

Универзитет у Београду
Саобраћајни факултет

Александар М. Чупић

**ПРОЈЕКТОВАЊЕ ТРАНСПОРТНИХ
МРЕЖА ПРИМЕНОМ ЕВОЛУЦИОНОГ
РАЧУНАРСТВА: МРЕЖА ЗА ПРЕНОС
ЕКСПРЕС ПОШТАНСКИХ ПОШИЉАКА**

Докторска дисертација

Ментор: др Душан Теодоровић, дописни члан САНУ,
редовни професор

Београд, 2014.

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC
ENGINEERING

Aleksandar M. Čupić

**TRANSPORTATION NETWORK DESIGN
BY EVOLUTIONARY COMPUTATION:
AN EXPRESS POSTAL PARCEL
DELIVERY NETWORK CASE**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2014

МЕНТОР:

др Душан Теодоровић, дописни члан САНУ, редовни професор
Саобраћајног факултета Универзитета у Београду

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

др Бранка Димитријевић, ванредни професор
Саобраћајног факултета Универзитета у Београду

др Вера Вујчић, редовни професор
Факултета организационих наука Универзитета у Београду

Датум одбране:

ПРОЈЕКТОВАЊЕ ТРАНСПОРТНИХ МРЕЖА ПРИМЕНОМ ЕВОЛУЦИОНОГ РАЧУНАРСТВА: МРЕЖА ЗА ПРЕНОС ЕКСПРЕС ПОШТАНСКИХ ПОШИЉАКА

РЕЗИМЕ

Експрес услуга преноса пакета у многим земљама подразумева доставу пошиљака „од врата до врата” на најбржи могући начин у оквиру економичности. Компаније које се баве овим послом најчешће врше пренос пошиљака кроз тзв. „hub and spoke” мрежу, односно транспортну мрежу са једним или више главних прерадних/сортирних центара – хабова у којима се врши концентрација токова пошиљака. Разлог за организовање такве мреже је ефекат смањивања трошкова транспорта између хабова због великог броја пакета који се превозе између њих. У хабовима се пошиљке размењују између друмских возила, железничких вагона и авиона којима се врши транспорт до/од хаба у процесу који се назива сортирање (прерада) пошиљака.

У циљу правилне организације транспорта пошиљака унутар одређеног региона поштанске/курирске компаније морају донети праве одлуке у вези са бројем хабова за разврставање пошиљака, њиховим локацијама, као и са алоцирањем доставних подручја сваком од хабова. Овај проблем решаван је у раду као вишекритеријумски. Предложени модел заснован је на компромисном програмирању и генетским алгоритмима. Осим тога, поред основног приступа, понуђен је и интерактивни приступ решавању проблема.

Развијени модел могао би се имплементирати на мрежама са великим бројем чворова. У раду је представљена студија случаја за пренос пошиљака у Србији.

У докторској дисертацији се решава проблем из области пројектовања транспортних мрежа за пренос поштанских пошиљака. Овај проблем је један од најважнијих проблема који се јављају у поштанском саобраћају а по својој природи спада у групу локацијских проблема. Основни циљ дисертације је формулација и решавање проблема лоцирања центара за прераду поштанских

пошиљака, одређивање саобраћајних веза као и редова превоза за сваки чвор на мрежи. Правилном локацијом прерадних центара, дефинисањем линија веза на транспортној мрежи као и реда превоза и броја односно типа возила који саобраћају на свакој релацији постиже се максимизација једног од дефинисаних критеријума или њихове комбинације.

Предложени концепт интерактивног решавања овог проблема пружа доносиоцима одлука, као главним корисницима развијених програма, нову димензију разумевања проблема који покушавају да реше.

Кључне речи: Експрес пренос пошиљака, генетски алгоритми, локације хабова, компромисно програмирање, интерактивни приступ.

Научна област: Саобраћај

Уже научне области: Операциона истраживања у саобраћају, Експлоатација, аутоматизација и информатизација поштанског саобраћаја.

УДК број: 656.8:004(043.3)

TRANSPORTATION NETWORK DESIGN BY EVOLUTIONARY COMPUTATION: AN EXPRESS POSTAL PARCEL DELIVERY NETWORK CASE

ABSTRACT

Parcel express service in many countries assumes door-to-door delivery of parcels and small packages in the fastest possible way. Delivery companies usually organize hub a delivery network, since flows between hubs are characterized by economies of scale effect. At hubs, parcels are exchanged between vans, trucks, and planes.

In order to properly organize parcel delivery in a specific region, the parcel delivery company should make proper decisions about the total number of parcel delivery hubs, their locations, as well as allocation of demand for facilities' service to facilities. These issues are modeled in this paper as a multi-objective problem. The model developed is based on Compromise Programming and Genetic Algorithms. Apart from this an interactive manner in which a defined problem can be solved is also demonstrated here.

The proposed model could be implemented in large-scale networks. The case study of express postal parcel delivery network in Serbia is shown in this dissertation.

The doctoral dissertation solves the problem of designing transportation network for postal parcel delivery. This problem, by its nature, is a facility location problem and it is one of the most important problems that appears in postal traffic. The main goal of the dissertation is to formulate and solve the problem of locating facilities for postal parcels sorting, determination of traffic links and transportation schedule for each node in the network. By identifying the right locations of the hubs, correctly defined transportation links in the network and properly setting of transportation schedule, numbers and types of vehicles that operate on each transportation link, it is possible to reach the maximization of one defined criterion or a combination of them.

The proposed concept of solving this problem in an interactive manner offers decision makers, as the main users of the developed software, a new dimension of understanding the problem that they have been trying to solve.

Keywords: Parcel express services, genetic algorithms, hub locations, Compromise Programming, interactive manner.

Scientific field: Traffic

Fields of Academic Expertise: Operations Research in Transport, Exploitation, Automation and Computerization of Postal Traffic.

UDK number: 656.8:004(043.3)

**Мојим родитељима
Миломирки и Миловану**

САДРЖАЈ

ПРЕГЛЕД СЛИКА	I
ПРЕГЛЕД ТАБЕЛА.....	III
1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА.....	1
1.1. Увод.....	1
1.2. ИСТРАЖИВАЧКИ ЦИЉЕВИ	5
1.3. ОРГАНИЗАЦИЈА – САДРЖАЈ ДИСЕРТАЦИЈЕ.....	7
2. ОРГАНИЗАЦИЈА ПРЕНОСА ЕКСПРЕС ПОШИЉАКА	9
2.1. ЕКСПРЕС ПРЕНОС ПОШИЉАКА	9
2.1.1. Врсте и нивои услуга	11
2.1.1.1. Курирске услуге преноса.....	12
2.1.1.2. Услуга преноса до краја радног дана.....	14
2.1.1.3. Уручење следећег и наредних радних дана.....	15
2.1.2. Искуства домаћих и страних оператора.....	17
2.1.2.1. Експрес пренос поштиљака у Србији.....	18
2.1.2.2. Највећи глобални преносиоци експрес поштиљака - интегратори.....	23
2.1.3. Организација доставе – концепт Hub&Spoke преноса	30
2.2. ХАБ – ПРЕРАДНИ ЦЕНТАР.....	32
2.2.1. Опрема за прераду/разврставање поштиљака	35
2.2.2. Разлози, проблеми и услови изградње механизованих прерадних центара за експрес поштиљке	37
2.2.3. Саобраћајна повезаност хабова (прерадних центара).....	39
2.3. ХАБ ЛОКАЦИЈСКИ ПРОБЛЕМИ	40
2.3.1. Основни хаб локацијски модели.....	41
2.3.1.1. Функција циља и проширење хаб локацијских модела	43
2.3.2. Решавање хаб локацијских проблема.....	47
2.3.2.1. Егзактне методе за решавање локацијских проблема	48
2.3.2.2. Хеуристичке методе за решавање локацијских проблема	49
3. МЕТОДОЛОГИЈА РАДА	53
3.1. МЕТАХЕУРИСТИКЕ ИНСПИРИСАНЕ ПРОЦЕСИМА У ПРИРОДИ.....	53
3.2. БИОЛОШКА ОСНОВА ГЕНЕТСКИХ АЛГОРИТАМА	56
3.3. ГЕНЕТСКИ АЛГОРИТМИ	58
3.3.1. Карактеристике генетских алгоритама.....	61
3.3.2. Оператори генетских алгоритама	63
3.3.2.1. Кодирање и функција прилагођености.....	63
3.3.2.2. Оператор селекције.....	65
3.3.2.3. Политика замене генерација.....	68
3.3.2.4. Укрштање - оператор размене генетског материјала.....	69
3.3.2.5. Мутација.....	71

3.3.2.6. Критеријуми заустављања	72
3.3.2.7. Остали аспекти генетских алгоритама	73
3.3.3. Примена генетских алгоритама у пројектовању транспортних мрежа ..	76
3.4. ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКИ АСПЕКТ ПРОБЛЕМА	78
4. РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА ДОСТАВЕ ЕКСПРЕС ПОШИЉАКА ПРИМЕНОМ ГЕНЕТСКИХ АЛГОРИТАМА	83
4.1. ФОРМУЛАЦИЈА ПРОБЛЕМА	83
4.1.1. Мерење укупног профита оператора	86
4.1.2. Мерење нивоа услуге понуђене клијентима	90
4.1.3. Математичка формулација проблема	94
4.2. ПРЕГЛЕД РЕЛЕВАНТНЕ ЛИТЕРАТУРЕ	97
4.3. РЕШАВАЊЕ ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКОГ ПРОБЛЕМА ЛОЦИРАЊА ХАБОВА КОМПРОМИСНИМ ПРОГРАМИРАЊЕМ	99
4.4. ПРИМЕНА ГЕНЕТСКИХ АЛГОРИТАМА НА ЈЕДНОКРИТЕРИЈУМСКИ ПРОБЛЕМ ПРОЈЕКТОВАЊА ТРАНСПОРТНЕ МРЕЖЕ ЗА ПРЕНОС ЕКСПРЕС ПОШИЉАКА	101
4.4.1. Кодирање бинарног низа потенцијалних решења	102
4.4.2. Генерисање иницијалне популације	103
4.4.3. Селекција	104
4.4.4. Укрштање	105
4.4.5. Мутација	106
4.5. ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКИ ПРИСТУП ПРОЈЕКТОВАЊУ МРЕЖЕ ЗА ПРЕНОС ЕКСПРЕС ПОШИЉАКА ПРИМЕНОМ ГЕНЕТСКИХ АЛГОРИТАМА	106
4.6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ	110
4.6.1. Једнокритеријумски приступ	112
4.6.1.1. Максимизација профита	112
4.6.1.2. Максимизација квалитета услуге (времена расположивог пошиљаоцима)	115
4.6.1.3. Максимизација процента клијената којима је на располагању услуга продуженог радног времена	118
4.6.2. Вишекритеријумски приступ	119
4.6.3. Тестирање програма на транспортној мрежи Турске	127
4.6.3.1. Експериментални резултати: два критеријума	131
4.6.3.2. Експериментални резултати: три критеријума	133
5. РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА ДОСТАВЕ ЕКСПРЕС ПОШИЉАКА НА ИНТЕРАКТИВАН НАЧИН	137
5.1. ФОРМУЛАЦИЈА ПРОБЛЕМА	137
5.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ: РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА НА ИНТЕРАКТИВАН НАЧИН	140
6. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА И ПРАВЦИ БУДУЋИХ ИСТРАЖИВАЊА	147
6.1. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА	147
6.2. НАУЧНИ ДОПРИНОСИ ДИСЕРТАЦИЈЕ	148
6.3. ПРАВЦИ БУДУЋИХ ИСТРАЖИВАЊА	149

ЛИТЕРАТУРА	152
БИОГРАФИЈА АУТОРА	177
ПРИЛОГ 1	179
ПРИЛОГ 2	180
ПРИЛОГ 3	181

ПРЕГЛЕД СЛИКА

Слика 2.1. Пример исправно попуњене адреснице за пренос путем „Post Express” службе Поште Србије	10
Слика 2.2. Бар код и RFID налепница за идентификацију пошиљке	11
Слика 2.3. Локације хабова интегратора	32
Слика 2.4. Системи за брзо разврставање пошиљака: а) Закретне платформе; б) Клизне папучице; в) Електро-пнеуматска скретница; г) Гурајућа скретница	36
Слика 3.1. Уобичајени запис GA	60
Слика 3.2. Оператори једнопозиционог укрштања и просте мутације	61
Слика 3.3. Селекција помоћу рулета	66
Слика 3.4. Селекција методом рангирања	67
Слика 3.5. Илустрација оператора двопозиционог укрштања	70
Слика 3.6. Илустрација оператора униформног укрштања	70
Слика 3.7. Илустрација Парето фронта (пуна линија) у случају проблема са две критеријумске функције	81
Слика 4.1. „Hub-and-spoke” мрежа за пренос пошиљака	85
Слика 4.2. Количине пошиљака и капацитети возила	87
Слика 4.3. Временски прозор за преузимање пошиљака	90
Слика 4.4. Повећање укупног броја опслужених чворова увођењем два нова хаба	92
Слика 4.5. Два бинарна стринга	103
Слика 4.6. Укупан профит кроз све генерације ($h = 0.5$)	114
Слика 4.7. Локације хабова и алокација чворова хабовима – максимизација укупног профита ($h = 0.5$)	115
Слика 4.8. Просечне вредности временског прозора за сакупљање пошиљака кроз све генерације	117
Слика 4.9. Локације хабова и алокација чворова хабовима – максимизација просечног временског прозора за сакупљање пошиљака	117
Слика 4.10. Промене процента клијената који могу предати пошиљке после најкаснијег тренутка L , $f_3(\vec{y})$, кроз све генерације	118

Слика 4.11. Локације хабова и алокација чворова хабовима – максимизација процента клијената који могу предати пошиљке после најкаснијег тренутка L	119
Слика 4.12. Парето фронт у случају двокритеријумске анализе (максимизације укупног профита и максимизације просечног временског прозора за сакупљање пошиљака)	121
Слика 4.13. Парето фронт у случају двокритеријумске анализе (максимизације укупног профита и процента клијената који могу предати своје пошиљке на пренос после најкаснијег тренутка $L= 18:45$)	123
Слика 4.14. Недоминирана решења у случају трокритеријумске функције (максимизација укупног профита, максимизација просечног временског прозора за сакупљање пошиљака и максимизација процента клијената који могу предати пошиљке после најкаснијег тренутка $L= 18:45$)	125
Слика 4.15. L_p (блискост идеалном решењу) вредност кроз генерације ($w_1 = 0.6; w_2 = 0.3; w_3 = 0.1$)	126
Слика 4.16. Компромисно решење у случају када је $w_1 = 0.6; w_2 = 0.3; w_3 = 0.1$	126
Слика 4.17. Вредности укупних трошкова кроз генерације ($\alpha = 0.6; f = 20$)	131
Слика 4.18. Парето фронт у случају двокритеријумске анализе (минимизације укупних трошкова и максимизације просечног временског прозора за сакупљање пошиљака)	133
Слика 4.19. Недоминирана решења у случају трокритеријумске функције (минимизација укупних трошкова, максимизација просечног временског прозора за сакупљање пошиљака, максимизација броја чворова са испоруком унутар 24 сата)	136

ПРЕГЛЕД ТАБЕЛА

Табела 2.1. Нормализоване количине експрес пошиљака између чворова компаније City Express	20
Табела 3.1. Упоредни приказ вероватноћа избора јединки за различите операторе селекције	66
Табела 4.1. Чворови и њима додељени временски прозори за сакупљање пошиљака у случају мреже илустроване сликом 4.11	111
Табела 4.2. Резултати добијени у случају максимизације укупног профита транспортне мреже	114
Табела 4.3. Резултати добијени у случају максимизације просечног временског прозора за сакупљање пошиљака	116
Табела 4.4. Резултати добијени у случају максимизације процента клијената који могу предати своје пошиљке на пренос после најкаснијег тренутка L , $f_3(\vec{y})$	118
Табела 4.5. Резултати добијени у случају двокритеријумске функције ($f_1(\vec{x})$ и $f_2(\vec{l})$)	120
Табела 4.6. Резултати добијени у случају двокритеријумске функције ($f_1(\vec{x})$ и $f_3(\vec{y})$)	122
Табела 4.7. Резултати добијени у случају трокритеријумске функције ($f_1(\vec{x})$, $f_2(\vec{l})$ и $f_3(\vec{y})$)	124
Табела 4.8. Резултати добијени у случају минимизације укупних трошкова	130
Табела 4.9. Резултати добијени у случају двокритеријумске функције	132
Табела 4.10. Резултати добијени у случају трокритеријумске функције	134
Табела 5.1. Аспирациони нивои доносиоца одлука и добијена решења кроз девет итерација	143
Табела 5.2. Аспирациони нивои доносиоца одлука и добијена решења кроз 15 итерација	146

УВОДНА РАЗМАТРАЊА



1

1.1. Увод

Проблеми одређивања броја и локације хабова јављају се приликом пројектовања мрежа у ваздушном, друмском, железничком, телекомуникационом и поштанском саобраћају, као и приликом пројектовања система брзе испоруке. Хабова у овим системима представљају аеродроми, железнички чворови, транспортни терминали, центри селекције, сакупљања или преусмеравања робе и путника и сл. Мреже хабова (*hub networks*) се јављају практично у свим савременим транспортним и телекомуникацијским системима. При путовању од изворног до циљног чвора путници, роба или информације увек пролазе кроз један или више хабова. Хабови представљају центре колекције и консолидације токова у мрежи између две локације. Ток између чворова у хаб мрежи се дефинише као број путника или количина робе у јединици времена коју треба транспортовати од почетног чвора (снабдевача) до крајњег чвора (корисника - примаоца). Сваки чвор може да буде директно повезан са једним или више хабова. Разлог за организовање мрежа хабова је покушај смањивања транспортних трошкова. С обзиром да је цена транспорта између хабова по јединици количине нижа то се на овај начин смањују и укупни трошкови транспорта у мрежи. Модерни телекомуникациони и комуникациони системи су такође конфигурисани као мреже хабова. У циљу смањивања цене протока података у овим мрежама, такође се користе хаб чворови (комутатори,

концентратори, портови итд.). Мреже линија великих светских ваздухопловних компанија карактерише постојање великог броја хабова.

Експрес услуга преноса пакета представља класичан пример организације преноса преко хаб мреже. У многим земљама она подразумева доставу пошиљака „од врата до врата” на најбржи могући начин. Постоји, најчешће, ограничење у погледу максималне масе и запремине пошиљке која се може послати. Највећи корисници ове услуге су мала и средња предузећа која шаљу писма и пакете са временски осетљивим роком уручења. Сваку пошиљку која треба да буде уручена карактеришу полазна тачка, адреса примаоца и рок уручења. Постоји више различитих услуга које стоје на располагању пошиљаоцу: курирски пренос, пренос до краја радног дана, гарантовано уручење следећег радног дана тзв. Д+1, гарантовано уручење у року од два радна дана тзв. Д+2 итд. Експрес компаније примају захтеве за преузимањем пошиљака путем телефонских позива, SMS (short message service) порука, e-mail порука и сл., организују преузимање пошиљака, њихов транспорт, разврставање све до уручења на адреси примаоца. По правилу мрежа за транспорт пошиљака унутар посматране земље или региона није потпуно повезана. Компаније које се баве овим послом најчешће врше пренос пошиљака кроз тзв. „hub and spoke” мрежу односно транспортну мрежу са једним или више главних прерадних/сортирних центара – хабова у којима се врши концентрација токова пошиљака. Другим речима, већина пакета се транспортује од једног чвора до другог без директних веза.

Један од најзначајнијих проблема са којима се сусрећу компаније које се баве преносом пошиљака је како да што боље организују транспортну мрежу узимајући у обзир захтеве својих клијената. Много различитих фактора утиче на избор специфичног начина решења овог проблема. Укупни број хабова, њихове локације и алокација доставних подручја надређеним хабовима илуструју начин на који су усаглашени расположиви транспортни ресурси и захтеви за преносом. Приликом одређивања броја и локација хабова морају се узети у обзир различита технолошка, саобраћајна, организациона и финансијска ограничења. У оквиру процеса усклађивања укупног броја хабова и њихових локација са захтевима за преносом јавља се читав низ проблема укључујући димензионисање возног парка, рутирање возила на мрежи, планирање одржавања возила, и то у комбинацији са

планом рутирања возача и њиховим распоредом на радне задатке. Када се одређује укупан број хабова и њихових локација неопходно је да се узму у обзир интереси како компаније превозиоца тако и њених клијената. Услед конфликта ових интереса, проблем одређивања укупног броја хабова и њихових локација је у овом раду формулисан као вишекритеријумски оптимизациони задатак, насупрот традиционалном једнокритеријумском приступу. Како се интерес превозника изражава кроз минимизирање трошкова и остварени профит, а интерес клијената кроз ниво услуге, у раду су дефинисане критеријумске функције које одражавају ове интересе.

Саобраћајни токови између свих парова чворова (изворно-циљна матрица) представљају основне улазне податке за решавање проблема лоцирања хабова. У циљу правилне организације транспорта унутар одређеног региона, компаније које пружају услугу превоза/преноса морају покушати да дају одговоре на неколико стратешких питања: а) колики ће бити укупан број прерадних центара – хабова? б) које ће бити њихове локације? в) како ће бити организована транспортна мрежа на нижем транспортном нивоу (организација доставног подручја за сваки хаб)? г) колико је времена на располагању клијентима за предају пошиљака у току дана? д) да ли је у свим тачкама на мрежи понуђен исти ниво услуге, односно колики је проценат клијената који имају стандардан/повећан ниво услуге на располагању? итд. Проблем којим се бави ова дисертација се може дефинисати на следећи начин: *за познате токове, растојања и времена путовања између свих парова чворова као и трошкове превоза, прераде/разврставања пошиљака и изградње хабова, пронаћи укупан број хабова, њихове локације и сваком хабу доделити подручје са кога ће се ка њему вршити концентрација пошиљака на начин да се максимизирају укупан профит и ниво(и) квалитета услуга који се пружа(ју) клијентима.*

Оптимална одлука у вези са бројем и локацијом хабова треба да буде донета на основу компромиса (*trade-offs*) између више супротстављених критеријума, уз поштовање дефинисаних ограничења. Самим тим, назначени проблем се у докторској дисертацији третира као проблем вишекритеријумске оптимизације. Дефинисани проблем по својој природи спада у групу локацијских проблема који су веома тешки за решавање и спада у групу *NP (Non-Polynomial)*

тешких проблема [Brs88, Cre97, Dre02, Gar79, Jun98]. Осим тога, не постоји општи математички модел који на задовољавајући начин описује све или бар већину хаб локацијских проблема које у пракси можемо наћи. Сваки хаб локацијски модел, зависно од проблема на који се односи, има специфичну структуру (функцију циља, ограничења, променљиве...). Егзактни приступи као што су метода гранања и ограничавања (*branch-and-bound*) и метода гранања и сечења (*branch-and-cut*) најчешће не могу решити проблеме већих димензија у полиномијалном времену рада рачунара што у пракси значи да је ове проблеме немогуће оптимално решити, или је за то потребно неприхватљиво много времена рада рачунара. Као последицу имамо да бројне оптимизационе технике најчешће нису у стању да реше овакав тип проблема.

Специјализовани хеуристички алгоритми могу да реше појединачне проблеме и остваре „субоптимално” решење док се у последњих тридесетак година почело са развојем и применом тзв. „метахеуристичких алгоритама”. Метахеуристички алгоритми представљају највиши ранг метода претраживања које усмеравају и воде остале хеуристичке алгоритме приликом претраживања простора допустивих решења. Основне метахеуристичке алгоритме, поред генетских алгоритама (GA) о којима ће бити више речи у наставку рада, чине следеће технике: симулирано каљење (*Simulated Annealing, SA* [Čer85, Kir83, Met53, Sum02, Sum06, Yig03]); табу претраживање (*Tabu Search, TS* [Glo86, Glo90, Glo97, Her97, Pam01]); оптимизација колонијом мравца (*Ant Systems, AS* [Bon97, Col91, Col92, Dor92, Dor96, Mla97, Dor99, Jun06]); као и метода која је први пут предложена од стране двојице домаћих аутора: Лучић и Теодоровић а која је позната као оптимизација колонијом пчела (*Bee Colony Optimization, BCO* [Luč01, Luč02, Luč03a, Luč03b, Тео09]) и друге. Осим тога могуће је и међусобно комбиновати неке од хеуристичких алгоритама како би се искористиле добре стране сваког од њих уз, евентуалну, хибридизацију са неком од егзактних метода што повећава ефикасност налажења оптималног решења [Abd98a, Abd99, Kid93, Pam01]. До сада су за решавање локацијских проблема из области саобраћаја у литератури најчешће коришћене технике математичког програмирања и специјализоване хеуристичке технике док су методе рачунарске интелигенције

(еволуционо рачунарство, метахеуристички алгоритми, интелигенција роја) биле знатно мање заступљене.

1.2. Истраживачки циљеви

Докторска дисертацији се бави хаб локацијским проблемима који се јављају приликом пројектовања транспортних мрежа за пренос експрес пошиљака. Истраживања у области хаб локацијских проблема су интензивирани крајем прошлог и почетком овог века. Мреже хабова срећемо у различитим областима саобраћаја и транспорта (снабдевање, достава, рачунарске мреже, ваздушни саобраћај...).

Основни циљ истраживања представља развој математичког модела проблема одређивања броја и локације хабова у мрежи за пренос експрес пошиљака. Поред тога, један од основних циљева представља и развој интерактивног рачунарског програма за решавање назначеног проблема који служи као подршка одлучивању доносиоцима одлука. У случајевима када је објекте могуће лоцирати у било којој тачки посматраног региона ови проблеми се зову континуални проблеми [Dri07, Nic05]. У литератури се чешће среће да је објекте могуће лоцирати искључиво у већ дефинисаним чворовима када те проблеме називамо дискретним локацијским проблемима [Cam94b, Man09, Mir90, Rig09]. У дисертацији ће бити разматран проблем који спада у дискретне проблеме што је последица чињенице да је хабова односно прерадне центре поштанских пошиљака, због потреба за добром саобраћајном повезаношћу, урбанистичким, правним и економским ограничењима као и инфраструктурним потребама, могуће лоцирати само у релативно малом, а у сваком случају ограниченом броју тачака.

Први циљ дисертације је развој општег модела hub-and-spoke преноса пошиљака и дефинисање критеријума који су од интереса учесницима преноса од пошиљаоца преко транспортне компаније до примаоца.

Hub-and-spoke мреже преноса су због својих, пре свега, саобраћајно-техничко-технолошких предности постале стандард у организацији преноса: поштанских пошиљака, логистичких јединица, пакета података, итд. Велики број

променљивих утиче на перформансе овакве транспортне мреже: број и локација хабова, повезаност осталих чворова са једним или више хабова, време сакупљања пошиљака на пренос, рокови уручења, број и врста возила која обављају транспорт, ред вожње, трошкови изградње и експлоатације хаб центара, итд.

Правилна локација хаб центара подразумева не само минимизацију трошкова преноса, како је најчешће присутно у литератури, већ и максимизацију нивоа квалитета услуге, процента опслужених корисника или неког другог критеријума који је од интереса неког од учесника у процесу преноса, а који, самим тим, описује перформансе мреже. У тези су, уз развој општег модела преноса, дефинисана три критеријума који представљају интересе како клијената тако и компаније која врши пренос: а) укупан профит преносиоца; б) просечно време које је на располагању пошиљаоцу за предају пошиљке на пренос; в) проценат клијената којима је на располагању додатна услуга у виду предаје пошиљака током продуженог радног времена.

Други циљ докторске дисертације представља развој алгоритма и рачунарског програма за вишекритеријумску анализу уоченог проблема.

Рачунарски програм је заснован на метахуристици Генетски алгоритми. Програм је тестиран на примеру преноса експрес пошиљака у Србији. У дисертацији је дефинисани вишекритеријумски проблем решаван комбинацијом компромисног програмирања и генетских алгоритама. Развој рачунарског програма је заснован на идеји да се креира функционалан и ефикасан програм који би са минималним прилагођавањима могао да решава читаву класу хаб локацијских проблема. Основни улазни подаци који се добијају прикупљањем или прорачунима су: изворишно-циљна матрица пошиљака, јединични трошкови превоза за сваки од типова возила из возног парка, њихови капацитети и експлоатационе брзине, јединични трошкови прераде пошиљака и процењени трошкови успостављања хабова за сваку потенцијалну локацију. Развијени вишекритеријумски концепт решавања уоченог проблема омогућава вршење анализе осетљивости у случају промене важности успостављених критеријума одлучивања.

Трећи циљ докторске дисертације представља развој интерактивног приступа решавању задатог проблема како би се омогућило доносиоцима одлука

да на основу сопствених искустава, уз помоћ рачунарског програма, дефинишу оптималну конфигурацију транспортне мреже.

Решавање хаб локацијских проблема није једноставан задатак тако да модели и програми који их решавају нису увек лако разумљиви за све стране које су заинтересоване за њихово решавање. Формирање интерактивног приступа решавању предложеног проблема требало би да олакша аналитичарима доношење крајње одлуке о топологији и перформансама транспортне мреже. Интерактивни приступ такође омогућава да се, кроз анализу случаја, доносиоци одлуке боље упознају са потенцијалним решењима проблема, уз сагледавање до ког нивоа се морају одрећи инсистирања на неком/неким од критеријума да би добили побољшање једног или више њему/њима супротстављених критеријума. Предложени приступ би требало да буде интуитивно јасан и једноставан за коришћење и да тиме допринесе квалитету одлуке при изабору оптималне конфигурације транспортне мреже узимајући у обзир конкретне услове, и не мање важно, личне ставове различитих корисника.

1.3. Организација – садржај дисертације

Докторска дисертација је организована на следећи начин: У другом поглављу, након општег описа експрес преноса пошиљака, се детаљно обрађује дефинисање нивоа експрес услуге, искуства домаћих и страних оператора као и организација доставе. Представљен је хаб прерадни центар са посебним освртом на опрему која се инсталира у њему. На крају је дат преглед хаб локацијских модела и метода за њихово решавање.

Треће поглавље садржи опис методологије рада кроз анализу метахеуристике Гентески алгоритми. Разматране су биолошке основе и све модификације ове технике, а потом је дат и преглед досадашњих примена. Дата је и теоријска основа компромисног програмирања и интерактивног приступа решавању проблема.

Четврто поглавље је посвећено приказу модела за решавање проблема доставе експрес поштиљака применом генетских алгоритама. Најпре је дата математичка формулација проблема. Преглед релевантне литературе наведен у овом поглављу односи се на дискретне локацијске проблеме. Централни део овог поглавља представља опис развијеног вишекритеријумског модела заснованог на компромисном програмирању. Иако је проблем решаван вишекритеријумски прво је представљена примена генетских алгоритама на једнокритеријумски проблем пројектовања транспортне мреже. У наставку су разматрани и двокритеријумски и трокритеријумски приступ. Истим редоследом, на крају поглавља, дати су експериментални резултати како за случај Србије тако и за Турску.

Пето поглавље садржи интерактивни модел за решавање проблема доставе. Након математичке формулације проблема и прегледа литературе предложено је решење за пројектовање мреже преноса експрес поштанских поштиљака. На крају су дати експериментални резултати.

Коначно, у оквиру шестог поглавља су дата закључна разматрања, допринос докторске дисертације и правци будућег истраживања.

ОРГАНИЗАЦИЈА ПРЕНОСА ЕКСПРЕС ПОШИЉАКА



2

2.1. Експрес пренос поштиљака

Експрес пренос поштиљака представља пренос поштиљака од поштиљаоца до примаоца што је могуће брже у оквиру економичности, по унапред дефинисаном распореду превоза/доставе и по унапред уговореној цени. Ова дефиниција експрес преноса важи како за поштански саобраћај, који се најчешће повезује са овом услугом, тако и за остале превозиоце (логистички оператори, превозиоци у друмском саобраћају, итд.). Из угла корисника поштанских услуга, експрес пренос представља курирски пренос „од врата до врата” који им пружа најбржи и најсигурнији пренос и уручење у прописаним и гарантованим роковима. Таква услуга је, подразумева се, најскупља али су корисници спремни да је плате у случајевима када им је поузданост и брзина уручења послатих поштиљака важнија од цене преноса.

Обзиром на специфичност овако убрзаног преноса постоје и одређена ограничења у погледу врсте, габарита поштиљака, њиховог паковања, адресирања, идентификације итд. Накит, новац, племенити метали, драго камење, опојне дроге, животиње, опасне материје, оружје, муниција и уопште предмети који захтевају посебан третман и обезбеђење најчешће су као и код „обичних” поштиљака искључени из преноса. Поштиљке би, због потреба убрзавања процеса прераде на аутоматским машинама за сортирање, требало да имају стандардне димензије у што већем проценту. Овај захтев је немогуће у потпуности испунити због природе робе која се преноси а која често није дељива али и због

немогућности да се свим пошиљоцима наметне стандардна амбалажа као обавезно паковање за робу коју шаљу. У конкуретном окружењу, какво влада на тржишту услуга експрес преноса пошиљака, оператори веома често излазе у сусрет својим клијентима (нарочито великим корисницима њихових услуга) и прихватају на пренос и пошиљке које не задовољавају критеријуме прописане општим условима преноса које су сами дефинисали. Како би се процес преноса пошиљака убрзао у фази прераде пошиљака, која се одвија у сортирним центрима – хабовима, од пошиљоца се захтева правилно адресирање пошиљака. Правилно адресирање подразумева осим навођења тачне адресе примаоца пошиљке и уписивање кодова који су дефинисани од стране преносиоца за потребе аутоматске идентификације пошиљака. У правилно адресирање спада и дефинисање врсте основних и посебних услуга, уписивање података о пошиљци и свих осталих информација (сл. 2.1) које је преносиоц предвидео као помоћне у циљу: што бржег пренеса преузетих пошиљака, вођења статистика, законски обавезујуће пратеће документације, одређивања контакт особе, праћења пошиљке, дефинисања начина плаћања, итд.

POST EXPRESS **АДРЕСНИЦА** **ПОШТА**
 РЕ 000000001

1 Пошиљалац
 Име и презиме: НИКОЛА НИКОЛИЋ
 Адреса: ПРВОМАЈСКА бр. 18
 БЕОГРАД
 Контакт особа: НИКОЛА Телефон: 011-233587

2 Прималац
 Име и презиме: ПЕТАР ПЕТРОВИЋ
 Адреса: ЦАРА ДУШАНА бр. 1
 НИШ
 Контакт особа: ПЕТАР Телефон: 018-54220

3 Врста услуге
 Данас - сутра
 Данас - данас
 Курирска служба

4 Посебне услуге
 Вредност: 2.000,00
 Откупљена: 2.180,00
 Са повратником Дено

5 Подаци о пошиљци
 Маса: 0,285 кг.
 Опис садржине: 2 МАГИНЕ КРТЕ

6 Потпис пошиљоца
 Н. Николић

7 Потпис примаоца
 П. Петровић

Промена поште: 111000 Шифра курира: []
 Датум пријема: 11110102 Време пријема: 1130

Наčin плаћања: []
 Поштомлаца: []
 Готовина / чек: 240,00
 По фактури
 Готовина / чек
 По фактури

Напомена: []

Потпис курира / радника - М.П.: С. Јовановић

Слика 2.1. Пример исправно попуњене адреснице за пренос путем „Post Express” службе Поште Србије

Очигледно је да је експрес пренос поштиљака комплексна услуга која пружа широк спектар могућности њеним корисницима али и компанији која је пружа јер имплементира читав низ напредних техника и технологија у транспортну мрежу преносиоца. Једна од кључних техника за експресно преношење поштиљака и робе уопште је техника напредне идентификације која се заснива на бар код и/или радио фреквентној идентификацији тзв. RFID (Radio Frequency IDentification) технологији (сл. 2.2). Аутоматска идентификација осим бржег сортирања у хабовима омогућава и ефикасно и прецизно вођење статистика о саобраћаним токовима унутар транспортне мреже које су кључне за њено исправно пројектовање јер представљају полазну основу у свим хаб локацијским моделима о којима ће бити речи у наставку дисертације.



Слика 2.2. Бар код и RFID налепница за идентификацију поштиљке

2.1.1. Врсте и нивои услуга

Експрес пренос поштиљака је слојевита услуга која подразумева више нивоа услуге. Као што јој и име каже примарни атрибут ове услуге, што је и издваја од осталих транспортних услуга, представља брзина уручења. Време потребно за уручење поштиљке у највећој мери зависи од организације транспортне мреже, брзине транспортних средстава и величине подручја које покрива.

Транспортна средства која се користе за експрес пренос поштиљака су по свему иста са осталим транспортним возилима, крећу се истим саобраћајницама и морају поштовати иста ограничења брзине кретања и безбедносних препорука.

Према томе краће време уручења пошиљака не може базирати на већој брзини кретања возила. Специјално пројектован систем преноса и ограничено подручје уручења омогућавају пренос који је бржи од „класичног” и носи префикс „експрес”. Услуге експрес преноса се могу поделити на три основне групе:

- Курирске услуге преноса када се пренос пошиљака, услед временског ограничења за испоруку, извршава без или са што мањим бројем операција претовара и без сортирања. Из истог разлога је уручење ограничено на веома уску територију (по правилу територију једног града).
- Услуге преноса до краја радног дана – пренос и уручење пошиљака се одвија унутар истог радног дана. Временски рокови који нису толико строги као у случају курирске услуге чине да је територија коју покрива ова услуга далеко већа услед чега је повећан и број операција претовара али и даље веома често без сортирања у хабовима.
- Под уручењем најраније следећег радног дана подразумева се читав низ услуга у унутрашњем и међународном саобраћају. Обзиром да су временски рокови уручења најчешће један, а у међународном саобраћају некада два и више дана, ова услуга је могућа на готово целој територији једне земље или чак више земаља. Број операција претовара је релативно велик уз обавезно сортирање пошиљака у хабовима и коришћење великог броја превозних средстава друмског, железничког и авио саобраћаја.

Свака од набројаних услуга које представљају посебне нивое експрес преноса пошиљака има сопствене карактеристике: другачије организовану транспортну мрежу, организацију рада, транспортна средства, тарифну политику и стратегију развоја, тако да се може слободно рећи да су довољно различите да се могу посматрати и решавати као потпуно самостални транспортни проблеми.

2.1.1.1. Курирске услуге преноса

Курирске услуге преноса пошиљака се базирају на куририма као главним носиоцима који одлазе на адресу пошиљаоца, преузимају пошиљку, транспортују је до претоварне тачке где врше размену пошиљака и преузимају оне пошиљке

које треба да испоруче примаоцима на делу доставног подручја за које су задужени. Приликом рада курири паралелно врше и преузимање и испоруку пошиљака а нису ретки ни случајеви када преузету пошиљку уручују директно, без одласка у тачку претовара/размене, на адресу примаоца ако су и пошиљалац и прималац на њиховом реону. У литератури је ова врста услуге решавана као *Pickup and Delivery* проблем. Међу многобројним радовима у последње време преовладава хеуристички и метахеуристички приступ решавању овог проблема [Gaj09, Gok13, Sub10, Wan12, Zid12]. У литератури се најчешће решава проблем динамичког рутирања курирских возила са временским ограничењима јер представља суштину комплетне курирске услуге преноса. За ову дисертацију нарочито је интересантан рад [Wan13] где аутори користе коеволутивни алгоритам чија су основа два генетска алгоритма о којима ће бити више речи у следећем поглављу. Један алгоритам Wang и Chan користе искључиво за побољшање диверсификације генетског материјала тако што у свакој генерацији најбољу јединку даје другом алгоритму чија је улога тражење најбољег решења кроз генерације. На тај начин аутори избегавају многе недостатке са којима се сусрећу генетски алгоритми.

Корисници услуга телефоном или путем интернет-а комуницирају са диспечерском службом и испостављају захтеве за превозом који се карактерише извором, садржајем и циљем тзв. *Dial a Ride*. На основу испостављених захтева (који се посматрају као новоселектовани чворови) врше се измене рута возила која на терену опслужују кориснике. Да би целокупан процес преноса трајао мање од максималних 4 сата (ограничење је последица величине доставног подручја) и да би се достигла задовољавајућа ефикасност, масовност и профитабилност, осим правилног рутирања неопходно је да курирска служба буде базирана на највишим стандардима информационо комуникационих технологија (*Information and Communications Technology*) ИСТ. Ово подразумева спрегу неколико система заснованих на потпуно различитим техникама. Ту спадају, пре свега, транспортни систем, затим систем за комуникацију и утврђивање тренутних локација возила курирске службе и информациони систем са базом адреса.

Да би се организовала квалитетна курирска услуга на основу претходно реченог пројектује се софтвер за подршку који мора да садржи следеће елементе:

- комуникацију возила - диспечерски центар,
- мониторинг (позиционирање и праћење возила) применом GSM и/или GPS технологије,
- рутирање возила (динамичког карактера са хеуристичким/метахеуристичким приступом решавању),
- праћење пошиљака и
- базу података о корисницима и активностима возила.

2.1.1.2. Услуга преноса до краја радног дана

Услуга преноса до краја радног дана представља релативно нову услугу, нарочито на нашим просторима. Реч је о услузи кориснику која подразумева да пошиљка коју је предао до одређеног крајњег тренутка у току дана (у зависности од положаја полазног чвора на транспортној мрежи) буде уручена тог истог дана до унапред дефинисаног крајњег рока (код нас обично 20 часова). Оно што ову услугу разликује од „класичног” курирског преноса, који такође почиње и завршава се у оквиру истог радног дана, су дужи рокови уручења али неупоредиво већи реон доставе а самим тим и ранији престанак са преузимањем пошиљака. Услуга је првенствено намењена изразито хитним пошиљкама које не могу да чекају да буду испоручене следећег дана и могућа је на ограниченим деловима територије који се налазе у непосредној близини брзих саобраћајница и које, осим повољног географског положаја, карактерише јака привредна активност и међусобна повезаност. Такав је случај са мегалополисима, појединим развијеним привредним регијама, или у нашој земљи градовима који се налазе у близини европских коридора E70, E75 и E763.

Услед изразито строгих и рестриктивних временских ограничења за испоруку на релативно великим раздаљинама између пошиљаоца и примаоца транспортна мрежа за пренос пошиљака до краја радног дана је пројектована тако да има свега неколико главних транспортних линија које се укрштају у једној тачки. Главне транспортне линије се са споредним линијама превоза укрштају у

тачкама претовара где се, у тачно одређеним временским тренутцима, врши примопредаја пошиљака по њиховим доставним подручјима. Највише времена, по правилу, се утроши при самом транспорту тако да у ситуацијама када саобраћајни токови нису интензивни не врши њихова концентрација у хабовима где би се обавило сортирање односно одакле би се кренуло са дистрибуцијом. У таквим ситуацијама се још приликом преузимања пошиљака од пошиљаоца врши предразврставање по одредишним правцима тако да се приликом сустицања линијских возила (авиона) која саобраћају на главним правцима врши размена већ оформљених закључака односно само претовар. Из тог разлога ова услуга, нарочито у нашој земљи, далеко више подсећа на курирску него на традиционалну поштанску услугу какав је случај са уручењем следећег радног дана којим се бави ова дисертација и о коме ће би речи у наставку.

Набројане карактеристике уручења до краја радног дана учиниле су да превозиоци за ову услугу пројектују посебне транспортне мреже које су потпуно независне од њихових „стандардних” транспортних мрежа. Компаније за ову услугу најчешће користе посебан возни парк са сопственим куририма док од основних ресурса најчешће користе само неке приступне тачке за кориснике и диспечерски центар. Укратко ова услуга је толико посебан производ на тржишту превозничких услуга да се слободно може рећи да представља посебан транспортни проблем нарочито ако би се, за разлику од садашњег статичког приступа где су мрежа и линије фиксирани, посматрала динамички.

2.1.1.3. Уручење следећег и наредних радних дана

Уручење најраније следећег радног дана је најразвијенија услуга експрес преноса пошиљака. Уколико пошиљалац преда пошиљку (куриру или директно на некој од приступних тачака/шалтера превозиоца) до унапред дефинисаног тренутка у току дана она ће бити уручена у току следећег радног дана такође до неког крајњег временског тренутка (пре подне, до 15, 18 сати итд) или касније. Иако највећи проценат свих експрес пошиљака буде уручен следећег радног дана

(тзв. Д+1 пренос обухвата по правилу све експрес пошиљке у унутрашњем и део међународног експрес саобраћаја) један број пошиљака се уручи за два, три или више дана (Д+2, Д+3...) услед чега се мора говорити о уручењу најраније следећег радног дана. Једине компаније које гарантују пренос експрес пошиљака у међународном саобраћају (на територији преко 200 земаља) са временским ограничењем Д+1 су познате као интегратори односно глобални оператори експрес преноса (највећи су: DHL, FedEx, TNT, USPS).

