hemikalijama <= p.avion.kapacitet_hemikalije:
        r.ubaci_na_kraj(p.najkraca_varijanta, p.duzina)
    el_rute.append(r)

return el_rute

def izracunaj_najblize_varijante(zadata_varijanta, parcele):
    for p in parcele:
        if p.oznaka is not zadata_varijanta.oznaka_parcele:
            min_udaljenost = sys.maxsize
            opt_var = None
            for v in p.varijante:
                udaljenost = odstojanje(zadata_varijanta.tacka_izlaska[0],
zadata_varijanta.tacka_izlaska[1],
                v.tacka_ulaska[0], v.tacka_ulaska[1])
                if udaljenost < min_udaljenost:
                    min_udaljenost = udaljenost
                    opt_var = v

            zadata_varijanta.najblize_varijante.append(opt_var)

def prover_a_za_ogranicjenja_parcela(parcela1, parcela2, ogran_icjenja):
    for o in ogran_icjenja:
        if (o[0] == parcela1 and o[1] == parcela2) or (o[1] == parcela1 and o[0] ==
parcela2):
            return False

    return True

def izracunaj_ustede(elementarna_ruta, el_rute, ogran_icjenja_za_parcele):
    varijanta = elementarna_ruta.varijante[0]
    lista_usteda = []

    for r in el_rute:

        if not prover_a_za_ogranicjenja_parcela(varijanta.parcela.oznaka,
r.varijante[0].parcela.oznaka,
                ogran_icjenja_za_parcele):
            continue

        if r.avion == elementarna_ruta.avion and r.varijante[0] != varijanta:
            v = r.varijante[0]
            usteda = varijanta.izlaz_leteliste + v.leteliste_ulaz - odstojanje(
                varijanta.tacka_izlaska[0], varijanta.tacka_izlaska[1], v.tacka_ulaska[0],
v.tacka_ulaska[1])

            if usteda > 0:
                lista_usteda.append((varijanta, v, usteda))

    return lista_usteda

def izracunaj_ustede_za_sve_elementarne_rute(el_rute, ogran_icjenja_za_parcele):
    lista_usteda = []
    for er in el_rute:
        lista_usteda += izracunaj_ustede(er, el_rute, ogran_icjenja_za_parcele)

    return sorted(lista_usteda, key=lambda u: u[2], reverse=True)

def prover_a_za_avion(varijanta, ruta, pocetak=True):

```

```

avion = varijanta.parcela.avion

if pocetak:

    nova_duzina = ruta.duzina - ruta.varijante[0].leteliste_ulaz +
    varijanta.parcela.duzina + \
        varijanta.leteliste_ulaz + odstojanje(
        varijanta.tacka_izlaska[0], varijanta.tacka_izlaska[1],
        ruta.varijante[0].tacka_ulaska[0], ruta.varijante[0].tacka_ulaska[1])

else:

    nova_duzina = ruta.duzina - ruta.varijante[-1].izlaz_leteliste +
    varijanta.parcela.duzina + \
        varijanta.izlaz_leteliste + odstojanje(
        ruta.varijante[-1].tacka_izlaska[0], ruta.varijante[-1].tacka_izlaska[1],
        varijanta.tacka_ulaska[0], varijanta.tacka_ulaska[1])

    potraznja_rute_za_hemikalijama = varijanta.parcela.potraznja_za_hemikalijama

for v in ruta.varijante:
    potraznja_rute_za_hemikalijama += v.parcela.potraznja_za_hemikalijama

if (nova_duzina * avion.potrosnja) <= avion.kapacitet_gorivo and \
    potraznja_rute_za_hemikalijama <= avion.kapacitet_hemikalije:
    return True, nova_duzina

return False, 0

def ocisti_listu_usteda(var1, var2, lista_usteda):
    avion = var1.parcela.avion