Обзиром да је уручење након следећег радног дана по правилу узроковано превеликом удаљеношћу примаоца или међудржавним прописима о царињењу док се са аспекта пројектовања транспортне мреже готово и не разликује од Д+1 уручења у наставку рада ће се посматрати искључиво уручење првог следећег радног дана. Осим тога глобално посматрано укупне количине експрес пошиљака које се упућују копненим путем кроз више транзитних земаља услед чега се уручују за два или више дана су занемарљиве у односу на број преузетих и уручених пошиљака у Д+1 режиму преноса.

Уручење следећег радног дана је првенствено намењено корисницима који желе да њихове пошиљке стигну на своја одредишта у што краћем и истовремено гарантованом року, да пренос и уручење буду поуздани и да се могу пратити кроз све фазе. Ову услугу је могуће организовати за велики број потенцијалних корисника на широкој територији која може бити не само национална већ и планетарна. За разлику од претходно описаних услуга експрес преноса код којих се уручење гарантује у току истог дана када је и преузета пошиљка, код уручења следећег радног дана превозиоц има на располагању довољно времена за концентрацију саобраћајних токова. Концентрација саобраћајних токова се врши како би се смањили трошкови превоза кроз коришћење висококапацитивних превозних средстава на линијама које повезују хабове са додељеним чворовима и међусобно. Други разлог за концентрисање свег саобраћаја у једном или неколико изабраних чворова је коришћење система разврставања великог капацитета који смањују јединичну цену претоварних операција по пошиљци.

Описана транспортна мрежа у којој се, услед наведених уштеда, комплетан саобраћај концентрише у појединим чворовима (*Hubs*) након чега се дистрибуира

ка осталим чворовима који се са хабовима повезују директним саобраћајним везама (*Spokes*) позната је као тзв. *Hub and Spoke* транспортна мрежа и о њој ће више речи бити касније. Треба још додати да се осим система уручења пошиљака следећег радног дана оваква мрежа среће и у осталим модерним транспортним и телекомуникационим системима.

На крају треба рећи да поделу нивоа експрес услуга треба узети условно. Обзиром да на тржишту услуга експрес преноса послује велики број компанија понуда тих услуга је веома разноврсна и слојевита. Веома често, када превозник нуди више различитих транспортних услуга, заједно користи ресурсе са осталим транспортним услугама (хабове, транспортна возила, курире, шалтере...) јер често није економски оправдано правити потпуно независну транспортну мрежу поред већ постојеће. На овај начин се побољшава искоришћење ангажованих људи и средстава. У савременом поштанском саобраћају, одакле ће бити и студија случаја у овој дисертацији, све чешће се постављају захтеви за Д+1 пренос и одређеног процента „обичних” пошиљака. За разлику од пошиљака које нису експрес, а које у неким случајевима такође могу да буду уручене следећег радног дана, у случају експрес преноса се таква испорука гарантује. Да би се услуга експрес преноса могла гарантовати превозиоц, ако не жели да пројектује посебну транспортну мрежу за пренос таквих пошиљака, мора експрес пошиљкама дати првенство преноса у свим фазама преноса.

2.1.2. Искуства домаћих и страних оператора

Искуства компанија које се баве експрес преносом у Србији и свету су, обзиром на њихов велики број, крајње различита. У зависности од величине компаније, величине територије коју покрива, локалне регулативе, конкуренције, развијености тржишта, пословне стратегије и многих других како спољних тако и унутрашњих, ограничења и могућности настале су најразличитије транспортне мреже а са њима и услуге експрес преноса.

2.1.2.1. Експрес пренос поштиљака у Србији

На српском тржишту експрес преноса доминирају поштанско логистичке компаније (Пост Експрес, City Express, и AKS Express Kurir) које, уз још неколико, нешто мањих компанија, својим клијентима нуде услуге преноса до краја радног дана (ређе за 3 до 4 сата од преузимања поштиљке) или у току следећег радног дана. Услуга преноса следећег радног дана је далеко најзначајнија и најзаступљенија услуга експрес преноса у Србији.

Специфичан проблем у анализи домаћег тржишта експрес услуга представља велики број малих, често и нерегистрованих, локалних експрес служби које се у кратком временском року појављују, послују и нестају са тржишта. На тај начин оне на одређеним подручјима представљају мање или више озбиљну а понекад и нелојалну конкуренцију већим компанијама. Са аспекта корисника постоји превелик број компанија (не постоји прецизна статистика о укупном броју али их је у сваком тренутку на тржишту више десетина па и стотина) које нису у стању да испуне стандарде квалитета што корисник привучен атрактивном ценом не може унапред да зна. Експрес пренос у Србији нема дугу традицију тако да се може рећи да се тржиште тек успоставља, да није на прави начин измерено јер не постоји податак о укупној потражњи за овим услугама, као и да корисници нису потпуно заштићени и поред постојања правне регулативе за ову област.

Са друге стране компаније које превазилазе локалне оквире пословања, имају респектабилан возни парк и број поштиљака које свакодневно преносе. Оне својим корисницима нуде уједначен и гарантован квалитет услуга међусобну конкуретност исказују преко:

- покривености што већег броја градова и општина а самим тим и корисника у земљи,
- тарифа преноса,
- гарантованих рокова испоруке,
- посебних погодности за велике клијенте,

- флексибилности у пријему и испоруци нестандартних пошиљака,
- посебних услуга (праћења, паковања, попуњавања адреснице, посебног руковања, преноса палетне и вангабаритне робе, збирног преноса, поновног покушаја доставе, повратне документације, формирања извештаја о извршеној испоруци, преузимања откупнине, дефинисање времена преузимања и испоруке робе, изнајмљивања курира на одређени временски период итд.),
- услуга увоза и извоза пошиљака у међународном експрес саобраћају (EMS – Express Mail Service),
- осигурања преношених пошиљака,
- обавештавања кратким порукама (SMS – *Short Message Service*) или e-mail порукама о статусу пошиљке, итд.

Далеко најразгранатију доставну мрежу на домаћем тржишту експрес услуга има Пост Експрес – сервис Поште Србије. Пост Експрес у оквиру своје услуге доставе наредног радног дана врши пријем у више од 800 објеката широм земље, а путем курира у близу 100 већих насеља. Разлог за тако доминантан положај у погледу доступности услуге лежи у више од 170 година пословања Поште Србије током којих је ова компанија постала доступна и у најзабаченијим деловима земље што је Пост Експрес наследио. Доступност је важан али не и одлучујући фактор у генерисању саобраћајних токова јер остале компаније, које немају ни приближно тако развијену транспортну мрежу, покривањем само најзначајнијих регионалних центара по обиму посла успешно конкуришу Пошти Србије. Услуга експрес преноса је услуга повећане вредности чији корисници су у највећој мери индустрија, трговина и становништво великих привредних и административних центара тако да се мрежом која покрива такве центре обезбеђује приступ великом проценту потенцијалних корисника. Просечне количине експрес пошиљака (дневне, месечне, годишње) као и укупни приходи и трошкови сваке компаније су пословна тајна. У овој дисертацији ће се, у делу студије случаја, користити њихове нормализоване вредности, на захтев компаније City Express.

Табела 2.1. Нормализоване количине експрес пошиљака између чворова компаније City Express

До Од	БГ	СУ	ЧА	ЈА	ПО	НИ	ЗР	БО	ВХ	УЕ	ВА	ША	КШ	НП	НС	КГ
БГ	0	0.04064	0.04900	0.02728	0.03531	0.05715	0.02698	0.02646	0.03096	0.03286	0.02464	0.03470	0.02388	0.01373	0.08146	0.03242
СУ	0.01763	0	0.00222	0.00080	0.00117	0.00232	0.00201	0.00069	0.00122	0.00109	0.00100	0.00144	0.00059	0.00048	0.00705	0.00117
ЧА	0.01419	0.00172	0	0.00117	0.00087	0.00329	0.00063	0.00077	0.00145	0.00292	0.00116	0.00117	0.00151	0.00113	0.00305	0.00142
ЈА	0.00861	0.00110	0.00133	0	0.00084	0.00163	0.00033	0.00105	0.00086	0.00063	0.00058	0.00050	0.00066	0.00077	0.00239	0.00065
ПО	0.00742	0.00046	0.00047	0.00032	0	0.00117	0.00030	0.00021	0.00023	0.00020	0.00037	0.00040	0.00021	0.00008	0.00102	0.00042
НИ	0.02328	0.00258	0.00353	0.00211	0.00242	0	0.00200	0.00464	0.00368	0.00215	0.00126	0.00161	0.00242	0.00071	0.00552	0.00221
ЗР	0.00690	0.00132	0.00065	0.00033	0.00092	0.00113	0	0.00032	0.00019	0.00031	0.00046	0.00049	0.00045	0.00014	0.00199	0.00036
БО	0.00668	0.00040	0.00048	0.00029	0.00024	0.00193	0.00011	0	0.00084	0.00034	0.00011	0.00014	0.00015	0.00010	0.00091	0.00038
ВХ	0.00870	0.00094	0.00097	0.00033	0.00032	0.00214	0.00042	0.00078	0	0.00040	0.00036	0.00086	0.00048	0.00033	0.00249	0.00061
УЕ	0.00828	0.00078	0.00147	0.00045	0.00034	0.00127	0.00040	0.00029	0.00036	0	0.00069	0.00054	0.00050	0.00044	0.00141	0.00059
ВА	0.00919	0.00072	0.00180	0.00132	0.00133	0.00196	0.00054	0.00038	0.00044	0.00111	0	0.00091	0.00117	0.00048	0.00270	0.00115
ША	0.00856	0.00091	0.00088	0.00018	0.00038	0.00102	0.00036	0.00024	0.00024	0.00052	0.00058	0	0.00033	0.00010	0.00158	0.00031
КШ	0.00911	0.00080	0.00132	0.00070	0.00061	0.00160	0.00091	0.00054	0.00115	0.00057	0.00067	0.00069	0	0.00031	0.00201	0.00079
НП	0.00405	0.00029	0.00107	0.00015	0.00031	0.00050	0.00013	0.00005	0.00029	0.00049	0.00036	0.00015	0.00035	0	0.00054	0.00029
НС	0.03535	0.00995	0.00572	0.00258	0.00277	0.00911	0.00508	0.00288	0.00281	0.00368	0.00251	0.00420	0.00242	0.00094	0	0.00348
КГ	0.01328	0.00371	0.00370	0.00239	0.00302	0.00468	0.00266	0.00345	0.00288	0.00575	0.00142	0.00174	0.00263	0.00130	0.00459	0

Цена услуге преноса представља веома битан параметар у избору превозиоца без обзира да ли се ради о „стандардном” или експрес преносу. Цена експрес преноса се формира на основу габарита пошиљке (најчешће само на основу масе пошиљке), растојања између пошиљаоца и примаоца (у домаћем саобраћају ово растојање нема утицаја) и брзине уручења. Експрес пренос је за исте габарите и раздаљине и до 5 пута скупља услуга од преноса са уобичајеним роком испоруке што значи да су корисницима брзина као и остале карактеристике уручења у случају ове услуге толико важни да пристају на повећану цену преноса. У таквим околностима компаније које послују на тржишту експрес услуга профилишу своје услуге тако да чак и за квалитативно исте или сличне услуге

имају релативно неусаглашене тарифе (нпр. услуга уручења следећег радног дана за пошиљку масе 4 килограма на територији Србије се наплаћује између 320 и 480 динара!). Дисперзија у ценама која се креће од 25 до 50% код водећих оператора показује да је пресудан чинилац на овом тржишту лојалност корисника који не бирају превозиоца само на основу понуђене цене већ на основу специфичног склопа карактеристика сваке услуге.

Рокови уручења експрес пошиљака су на територији Србије гарантовани у три нивоа, како је већ објашњено. Неке компаније не нуде све три услуге (курирска, до краја радног дана и следећег радног дана) док поједине врше поделу на подуслуге у оквиру једне услуге (уручење следећег радног дана до 12 или до 19 часова). Каква год да је понуда оператора гарантовање рокова уручења најчешће се огледа у вишеструком повраћају трошкова транспорта (поштарине) у случајевима када се пошиљка не испоручи у гарантованим роковима.

За разлику од гарантованих рокова који су понуђени свим корисницима за оне највеће постоје посебне погодности. Обзиром на добро познату чињеницу [And12] да у укупним количинама доминирају пошиљке које потичу од великих корисника и правних лица уопште (пошиљке послате од стране физичких лица чине свега неколико процената свих пошиљака без обзира да ли су експрес или не) ови корисници имају посебан третман код свих оператора експрес преноса. Великим корисницима експрес компаније нуде попусте на количине пошиљка које шаљу (од 2,5 до 30% на укупну цену када је месечни број пошиљака већи од 45 хиљада). Осим тога омогућено им је и уговарање различитих врста тарифа у зависности од специфичних потреба којима се преносиоци посебно прилагођавају. Осим тога посебне услуге које се нуде корисницима настале су на захтев и углавном су намењене управо великим корисницима иако их, под одређеним условима, могу користити и сви остали. Пренос палетне и вангабаритне робе је допунска услуга експрес преноса која је у својој основи логистичка и намењена је пре свега мањим компанијама које немају свој возни парк иако је у неким случајевима користе и физичка лица. Формирање извештаја о извршеној испоруци заједно са преузимањем откупнина користи интернет продаја, дистрибутери резервних делова и остале компаније које немају разгранату продајну мрежу. Дефинисање времена преузимања и испоруке робе је

опција интересантна фирмама које у неком тренутку у току дана желе да пошаљу дневне наруџбине клијентима који су током дана извршили наручивање одређене робе. Изнајмљивања курира на одређени временски период је намењено компанијама које имају само повремене потребе за специфичним и сложеним курирским задацима какве извршавају стално запослени курири. Погодностима намењеним великим корисницима експрес компаније се боре за њихову наклоност и лојалност које им доносе већи обим посла, стабилност у погледу дневних количина пошиљака и бољу искоришћеност превозних капацитета што све заједно резултује већом профитабилношћу укупног пословања.

Када се говори о флексибилности у пријему и испоруци нестандартних пошиљака пренос палетне и вангабаритне робе, као допунска услуга, се изузима из посматрања. Спремност да се од корисника преузме и пошиљка која не задовољава прописане стандарде и услове преноса представља реалност на српском тржишту. Услед малих количина пошиљака, оштре конкуренције и борбе за сваког појединачног корисника експрес компаније најчешће нису у ситуацији да одбију сваку пошиљку која не задовољава све прописане услове нарочито ако је предата од стране редовног корисника експрес услуга. На тај начин се дешава да се неке нестандартне, неадекватно упаковане па чак и пошиљке забрањене садржине прихватају и преносе по цени стандардних само како би се корисник „сачувао” од преласка код конкурентског преносиоца.

Неке од посебних услуга намењених првенствено великим корисницима су већ представљене док су остале (праћење, паковање, попуњавање адреснице, посебно руковање, збирни пренос, поновни покушај доставе) осмишљене како би корисници добили додатни квалитет или задовољили неке специјалне захтеве. Праћење пошиљака тзв. *Track and Trace* (Т&Т) је добро позната услуга праћења послате пошиљке током фаза преноса коју подједнако користе пошиљалац, прималац (праћењем путем интернет апликације или добијањем SMS порука) али и сам преносилац. Паковање и адресирање пошиљака се нуди корисницима који доносе неупаковану робу и који немају искуства у слању пошиљака. Посебно руковање се односи на пренос осетљивих пошиљака, збирни пренос користе пошиљеоци који шаљу више пошиљака на исту адресу док је поновни покушај

доставе намењен корисницима који желе да буду сигурни да ће њихова пошиљка сигурно бити уручена.

Велики експрес преносиоци у Србији кроз стратешку сарадњу са неким од оператора из суседних земаља или као агенти глобалних експрес преносиоца (DHL, UPS, FedEx) нуде својим корисницима пријем и испоруку пошиљака у међународном експрес саобраћају. На тај начин домаће тржиште експрес услуга у потпуности је интегрисано у међународно што корисницима пружа могућност да несметано шаљу своје пошиљке широм планете. Свака пошиљка, при том, је осигурана од евентуалних оштећења и губитака.

Заједничка црта искустава оператора експрес преноса у нашој земљи је да су широком лепезом основних и додатних услуга постигли квалитет услуге који је био довољан да их неке од светски познатих компанија из ове области укључе у своје системе. Са друге стране прилагођавање њихових транспортних мрежа новим услугама углавном је било минимално тако да се посматрањем основне услуге преноса са уручењем следећег радног дана решава проблем пројектовања мреже која ће бити способна да омогући тако разноврсну палету додатних могућности. Још једна заједничка особина домаћих експрес компанија је повраћај до десетоструког износа цене преноса у случајевима делимичног или потпуног оштећења пошиљке односно надокнада дефинисане вредности пошиљке увећане за цену преноса (ограничено на неку максималну вредност у збиру) у случају преноса вредносних пошиљака.

2.1.2.2. Највећи глобални преносиоци експрес пошиљака - интегратори

За разлику од домаћег тржишта експрес преноса пошиљака, међународно тржиште одликује добра развијеност и регулисаност, дуга традиција, велики обим саобраћаја а самим тим и велики приходи. Највеће светске компаније у овој области су: DHL, FedEx, TNT и USPS. Ове компаније (и поред постојања великог броја других) осим што имају далеко највеће учешће на тржишту представљају пионире на овом пољу и главне носиоце развоја експрес преноса. Због своје

величине и значаја делатности којом се баве ове четири мултинационалне компаније имају изразит утицај на светску економију уопште и у наставку рада њима ће бити посвећена посебна пажња.

Тржиште преноса експрес пошиљака, према истраживању спроведеном на Оксфорду [Oxf09], 2008. године је учествовало у укупном светском БДП-у (брuto друштвени производ) са 80 милијарди долара од чега је готово половина генерисана на територији Европе. Осим тога, само у области продаје, експрес пренос је генерисао промет од 175 милијарди долара.

Важна карактеристика светског тржишта експрес преноса је константан раст који се предвиђа и у будућности. У периоду од 2004. до 2009. године ово тржиште је бележило просечан раст физичког обима од 4% годишње [Oxf09]. На основу истог истраживања након нешто смањеног раста од просечно 3% годишње до 2014. године може се очекивати раст од 7% годишње до 2019. године са потенцијалом још бржег развоја. Овакав тренд требало би да доведе до раста од 60% директног доприноса „експрес индустрије” светском БДП-у у 2018. години што би по данашњим ценама достигло 135 милијарди долара. Експрес пренос пошиљака 2008. године чинио је готово половину авио карго транспорта (предвиђао се раст удела од 5% годишње) којим се обавља 35% међународне трговине. Међународна трговина, са друге стране, има константан апсолутни раст у претходном периоду уз прогнозу даљег напредовања што ће додатно утицати и на пораст броја експрес пошиљака јер купци захтевају све краће рокове за испоруку робе.

Осим директног утицаја на светску економију експрес пренос има још значајнији индиректни утицај на многе растуће привредне гране: високу технологију, интернет и телекомуникације, фармацеутску индустрију, електронику, финансијски сектор, ауто индустрију и малопродају. На тај начин индустрија експрес преноса постаје генератор послова за велики број људи широм света.

Компаније за експрес пренос су још 2009. године директно запошљавале више од 1,3 милона (индиректно 2,75 милиона) људи најразличитијих струка (радника разврставања, инжењера, техничара, административних службеника,

менаџера итд.). Овај број ће се са развојем индустрије повећавати тако да се очекује да до 2018. године 1,8 милиона људи директно ради у овој индустрији (индиректно 3,8 милиона).

Утицај ове индустрије може се илустровати и кроз следеће чињенице које говоре саме за себе:

- дневно се преноси више од 6 милиона пакета,
- више од 200 хиљада камиона и доставних возила део је транспортне мреже експрес индустрије,
- 1200 авиона се налази у власништву експрес компанија уз свакодневно коришћење преко 2000 комерцијалних летова,
- више од 220 земаља је покривено експрес преносом,
- практично све мултинационалне компаније редовно користе експрес пренос у свом пословању,
- две трећине компанија је у стању да уштеди коришћењем експрес преноса и верује да експрес пренос повећава флексибилност компаније уз уштеде у укупним трошковима дуж ланца снабдевања од 3% до 5%,
- експрес индустрија је способна да у року од 72 сата повеже 90% светске економије.
- готово 40% свих компанија користи испоруку у току следећег радног дана у случајевима када им клијенти захтевају хитну испоруку робе [Oxf09].

Описаним тржиштем експрес транспорта доминирају компаније које користе посебан производно-транспортни концепт. Овај концепт интегрише све фазе преноса и превозна средства у транспортном ланцу од стране једне компаније. Из тог разлога се овакав концепт, односно компаније које га спроводе у дело, називају интегратори. Без обзира што интегратори често немају довољно јак интерес да покрију све територије сопственим превозним средствима, ангажовање локалних оператора (тзв. агената) не мења концепт интегрисаног транспорта јер се агенти у потпуности прилагођавају систему преноса интегратора. Интегратори у толикој мери доминирају сегментом међународног превоза докумената и експрес пакета да врло често бивају идентификовани са експрес тржиштем у целини. Као илустрација величине ових компанија може

послужити чињеница да, не рачунајући њихове агенте, свака од четири највеће има у свом саставу неколико десетина хиљада возила (FedEx има између 40 и 50 хиљада), више од 100 хиљада запослених (DHL запошљава преко 250 хиљада људи) и више десетина па и стотина авиона (FedEx има око 600).

Систем преноса интегратора предвиђа коришћење свих расположивих средстава у оквиру исте компаније и често се назива „затворена петља“. Он представља радикалну предност у смислу контроле целокупног транспортног ланца чиме се постиже већи ниво поузданости, укупни трошкови се лакше идентификују, док интегратор постиже предност у погледу броја и врсте услуга које нуди, поузданости и брзине преноса и контроле целокупног производног процеса. Основне карактеристике интегратора су:

1. „Затворена петља“
2. *Hub and Spoke* систем преноса
3. Пренос „од врата до врата“
4. Изразита брзина преноса
5. Унапред одређена цена услуге
6. Унапред одређено време доставе (уручења)

Интегратори су управо захваљујући наведеним карактеристикама постали наднационалне компаније које осим експрес транспортних услуга пружају и широк спектар услуга дуж ланца снабдевања: логистичких (царинско посредовање, складиштење, превоз робе у контејнерима и палетама итд.), класичне транспортне услуге, транспорт опасних материја, клиничке експрес услуге (пренос специфичних медицинских, фармацеутских или биотичких материјала), пренос кварљиве робе. Неки интегратори користе своје велико искуство у транспорту за пружање и консултантских услуга корисницима.

DHL (Dalsey, Hillblom, Lynn) у већинском власништву *Deutsche Post* је лидер на глобалном тржишту експресног транспорта, друмског и ваздушног карго транспорта, бродског превоза и транспортној логистици. Међународна мрежа DHL-а са својих 285.000 запослених пружа могућност слања пошиљака тешких и

до 2500 килограма у више од 220 земаља и територија са 120.000 одредишта на свим континентима.

DHL врши пренос различите робе и докумената у различитим роковима преноса од којих су најзначајније:

- DHL Express 9:00/12:00 – достава докумената (од врата до врата) у међународном саобраћају до 9/12h наредног радног дана, у свим великим пословним центрима Европе, за пошиљке тешке до 250 килограма.
- DHL Express Worldwide – достава пошиљака које су тешке до 250 килограма пре 18h наредног или првог следећег радног дана, у складу са препорученим транзитним временима (доступна у више од 220 земаља).
- DHL Economy Select – услуга специјализована за транспорт пакета и палета тежих од 30kg (авионско-друмски транспорт пошиљака „од врата до врата” које су тешке до 2500kg са роком испоруке од 5 до 10 радних дана зависно од дестинације).
- DHL Import Express Worldwide – услуга за оне који редовно увозе резервне делове, узорке, готове или друге врсте производа (преузимање пошиљке која је тешка до 250 kg у било ком граду у свету, извозно царинење у земљи из које се шаље, транспорт до жељене дестинације, увозно царинење и достава пошиљке).

Наведене услуге DHL пружа користећи више мањих (Бахреин, Бомбај, Манила...) и два главна међународна хаба (Синсинати и Лајпциг) [DHL].

FedEx (Federal Express Corporation) углавном базира пословање на сопственим авионима и возном парку. Међу интеграторима је пионир у многим технолошким областима (специјалне врсте амбалаже, пратећа документација, примена кода, употреба обновљивих извора енергије итд.). Четири основне групе услуга се налазе у понуди овог интегратора:

- Пословна писма до 250 gr,
- Гломазна пословна писма,

- „Међународна кутија“ (вожња докумената и малих пакета),
- Тежи пакети (до 68 kg) и групне пошиљке.

На територији САД-а, где се налази седиште компаније, у унутрашњем саобраћају пружа услуге: FedEx SameDay (услуга од врата до врата у оквиру једног сата), FedEx SameDay City (курирски пренос на територији града), FedEx First Overnight (испорука рано ујутру – пре почетка пословног дана), FedEx Priority Overnight (њихова најпопуларнија услуга када прималац захтева испоруку следећи радни дан), и још читав низ мање или више специјално пројектованих услуга.

У међународном саобраћају њихове највише коришћене услуге су следеће: FedEx International Next Flight (најбржа испорука првим следећим летом), FedEx International Priority Direct Distribution (пошиљке од једног пошиљаоца се преузимају и приликом испоруке деле на индивидуалне примаоце у одредишној земљи), FedEx International Mail Service (пренос каталога, брошура, фактура и других међународних пошиљака).

Транспортна мрежа FedEx-а базира се на централном хабу (названом супер-хаб јер се простире на 550ha и прерадном центру од преко 1,35 милиона квадратних метара), неколико „мањих“ регионалних хабова широм света (Гвангжу, Торонто, Париз, Келн) и шест хабова у унутрашњем саобраћају. На овој мрежи саобраћа више од 600 авиона у власништву компаније уз готово 100 изнајмљених летилица што представља једну од највећих флота у цивилном ваздухопловству на свету [FDX].

TNT (Thomas Nationwide Transport) је систем који кроз 2300 компанија у власништву запошљава око 75.000 људи у преко 200 земаља широм света. Главна особина ове компаније је изразита флексибилност у погледу врста и габарита пошиљака које преносе као и спремност да сваку од преузетих пошиљака без обзира на врсту осигурају. TNT нуди услуге испоруке истог дана, следећег дана, испорука на одређени дан. Што се тиче посебних захтева клијената нуди за документа и пакете услугу која има критично време док за јако велике пошиљке (и до 500kg) са посебним захтевима нуди специјалан приступ терету у зависности од конкретних околности.

Овај интегратор такође нуди услугу специјалног руковања пошиљком, ако је она осетљива, ако има високу вредност или је опасна уз опцију регулисања температуре ако је роба кварљива. TNT врши клиничке експрес испоруке медицинским, фармацеутским и биотичким индустријама. Између осталог ова компанија се бави и индустријским решењима својих клијената, царинењем, складиштењем и дистрибуцијом широм света уз могућност праћења пошиљака путем мобилног телефона, PDA уређаја, WAP система и E-mail-а.

Транспортном мрежом ове компаније недељно се превезе више од 4,4 милиона експрес пошиљака помоћу близу 27 хиљада возила и 47 авиона. Главни хаб за авионски пренос се налази у Лијежу док се мрежа друмског транспорта пошиљака простире широм Европе, Блиског Истока, Азије, Аустралије и Јужне Америке. Остала тржишта TNT углавном покрива кроз партнерства и агентске уговоре [TNT].

UPS (United Parcel Service) је компанија која своје пословање претежно везује за САД (највећи превозник пакета који нису хитни на територији САД) одакле врши испоруку у више од 60, а пријем из више од 185 земаља широм света. Ова компанија преко своје *Hub&Spoke* (H&S) мреже са два главна хаба у Луисвилу и Келну доставља 15 милиона пакета дневно за 6,1 милиона корисника. Рокови уручења су између једног и три радна дана у зависности од удаљености дестинације. UPS пружа услуге преноса писама, хитних докумената, штампаних ствари и пакета (робе) до 31,5kg. Услуге које пружа се могу поделити у три сегмента: домаће пакетске услуге, међународне пакетске услуге и ланац снабдевања са услугама превоза [UPS].

Ланац снабдевања и услуга превоза укључују логистичке операције и превоз пошиљака, палета и контејнера са опцијом царинења робе. UPS нуди и широк спектар специјалних услуга: груписање пошиљака, повраћај пошиљака, дефинисање вредности пошиљке (до 100.000\$ по палети), потврђивање уручења, уручење суботом, свакодневно посећивање курира када је у близини, заказивање преузимања пошиљке, интелигентно предвиђање потребе за слањем курира на адресу великих корисника, брокерске писмоносне и консултантске услуге, итд.

UPS је почетком 2013. године покушао да за близу 7 милијарди долара преузме TNT, али је преузимање спречила европска комисија за заштиту тржишта од монопола која је установила да би се на тај начин, смањењем понуде на тржишту експрес преноса, угрозила права потрошача у 15 чланица ЕУ. Овај пример на најбољи начин илуструје величину компанија које се надмећу за сваку експрес пошиљку као и разлоге због којих није дошло до њиховог даљег уједињавања што би интеграторима донело додатно смањење оперативних трошкова, али без гаранција да би то могли да очекују и њихови корисници.

Без обзира на различиту понуду и позиције на тржишту сваке од представљених компанија базичне поставке њиховог пословања су исте. Хабови као централна места у Н&S мрежама свих интегратора су по правилу смештени на повољно лоцираним и инфраструктурно добро опремљеним аеродромима који најчешће немају велики број путника тако да интегратори представљају главне кориснике ових аеродрома (изузетак су Дубаи, Бахреин и Енкориц који су најпре били предвиђени за снабдевање горивом, али су временом постали значајни хабови). Интегратори значајно утичу на развој и пословање ових аеродрома услед чега на њима и добијају привилегован положај (у приступу пистама и другим инфраструктурним капацитетима) који им је неопходан за нормално пословање. Сличне пословне стратегије интегратора произвеле су честу међусобну испреплетаност у процесу преноса пошиљака, власничким односима, а првенствено заједнички концепт Hub&Spoke преноса. На тај начин се ове компаније веома лако међусобно интегришу, у деловима или у потпуности (у случајевима када дође до потпуног преузимања од стране конкурената), што је и довело до изразитог укрупњавања компанија на атрактивном тржишту преноса експрес пошиљака.

2.1.3. Организација доставе – концепт Hub&Spoke преноса

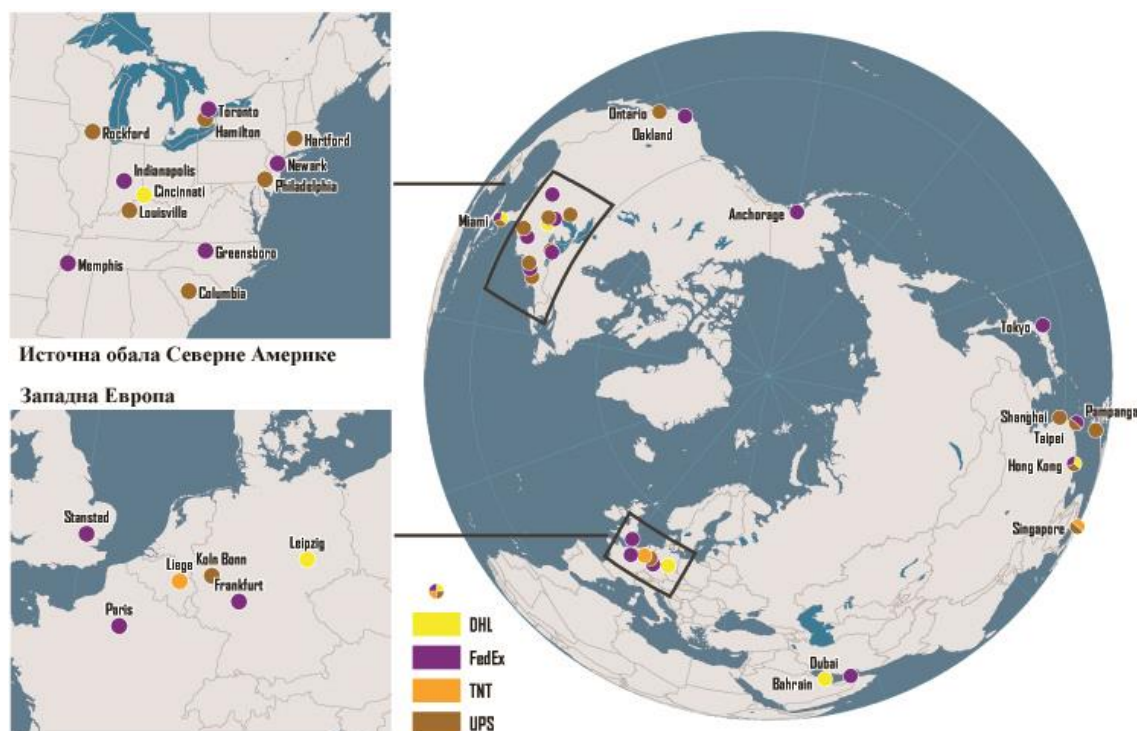
Највеће транспортне мреже на свету са највећим бројем транспортних средстава (највеће авионске флоте и возни паркови) данас су организоване као

Hub and Spoke мреже. Да би поменуте мреже биле тако велике односно да би се постигло покривање великих доставних подручја, па и читаве планете, користе се локални превозиоци као агенти јер би у супротном експрес компаније/интегратори били превелики и превише сложени пословни системи.

Интегратори користе Н&S систем преноса који подразумева да се све пошиљке на локалном нивоу прикупљају и без икаквог сортирања отпремају у централну тачку транспортне мреже која се зове „*Hub*“ (чвориште-центар). У хабу се све пошиљке сортирају након чега се отпремају на различита одредишта посредством локалних служби. Линије веза које воде до и од локалних служби се називају „*Spokes*“. Овакав систем преноса, који се код поштанских оператора назива и централизовани систем механизоване прераде, користи предности економије обима. Овакав приступ доноси умањивање трошкова по јединици производа кроз већи обим производње и нарочито је ефикасан у ситуацијама када се пакети и документи преносе у веома великим количинама.

Оператори у овом систему преноса имају релативно широк дијапазон услуга које пружају у оквиру фиксне (унапред) организоване транспортне мреже, али је њихова организација својеврсни синоним за максимално искоришћење фиксне транспортне мреже. У оваквом систему оператори експрес преноса, за разлику од авио-компанија, не могу да чекају испуњење одређене квоте пошиљака какао би оправдали трошкове лета.

Хабови су као што је приказано на слици 2.3 [Rod13] сконцентрисани око три зоне са највећом привредном активношћу: Источна обала Северне Америке, Западна Европа и Азија (обала Пацифика).



Слика 2.3. Локације хабова интегратора

Чињеница да су хабови највећих светских преносилаца експрес пошљака сконцентрисани у најразвијенијим регионима света не значи њихову одређеност да покривају искључиво атрактивна тржишта што би се, на основу искустава у Србији, могло закључити. Позиционирање хабова представљено на слици 2.3. представља природну тежњу да се лоцирањем прерадних капацитета у областима са највећим интензитетом како полазног тако и долазног саобраћаја, уштеди на транспортним трошковима.

2.2. ХАБ – прерадни центар

Анализом структура транспортних мрежа са јединицама за прераду саобраћајних токова - хабовима, уочава се да постоје две концепције механизоване прераде:

- централизовани систем и
- децентрализовани систем прераде.

Прва концепција централизованог система заснива се на концентрацији свих саобраћајних токова у неколико јединица за прераду (понекад само у једну), где се брзо и економично прерађују коришћењем најсавременије опреме великог капацитета. У овој дисертацији ће се разматрати случај централизоване прераде где се све операције везане за прераду/сортирање пошиљака одвијају искључиво у прерадним центрима – хабовима.

Друга концепција децентрализованог система прераде реализује се уградњом велике количине опреме (технолошке и транспортне), релативно малог капацитета, у све јединице – чворове у мрежи и у тим тачкама се изводи једна фаза прераде. Следећа фаза прераде, као и завршна фаза, остварује се у мањем броју центара (хабовима), опремљеним савршенијом опремом механизације процеса са већим капацитетом. У ове центре се пошиљке довозе из центара где је извршена прва фаза прераде. Свака од ових концепција има своје недостатке, као и предности.

Основни недостатак централизованог система је потреба ангажовања брзих транспортних средстава (друмских возила на краћим релацијама и авиона на дужици) за преношење пошиљака из чворова у хабова. Предност је повећање квалитета услуга од преузимања до уручења као и смањење трошкова манипулације по пошиљци коришћењем најсавременије опреме у хабовима.

Недостатак децентрализованог система је потреба набавке великог количине исте опреме, која би у многим чворовима била нерационално коришћена. Преимућство је, међутим, што се у чворовима обављају знатне фазе процеса, а у новије време и цео процес за поједине врсте пошиљака чиме се посао манипулисања пошиљкама равномерније распоређује на читаву мрежу. На бази дефинисане концепције прераде бира се опрема механизоване прераде за сваки појединачни чвор/хаб на мрежи са тежњом да се изврши потпуна механизација процеса [Бук12].

Прерадни центри у системима преноса пошиљака имају, без обзира на концепт прераде, улогу прихватања концентрисаних саобраћајних токова, њихове прераде и дистрибуције. Хабови имају директне саобраћајне везе са:

- чворовима који се налазе на њиховом доставном подручју,

- другим прерадним центрима.

Хабови врше детаљну прераду свих пошиљака које су упућене корисницима у чворовима који су њима додељени без обзира одакле су упућене. Детаљна прерада подразумева сортирање пошиљака према адресама њихових прималаца тако да у одредишним чворовима није потребна било каква даља обрада пре коначног уручења. Главна карактеристика прерадних центара је употреба сортирних и претоварних машина и опреме великог капацитета обзиром да је потребно извршити све операције сортирања у релативно кратком временском интервалу од пристизања до отпреме пошиљака. Транспортна средства која повезују хабова са чворовима су стационарна у чворовима и углавном су мањег капацитета услед мањег интензитета саобраћаја који се јавља између хабова и чворова у односу на саобраћај који се одвија између самих хабова.

У случају да су пошиљке пристигле у хаб из чворова са његовог доставног подручја упућене корисницима у чворовима који припадају другим хабовима врши се само одвајање пошиљака по хабовима. Одвајање пошиљака по хабовима подразумева груписање пошиљака према томе ком хабу припада одредишни чвор, чиме се добијају закључци са пошиљкама које приликом пристизања у одредишни хаб морају бити додатно детаљно сортиране пре њиховог упућивања у одредишне чворове. Овај принцип је установљен да би се финално сортирање увек одвијало у хабовима који су „надређени” одредишном чвору како би се избегло усложњавање програма сортирања. Уместо да се у сваком хабу пошиљке деле по свим чворовима на мрежи којих може бити и више стотина – сваки хаб дели пошиљке на број одредишта који одговара броју њему додељених чворова увећан за број осталих хабова. На овај начин се добија могућност да се у хабовима изврши детаљније сортирање на њиховом доставном подручју где се пошиљке не одвајају само по чворовима већ и унутар доставних реона самих чворова. Последица оваквог приступа је да у неким случајевима сваки курир добија закључак, формиран у хабу, са пошиљкама које су адресиране на његов доставни реон. Овакав приступ не мора бити универзално прихваћен тако да се често у пракси срећу другачија решења (детаљно разврставање свих пошиљака пристиглих у хаб без обзира на њихово одредиште, директне везе између

појединих чворова без посредовања хабова, повезивање појединих чворова са више хабова итд.)

Комуникација хабова међусобно се одвија на начин да постоје директне линије транспорта између сваког пара хабова. Возила/авиони саобраћају на тим линијама у оба смера истовремено и одликује их изразито велики транспортни капацитет обзиром да им је задатак пренос свих пошиљака које се из једног региона шаљу у други. На тај начин формира се својеврсна посебна транспортна мрежа за пренос пошиљака између хабова која је потпуно повезана.

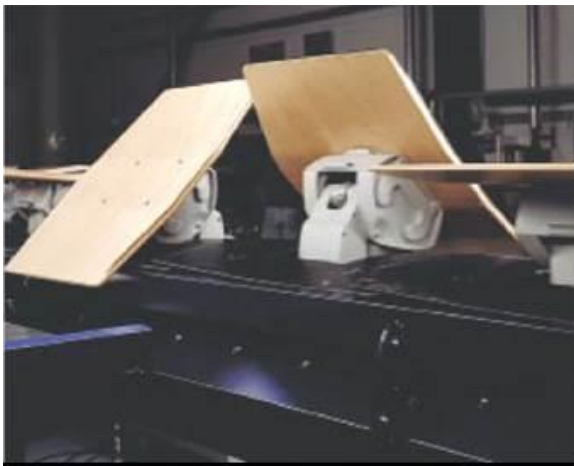
2.2.1. Опрема за прераду/разврставање пошиљака

Обзиром да је хаб, односно прерадни центар, централна тачка у Н&S мрежи преноса, а да је опрема за прераду/разврставање пошиљака његова далеко најважнија компонента – пројектовање, избор и експлоатација ове опреме је од суштинског значаја за функционисање читавог процеса експрес преноса.

Основне карактеристике најсавременијих транспортера за брзо разврставање (сл.2.4. а÷г) су [Чуп07]:

- велике брзине транспорта и разврставања (најчешће до 1,5m/s,..., 2,5 m/s, достижу и 2,7 m/s ÷ 3,5 m/s),
- велики капацитети разврставања (достиге и до 14000, 16000, 18000 пак/сат),
- разврставају се пакети великог распона масе, од 0,02kg до 100kg (најчешће 31,5kg/пакет),
- димензије пошиљака, амбалажиране робе се крећу од 25 x 25 x 0,2 mm до 2500 x 1000 x 1000 mm (дужина x ширина x висина),
- унутрашњи транспортни системи су великих димензија, максимално и до 200 m, са великим бројем места за разврставање (одредишта),
- уграђује се већи број висококапацитивних уводних станица,

- примена нових система у аутоматском разврставању и управљању и тотално интегрисане аутоматизације у процесу пословања,
- мали трошкови одржавања,
- низак ниво буке при раду,
- потпуна аутоматизација процеса прераде-разврставања, унутрашњег транспорта и складиштења,
- пуна информатизација о току процеса и у процесу управљања.



а)



б)



в)



г)

Слика 2.4. Системи за брзо разврставање пошиљака: а) Закретне платформе ; б) Клизне папучице; в) Електро-пнеуматска скретница; г) Гурајућа скретница

Опрема која се користи у хабовима повећава продуктивност повећањем степена механизованости и аутоматизације у свим технолошким и транспортним

операцијама. Кретање пошиљака кроз производни процес је такво да нема непотребног задржавања пошиљака у току процеса. Унутрашњи транспорт се одвија што краћим путањама између свих производних и помоћних одељења и складишта. Кретање пошиљака увек је усмерено ка месту отпреме прерађених пошиљака са што мањим бројем укрштања и повратних линија.

Уколико је могуће, приликом прераде, треба користити транспортна средства за обављање појединих операција за време кретања пошиљака. Правилно решење транспорта је кључно за успостављање рационално организоване услуге и ствара услове за повећање квалитета и смањење цена услуге преноса. При избору опреме и транспортних уређаја, ако је могуће, треба тежити да се усвоје типски уређаји, предвиди могућност проширења објеката, повећање обима прераде и могућност промене врсте производа. Такође треба остварити висок степен искоришћења ефективног рада уз смањење мануелних операција на минимум.

2.2.2. Разлози, проблеми и услови изградње механизованих прерадних центара за експрес пошиљке

Има много разлога за увођење механизованих процеса прераде експрес пошиљака. Уопштено се може рећи да механизација процеса настаје и прати ниво развоја савременог индустријског друштва. Најважнији разлози су:

- сталан пораст броја експрес пошиљака, услед привредне и демографске експанзије као и урбане концентрације становништва и њихових растућих потреба,
- развој терцијарних делатности (услуга и др.), потреба и појава нових асортимана транспортних услуга,
- повећање распрострањености транспортне мреже како би се дошло до што већег броја потенцијалних корисника, што захтева сложенији процес обраде,
- захтеви за побољшањем квалитета услуга, што се постиже и повећањем брзине и интензитета прераде пошиљака,

- потреба сарадње са експрес компанијама у окружењу и на глобалном нивоу,
- захтеви за побољшање услова рада и
- еколошки захтеви (захтеви заштите човекове средине) [Бук12].

Проблеми механизоване прераде експрес поштиљака проистичу из потребе да све поштиљке, које уђу у систем преноса, морају да прођу кроз одговарајући технолошки процес прераде, преношења и транспорта, који по правилу треба да се обави у што краћем временском року. Ови проблеми се увећавају појавом нових услуга, потребом да се целокупан процес електронски документује, статистички обради и у одређеној мери учини видљивим за корисника.

Проблеми прераде експрес поштиљака и механизације, а самим тим и сложеност система зависе од квалитативних фактора:

- Бројност врста и категорија поштиљака, по габаритима и маси. Све поштиљке би требало да одговарају међународним ISO (*International Organization for Standardization*) стандардима.
- Разноликост садржаја поштиљака утиче да се и фазе процеса прераде разликују по карактеристикама. Неке поштиљке се могу механизовано прерађивати (*machinable mail*), а друге категорије поштиљака не (*nonmachinable mail*).
- Различити захтеви поштиљалаца који се најчешће односе на посебне услуге и брзину доставе. То условљава смањено коришћење техничког система и посебан режим рада.
- Усклађивање механизованог и мануелног рада у процесу прераде. У сваком производном систему, ма колико опремљеном механизованом опремом, делови процеса се обављају мануелно.
- Обезбеђење услова рада и еколошких захтева. Систем треба да омогући технолошко-транспортни процес према одређеним нормама: са дозвољеном буком, ограниченом масом терета (поштиљака) у манипулацији, заштитом човекове околине од загађења и слично; односно спровођењем норми квалитета [Бук12].

2.2.3. Саобраћајна повезаност хабова (прерадних центара)

Развијена саобраћајна инфраструктура (друмске саобраћајнице, железничке пруге, ваздухопловна пристаништа) је неопходан услов за ефикасно повезивање хабова међусобно, као и са чворовима који им гравитирају. Саобраћајна повезаност интегратора се не доводи у питање обзиром да је авио саобраћај основа њихових Н&S мрежа које се и пројектују на основу постојања аеродрома и редова летења у потенцијалним дестинацијама које покривају. Интегратори често набављају половне путничке авионе који су повучени из путничког саобраћаја и на тај начин смањују почетне инвестиционе трошкове. Устаљена је и пракса изнајмљивања појединих авиона, линија или чак читавих авио-карго компанија како би отпремни чворови и хабови у транспортним мрежама интегратора били најбоље могуће саобраћајно повезани.

Саобраћајна повезаност у развијеним државама је углавном задовољавајућа, док су у нашој земљи времена путовања из појединих чворова несразмерна њиховој физичкој удаљености до хабова. Неодговарајућа саобраћајна повезаност појединих чворова са хабовима којима припадају утиче на квалитет услуга и у осталим чворовима на мрежи. Овај утицај се огледа кроз сужавање временског прозора за завршетак операција разврставања и отпреме из хабова. У оваквим ситуацијама, возила са прерађеним пошиљкама морају раније да напусте хабове како би на време пристигла у неадекватно повезане чворове. Раније отпремање пошиљака из хабова, узрокује и њихово раније пристизање, односно краће време за сакупљање пошиљака од корисника. Другим речима, корисницима из осталих чворова се крајњи моменат за предају пошиљака помера унапред, како би имали могућност слања пошиљака што је могуће већем броју осталих корисника. Корисници који се налазе у временски удаљеним чворовима такође не могу да рачунају на исти ниво квалитета услуге, обзиром да је и њима значајно смањено време расположиво за предају пошиљака на пренос (екстремно на само 1 сат). О овом проблему ће бити више речи у наставку дисертације (нарочито у делу студије случаја).

Избор транспортних средстава, којима се транспортују пошиљке између хабова и чворова зависи искључиво од очекиваног броја пошиљака на свакој посматраној линији. Најчешће се висококапацитивна транспортна средства користе за међусобно повезивање хабова. На релицијама чвор-хаб саобраћају „мања” возила, иако то не мора да буде правило.

2.3. Хаб локацијски проблеми

Локације хабова, њихов укупни број и скуп чворова који су са њима директно повезани имају утицај на укупне транспортне, инвестиционе и експлоатационе трошкове као и на ниво услуге који нуди транспортна или телекомуникациона мрежа. Избор локација хабова на мрежи уз дефинисање саобраћајне повезаности свих чворова у стручној литератури је познат као хаб локацијски проблем. Хаб локацијски проблеми су, услед велике распрострањености и економског значаја њиховог успешног решавања, често решавани. Мреже хабова (*hub networks*) су специјално пројектоване транспортне мреже на којима је уместо директних веза између тзв. снабдевача и корисника дозвољен транспорт искључиво преко изабраног скупа хабова у којима се врши консолидација и колекција пошиљака у мрежи између две локације. Другим речима сваки чвор је придружен једном или већем броју хабова, тако да се саобраћај од једног до другог чвора реализује (не увек обавезно) преко скупа одговарајућих хабова који може бити и једночлан. Користећи хабове као тачке преусмеравања саобраћаја и повећавајући интензитет саобраћаја између хабова може се ефикасније искористити капацитет мреже јер је јединична цена транспорта између хабова нижа, тако да се, на овај начин, редукују укупни трошкови транспорта на мрежи.

Хаб локацијски проблеми се интензивно користе за пројектовање различитих транспортних мрежа: поштанских мрежа, система експрес преноса, железничких и друмских система, превозења путника и робе у авио саобраћају, ланаца снабдевања, телекомуникационих система, итд. Интензитет саобраћаја

између чворова у мрежи се обично дефинише као количина робе или број путника које треба транспортовати од почетног чвора (снабдевач) до крајњег чвора (корисник) у јединици времена. Хабови у овим системима су: сортирни/комисиони центри, транспортни терминали, центри сакупљања или преусмеравања робе и путника и сл.

Мање је познато да се и телекомуникациони системи такође могу конфигурирати као мреже хабова. Информације и пакети података у телефонским, сателитским, рачунарским и другим комуникационим системима се преносе преко одговарајућих линкова (телефонски/оптички каблови, сателитске и друге бежичне комуникације), што је у неким случајевима и веома скупо. У циљу смањивања цене преноса података у овим мрежама користе се специјални хаб-чворови (телефонске централе, комутациони чворови, прекидачи, рутери, концентратори...).

2.3.1. Основни хаб локацијски модели

Први корак при проучавању хаб локацијских проблема био је да се за сваки класични дискретни локацијски проблем (проблем p -центра, p -медијане, проблем покривања, прост локацијски проблем са неограниченим капацитетима, итд.) формулише одговарајући хаб локацијски проблем (проблем p -хаб центра, p -хаб медијане, проблем хаб покривања, проблем локације хабова са неограниченим капацитетима, итд). Campbell [Cam94a] и O'Kelly [OKe94] још 1994 године дају прве прегледе хаб локацијских проблема и одговарајућих модела који се првенствено заснивају на минимизацији укупних транспортних трошкова на мрежи као и трошкова успостављања хабова. У овим моделима аутори су подразумевали да је цена транспорта између хабова по јединици количине робе нижа у односу на јединичну цену транспорта између хабова и чворова услед чега је оптимална мрежа успостављених хабова заправо комплетан граф и целокупан транспорт у мрежи се обавља преко њих [Ста07]. Осим тога постоји могућност да

се број хаб локација које треба успоставити унапред дефинише као цео број p (p -hub location problems).

Хаб локацијски проблеми се од класичних локацијских проблема, између осталог, разликују и по томе што сваки има две варијанте које користе различите концепте алокације чворова хабовима. Постоје два основна алокацијска концепта:

- **шема једноструке алокације** (*single allocation scheme*), код које се сваки не-хаб чвор (снабдевач или корисник) придружује тачно једном хабу, тако да се сав саобраћај до и од тог чвора обавља искључиво преко тог хаба.
- **шема вишеструке алокације** (*multiple allocation scheme*), која даје могућност сваком не-хаб чвору да комуницира са једним или више хабова.

Очигледно је да шема вишеструке алокације пружа већу флексибилност модела обзиром да за дати скуп хабова саобраћај између полазних и долазних чворова може бити реализован путем са најнижом ценом транспорта, независно од осталих чворова што код једноструке алокације није увек могуће обзиром на фиксираност саобраћајних веза. Без обзира на ту чињеницу, већина хаб локацијских проблема подразумева шему једноструке алокације где је сваки не-хаб чвор обично придружен хабу са најнижим трошковима транспорта (то је најчешће, али не и по правилу, њему најближи хаб). Јасно је да ће, услед претходно реченог, у хаб моделима са шемом вишеструке алокације транспортни трошкови бити нижи у односу на моделе са шемом једноструке алокације.

Илустративан пример може се се срести код поштанских мрежа где пошиљке из полазне јединице поштанске мреже (ЈПМ) могу да се дистрибуирају преко различитих (главних) поштанских центара који врше сортирање односно преусмеравање токова пошиљака до ЈПМ на чијој територији се налази адреса примаоца пошиљке, тако да трошкови транспорта буду минимални. Супротно томе, ако се ради о поштанским мрежама за пренос експрес пошиљака (DHL, FedEx, TNT, UPS и слични системи) у којима је значајније минимизирати максимално време испоруке за сваки пар чворова, у одговарајућим хаб моделима искључиво се користи шема једноструке алокације. Слично томе и путници, нарочито у авио саобраћају, који крећу из истог града (полазног чвора) могу

изабрати да путују различитим итинерерима - преко више различитих градова (хабова) у зависности од изабране дестинације (долазног чвора).

2.3.1.1. Функција циља и проширење хаб локацијских модела

Циљ већине хаб локацијских проблема је, до сада био, минимизација неких од трошкова на мрежи (транспортни, трошкови успостављања хабова, изградње саобраћајне инфраструктуре, кашњења, експлоатације итд.) или минимизација укупних трошкова. У зависности од типа функције циља (типа реалног проблема) могу се издвојити:

1. Проблеми хаб центра који се баве успостављањем тачно одређеног броја хабова – p , користећи за функцију циља минимизацију максималних трошкова/времена/растојања транспорта између било која два чвора на мрежи (*minmax* критеријум). Проблеми p -хаб центра су, као што је већ речено, настали по угледу на класичан локацијски проблем p -центра. Функција циља хаб центра се доминантно користи код проблема експрес испоруке односно у случајевима када је максимално растојање између чворова изузетно важно. Прва формулација проблема p -хаб центра дата је у [ОКе91] да би се касније овај проблем више пута решавао у стручној литератури [Каг00, Рап01, Кга06, Ста07, Ерн09, итд.].

2. Проблеми хаб медијане који имају функцију циља која минимизира суму трошкова транспорта за сваки пар чворова повезаних преко одговарајућег хаба/хабова, при чему је број хабова које треба успоставити унапред задат - p . Описани проблеми p -хаб медијане, слично проблемима хаб центара, аналогни су добро познатом локацијском проблему p -медијане. Прва општа формулација проблема p -хаб медијане дата је још у [ОКе87] док су разне варијанте овог проблема проучаване и у [ОКе96, Ско96, Ерн98, Вол04, Ста07, итд.].

3. Хаб локацијски проблеми - проблеми успостављања оптималног броја хабова, на начин да се укупни транспортни трошкови у мрежи минимизују. Функција циља хаб локацијских проблема често укључује фиксне трошкове успостављања и/или експлоатације хабова односно грана у мрежи, па тако настају

хаб локацијски проблеми са фиксним трошковима [Ста07]. Мора се нагласити да функција циља и у случајевима проблема p -хаб медијане и p -хаб центра може укључивати разне фиксне трошкове али су они чешће укључени у разматрање приликом решавања хаб локацијског проблема. Ови проблеми имају широку примену у свим мрежама где су трошкови успостављања хабова или саобраћајних веза значајни као што је случај у поштанском, телекомуникационом, авио, железничком и другим видовима саобраћаја. Циљ увођења у разматрање фиксних трошкова је успостављање равнотеже између смањења трошкова транспорта у мрежи са већим бројем хабова и на другој страни повећавања укупних трошкова приликом успостављања и/или коришћења нових хабова. У [ОК91] је први пут формулисан хаб локацијски проблем док су варијанте са или без фиксних трошкова проучаване у: [ОК92, Ерн99, Ебе00, Вол04, Ман05, Ста07, итд.].

4. Остали типови функције циља, који су мање заступљени у стручној литератури, најчешће се срећу код проблема који немају за циљ минимизацију трошкова или времена транспорта. Хаб локацијски проблеми са покривањем (*hub covering problem*) могу дефинисати максимално време транспорта као ограничење у поставци проблема док им функција циља минимизује трошкове успостављања транспортне мреже. Осим тога функција циља може максимизовати саобраћај који се одвија преко мреже хабова (хаб локацијски модели са такмичењем – *hub location models with competition*) [Май99]. Постоје и функције циља које су линеарне, део по део, јер укључују променљиве транспортне трошкове. Ови трошкови зависе од интензитета саобраћаја. Цене транспорта су ниже између хабова када је интензитет саобраћаја већи и обрнуто. Истовремено је могуће дефинисати пораст одговарајућих фиксних трошкова са снижавањем јединичне цене транспорта између хабова.

Проучавањем литературе може се приметити да су хаб локацијски проблеми који се решавају све сложенији и разноврснији тако да се може очекивати појава нових функција циља.

Проширење основних хаб локацијских проблема има више различитих праваца што узрокује формулисање нових, све комплекснијих, хаб локацијских модела. Могућа проширења су:

1. Усложњавање нивоа услуге. Ниво услуге (*level of service*) који мрежа пружа корисницима се може дефинисати на више начина:

- максимално време транспорта од пошиљаоца до примаоца преко једног или више хабова,
- максимална дужина пређеног пута,
- максималан број заустављања/преседања у хабовима,
- проценат корисника којима је основни или виши ниво услуге на располагању, итд.

Код основних хаб локоцијских модела подразумева се да је максимални број заустављања у хабовима 2 односно да пут од пошиљаоца до примаоца може имати максимално 3 саобраћајне везе (пошиљалац→хаб1→хаб2→прималац) али то не мора бити правило. Проширивањем основних нивоа услуга формулишу се следећи хаб локацијски модели:

- Модели са фиксираним бројем заустављања у хабовима.
- Модели са фиксираним бројем саобраћајних линкова на сваком путу пошиљалац-прималац [ОКе98b, Sas99].
- Модели са максималним дозвољеним временом транспорта (сви модели који укључују експрес пренос пошиљака) који имају за циљ минимизацију укупних трошкова успостављања и експлоатације транспортне мреже. Ови модели углавном се срећу са унапред задатим бројем хабова када имамо проблеме хаб покривања (*hub covering problem*) док ће ова дисертација понудити модел у коме број хабова које треба успоставити није унапред дефинисан.
- Модели са такмичењем хабова у опслуживању корисника по нижим ценама транспорта [Маi99]. Овакви модели се најчешће срећу код пројектовања мреже путничког и теретног авио саобраћаја јер приликом успостављања новог хаба долази до такмичења. То доводи до редукације цене или времена транспорта али су ови модели потенцијално употребљиви и у решавању проблема тзв. приступних тачака на мрежи преноса поштанских пошиљака у случајевима потпуно либерализованих тржишта.

2. Додавање нових трошкова поред транспортних када имамо:

- Моделе са фиксним трошковима успостављања саобраћајних веза између чворова [Yam05] које срећемо када је потребно ограничити разгранатост транспортне мреже.
- Моделе са фиксним трошковима успостављања хабова [Em99, Ebe00, Vol04, Man05].

3. Проширење међусобне повезаности хаб и не-хаб чворова при чему настају:

- Модели код којих се транспорт од пошиљаоца до примаоца не мора искључиво обављати преко хабова већ се дозвољавају и директне везе између не-хаб чворова [Sun01].
- Модели код којих се среће могућност сакупљања саобраћаја из неколико чворова сукцесивно пре финалне колекције у надређеном хабу (*multi stop access paths*) што је релативно честа појава у пословању транспортних компанија које на тај начин смањују трошкове сакупљања пошиљака на мрежи. У том случају одређено возило/авион обилази неколико блиских чворова пре него што се упуту ка надређеном хабу.
- Модели са подељеним саобраћајем између пошиљаоца и примаоца код којих се полазни саобраћај у неком унапред дефинисаном односу дели на неколико алтернативних путева [Man05].

4. Усложњавање мреже хабова што даје:

- Моделе код којих се, уколико интензитет саобраћаја на посматраној грани прелази одређену вредност, транспорт преко такве гране у мрежи реализује по нижој цени (*flow threshold models*). Последица овакве поставке је концентрација саобраћаја у неколико грана на транспортној мрежи што је некада физички неизводљиво осим у случају висококапацитивних телекомуникационих мрежа за чије пројектовање су ови модели нарочито значајни.
- Моделе код којих се хабови бирају из унапред дефинисаног подскупа чворова који задовољавају инфраструктурне захтеве за успостављање хабова у њима [Sun01].

- Моделе који допуштају да се један део саобраћаја између хабова одвија по нижим, а остатак по неумањеним ценама.
- Моделе са умањеним ценама транспорта између хабова, а које нису међусобно исте већ зависе од других параметара модела (нпр. од интензитета саобраћаја на грани која повезује два хаба), итд.

5. Укључивање различитих ограничења капацитета на мрежи чиме се формулишу хаб локацијски проблеми са ограниченим капацитетима (*capacitated hub location problems*):

- Модели са ограниченим интензитетом саобраћаја између хабова и/или између хабова и њима придружених чворова.
- Модели са ограниченим капацитетима како хаб, тако и не-хаб чворова [Ern99, Ebe00, Man05, Yam05, Moh10].

2.3.2. Решавање хаб локацијских проблема

Релативно једноставна формулација хаб локацијских проблема не имплицира њихово једноставно решавање, напротив, ови проблеми се у односу на класичне дискретне локацијске проблеме у највећем броју случајева теже решавају. Осим што већина хаб локацијских проблема спада у класу NP-тешких треба рећи да су и неки њихови потпроблеми такође NP-тешки проблеми. Примера је више, рецимо уколико се цена транспорта између хабова у полазним проблемима не редукује, потпроблеми који се добијају су такође NP-комплетни, што је доказано у раду [Ern09], итд.

Међутим, постоје специјални случајеви – потпроблеми хаб локацијских проблема који се могу решити у полиномијалном времену (проблеми 1-хаб медијане и 1-хаб центра ($p=1$)). Осим тога, такви су и потпроблеми p -хаб медијане/центра неограничених капацитета са вишеструким алокацијама и фиксираним скупом хабова [Sam02].

Изражени практични значај хаб локацијских проблема, у последњих двадесет и више година, допринео је да се развију бројни алгоритми за њихово решавање. Различите егзактне методе коришћене су у стручној литератури углавном за решавање хаб локацијских проблема мањих димензија за које дају задовољавајуће резултате. Међутим примери из праксе су најчешће великих, или чак изразито великих, димензија тако да се за њихово решавање уместо егзактних користе разне хеуристичке и метахеуристичке методе и њихове хибридизације са егзактним методама. У наставку ће бити представљене најзначајније методе (егзактне, хеуристичке и метахеуристичке) које су развијене за решавање хаб локацијских проблема.

2.3.2.1. Егзактне методе за решавање локацијских проблема

Хаб локацијски проблеми најчешће се решавају као проблеми мешовитог целобројног линеарног програмирања (*Mixed Integer Linear Programming-MILP*). Претраживање простора решења је један од основних начина за егзактно решавање MILP проблема, али са порастом његових димензија потпуно претраживање простора решења ни помоћу најсавременијих рачунара најчешће није могуће. Методе интелигентног претраживања су конципиране тако да елиминишу потребу за потпуним претраживањем простора решења тако што помоћу процена усмеравају претраживање у одређеном правцу и елиминишу бескорисна претраживања. Метода гранања и одсецања (*Branch and Cut – BnC*) и гранања и ограничавања (*Branch and Bound – BnB*) су егзактне методе које се често користе за решавање хаб локацијских проблема.

Идеја да је непотребно претраживати оне делове простора решења у којима се, према процени, не налази решење боље од неког унапред познатог или већ нађеног решења је основа методе гранања и ограничавања (BnB). Код ове методе се разматрани проблем разлаже на мање и евентуално простије проблеме како би се, уколико се процени да њихов допустиви скуп не садржи оптимално решење полазног проблема, избегло даље решавање тих потпроблема и на тај начин

скратило укупно време потребно за проналажење најбољег/оптималног решења [Ber97].

Комбиновањем методе гранања и ограничавања и методе одсецања равни настаје метода гранања и одсецања (ВnС). Метода одсецања равни после коначног броја корака налази оптимално решење полазног проблема, али се у пракси може десити да је број потребних корака веома велики када се решавају проблеми већих димензија. У литератури се ВnС алгоритам показао као веома успешан за решавање разних NP-тешких проблема комбинаторне оптимизације [Pad91, Jün97].

Код хаб локацијских проблема са вишеструким алокацијама када је број хабова које треба успоставити релативно мали ($p \leq 5$) користе се тзв. алгоритми пребројавања (enumerative algorithms). Идеја је да се за сваку допустиву комбинацију лоцираних хабова добије потпроблем који се може решити методом најкраћег пута (*shortest path method*) у полиномијалном времену [Ern98b].

Пребројавање свих могућих локација хабова у полиномијалном времену при решавању проблема p -хаб медијане неограничених капацитета са вишеструким алокацијама Ernst и Krisnamoorthy [Ern98a] такође врше помоћу методе најкраћег пута којом за $p \leq 5$ добијају оптимална решења.

Хаб локацијски проблем неограничених капацитета је решаван од стране Klincewicz-а у [Kli96] имплементацијом двеју егзактних метода у оквиру ВnВ алгоритма. Егзактни приступи решавању хаб локацијских проблема су до појаве и прихватања хеуристичких метода били једини начин решавања ових проблема [Bol04, Man05, Sun01, Yam05, итд.].

2.3.2.2. Хеуристичке методе за решавање локацијских проблема

У случају решавања хаб локацијских проблема великих димензија све, до сада развијене, егзактне методе не дају задовољавајућа решења. Разни

хеуристички приступи су развијени како би се за реалне димензије проблема, у разумном времену рада рачунара, добила употребљива решења.

О'Kelly након дефинисања проблема лоцирања хабова 1986. године већ у [ОКе87] формулише проблем p -хаб медијане са једноструким алокацијама и предлаже две хеуристичке методе које одређују најбоље алокације не-хаб чворова успостављеним хабовима, за сваку могућу комбинацију од p успостављених хабова. Прва хеуристичка метода - HEUR1 једноставно придружује сваки не-хаб чвор најближем хабу, док друга - HEUR2 пореди алокације најближем и другом најближем хабу за сваки не-хаб чвор усвајајући ону која даје боље решење.

За решавање истог проблема Klincewicz у [Kli91] користи хеуристичке методе једноструке и двоструке замене (*single and double location exchange heuristic*) у циљу поправљања решења добијеног вишекритеријумском шемом алокације не-хаб чворова успостављеним хабовима.

У [Еrn98b] аутори осим егзактног приступа примењују и хеуристичку методу једноструке замене за решавање проблема p -хаб медијане неограничених капацитета са вишеструким алокацијама. Помоћу ове хеуристичке методе најпре се добија скуп успостављених хабова, а затим се методом најкраћег пута одређују оптималне алокације чворова изабраним хабовима. Овај алгоритам је ефикасан за мале димензије проблема док у случају већих димензија ($n \geq 50$) и са повећањем броја хабова које треба лоцирати такође даје задовољавајућа решења, али је време извршавања неприхватљиво дуго.

Рамук и Серил [Рам01] предлажу хеуристички приступ решавању проблема p -хаб центра неограничених капацитета са једноструком алокацијом чворова. Аутори су у [Рам01] користили четири различите стратегије засноване на методи најкраћег пута. Осим тога, како би спречили преурањену конвергенцију Рамук и Серил су хибридизовали предложени алгоритам методом табу претраживања (*tabu search - TS*). Добијено решење су, уколико је то могуће, додатно побољшавали грамзивом хеуристиком (*greedy heuristic*).

Skorin-Каров и Skorin-Каров су у [Sko94] представили модификацију табу претраживања коју су назвали двофазни TS алгоритам. У [Sko94] аутори су решавали проблем p -хаб медијане неограничених капацитета са једноструком

алокацијом чворова. Први корак у њиховом алгоритму је био избор скупа од p хабова и придруживање не-хаб чворова њима најближим хабовима. На тај начин се формира почетно решење за TS алгоритам који испитује различите варијанте придруживања не-хаб чворова неком од изабраних хабова без обзира на међусобну удаљеност.

Метода Лагранжове релаксације је такође једна од хеуристичких метода за решавање хаб локацијских проблема. Између осталих Skoѓin-Каров и остали у [Sko96] и Pirkul и Schilling у [Pir98] су помоћу методе Лангранжове релаксације решавали проблем p -хаб медијане неограничених капацитета са једноструким алокацијама. Истом методом Аукin [Auk94] је решавао проблем p -хаб медијане ограничених капацитета са вишеструким алокацијама док је Gavish [Gav92] Лагранжову релаксацију употребио за решавање хаб локацијског проблема неограничених капацитета са једноструким алоцирањем чворова.

Проблем p -хаб медијане неограничених капацитета у варијантама једноструке и вишеструке алокације чворова решаван је хеуристикама симулираног каљења (*simulated annealing*) у [Ern96], неуронских мрежа (*neural networks*) у [SmK95], [Dom03] и грамзивом хеуристиком у [Pér98].

Код хаб локацијских проблема које карактерише доминантна улога фиксних трошкова које треба минимизовати често је коришћена дуална метода пењања (*dual ascent method*) [Cán07, Gen02].

Метахеуристичке методе проналазе довољно добра решења у прихватљивом времену рада рачунара, за различите типове проблема.

Klincewicz [Kli92] примењује методу табу претраживања и GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) метахеуристичку методу приликом решавања проблема p -хаб медијане са једноструком алокацијом чворова. GRASP метода се извршава у два корака: генерисање допустивог решења и претрага простора у близини генерисаног допустивог решења. Приликом сваке појединачне претраге тражи се најбоље локално решење док се за крајње решење разматраног проблема узима најбоље нађено решење током свих претрага.

Метахеуристички приступи инспирисани појавама у природи представљају најновију и најефикаснију класу алгоритамаа који се употребљавају за решавање

хаб локацијских проблема. Међу њима значајно место заузимају генетски алгоритми чија примена у решавању ових проблема ће бити детаљно описана у секцији 3.3.3.

МЕТОДОЛОГИЈА РАДА



3.1. Метакхеуристике инспирисане процесима у природи

Проблеми које је могуће решавати на савременим рачунарима се најгрубље могу поделити на две класе: алгоритамски нерешиве и алгоритамски решиве. Алгоритамски нерешиви задаци су уопштени проблеми који се ни на који начин не могу решити на савременим рачунарима који раде на принципима које је дефинисао фон Нойман. (проблем заустављања Тјурингове машине, проблем еквивалентности речи у асоцијативном рачуну, итд.) [Маћ08]. Због те чињенице ни битно побољшање перформанси рачунара неће допринети решавању оваквих проблема. Алгоритамски решиви проблеми представљају много интересантнију класу јер за њих постоје одговарајући алгоритми. Ови задаци могу бити различите сложености тако да се, у зависности од потребног процесорског времена за њихово решавање, могу поделити у поткласе. Формално, неки проблем је алгоритамски решив ако постоји алгоритам који се може применити на сваку његову појединачну верзију. Треба нагласити да није довољно само да постоји алгоритам, већ је потребно да тај алгоритам буде и ефикасан, односно при решавању проблема не сме захтевати нереалне рачунарске ресурсе.

Велики број проблема из области саобраћаја и транспорта, међу њима и хаб локацијски проблеми, спада у групу дискретних оптимизационих проблема које је због њихових димензија и сложености веома тешко оптимално решити. За овакве проблеме се каже да су *NP (Non-deterministic Polynomial-time hard)* тешки

проблеми јер у полиномијалном времену рада рачунара не постоје егзактне технике које би их решиле.

Временом, истраживачи су развили различите приближне методе (алгоритми који не пружају гаранције да ће се увек доћи до оптималног решења) за решавање *NP*-тешких проблема. Решења која се добијају помоћу ових метода називају се субоптималним решењима. Методе које генеришу субоптимална решења називају се хеуристичким алгоритмима и представљене су у 2.3.2.2. У пракси се применом хеуристичких алгоритама може добити, у одређеним случајевима, и оптимално решење. Хеуристички алгоритми се често користе и најчешће су, услед њихове ефикасности и могућности примене на велике класе проблема, први избор за решавање *NP* – тешких проблема.

Приликом решавања ове класе тешких проблема доносиоци одлука су веома често задовољни решењем које није оптимално али које се добија у прихватљивом временском интервалу, нарочито ако проблем треба решити у реалном, односно релативно кратком времену. Биолошки системи који су у стању да се успешно прилагођавају константним променама у свом окружењу и да на тај начин преживљавају, трају, а пре свега еволуирају, односно напредују у суровим условима, постали су важан извор идеја за развој вештачких система, који су се показали изузетно корисним приликом решавања задатака комбинаторне оптимизације.

Најразличитији биолошки и природни процеси који нас окружују представљају најчешћи извор идеја за развој ових алгоритама. Неки од алгоритама чији су основни постулати преузети из природе су: Неуронске мреже [Dom03, Нор85, Lip87, Mas90, SmK95, Vas08], Оптимизација колонијом мрава [Col91, Col92, Col96, Ћер85, Dor92, Dor96, Dor99, Ken01, Тео03, Тео08] и Оптимизација колонијом пчела (*Bee Colony Optimization – BCO*): [Dav10, Dav11, Eda08, Мак07, Сим08, Тео05, Тео08а, Тео08б, Тео09], итд.

Константан развој и напредак организама од њиховог настанка огледа се кроз појаву све сложенијих облика биљног и животињског света. Индивиде у биолошким системима су кроз милионе година њиховог постојања успевале не само да преживе разне променљиве и често екстремне услове већ и да из

генерације у генерацију дају све боље и све прилагођеније јединке. Кључни механизам таквог напретка лежи у преношењу гена са родитеља на потомке. Прилагођеније и јаче јединке су кроз компликоване механизме опстанка имале већу шансу да за собом оставе потомке преко којих су се преносили гени који су њихове родитеље и учинили успешним јединкама. Разумевање процеса природне селекције послужио је човеку да креира нове биљне и животињске врсте са карактеристикама које су се значајно разликовале од полазних. Било је само питање времена када ће се искуства из биологије, пољопривреде и медицине пренети на поље техничких наука.

Генетски алгоритми (*Genetic algorithm (GA)*) су метахеуристичка техника која припада класи алгоритама инспирисаних појавама у природи. Ови алгоритми су део еволутивног рачунања (*evolutionary computing (EA)*) које представља сегмент вештачке интелигенције, чија примена веома брзо расте. Инспирација за примену генетских алгоритама лежи у Дарвиновој теорији еволуције (Charles Robert Darwin). Под еволуцијом се у биологији подразумева промена генетског материјала између јединки одређене популације из генерације у генерацију. Иако су разлике између узастопних генерација минималне током дужег периода посматрања запажа се кумулативни ефекат тих промена, што резултира значајним променама у популацији јединки - током више хиљада генерација се на тај начин стварају нове врсте. Сама идеја еволутивног рачунања као ширег концепта датира из 70-их година прошлог века и представљена је у раду Rechenberg-а [Rec71]. Идеју генетских алгоритама први је представио Holland [Hol75].

Концепт на који се ослањају GA је изградња система јединки са вештачким генима који ће бити способан да кроз еволуцију ефикасно решава тешке оптимизационе проблеме комбинаторне природе. Вештачки гени су, при том, у већој или мањој мери слични генима у природи у смислу преношења битних особина јединке на потомке.

Показало се да GA, у прихватљивом времену рада рачунара, поседују способност да пронађу високо квалитетна решења тешких комбинаторних проблема због чега су до сада били коришћени као алат за решавање великог броја реалних проблема. Многи проблеми у инжењерству спадају у класу

комбинаторних проблема где је потребно из великог броја могућих решења (могућих локација објеката на мрежи, могућих рута саобраћајних средстава, могућих сигналних планова, итд.) изабрати оптимално или субоптимално решење у зависности од димензија проблема. Како приликом решавања оваквих проблема, веома често, оптимизационе технике нису у стању да дођу до прихватљивог решења, користе се разнородне технике које спадају у групу еволуционог рачунања којој припадају и GA [Teo12]. При томе је јако важно да GA имају и могућност паралелизације [Kra00] као и способност да, правилним подешавањем оператора, избегавају заглављивање у неком од локалних оптимума. Два доминантна критеријума на основу којих се на крају вреднују сви хеуристички алгоритми па самим тим и GA су: квалитет генерисаних решења и време рада рачунара. Поред тога узима се у обзир и јасноћа и једноставност коришћења метода као и сложеност имплементације [Teo12].

У овом поглављу биће дат детаљан опис методе која ће се користити при решавању дефинисаног проблема у дисертацији као и анализа резултата који су до сада постигнути коришћењем метахеуристике GA. Најзначајније карактеристике као и примене ове технике су приказане у радовима [Bea93a, Bea93b, Вёс93, Воz02, Сое02, Чан96, Фил98, Fil03, Gol89, Kra01, Kra02, Kra05, Kra06, Kra07, Kra08, Mic96, Mit99, Müh97, SrM94, Тоš04].

3.2. Биолошка основа генетских алгоритама

У свету који нас окружује непрестано се догађају промене у живим организмима: настанак и нестанак гена, промене у структури и количини генетских информација, и ефекти које такве промене имају на све аспекте живота. Те промене се непрестано шире кроз популације, што производи спору али неизбежну промену састава и изгледа свих врста на Земљи. Промене се дешавају услед варијација и нових генетских мутација које се могу наслеђивати, а промене се током генерације одржавају процесом који се назива селекција.

Јединке се боре за ограничене ресурсе и осетљиве су на сушу, хладноћу, ресурсе хране и друге факторе средине. У овој борби, преживљавање и репродукција нису случајни. Ако јединка поседује одређене особине које јој поспешују опстанак, у датој животној средини, и репродукцију, тада ће у просеку оставити више потомства у односу на друге јединке исте популације. Као резултат успешног преживљавања и укрштања у следећој генерацији ће бити у просеку више јединки које поседују „селекционисане” особине, карактеристике које боље (у односу на друге) одговарају датим условима средине. Свака средина врши одређени селективни притисак, односно развој особина које су најбоље прилагођене тој средини. То је у прошлости човеку помогло да се и сам развија или да одгаји различите сорте и расе корисних биљних и животињских врста. Селективни притисак човек је вршио кроз прилагођавање живог света себи кроз фаворизовање јединки које су поседовале њему „пожељне особине”. У GA се овакав приступ среће кроз различите политике замена генерација.

Механизам природне селекције се заснива на логичким принципима: ако постоји варијабилност између јединки дате популације која се преноси на потомство, и ако постоји успех у преживљавању и репродукцији који одваја јединке једне од других, тада дате карактеристике популације омогућавају опстанак и репродукцију јединки [Мил09]. За ограничене ресурсе средине, јединке одређене популације се такмиче, и у тој конкуренцији јединке које опстану (победи), а чији потомци чине већи проценат следеће генерације су боље прилагођене – адаптиране. Као меру за прилагођеност Дарвин је користио енглеску реч *fit*, *fitness*, или адаптивна вредност [Dar59]. И у случају генетских алгоритама срећемо меру прилагођености кроз тзв. фитнес функцију односно прилагођеност јединке функцији циља.

Гени као носиоци наследних чинилаца имају главну улогу у преношењу наследних особина. Они се налазе на хромозомима и током репродукције се преносе у нову јединку. Тиме је објашњено наслеђивање у процесу еволуције. У природи се на случајан начин дешавају мутације гена чиме се добијају различити облици једног истог гена који се у генетици називају генски алели. Генски алели јединкама дају варијабилност што се манифестује развојем нових особина. Ова

чињеница била је инспирација да се у GA уведу слични механизми кроз операторе укрштања и мутације.

На основу свега наведеног данас је на снази синтетичка теорија еволуције која се заснива на четири основна постулата значајна и за еволутивне алгоритме:

1. Резултат мутација и креирања нових алела, њиховог раздвајања и независног комбиновања, је индивидуална варијабилност скоро свих особина јединке.
2. Јединке преносе своје гене на потомство процесом репродукције. Гени се преносе као такви са родитеља на потомство и независно од других гена (или барем у одређеном проценту независно).
3. У већини генерација се више потомака ствара него што их опстане и постане полно зрело.
4. Јединке које преживе и постану репродуктивно способне или оне које се највише репродукују, су носиоци гена и њихових комбинација које су најбоље адаптиране окружењу. Репродукцијом јединки, носилаца одређених гена и особина, у следећој генерацији се повећава фреквенција гена који су повезани са највећим адаптивним вредностима.

3.3 Генетски алгоритми

Без обзира што је још крајем 60-их година прошлог века било радова који су кроз симулацију веза и релација из биолошких система покушавали да реше различите инжењерске проблеме, те су се због тога могли генерално класификовати у ову област, John Henry Holland се сматра родоначелником генетских алгоритама. Он је у својој књизи „*Adaptation in natural and artificial systems*” из 1975. године [Hol75] први изложио концепт GA чије основне поставке дате у том раду, иако су током непуне четири деценије постигнуте завидни резултати на теоријском и практичном плану, и данас важе. GA су највише

допринели да еволутивни алгоритми добију ширу популарност за решавање најразличитијих проблема.

За разлику од традиционалних техника претраживања и изналажења оптималног решења које у сваком тренутку времена испитују само једно потенцијално решење GA врше претраживање тако што истовремено испитују читаву популацију генерисаних решења [Teo12]. Основна конструкција GA је, према томе, популација јединки (највише неколико стотина али понекад и више хиљада). Свака јединка, представљена низом карактера (генетским кодом) над одређеном коначном азбуком, представља могуће решење у претраживачком простору за дати пробем. Друга битна карактеристика је да се генетски код јединке карактерише најчешће помоћу бинарних низова фиксне дужине, где се генетски код састоји од низа битова. У неким случајевима је, упркос различитим мишљењима о њиховој ефикасности, погодно користити и азбуке веће кардиналности. Свакој јединки се додељује функција прилагођености (*fitness function*), слично Дарвиновој адаптивној вредности, која оцењује квалитет дате јединке. GA би требало да из генерације у генерацију, побољшава апсолутну прилагођеност најбоље јединке у популацији, као и средњу прилагођеност целе популације мада постоји и опасност да се у том случају генерално смањи разноврсност генетског материјала [Hut02]. То се постиже узастопном применом генетских оператора *селекције*, *укрштања* и *мутације*, где прве две на уређен, а трећа на случајан начин, мењају кодове јединки чиме се добијају све боља решења датог конкретног проблема.

Генерисање почетне популације представља први корак у реализацији генетских алгоритама. Најбоље резултате GA су показали када се почетна популација генерише на случајан начин јер је у том случају генетски материјал најразноврснији. У неким случајевима се, када је време извршавања релативно кратко и када се битно не смањује разноврсност генетског материјала, повољније показало генерисање целе или дела почетне популације другом, погодно изабраном, хеуристиком. Свакој јединки у популацији се потом додељује функција прилагођености која је мерило квалитета јединке (односно решења којег репрезентује).

Механизам селекције је оператор који фаворизује боље прилагођене јединке и њихове натпросечно прилагођене делове (гене), тако што добијају већу шансу за репродукцију при формирању нове генерације док слабије прилагођене јединке постепено изумиру. Оператор укрштања врши размену (рекомбинацију) гена две или више јединки-родитеља чиме доприноси разноврсности генетског материјала њихових потомака. Ова размена има за последицу да добро прилагођене јединке генеришу још боље јединке али и да неки добри гени релативно слабије прилагођених јединки, добијају своју шансу за даљу репродукцију.

Током више генерација селекција и укрштање могу довести до губљења појединих гена (манифестује се великом сличношћу индивидуа), односно до тога да неки региони претраживачког простора постану недоступни. Случајном променом одређеног гена, са малом вероватноћом као у природи, мутација даје могућност враћања изгубљеног генетског материјала у популацију чиме се спречава преурађена конвергенција GA у неки од локалних екстремума.

Оператори GA се примењују узастопно све до задовољења критеријума заустављања: достигнут оптимум, максималан број генерација, престанак добијања бољих решења током унапред задатог броја генерација итд. На слици 3.1 шематски је представљен уобичајени запис основних елемената GA [Кра00]:

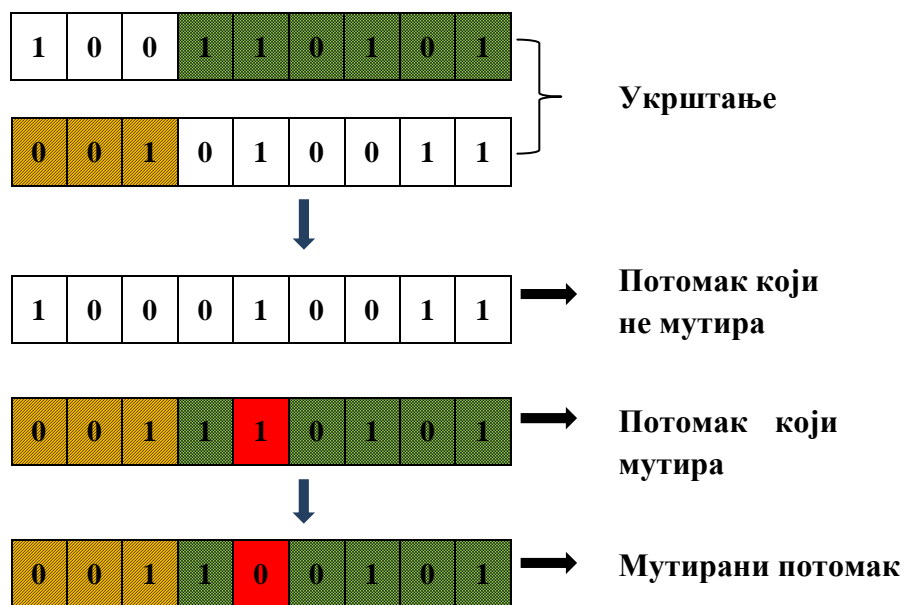
```
Уношење_улазних_података();
Генерисање_почетне_популације();
while not Критеријум_заустављања_GA()do
    for i=1 to Npop do
        fit[i] = Функција_циља(i);
    endfor
    Фитнес_функција();
    Селекција();
    Укрштање();
    Мутација();
endwhile
Штампање_Излазних_Података();
```

Слика 3.1. Уобичајени запис GA

3.3.1. Карактеристике генетских алгоритама

Полазну тачку свих модификација генетских алгоритама које су данас присутне у стручној литератури представља тзв. прости генетски алгоритам (*Simple Genetic Algorithm (SGA)*) [Hol75]. SGA карактеришу: пропорционална или рулет селекција, једнопозиционо укрштање и проста мутација. Јединке су, као и код осталих GA, кодиране бинарним низовима (стринговима).

SGA користи пропорционалну (рулет) селекцију којом одређује које јединке ће опстати и пренети своје гене у следећу популацију односно које ће из ње бити уклоњене. Куглица се баца на виртуелном рулету који је формиран од слотова чија је величина пропорционална прилагођености сваке јединке. Оператори укрштања и мутације дати су на слици 3.2 где се може видети да се једнопозиционо укрштање своди на размену генетског материјала између две јединке почев од неке, случајно одабране, позиције у стрингу док се проста мутација манифестује изменом једног (ретко када и више) гена у јединки.



Слика 3.2. Оператори једнопозиционог укрштања и прости мутације

Могућност преурађене конвергенције изражене кроз повећање сличности између јединки током генерација само је један од недостатака SGA.

Преовлађивање сличних, јединки у популацији може одвести алгоритам у локални екстрем одакле су јако мале шансе за побољшање решења до глобалног оптимума. Преурањена конвергенција је најчешће последица примене прорачуна селекције што може дати одређене аномалије на популацији јединки. Ако се посматра велики узорак број потомака сваке јединке у просеку је приближно једнак очекиваном броју, међутим у неколико почетних генерација, појединачно су могућа велика одступања која се манифестују раним губитком генетског материјала што за последицу има лош квалитет решења. Са друге стране високо прилагођене јединке, услед већих шанси за размножавање, временом истискују лошије јединке из популације, иако оне можда садрже поједине добре и разноврсне гене (не ретко, појединачно посматрано, и боље од фаворизоване јединке) који у процесу рекомбинације могу дати квалитетније потомке. Могућности за побољшање датог решења у наставку извршавања генетског алгоритма су веома мале јер селекција и укрштање у популацији са веома сличним јединкама немају прави ефекат и једино мутација, у том случају, може да допринесе излазу из дате ситуације. Међутим, уколико је ниво мутације релативно велики (да би повећао разноврсност генетског материјала), генетски алгоритам се претвара у случајну претрагу. У супротном, уколико је вероватноћа мутације релативно мала, промене генетског материјала су незнатне па доминантне јединке поново врло брзо елиминишу све остале из популације.

Други недостатак SGA је, супротно првом, спора конвергенција, која се обично јавља у каснијој фази извршавања алгоритма. Дешава се у пракси да је средња прилагођеност јединки у популацији велика, а да је разлика између најбоље и осталих јединки мала, тако да је градијент функције прилагођености недовољан да би помогао генетском алгоритму да се приближи оптималном решењу у догледном времену извршавања.