    indexi_za_brisanje = []
    for i, usteda in enumerate(lista_usteda):
        if avion != usteda[0].parcela.avion:
            if usteda[0].parcela.oznaka == var1.parcela.oznaka or \
                usteda[1].parcela.oznaka == var1.parcela.oznaka or \
                usteda[0].parcela.oznaka == var2.parcela.oznaka or \
                usteda[1].parcela.oznaka == var2.parcela.oznaka:
                indexi_za_brisanje.append(i)

    for index in sorted(indexi_za_brisanje, reverse=True):
        del lista_usteda[index]

def kreiraj_novu_rutu(var1, var2, konacne_rute, lista_usteda, f):
    avion = var1.parcela.avion

    uspesno_prosirena_ruta = False
    avion_se_vec_koristi = False

    ruta_za_prosirenje = None
    for kr in konacne_rute:
        if kr.avion == avion:
            ruta_za_prosirenje = kr
            avion_se_vec_koristi = True
            if var2 == kr.varijante[0] and var1 not in kr.varijante: # ubacivanje na pocetak
                prosao_proveru, nova_duzina = provera_za_avion(varijanta=var1, ruta=kr,
                pocetak=True)
                if prosao_proveru:
                    kr.ubaci_na_poziciju(varijanta=var1, nova_duzina=nova_duzina, pozicija=0)
                    uspesno_prosirena_ruta = True
            else:
                return

    elif var1 == kr.varijante[-1] and var2 not in kr.varijante: # ubacivanje na kraj
        prosao_proveru, nova_duzina = provera_za_avion(varijanta=var2, ruta=kr,

```

```

pocetak=False)
    if prosao_proveru:
        kr.ubaci_na_poziciju(varijanta=var2, nova_duzina=nova_duzina, pozicija=-1)
        uspesno_prosirena_ruta = True
    else:
        return

    if not uspesno_prosirena_ruta and not avion_se_vec_koristi: # ne postoji ruta za
    avion jos uvek
        nova_ruta = Ruta()
        nova_ruta.varijante = [var1, var2]
        nova_ruta.avion = avion
        nova_ruta.duzina = var1.leteliste.ulaz + var1.parcela.duzina + odstojanje(
            var1.tacka_izlaska[0], var1.tacka_izlaska[1], var2.tacka_ulaska[0],
            var2.tacka_ulaska[1]) + var2.parcela.duzina + var2.izlaz_leteliste

        konacne_rute.append(nova_ruta)
        ruta_za_prosirenje = nova_ruta
        uspesno_prosirena_ruta = True

    if uspesno_prosirena_ruta:
        f.write("iz ustede: " + str(var1.parcela.oznaka) + " - " +
            str(var2.parcela.oznaka) + " (" + str(
                var2.parcela.avion.oznaka) + ")\n")
        f.write("- ")
        for v in ruta_za_prosirenje.varijante:
            f.write(v.parcela.oznaka + " - ")
        f.write("\n-----\n")
        ocisti_listu_usteda(var1, var2, lista_usteda)

def filtriraj_elementarne_rute(el_rute, konacne_rute):
    neobradjene_rute = []

    for er in el_rute:
        parcela = er.varijante[0].parcela.oznaka
        obradjena = False
        for kr in konacne_rute:
            for v in kr.varijante:
                if v.parcela.oznaka == parcela:
                    obradjena = True
        if not obradjena:
            neobradjene_rute.append(er)

    return sorted(neobradjene_rute, key=lambda r: r.duzina)

def filtriraj_slobodne_avione(konacne_rute, svi_avioni):
    slobodni_avioni = []

    for a in svi_avioni:
        koristi_se = False
        for kr in konacne_rute:
            if kr.avion == a:
                koristi_se = True

        if not koristi_se:
            slobodni_avioni.append(a)