3.3.2. Оператори генетских алгоритама

Због претходно наведених недостатака, прост генетски алгоритам се успешно може применити само на мањи број и то једноставнијих проблема комбинаторне оптимизације. За решавање сложенијих проблема неопходно је коришћење побољшаних верзија GA који укључују различите врсте кодирања и функција прилагођености и читав спектар генетских оператора селекције, укрштања и мутације који се користе у зависности од карактеристика решаваног проблема. Осим тога користе се и разне политике замене генерација као и фиксна или адаптивна промена параметара током извршавања GA. Развој и усавршавање генетских оператора и поред њихове већ бројне и разноврсне имплементације су и даље у току.

3.3.2.1. Кодирање и функција прилагођености

За успешну примену GA у решавању неког проблема најзначајнији фактори су кодирање и вредносна функција који су у тесној вези са природом проблема који решавамо јер се често догађа да методе, које дају добре резултате у неким применама, дају врло лоше резултате када се примене на друге проблеме. За дато кодирање идеално је да функција прилагођености буде непрекидна и глатка, при чему јединке са сличним генетским кодом имају сличну вредност (прилагођеност). Такође предуслов за добре перформансе је да функција прилагођености нема сувише локалних екстремума или сувише изолован глобални екстремум [Веа93а]. Над таквим функцијама прилагођености и друге методе често дају приближне или чак и боље резултате тако да се GA, обзиром да не захтевају глаткост и непрекидност функције прилагођености, управо и примењују у случајевима када друге методе није могуће применити, или дају изузетно лоше резултате, док GA ипак успевају да нађу задовољавајуће решење.

Функција прилагођености, по правилу, пресликава на неки „природан” начин генетски код јединке у претраживачки простор. Међутим, често се дешава

да такав начин не постоји или из неког разлога (нпр. велики проценат некоректних јединки) није погодан.

За успешну примену GA су најпогоднији проблеми који се могу бинарно кодирати на природан начин - сваком решењу додељује се код унапред задате дужине над бинарном азбуком $\{0,1\}$. Могући су и случајеви коришћења алфабета веће кардиналности (целим или реалним бројевима : [Ant89], [Bea93b], [Gol89]). У сваком случају, кад год је то могуће, треба успоставити бијективну везу између решења проблема и њихових генетских кодова. Када то није могуће, кодирање не мора бити бијективно па чак ни пресликавање, али се тада мора водити рачуна о генерисаним кодовима који не представљају ниједно решење тзв. некоректним јединкама. Када их је немогуће избећи некоректне јединке се могу избацити из популације тако што им се вредност функције прилагођености постави на нулу. Аутори примењују различите методе за кориговање оних јединки које не задовољавају сва задата ограничења [Кра08]. Алтернативно, могуће је вршити и пенализацију вредности функције прилагођености помоћу казних функција [Ђур08]. Успешном у пракси се показала метода која се састоји у томе да се почетна популација генерише тако да су у њој сва решења допустива, а да се затим примењују генетски оператори који чувају допустивост ([Lev94], [Orv93] и [SmA93]).

У литератури наилазимо на различите начине рачунања функције прилагођености: директно преузимање (за вредност функције прилагођености неке јединке узима се одговарајућа вредност критеријумске функције), линеарно скалирање (прилагођеност јединке се рачуна као линеарна функција вредности критеријумске функције), скалирање у јединични интервал (функција прилагођености узима вредности из интервала $[0, 1]$), сигма одсецање ([Кра00]). Специфичности конкретног проблема дефинишу избор одговарајућег начина рачунања функције прилагођености, што некад захтева и њихово комбиновање.

3.3.2.2. Оператор селекције

Да би се извршила селекција јединки које ће учествовати у размени генетског материјала и стварању нове генерације јединки неопходно је установити некакав поступак за тај избор. Приликом избора потребно је водити рачуна да вероватноћа одабира неке јединке буде у складу са вредношћу њене функције прилагођености. Другим речима, јединке са бољим вредностима фитнес функције морају имати веће шансе да буду изабране за стварање потомства. Ако са f_i означимо вредност фитнес функције јединке i тада вероватноћа да ће јединка i бити изабрана за даљу репродукцију (p_i) треба да буде једнака односу вредности критеријумске функције посматране јединке f_i и суме вредности критеријумских функција свих јединки у популацији:

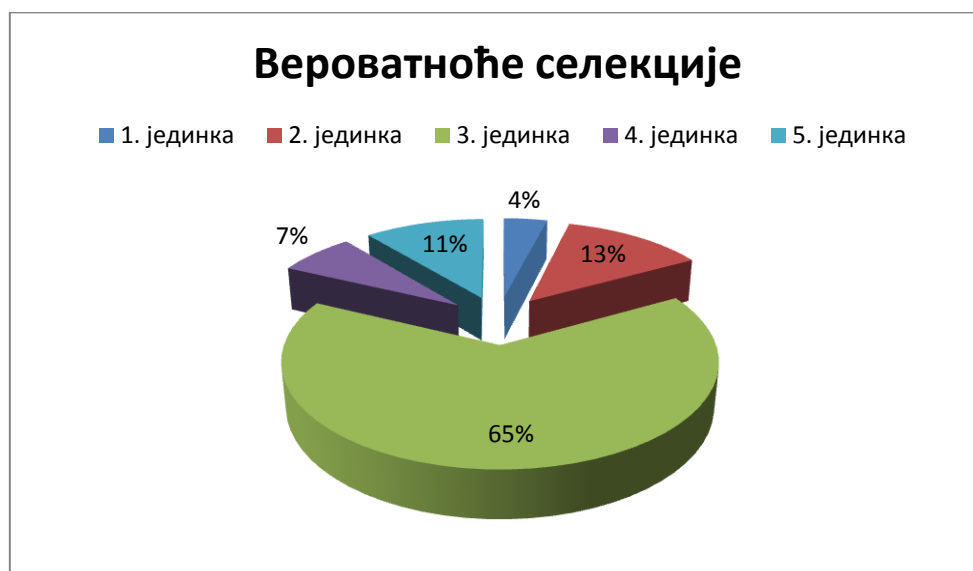
$$p_i = \frac{f_i}{\sum_j f_j} \quad (3.1)$$

SGA је користио овакву пропорционалну или просту рулет селекцију. Селекција заснована на рангу, и турнирска селекција су постигле најбоље резултате у пракси јер свака на свој начин превазилази аномалије просте рулет селекције. Основни недостатак просте рулет селекције је да добре јединке могу бити фаворизоване више него што је реално или пожељно јер узорак на коме се врши селекција је најчешће сувише мали да би се селектовани кодови појављивали у односу у којем су њихове функције прилагођености (сл. 3.3).

Како би се превазишао овај недостатак користи се селекција заснована на рангирању кодова (линеарно или неко друго) тако да се функција прилагођености, уместо на основу вредности критеријумске функције дате јединке, добија на основу позиције (ранга) јединке у популацији (таб. 3.1). На тај начин чак и јединке које имају изразито лошу вредност критеријумске функције у односу на најбоље у популацији добијају реалнију шансу да буду селектоване (сл. 3.4), што је пожељно због спречавања преурањене конвергенције, као и губитка генетског материјала о чему је било речи раније. На сликама 3.3 и 3.4 илустроване су вероватноће избора јединки за исте вредности критеријумске функције, које су за ову прилику дате произвољно (таб. 3.1).

Табела 3.1. Упоредни приказ вероватноћа избора јединки за различите операторе селекције

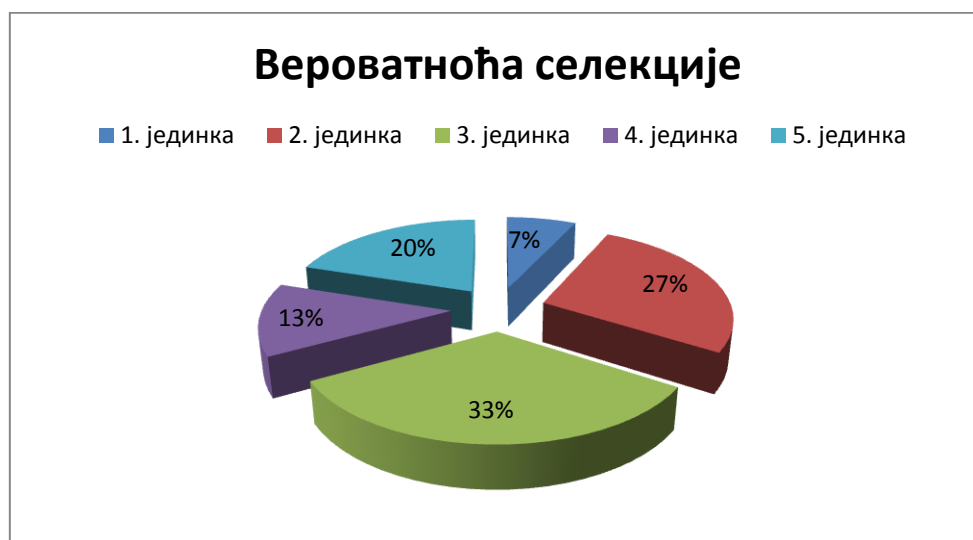
Јединка	Кодови јединки	Рангирање јединки f_i	Вероватноћа избора		
			применом просте рулет селекције p_i	Вероватноћа избора рангирањем	
1	100101	20	1	$p(1) = \frac{20}{20+65+325+35+55} \approx 0,04$	$p(1) = \frac{1}{1+2+3+4+5} \approx 0,07$
2	011011	65	4	$p(2) = \frac{65}{20+65+325+35+55} \approx 0,13$	$p(2) = \frac{4}{1+2+3+4+5} \approx 0,27$
3	111010	325	5	$p(3) = \frac{325}{20+65+325+35+55} \approx 0,65$	$p(3) = \frac{5}{1+2+3+4+5} \approx 0,33$
4	001010	35	2	$p(4) = \frac{35}{20+65+325+35+55} \approx 0,07$	$p(4) = \frac{2}{1+2+3+4+5} \approx 0,13$
5	101111	55	3	$p(5) = \frac{55}{20+65+325+35+55} \approx 0,11$	$p(5) = \frac{3}{1+2+3+4+5} \approx 0,20$



Слика 3.3. Селекција помоћу рулета

Код селекције методом рангирања, након рангирања јединки по вредностима фитнес функција, индивидуи са највећом вредношћу фитнес функције додељује се, за случај када имамо n јединки, вредност n (у конкретном

случају 5, таб. 3.1), следећој по реду $n-1$, и тако редом до најлошије која добија вредност 1. Разлике између овако додељених вредности ($n, n-1, n-2, \dots, 3, 2, 1$) су далеко мање од разлика оригиналних вредности фитнес функција што даје већу шансу лошијим јединкама да буду изабране за стварање потомства. Слика 3.4 је најбоља илустрација претходне тврдње. Мана оваквог приступа је што уједначавањем вероватноћа селекције процес налажења задовољавајућег решења може бити знатно успорен.



Слика 3.4. Селекција методом рангирања

Још један начин селекције који се често и успешно користи је турнирска селекција. Турнири су такмичења између унапред дефинисаног броја јединки популације (N_{tur}) које се надмећу ради преживљавања и учешћа у следећој генерацији. Параметар (N_{tur}) се најчешће унапред задаје а сама селекција функционише тако што се најпре на случајан начин бирају подскупови од по N_{tur} јединки између којих се бира најбоља јединка која учествује у стварању нове генерације. Величина турнира мора се пажљиво изабрати како би се смањили неповољни стохастички ефекти и како би што разноврснији и што бољи генетски материјал прошао у наредну генерацију. Поступак се понавља све док се не изабере јединке које ће учествовати у укрштању. Свака од набројаних селекција има своје недостатке и ограничења. Једно од могућих унапређења турнирске селекције је Фино градирана турнирска селекција која уместо целобројног узима реалан праметар величине турнира [Фил98, Fil00, Fil01, Fil03, Фил06]. У [Hut02]

је покушано да се помоћу оператора униформне селекције на основу вредности функција прилагођености омогући очување разноврсности генетског материјала. Овакав приступ није нашао ширу примену у пракси.

3.3.2.3. Политика замене генерација

SGA из генерације у генерацију предвиђа замену читаве популације новим јединкама (њиховим потомцима). Оваква политика замене генерација се у литератури често назива и *генерацијски GA (generational GA)*. Иако је замена читаве популације најсличнија природним законима у пракси се показало да, супротно очекивањима, применом такве политике добре јединке и квалитетни гени некада не прођу у наредну генерацију. Другим речима, дешава се да неки потомци буду и лошији од родитеља, што је познато и у биологији, или чак да се најбоља јединка не појави у наредној генерацији. То значи да ако смо у неком тренутку постигли решење доброг квалитета због стохастике у примени оператора селекције, укрштања или мутације могли би да га неповратно изгубимо. То само по себи није велики проблем, јер се једном генерисано решење може меморисати ако је било до тада најбоље. Међутим, непојављивањем најбољег решења у следећој генерацији се губи његов даљи утицај на изналажење још бољих решења кроз заустављање његове репродукције, односно рекомбинације његових гена. Последица овога су лошије перформансе GA.

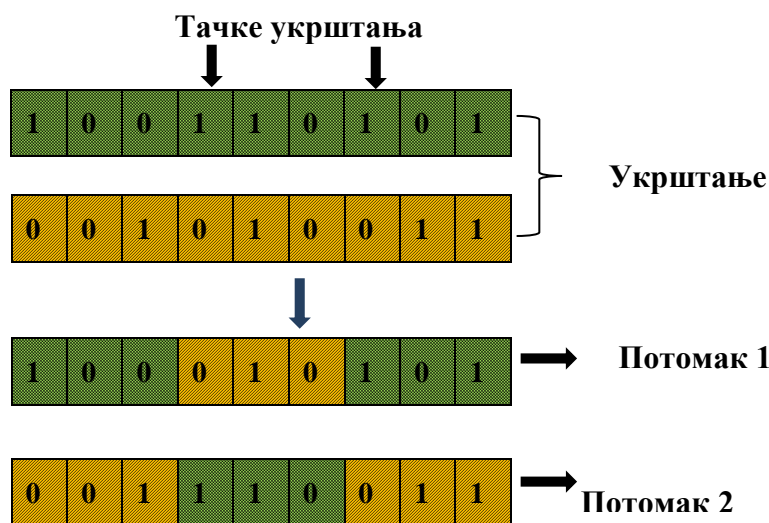
Могуће решење проблема поново је било инспирисано природом и коришћењем већ помињаног селективног притиска. Идеја је да само одређени део популације пролази селекцију док остатак популације директно пролази у наредну генерацију. Ово се постиже увођењем *стационарног GA (steady-state GA)*. Понекад се увођење стационарног GA комбинује са елитистичком стратегијом (*elitist strategy*) замене генерација. У стационарном GA само одређени део јединки из популације пролази селекцију, док остатак директно пролази у наредну генерацију. Слично претходном могућа је и примена елитистичких стратегија, где једна или неколико најбољих јединки може у непромењеном облику прећи у

наредну генерацију (једноставно се ископира), без примене генетских оператора селекције, укрштања и мутације. У тим случајевима смањује се моћ претраге GA, али зато добре јединке са сигурношћу пролазе у наредну генерацију тако да нема губљења добијених добрих јединки. Резултат тога су обично слабије перформансе GA, али само у неколико почетних генерација, док су коначни резултати стационарног GA уз елитне стратегије у највећем броју примена бољи у односу на резултате генерацијског GA [Кра00]. Детаљније о овом аспекту GA се може наћи у [Sys91] и [SmR93].

3.3.2.4. Укрштање - оператор размене генетског материјала

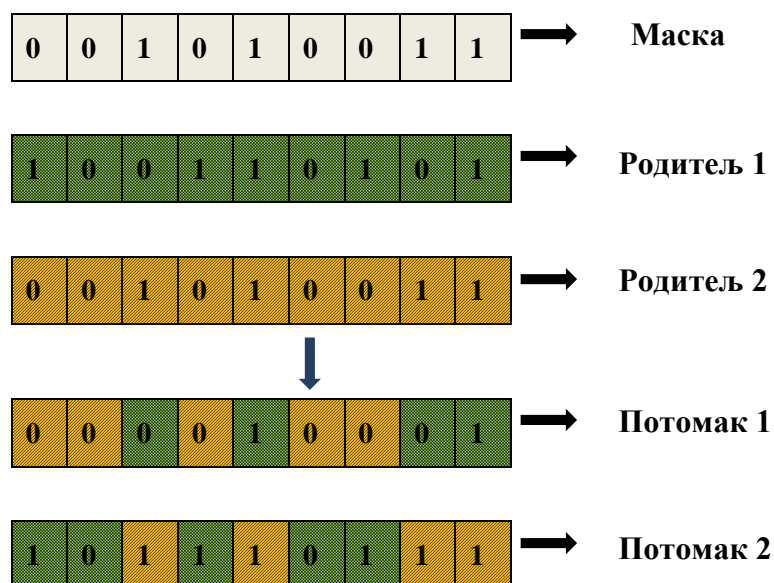
Оператором укрштања (*crossover*) врши се размена генетског материјала јединки које су селекцијом одабране да буду родитељи новој генерацији јединки (потомцима). Укрштање може бити: једнопозиционо, двопозиционо, вишепозиционо или униформно, али постоје и сложеније варијанте овог генетског оператора [Müh97]. Избор оператора укрштања у нешто мањој мери од претходних техника утиче на перформансе GA. Избор оператора укрштања у највећој мери зависи и од међузависности гена у генетском коду. Када постоји велика међузависност битова, најпогодније је једнопозиционо укрштање, јер се помоћу њега најмање разбија целина јединке. Једнопозиционо укрштање (*single-point crossover* – имплементирано у SGA) се извршава тако што се на случајан начин бира број који представља тачку укрштања, а који је мањи од дужине генетског кода. Сви гени селектовних родитеља, почев од позиције тачке укрштања до последње позиције у њиховим генетским кодовима, узајамно мењају места стварајући на тај начин два нова потомка (сл. 3.2).

За проблеме са мањом међузависношћу битова је најпогодније двопозиционо а некада и вишепозиционо укрштање. Код двопозиционог укрштања (*two-point crossover*) случајно се бирају две тачке укрштања, а затим се размењују делови генетских кодова родитеља између ових позиција (сл. 3.5), док се код вишепозиционог врши размена k делова генетског низа уз генерисање $2k$ тачака укрштања.



Слика 3.5. Илустрација оператора двопозиционог укрштања

Ако су битови у кодовима јединки међусобно потпуно независни, или су веома мало међузависни, најпогодније је униформно укрштање. Код униформног укрштања се за сваки родитељски пар на случајан начин генерише бинарни низ исте дужине као генетски код тих јединки – тзв. „маска”. Размена гена се врши на позицијама на којима је вредност „маске” нула, док на местима где маска има вредност један, родитељи задржавају своје гене или обрнуто (сл. 3.6) [Spe91]. Детаљније о операторима укрштања дато је у [Bea93b, SrM94].



Слика 3.6. Илустрација оператора униформног укрштања

3.3.2.5. Мутација

Мутација је један од најзначајнијих оператора GA јер често пресудно утиче на ток извршавања алгоритма. Постоји велики број различитих варијанти овог оператора а најпознатији су: проста мутација, мутација помоћу биномне расподеле и мутација помоћу нормалне расподеле.

Оператор прости мутације је најједноставнији и најчешће коришћен у случајевима када се јединке бинарно кодирају, а популација не садржи недопустиве јединке. Проста мутација пролази кроз генетски код, бит по бит, и мења вредност 0 у вредност 1, или обрнуто, са неком унапред задатом малом вероватноћом P_{mut} , како GA не би прерастао у случајну претрагу. Могуће је мутацију реализовати и преко бинарног низа који се случајно генерише и чува информацију о томе на којој позицији у генетском коду ће доћи до промене гена.

Током извршавања GA може се, услед стохастичности у операторима или доминантних јединки, десити да (скоро) све јединке у популацији имају исти бит на одређеној позицији (или чак на више позиција). Такви битови се називају „залеђеним” [Ста04], а са њиховим појављивањем могућност преураћене конвергенције нагло расте јер претраживачки простор постаје 2^z пута мањи, ако је број залеђених битова z . Оператори селекције и укрштања не могу променити вредност ниједног залеђеног бита јер оба родитеља имају исту вредност на датој позицији, а основни ниво мутације најчешће није довољно велики да би повратио изгубљене регионе претраживачког простора. Како генетски алгоритам не би постао случајна претрага (*random search*) ниво мутације се повећава само на залеђеним битовима, али не више од неколико пута [Ста07]. Нумерички експерименти вршени у оквиру ове докторске дисертације (више стотина експеримената) су показали да се приликом лоцирања хабова за пренос експрес пошилака нису јављали залеђени битови што је последица правилно подешених оператора GA.

Када је неке делове кода јединке потребно мутирати са мањом или већом вероватноћом, односно када гени генетског кода нису равноправни, користи се мутација која није униформна. Тада се обично користи нормална мутација која се

примењује у складу са нормалном расподелом, или експоненцијална мутација код које број мутираних гена у коду експоненцијално опада.

Уколико ГА користи кодирање целим или реалним бројевима употребљавају се други концепти мутације (замена гена случајно изабраним бројем, множење бројем блиским јединици, додавање или одузимање мале вредности, итд) чије вредности су такође случајне и могу имати униформну, експоненцијалну, Гаусову или биномну расподелу [Веа93а, Веа93б]. Као и код избора претходних оператора и оператор мутације се бира према природи проблема који се решава [Алк04, Воz02, Соr01, Гоl85, Гре85, Мос89, Уск93].

3.3.2.6. Критеријуми заустављања

Генетски алгоритми се, уколико им не наметнемо критеријум заустављања, могу извршавати бесконачно дуго јер су у основи стохастичке методе претраге простора допустивих решења. Постоји више критеријума завршетка ГА:

- проналажење оптималног решења (уколико је унапред познато)
- доказана оптималност најбоље пронађене јединке (ако је то могуће),
- максимални број генерација,
- максимално време извршавања ГА,
- сличност јединки у популацији,
- најбоља јединка је поновљена максимални (дозвољени) број пута и
- прекид од стране корисника итд.

Критеријум заустављања, чак и када је доступно оптимално решење, или када је могуће доказати оптималност пронађеног решења, представља веома осетљиво место у примени ГА. Сваки од наведених критеријума има добре и лоше стране тако да, уколико се жели добра процена прекида ГА, њихово комбиновање даје најбоље резултате.

3.3.2.7. *Остали аспекти генетских алгоритама*

Генетски алгоритми, попут свих метода, имају и одређена ограничења и недостатке. Већ је речено да перформансе GA, између осталог, веома зависе од правилног подешавања његових параметара. Управо ту лежи један од основних недостатака GA – не постоји оптимална комбинација параметара (величина почетне популације, политика замене популације, вероватноћа мутације, тип и вероватноћа укрштања, итд.) која би давала најбоље резултате у решавању свих проблема. Параметри се у сваком конкретном случају морају посебно подешавати експерименталним путем где долази до изражаја искуство и упорност истраживача.

Осим тога разноврсност генетског материјала се мења кроз различите фазе извршавања GA па се често оптималне вредности нивоа укрштања или мутације, осим између експеримената, морају мењати и током извршавања алгорита [Bm91, Вџ93, SrM94]. У току извршавања GA параметри се могу мењати на два начина:

- фиксно, када се унапред задаје линеарно или експоненцијално повећање или смањење параметара, и
- адаптивно, када се параметар мења у зависности од тога какве је резултате оператор до тада дао, односно колико је био успешан.

У литератури се може срести и низ метода за побољшање перформанси генетских алгоритама. Једна од метода је техника кеширања, која је први пут примењена у [Kra99]. Код имплементације генетских алгоритама кеширање у великој мери побољшава перформансе (пре свега смањује време извршавања алгорита) без утицаја на остале аспекте алгоритама.

Када је у питању време извршавања GA најзахтевнији део је по правилу израчунавање функције циља. Кратица [Kra00] због тога предлаже да се једном израчунате вредности функције циља, заједно са одговарајућим генетским кодом, сместе у меморију. При сваком извршавању GA проверава се да ли се текућа јединка у популацији појављивала у претходним генерацијама, односно постоји ли у кеш меморији вредност њене функције циља. Ако се текућа јединка већ

појављивала тада се њена функција циља не израчунава већ се њена вредност узима из кеш меморије. Уколико се текућа јединка први пут појављује или је током извршавања алгоритма избрисана из кеш меморије приступа се рачунању вредности њене функције циља, која се заједно са генетским кодом (поново) смешта у кеш меморију.

Другим речима, проверава се да ли се текућа јединка налази у кеш меморији. Ако се текућа јединка лоцира у кеш меморији читава се вредност њене функције уместо да се поново израчунава.

Осим тога, GA се, као и већина представљених хеуристичких метода, могу и паралелизовати на вишепроцесорским рачунарима, с тим што постоје додатне могућности за њихову паралелизацију обзиром да готово све функције у имплементацији GA садрже висок степен међусобне независности, услед чега се могу релативно успешно паралелизовати. Паралелизација предложеног генетског алгоритма представља следећу фазу у развоју општег модела за пројектовање система преноса пошиљака.

Приликом решавања реалних проблема није редак случај да је неопходно да се генетски алгоритми комбинују са другим хеуристикима. Хеуристике се могу користити само за побољшавање почетне популације, али и за побољшање сваке наредне генерације. Могу се примењивати на целу популацију, један њен део, или на појединачну јединку [Маћ08].

У [Ста04] GA је хибридизован са једном модификацијом хеуристике замене (*modified interchange heuristic*) коју је ауторка развила у циљу побољшања квалитета решења. У свакој генерацији алгоритма, пре примене генетских оператора селекције, укрштања и мутације, извршава се хеуристика тако што се примењује само на најбољу јединку, и то само у случају да се та јединка променила у односу на претходну генерацију.

Хеуристика најпре искључује једну успостављену локацију хаба из најбољег решења и укључује другу локацију у којој још увек није успостављен хаб. Искључивање и укључивање хабова се врши до првог побољшања. Уколико се добије боље решење цео поступак се понавља и на новој, побољшаној јединки. Цео процес се зауставља оног тренутка када хеуристика не може више поправити

најбољу јединку. Према томе хеуристика која се користи у [Ста04] је таква да ако не успе да поправи најбољу јединку у текућој генерацији тада не може дати ни било какво даље побољшање.

Сваки пут када се замени локација, испитује се да ли та нова јединка постоји у кеш меморији – ако постоји, њена вредност се не рачуна већ се преузима из кеш табеле, у супротном, вредност нове јединке се скраћено рачуна на горе описани начин и смешта у кеш табелу, одакле се даље може користити као и свака друга јединка.

Често се приликом извршавања алгорита кроз велики број генерација јавља феномен идентичних јединки у популацији. Овај проблем се решава уклањањем идентичних јединки јер, у супротном, њихово нагомилавање у популацији може озбиљно смањити генетску разноврсност читаве популације. Са друге стране, корисно је ограничити и број јединки које имају исту вредност функције циља, а различите генетске кодове. Ово је нешто ређа појава која када се јави такође „води” генетски алгоритам у неки од локалних оптимума.

Упркос свим варијацијама које се могу јавити у различитим имплементацијама GA, може се издвојити шест карактеристичних заједничких корака за све генетске алгоритме [Тео12]:

Корак 1: Кодирати проблем и одредити вредности параметара.

Корак 2: Формирати иницијалну популацију која се састоји од n стрингова. Израчунати критеријумску (*fitness*) функцију сваког стринга.

Корак 3: Изабрати n потенцијалних стрингова (родитеља) применом неког од механизма избора.

Корак 4: На случајан начин изабрати родитељски пар за даљу репродукцију. Генерисати два потомка разменом генетског материјала изабраним оператором укрштања. Применити оператор мутације на сваком од створених потомака. Примењивати операторе размене и мутације све док се не створи n потомака који сачињавају нову популацију.

Корак 5: Заменити стару популацију стрингова новом. Евалуирати све чланове нове популације.

Корак 6: Уколико је број створених популација мањи од унапред задатог, или уколико није задовољен неки други критеријум заустављања, вратити се на корак 3. У супротном случају, завршити са алгоритмом. Финално решење разматраног проблема представља најбоље решење генерисано у свим популацијама.

3.3.3. Примена генетских алгоритама у пројектовању транспортних мрежа

Једна од најзначајнијих примена GA је решавање широке класе проблема комбинаторне оптимизације. Највише примена ове методе је забележено у случају решавања проблема трговачког путника (*Travelling Salesman Problem - TSP*) који је, између осталих, помоћу GA решаван у [Jog89, Hmf93, Dzu94, Joh97]. Осим тога још неке од примена су: вишекритеријумска оптимизација [Fon93], проблем покривања скупа [ALS96], неуронске мреже [Sch92], распоређивања радника [Mah08], дизајн [Loi91], пројектовање рачунарских мрежа [Kra02, Kra09], рутирање возила [Kra12], као и решавање осталих практичних проблема. Класификација великог броја радова, који описују примену GA за решавање проблема комбинаторне оптимизације, може се наћи у библиографији [Osm96b]. Приказивање свих релевантних примена GA, на решавање проблема комбинаторне оптимизације, далеко би превазишло обим овог рада. Зато ће бити приказани само неки значајнији радови и примена GA на проблеме повезане са пројектовањем транспортних мрежа.

Dvoretz у [Dvo99] решава проблем p -медијане генетским алгоритмом. У раду се користи бинарна шема кодирања и укрштање засновано на принципу који је аутор назвао компатибиност родитеља. Први родитељ (аутор га назива „мајком“) се бира на класичан начин тј. на основу функције прилагођености, док се „отац“ бира на основу два критеријума: по свом квалитету и по компатибилности (са „мајком“), чије израчунавање Dvoretz по први пут уводи у стручну литературу. У [Boz02] је такође предложен концепт GA за решавање

класичног локацијског проблема p -медијане. Возкаја и остали [Voz02] предлажу целобројну репрезентацију јединки уз неколико модификованих оператора укрштања. Карактеристично је и то да уз стандардну мутацију уводе и оператор "инвазије" чији је циљ повећавање разноврсности генетског материјала.

У [Mih03] применом GA је решаван локацијски проблем p -центра. Концепт који предлажу аутори је целобројна репрезентација јединки, турнирска селекција и стандардни оператор мутације. За сваког родитеља формира се листа гена који се могу копирати у код другог родитеља тако да не дође до креирања идентичних јединки. Оператор укрштања који се реализује заменом случајно изабраних гена из сваке листе, на тај начин, чува допустивост јединки.

У [Ста07, Sta07a] предложене су две еволутивне метахеуристике које су аутори назвали HGA1 и HGA2 (хибридизација генетског алгорита са ефикасном хеуристиком локалног претраживања). За решавање неколико NP-тешких хаб локацијских проблема (p -хаб медијане неограничених капацитета са једноструким алокацијама, p -хаб медијане/центра ограничених капацитета са једноструким алокацијама и хаб локацијског проблема ограничених капацитета са једноструким алокацијама, итд.). Станимировић је у [Ста07] користила два различита начина кодирања: бинарно у HGA2 и целобројно у HGA1. Осим тога два генетска алгорита са различитим начином кодирања (бинарно и целобројно) и одговарајућим модификованим генетским операторима за решавање проблема p -хаб медијане неограничених капацитета са једноструким алокацијама дата су у [Кра07]. Још неки од домаћих истраживача су успешно применили унапређене верзије GA: на прост локацијски проблем, [Кра00, Кра01], проблем дизајнирања мреже [Кра00, Кра02], хаб локацијски проблем неограничених капацитета са вишеструким алокацијама [Кра05] и локацијски проблем снабдевача неограниченог капацитета у више нивоа [Маћ08]. Истраживачи са Математичког института САНУ и Математичког факултета у Београду, у наведеним радовима су предложили паралелне имплементације GA које садрже разне варијанте генетских оператора селекције, укрштања, мутације, неколико функција прилагођености, разне критеријуме заустављања GA, као и различите политике замене генерација.

Још неки генетски концепти примењени на хаб локацијске проблеме описани су у [Фил06, Fil12, Moh10, Pér00, Pér04, Top05].

Анализом свих наведених радова долази се до закључка да је теоријски могуће применити концепт ГА на сваки локацијски проблем, али код проблема са много ограничења могу настати тешкоће у проналажењу одговарајућег начина кодирања. ГА се показао ефикасним за решавање проблема који имају релативно сложену функцију циља уз што мање ограничења [Ree93].

3.4. Вишекритеријумски аспект проблема

Одређивање локација хабова, као што ће у наставку бити дато изразима (4.21)-(4.28) представља проблем вишекритеријумске оптимизације. Ова врста проблема јавља се у инжењерству, планирању, економији, менаџменту, екологији, здравству и још многим другим областима савременог људског деловања. Проблем вишекритеријумске оптимизације је проблем код кога је потребно пронаћи „вектор променљивих који задовољава постављене услове и оптимизује векторску функцију чији елементи репрезентују критеријумске функције” [Osy84, Osy85, Czy95, Coe02, Zak11]. Општи облик вишекритеријумског оптимизационог проблема може се формално дефинисати као што су предложили Coello Coello и остали [Coe02]:

Наћи вектор:

$$\bar{x}^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T \quad (3.2)$$

који задовољава m услова неједнакости:

$$g_i(\bar{x}) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.3)$$

и p услова једнакости:

$$h_i(\bar{x}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (3.4)$$

и који оптимизује векторску функцију:

$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]^T \quad (3.5)$$

Веома је важно приметити да присуство више критеријумских функција, уместо једне, мења и сам концепт оптимума. Код вишекритеријумске оптимизације циљ је пронаћи добар компромис између више критеријума уместо тражења најбољег решења за било који од појединачних критеријума као што је случај код глобалне оптимизације.

Изабране критеријумске функције у проблему који се, у овој дисертацији, решава су међусобно супротстављене, што ће бити детаљније описано у наставку рада. Укратко, укупна покривеност (укупан број опслужених чворова или корисника) се повећава увођењем нових хабова на мрежи, али се са друге стране на тај начин повећавају и укупни трошкови итд.

Услед конфликтне природе датих критеријума најчешће не постоји решење које истовремено максимизира све критеријуме. Услед тога решење проблема (4.21) – (4.28) се најчешће састоји од Парето-оптималних (ефикасних, неинфериорних) решења.

Решење $\vec{x}^* \in \Omega$ је Парето-оптимално [Coe02] ако за свако $\vec{x} \in \Omega$ и $I = \{1, 2, \dots, k\}$ важи:

$$\forall_{i \in I} (f_i(\vec{x}) = f_i(\vec{x}^*)) \quad (3.6)$$

или постоји бар једно $i \in I$, такво да је:

$$f_i(\vec{x}) > f_i(\vec{x}^*) \quad (3.7)$$

где је Ω простор допустивих решења дефинисан изразима (3.3) и (3.4) док су $\vec{x} \in \Omega$ допустива решења.

Другим речима, решење је Парето-оптимално ако не постоји допустив вектор \vec{x} који би смањео неке критеријуме без истовременог повећавања бар једног од осталих критеријума.

Још неке важне дефиниције у вези са Парето оптималношћу односе се на Парето доминантност и Парето оптимални скуп:

За вектор $\vec{u} = (u_1, \dots, u_k)$ се каже да доминира $\vec{v} = (v_1, \dots, v_k)$ што се записује и као $\vec{u} \preceq \vec{v}$ ако и само ако је u парцијално мање од v односно, $\forall i \in \{1, \dots, k\}, u_i \leq v_i \wedge \exists i \in \{1, \dots, k\}: u_i < v_i$.

За дати вишекритеријумски проблем оптимизације $\vec{f}(x)$, Парето оптимални скуп (P^*) се дефинише као:

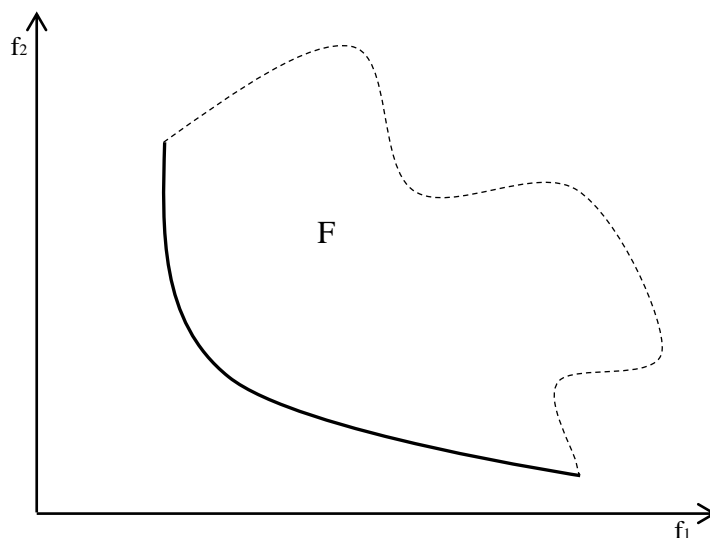
$$P^* := \{x \in \Omega \mid \neg \exists x' \in \Omega \vec{f}(x') \preceq \vec{f}(x)\} \quad (3.8)$$

На слици 3.7 дата је илустрација тзв. Парето фронта за двокритеријумски проблем (пуна линија на слици). Парето фронт представља област тачака које представљају минимум критеријумске функције у Парето смислу, односно скуп рубних (граничних) тачака критеријумских функција.

За дати вишекритеријумски проблем оптимизације $\vec{f}(x)$ и Парето оптимални скуп P^* , Парето фронт PF^* се према [Coe02] дефинише као:

$$PF^* := \{\vec{u} = \vec{f} = (f_1(x), \dots, f_k(x)) \mid x \in P^*\} \quad (3.9)$$

Одмах треба рећи да је, у општем случају, налажење аналитичке формуле линије или површине која садржи тачке које се налазе на Парето фронту веома тешко. Када се за решавање самог проблема користи метахеуристичка метода, као што је то случај у овој дисертацији, тада се поставља и питање доказивости да ли су решења која су добијена, а која нису доминирана ни од ког другог решења, заиста таква или је то резултат немогућности методе да нађе боље. Једном речју, најчешће је немогуће доказати оптималност добијених решења као ни пронаћи сва недоминирана решења тако да се поставља оправдано питање да ли тако генерисан Парето фронт задовољава (3.8) и (3.9). Са друге стране графичко представљање недоминираних решења представља корисну илустрацију доносиоцима одлука тако да ће у делу са експерименталним резултатима ипак бити дати Парето фронтови за двокритеријумски и трокритеријумски оптимизациони проблем.



Слика 3.7. Илустрација Парето фронта (пуна линија) у случају проблема са две критеријумске функције

На крају треба истаћи да решења, упркос томе што припадају Парето фронту, не морају имати очигледне међусобне везе.

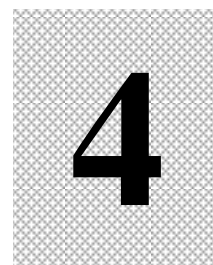
Налажење решења вишекритеријумског проблема оптимизације најчешће подразумева следеће две фазе: (а) оптимизација дефинисаних критеријумских функција; (б) изражавање преференција доносиоца одлука према размени (*trade-off*) између дефинисаних критеријумских функција. Cohon и Marks су у [Coh75] класификовали све вишекритеријумске оптимizacione методе према изражавању преференција доносиоца одлука. У случају артикулисања априори преференција доносиоца одлука одлучије о размени између критеријума пре самог тражења решења. Супротно томе, у случају изражавања апостериори преференција тражење решења се извршава пре доношења одлуке.

Неке од добро познатих техника са априори изражавањем преференција су: Метод глобалних критеријума (*Global Criterion Method*) [Boy73, Zel77, Duc84, Kos84, Osy84]; Циљно програмирање (*Goal Programming*) [Cha61, Iji65]; Метод достизања циља (*Goal-Attainment Method*) [Gem74, Gem75]; Лексикографска метода (*Lexicographic Method*) [Rao84, Sar93]; Мин-Макс оптимизација (*Min-Max Optimization*) [Jut67, Sol69, Osy78, Rao86, Tse90]; Вишеатрибутивна теорија

корисности (*Multiattribute Utility Theory*) [vNe47, Ken69, Rai69, Geo72, Ken76, Kel76, Ver80]; Електра (*ELECTRE*) [Ben66, Roy71, Duc81, Roy93] и *PROMETHEE* метода [DAv83, Brn85, Brn86, Mar88].

Што се тиче апостериори техника изражавања преференција најчешће су коришћене: Линеарна комбинација тежина (*Linear Combination of Weights*) [Gas55] и Метода ε ограничења (*ε - Constraint Method*) [Car80, Hwa80, Osy84, Lon93].

РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА ДОСТАВЕ ЕКСПРЕС ПОШИЉАКА ПРИМЕНОМ ГЕНЕТСКИХ АЛГОРИТАМА



4.1. Формулација проблема

У великом броју мрежа у ваздушном, железничком, друмском и поштанском саобраћају, као и у системима брзе испоруке пошиљака постоје хабови у којима долази до трансфера путника или претовара робе. Хабови могу бити транспортни терминали, аеродроми, железничке станице, центри селекције, сакупљања или преусмеравања робе и путника и сл. Типови транспортних мрежа засновани на постојању хабова (*Hub-and-spoke networks*) се широко користе у модерним транспортним и телекомуникационим системима. На овим мрежама се путовања између појединих парова чворова обављају преко изабраног скупа хабова. Хабови представљају центре колекције и консолидације робних и/или путничких токова у мрежи на путевима између парова чворова. Ток између два чвора у хаб мрежи се обично дефинише као број путника или количина робе у јединици времена коју треба транспортовати од почетног чвора (извора кретања, снабдевача) до крајњег чвора (циља кретања, корисника - примаоца).

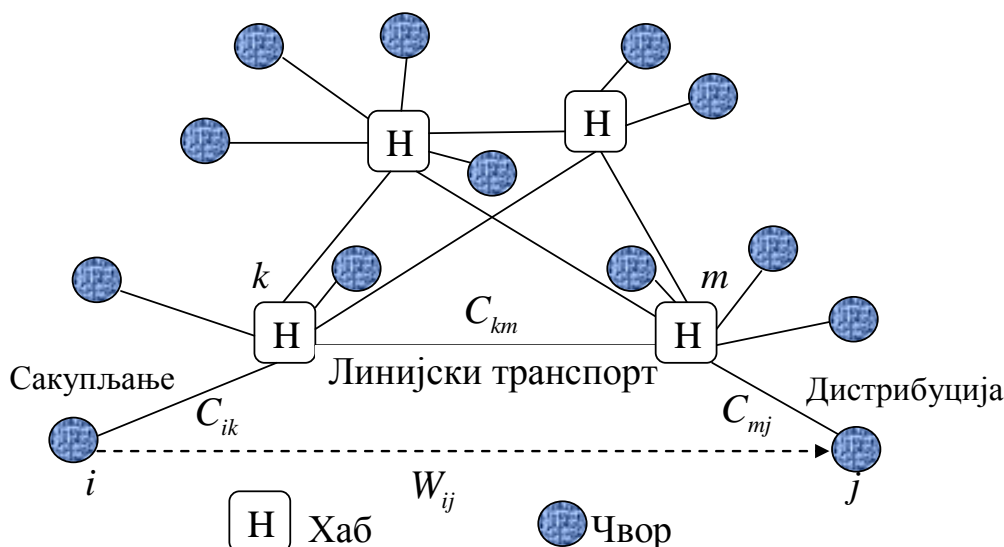
Укупан број хабова, њихове локације и чворови који су са њима директно повезани имају утицај на укупне транспортне трошкове, на профит који компаније остварују, као и на ниво услуге који нуди мрежа за пренос пошиљака. Токови пошиљака између свих парова чворова (изворишно-циљна матрица) представљају основне улазне податке приликом решавања проблема лоцирања хабова.

У дисертацији се разматра проблем пројектовања мреже за пренос пошиљака у случају када се чворови повезују са само једним хабом у мрежи.

Разматра се случај када не постоји ограничење у погледу капацитета који имају хабови. Такође се претпоставља да укупан број хабова на мрежи није дефинисан унапред. Проблем којим се бави ова дисертација се може дефинисати на следећи начин: *за познате токове, растојања и времена путовања између свих парова чворова, као и трошкове превоза, прераде/сортирања пошиљака и изградње хабова, пронаћи укупан број хабова, њихове локације и сваком хабу доделити подручје са кога ће се ка њему вршити концентрација пошиљака на начин да се максимизирају укупан профит и ниво(и) квалитета услуга које се пружају клијентима.*

Доносиоци одлука, који треба да прихвате неко од генерисаних решења, најчешће желе да имају више опција у доношењу коначне одлуке. Компарација понуђених решења је најефикаснија када се извршава на интерактиван начин са активним учествовањем донослаца одлуке у том процесу. Интерактивни приступ решавању назначеног проблема детаљније је разматран у следећем поглављу.