    return slobodni_avioni

def dodeli_avione_neobradjenim_rutama(neobradjene_rute, slobodni_avioni,
konacne_rute):
    finalne_neobradjene_rute = []

    for r in neobradjene_rute:
        vec_u_konacnim = False

```

```

for k in konacne_rute:
    for v in k.varijante:
        if v.parcela.oznaka == r.varijante[0].parcela.oznaka:
            vec_u_konacnim = True

    if not vec_u_konacnim and r.avion.oznaka in [(lambda x: x.oznaka)(x) for x in
slobodni_avioni]:
        konacne_rute.append(r)
        slobodni_avioni.remove(r.avion)

for r in neobradjene_rute:
    vec_u_konacnim = False
    for k in konacne_rute:
        for v in k.varijante:
            if v.parcela.oznaka == r.varijante[0].parcela.oznaka:
                vec_u_konacnim = True

    if not vec_u_konacnim:
        finalne_neobradjene_rute.append(r.varijante[0].parcela.oznaka)

return finalne_neobradjene_rute

```

Modul *Model.py*

```

class Avion:
    def __init__(self, oznaka, kapacitet_gorivo, potrosnja, kapacitet_hemikalije):
        self.oznaka = oznaka
        self.kapacitet_gorivo = kapacitet_gorivo
        self.potrosnja = potrosnja
        self.kapacitet_hemikalije = kapacitet_hemikalije

    def __repr__(self):
        return "\nOznaka: " + str(self.oznaka) + "\nKapacitet - gorivo: " +
str(self.kapacitet_gorivo) + \
        "\nPotrosnja: " + str(self.potrosnja) + "\nKapacitet - hemikalije: " + \
        str(self.kapacitet_hemikalije) + "\n"

    def __eq__(self, other):
        if not isinstance(other, Avion):
            return False

        return self.oznaka == other.oznaka

class Parcela:
    def __init__(self, oznaka, avion):
        self.oznaka = oznaka
        self.varijante = []
        self.najkraca_varijanta = None
        self.duzina = 0
        self.ukupna_duzina = 0
        self.potraznja_za_hemikalijama = 0
        self.avion = avion

    def dodaj_varijantu(self, varijanta):
        self.varijante.append(varijanta)

    def __str__(self):
        return str(self.oznaka)

    def __repr__(self):
        return "\nOznaka: " + str(self.oznaka) + "\nDuzina parcele: " + str(self.duzina)
+ \
        "\nPotraznja za hemikalijama: " + str(self.potraznja_za_hemikalijama) + \
        "\nVarijante: " + str(self.varijante) + "\nAvion: " + str(self.avion) + \

```

```

    "\nNajkraca varijanta: " + str(self.najkraca_varijanta) + \
    "\nUkupna duzina: " + str(self.ukupna_duzina) + "\n\n"

class Leteliste:
    def __init__(self, x, y):
        self.x = x
        self.y = y

    def __repr__(self):
        return str(self.x) + ": " + str(self.y) + "\n\n"

class Ruta:
    def __init__(self):
        self.varijante = []
        self.duzina = 0
        self.avion = None

    def ubaci_na_poziciju(self, varijanta, nova_duzina, pozicija):

        self.duzina = nova_duzina
        if pozicija == -1:
            self.varijante.append(varijanta)
        else:
            self.varijante.insert(pozicija, varijanta)

    def ubaci_na_kraj(self, varijanta, duzina_parcele, udaljenost_izmedju_parcela=0):

        if self.duzina > 0:
            self.duzina -= self.varijante[-1].izlaz_leteliste
            self.duzina += varijanta.izlaz_leteliste + duzina_parcele +
            udaljenost_izmedju_parcela

        else:
            self.duzina = varijanta.leteliste_ulaz + duzina_parcele +
            varijanta.izlaz_leteliste

        self.varijante.append(varijanta)
        self.avion = varijanta.parcela.avion

    def __repr__(self):
        rez = "\nParcele: " + str(self.varijante) + "\nDuzina: " + str(self.duzina)

        if self.avion is not None:
            return rez + "\nAvion: " + str(self.avion) + "\n\n"

        return rez + "\n\n"

class Varijanta:
    def __init__(self, parcela, tacka_ulaska, tacka_izlaska, redni_broj):
        self.parcela = parcela
        self.tacka_ulaska = tacka_ulaska
        self.tacka_izlaska = tacka_izlaska
        self.redni_broj = redni_broj
        self.leteliste_ulaz = 0
        self.izlaz_leteliste = 0
        self.najblize_varijante = []

    def __repr__(self):
        return "Parcela: " + str(self.parcela.oznaka) + ", " + "Avion: " +
        str(self.parcela.avion) + " V" + str(
            self.redni_broj) + ':' + str(
            self.tacka_ulaska) + "-" + str(
            self.tacka_izlaska) + " l-u: " + str(self.leteliste_ulaz) + \
            " i-l: " + str(self.izlaz_leteliste) + "\n"

```

```

def prikazi_najblize(self):
    print(str(self.najblize_varijante))

def __eq__(self, other):

    if not isinstance(other, Varijanta):
        return False

    return (self.parcela.oznaka == other.parcela.oznaka and self.tacka_ulaska ==
            other.tacka_ulaska
            and self.tacka_izlaska == other.tacka_izlaska)

```

Modul *solver.py*

```

import datetime

import Utils
from loaders import avioni_loader, letelista_loader, parcele_loader,
ogranicenja_loader

LETELISTE = "1"

parcele_za_leteliste = parcele_loader.ucitaj_oznake_parcela_za_leteliste(LETELISTE)
avioni = avioni_loader.ucitaj_avione()
parcele = parcele_loader.ucitaj_parcele(avioni, parcele_za_leteliste)
letelista = letelista_loader.ucitaj_letelista()
ogranicenja_za_parcele = ogranicenja_loader.ucitaj_ogranicenja()

Utils.izracunaj_odstojanja_varijanti(parcele, letelista[0])

parcele = Utils.izracunaj_najkrace_varijante(parcele)

with open("rezultat.txt", "w") as f, open("konacne_rute.txt", "w") as final_rute:
    final_rute.write("FlightPlanner v2.0\n" + str(datetime.datetime.now()))
    final_rute.write("\nUkupno parcela: " + str(len(parcele_za_leteliste)) + "\n\n")
    final_rute.write("Pocetak generisanja ruta... \n\n")
    final_rute.write("-----\n\n")

    f.write("\n\n-----AVIONI-----\n\n")
    for a in avioni:
        f.write(repr(a))

    f.write("\n\n-----PARCELE SA AVIONIMA-----\n\n")
    for p in parcele:
        f.write(repr(p))

    elementarne_rute = Utils.kreiraj_elementarne_rute(parcele)

    # print(elementarne_rute)
    f.write("\n\n-----ELEMENTARNE RUTE-----\n\n")
    f.write(str(elementarne_rute))

    lista_usteda = Utils.izracunaj_ustede_za_sve_elementarne_rute(elementarne_rute,
ogranicenja_za_parcele)

    f.write("\n\n-----LISTA USTEDA-----\n\n")
    for u in lista_usteda:
        f.write(str(u[0]) + "\n" + str(u[1]) + "\n" + "Usteda:" + str(u[2]) + "\n\n")

    konacne_rute = []

    with open("proces_kreiranja_ruta.txt", "w") as ruta_file:
        i = 0
        while i < len(lista_usteda):
            usteda = lista_usteda[i]

```