Проблем који се разматра односи се на експрес пренос у случају када се транспорт, на посматраном региону, врши искључиво флотом друмских возила. Предложени концепт се, са минималним модификацијама модела, може применити и на друге видове саобраћаја. Без губљења на општости разматран је случај гарантованог уручења у току наредног радног дана (Д+1). У дисертацији се разматра проблем лоцирања хабова за случај неоријентисане мреже репрезентоване графом $G = (N, A)$. Овај граф укључује скуп чворова N као и скуп грана A . Са n је означена кардиналност (број елемената) скупа N , тј. укупан број чворова на транспортној мрежи.



Слика 4.1. „Hub-and-spoke” мрежа за пренос поштиљака

Чворови означени са H на слици 4.1 представљају хабове док су круговима представљене тачке отпреме поштиљака које су повезане са одређеним хабовима. У већини случајева мрежа хабова представља потпуно повезани граф што је случај и у овој дисертацији. Иако у пракси постоје случајеви када су поједини чворови на мрежи повезани са више хабова истовремено, или директно са другим углавном блиским чворовима, у овој дисертацији претпоставља се да је сваки чвор (тачка отпреме) повезан са искључиво једним хабом на мрежи. Са R ($R \subseteq N$) и S ($S \subseteq N$) означени су скупови полазних и одредишних чворова респективно. Размотримо случај када укупни број будућих хабова у мрежи за пренос поштиљака није унапред одређен. Оваква поставка је у стручној литератури далеко мање разматрана од добро познатих проблема p -хаб медијане/центра о којима је било више речи у трећем поглављу. Такође, претпоставља се да сваки хаба има довољан капацитет прераде, обзиром на количине поштиљака, тако да се разматра тзв. некапацитивни проблем размештаја хабова.

Претпоставља се да оптимална одлука везана за лоцирање хабова треба да буде донета на основу компромиса између више супротстављених критеријума, уз поштовање дефинисаних ограничења. Критеријуми на основу којих треба пронаћи најбоље могуће решење су: максимизирање укупног профита и максимизирање нивоа услуге понуђене клијентима (изражено кроз два показатеља

квалитета: време понуђено пошиљаоцима за предају пошиљака и проценат корисника којима је на располагању услуга слања пошиљака ван стандардног радног времена). Ови критеријуми су међусобно конфликтни. У дисертацији је предложена вишекритеријумска формулација проблема лоцирања хабова у мрежи за пренос пошиљака.

4.1.1. Мерење укупног профита оператора

Означимо са R укупне приходе оператора преноса пошиљака. Ови приходи се добијају наплатом услуга преноса од клијената. Остварени приход зависи од више фактора које дефинише превозилац (најчешће: дистанце на којој се врши превоз, масе или запремине пошиљке која се превози, временског рока уручења, итд.). Узимајући све наведено у обзир ако са P означимо просечну накнаду коју оператор наплаћује за пренос пошиљке, укупан приход оператора R , је приближно једнак:

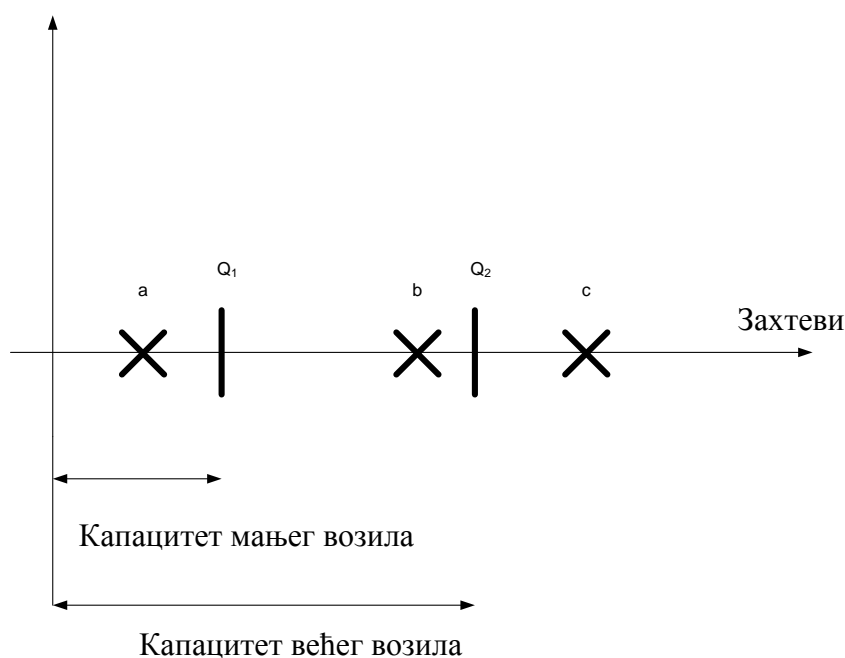
$$R = \sum_i \sum_j W_{ij} P \quad (4.1)$$

где је:

W_{ij} - број транспортних јединица (пошиљака) између чворова i и j

Најчешће се за сакупљање и дистрибуцију пошиљака користе комби возила. Између хабова се пошиљке превозе помоћу камиона са приколицом и сходно томе са порастом величине возила остварују се нижи транспортни трошкови по појединачној пошиљци. У овој дисертацији разматра се случај (потврђен у свакодневној пракси) када оператор има на располагању два типа возила: мања возила (комби) и већа возила (камиони). Када се анализирају трошкови система превоза пошиљака узимају се у обзир трошкови сакупљања пошиљака од чворова до хабова, трошкови транспорта пошиљака између хабова, трошкови дистрибуције од хабова до чворова, трошкови изградње хабова као и

трошкови сортирања пошиљака у хабовима. Претпоставља се да, услед разлика у броју пошиљака које треба транспортовати, оператор користи мања возила за сакупљање пошиљака из чворова и дистрибуцију до чворова, док за превоз између хабова користи једно или више већих возила. У случају великих количина пошиљака између појединих чворова и хабова претпостављено је да оператор користи већа возила уместо више мањих.



Слика 4.2. Количине пошиљака и капацитети возила

Означимо са Q_1 и Q_2 капацитете мањег и већег возила, респективно (слика 4.2). Када је количина пошиљака која треба да се превезе мања од капацитета мањег возила – оператор користи мање возило (случај (а), слика 4.2). У случају када је та количина већа од капацитета мањег возила и мања од капацитета већег возила (случај (б), слика 4.2) оператор користи веће возило. Коначно, када је количина пошиљака коју треба превести већа од капацитета већег возила оператор користи једно, два, три,... већих возила или једно, два, три,... већих возила и једно мање возило. Укупни бројеви ангажованих мањих и већих возила означени су са y_{ik} и z_{ik} , респективно.

Укупан број ангажованих мањих возила (број вожњи мањих возила) између чвора i и хаба смештеног у чвору k једнак је:

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{ако је } W_{ik} \leq Q_1 \text{ или } W_{ik} > Q_2 \text{ и } W_{ik} - Q_2 \left\lfloor \frac{W_{ik}}{Q_2} \right\rfloor \leq Q_1 \\ 0 & \text{у супротном} \end{cases} \quad (4.2)$$

где је $\lfloor x \rfloor = \max\{n \in \mathbb{Z} | n \leq x\}$ - највећи цели број, не већи од x (n су цели бројеви, а Z је скуп целих бројева)

Укупан број ангажованих већих возила (број возњи већих возила) између чвора i и хаба смештеног у чвору k једнак је:

$$z_{ik} = \begin{cases} 0 & \text{ако је } W_{ik} \leq Q_1 \\ \left\lfloor \frac{W_{ik}}{Q_2} \right\rfloor & \text{ако је } W_{ik} > Q_1 \text{ и } W_{ik} - Q_2 \left\lfloor \frac{W_{ik}}{Q_2} \right\rfloor \leq Q_1 \\ \left\lfloor \frac{W_{ik}}{Q_2} \right\rfloor + 1 & \text{ако је } W_{ik} > Q_1 \text{ и } Q_1 < W_{ik} - Q_2 \left\lfloor \frac{W_{ik}}{Q_2} \right\rfloor \leq Q_2 \end{cases} \quad (4.3)$$

Од пошиљаоца до примаоца пошиљка може путовати са минимално једним, а максимално два претовара у прерадном центру, односно хабу. Посматрајмо пут пошиљке која иде од чвора i преко хабова k (коме је придружен чвор i) и m до чвора j (придруженог хабу m): $i \rightarrow k \rightarrow m \rightarrow j$. Без губитка општости, може се претпоставити да су сви трошкови симетрични ($C_{ij} = C_{ji}$) за све типове возила. Укупни трошкови транспорта пошиљака од полазног чвора i , преко хабова k и m , до одредишног чвора j , C_{ikmj} , износе:

$$C_{ikmj} = C_{ik} + C_{km} + C_{mj} \quad (4.4)$$

где су:

$$C_{ik} = (y_{ik}c_1 + z_{ik}c_2)d_{ik} \quad (4.5)$$

$$C_{km} = (y_{km}c_1 + z_{km}c_2)d_{km} \quad (4.6)$$

$$C_{mj} = (y_{mj}c_1 + z_{mj}c_2)d_{mj} \quad (4.7)$$

c_1 - транспортни трошкови по јединичном растојању за мања возила (комби)

c_2 - транспортни трошкови по јединичном растојању за већа возила (камион)

y_{ik} - број возњи начињених мањим возилима између чвора i и чвора k

z_{ik} - број возњи начињених већим возилима између чвора i и чвора k

d_{ik} - растојање између чвора i и чвора k

Аналогно y_{ik} , z_{ik} и d_{ik} дефинисани су и: y_{km} , z_{km} и d_{km} на релацији $k \rightarrow m$ односно: y_{mj} , z_{mj} и d_{mj} на релацији $m \rightarrow j$. Уведимо у разматрање следеће бинарне променљиве:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{ако је чвор } i \text{ повезан са хабом смеитеним учвору } k \\ 0 & \text{у супротном} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$x_{ii} = \begin{cases} 1 & \text{ако је чвор } i \text{ хаб} \\ 0 & \text{у супротном} \end{cases} \quad (4.9)$$

Укупни транспортни трошкови сакупљања пошиљака на целој мрежи, C , су једнаки:

$$C = \sum_i \sum_k x_{ik} C_{ik} \quad (4.10)$$

Укупни транспортни трошкови између хабова, T , износе:

$$T = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m x_{ik} x_{jm} C_{km} \quad (4.11)$$

Укупни транспортни трошкови дистрибуције пошиљака на целој мрежи, D , су једнаки:

$$D = \sum_j \sum_m x_{jm} C_{jm} \quad (4.12)$$

Приликом пројектовања транспортне мреже морају се узети у обзир и трошкови изградње и експлоатације хабова у чворовима који су изабрани као њихове оптималне локације. Изградња и експлоатација овако сложених система детаљно је описана у другом поглављу, (2.2) а на овом месту означимо са f_i трошкове успостављања хаба у чвору i , уз напомену да је узет у обзир са једне стране специфичан утицај локације на цену изградње, а са друге јединична цена

руковања пошиљком у хабу. Укупан профит $f_1(\vec{x})$ система преноса пошиљака једнак је:

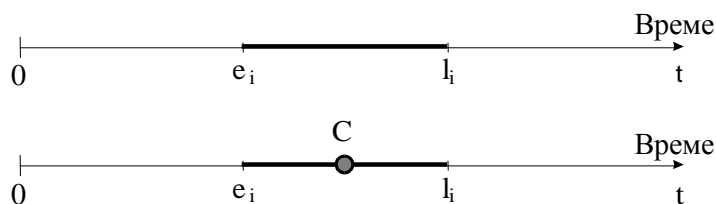
$$f_1(\vec{x}) = \sum_i \sum_j W_{i,j} P - \sum_i \sum_k x_{ik} C_{ik} - \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m x_{ik} x_{jm} C_{km} - \sum_j \sum_m x_{jm} C_{jm} - \sum_i x_{ii} f_i \quad (4.13)$$

На укупан профит превозиоца утиче и велики број фактора који нису видљиви у формули (4.13) (попусти великим корисницима, наплативост потраживања, варијабилност трошкова радне снаге, енергената и репроматеријала, итд.). Њихови утицаји су узети у обзир у нумеричком примеру који се односи на пренос експрес пошиљака у компанији *CityExpress*.

4.1.2. Мерење нивоа услуге понуђене клијентима

Код многих оператора преноса као једна од услуга нуди се гарантована испорука у току наредног радног дана. Ова услуга подразумева постојање „временског прозора“ за преузимање пошиљака. На пример, оператор може понудити гаранције клијентима да ће све пошиљке које у току дана преузме између 8:00 и 15:00 бити испоручене у одредишни чвор до 8.00 наредног радног дана, односно да ће бити уручене примаоцима најкасније до 12.00 наредног радног дана (тренутна пракса код оператора у Србији).

Слика 4.3 илуструје „временски прозор“ за преузимање пошиљака. Најранији и најкаснији тренутак за преузимање пошиљака у чвору i означени су са e_i и l_i , респективно (слика 4.3.). Временска тачка C представља преузимање пошиљке у i -том чвору у тренутку C .



Слика 4.3. Временски прозор за преузимање пошиљака

Посматрајмо поново пут $i \rightarrow k \rightarrow m \rightarrow j$. Као и у случају транспортних трошкова, претпоставља се да су сва времена транспорта симетрична ($t_{ij} = t_{ji}$). Са t_{kk} је означено време које је потребно за сортирање пошиљака у хабу k . Укупно време транспорта пошиљке од полазишта i , преко хабова k и m , до одредишта j је једнако:

$$t_{ij} = \sum_k x_{ik} t_{ik} + t_{kk} + \sum_k \sum_m x_{ik} x_{jm} t_{km} + \sum_m x_{jm} t_{jm} \quad (4.14)$$

Са t^* означимо гарантовано време испоруке (на пример 8:00 следећег јутра). Најкасније могуће време l_i за сакупљање пошиљака у чвору i мора да задовољи следеће неједнакости:

$$l_i + \max_j \{t_{ij}\} \leq t^* \quad (4.15)$$

односно:

$$l_i \leq t^* - \max_j \{t_{ij}\} \quad (4.16)$$

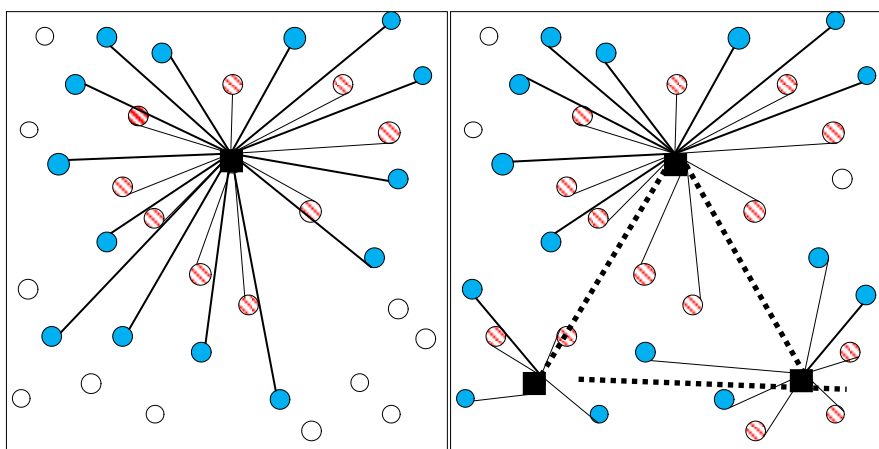
$$l_i \leq t^* - \max_j \left\{ \sum_k x_{ik} t_{ik} + t_{kk} + \sum_k \sum_m x_{ik} x_{jm} t_{km} + \sum_m x_{jm} t_{jm} \right\} \quad (4.17)$$

Након израчунавања најкаснијег могућег времена за сакупљање пошиљака l_i , дефинише се временски прозор $[e_i, l_i]$ за сакупљање пошиљака у чвору i . У случају веома малих временских интервала (на пример 45 минута) чвор i неће бити укључен у мрежу преноса пошиљака. У случајевима веома малих временских прозора за сакупљање пошиљака чвор се избацује из мреже за пренос јер је такво време пријема неприхватљиво за клијенте који у том случају морају да све своје потребе за преносом задовоље на самом почетку радног времена (нпр. до 8.30 сати) што је практично неприхватљиво. Таквим клијентима је у реалности понуђена услуга Д+2 јер ће свака пошиљка коју пошаљу после веома рестриктивног најкаснијег момента (нпр. 8.30 сати) кренути из чвора ка хабу тек сутрадан, а бити испоручена за два радна дана. Концепт временских прозора је

искоришћен да би се измерио квалитет услуге пружене клијентима. Што је шири временски прозор за сакупљање пошиљака у концентрацији (са доставног подручја чворова) то је више времена на располагању корисницима да их предају на пренос а то значи њихову већу удобност, већи проценат њихових пошиљака које ће бити уручене у року $D+1$ и уопште већи квалитет услуге. Означимо са tw_i временски прозор за сакупљање пошиљака у чвору i ($tw_i = l_i - e_i$). Без губљења општости можемо претпоставити да је $e_i = 0$ (иако у пракси радно време чворова почиње од 07.00, 07.30, 08.00, итд.). Најједноставнија мера квалитета услуге на нивоу целе разматране транспортне мреже може бити просечно време за сакупљање пошиљака (временски прозор). Просечан временски прозор за сакупљање пошиљака једнак је:

$$f_2(\vec{l}) = \frac{\sum_i tw_i \sum_j W_{ij}}{\sum_i \sum_j W_{ij}} \quad (4.18)$$

Укупан број чворова и/или укупан број клијената на мрежи који могу користити понуђене услуге преноса такође представљају значајне показатеље нивоа услуге. Укупан број хабова, њихове локације као и алокација чворова одређеним хабовима утичу на вредности ових показатеља услуге. На пример, укупан број чворова (корисника) који могу користити специфичну услугу може бити значајно повећан увођењем новог хаба и/или променом локација постојећих хабова (слика 4.4).



Слика 4.4. Повећање укупног броја опслужених чворова увођењем два нова хаба

Легенда:

■ - Хабови

○ - Чворови изван система преноса

● - Чворови обухваћени системом преноса

⊗ - Чворови који имају време за пријем пошиљака дуже од стандардног

У овој дисертацији предвиђене су две могућности за сваки чвор на транспортној мрежи. Чвор може бити изван система преноса када нема могућност нити пријема нити испоруке пошиљака које се транспортују или може бити повезан са свим осталим чворовима на мрежи. У разматрање није узет случај када се корисницима у неком чвору може понудити ограничена услуга преноса односно када се тај чвор може повезати само са одређеним бројем осталих чворова на мрежи. Чвор i може бити укључен у систем преноса ако је задовољен услов дат неједначином (4.16).

Време расположиво за предају пошиљака на пренос није једина мера квалитета понуђене услуге. Означимо са L произвољно усвојено време завршетка сакупљања пошиљака, тј. крај радног времена у чвору (нпр. 18:00). Важно је напоменути да тај тренутак не мора бити стриктно везан за престанак свих активности у чвору већ само за активност сакупљања пошиљака. Честе су ситуације да је моменат престанка сакупљања пошиљака значајно пре краја радног времена оператора и/или корисника услуге. Уведимо у разматрање следеће бинарне променљиве:

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{када је } l_i \geq L \\ 0 & \text{у супротном} \end{cases} \quad (4.19)$$

Процент клијената $f_3(\vec{y})$ који могу предати своје пошиљке на пренос после најкаснијег тренутка L је једнак:

$$f_3(\vec{y}) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} y_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \cdot 100\% \quad (4.20)$$

У дисертацији се $f_3(\bar{y})$ користи као секундарна мера нивоа услуге. Што је већи проценат клијената који могу предати своје пошиљке после одређеног најкаснијег времена L , то је већи квалитет саме услуге. Ова мера у свакодневној експлоатацији означава проценат пошиљака које ће, без икаквих додатних улагања, ипак бити уручене следећег радног дана, иако би у стандардним околностима биле уручене тек за два радна дана (Д+2). На тај начин $f_3(\bar{y})$ представља меру додатног квалитета која представља важну перформансу транспортне мреже, јер није редак случај да клијенти имају потребу да предају велики број пошиљака управо у касним поподневним часовима када завршавају дневне активности, или двократног радног времена, због прикупљања поруџбина, итд. Такође, то је време када запослени регулишу своје приватне обавезе. Ова мера је уско повезана са хитним пошиљкама којима је важна што бржа испорука и клијентима који су спремни да за такву хитност додатно плате док за „обичне” пошиљке није од превеликог интереса.

4.1.3. Математичка формулација проблема

Оптимално решење представљеног хаб локацијског проблема, или решење које је близу оптималног, мора се пронаћи у условима задовољења два или више критеријума који су међусобно супротстављени. Тако је, на пример, немогуће истовремено повећавати и профит оператора и ниво квалитета услуге. У овој дисертацији врши се симултана оптимизација три супротстављене критеријумске функције уз задовољење свих ограничења математичког модела транспортне мреже.

Симултана оптимизација подразумева истовремену максимизацију укупног профита, максимизацију средњег временског прозора за предају пошиљака и максимизацију процента клијената којима је понуђена додатна услуга предаје пошиљке након краја стандардног радног времена L . Ови критеријуми су очигледно међусобно супротстављени. Као и код свих оптимизационих проблема

и у овом случају је потребно задовољити одређена ограничења која су условљена појединим карактеристикама како окружења тако и доступних ресурса (саобраћајна повезаност, доступно време и сл.). Ова ограничења морају бити задовољена да би се одређено потенцијално решење уопште разматрало. Предложена математичка формулација вишекритеријумске оптимизације хаб локацијског проблема гласи:

Максимизирати

$$f_1(\vec{x}) = \sum_i \sum_j W_{ij} P - \sum_i \sum_k x_{ik} C_{ik} - \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m x_{ik} x_{jm} C_{km} - \sum_j \sum_m x_{jm} C_{jm} - \sum_i x_{ii} f_i \quad (4.21)$$

Максимизирати

$$f_2(\vec{l}) = \frac{\sum_i t w_i \sum_j W_{ij}}{\sum_i \sum_j W_{ij}} \quad (4.22)$$

Максимизирати

$$f_3(\vec{y}) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} y_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \cdot 100\% \quad (4.23)$$

при ограничењима:

$$l_i \leq t^* - \max_j \left\{ \sum_k x_{ik} t_{ik} + t_{kk} + \sum_k \sum_m x_{ik} x_{jm} t_{km} + \sum_m x_{jm} t_{jm} \right\} \quad \forall i \in N \quad (4.24)$$

$$\sum_k X_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (4.25)$$

$$X_{kk} - X_{ik} \geq 0 \quad \forall i, k \in N \quad (4.26)$$

$$X_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \in N \quad (4.27)$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{када је } l_i \geq L \\ 0 & \text{у супротном} \end{cases} \quad (4.28)$$

Критеријумска функција $f_1(\vec{x})$ репрезентује укупан профит оператора. Друга критеријумска функција $f_2(\vec{l})$ представља просечно време понуђено клијентима за предају пошиљака у току једног дана, док трећа критеријумска функција $f_3(\vec{y})$ репрезентује проценат клијената којима је понуђена додатна услуга предаје пошиљке након краја стандардног радног времена L . Ограничење (4.24) дефинише најкаснији временски тренутак за сакупљање пошиљака у чвору. Услов (4.25) одређује да је сваки чвор придружен једном и само једном хабу. Ограничење (4.26) представља захтев да је чвор i повезан са чвором k само ако је у чвору k успостављен хаб. Остала ограничења описују променљиве у моделу.

Одређивање локација хабова изражено релацијама (4.21-4.28) представља проблем вишекритеријумског нелинеарног целеобројног програмирања које се генерално може изразити као:

$$\max \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_r(x) \mid x \in X \text{ где је } x \text{ цео број}\} \quad (4.29)$$

У претходном изразу $X \subset R^n$ је скуп свих допустивих решења дефинисаних датим ограничењима док су $f_1(x), f_2(x), \dots, f_r(x)$ критеријуми који се максимизирају.

Изабране критеријумске функције су, као што је већ речено, међусобно конфликтне. На пример ако се временски прозор за пријем пошиљака повећа поједини парови градова (чворова) наћи ће се изван система гарантоване испоруке следећег радног дана што ће умањити укупан број опслужених клијената. Укупна покривеност (укупан број покривених чворова или укупан број покривених корисника као боља мера) може се повећати увођењем нових хабова на мрежи. Међутим, успостављање нових хабова ће довести до повећања укупних трошкова а самим тим и смањења профита који се остварује. Слично томе, ако се покуша повећати проценат клијената који могу своје пошиљке предати након истека стандардног радног времена то ће или повећати број хабова или избацити поједине удаљене чворове из система преноса.

Другим речима услед конфликтне природе датих критеријума обично не постоји решење које симултано максимизира све успостављене критеријуме. Из тог разлога решење проблема (4.21-4.28) најчешће подразумева Парето-

оптимално (ефикасно, неинфериорно) решење (Vilfredo Pareto, [Par96]). Више о Парето-оптималности дато је у поглављу 3.4.

4.2. Преглед релевантне литературе

У последњих неколико деценија настао је велики број радова посвећених локацијској анализи. О'Kelly [ОКе86, ОКе87] је први проучавао проблем лоцирања хабова. Проблеми лоцирања хабова су познати као веома сложени и припадају класи NP-тешких проблема. Различити аспекти проблема локације хабова детаљно су разматрани у литератури. У већини радова проблеми лоцирања објеката као и проблеми рутирања возила, који се често заједно решавају, су формулисани као проблеми мешовитог целобројног програмирања (само неке од променљивих су целобројне) што их чини тешким за решавање (у случају проблема великих димензија). Неке од тешкоћа повезаних са решавањем ове класе проблема Daganzo и Newell су, приликом проучавања топологије транспортне мреже, покушали да превазиђу користећи континуални приступ [Dag86]. Daganzo и Newell су увели у разматрање густину корисника на посматраној територији опслуживања и на тај начин успели да одреде број претоварних тачака (*transshipment points*) уз одређивање фреквентности и рута дистрибутивних возила. Torcuoglu и остали [Tor05] су решавали некапацитивни хаб локацијски проблем коришћењем метахеуристике GA на примеру транспортне мреже за превоз логистичких јединица између више од 80 чворова у Турској. Smilowitz и Daganzo су у [Smi07] проучавали пројектовање комплексног система преноса пакета. Они су у свом раду користили идеализоване: оперативне трошкове, геометрију мреже, захтеве корисника и њихов размештај у простору. Посматрани проблем пројектовања мреже Smilowitz и Daganzo су свели на низ оптимизационих подпроблема који се могу лакше решити. Основна идеја њиховог истраживања је била проналажење једноставних, али довољно реалних, смерница за пројектовање и експлоатацију мреже за дистрибуцију пакета управо у D+1

временском ограничењу. Smilowitz и Daganzo су узимали у обзир како интересе оператора, тако и ниво услуга који се пружа клијентима.

Осим што је први дефинисао хаб локацијски проблем, О'Kelly је низом радова [ОКе91, ОКе92, ОКе94, ОКе96, ОКе98а, ОКе98b, ОКе98c] указао на многе аспекте хаб локацијских проблема услед чега су његови радови полазна основа за свако даље истраживање.

Обзиром на комплексност проблема и велики број фактора који утичу на перформансе транспортне мреже Current и остали су већ 1990. године дали предлог вишекритеријумског приступа доношењу одлуке о лоцирању објеката на мрежи [Cur90]. И поред тога мали је број радова који се, услед додатног усложњавања већ компликованог хаб локацијског проблема, бави вишекритеријумским аспектом локацијске анализе. Управо у овој чињеници лежи један од основних мотива за израду ове дисертације.

Поред решавања појединачних и конкретних локацијских проблема већи број аутора представио је и прегледне радове у вези са појединим облстима локацијске анализе. Прегледни радови који укључују и проблеме лоцирања хабова дати су, између осталих, и од стране: Owen и Daskin [Owe98], Re Velle-a и Eiselt-a [ReV05] као и Smith-a и осталих [SmH09]. Bryan и O'Kelly у [Bry02] дају аналитички преглед Hub&Spoke мрежа у авио саобраћају који је значајан и за друге области саобраћаја. Група аутора на челу са Re Velle-ом је у [ReV08] публиковала библиографију фундаменталних дискретних локацијских проблема. Такође, у скорије време публикован је и рад аутора Alumur и Kara [Alu08] који сумирају најновије технике за решавање хаб локацијских проблема.

Осим радова у којима се решавају разни специфични и у главном реални проблеми или се врши сублимација читавих класа проблема или метода решавања, публиковано је и више специјалних издања часописа посвећених искључиво овој проблематици. Специјално издање *INFOR* (едитори Laporte и Semet) [Lap99] посвећено је коришћењу метахеуристика у решавању локацијских и проблема рутирања. Специјално издање часописа *Computers & Operations Research* (едитори Namacher и Meyer) је посвећено најновијим достигнућима у лоцирању хабова [Nam09].

Велико интересовање истраживача широм света показује да је проблем лоцирања објеката на мрежи већ дужи низ година веома актуелан и пре свега економски значајан. Укупан број хабова, њихове локације и правилна расподела припадајућих чворова тим хабовима утичу на два главна показатеља квалитета пројектоване транспортне мреже: укупне трошкове превоза и ниво квалитета услуге коју пружа. У овој дисертацији се истражује некапацитивни проблем лоцирања хабова на мрежи са једноструком алокацијом чворова у коме број хабова није унапред задат. Вишекритеријумски и интерактивни приступ решавању овог проблема треба да развијеном моделу дају стратешки карактер док предложене методе израчунавања критеријумских функција треба да га учине што применљивијим у пракси.

4.3. Решавање вишекритеријумског проблема лоцирања хабова компромисним програмирањем

Постоје различити приступи и концепти за решавање посматраног вишекритеријумског проблема лоцирања хабова у мрежама за пренос експрес пошиљака. Компромисно програмирање припада групи техника са априори изражавањем преференција доносиоца одлука (више о томе је дато у делу 3.4). Поред компромисног програмирања постоје и друге технике које се могу користити [Yu77, Duc80, Kos84, Osy84]. Последњих година за решавање проблема вишекритеријумске оптимизације развијени су и различити вишекритеријумски еволутивни алгоритми [Sch84, Sch85, Hor94, SrN94, Coe02].

У овој дисертацији ће бити коришћено компромисно програмирање [Coe02] као алат за решавање вишекритеријумског проблема лоцирања хабова на мрежи за пренос експрес пошиљака.

Вектор $[f_1^o, f_2^o, \dots, f_K^o]$ се назива идеалним вектором где f_i^o ($i = 1, 2, \dots, K$) означава оптимум i -те критеријумске функције. Тачка која одређује идеални вектор се назива идеалном тачком. Како је у реалним апликацијама веома ретко

ако не и немогуће открити идеално решење посматраног вишекритеријумског проблема Duckstein [Duc84] је предложио следећу меру „блискости са идеалним решењем“:

$$L_p = \left[\sum_{i=1}^K w_i^p \left| \frac{f_i(\bar{x}) - f_i^o}{f_{i \text{ најгоре}} - f_i^o} \right|^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (4.30)$$

где је:

$f_i(\bar{x})$ - вредност i -те критеријумске функције настале имплементацијом одлуке \bar{x}

f_i^o - оптимална вредност i -те критеријумске функције

$f_{i \text{ најгоре}}$ - најлошија могућа вредност i -те критеријумске функције

K - укупан број критеријумских функција

w_i - тежина i -те критеријумске функције

p - вредност која представља врсту растојања: за $p = 1$, сва одступања од оптималног решења су директно пропорционална са њиховом величином, док за $2 \leq p \leq \infty$, што је веће одступање то оно са собом носи већу тежину у складу са одговарајућом L_p метриком.

Променом вредности параметара у (4.30) могу се генерисати различита компромисна решења. На тај начин се доносиоцу одлука може понудити читав спектар могућих решења посматраног проблема. За примену овакве метрике неопходно је пронаћи оптимална решења f_i^o дефинисаних критеријумских функција како би се могла израчунати блискост идеалном решењу L_p . Другим речима, неопходно је прво решити једнокритеријумске проблеме лоцирања хабова на транспортној мрежи за експрес пренос пошиљака и то за сваку дефинисану критеријумску функцију. Решавање једнокритеријумских проблема у овој дисертацији базираће се на метахеуристици Генетски алгоритми описаној у поглављу 3.3.

4.4. Примена генетских алгоритама на једнокритеријумски проблем пројектовања транспортне мреже за пренос експрес пошиљака

Обзиром да се саобраћајни токови унутар транспортних мрежа најчешће карактеришу тзв. економијом обима (енг. *economies of scale*) компаније које се баве преносом и уручењем пошиљака организују своје транспортне мреже као хаб мреже. Понашање компанија у извесној мери произилази из учења на сопственим и искуствима других компанија у свакодневном раду. Велико искуство у преносу и испоруци пошиљака је временом довело до значајног смањења јединичних трошкова транспорта уз истовремено повећање величине, односно транспортног капацитета возила која саобраћају између хабова. Другим речима, трошкова функција транспорта који се карактерише економијом обима није линеарна. На тај начин економија обима даје аргументацију за коришћење генетских алгоритама при решавању проблема преноса експрес пошиљака. Наравно да то није и једини разлог за коришћење генетских алгоритама.

Егзактне методе решавања хаб локацијских проблема какве су еnumerативне шеме у случају проблема који се овде решава показују недостатак ефикасности. Чак и веома софистициране методе каква је динамичко програмирање (*Dynamic Programming*) постају неефикасне већ на проблемима средњих димензија. Услед потешкоћа у проналажењу оптималног решења за велике комбинаторне проблеме у последње време велика пажња је посвећена хеуристичким и метахеуристичким техникама чијом употребом се генеришу решења блиска оптималном.

Још један од могућих приступа решавању назначених проблема је да се најпре спроведе линеаризација а да се затим користи линеарно програмирање како би се дошло до решења, без обзира на целобројну природу променљивих. Познато је да приликом линеарне апроксимације нелинеарних функција величина проблема значајно расте. Добијена решења су, са друге стране, најчешће нецелобројна те се морају заокружити. Овакав поступак, очигледно, узрокује

значајан проблем чему треба додати и чињеницу да нема никаквих гаранција да је добијено нецелобројно решење близу правог оптимума.

Алгоритмима случајног претраживања покушале су се превазићи мане еnumerативних шема. У овој дисертацији оптималне вредности појединих критеријумских функција, f_i^o , добијају се генетским алгоритмима. Генетски алгоритми [Ho175, Go189], као што је већ речено, представља технику претраживања која се користи за решавање комплексних комбинаторних проблема оптимизације. У случају генетских алгоритама, за разлику од традиционалних техника претраживања, претрага се извршава паралелно унутар популације решења. Најпре се генеришу различита решења посматраног проблема минимизације (или максимизације). У следећем кораку се врши евалуација генерисаних решења односно израчунавају се вредности критеријумских функција за та решења. Нека од „добрих” решења, са бољом вредношћу фитнес функције, се узимају у даље разматрање, док се остала решења елиминишу из даљег разматрања. Изабрана решења пролазе кроз фазе репродукције, укрштања и мутације након чега је добијена нова генерација решења и тако редом из генерације у генерацију. У трећем поглављу објашњено је услед чега се очекује да свака наредна генерација буде боља од претходне. Са извршавањем алгоритма се престаје када се задовољи услов заустављања (3.3.2.6) уз усвајање најбољег генерисаног решења током свих генерација за коначно решење посматраног проблема.

4.4.1. Кодирање бинарног низа потенцијалних решења

Хромозом који репрезентује појединачно решење посматраног проблема садржи у себи потпуну инфомацију о том решењу. У овој дисертацији су коришћени бинарни стрингови за представљање решења, при чему сваки бит у стрингу даје информацију о лоцирању хаба у специфичном чвору. Другим речима, уколико је на одређеном месту у бинарном запису решења јединица то

означава да је хаб успостављен управо у чвору означеном индексом тог члана бинарног низа. Слика 4.5 илуструје два примера бинарних стрингова дужине 16 (у нумеричком примеру који следи на крају овог поглавља дата је управо мрежа са 16 чворова). Први стринг представља решење са успостављена четири хаба који су лоцирани у чворовима 3, 5, 11 и 12. Други стринг представља решење са успостављена три хаба који су лоцирани у чворовима 2, 6 и 16.

0010100000110000

0100010000000001

Слика 4.5. Два бинарна стринга

4.4.2. Генерисање иницијалне популације

Почетна популација је, сходно препорукама датим у трећем поглављу, генерисана на случајан начин како би се добио што разноврснији генетски материјал. Најпре се на случајан начин генерише број хабова на мрежи (број јединица у стрингу) за сваки појединачни бинарни стринг, односно потенцијално решење проблема. Број хабова H у сваком стрингу мора бити у интервалу $0 < H \leq n$. У следећем кораку случајно се генеришу локације хабова на мрежи (положаји јединица унутар генерисаних бинарних стрингова). Вероватноћа да ће чвор i бити селектован за локацију хаба износи:

$$P_i = \frac{U_i}{\sum_j U_j} \quad (4.31)$$

где је:

$$U_i = O_i + D_i$$

O_i - укупан број пошиљака упућен из чвора i

D_i - укупан број пошиљака које треба испоручити на подручју чвора i

У формули (4.31) U_i представља укупан број „операција” (прикупљених и пошилака за испоруку, односно пошилака у концентрацији и дифузији) у чвору i . Што је већи укупан број операција у посматраном чвору то је већа вероватноћа да ће тај чвор бити изабран за локацију хаба. Оваква политика избора локација хабова је сасвим логична и има своје утемељење у пракси, јер су укупни транспортни трошкови мањи када су хабови у чворовима у којима је велика концентрација корисника односно пошилака. На тај начин добијају се квалитетније јединке почетне генерације без великог угрожавања разноврстности генетског материјала, јер сваки чвор има шансу да хаб буде лоциран управо у њему.

Када се знају локације хабова приступа се алоцирању чворова (који нису хабови) њима надређеним хабовима. Алоцирање чворова хабовима може се извести на више различитих начина. Најједноставнији и често најефикаснији начин је придруживање чворова најближем хабу. Управо на тај начин су у предложеном моделу алоцирани чворови хабовима, јер не постоје оправдани разлози за повећање транспортних трошкова повезивањем чвора на удаљеније хабове. Повезивање чворова са удаљенијим хабовима би имало смисла у случају постојања хабова са ограниченим капацитетима, што није случај у овој дисертацији. Другим речима, за сваки чвор који није хаб (нуле у бинарном низу) тражи се у матрици међурастојања најближи чвор у коме је лоциран хаб (јединице у бинарном низу) и њему се придружује. На тај начин добија се скуп хабова са подскупом (који може бити и празан) њима придружених чворова.

4.4.3. Селекција

Пре селекције родитеља који ће учествовати у стварању потомства најпре се копирају најбољи хромозоми директно у наредну популацију (уобичајено је да се копира 10% до 20% најбоље ранжираних јединки). На тај начин обезбеђује се опстанак генетског материјала оних јединки које су се показале најбоље прилагођеним, о чему је било речи у претходном поглављу. Остали хромозоми, из

целокупне популације родитеља, се селекују на случајан начин са различитим вероватноћама. Вероватноћа да ће хромозом i бити селекуван за репродукцију (у случају проблема који се максимизира) је једнака:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_j f_j} \quad (4.32)$$

где је:

f_i - вредност фитнес функције i -тог хромозома

Приликом селекције биће коришћена добро позната селекција рангирањем (линеарно) где се фитнес функција добија на основу позиције (ранга) јединке у популацији. Разлог за избор оваког оператора селекције је спречавање преурањене конвергенције, као и губитка генетског материјала. Из (4.32) се јасно види да што је већа вредност фитнес функције одређене јединке то је већа вероватноћа да ће иста бити изабрана за родитеља.

4.4.4. Укрштање

Укрштање је оператор генетских алгоритама који из популације родитеља ствара популацију нове генерације потомака. Овај оператор селекује гене из генетског низа једног од родитеља и од њих ствара потомке. Између више могућих типова оператора укрштања, који су представљени у трећем поглављу, изабрано је униформно укрштање код кога се сваки појединачни ген на случајан начин копира, од стране првог или другог родитеља, у стринг потомка. У овој дисертацији је одлучено да вероватноћа укрштања износи 0,9. У првој генерацији све јединке су генерисане као допустиве. Допустивост решења у наредним генерацијама се обезбеђује на начин да једино потомци који имају бар на једној позицији у стрингу јединицу (бар један хаб на мрежи) улазе у даљу анализу. Уколико се деси да се генерише потомак који није допустив, тј. нема ни један хаб на мрежи, тада се уместо таквог потомка оставља родитељ чијим изменама је он

настао, а који је сигурно допустив. На овај начин се из генерације у генерацију одржава допустивост генерисаних решења.

4.4.5. Мутација

Делови хромозома после извршеног оператора укрштања подлежу оператору мутације. У случају бинарног кодирања, какво је предложено у овој дисертацији, мутација се испољава променом вредности 1 у вредност 0 или обрнуто. Вероватноћа мутације мора бити мала да се тражење решења не би претворило у случајну претрагу. Најбоље резултате у експериментима дало је коришћење вероватноће мутације од 0,0075. Разлог коришћења оператора мутације је, као што је речено раније, спречавање неповратног губитка генетског материјала на појединим тачкама дуж генетског низа јединки. Обзиром да предложени модел, применом оператора мутације, није показао појаву тзв. залеђених битова, мутација није повећавана ни за једну позицију у бинарном низу, тј. није имплементирана заштита од ове појаве како је то предложено у [Sta07]. Након примене оператора укрштања и мутације могуће је у наставку извршавања алгоритма израчунати вредност фитнес функције за свако генерисано решење.

4.5. Вишекритеријумски приступ пројектовању мреже за пренос експрес пошиљака применом генетских алгоритама

Приликом програмирања описаног модела потребно је осим основних параметара генетских алгоритама дефинисати и пратити још неке, додатне, параметре како би се пратило извршавање програма и оценио квалитет предложеног решења. Приликом израде ове дисертације аутор се определио да не

користи готова софтверска решења којих има у неким комерцијалним софтверским пакетима већ да за решавања проблем креира потпуно нов програм. Разлог за такво опредељење, осим професионалног изазова, лежи у специфичности решаваног проблема који је захтевао специјална програмска решења којих нема у стандардној понуди алата софтверских пакета (C++, MATLAB, итд.).

Најпре је у циљу мерења времена извршавања програма потребно дефинисати променљиву која ће меморисати CPU (*Central Processing Unit*) време од тренутка стартовања програма до тренутка његовог завршетка. Потом се дефинишу или читавају из спољних фајлова променљиве које се могу мењати од једног до другог експеримента:

- број родитеља,
- број генерација или услов заустављања програма,
- број чворова на мрежи и евентуално максимални број хабова,
- количине пошиљака,
- међурастојања чворова,
- јединични трошкови превоза за сваки тип возила,
- капацитети сваког типа возила,
- времена путовања између чворова за сваки тип возила,
- варијабилни трошкови изградње и сортирања у хабовима,
- фиксни трошкови експлоатације, итд.

Овакав приступ пружа могућност да се једноставним изменама исти програм користи за решавање широког спектра сродних проблема.

Програм почиње генерисањем почетне генерације решења уз израчунавање фитнес функција за сваку јединку (за сваку генерисану мрежу) у зависности од критеријумске функције. Уколико се посматра критеријум укупног профита $f_1(\vec{y})$ тада се, пре израчунавања транспортних трошкова, мора израчунати број возила који због капацитивних захтева саобраћа између чворова и хабова, као и између хабова међусобно. Време које је на располагању корисницима се користи у израчунавању две фитнес функције $f_2(\vec{y})$ и $f_3(\vec{y})$. Како би се добиле што боље

перформансе транспортне мреже предложена је добро позната политика организације унутрашњег превоза (*Just in time*). Приликом одређивања реда вожње водило се рачуна да возила стижу у хабове сукцесивно са временским разликама које зависе од капацитета прераде самог хаба и количине пошиљака које је претходно возило довезло. Укупно време које је на располагању хабовима за комплетну манипулацију свим пошиљкама је стандардизовано и исто на читавој мрежи, што не мора да буде увек случај. Ово време у великој мери утиче на временске параметре преноса пошиљака, а самим тим и квалитет који се пружа корисницима. У циљу што равномерније дистрибуције квалитета услуге пружене корисницима установљен је и принцип да у хабове најпре стижу возила из чворова који су најмање временски удаљени. Уколико се жели остваривање максималног могућег квалитета услуга корисницима било би неопходно да у хаб најпре стижу возила из чворова са најмањим полазним количинама пошиљака. Међутим, ово би могло да има за последицу да поједини удаљени чворови остану неопслужени.

Програм који је развијен за решавање описаног проблема пројектовања мреже за пренос експрес пошиљака може се поједностављено (величина програма се мери са више стотина редова) представити псеудокодом на следећи начин¹:

- 1: Постави $N \leftarrow$ број родитеља, $G \leftarrow$ број генерација
- 2: Генерисати тежине за израчунавање L_p функције
- 3: **for** $i = 1$ **to** N
- 4: На случајан начин одредити број хабова (H)
- 5: **for** $j = 1$ **to** H
- 6: Изабрати локацију хаба на основу вероватноће дате изразом (3.1)
- 7: **end for**
- 8: **if** родитељ i задовољава критеријум расположивог времена за предају **then**

¹ Представљени псеудокод је дат за програм који је решавао проблем пројектовања мреже за пренос експрес пошиљака применом генетских алгоритама и компромисног програмирања које је укључивало сва три предложена критеријума. У случајевима када је укључиван један или два критеријума програм је нешто једноставнији или исти (у рачунању критеријумске функције посматраног решења тежина критеријума који се не узима(ју) у обзир се постави на 0).

```
9:           Израчунати трошкове превоза од чворова до хабова и назад
10:  else
11:           Пенализуј родитеља  $i$  по посматраним критеријумима
12:  end if
13:  Израчунати  $L_p$  вредност родитеља  $i$ 
14:end for
15:for  $i = 2$  to  $G$ 
16:  Рангирати родитеље у растући поредак у односу на вредност  $L_p$ 
17:  Извлачење родитеља
18:  Са вероватноћом 0.9 родитељи размењују материјал, односно са
    вероватноћом 0,1 родитељи ће прећи у следећу генерацију
19:  Урадити мутацију 0,75% гена популације
20:  Извредновати квалитет решења свих гена
21:  Уколико је постигнуто ново најбоље познато решење сачувати га
22:end for
```

Осим израчунавања критеријумских функција и проналажења најбољег решења програм који је креиран генерише или даје могућност генерисања и читавог низа других, не мање важних, параметара транспортне мреже која се пројектује:

- крајња времена за прикупљање пошиљака у сваком од чворова без обзира да ли је у њима смештен хаб или није – радно време за дату услугу;
- времена поласка и пристизања возила из сваког чвора и за сваки хаб – општи ред вожње;
- број ангажованих возила (возни парк) у сваком чвору и хабу као и њихов тип (мања или већа);
- коефицијент искоришћености возног парка;

- парцијалне показатеље профитабилности и квалитета опслуге по чворовима и хабовима,
- капацитет прераде (укупни и часовни) за сваки хаб који дефинише и технолошку опрему сортирања о којој је било речи у другом поглављу;
- број чворова који су укључени у систем превоза, итд.

4.6. Експериментални резултати

Приликом израде ове дисертације извршено је више стотина рачунарских експеримената. Експериментисање се односило, како на укључивање једног или више предложених критеријума у разматрање, тако и на подешавање параметара генетског алгорита [Џур14а]. Осим тога, разматрањем мреже за пренос експрес поштиљака у Србији и мреже за пренос логистичких поштиљака у Турској настало је више модификација основног програма за решавање хаб локацијског проблема. Мрежа за пренос експрес поштиљака у Србији која је анализирана се састоји од 16 чворова (слика 4.7.). Број чворова је усвојен на основу тренутне организације преноса поштиљака једне од компанија које се баве експрес преносом у Србији (*CityExpress*). Статистички подаци о токовима поштиљака у транспортној мрежи, временима путовања, капацитетима возила, трошковима превоза и прераде поштиљака, добијени од менаџмента ове компаније, су узети као улазни подаци развијеног програма. Процес сакупљања поштиљака се заснива на чињеници да свих 16 чворова имају одређени гарантовани временски интервал за сакупљање поштиљака. Прикупљање поштиљака у свим чворовима почиње истовремено – у 8:00 сати сваког радног дана. Крај сакупљања се разликује од чвора до чвора и израчунава се на основу релације (4.17). Најкаснији тренутак за сакупљање поштиљака, L , који се нуди као стандардна услуга је 18:45, за све чворове којима није одређено краће време. Све сакупљене поштиљке се испоручују чвору на чијој територији се врши испорука најкасније до 8:00 сати следећег радног дана (тренутна пракса код оператора експрес преноса у Србији). Чињеница да су

пошиљке пристигле у одредишни чвор до 8:00 не говори ништа о времену њиховог уручења примаоцу, које зависи од организације испоруке у самом чвору која није била предмет проучавања ове дисертације. Време које је на располагању пошиљаоцима за предају пошиљака зависи од укупног броја хабова, њихове локације, као и начина алокације чворова хабовима. Другим речима, свако решење се може окарактерисати одговарајућим скупом „временских прозора” који су на располагању пошиљаоцима. Тако је у табели 4.1 дат скуп „временских прозора” за случај транспортне мреже илустроване сликом 4.11., уз напомену да су се приликом израчунавања крајњих тренутака за предају пошиљака добијене вредности заокруживале. На пример ако је израчунато да је у неком чвору могуће предати пошиљку најкасније до 16:53 та вредност је заокружена на 16:45 (заокружује се на пун сат и целобројни умножак од 15 минута).

Табела 4.1. Чворови и њима додељени временски прозори за сакупљање пошиљака у случају мреже илустроване сликом 4.11.

Редни број чвора	Назив града	Заокружени временски прозори ($L=18:45$)
1	Београд	[8:00 , 20:00]
2	Суботица	[8:00 , 17:30]
3	Чачак	[8:00 , 17:45]
4	Јагодина	[8:00 , 19:30]
5	Пожаревац	[8:00 , 18:15]
6	Ниш	[8:00 , 18:15]
7	Зрењанин	[8:00 , 18:45]
8	Бор	[8:00 , 18:00]
9	Владичин Хан	[8:00 , 17:30]
10	Ужице	[8:00 , 17:00]
11	Ваљево	[8:00 , 17:15]
12	Шабац	[8:00 , 16:30]
13	Крушевац	[8:00 , 18:45]
14	Нови Пазар	[8:00 , 14:45]
15	Нови Сад	[8:00 , 19:00]
16	Крагујевац	[8:00 , 19:00]

Програм који је омогућио извршавање експеримената написан је у програмском језику MATLAB. Експерименти су вршени на Pentium IV рачунару

2.2 GHz, са 1 GB RAM меморије (на оперативном систему Windows XP). Времена рада рачунара ни у најсложенијим експериментима (мрежа са 81 чвором, три критеријума, варирање вредности свих тежина) нису прелазила 2 сата. Како је решавани проблем стратешког карактера, што подразумева довољно времена за његово решавање, времена рада рачунара нису дата ни за један изведени експеримент. Сви улазни подаци су на захтев компаније *CityExpress* нормализовани како би се сачувала њихова поверљивост.

4.6.1. Једнокритеријумски приступ

На почетку овог поглавља представљени су критеријуми по којима ће се вредновати потенцијална решења описаног хаб локацијског проблема. У дисертацији је предложен вишекритеријумски приступ пројектовању транспортних мрежа уз примену еволуционог рачунарства, али је први корак приликом експериментисања у пројектовању транспортних мрежа заснован на задовољењу искључиво једног од разматраних критеријума.

У наставку ће бити представљени експериментални резултати настали максимизацијом сваког од три критеријума понаособ, о којима је било речи у делу 4.1. Јасно је да ће се решења проблема, у зависности од посматраног критеријума, значајно разликовати.

4.6.1.1. Максимизација профита

Најпре ће бити представљени експериментални резултати засновани на максимизацији укупног профита који остварује мрежа за пренос пошиљака. Број генерација је вариран између 20 и 1000 али треба истаћи да је, у највећем броју експеримената, алгоритам конвергирао већ након 100 генерација [Чуп14].

Као и у већини реалних проблема када треба донети комплексне пословне одлуке, улазни подаци некада нису прецизно дати или нису доступне све потребне информације. Из тог разлога поједине параметре дефинисаног математичког модела треба узети са резервом, односно извршити анализу резултата узимајући различите вредности посматраног параметра у обзир. У посматраном проблему процењено је да постоји неизвесност везана за процењене трошкове изградње и експлоатације хабова у чворовима. Процењени трошкови изградње и експлоатације хабова (коришћени у изразу 4.13) кориговани су множењем са параметром h , чије се вредности налазе у интервалу $[0, 2]$. На пример, множење процењених трошкова са 1,5 значи да би трошкови успостављања и експлоатације хаба могли бити 50% већи од очекиваних. На тај начин је могуће спровести анализу осетљивости у односу на немогућност тачне процене трошкова изградње и нарочито експлоатације у дужем временском периоду. У свакој генерацији је генерисано по 80 јединки. Укупан број генерација у сваком експерименту износио је 100.

У свим експериментима коришћена су два типа возила, мање са запремином товарног простора 42m^3 и транспортним трошковима по јединичном растојању $c_1 = 0.39\text{€/km}$; и веће са запремином товарног простора 86 m^3 и транспортним трошковима по јединичном растојању $c_2 = 0.61\text{€/km}$ [Ћур14а].

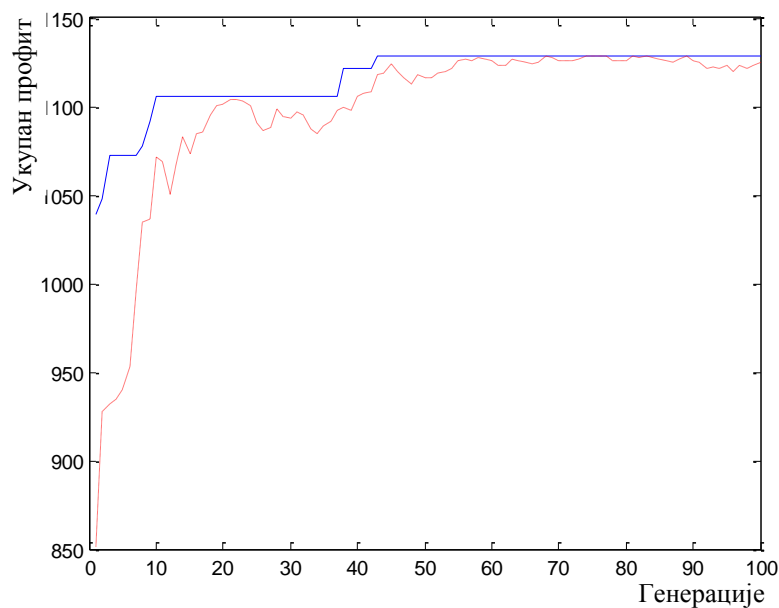
У табели 2 дати су резултати једнокритеријумске анализе проблема са максимизацијом профита пројектоване транспортне мреже. Максимални очекивани профит износи 1078.94 новчаних јединица на дневном нивоу (за случај неизмењених процењених трошкова изградње и експлоатације хабова – $h = 1$).

Као што се може видети у табели 4.2. укупан број хабова као и њихове локације директно зависе од вредности параметра h . Што је већа вредност h то постоји мање хабова у транспортној мрежи. Такође се може видети да за изразито високу вредност параметра h локација јединог хаба уместо Београда постаје Јагодина. Разлог за то лежи у чињеници да је приликом рачунања специфичних трошкова за сваку потенцијалну локацију хаба, између осталог, велики утицај имала цена грађевинског земљишта која је у Београду највећа.

Табела 4.2. Резултати добијени у случају максимизације укупног профита транспортне мреже

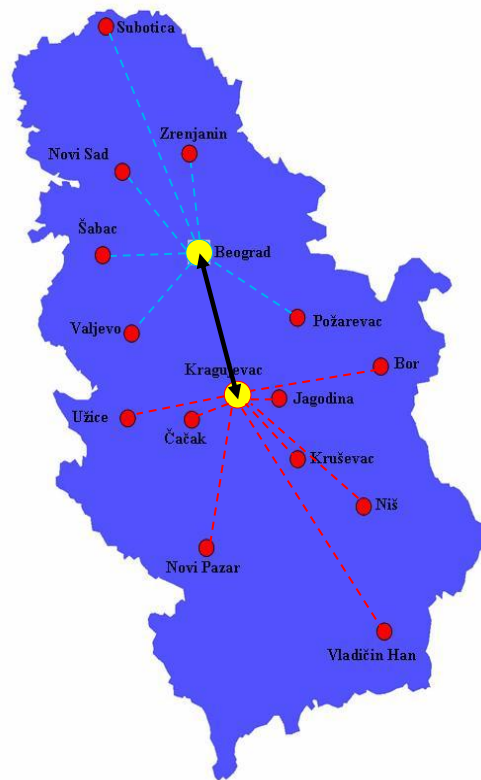
h	Укупан профит	Локација хабова
0	1180.92	Београд, Чачак, Јагодина
0.25	1153.25	Београд, Крагујевац
0.5	1128.28	Београд, Крагујевац
0.75	1103.31	Београд, Крагујевац
1	1078.94	Београд
1.25	1057.03	Београд
1.5	1036.79	Јагодина
1.75	1017.43	Јагодина
2	998.08	Јагодина

Слика 4.6. илуструје вредности укупног профита (фитнес функције) кроз све генерације када је $h = 0.5$.



Слика 4.6. Укупан профит кроз све генерације ($h = 0.5$)

Пуна линија репрезентује вредности најбољих решења у свакој генерацији, док испрекидана линија показује средњу вредност укупног профита свих решења у генерацији [Џур14а]. Промене фитнес функције (у овом случају укупног профита) кроз генерације су биле веома сличне у свим осталим експериментима, без обзира на подешавања вредности параметара модела.



Слика 4.7. Локације хабова и алокација чворова хабовима – максимизација укупног профита ($h = 0.5$)

На претходној слици, као и на свим наредним које буду приказивале локације хабова и алокацију чворова, хабови су представљени пуним жутим круговима, док су везе између њих дате пуним линијама. Испрекиданим линијама приказане су везе између хабова и њима придружених чворова који су обележени пуним црвеним кружићима.

4.6.1.2. Максимизација квалитета услуге (времена расположивог пошиљацима)

Осим максимизирања укупног профита извршена је и максимизација просечног временског прозора за сакупљање пошиљака $f_2(\vec{l})$. Ова мера квалитета услуге зависи од више фактора: организације превоза, дужине транспортних путева, брзине превозних средстава, итд. Временски прозор који је

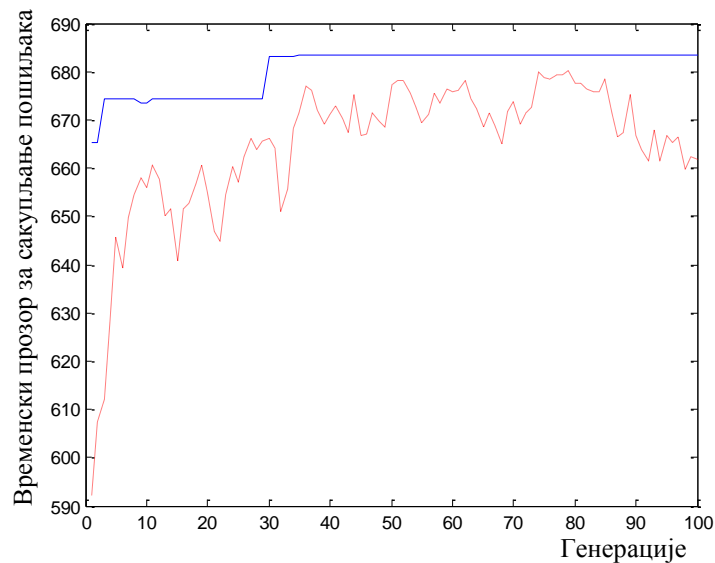
на располагању пошиљаоцима за предају пошиљака, између осталог, зависи и од времена које је потребно хабовима да изврше прераду односно сортирање прикупљених пошиљака. Технологија описана у другом поглављу има за циљ да време прераде у хабовима сведе на минимум, али је тај процес и поред тога често дуготрајан и непоуздан. У извршеним експериментима време дато хабовима за прераду пошиљака је варирано у опсегу од 4 до 8 сати. Осим тога дат је још 1 сат за претовар закључака са већ сортираним пошиљкама које су пристигле из осталих хабова. Овакав приступ произилази из претпоставке да се сортирање пошиљака у потпуности завршава у полазном хабу, што није увек случај. Алтернативно, могуће је у полазним хабовима сортирати само пошиљке адресиране на чворове повезане са посматраним хабом. Остале пошиљке би се тада транспортовале несортиране ка осталим хабовима. Приликом приспећа тако формираних закључака у одредишном хабу би се вршило њихово распакивање и сортирање пошиљака према одредишним чворовима који су повезани са тим хабом. У овој дисертацији за све експерименте је усвојено да је време прераде пошиљака у хабу, без обзира на његову величину, једнако и износи 8 сати.

Најбоље пронађено решење када се максимизирао просечни временски прозор за сакупљање пошиљака, $f_2(\vec{l})$, износи 683,35 минута. Локације хабова у најбољем решењу дате су у табели 4.3.

Табела 4.3. Резултати добијени у случају максимизације просечног временског прозора за сакупљање пошиљака

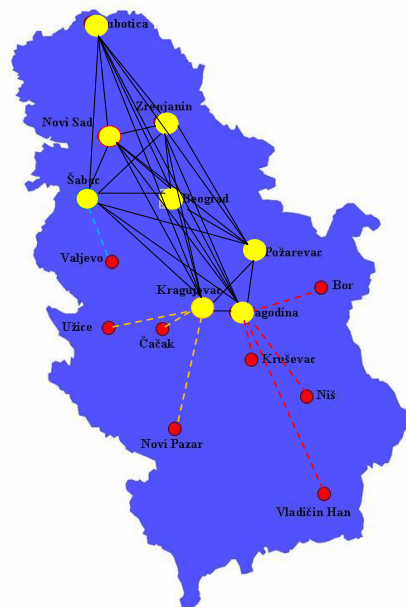
Најбоља вредност просечног временског прозора за сакупљање пошиљака (min)	Локације хабова
683,35	1,2,4,5,7,12,15,16

На слици 4.8. приказане су вредности просечног временског прозора за сакупљање пошиљака (фитнес функције) кроз генерације.



Слика 4.8. Просечне вредности временског прозора за сакупљање пошилака кроз све генерације

Као и у претходном примеру, пуна линија репрезентује вредности најбољих решења у свакој генерацији, док испрекидана линија показује средњу вредност фитнес функција свих решења у генерацији. Слика 4.9 илуструје локације хабова и алокацију чворова хабовима најбољег пронађеног решења у случају максимизације просечног временског прозора за сакупљање пошилака.



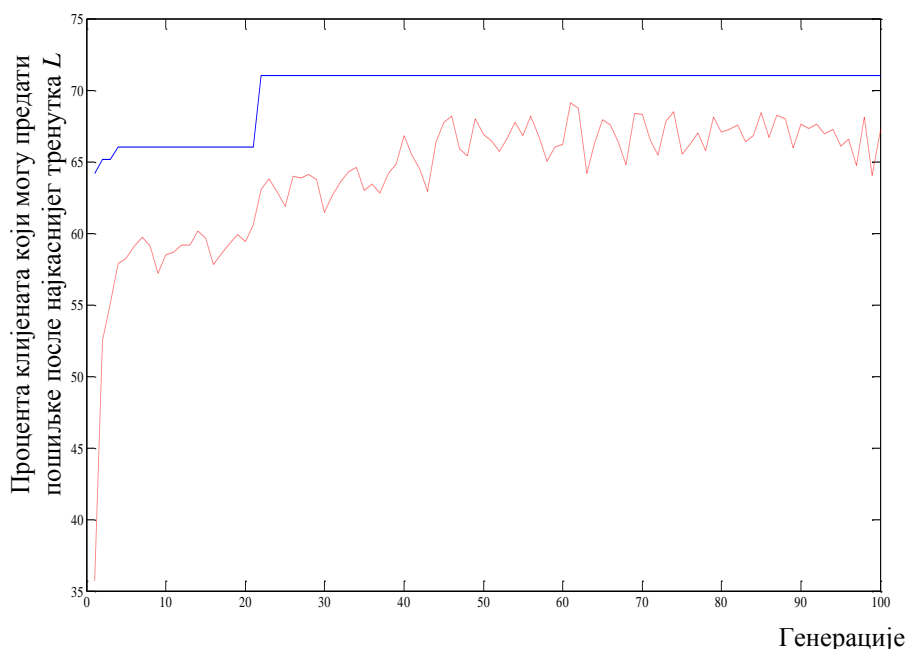
Слика 4.9. Локације хабова и алокација чворова хабовима – максимизација просечног временског прозора за сакупљање пошилака

4.6.1.3. Максимизација процента клијената којима је на располагању услуга продуженог радног времена

На крају је извршена и максимизација процента клијената који могу предати своје пошиљке на пренос после најкаснијег тренутка L , $f_3(\vec{y})$. Локације хабова најбољег пронађеног решења као и проценат клијената којима је понуђен додатни квалитет услуге дати су у табели 4.4.

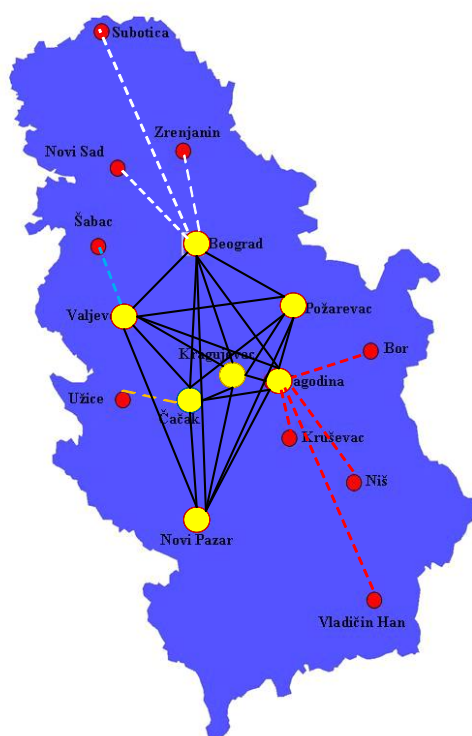
Табела 4.4. Резултати добијени у случају максимизације процента клијената који могу предати своје пошиљке на пренос после најкаснијег тренутка L , $f_3(\vec{y})$

Процент клијената који могу предати своје пошиљке на пренос после 18:45	Локације хабова
71,01	1,3,4,8,11,14,16



Слика 4.10. Промене процента клијената који могу предати пошиљке после најкаснијег тренутка L , $f_3(\vec{y})$, кроз све генерације.

Слика 4.10. приказује промене (кроз генерације) процента клијената који могу предати своје пошиљке на пренос после најкаснијег тренутка L , $f_3(\bar{y})$. Као и у претходним случајевима, пуна линија репрезентује вредности најбољих решења у свакој генерацији, док испрекидана линија показује средњу вредност фитнес функција свих решења у генерацији. Слика 4.11 илуструје локације хабова и алокацију чворова хабовима најбољег пронађеног решења у случају максимизације процента клијената који могу предати своје пошиљке на пренос после најкаснијег тренутка L .



Слика 4.11. Локације хабова и алокација чворова хабовима – максимизација процента клијената који могу предати пошиљке после најкаснијег тренутка L

4.6.2. Вишекритеријумски приступ

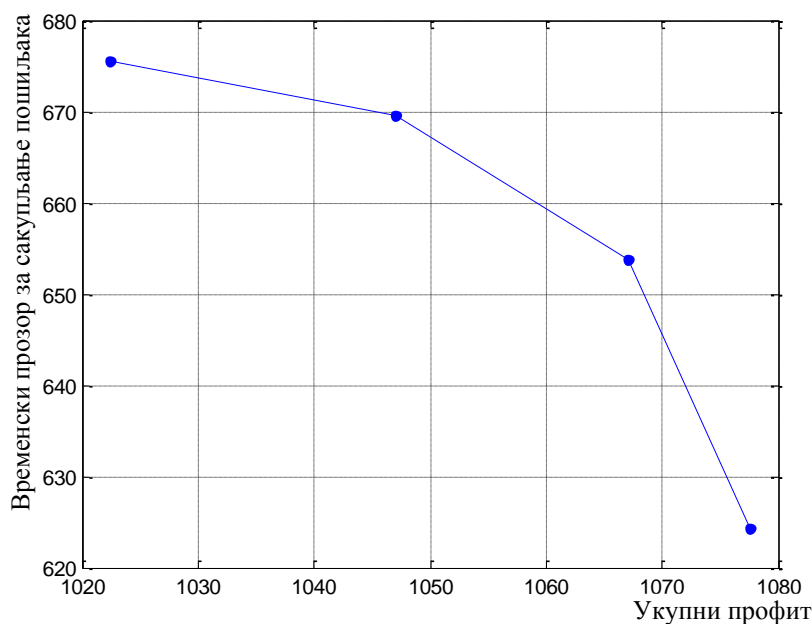
Приликом вишекритеријумског решавања проблема (4.21)-(4.28) компромисним програмирањем најпре је потребно одредити идеалну тачку. У ту

сврху су решавана три једнокритеријумска проблема одређивања броја и локација хабова са следећим критеријумским функцијама: максимизација укупног профита, максимизација просечног временског прозора за сакупљање пошиљака и максимизација процента клијената који могу предати пошиљке и после најкаснијег тренутка L .

У следећем кораку, представљеним генетским алгоритмом, врши се минимизација блискости посматраног решења идеалном (4.30). Тежине критеријума су вариране у интервалу $[0, 1]$ са кораком 0,1. Са w_1, w_2, w_3 су означене тежине сва три критеријума респективно. Проблем одређивања броја и локације хабова је решаван више пута за различите парове критеријума као и узимајући у обзир сва три предложена критеријума. На овај начин добијена су бројна решења која су послужила за даље разматрање. Следећи корак представља даља анализа искључиво Парето оптималних (недоминираних, неинфериорних) решења. На овај начин се за сваки пар или тројку тежина критеријума добија одговарајући скуп Парето оптималних решења. У табели 4.5. дата су Парето оптимална решења у случају посматрања прва два критеријума (максимизације укупног профита и максимизације просечног временског прозора за сакупљање пошиљака), чије су тежине w_1 и w_2 комбиноване на различите начине. Одговарајући Парето фронт ($h=1$) приказан је на слици 4.12.

Табела 4.5. Резултати добијени у случају двокритеријумске функције ($f_1(\vec{x})$ и $f_2(\vec{l})$)

Укупан профит $f_1(\vec{x})$	$f_2(\vec{l})$	w_1	w_2	Локације хабова
1077.54	624.33	0.9	0.1	1,4
1077.54	624.33	0.8	0.2	1,4
1067.03	653.71	0.7	0.3	1,4,16
1067.03	653.71	0.6	0.4	1,4,16
1067.03	653.71	0.5	0.5	1,4,16
1047.02	669.56	0.4	0.6	1,4,15,16
1047.02	669.56	0.3	0.7	1,4,15,16
1047.02	669.56	0.2	0.8	1,4,15,16
1022.38	675.47	0.1	0.9	1,4,12,15,16



Слика 4.12. Парето фронт у случају дво критеријумске анализе (максимизације укупног профита и максимизације просечног временског прозора за сакупљање поштиљака).

Са слике 4.12 се, као и из табеле 4.5, може видети да је за 9 различитих комбинација вредности тежина критеријума добијено свега 4 недоминирана решења, чијим спајањем је добијен Парето фронт.

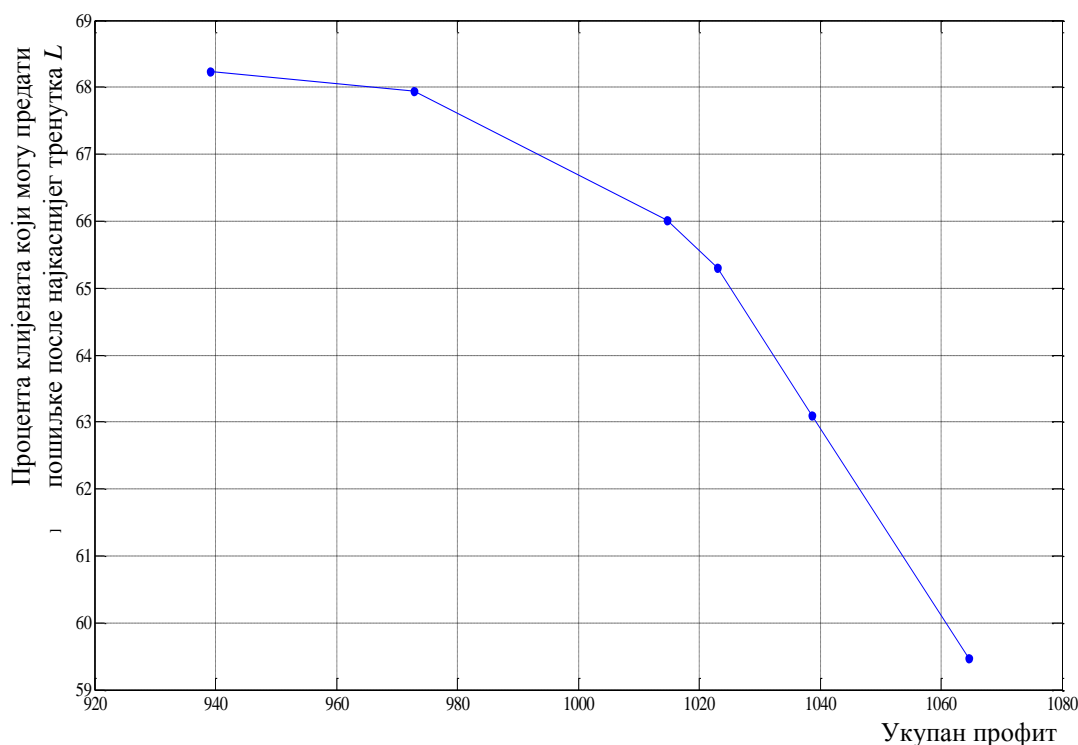
На сличан начин могуће је посматрати и преостале две комбинације критеријума. Обзиром да је поступак потпуно исти, као и алгоритам, због ограниченог простора, одлучено је да се не представе резултати свих експеримената. Приликом варирања тежина првог и трећег критеријума, w_1, w_3 (укупан профит и проценат клијената који могу предати своје поштиљке на пренос после најкаснијег тренутка L) добијени су интересантни резултати. Приликом експеримената који су понављани по 10 пута за исти пар вредности тежина критеријума добијано је, са различитим учесталостима, више од једног Парето оптималног решења (за случај $w_1 = 0,3; w_3 = 0,7$, чак 3 Парето оптимална решења) што је представљено у табели 4.6.

Табела 4.6. Резултати добијени у случају двокритеријумске функције ($f_1(\vec{x})$ и $f_3(\vec{y})$)

w_1	w_3	Укупан профит $f_1(\vec{x})$	Процент клијената који могу предати своје пошиљке на пренос после најкаснијег тренутка L $f_3(\vec{y})$	Локације хабова	Број понављања добијеног решења у 10 експеримената
0.9	0.1	1064.62	59.47	1,13,16	10
0.8	0.2	1064.62	59.47	1,13,16	9
0.7	0.3	1064.62	59.47	1,13,16	5
		1038.62	63.10	1,4,11,14	5
0.6	0.4	1022.94	65.30	1,5,11,13,16	7
0.5	0.5	1022.94	65.30	1,5,11,13,16	4
		1014.65	66.02	1,2,4,11,16	5
0.4	0.6	1022.94	65.30	1,5,11,13,16	2
		1014.65	66.02	1,2,4,11,16	8
0.3	0.7	1014.65	66.02	1,2,4,11,16	3
		972.79	67.94	2,5,11,13,15,16	2
		964.03	71.01	1,3,4,5,11,14,16	5
0.2	0.8	972.79	67.94	2,5,11,13,15,16	2
		964.03	71.01	1,3,4,5,11,14,16	6
0.1	0.9	972.79	67.94	2,5,11,13,15,16	1
		964.03	71.01	1,3,4,5,11,14,16	8

Из претходне табеле се може видети да програм, за разлику од осталих комбинација тежина критеријума, у случају комбиновања тежина првог и трећег критеријума не налази увек Парето оптимално решење, али је проценат успешности у распону од 70 до 100%.

Слика 4.13. илуструје Парето фронт ($h=1$) за случај посматрања првог и трећег критеријума где је добијено укупно 6 недоминираних решења.



Слика 4.13. Парето фронт у случају дво критеријумске анализе (максимизације укупног профита и процента клијената који могу предати своје пошиљке на пренос после најкаснијег тренутка $L= 18:45$).

Као што може да се види са слика 4.12. и 4.13. ни једна од тачака (решења) које се налазе на Парето фронту није стриктно доминирана од било које друге тачке, односно решења. Ова решења су Парето оптимална јер не постоји ни једно друго решење које је боље по свим критеријумима. Варирање вредности тежина критеријума омогућава генерисање великог броја решења која доносиоцима одлука олакшавају разумевање проблема и избор коначног решења.

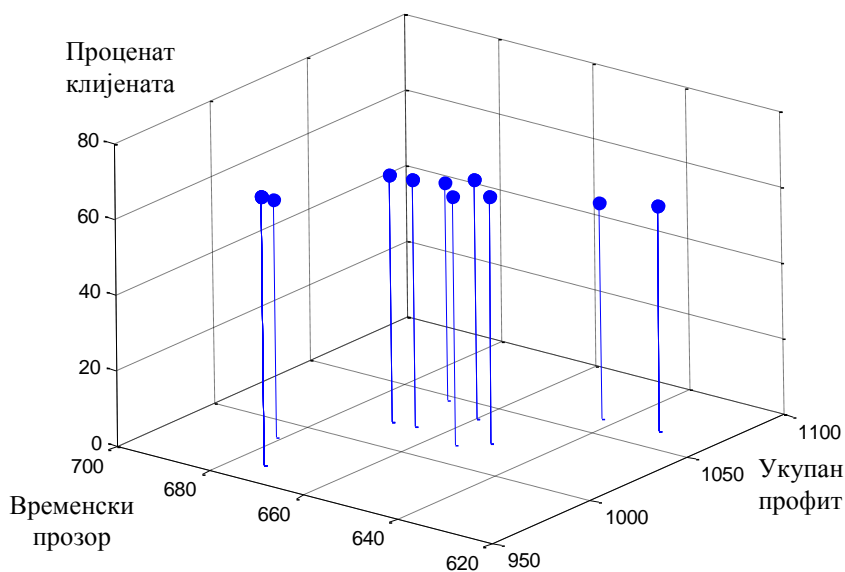
На крају, извршени су и експерименти са укључивањем све три критеријумске функције: максимизација укупног профита, максимизација просечног временског прозора за сакупљање пошиљака и максимизација процента клијената који могу предати пошиљке и после најкаснијег тренутка L . Добијени резултати су приказани у табели 4.7. и на слици 4.14.

Табела 4.7. Резултати добијени у случају трокритеријумске функције ($f_1(\bar{x})$, $f_2(\bar{l})$ и $f_3(\bar{y})$)

Укупан профит $f_1(\bar{x})$	Просечни временски прозор за сакупљање пошил. (min) $f_2(\bar{l})$	Процент клијената који могу предати своје пошилке на пренос после најкаснијег тренутка 18:45 $f_3(\bar{y})$	w_1	w_2	w_3	Локације хабова
964.03	674.39	71.01	0.1	0.1	0.8	1,3,4,5,11,14,16
964.03	674.39	71.01	0.1	0.2	0.7	1,3,4,5,11,14,16
964.03	674.39	71.01	0.1	0.3	0.6	1,3,4,5,11,14,16
964.03	674.39	71.01	0.1	0.4	0.5	1,3,4,5,11,14,16
964.03	674.39	71.01	0.1	0.5	0.4	1,3,4,5,11,14,16
964.03	674.39	71.01	0.1	0.6	0.3	1,3,4,5,11,14,16
964.03	674.39	71.01	0.1	0.7	0.2	1,3,4,5,11,14,16
987.14	681.33	62.99	0.1	0.8	0.1	1,2,4,12,15,16
964.03	674.39	71.01	0.2	0.1	0.7	1,3,4,5,11,14,16
964.03	674.39	71.01	0.2	0.2	0.6	1,3,4,5,11,14,16
964.03	674.39	71.01	0.2	0.3	0.5	1,3,4,5,11,14,16
964.03	674.39	71.01	0.2	0.4	0.4	1,3,4,5,11,14,16
964.03	674.39	71.01	0.2	0.5	0.3	1,3,4,5,11,14,16
1020.34	670.36	65.29	0.2	0.6	0.2	1,4,11,14,16
1020.34	670.36	65.29	0.2	0.7	0.1	1,4,11,14,16
964.03	674.39	71.01	0.3	0.1	0.6	1,3,4,5,11,14,16
964.03	674.39	71.01	0.3	0.2	0.5	1,3,4,5,11,14,16
964.03	674.39	71.01	0.3	0.3	0.4	1,3,4,5,11,14,16
1020.34	670.36	65.29	0.3	0.4	0.3	1,4,11,14,16
1020.34	670.36	65.29	0.3	0.5	0.2	1,4,11,14,16
1038.62	659.94	63.10	0.3	0.6	0.1	1,4,11,14
964.03	674.39	71.01	0.4	0.1	0.5	1,3,4,5,11,14,16
1014.65	654.48	66.02	0.4	0.2	0.4	1,2,4,11,16
1020.71	665.83	65.30	0.4	0.3	0.3	1,5,6,11,16
1038.62	659.94	63.10	0.4	0.4	0.2	1,4,11,14
1047.02	669.56	57.59	0.4	0.5	0.1	1,4,15,16
1022.94	650.26	65.30	0.5	0.1	0.4	1,5,11,13,16
1022.94	650.26	65.30	0.5	0.2	0.3	1,5,11,13,16
1064.62	631.73	59.47	0.5	0.3	0.2	1,13,16
1061.61	642.95	57.59	0.5	0.4	0.1	1,4,15
1022.94	650.26	65.30	0.6	0.1	0.3	1,5,11,13,16
1064.62	631.73	59.47	0.6	0.2	0.2	1,13,16
1064.62	631.73	59.47	0.6	0.3	0.1	1,13,16
1064.62	631.73	59.47	0.7	0.1	0.2	1,13,16
1064.62	631.73	59.47	0.7	0.2	0.1	1,13,16
1064.62	631.73	59.47	0.8	0.1	0.1	1,13,16

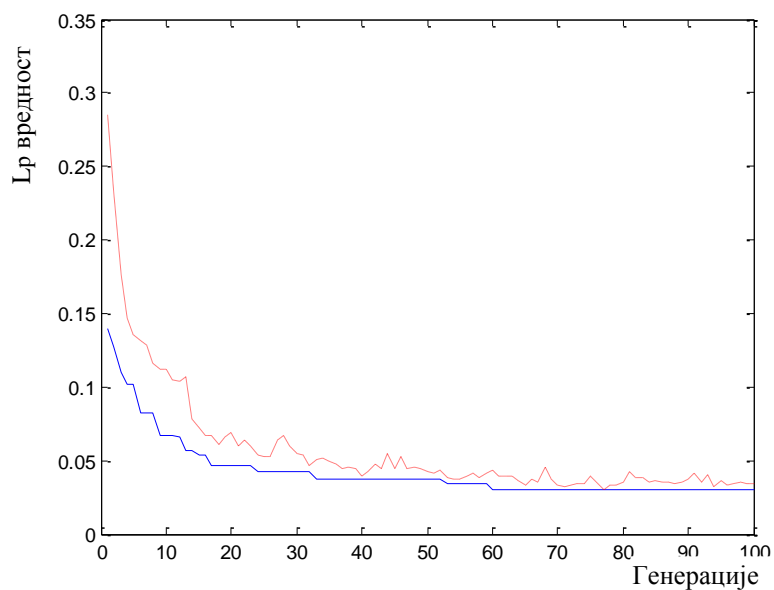
На основу табеле 4.7. може се закључити да не постоји значајна стандардна девијација критеријумских функција $f_2(\vec{l})$ и $f_3(\vec{y})$. Овај „феномен” се може објаснити чињеницом да се више од 50% укупних количина пошиљака шаље из Београда или за Београд. Имајући то у виду не чуди што се Београд појављивао као хаб у готово сваком најбољем решењу без обзира на број укључених критеријума, варирање параметара ГА или тежина критеријума. У том смислу далеко разноврснија решења добијена су приликом тражења броја и локација хабова у транспортној мрежи са 81-им чвором у Турској што ће бити представљено на крају овог поглавља.

Укључивањем сва три критеријума у одређивање броја и локација хабова у транспортној мрежи за пренос експрес пошиљака у Србији добијена су недоминирана решења која су представљена на слици 4.14.



Слика 4.14. Недоминирана решења у случају трокритеријумске функције (максимизација укупног профита, максимизација просечног временског прозора за сакупљање пошиљака и максимизација процента клијената који могу предати пошиљке после најкаснијег тренутка $L= 18:45$).

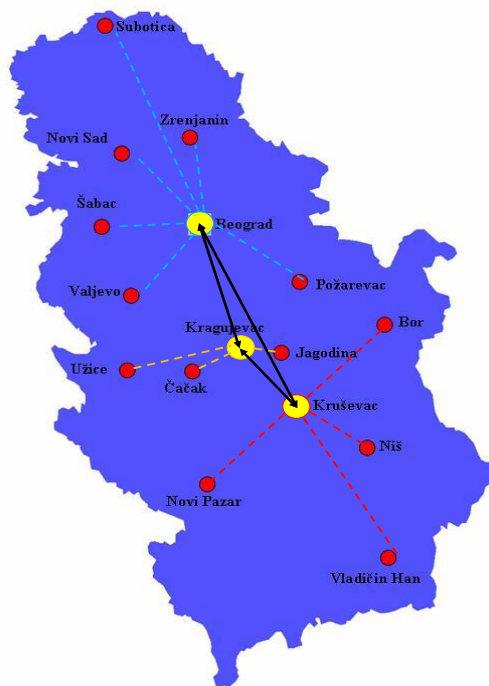
На слици 4.15. приказане су вредности L_p (блискост идеалном решењу) кроз генерације, у случају када су вредности тежина критеријума: $w_1 = 0.6; w_2 = 0.3; w_3 = 0.1$.



Слика 4.15. L_p (блискост идеалном решењу) вредност кроз генерације

$$(w_1 = 0.6; w_2 = 0.3; w_3 = 0.1)$$

На слици 4.16. приказано је једно потенцијално компромисно решење у случају када је $w_1 = 0.6; w_2 = 0.3; w_3 = 0.1$ [Џур14а].



Слика 4.16. Компромисно решење у случају када је

$$w_1 = 0.6; w_2 = 0.3; w_3 = 0.1$$

4.6.3. Тестирање програма на транспортној мрежи Турске

Програм који је развијен и тестиран на примеру транспортне мреже од 16 чворова примењив је и на далеко веће мреже. Велики проблем приликом експериментисања представља проналажење квалитетних и комплетних података за упоређивање (*benchmark*) са другим програмима / хеуристикама / метахеуристикама. Постоји неколико општеприхваћених база података за тестирање хаб локацијских проблема [ОКе87, Ве90] али већина доступних података не укључује најмање један од потребних параметара (времена путовања, транспортне капацитете, фиксне трошкове изградње хаба). Разноврсност параметара који су узети у обзир у математичком моделу који предлаже ова дисертација у комбинацији са вишекритеријумским приступом условила је да избор скупа података буде онај коришћен у локацијској анализи транспортне мреже у Турској [Тап07]. Обзиром да у [Тап07] аутори, као и у већини осталих доступних радова, проблему приступају једнокритеријумски и то у смислу минимизирања укупног броја успостављених хабова на мрежи, није могуће директно упоређивање добијених резултата. Имајући у виду да нема адекватног *benchmark* проблема приступило се решавању друге, веће, транспортне мреже како би се илустровале могућности креираног модела и рачунарског програма. Као што ће се видети у наставку, развијени програм без већих исправки успешно решава далеко сложеније проблеме у року од неколико сати рада рачунара.

Подаци до којих су Тап и Кара дошли, анализирајући Турску пошту и 4 највеће логистичке компаније, се односе на транспортну мрежу са 81 чвором (растојања и времена путовања између чворова, количине робе које се упућују између сваког пара чворова, јединичне цене транспорта између 81 града у Турској и фиксни трошкови успостављања хабова у њима). Сви подаци осим фиксних трошкова успостављања хабова су преузети у изворном облику. Фиксни трошкови, f , успостављања хабова који су дати за сваки од чворова су измењени на начин да су изједначени за сваки чвор али је урађена анализа осетљивости њиховим варирањем у интервалу $[0, 80]$.

Транспортна мрежа у Турској се значајно разликује од оне у Србији. Обзиром да јединични приходи по пошљици нису познати први критеријум који је коришћен у случају вишекритеријумске анализе транспортне мреже у Србији, максимизација укупног профита, замењен је минимизацијом укупних трошкова. Осим тога, није разматрано коришћење више типова возила [Чуп09]. Имајући све наведено у виду, у наставку ће бити дата формулација овог критеријума.