```

    Utils.kreiraj_novu_rutu(usteda[0], usteda[1], konacne_rute, lista_usteda,
ruta_file)
    i += 1

    privremene_neobradjene_rute = Utils.filtriraj_elementarne_rute(elementarne_rute,
konacne_rute)
    final_rute.write("\n\nPrivremene neobradjene rute: \n\n")
    for k in privremene_neobradjene_rute:
        final_rute.write("Avion: " + str(k.avion.oznaka) + "\nDuzina: " + str(k.duzina) +
"\nParcele: ")
        for v in k.varijante:
            final_rute.write(v.parcela.oznaka + " - ")
        final_rute.write("\n-----\n")

    privremeni_slobodni_avioni = Utils.filtriraj_slobodne_avione(konacne_rute, avioni)

    final_rute.write("\n\nPrivremeni slobodni avioni: \n\n")
    for sa in privremeni_slobodni_avioni:
        final_rute.write(str(sa))
        final_rute.write("\n-----\n")

    finalne_neobradjene_rute =
Utils.dodeli_avione_neobradjenim_rutama(privremene_neobradjene_rute,
privremeni_slobodni_avioni, konacne_rute)

    final_rute.write("\n\nFinalne neobradjene rute: \n\n")
    for k in finalne_neobradjene_rute:
        final_rute.write(str(k) + ", ")

    final_rute.write("\n\nFinalni slobodni avioni: \n\n")
    for sa in privremeni_slobodni_avioni:
        final_rute.write(str(sa))
        final_rute.write("\n-----\n")

    final_rute.write("\nGenerisanje ruta zavrsono " + str(datetime.datetime.now()))
    final_rute.write("\n-----\n\n")
    final_rute.write("Generisane konacne rute: \n\n")
    for k in konacne_rute:
        final_rute.write("Avion: " + str(k.avion.oznaka) + "\nDuzina: " + str(k.duzina) +
"\nParcele: ")
        for v in k.varijante:
            final_rute.write(v.parcela.oznaka + " - ")
        final_rute.write("\n-----\n")

    f.write("\n\n-----KONACNE RUTE-----\n")
    f.write(str(konacne_rute))