У овим експериментима такође је коришћена математичка формулација коју је предложио О'Kelly [ОКе87] и користили Торсуоглу и остали [Тор05]. Транспортни трошкови по јединици саобраћајног тока од чвора i до чвора j означени су са C_{ij} (ови трошкови су пропорционални растојању између чворова). Са W_{ij} означен је интензитет саобраћајног тока од чвора i до чвора j ($C_{ii} = 0$ и $W_{ii} = 0$). Укупни трошкови на путу од изворишног чвора i до одредишног чвора j ($i \rightarrow k \rightarrow m \rightarrow j$) (слика 4.1.) су једнаки $\chi \times C_{ik} + \alpha \times C_{km} + \delta \times C_{mj}$ [Тор05], где је χ – коефицијент трошкова сакупљања, α – коефицијент трошкова линијског транспорта и δ – коефицијент трошкова дистрибуције. У литератури се најчешће подразумева да је $\chi = \delta = 1$. Такође је $\alpha < 1$ јер α представља тзв. дисконтни фактор висококапацитивног транспорта између хабова. Овај фактор значајно утиче на топологију мреже и локације хабова. Означимо са f_i трошкове смештања хаба у чвор i без обзира на чињеницу да ће у експериментима та вредност бити иста за све чворове. Уз напомену да изрази (4.8) и (4.9) важе, као и ограничења (4.24) до (4.28), математичка формулација разматраног проблема гласи [Чуп09]:

Минимизирати:

$$f(x) = \sum_i \sum_j W_{ij} \sum_k \chi C_{ik} X_{ik} + \sum_i \sum_j W_{ij} \sum_l \delta C_{jl} X_{jl} + \sum_i \sum_k X_{ik} \sum_j \sum_l X_{jl} \alpha C_{kl} W_{ij} + \sum_j x_{jj} f_j \quad (4.33)$$

Критеријумска функција (4.33) представља суму трошкова сакупљања, дистрибуције, линијског транспорта и трошкова смештања хабова у чворове.

Како Тап и Кара нису разматрали капацитете прераде (временско задржавање пошљака у хабовима) у експериментима ће се подразумевати тренутна прерада, што у реалности није могуће. Осим ове разлике, максимизација

просечног временског прозора за сакупљање пошиљака, као други критеријум, остала је иста. Другим речима изрази (4.14) до (4.18) важе уз напомену да је $t_{kk} = 0$.

Најзначајнија разлика, поред броја чворова, су растојања између најудаљенијих чворова. Из тог разлога су времена путовања значајно већа што за последицу има да је гарантовани рок уручења 48 сати у односу на почетак сакупљања пошиљака (D+2). Оваква организација преноса не утиче на математички модел, али пружа могућност поствљања најкаснијег тренутка за предају пошиљака L на 24 сата што формира подскуп чворова (мрежа унутар мреже) којима је, без додатних трошкова, на располагању услуга преноса у року од 24 сата (D+1). Због тога је трећи критеријум – максимизација процента клијената који могу предати пошиљке и после најкаснијег тренутка L , промењен у максимизацију броја чворова који могу бити повезани у року од 24 сата. Суштина трећег критеријума на овај начин није промењена и не захтева битне интервенције на програму. На тај начин, уз задржавање израза (4.16) и (4.19), израз (4.23) постаје:

Максимизирати:

$$f_3(\vec{y}) = \sum_{i=1}^n y_i \quad (4.34)$$

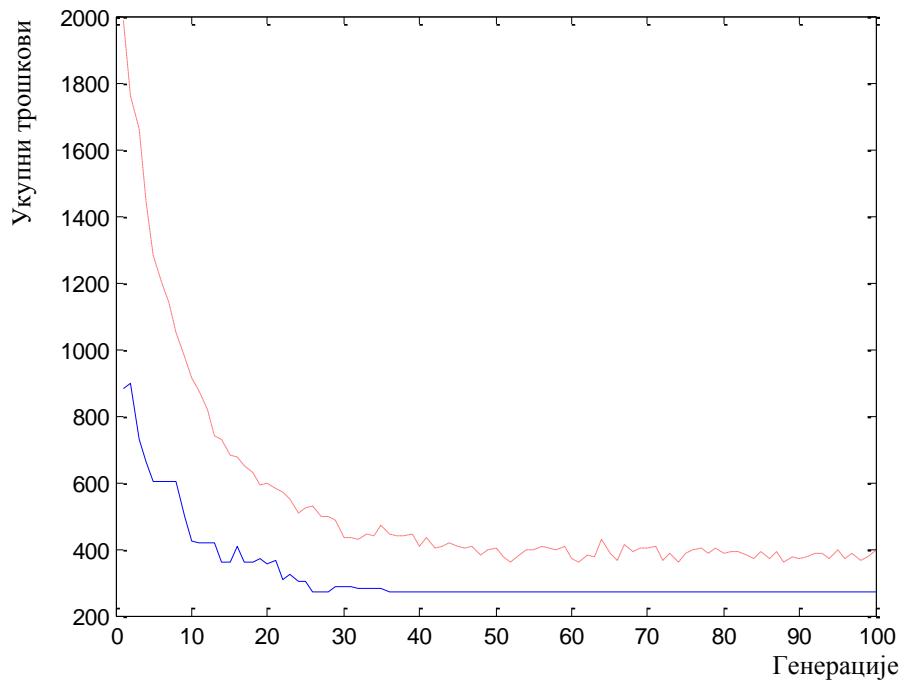
Као и у случају анализе транспортне мреже у Србији најпре су извршени експерименти са по једним критеријумом. Између три наведена критеријума, за приказ експерименталних резултата, изабран је први – минимизација укупних трошкова транспортне мреже за пренос пошиљака. Број генерација је вариран између 20 и 1000. У већини спроведених експеримената добијена решења су конвергирала већ након 100 генерација. Коefицијент α вариран је у интервалу [0,2, 1]. Улазни подаци су доступни у [Tan07]. У свакој генерацији је генерисано по 80 јединки док је број генерација ограничен на максимално 100. Резултати добијени експериментима дати су у Табели 4.8.

Табела 4.8. Резултати добијени у случају минимизације укупних трошкова

α	f	Укупни трошкови	Локације хабова	CPU [sec]
0,2	0	88.42	1,6,7,21,23,25,27,34,35,38,42,44,52,55,58,60,61,63,65,66	56.83
	20	235.06	1,6,21,25,34	28.81
	40	313.78	34	27.67
	60	333.78	34	26.61
	80	353.78	34	26.48
0,4	0	119.56	1,6,21,25,27,34,38,44,52,55,58,60,61,63,65	49.73
	20	253.46	1,6,21,25,34	29.70
	40	313.78	34	26.45
	60	333.78	34	25.61
	80	353.78	34	25.70
0,6	0	143.96	1,6,21,25,27,34,38,44,52,55,58,60,61,63	43.81
	20	271.86	1,6,21,25,34	30.56
	40	333.78	34	27.56
	60	353.78	34	28.17
	80	373.78	34	28.98
0,8	0	166.46	1,6,21,25,27,34,38,44,52,55,58,60,61,63	38.19
	20	290.26	1,6,21,25,34	30.97
	40	313.78	34	28.81
	60	333.78	34	29.11
	80	353.78	34	29.14
1	0	188.96	1,6,21,25,27,34,38,44,52,55,58,60,61,63	49.83
	20	293.78	34	21.72
	40	313.78	34	19.83
	60	333.78	34	19.73
	80	353.78	34	19.39

Укупан број хабова као и њихове локације веома зависе од вредности параметара α и f , што се може видети из претходне табеле. Што је мања вредност параметра α , већи је број хабова у најбољем пронађеном решењу. Са друге стране што је већа вредност параметра f , број хабова у најбољем решењу је мањи.

Слика 4.17. приказује промену транспортних трошкова (фитнес функције) кроз генерације, у случају када су $\alpha = 0.6$ и $f = 20$.



Слика 4.17. Вредности укупних трошкова кроз генерације ($\alpha = 0.6$; $f = 20$)

Пуна линија репрезентује вредности фитнес функције (укупних трошкова) најбољих решења у свакој генерацији, док испрекидана линија показује средњу вредност фитнес функције свих решења у генерацији. Промене фитнес функције (и у случају осталих критеријума) кроз генерације су биле веома сличне без обзира на подешавања вредности параметара модела. Развијени програм је, за исто време и веома успешно, решавао једнокритеријумске проблеме и са осталим критеријумима али ти резултати неће бити презентовани.

4.6.3.1. Експериментални резултати: два критеријума

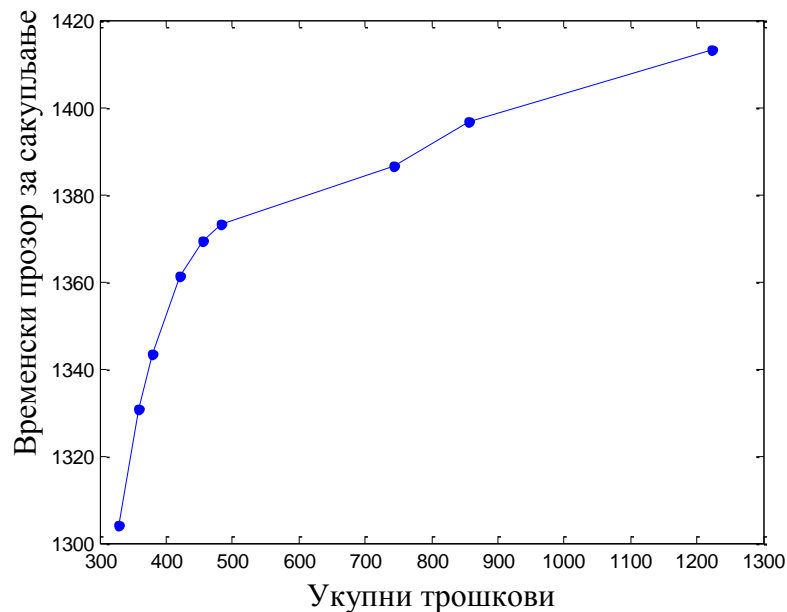
Приликом двокритеријумског решавања задатог проблема коришћен је израз (4.30) којим је минимизирано растојање посматраног решења од идеалног уз помоћ представљеног генетског алгоритма. Проблем је решаван више пута, за сваки пар вредности тежина критеријума, што је представљено у табели 4.9. Тежине критеријума су обележене са w_1, w_2, w_3 , респективно, од првог до трећег

критеријума. Вредности тежина су вариране у интервалу $[0, 1]$ са кораком 0,1. У настаку ће бити представљени само резултати добијени посматрањем прва два критеријума.

Табела 4.9. Резултати добијени у случају двокритеријумске функције

Укупни трошкови $f_1(\vec{x})$	Просечни временски прозор за сакупљање пошилијака (min) $f_2(\vec{l})$	w_1	w_2	Локације хабова
327.7	1304	0.9	0.1	1,6,21,25,55
357.7	1330.7	0.8	0.2	1,6,21,25,38,55,61
378.9	1343.3	0.7	0.3	1,6,21,25,38,44,52,55
420.7	1361.3	0.6	0.4	1,6,21,25,38,42,44,55,61
454.8	1369.3	0.5	0.5	1,6,21,25,27,38,42,44,55,58,61
484.1	1373.3	0.4	0.6	1,6,19,21,25,27,38,42,44,55,58,61
744.2	1386.5	0.3	0.7	1,6,7,10,16,20,21,25,27,34,35,38,42,44,45,52,55,59,60
856.5	1396.5	0.2	0.8	1,3,6,7,10,20,21,24,25,27,34,35,38,41,42,44,45,52,55,59,60
1222	1413.3	0.1	0.9	1,3,6,7,10,20,21,24,25,26,27,31,34,35,38,41,42,44,45,46,51,52,55,59,60,66,67,72,73

Слика 4.18. приказује Парето фронт ($\alpha=0.9$; $f=20$) за случај посматрања два критеријума (минимизација укупних трошкова и максимизација просечног временског прозора за сакупљање пошилијака).



Слика 4.18. Парето фронт у случају двоцикритеријумске анализе (минимизације укупних трошкова и максимизације просечног временског прозора за сакупљање поштиљака)

Добијена допустива решења су на слици 4.18. истакнута тачкама. Ниједна од приказаних тачака (решења) које се налазе на Парето фронту није стриктно доминирана од било које друге тачке, односно решења. Ова решења су Парето оптимална јер не постоји ниједно друго решење које је боље по свим критеријумима. И у овом случају је варирање вредности тежина критеријума омогућило генерисање великог броја решења која доносиоцима одлука олакшавају разумевање проблема и избор коначног решења.

4.6.3.2. Експериментални резултати: три критеријума

Предложени вишекритеријумски приступ одређивања броја и локација хабова тестиран је и у случају коришћења све три критеријумске функције. Добијени резултати приказани су у табели 4.10. и на слици 4.19. Време рада рачунара у овом, најкомпликованијем, случају износило је приближно 150

минута, што говори да би развијени програм могао да решава и мреже са далеко већим бројем чворова за прихватљиво време.

Табела 4.10. Резултати добијени у случају трокритеријумске функције ²

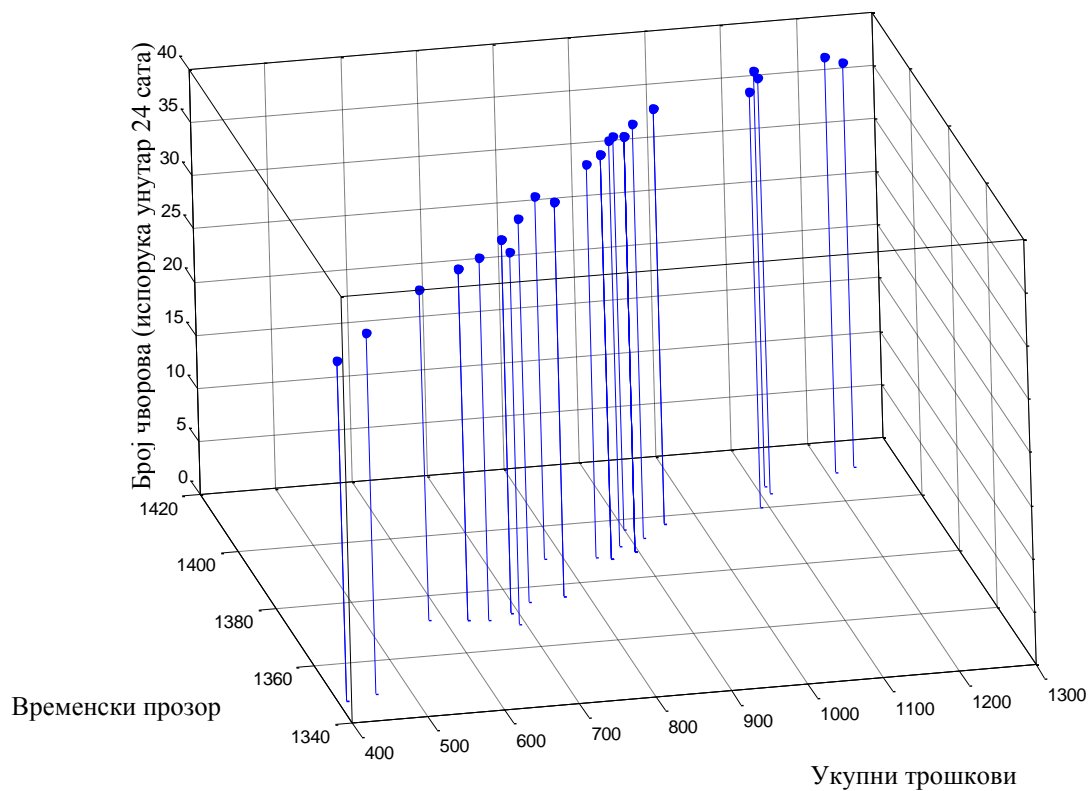
Укупни трошкови $f_1(\vec{x})$	Просечни временски прозор за сакупљање пошиљака $f_2(\vec{l})$	Укупан број чворова са испоруком унутар 24 сата $f_3(\vec{y})$	w_1	w_2	w_3	Локације хабова
953.73	1397.3	39	0.1	0.1	0.8	1,3,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,51,52,55,59,60,61
895.53	1388.8	39	0.1	0.2	0.7	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,51,52,55,59,61
1088.2	1400.2	39	0.1	0.3	0.6	1,3,6,7,9,10,14,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,41,42,44,45,48,51,52,55,59,61,67
953.73	1397.3	39	0.1	0.4	0.5	1,3,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,51,52,55,59,60,61
1111.4	1404.6	39	0.1	0.5	0.4	1,3,6,7,9,10,14,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,41,42,44,45,48,51,52,55,59,60,61,67
1111.8	1407	39	0.1	0.6	0.3	1,3,6,7,10,14,20,21,24,25,27,29,31,34,35,37,38,41,42,44,45,46,51,52,55,59,60,61,67
1211.4	1409.9	39	0.1	0.7	0.2	1,3,6,7,10,16,20,21,24,25,26,27,29,31,34,35,37,38,42,44,45,46,51,52,55,59,60,61,72,73
1239	1411.2	38	0.1	0.8	0.1	1,2,3,6,7,10,16,19,20,21,24,25,26,29,31,34,35,38,42,44,45,46,51,52,55,59,60,61,63,66,72,73
895.53	1388.8	39	0.2	0.1	0.7	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,51,52,55,59,61
895.53	1388.8	39	0.2	0.2	0.6	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,51,52,55,59,61
895.53	1388.8	39	0.2	0.3	0.5	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,51,52,55,59,61

$$^2 \alpha=0.9; f=20; K=3 p=2; L_p = \left[\sum_{i=1}^K w_i^p \left| \frac{f_i(\vec{x}) - f_i^o}{f_{i \max} - f_i^o} \right|^p \right]^{\frac{1}{p}} = \left[\sum_{i=1}^3 w_i^2 \left| \frac{f_i(\vec{x}) - f_i^o}{f_{i \max} - f_i^o} \right|^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$f_1^o = 294 \quad f_{1 \max} = 5675 \quad f_2^o = 1432 \quad f_{2 \max} = 0 \quad f_3^o = 39 \quad f_{3 \max} = 0$$

Број јединки у свакој генерацији =500 Број генерација = 200

895.53	1388.8	39	0.2	0.4	0.4	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,51,52,55,59,61
917.43	1393.1	39	0.2	0.5	0.3	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,51,52,55,59,60,61
881.3	1391.4	38	0.2	0.6	0.2	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,52,55,59,60,61
899.28	1396.5	37	0.2	0.7	0.1	1,3,6,7,10,16,20,21,24,25,27,34,35,37,38,42,44,45,51,52,55,59,60
895.53	1388.8	39	0.3	0.1	0.6	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,51,52,55,59,61
895.53	1388.8	39	0.3	0.2	0.5	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,51,52,55,59,61
859.45	1387.1	38	0.3	0.3	0.4	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,52,55,59,61
859.45	1387.1	38	0.3	0.4	0.3	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,52,55,59,61
842.27	1388	37	0.3	0.5	0.2	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,34,35,37,38,42,44,45,51,52,55,59
776.78	1389.1	34	0.3	0.6	0.1	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,34,35,38,42,44,45,52,55,59,60
859.45	1387.1	38	0.4	0.1	0.5	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,52,55,59,61
859.45	1387.1	38	0.4	0.2	0.4	1,6,7,10,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,45,52,55,59,61
769.93	1376.1	37	0.4	0.3	0.3	1,6,7,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,51,52,55,61,62
689.89	1372.1	35	0.4	0.4	0.2	1,6,7,16,20,21,25,27,28,34,35,37,38,42,44,51,55
629.52	1370.8	33	0.4	0.5	0.1	1,6,7,16,20,21,25,27,34,35,37,38,42,44,52,55
769.93	1376.1	37	0.5	0.1	0.4	1,6,7,16,20,21,24,25,27,29,34,35,37,38,42,44,51,52,55,61,62
689.89	1372.1	35	0.5	0.2	0.3	1,6,7,16,20,21,25,27,28,34,35,37,38,42,44,51,55
689.89	1372.1	35	0.5	0.3	0.2	1,6,7,16,20,21,25,27,28,34,35,37,38,42,44,51,55
580.93	1369.2	31	0.5	0.4	0.1	1,6,7,16,20,21,25,27,34,35,38,42,44,52,55
720.31	1375.1	36	0.6	0.1	0.3	1,6,7,16,20,21,24,25,27,34,35,37,38,42,44,51,52,55,62
656.69	1370.4	34	0.6	0.2	0.2	1,6,7,16,20,21,25,27,28,34,35,37,38,42,44,55
453.03	1348.7	34	0.6	0.3	0.1	1,6,21,25,27,28,37,38,44,55
629.52	1370.8	33	0.7	0.1	0.2	1,6,7,16,20,21,25,27,34,35,37,38,42,44,52,55
409.94	1347.2	32	0.7	0.2	0.1	1,6,21,25,27,28,38,44,55
409.94	1347.2	32	0.8	0.1	0.1	1,6,21,25,27,28,38,44,55



Слика 4.19. Недоминирана решења у случају трокритеријумске функције (минимизација укупних трошкова, максимизација просечног временског прозора за сакупљање поштиљака, максимизација броја чворова са испоруком унутар 24 сата)

РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА ДОСТАВЕ ЕКСПРЕС ПОШИЉАКА НА ИНТЕРАКТИВАН НАЧИН



5.1. Формулација проблема

Приликом решавања реалних вишекритеријумских проблема решење које треба пронаћи представља тзв. решење за имплементацију („*implementation*” solution). Како би се усвојило решење које је најбоље са корисничког становишта, доносиоци одлука морају имати на располагању више упоредних решења. Упоредивање решења се може реализовати на интерактиван начин где доносилац одлука учествује у процесу проналажења решења датог проблема.

Вишекритеријумски проблем лоцирања хабова на мрежи за доставу експрес пошиљака, у овој дисертацији, ће бити решаван на интерактиван начин методом коју су представили Nakayama и Sawaragi [Nak84]. Метода представљена у [Nak84] је модификована [Теo89] како би могла бити примењена на целобројне проблеме какав је решаван и у овој дисертацији.

Циљ је пронаћи допустива решења $x \in X$ тако да важи неједнакост:

$$f_i(x) \geq \bar{f}_i \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (5.1)$$

где је:

$f_i(x)$ – i -ти критеријум

$\bar{f} = (\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_r)$ – нивои аспирације доносилаца одлука.

Крајње решење се налази у скупу допустивих решења. У наставку је дат кратак алгоритам примене интерактивне методе за решавање посматраног вишекритеријумског проблема:

Корак 1. Одредити идеалну тачку $f^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_r^*)$, где је f_i^* довољно велико, на пример, $f_i^* = \max\{f_i(x) | x \in X\}$. Ове вредности остају фиксиране током целокупног процеса. Најчешће је релативно лако наћи ове вредности (у нашем случају оне се проналазе једнокритеријумском оптимизацијом). Вредности f_i^* би требало да буду довољно велике да покрију готово сва допустива решења.

Корак 2. У k -тој итерацији, доносиоц одлука мора да одреди аспирационе нивое \bar{f}_i^k за сваки критеријум f_i , $i = 1, 2, \dots, r$. Вредност \bar{f}_i^k је постављена тако да:

$$\bar{f}_i^k < f_i^* \quad (5.2)$$

Корак 3. Поставити тежине:

$$w_i^k = \frac{1}{f_i^* - \bar{f}_i^k} \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (5.3)$$

и решити проблем

$$\min_x \max_i w_i^k |f_i^* - f_i(x)| \quad x \in X \quad \text{и } x \text{ је цео број } 1 \leq i \leq r \quad (5.4)$$

Нека је x^k решење израза (5.4).

Корак 4. На основу вредности $f_i(x^k)$, $i = 1, 2, \dots, r$, доносилац одлука класификује критеријуме у три групе:

а) група критеријума по којима доносилац одлуке (ДО) жели да оствари боље вредности критеријумских функција,

б) група критеријума по којима је ДО спреман да прихвати нешто лошије вредности критеријумских функција,

в) група критеријума по којима је ДО задовољан оствареним вредностима критеријумских функција.

Уколико доносилац одлука не искаже жељу за поправљањем пронађеног, решења, ни по једном критеријуму, процес се завршава. У том случају, допустиво решење пронађено након k итерација, x^k се усваја као крајње решење. У супротном, од доносиоца одлука се тражи дефинисање нових аспирационих нивоа за сваки критеријум. У овом кораку, нови аспирациони нивои се одређују као:

$\bar{f}_i^{k+1} > f_i(x^k)$ уколико доносилац одлука жели да поправи i -ти критеријум,

$\bar{f}_i^{k+1} < f_i(x^k)$ уколико доносилац одлука прихвата погоршање i -тог критеријума,

$\bar{f}_i^{k+1} = f_i(x^k)$ уколико доносилац одлука прихвата i -ти критеријум какав јесте.

Повећати бројач итерација $k = k + 1$ и вратити се на Корак 3.

Супротно већини интерактивних метода које, готово по правилу, од доносиоца одлука захтевају обуку и детаљно упознавање са моделом, што отежава њихову практичну примену, предложена метода је једноставна и интуитивно јасна. Од доносиоца одлука се захтева да користи већ добијене вредности најбољег решења, по сваком од критеријума, како би изразио своје аспирационе нивое, који се касније користе за израчунавање тежина критеријума. Минимизацијом тежински пондерисаног растојања вредности критеријума од идеалне тачке се добија ново решење које се предлаже доносиоцу одлука. Обзиром да постоји могућност дефинисања нереалних аспирационих нивоа од стране доносиоца одлука не могу се унапред дати гаранције да ће бити пронађено решење које задовољава тако постављене аспирационе нивое. Са друге стране, метод пружа прилику доносиоцу одлука да проучава могућности и контрадикторности проблема који решава (за које није знао на почетку процеса

решавања). На основу реалног сагледавања могућности и ограничења посматраног проблема, доносиоцу одлука је далеко лакше да постави реалистичне захтеве кроз дефинисање аспирационих нивоа за критеријуме, што доводи до проналажења задовољавајућег крајњег решења.

Сваки проблем

$$\max \{f_i(x) | x \in X \text{ и } x \text{ је цео број}\}$$

је, такође, решаван коришћењем генетских алгоритама. Координате идеалне тачке f_i^* су произвољно усвојене као горња граница највећих вредности које су пронађене за i -ти критеријум ($i = 1, 2, \dots, r$). У случају када имамо фиксне координате идеалне тачке и задате аспирационе нивое у k -тој итерацији, генетски алгоритам се, такође, може успешно применити за решавање *min-max* проблема

Треба напоменути да приликом извршавања описаног интерактивног процеса, остаје до краја нерешено питање „коректног” одређивања идеалне тачке и решавања *min-max* проблема (5.4). Оба проблема се могу редуковати на проблеме нелинеарног целобројног програмирања који су по својој природи веома тешки за решавање (нарочито у случају реалних проблема великих димензија).

5.2. Експериментални резултати: решавање проблема на интерактиван начин

За спровођење експеримената са интерактивним приступом потребно је учешће доносиоца одлука. Уз консултације са менаџментом компаније, чији подаци су коришћени за експериментисање, приступило се симулирању процеса проналажења решења у више итерација. Иницијални аспирациони нивои су дефинисани за двокритеријумски случај (максимизација укупног профита и максимизација процента клијената који могу предати своје пошиљке на пренос после најкаснијег тренутка $L = 18:45$). Почетне вредности су дате као изразито захтевне:

Жељени укупан профит	1075
Жељени проценат клијената	73

Проблем (5.4) је решен генетским алгоритмом уз дефинисање координата идеалне тачке (1080,75) и горе наведених аспирационих нивоа. Добијено је следеће решење:

Итерација 1

Жељени укупан профит	1075
Профит пронађеног решења	1047,78
Жељени проценат клијената	73
Процент пронађеног решења	59,47

Вредности аспирационих нивоа и остварених вредности најбољег пронађеног решења по сваком од критеријума су дате упоредно. Разлог таквом приказу лежи у чињеници да се од доносиоца одлука тражи да изрази своје задовољство или незадовољство добијеним решењем кроз прихватање или неприхватање одређене вредности критеријума. Анализом добијених резултата, након прве итерације, може се приметити да су иницијалне вредности аспирационих нивоа постављене превисоко, па као такве не могу бити достигнуте. Како добијено решење није задовољавајуће од доносиоца одлука се тражи да поново дефинише нове аспирационе нивое. Претпоставља се да ће доносилац одлука, попут аутора ове дисертације, желети да проучи проблем и изврши већи број експеримената пре усвајања неког од понуђених решења. Након друге итерације, у којој су промењена оба аспирациона нивоа што не мора увек бити случај, добијено је следеће решење:

Итерација 2

Жељени укупан профит	1050
Профит пронађеног решења	1022,94
Жељени проценат клијената	70
Процент пронађеног решења	65,30

Како су и даље добијене вредности значајно одступале од жељених приступило се трећој итерацији:

Итерација 3

Жељени укупан профит	1000
Профит пронађеног решења	974,47
Жељени проценат клијената	69
Процент пронађеног решења	66,02

Доносилац одлука би требало да дође до задовољавајућег решења кроз већи број итерација. У табели 5.1. приказани су аспирациони нивои доносиоца одлука и добијена решења (локације хабова, укупан профит и проценат корисника) кроз девет итерација.

Табела 5.1. Аспирациони нивои доносиоца одлука и добијена решења кроз девет итерација

Итерација	Аспирациони ниво за критеријум 1	Аспирациони ниво за критеријум 2	Локације хабова	Укупан профит $f_1(\vec{x})$	Процент клијената који могу предати своје пошиљке на пренос после најкаснијег тренутка 18:45 $f_3(\vec{y})$
1	1075	73	1,4,6,16	1047,78	59,47
2	1050	70	1,5,11,13,16	1022,94	65,30
3	1000	69	1,2,6,11,13,16	974,47	66,02
4	950	69	1,2,6,11,12,13,16	939,11	68,23
5	950	68	2,5,11,13,15,16	972,79	67,94
6	975	67	1,2,6,11,13,16	974,47	66,02
7	1000	66,5	1,5,6,11,13,16	995,66	65,30
8	1000	66	1,2,4,11,16	1014,65	66,02
9	1025	65,5	1,5,11,13,16	1022,94	65,30

Након интерактивног решавања проблема са два критеријума приступило се експериментима са укључивањем свих критеријума у разматрање. Очекивано је да процес потраје дуже због већег броја комбинација које се могу направити дефинисањем три аспирациона нивоа.

Почетне вредности иницијалних аспирационих нивоа дефинисаних за трокритеријумски случај (максимизација укупног профита, максимизације просечног временског прозора за сакупљање пошиљака и максимизација процента клијената који могу предати своје пошиљке на пренос после најкаснијег тренутка $L= 18:45$) су дате као изразито захтевне:

Жељени укупан профит	1075
Жељени временски прозор	690
Жељени проценат клијената	73

Проблем (5.4) је решен генетским алгоритмом уз дефинисање координата идеалне тачке (1080,685,75) и горе наведених аспирационих нивоа. Добијено је следеће решење:

Итерација 1

Жељени укупан профит	1075
Профит пронађеног решења	1047,78
Жељени временски прозор	680
Временски прозор пронађеног решења	647,89
Жељени проценат клијената	73
Процент пронађеног решења	59,47

Анализом добијених резултата, након прве итерације, може се приметити да су иницијалне вредности аспирационих нивоа постављене превисоко тако да не могу бити достигнуте. Из тог разлога се од доносиоца одлука тражи да поново дефинише нове аспирационе нивое. Приликом дефинисања аспирационих нивоа треба успоставити стратегију по којој се они мењају како не би долазило до понављања истих вредности. Осим тога пожељно је извршити што већи број експеримената што би требало да допринесе бољем разумевању посматраног проблема. Након друге итерације, у којој су промењена сва три аспирациона нивоа (не мора увек бити случај), добијено је следеће решење:

Итерација 2

Жељени укупан профит	1050
Профит пронађеног решења	1022,94
Жељени временски прозор	650
Временски прозор пронађеног решења	650,26
Жељени проценат клијената	70
Процент пронађеног решења	65,30

Како су и даље добијене вредности значајно одступале од жељених приступа се трећој итерацији:

Итерација 3

Жељени укупан профит	1025
Профит пронађеног решења	1021,59
Жељени временски прозор	650
Временски прозор пронађеног решења	658,22
Жељени проценат клијената	67
Процент пронађеног решења	65,30

Процес интерактивног решавања проблема доставе експрес пошиљака завршен је након 15 итерација. У табели 5.2. приказани су аспирациони нивои доносиоца одлука и добијена решења (локације хабова, укупан профит, просечни временски прозори за предају пошиљака и проценат корисника).

Табела 5.2. Аспирациони нивои доносиоца одлука и добијена решења кроз 15 итерација

Итерација	Аспирациони ниво за критеријум 1	Аспирациони ниво за критеријум 2	Аспирациони ниво за критеријум 3	Локације хабова	Укупан профит $f_1(\vec{x})$	Просечни временски прозор за сакупљање пошилака (min) $f_2(\vec{l})$	Процент клијената који могу предати своје пошиљке на пренос после најкаснијег тренутка 18:45 $f_3(\vec{y})$
1	1075	680	73	1,4,6,16	1047,78	647,89	59,47
2	1050	650	70	1,5,11,13,16	1022,94	650,26	65,30
3	1025	650	67	1,6,11,13,16	1021,59	658,22	65,30
4	1000	640	67	1,2,4,11,16	1014,65	654,48	66,02
5	975	650	67	1,2,4,6,11,16	978,35	647,97	66,02
6	950	630	68	1,2,6,11,12,13,16	939,11	653,40	68,23
7	925	630	70	1,2,8,11,12,13,16	935,79	648,27	68,23
8	940	645	69	1,2,3,4,6,7,15	939,75	653,48	67,68
9	960	655	68	1,2,5,11,12,13,16	951,51	651,60	66,90
10	970	650	68	2,5,11,13,15,16	972,79	637,62	67,94
11	965	665	69	1,3,4,5,11,14,16	964,03	674,39	71,01
12	985	670	71	1,3,4,5,11,14,16	964,03	674,39	71,01
13	1005	665	68	1,5,6,11,13,16	995,66	664,19	65,30
14	1015	665	67	1,5,6,11,16	1020,71	665,83	65,30
15	1020	670	66	1,4,11,14,16	1020,34	670,36	65,29

Из претходне табеле се може видети да је решење добијено у 14-ој итерацији боље од решења добијеног у 13-ој итерацији по прва два критеријума, док су по трећем критеријуму решења иста. Међутим, приликом 13-е итерације, за аспирационе нивое (1005,665,68) фитнес функције добијене на основу (5.4) за ова два решења су биле једнаке и оне су се наизменично појављивале приликом експеримената.

ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА И ПРАВЦИ БУДУЋИХ ИСТРАЖИВАЊА



6.1. Закључна разматрања

У дисертацији је описана имплементација модела заснованих на генетским алгоритмима за решавање проблема пројектовања транспортних мрежа. За решавање разматраног проблема детаљно су описани теоријски и практични аспекти предложене метахеуристике, као и преглед других метода коришћених за његово решавање. Предложени приступ је тестиран на примеру транспортне мреже за пренос експрес поштанских пошиљака у Србији, као и логистичких пошиљака у Турској.

Разматрани хаб локацијски проблем је тежак за решавање и припада класи NP-тешких проблема. Постојеће егзактне методе могу решити само инстанце проблема релативно малих димензија. Попут егзактних метода ни познате хеуристике, засноване на методи локалног претраживања, углавном не дају решења задовољавајућег квалитета на инстанцама проблема великих димензија. Предложени еволутивни приступ је веома значајан јер омогућава успешно решавање датих проблема, без обзира на димензије проблема.

Описани алгоритам користи концепт GA који је модификован у складу са природом решаваног проблема. Без обзира на модификације које су специфичне за решавани проблем, могуће је релативно лако реконфигурисати и допунити развијени програм тако да буде применљив за решавање сличних хаб и других локацијских проблема.

У складу са примењеним начином кодирања и природом проблема, имплементирани су генетски оператори који чувају допустивост решења. На тај начин је искључена појава некоректних јединки у свакој генерацији. Осим тога, примењене су и методе за спречавање преурађене конвергенције, споре конвергенције генетског алгоритма и губљења разноврсности генетског материјала. Предложена имплементација генетских алгоритама користи елитистичку стратегију која омогућава директно преношење елитних јединки у наредну генерацију.

Предложени концепт интерактивног решавања проблема пружа доносиоцима одлука, као главним корисницима развијених програма, нову димензију у разумевању проблема који покушавају да реше.

Сви резултати добијени експериментисањем указују да су развијени програми способни за решавање широког спектра хаб локацијских проблема. У том смислу величина посматраног проблема не представља посебан изазов у решавању, што је потврђено на контролном примеру транспортне мреже у Турској.

6.2. Научни доприноси дисертације

Доприноси дисертације се могу анализирати кроз неколико аспеката:

- 1) У дисертацији је предложен вишекритеријумски приступ решавању хаб локацијских проблема. Методом компромисног програмирања укључени су у разматрање и параметри квалитета услуге коју транспортна мрежа пружа корисницима, за разлику од већине сличних истраживања која су се углавном концентрисала на минимизирање трошкова односно максимизирање профита.
- 2) Други допринос дисертације представља укључивање широког спектра параметара који утичу на крајње решење. Приликом израде предложеног модела узимали су се у обзир: приходи од преноса пошилијака, трошкови манипулације унутар хабова, фиксни трошкови изградње процењени на

основу реалних цена специфичних локација, употреба више типова возила, време потребно за прераду пошиљака као и прилагођавање реда вожње прерадним капацитетима. Резултат оваквог приступа је висок квалитет добијених решења и њихова реалистичност.

- 3) Развијен је модел интерактивног доношења крајње одлуке. Доносиоцима одлука, као крајњим корисницима, понуђен је алат за истраживање и боље разумевање проблема који се решава. Доносиоци одлука кроз процес дефинисања сопствених аспирационих нивоа имају могућност да спознају могућности и ограничења које им поставља транспортна мрежа.
- 4) Коначно, последњи допринос дисертације је остварен кроз генерисање низа додатних параметара транспортне мреже која се пројектује: радна времена чворова, општи ред вожње, дефинисање возног парка и капацитета прераде за успостављене хабове, итд.

Добијени резултати показују да је предложена еволутивна метода изузетно успешна при решавању хаб локацијских проблема. Научно истраживање описано у овој дисертацији даје допринос у областима: локацијска анализа, комбинаторна оптимизација и пројектовање мрежа за пренос експрес пошиљака. Један део добијених резултата је објављен у иностраном часопису и на међународним конференцијама, док су остали делови у припреми за објављивање.

6.3. Правци будућих истраживања

Локацијски проблеми на мрежи представљају изузетно важно поље истраживања. Резултати који су добијени применом метахеуристике Генетски алгоритми и који су приказани у дисертацији дају подстрек за даља истраживања. У том смислу, даље проширење и унапређивање представљене методе и добијених резултата се може извршити у неколико правца:

- а) Увођење конкуренције у разматрање.

Тржиште услуга експрес преноса се одликује постојањем изразито развијене конкурентности између свих учесника који учествују на њему. Постојање конкурентских компанија у великој мери утиче на све аспекте пословања (цену преноса, понуђени квалитет услуга, обим преузетих пошиљака, итд). Укључивање конкурентских експрес компанија у модел допринело би квалитету и реалистичности добијених резултата.

б) Хибридизација са неким другим хеуристикама и/или егзактним методама.

Комбинација метахеуристике GA са другим техникама, како хеуристичким тако и егзактним, је један од могућих задатака будућих истраживања. Осим тога, веома актуелан тренд је и хибридизација две метахеуристике (могло би се разматрати повезивање метахеуристике GA са неком од метода заснованих на локалном претраживању).

в) Решавање истог проблема методом оптимизације колонијом пчела.

Осим хибридизације могуће је упоређивањем са резултатима који би се добили решавањем истог проблема методом VCO. Оптимизација колонијом пчела, као нова метахеуристичка метода, је постигла одличне резултате приликом решавања више локацијских и саобраћајних проблема. Из тог разлога би било корисно упоредити ове две методе како би се утврдило које су међусобне предности и недостаци.

г) Паралелизација описаног GA.

Извршавање алгоритама на паралелним рачунарима са већим бројем процесора, представља потенцијал да се убрза развијени програм и добију квалитетнији коначни резултати.

д) Модификација описаног GA.

Модификација описаног генетског алгорита за решавање сличних проблема комбинаторне оптимизације, нарочито у области теорије локације, може бити један од праваца будућих истраживања. Формулација и решавање других тешких комбинаторних проблема из области саобраћаја се намеће као задатак који пред истраживаче постављају компаније које се

баве како преносом пошиљака тако и логистичким услугама, превозом путника, телекомуникацијама, итд. Осим тога приказани алгоритам је могуће даље усавршавати у смислу његових перформанси. То се односи на примену технике кеширања за убрзање извршавања програма, елиминисања гена који се могу наћи на истој позицији код (скоро) свих јединки у популацији, развој алата за очување разноврсности генетског материјала (уклањање јединки које се више пута појављују у популацији, ограничавање броја јединки са истом функцијом циља и сл.), итд.

ЛИТЕРАТУРА

- [Abd98a] Abdinnour-Helm S. (1998) A Hybrid Heuristic for the Uncapacitated Hub Location Problems, *European Journal of Operational Research* **106**: 489-499.
- [Abd99] Abdinnour-Helm S. (1999) Network Design in Supply Chain Management, *International Journal of Agile Management Systems*, Vol. 1, No. 2., pp.99-106.
- [Alk04] Alkhalifah Y., Wainwright R.L. (2004) *A Genetic Algorithm Applied to Graph Problems Involving Subsets of Vertices*, CEC.
- [AIS96] Al-Sultan K., Hussain M., Nizami J. (1996) A genetic algorithm for the set covering problem, *Journal of the Operational Research Society* **47**: 702-709.
- [Alu08] Alumur S., Kara B.Y. (2008) Network hub location problems: The state of the art. *European Journal of Operational Research* **190**: 1-21.
- [And12] Andriankaja D. (2012) The location of parcel service terminals: Links with the locations of clients, *The Seventh International Conference on City Logistics*, Procedia - Social and Behavioral Sciences 39, pp. 677-686.
- [Ant89] Antonisse J. (1989) A New Interpretation of Schema That Overturns the Binary Encoding Constraint, in: *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, pp. 86-91.
- [Ayk94] Aykin T. (1994) Lagrangean Relaxation Based Approaches to Capacitated Hub-and-Spoke Network Design Problem, *European Journal of Operational Research*, **79**: 501-523.
- [Bea93a] Beasley D., Bull D.R., Martin R.R. (1993) An Overview of Genetic Algorithms, Part 1, Fundamentals, *University Computing*, Vol. 15, No. 2, pp.58-69.

- [Bea93b] Beasley D., Bull D.R., Martin, R.R. (1993) An Overview of Genetic Algorithms, Part 2, Research Topics, *University Computing*, Vol. 15, No. 4, pp. 170-181.
- [Bes90] Beasley J.E. (1990) OR-Library: distributing test problems by electronic mail, *Journal of the Operational Research Society* **41**(11): 1069-1072. <http://people.brunel.ac.uk/~mastjib/jeb/info.html>
- [Ben66] Benayoun R., Roy B., Sussman B. (1966) Une méthode pour guider le choix en presence de points de vue multiple. *Direction Scientifique*. Note de Travail, No. 49.
- [Ber80] Berger J. O. (1980) *Statistical Decision Theory: Foundations, Concepts and Methods*. Springer-Verlag., New York.
- [Ber97] Bertsimas D., Tsitsiklis J. T. (1997) *Introduction to Linear Optimization*”, Athena Scientific, Belmont, USA.
- [Bëc93] Bëck T. (1993) Optimal Mutation Rates in Genetic Search, *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, pp. 2-8.
- [Bol04] Boland N., Krishnamoorthy M., Ernst A., Ebery J. (2004) Preprocessing and Cutting for Multiple Allocation Hub Location Problems, *European Journal of Operational Research* **155**: 638-653.
- [Bon97] Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G. (1997) *Swarm Intelligence*. Oxford University Press, Oxford.
- [Boy73] Boychuk L. M., Ovchinnikov V. O. (1973) Principal Methods of Solution of Multicriterial Optimization Problems (survey), *Soviet Automatic Control* **6**: 1-4.
- [Bol04] Boland N., Krishnamoorthy M., Ernst A., Ebery J. (2004) Preprocessing and Cutting for Multiple Allocation Hub Location Problems, *European Journal of Operational Research* **155**: 638-653.
- [Boz02] Bozkaya B., Zhang J., Erkut E. (2002) An Efficient Genetic Algorithm for the p- median problem, in Drezner Z. and Hamacher H., eds.: *Facility*

- Location: Applications and Theory*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp.179-204.
- [Brm91] Bramlette, M.F. (1991) Initialisation, Mutation and Selection Methods in Genetic Algorithms for Function Optimization, in: Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, San Mateo, Calif., pp. 100-107.
- [Brn85] Brans J. P., Vincke P. (1985) A Preference Ranking Organisation Method (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Management Science* **31**(6): 647-656.
- [Brn86] Brans J. P., Vincke P., Mareschal B. (1986) How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research* **24**(2): 228-238.
- [Brs88] Brassard G., Bratley P. (1988) *Algorithms: Theory and Practice*, Prentice-Hall Int., Englewoods Cliffs NJ.
- [Bry02] Bryan D., O'Kelly M. (2002) Hub-and-Spoke Networks in Air Transportation: An Analytical Review, Journal of Regional Science ,Vol. 39, Iss. 2, pp.275–295.
- [Бук12] Букумировић М., Чупић А. (2012) *Технологија механизоване прераде поштанских пошиљака*. Саобраћајни факултет, Београд.
- [Cam94a] Campbell J. F. (1994) A Survey of Network Hub Location, *Studies in Locational Analysis* **6**: 31-49.
- [Cam94b] Campbell J. F. (1994) Integer programming formulations of discrete hub location problems, *European Journal of Operational Research* **72**: 387-405.
- [Cam02] Campbell J.F., Ernst A., Krishnamoorthy M. (2002) Hub Location Problems in Drezner Z. and Hamacher H., eds.: *Facility Location : Applications and Theory*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp.373-407.