    f.write("-----NEOBRAJENE RUTE-----\n")

```


Prilog 2

**Specijalna heuristika – primer ulaznih podataka
(10 parcela, 4 varijante obrade, 4 aviona, 1 letelište)**

U sheet-u *Letelista* excel fajla se nalaze podaci sa koordinatama letelišta:

	Koordinate letelišta	
	a	b
Letelište 1	8.5	3

U sheet-u *Avioni* excel fajla se nalaze podaci o avionima: *oznaka aviona*, *kapacitet rezervoara za gorivo* i *rezervoara za hemikalije* za svaki avion:

Oznaka aviona	Kapacitet rezervoara za gorivo (l)	Potrosnja goriva po dužnoj jedinici parcele (l/km)	Kapacitet rezervoara za hemikalije (l)
A1	100	1	700
A2	120	1	600
A3	60	1	300
A4	90	1	500
...

R.br.	Oznaka parcele	Ukupna dužina parcele	Potražnja za hemikalijama
		d	h
1	C1	20.62	50
2	C2	11.41	60
3	C3	16.99	40
4	C4	21.08	70
5	C5	24.84	80
6	C6	17.42	90
7	C7	21.66	100
8	C8	26.3	120
9	C9	38.44	150
10	C10	38.09	200
...

Prilog 3

**Specijalna heuristika – primer rešenja
(2 parcele, 4 varijante obrade, 4 aviona, 1 letelište)**

PROCES KREIRANJA RUTA

iz ustede: C1 - C2 (A3)

- C1 - C2 -

REZULTAT

-----AVIONI-----

Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700

Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

-----PARCELE SA AVIONIMA-----

Oznaka: C1
Duzina parcele: 5
Potraznja za hemikalijama: 96
Varijante: [Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83
, Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V2:(14.7, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 6.89 i-l: 6.17
, Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V3:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83
, Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V4:(14.4, 1.2)-(14.7, 0) l-u: 6.17 i-l: 6.89
]
Avion:

Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

Najkraca varijanta: Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83

Ukupna duzina: 16.66

Oznaka: C2
Duzina parcele: 14
Potraznja za hemikalijama: 127
Varijante: [Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(14.7, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 6.89 i-l: 6.17

, Parcela: C2, Avion:

Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V2:(15, 0)-(14.7, 1.5) l-u: 7.16 i-l: 6.38
, Parcela: C2, Avion:

Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V3:(14.4, 1.2)-(14.7, 0) l-u: 6.17 i-l: 6.89
, Parcela: C2, Avion:

Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V4:(14.7, 1.5)-(15, 0) l-u: 6.38 i-l: 7.16
]

Avion:

Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

Najkraca varijanta: Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(14.7, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 6.89 i-l: 6.17

Ukupna duzina: 27.060000000000002

Oznaka: C1
Duzina parcele: 5
Potraznja za hemikalijama: 96
Varijante: [Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83

, Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V2:(14.7, 0)-(14.7, 0) l-u: 6.89 i-l: 6.89
, Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V3:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83
, Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V4:(14.4, 1.2)-(14.4, 1.2) l-u: 6.17 i-l: 6.17
]
Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

Najkraca varijanta: Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83

Ukupna duzina: 16.66

Oznaka: C2
Duzina parcele: 14
Potraznja za hemikalijama: 127
Varijante: [Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(14.7, 0)-(14.7, 0) l-u: 6.89 i-l: 6.89
, Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V2:(15, 0)-(15, 0) l-u: 7.16 i-l: 7.16
, Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V3:(14.4, 1.2)-(14.4, 1.2) l-u: 6.17 i-l: 6.17
, Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V4:(14.7, 1.5)-(14.7, 1.5) l-u: 6.38 i-l: 6.38
]
Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

Najkraca varijanta: Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V3:(14.4, 1.2)-(14.4, 1.2) l-u: 6.17 i-l: 6.17

Ukupna dužina: 26.340000000000003

Oznaka: C1
Dužina parcele: 5
Potražnja za hemikalijama: 96
Varijante: [Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V1:(13.5, 0)-(14.7, 0) l-u: 5.83 i-l: 6.89
, Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V2:(14.7, 0)-(13.5, 0) l-u: 6.89 i-l: 5.83
, Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V3:(13.5, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 5.83 i-l: 6.17
, Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V4:(14.4, 1.2)-(13.5, 0) l-u: 6.17 i-l: 5.83
]
Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700

Najkraca varijanta: Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V3:(13.5, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 5.83 i-l: 6.17

Ukupna dužina: 17.0

Oznaka: C2
Dužina parcele: 14
Potražnja za hemikalijama: 127
Varijante: [Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V1:(14.7, 0)-(15, 0) l-u: 6.89 i-l: 7.16
, Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1

Kapacitet - hemikalije: 700
V2:(15, 0)-(14.7, 0) l-u: 7.16 i-l: 6.89
, Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V3:(14.4, 1.2)-(14.7, 1.5) l-u: 6.17 i-l: 6.38
, Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V4:(14.7, 1.5)-(14.4, 1.2) l-u: 6.38 i-l: 6.17
]
Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700

Najkraca varijanta: Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V4:(14.7, 1.5)-(14.4, 1.2) l-u: 6.38 i-l: 6.17

Ukupna duzina: 26.549999999999997

Oznaka: C1
Duzina parcele: 5
Potraznja za hemikalijama: 96
Varijante: [Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83
, Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V2:(14.7, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 6.89 i-l: 6.17
, Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V3:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83
, Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V4:(14.4, 1.2)-(14.7, 0) l-u: 6.17 i-l: 6.89
]
Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

Najkraca varijanta: Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250

Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83

Ukupna duzina: 16.66

Oznaka: C2
Duzina parcele: 14
Potraznja za hemikalijama: 127
Varijante: [Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(14.7, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 6.89 i-l: 6.17
, Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V2:(15, 0)-(14.7, 1.5) l-u: 7.16 i-l: 6.38
, Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V3:(14.4, 1.2)-(14.7, 0) l-u: 6.17 i-l: 6.89
, Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V4:(14.7, 1.5)-(15, 0) l-u: 6.38 i-l: 7.16
]
Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

Najkraca varijanta: Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(14.7, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 6.89 i-l: 6.17

Ukupna duzina: 27.060000000000002

-----ELEMENTARNE RUTE-----

[
Parcele: [Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83
]
Duzina: 16.66
Avion:
Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

'
Parcela: [Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(14.7, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 6.89 i-l: 6.17
]
Duzina: 27.060000000000002
Avion:
Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

'
Parcela: [Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83
]
Duzina: 16.66
Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

'
Parcela: [Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V3:(14.4, 1.2)-(14.4, 1.2) l-u: 6.17 i-l: 6.17
]
Duzina: 26.340000000000003
Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

'
Parcela: [Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V3:(13.5, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 5.83 i-l: 6.17
]
Duzina: 17.0
Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700

'
Parcela: [Parcela: C2, Avion:

Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V4:(14.7, 1.5)-(14.4, 1.2) l-u: 6.38 i-l: 6.17
]
Duzina: 26.549999999999997
Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700

,
Parcela: [Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83
]
Duzina: 16.66
Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

,
Parcela: [Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(14.7, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 6.89 i-l: 6.17
]
Duzina: 27.060000000000002
Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

]

-----LISTA USTEDA-----

Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V3:(13.5, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 5.83 i-l: 6.17

Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrosnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V4:(14.7, 1.5)-(14.4, 1.2) l-u: 6.38 i-l: 6.17

Usteda:12.13

Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A1

Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83

Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(14.7, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 6.89 i-l: 6.17

Usteda:11.52

Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83

Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(14.7, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 6.89 i-l: 6.17

Usteda:11.52

Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(14.7, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 6.89 i-l: 6.17

Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83

Usteda:10.5

Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83

Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V3:(14.4, 1.2)-(14.4, 1.2) l-u: 6.17 i-l: 6.17

Usteda:10.5

Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V3:(14.4, 1.2)-(14.4, 1.2) l-u: 6.17 i-l: 6.17

Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83

Usteda:10.5

Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V4:(14.7, 1.5)-(14.4, 1.2) l-u: 6.38 i-l: 6.17

Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V3:(13.5, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 5.83 i-l: 6.17

Usteda:10.5

Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(14.7, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 6.89 i-l: 6.17

Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600
V1:(13.5, 0)-(13.5, 0) l-u: 5.83 i-l: 5.83

Usteda:10.5

-----KONACNE RUTE-----

[
Parcele: [Parcela: C1, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V3:(13.5, 0)-(14.4, 1.2) l-u: 5.83 i-l: 6.17
, Parcela: C2, Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700
V4:(14.7, 1.5)-(14.4, 1.2) l-u: 6.38 i-l: 6.17
]
Duzina: 31.42
Avion:
Oznaka: A3
Kapacitet - gorivo: 150
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 700

]-----NEOBRADJENE RUTE-----

KONAČNE RUTE

FlightPlanner v2.0
2018-07-22 13:37:26.252904
Ukupno parcela: 2

Pocetak generisanja ruta...

Privremene neobradjene rute:

Privremeni slobodni avioni:

Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

Oznaka: A4
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

Finalne neobradjene rute:

Finalni slobodni avioni:

Oznaka: A1
Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

Oznaka: A2
Kapacitet - gorivo: 200
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

Oznaka: A4

Kapacitet - gorivo: 250
Potrošnja: 1
Kapacitet - hemikalije: 600

Generisanje ruta završeno 2018-07-22 13:37:26.268503

Generisane konacne rute:

Avion: A3
Duzina: 31.42
Parcele: C1 - C2 -