- [Cán07] Cánovas L., García S., Marín A. (2007) Solving the uncapacitated multiple allocation hub location problem by means of a dual-ascent technique, *European Journal of Operational Research*, **179**(3): 990-1007.
- [Car80] Carmichael D. G. (1980) Computation of Pareto Optima in Structural Design. *International Journal of Numerical Methods in Engineering* **15**: 925-952.
- [Cha61] Charnes A., Cooper W. W. (1961) *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*. Vol. 1, Wiley., New York.
- [Coe02] Coello Coello, C.A., Van Veldhuizen, D.A., Lamont, G.B. (2002) *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems (Genetic and Evolutionary Computation)*, Springer., Heilderberg.
- [Coh75] Cohon J. L., Marks D. H. (1975) A review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques. *Water Resources Research* **11**(2): 208-220.
- [Coh78] Cohon J. L. (1978) *Multiobjective Programming and Planning*. Academic Press.
- [Col91] Colomi A., Dorigo M., Maniezzo V. (1991) Distributed Optimization by Ant Colonies. In: *Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*, Paris, France, Elsevier, pp. 134–142.
- [Col92] Colomi A., Dorigo M., Maniezzo V. (1992) An investigation of some properties of an ant algorithm, In: *Proceedings – Parallel Problem Solving from Nature Conference (PP.SN 92)*, Brussels, Belgium, pp. 509–520.
- [Col96] Colomi A., Dorigo M., Maffioli F., Maniezzo V., Righini G., Trubian M. (1996) Heuristics from nature for hard combinatorial problems, *International Transactions in Operational Research* **3**: 1–21.
- [Cor01] Correa E. S., Steiner M.T., Freitas A., Carnieri C. (2001) *A Genetic Algorithm for the p-median Problem*, GECCO,.

- [Cre97] Crescenci P., Kann V. (1997) *A Compendium of NP Optimization Problems*. <http://www.nada.kth.se/theory/problemist.html>
- [Cur90] Current J., Min H., Schilling D. (1990) Multiobjective analysis of facility location decisions. *European Journal of Operational Research* **49**(3): 295-307.
- [Czy95] Czyzak P., Zak J. (1995) A model of an urban-transportation system formulated as a multiobjective mathematical-programming problem under uncertainty. *Journal of advanced transportation*. **29**(1): 43-62.
- [Чан96] Чангаловић М. (1996) Опште хеуристике за решавање проблема комбинаторне оптимизације, *Комбинаторна оптимизација: Математичка теорија и алгоритми*, стр. 320-350.
- [Čer85] Černý V. (1985) Thermodynamical Approach to the Travelling Salesman Problem: An Efficient Simulation Algorithm, *Journal of Optimization Theory and Applications*, **45**: 41-51.
- [Чуп07] Чупић А. (2007) *Методологија избора техничког система за аутоматску прераду пакета у главним поштанским центрима*, Магистарски рад, Саобраћајни факултет, Београд.
- [Чуп09] Чупић А., Теодоровић Д. (2009) *Лоцирање хабова за експрес пошिल्ке применом генетских алгоритама*, XXXVI SIM-OP-IS, Математички институт САНУ, Ивањица, стр. 651-654.
- [Чуп14] Чупић А. (2014) *Вишекритеријумски приступ пројектовању мреже за пренос експрес пошљака применом генетских алгоритама*, XLI SIM-OP-IS, Саобраћајни факултет, Дивчибаре 2014, стр. 741-747.
- [Čup14a] Čupić A., Teodorović D., (2014) A Multi - objective approach to the parcel express service delivery problem, *Journal of Advanced Transportation* **48**(7): 701-720.
- [Dag86] Daganzo C. F., Newell G. F. (1986) Configuration of Physical Distribution Networks. *Networks* **16**(2): 113-132.
- [Dar59] Darwin C. (1859) *The origin of species*, London.

- [DAv83] D'Avignon G., Turcotte M., Beaudry L., Duperre Y. (1983) Degré de specialization des hôpitaux de Quebec. Technical report, *Université Laval.*, Quebec, Canada.
- [Dav10] Davidović T., Ramljak D., Šelmić M., Teodorović D. (2010) Parallel Bee Colony Optimization for Scheduling Independent Tasks to Identical Machines, *Simpozijum o operacionim istraživanjima SYM-OP-IS*, Tara, Zbornik radova, pp. 389-392.
- [Dav11] Davidović T., Ramljak D., Šelmić M., Teodorović D. (2011) Bee colony optimization for p -center problem, *Computers & Operations Research* **38**, Iss. 10, pp. 1367-1376.
- [Dom03] Domínguez E., Muñoz J., Mérida E. (2003) A Recurrent neural Network Model for the p -Hub Problem, *Proceedings of IWANN 2003.*, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2687, pp. 734-741.
- [Dor92] Dorigo M. (1992) *Optimization, Learning and Natural Algorithms*, Ph.D. Dissertation, Politecnico di Milano, Milano, Italy.
- [Dor96] Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. (1996) Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Part B **26**: 29–41.
- [Dor99] Dorigo M., Di Caro G., Gambardella, L.M. (1999) Ant algorithms for discrete optimization, *Artificial Life* **5**: 137–172.
- [Dre02] Drezner Z., Klamroth K., Schöbel A., Weslowsky G.O. (2002) The Weber Problem in Drezner Z. and Hamacher H., eds.: *Facility Location : Applications and Theory*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 1-25.
- [Dri07] Drira A., Pierreval H., Hajri-Gabouj S. (2007) Facility layout problems: A survey, *Annual Reviews in Control* **31**: 255-267.
- [Duc80] Duckstein L., Opricovic S. (1980) Multiobjective optimization in river basin development. *Water Resources Research* **16**(1): 14-20.
- [Duc81] Duckstein L. Gershon M. (1981) Multi-objective analysis of a vegetation management problem using ELECTRE II. Technical Report 81-11,

Department of Systems and Industrial Engineering, University of Arizona., Tucson, Arizona.

- [Duc84] Duckstein L. (1984) Multiobjective optimization in structural design: The model choice problem. In: Atrek E., Gallagher, R. H., Ragsdell, K. M., Zienkiewicz, O. C., editors, *New Directions in Optimum Structural Design*, pages 459-481. Wiley., New York.
- [Dvo99] Dvoretz J. (1999) Compatibility-Based Genetic Algorithm: A New Approach to the p-Median Problem, *Department of Industrial Engineering and Management Sciences, Northwestern University*, pp.1-17.
<http://www.iems.northwestern.edu/docs/undergraduate/honors/dvoretz.pdf>.
- [Dzu94] Dzuberá J., Whitley D. (1994) Advanced Corelation Analysis of Operators for the Traveling Salesman Problem, In: *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN III*, eds: Davidor Y., Schwefel H.P., Manner R., Springer-Verlag, pp.68-77.
- [Đur08] Đurić B., Kratica J., Tošić D., Filipović V. (2008) Solving the maximally balanced connected partition problem in graphs by using genetic algorithm, *Computing and Informatics* **27**: 341-354.
- [Ebe00] Ebery J.E., Krishnamoorthy M., Ernst A.T., Boland N. (2000) The Capacitated Multiple Allocation Hub Location Problem: Formulations and Algorithms, *European Journal of Operational Research* **120**(3): 614-631.
- [Eda08] Edara P., Šelmić M., Teodorović D. (2008) Heuristic Solution Algorithms for a Traffic Sensor Optimization Problem, *INFORMS 2008*, Washington D.C.
- [Ern96] Ernst A.T., Krishnamoorthy M. (1996) Efficient Algorithms for the Uncapacitated Single Allocation p-Hub Median Problem, *Location Science* **4**(3): 139-154.

- [Ern98a] Ernst A.T., Krishnamoorthy M. (1998) An Exact Solution Approach Based on Shortest-paths for p-hub Median Problem, *INFORMS Journal of Computing* **10**: 149-162.
- [Ern98b] Ernst A.T., Krishnamoorthy M. (1998) Exact and Heuristic Algorithms for the Uncapacitated Multiple Allocation p-hub Median Problem, *European Journal of Operational Research* **104**: 100-112.
- [Ern99] Ernst A.T., Krishnamoorthy M. (1999) Solution Algorithms for The Capacitated Single Allocation Hub Location Problem, *Annals of Operations Research* **86**: 141-159.
- [Ern09] Ernst A.T., Hamacher H., Jiang H., Krishnamoorthy M., Woeginger G. (2009) Uncapacitated single and multiple allocation p-hub center problems, *Computers & Operations Research* **36**(7): 2230-2241.
- [Фил98] Филиповић В. (1998) *Предлог побољшања оператора турнирске селекције код генетских алгоритама*, Магистарски рад, Универзитет у Београду, Математички факултет.
- [Fil00] Filipović V., Kratica J., Tošić D., Ljubić I. (2000) Fine Grained Tournament Selection for the Simple Plant Location Problem, *Proceedings of the 5th Online World Conference on Soft Computing Methods in Industrial Applications - WSC5*, pp. 152-158.
- [Fil01] Filipović V., Tošić D., Kratica J. (2001) Experimental Results in Applying of Fine Grained Tournament Selection, *Proceedings of the 10th Congress of Yugoslav Mathematicians*, pp. 331-336.
- [Fil03] Filipović V. (2003) Fine-Grained Tournament Selection Operator in Genetic Algorithms, *Computing and Informatics* **22**(2): 143-161.
- [Фил06] Филиповић В. (2006) *Оператори селекције и миграције у WEB сервису код паралелних еволутивних алгоритама*, Докторска дисертација, Математички факултет, Београд.
- [Fil12] Filipovic V., Kratica J., Savic A., Dugosija Đ. (2012) The modification of genetic algorithms for solving the balanced location problem, *Balkan Conference in Informatics*, Novi Sad pp. 243-246.

- [Fon93] Fonseca C.M., Fleming P.J. (1993) Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization, In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, San Mateo, Calif., pp. 416-423.
- [Gaj09] Gajpal Y., Abad P. (2009) An ant colony system (ACS) for vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup. *Computers & Operations Research* **36**(12): 3215-3223.
- [Gar79] Garey M.R., Johnson D.S. (1979) *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP Completeness*, W.H. Freeman and Co.
- [Gas55] Gass S., Saaty T. L. (1955) The computational algorithm for the parametric objective function. *Naval Research Logistics Quarterly* **2**: 39-45.
- [Gav92] Gavish B. (1992) Topological Design of Computer Communication Networks-the Overall Design Problem, *European Journal of Operational Research*, **58**(2): 148-172.
- [Gem74] Gembicki F. W. (1974) *Vector Optimization for Control with Performance and Parameter Sensitivity Indices*. PhD thesis, Case Western Reserve University., Cleveland, Ohio.
- [Gem75] Gembicki F. W., Haimes Y. Y. (1975) Approach to performance and sensitivity multiobjective optimization: the goal attainment method. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **AC-15**: 591-593.
- [Gen02] Gendron B. (2002) A note on “a dual-ascent approach to the fixed-charge capacitated network design problem”, *European Journal of Operational Research*, **138**(3): 671-675.
- [Geo72] Geoffrion A. M., Dyer J. S., Feinberg A. (1972) An interactive approach for multi-criterion optimization, with an application to the operation of an academic department. *Management Science* **19**(4): 357-368.
- [Glo86] Glover F. (1986) Future paths for integer programming and links to artificial intelligence, *Computers & Operations Research* **13**: 533–549.

- [Glo90] Glover F. (1990) Tabu search: A Tutorial, *Interfaces* **20**: 74-94.
- [Glo97] Glover F., Laguna M. (1997) *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [Goi76] Goicoechea A., Duckstein L., Fogel M. (1976) Multi-objective programming in watershed management. A study of the Charleston watershed. *Water Resources Research* **12**(6): 1085-1092.
- [Gok13] Goksal F.P., Karaoglan I., Altiparmak F. (2013) A hybrid discrete particle swarm optimization for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Industrial Engineering* **65**(1): 39-53.
- [Gol85] Goldberg D.E. (1985) Alleles, loci and the TSP, In: *Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms*, Lawrence Erlbaum Associates, pp. 154-159.
- [Gol89] Goldberg D.E. (1989) *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Reading., MA: Addison-Wesley.
- [Gre85] Grefenstette J.J., Gopal R., Rosmaita R., Gucht D.V. (1985) Genetic Algorithms for the traveling salesman problem, In: *Proceedings of an International Conference of Genetic Algorithms and Their Applications*, Texas Instrument and U.S. Navy Center for Applied Research and Artificial Intelligence, pp. 154-159.
- [Ham09] Hamacher H.W., Meyer T. (2009) New Developments on Hub Location (Editorial), *Computers & Operations Research* **36**, 3087,.
- [Her97] Hertz A., Taillard E., de Werra D. (1997) *Tabu search*, In: *Local Search in Combinatorial Optimization*, Aarts E.H.L. and Lenstra J.K. (eds.), John Wiley & Sons Ltd., pp. 121-136.
- [Hmf93] Homaifar A., Guan S., Liepins G.E. (1993) A New Approach on the Traveling Salesman Problem by Genetic Algorithms, In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, San Mateo, Calif., pp. 460-466.

- [Hol75] Holland J. (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor: University of Michigan Press.
- [Hop85] Hopfield J.J., Tank D.W. (1985) Neural Computation of Decisions in Optimization Problems, *Biological Cybernetics* **52**: 141-152.
- [Hor94] Horn J., Nafpliotis N., Goldberg D. E. (1994) A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. In *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence*, vol. 1, pages 82-87, Piscataway, New Jersey, IEEE Service Center.
- [Hut02] Hutter M. (2002) Fitness Uniform Selection to Preserve Genetic Diversity, in *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, CEC-2002, Hawaii*, pp. 783-788.
- [Hwa80] Hwang C. L., Paidy S. R., Yoon K. (1980) Mathematical Programming with Multiple Objectives: A Tutorial. *Computing and Operational Research* **7**: 5-31.
- [Iji65] Ijiri Y. (1965) *Management Goals and Accounting for Control*. North-Holland., Amsterdam.
- [Jog89] Jog P., Suh J.Y., Van Gucht D. (1989) The effects of Population size, Heuristic Crossover and Local Improvement on a Genetic Algorithm for the Traveling Salesman Problem, In: *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, San Mateo, Calif., pp. 110-115.
- [Joh97] Johnson D.S., McGeoch L.A. (1997) The Traveling Salesman Problem: A Case Study in Local Optimization, *Local Search in Combinatorial Optimization*, eds. Aarts E.H.L., Lenstra J.K., John Wiley & Sons Ltd., pp. 215-310.
- [Jun06] Jun Y., Min Z. (2006) Flow Capturing Location-allocation Problem with Piecewise Linear Value-Time Function Based on Max-min Ant Colony Optimization, In: *Proceedings of the IEEE International Conference on*

- Computational Intelligence and Security* **2**, Guangzhou, China, pp. 1172-1175.
- [Jun98] Jungnickel D. (1998) *Graphs, Networks and Algorithms*, Springer Verlag, Berlin.
- [Jut67] Jutler H. (1967) Liniejnaja model z nieskolnimi celevymi funkcijami (Linear Model with Several Objective Functions). *Ekonomika i matematiceckie Metody* **3**: 397-406. (In Polish)
- [Kara00] Kara B.Y., Tansel B.C. (2000) On the Single Assignment p-Hub center Problem, *European Journal of Operational Research* **125**(3): 648-655.
- [Kel76] Keelin T. W. (1976) *A protocol and procedure for assessing multi-attribute preference functions*. PhD thesis, Department of Engineering Economic Systems., Stanford University, Stanford, California.
- [Ken69] Keeney R. L. (1969) *Multi-dimensional Utility Functions: Theory, Assessment and Applications*. Operations Research Center 43, Massachusetts Institute of Technology., Cambridge, Massachusetts.
- [Ken76] Keeney R. L., Raiffa H. (1976) *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-offs*. Wiley., New York.
- [Ken01] Kennedy J., Eberhart R.C., Shi Y. (2001) *Swarm intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, USA.
- [Kid93] Kido T., Kitano H., Nakanishi M. (1993) A hybrid search for genetic algorithms: Combining genetic algorithms, tabu search, and simulated annealing, In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, San Mateo, Calif., pp. 614.
- [Kir83] Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P. (1983) Optimization by simulated annealing, *Science* **220**: 671–680.
- [Kli91] Klincewicz J.G. (1991) Heuristics for the p-Hub Location Problem , *European Journal of Operational Research* **53**(1): 25-37.

- [Kli92] Klincewicz J.G. (1992) Avoiding Local Optima in the p-Hub Location Problem Using tabu Search And GRASP, *Annals of Operations Research*, **40**: 83-302.
- [Kli96] Klincewicz J.G. (1996) A Dual Algorithm for the Uncapacitated Hub Location Problems, *Location Science* **4**: 173-184.
- [Kos84] Koski K. (1984) Multicriterion Optimization in Structural Design. In: Atrek, E., Gallagher, R. H., Ragsdell., K. M., Zienkiewicz, O. C., editors, *New Directions in Optimum Structural Design*, pages 483-503. Wiley., New York.
- [Kra99] Kratica J. (1999) Improving Performances of the Genetic Algorithm by Caching, *Computers and Artificial Inteligence* **18**(3): 271-283.
- [Кра00] Кратица Ј. (2000) *Паралелизација генетских алгоритама за решавање неких НП- комплетних проблема*, Докторска дисертација, Математички факултет, Београд.
<http://www.mi.sanu.ac.rs/~jkratica/papers/phd.pdf>
- [Kra01] Kratica J., Tošić D., Filipović V., Ljubić I. (2001) Solving the Simple Plant Location Problem by Genetic Algorithm, *RAIRO Operations Research* **73**(1): 127-142.
- [Kra02] Kratica J., Tošić D., Filipović V., Ljubić I. (2002) A Genetic Algorithm for the Uncapacitated Network Design Problem, *Soft Computing in Industry - Recent Applications*, Engineering series, Springer, pp. 329-338.
- [Kra05] Kratica J., Stanimirović Z., Tošić D., Filipović V. (2005) Genetic Algorithm for Solving Uncapacitated Multiple Allocation Hub Location Problem, *Computers and Informatics* **22**: 1001-1012.
- [Kra06] Kratica J., Stanimirović Z. (2006) Solving the Uncapacitated Multiple Allocation p-Hub Center Problem by Genetic Algorithm, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, **23**(4): 425- 437.

- [Kra07] Kratica J., Stanimirović Z., Tošić D., Filipović V. (2007) Two genetic algorithms for solving the uncapacitated single allocation p-hub median problem, *European Journal of Operational Research* **182**(1): 15-28.
- [Kra08] Kratica J., Kovačević-Vujčić V., Čangalović M. (2008) Computing the Metric Dimension of Graphs by Genetic Algorithms, *Computational Optimization and Applications* **44**(2): 343-361.
- [Kra12] Kratica J., Kostić T., Tošić D., Dugošija Đ., Filipović V. (2012) A genetic algorithm for the routing and carrier selection problem, *Comput. Sci. Inf. Syst.* **9**(1): 49-62.
- [Kra09] Kratica J., Tošić D., Filipović V., Dugošija Đ. (2009) Two hybrid genetic algorithms for solving the super-peer selection problem, *Advances in Intelligent and Soft Computing* **58**: 337-346.
- [Lap99] Laporte G., Semet F. (1999) Special issue of INFOR on metaheuristics for location and routing problems. *INFOR* **37**(3): 193-193.
- [Lev94] Levine D. (1994) *A Parallel Genetic Algorithm for the Set Partitioning Problem*, PhD thesis, Argonne National Laboratory, Mathematics and Computer Science Division, ANL-94/23, Illinois Institute of Technology,
ftp://ftp.mcs.anl.gov/pub/tech_reports/reports/ANL9423.pdf.
- [Lip87] Lippmann R.P. (1987), An introduction to computing with neural nets, *IEEE ASSP Magazine*, pp. 4-22.
- [Loi91] Louis S.J., Rawlins G.J.E. (1991) Designer genetic algorithms: Genetic algorithms in structure design, In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms - ICGA '91*, Morgan Kaufmann, San Mateo, Calif., pp. 53-60.
- [Lon93] Lounis Z., Cohn M. Z. (1993). Multiobjective Optimization of Prestressed Concrete Structures. *Journal of Structural Engineering* **119**(3): 794-808.
- [Luč01] Lučić P., Teodorović D. (2001) Bee system: modeling combinatorial optimization transportation engineering problems by swarm intelligence.

- In: *Preprints of the TRISTAN IV Triennial Symposium on Transportation Analysis*, Sao Miguel, Azores Islands, Portugal, pp. 441–445.
- [Luč02] Lučić P., Teodorović D. (2002) Transportation modeling: an artificial life approach. In: *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, Washington, DC, pp. 216–223.
- [Luč03a] Lučić P., Teodorović D. (2003) Computing with bees: attacking complex transportation engineering problems. *Int. J. Artif. Intell. T.* **12**: 375–394.
- [Luč03b] Lučić P., Teodorović D. (2003) Vehicle routing problem with uncertain demand at nodes: the bee system and fuzzy logic approach. In: Verdegay JL (eds) *Fuzzy Sets in Optimization*. Springer-Verlag, Heidelberg Berlin, pp. 67–82.
- [Mar88] Mareschal B., Brans J. P. (1988) Geometrical Representations for MCDA. *European Journal of Operational Research* **34**(1): 69-77.
- [Mai99] Marianov V., Serra D., ReVelle C. (1999) Location of Hubs in a Competitive Environment, *European Journal of Operational Research* **114**: 363-371.
- [Mañ08] Марић М. (2008) *Решавање неких НП – тешких хијерархијско-локацијских проблема применом генетских алгоритама*, Докторска дисертација, Математички факултет, Београд.
- [Man05] Marín A., (2005) Formulating and Solving Splittable Capacitated Multiple Allocation Problems , *Computers and Operations Research* **32**(12): 3093-3109.
- [Man06] Marín A., Cánovas L., Landete M. (2006) New formulations for the uncapacitated multiple allocation hub location problem, *European Journal of Operational Research*, Volume 172(1): 274-292.
- [Man09] Marín A., Nickel S., Puerto J., Velten S. (2009) A flexible model and efficient solution strategies for discrete location problems, *Discrete Applied Mathematics* **157**: 1128-1145.

- [Mak07] Marković G., Teodorović D., Aćimović-Raspopović V. (2007) Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks Based on the Bee Colony Optimization, *AI Communication – The European Journal of Artificial Intelligence* **20**: 273 – 285.
- [Mas90] Masson E., Wang Y.J. (1990) Introduction to computation and learning in artificial neural networks, *European Journal of Operational Research* **47**: 1-28.
- [Moh10] Mohammadi M., Tavakkoli-Moghadam R., Tolouei H., Yousefi M. (2010) Solving a hub covering location problem under capacity constraints by a hybrid algorithm, *Journal of Applied Operational Research* **2**(2): 109–116.
- [Mon73] Monarchi D. E., Kisiel C. C., Duckstein L. (1973) Interactive multiobjective programming in water resources: a case study. *Water Resources Research* **9**(4): 837-850.
- [Met53] Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H., Teller E. (1953) Equations of State Calculations by Fast Computing Machines, *Journal of Chemical Physics* **21**: 1087-1092.
- [Mic96] Michalewicz Z. (1996) *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Third Edition, Springer Verlag, Berlin Heideleberg.
- [Mih03] Mihelič J., Robič B. (2003) Genetic Algorithm for the k-center Location Problem, *XIV EWGLA*, Corfu, Greece, pp.40.
- [Мил09] Миланков В. (2009) Развој еволуционе мисли, *АРХЕ*, Филозофски факултет Универзитета у Новом Саду, <http://www.arhe.rs/sh/arhe-11/razvoj-evolucionе-misli>
- [Mit99] Mitchell M. (1999) *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [Mir90] Mirchandani P.B. and Francis R.L. (1990) *Discrete Location Theory*, John Wiley & Sons.

- [Mla97] Mladenovic N., Hansen P. (1997) Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research* **24**(11): 1097-1100.
- [Mos89] Moscato P. (1989) *On Genetic Crossover Operators for Relative Order Preservation*, Caltech Concurrent Computation Program, C3P Report 778.
- [Müh97] Mühlenbein H. (1997) Genetic Algorithms, *Local Search in Combinatorial Optimization*, eds. Aarts E.H.L, Lenstra J.K., John Wiley & Sons Ltd, pp. 137-172.
- [Nak84] Nakayama H., Sawaragi Y. (1984). Satisficing Trade-off Method for Multiobjective Programming. In Graver, M., Wierzbicki, A. P., eds, *Interactive Decision Analysis: Proceedings*, Springer-Verlag, Berlin pp: 113-122.
- [Nic05] Nickel S., Puerto J. (2005) *Location theory: a unified approach*, Springer-Verlag, Berlin.
- [OKe86] O’Kelly M. E. (1986) The location of interacting hub facilities. *Transportation Science* **20**: 92-106.
- [OKe87] O’Kelly M.E. (1987) A quadratic integer program for the location of interacting Hub facilities. *European Journal of Operational Research* **32**: 393-404.
- [OKe91] O’Kelly M. E., Miller H. J. (1991) Solution Strategies for the Single Facility Minimax Hub Location Problem, *Papers in Regional Science: The Journal of the RSAI* **70**: 367-380.
- [OKe92] O’Kelly M. E. (1992) Hub Facility Location with Fixed Costs, *Papers in Regional Science. The Journal of the RSAI* **77**(1): 293-306.
- [OKe94] O’Kelly M. E., Miller H.J. (1994) The Hub Network Design Problem, *Journal of Transport Geography*, **2**(1): 31-40.
- [OKe96] O’Kelly M. E., Bryan D., Skorin-Kapov D., Skorin Kapov J. (1996) Hub Network Design with Single and Multiple Allocation: A Computational Study, *Location Science* **3**: 125-138.

- [OKe98a] O'Kelly M. E. (1998) A geographer's analysis of hub-and-spoke networks, *Journal of Transport Geography*, Vol. 6, Iss. 3, pp. 171–186.
- [OKe98b] O'Kelly M. E. (1998) On the Allocation of a Subset of Nodes to a Mini-Hub in a Package Delivery Network, *Papers in Regional Science. The Papers of RSAI* 77(1), pp. 77-99.
- [OKe98c] O'Kelly M. E., Bryan D. (1998) Hub Location With Flow Economies of Scale, *Transportation Research B* 32(8): 605-616.
- [Orv93] Orvosh D., Davis L. (1993) Shall We Repair? Genetic Algorithms, Combinatorial Optimization, and Feasibility Constraints, in: *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms - ICGA '93*, Morgan Kaufmann, San Mateo, Calif., pp. 650.
- [Osm96b] Osman I.H., Laporte G. (1996) Metaheuristic: A bibliography, *Annals of Operations Research* 63: 513-623.
- [Osy78] Osyczka A. (1978) An Approach to Multicriterion Optimization Problems for Engineering Design. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 15: 309-333.
- [Osy84] Osyczka A. (1984) *Multicriterion Optimization in Engineering with FORTRAN programs*. Ellis Horwood Limited.
- [Osy85] Osyczka A. (1985) Multicriteria optimization for engineering design. In Gero, J. S., editor, *Design Optimization*, pages 193-227. Academic press.
- [Owe98] Owen S.H., Daskin M.S. (1998) Strategic facility location: A review, *European Journal of Operational Research* 111: 423-447.
- [Oxf09] *Oxford Economics Report. (2009) The Impact of the Express Delivery Industry on the Global Economy*, Oxford Economics, <http://www.euroexpress.org/facts-figures>
- [Pam01] Pamuk P., Sepil C. (2001) A Solution to the Hub Center Problem via a Single-Relocation Algorithm With Tabu Search, *IEE Transactions* 23: 399-411.

- [Par96] Pareto V. (1896) *Cours D'Economie Politique*, volume I&II. F. Rouge, Lausanne.
- [Pér98] Pérez-Pérez M., Almeida Rodriguez F., Moreno Vega J.M., (1998) Fast Heuristics for the p-Hub Location Problem, *Presented in EWGLAX*, Murcia, Spain (1998).
- [Pér00] Pérez-Pérez M., Almeida Rodriguez F., Moreno Vega J.M. (2000) Genetic Algorithm With Multistart for the p-Hub Median Problem, *Proceedings of EUROMICRO 98, IEEE Computer Society*, pp.702-707.
- [Pér04] Pérez-Pérez M., Almeida Rodriguez F., Moreno Vega J.M. (2004) On the Use of the Path Relinking for the p-Hub Median Problem, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3004, pp. 155-164.
- [Pir98] Pirkul H., Schilling D.A. (1998) An Efficient Procedure for Designing Single Allocation Hub and Spoke Systems, *Management Science*, **44**(12): 235-242.
- [Rai69] Raiffa H. (1969) Preferences for Multi-Attributed Alternatives. Technical Report RM-5868-DOT/RC, *Rand Corporation.*, Santa Monica, California.
- [Rao84] Rao S. S. (1984) Multiobjective Optimization in Structural Design with Uncertain Parameters and Stochastic Processes. *AIAA Journal* **22**(11): 1670-1678.
- [Rao86] Rao S. S. (1986) Game Theory Approach for Multiobjective Structural Optimization. *Computers and Structures* **25**(1): 119-127.
- [Rec71] Rechenberg I. (1971) *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Dr.-Ing. Thesis, Technical University of Berlin, Department of Process Engineering.
- [ReV05] ReVelle C.S., Eiselt H.A. (2005) Location analysis: A synthesis and survey, *European Journal of Operational Research* **165**: 1-19.

- [ReV08] ReVelle C.S., Eiselt H.A., Daskin M.S. (2008) A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science, *European Journal of Operational Research* **184**: 817-848.
- [Ree93] Reeves C.R. (1993) *Genetic Algorithms*, Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems, John Willy and Sons, New York.
- [Rig09] Righini G. (1995) A double annealing algorithm for discrete location/allocation problems, *European Journal of Operational Research* **86**: 452-468.
- [Rod13] Rodrigue J.P. (2013) Hubs of major air freight integrators. Dept. of Global Studies&Geography, Hofstra University, New York. <http://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch5en/appl5en/upshubs.html>
- [Roy71] Roy B. (1971) Problems and methods with multiple objective functions. *Mathematical programming* **1**(2): 239-266.
- [Roy93] Roy B., Bouyssou D. (1993) *Aide Multicritère à la decision: Méthodes et Cas*. Economica., Paris.
- [Sar93] Sarma G. V., Sellami L., Houam K. D. (1993) Application of Lexicographic Goal Programing in Production Planning – Two case studies. *Opsearch* **30**(2): 141-162.
- [Sas99] Sasaki M., Suzuki A., Drezner Z. (1999) On the Selection of Hub Airports for an Airline Hub-and-Spoke, *Computers & Operations Research* **26**: 1411-1422.
- [Sch84] Schaffer J. D. (1984) *Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms*. PhD thesis, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee.
- [Sch85] Schaffer J. D. (1985) Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms. In *Genetic Algorithms and their Applications: Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms*, pages 93-100. Hillsdale, New Jersey, Lawrence Erlbaum.

- [Shf92] Schaffer J.D., Whitley D., Eshelman L.J. (1992) Combinations of genetic algorithms and neural networks: A survey of the state of the art, In: *International Workshop on Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks*, Whitley D. and Schaffer J.D. (eds.), IEEE Press, Los Alamitos, CA.
- [Сим08] Симић В., Шелмић М., Димитријевић Б., Теодоровић Д. (2008) Решавање локацијског проблема непокривања применом Оптимизације колонијом пчела, *Симпозијум о операционим истраживањима SYM-OP-IS*, Зборник радова, Соко Бања, стр. 293-297.
- [Sko94] Skorin-Kapov D., Skorin Kapov J. (1994) On Tabu Search for the Location of Interacting Hub Facilities, *European Journal of Operational Research*, **73**: 502-509.
- [Sko96] Skorin-Kapov D., Skorin-Kapov J., O'Kelly M. (1996) Tight Linear Programming Relaxations of Uncapacitated p-hub Median Problems, *European Journal of Operational Research* **94**: 582-593.
- [Smi07] Smilowitz K. R., Daganzo C. F. (2007) Continuum Approximation Techniques for the Design of Integrated Package Distribution Systems. *Networks* **50**: 183-196.
- [SmA93] Smith A.E., Tate D.M. (1993) Genetic optimization using a penalty function, in: *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, San Mateo, Calif., pp. 499-505.
- [SmH09] Smith H. K., Laporte G., Harper P. R. (2009) Locational analysis: highlights of growth to maturity. *Journal of the Operational Research Society* **60**: S140-S148.
- [SmK95] Smith K., Krishnamoorthy M., Palaniswami M. (1995) On the Location of Interacting Hub Facilities: Neural Versus Traditional Approaches, *Proceedings of the 13th National Australian Society of Operations Research Conference*, pp. 423-432.

- [SmR93] Smith R., Forrest S., Perelson A.S. (1993) Searching for diverse, cooperative populations with genetic algorithms, *Evolutionary Computation*, Vol. 1, No.2, pp. 127-149.
- [Sol69] Solich R. (1969) Zадание програмования liniowego z wieloma funkcjami celu (Linear Programming Problem with Several Objective Functions). *Przegląd Statystyczny* **16**: 24-30. (In Polish)
- [Spe91] Spears W., De Jong K. (1991) On the Virtues of Parametrized Uniform Crossover, in: *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, San Mateo, Calif., pp. 230-236.
- [SrM94] Srinivas M., Patnaik L.M. (1994) Genetic Algorithms: A Survey, *IEEE Computer*, pp. 17-26.
- [SrN94] Srinivas N., Deb K. (1994) Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation* **2**(3): 221-248.
- [Sta04] Станимировић З. (2004) *Решавање неких дискретних локацијских проблема применом генетских алгоритама*, Магистарски рад, Математички факултет, Београд.
- [Sta07] Станимировић З. (2007) *Генетски алгоритми за решавање неких НП-тежких хаб локацијских проблема*, Докторска дисертација, Математички факултет, Београд.
- [Sta07a] Stanimirović Z., Kratica J., Dugošija Đ. (2006) Genetic Algorithms for Solving the Discrete Ordered Median Problem, *European Journal of Operational Research* **182**(3): 983-1001.
- [Sub10] Subramanian A., Drummond L.M.A., Bentes C., Ochi L.S., Farias R. (2010) A parallel heuristic for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Computers & Operations Research* **37**(11): 1899-1911.
- [Sum02] Suman B. (2002) Multiobjective simulated annealing a metaheuristic technique for multiobjective optimization of a constrained problem, *Foundations of Comput Decision* **27**: 171-191.

- [Sum06] Suman B., Kumar P. (2006) A survey of simulated annealing as a tool for single and multiojective optimization, *Journal of the operational research society* **57**: 1143–1160.
- [Sun01] Sung C.S., Jin H.W. (2001) Dual Based Approach for a Hub Network Design Problem Under Non-Restrictive Policy, *European Journal of Operational Research* **132**: 88-105.
- [Sys91] Syswerda G. (1991) A study of reproduction in generational and steady-state genetic algorithms, *Foundations of Genetic Algorithms - FOGA*, Rawlins G.J. (ed.), Morgan Kaufmann Publishers, pp. 94-101.
- [Tan07] Tan P.Z., Kara B.Y. (2007). A hub covering model for cargo delivery systems. *Networks* **4**: 28-39. <http://bkara.bilkent.edu.tr/hubloc.htm>
- [Teo89] Teodorović D., Krčmar-Nožić E. (1989) Multicriteria Model to Determine Flight Frequencies on an Airline Network under Competitive Conditions, *Transportation Science* **23**(1): 14-25.
- [Teo03] Teodorović D. (2003) Transport Modeling by Multi-Agent Systems: A Swarm Intelligence Approach. *Transport. Plan. Techn.* **26**: 289–312.
- [Teo05] Teodorović D., Dell’Orco M. (2005) Bee colony optimization – a cooperative learning approach to complex transportation problems. In: *Advanced OR and AI Methods in Transportation. Proceedings of the 10th Meeting of the EURO Working Group on Transportation*, Poznan, Poland, pp. 51–60.
- [Teo08] Teodorović D. (2008) Swarm Intelligence Systems for Transportation Engineering: *Principles and Applications. Transp. Res. Pt. C-Emerg. Technol.* **16**: 651-782.
- [Teo08a] Teodorović D., Dell’Orco M. (2008) Mitigating traffic congestion: solving the ride-matching problem by bee colony optimization, *Transport. Plan. Techn.* **31**: 135–152.
- [Teo08b] Теодоровић Д., Шелмић М. (2008) Решавање проблема p - центара применом Оптимизације колонијом пчела, *Симпозијум о*

- операционим истраживањима SYM-OP-IS*, Зборник радова, Соко Бања, стр. 591-594.
- [Teo09] Teodorović D. (2009) Bee Colony Optimization (BCO), In: *Lim CP, Jain LC, Dehuri S (eds) Innovations in Swarm Intelligence*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 39-60.
- [Teo12] Теодоровић Д., Шелмић М (2012) *Рачунарска интелигенција у саобраћају* Саобраћајни факултет, Београд.
- [Top05] Topcuoglu H., Corut F., Ermis M., Yilmaz G. (2005) Solving the Uncapacitated Hub Location Problem Using Genetic Algorithms, *Computers & Operations Research* **32**: 967-984.
- [Toš04] Тошић Д., Младеновић Н., Кратика Ј., Фиповић В. (2004) *Genetski algoritmi*, Matematički institut SANU, Beograd.
- [Tse90] Tseng C. H., Lu T. W. (1990) Minimax Multiobjective Optimization in Structural Design. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **30**: 1213-1228.
- [Uck93] Uckun S., Bagchi S., Kawamura K., Miyabe Y. (1993) Managing Genetic Search in Job Shop Scheduling, *IEEE Expert*, pp. 15-24.
- [Vas08] Vassiliadis V., Dounias G. (2008) Nature inspired intelligence for the constrained portfolio optimization problem. In: *Artificial Intelligence: Theories, Models and Applications*, LNCS 5138. Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg, pp. 431–436.
- [vNe47] von Neumann J., Morgenstern O. (1947) *Theory of Game and Economic Behavior*. Princeton University Press., Princeton, New Jersey, second edition.
- [Wan12] Wang H. F., Chen Y, Y. (2012) A genetic algorithm for the simultaneous delivery and pickup problems with time window. *Computers & Industrial Engineering* **62**(1): 84-95.

- [Wan13] Wang H. F., Chen Y, Y. (2013) A coevolutionary algorithm for the flexible delivery and pickup problem with time windows. *International Journal of Production Economics* **141**(1): 4-13.
- [Yam05] Yaman H, Carello G. (2005) Solving the Hub Location Problem With Modular Link Capacities, *Computers & Operations Research* **32**: 3227 – 3245.
- [Yig03] Yigit V., Turkbey O. (2003) An approach to the facility location problems with hill-climbing and simulated annealing, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* **18**, №4: 45-56.
- [Yu77] Yu P. L. (1977) Decision dynamics with an application to persuasion and negotiation. In Starr, M. K., Zeleny, M., eds, *Multiple Criteria Decision Making*, pages 147-157. North-Holland., Amsterdam.
- [Zak11] Zak J., Redmer A., Sawicki P. (2011) Multiple objective optimization of the fleet sizing problem for road freight transportation. *Journal of advanced transportation*. 45 (4): 321-347.
- [Zel77] Zeleny M. (1977) Adaptive displacement of preferences in decision making In Starr, M. K., Zeleny, M., eds, *Multiple Criteria Decision Making*, vol. 6 of *TIMS Studies in the Management Sciences*, pages 147-157. North-Holland, Amsterdam.
- [Zid12] Zidi I., Mesghouni K., Zidi K., Ghedira K. (2012) A multi-objective simulated annealing for the multi-criteria dial a ride problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **25**(6): 1121-1131.
- [DHL] <http://www.dhl.com/en.html>
- [FDX] <http://www.fedex.com>
- [TNT] <http://www.tnt.com/portal/location/en.html>
- [UPS] <http://www.ups.com/>

Биографија аутора

Мр Александар Чупић је рођен у Прокупљу 1978. године. Основну школу "9. Октобар" и гимназију "Топлички хероји" завршио је са одличним успехом и Вуковим дипломама за постигнуте резултате. Саобраћајни факултет Универзитета у Београду, ПТТ смер, завршио је 2003. године са просечном оценом у току студија 9,05 (девет и 5/100) и оценом 10 (десет) на дипломском испиту.

Последипломске студије на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду, смер за поштански и телекомуникациони саобраћај, уписао је школске 2003/2004. године и положио све испите са просечном оценом 10.00. Као студент основних и последипломских студија за показани успех добио је следеће награде и признања: Стипендије Владе Републике Србије, Стипендије Министарства науке и технолошког развоја, Стипендија за развој научног и уметничког подмлатка. Магистарски рад са темом „Методологија избора техничког система за аутоматску прераду пакета у главним поштанским центрима“ одбранио је 2007. године.

Од 2004. године је запослен на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду као асистент – приправник. За асистента на Саобраћајном факултету изабран је децембра 2007. године и реизабран 2010.године, за ужу научну област Експлоатација, аутоматизација и информатизација поштанског саобраћаја. На основним академским студијама ангажован је у извођењу наставе на предметима: Технологија механизоване прераде поштанских пошиљака; Аутоматизација процеса у поштанском саобраћају; Механизација претовара и транспортна средства у поштанском саобраћају; Аутоматизација и информационе технологије у поштанском саобраћају. На мастер академским студијама ангажован је у извођењу наставе на предмету: Поштанска технологија.

Области интересовања мр Александра Чупића су хаб локацијски проблеми, вишекритеријумска анализа и оптимизација, развој метахеуристичких алгоритама и њихова примена у решавању саобраћајних проблема, експлоатација и аутоматизација поштанског саобраћаја. Аутор је и коаутор једног универзитетског уџбеника и више од 35 научних радова објављених у часописима, на домаћим и

иностраним конференцијама. Као члан ауторског тима учествовао је у изради 8 научно-истраживачких и стручних студија и пројеката. Мр Александар Чупић је члан организационог одбора Симпозијума о новим технологијама у поштанском и телекомуникационом саобраћају – ПОСТЕЛ и члан удружења за моделовање и симулације Србије – СРБИСИМ. Служи се енглеским и руским језиком.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани мр Александар М. Чупић

број индекса _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ПРОЈЕКТОВАЊЕ ТРАНСПОРТНИХ МРЕЖА ПРИМЕНОМ ЕВОЛУЦИОНОГ
РАЧУНАРСТВА: МРЕЖА ЗА ПРЕНОС ЕКСПРЕС ПОШТАНСКИХ
ПОШИЉАКА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, _____

Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије
докторског рада**

Име и презиме аутора мр Александар М. Чупић

Број индекса _____

Студијски програм _____

Наслов рада ПРОЈЕКТОВАЊЕ ТРАНСПОРТНИХ МРЕЖА ПРИМЕНОМ
ЕВОЛУЦИОНОГ РАЧУНАРСТВА: МРЕЖА ЗА ПРЕНОС ЕКСПРЕС
ПОШТАНСКИХ ПОШИЉАКА

Ментор: Проф. др Душан Теодоровић, дописни члан САНУ

Потписани: мр Александар М. Чупић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, _____

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ПРОЈЕКТОВАЊЕ ТРАНСПОРТНИХ МРЕЖА ПРИМЕНОМ ЕВОЛУЦИОНОГ РАЧУНАРСТВА: МРЕЖА ЗА ПРЕНОС ЕКСПРЕС ПОШТАНСКИХ ПОШИЉАКА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
- ③. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

Потпис докторанда

У Београду, _____
