

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Nenad S. Kojić

**PRIMENA NEURALNIH MREŽA
U REŠAVANJU
TRANSPORTNIH PROBLEMA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Beograd, 2012.

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Nenad S. Kojić

**APPLICATION OF NEURAL NETWORK
IN SOLVING OF
TRANSPORTATION PROBLEMS**

DOCTORAL DISSERTATION

Belgrade, 2012.

Mentor:

Vanr. prof, dr Irini Reljin, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Članovi:

Red. prof. u penziji, dr Branimir Reljin, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet

Van. prof, dr Aleksandar Nešković, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet

Prof. emeritus, dr Srđan Stanković, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet

Red. prof, dr Katarina Vukadinović, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet

Datum odbrane: _____

Прилог 2.

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

Име и презиме аутора НЕНАД КОЈИЋ
Број уписа /
Студијски програм /
Наслов рада ПРИМЕНА НЕУРАЛНИК МРЕЖА У РЕШАВАЊУ ТРАНСПОРТНИХ ПРОБЛЕМА
Ментор ВАНР. ПРОФ. ДР ИРИНИ РЕЉИЋ, УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ,
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
Потписани НЕНАД КОЈИЋ

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла 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.

У Београду, 12.6.2012.

Потпис докторанда

Јојџ Јењег

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

ПРИМЕНА НЕУРАЛНИХ МРЕЖА У
РЕШАВАЊУ ТРАНСПОРТНИХ ПРОБЛЕМА

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/ла.

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

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, 12. 6. 2012.

Потпис докторанда



1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.

PRIMENA NEURALNIH MREŽA U REŠAVANJU TRANSPORTNIH PROBLEMA

Rezime:

Dvadeseti vek je obeležen ekspanzijom u razvoju, proizvodnji i primeni računara i sofisticiranih elektronskih uređaja najrazličitijih namena. Niska cena računara, dostupnost Interneta, stalni razvoj i poboljšanja na nivou pristupne mreže, razvoj servisa koji omogućavaju najširi spektar mogućnosti i obavezno obrazovanje u domenu računarske pismenosti, stvorili su milijarde korisnika na celom svetu.

Danas na tržištu postoji izuzetno veliki broj telekomunikacionih korisničkih uređaja i usluga koji se permanentno povećavaju, usložnjavaju i modifikuju. Među velikim brojem korisničkih servisa, korisnicima su na raspolaganju i vrlo sofisticirani multimedijalni servisi koji rade u realnom vremenu i u interakciji sa jednim ili većim brojem drugih korisnika (mogućnost kreiranja i distribucije multimedijalnog sadržaja, *streaming* audio i video fajlova, video konferencije, četovi, rad sa distribuiranim bazama podataka, itd.). Mobilni uređaji danas omogućavaju realizaciju skoro svih integrisanih korisničkih funkcionalnosti i servisa, koje su do skoro realizovali posebni uređaji. Danas imamo mogućnost prijema TV signala na mobilnim uređajima, pristup web i mail serverima i servisima, pristup specijalizovanim korisničkim servisima i informacijama i sl. Obzirom da je prisutna vrlo aktivna tržišna konkurencija, i da davaoci usluga uvek žele da ponude novi i bolji proizvod, to neminovno dovodi do stalnog razvoja, usavršavanja i primene novih tehnoloških rešenja kod proizvođača.

Svi navedeni servisi svoj način rada baziraju na prenosu većeg broja informacija, čime se gustina saobraćaja u komunikacionim mrežama stalno povećava. Savremeni servisi zahtevaju strukturu mreža sa većim propusnim opsezima, većim brojem alternativnih putanja, bržim prenosom, malim kašnjenjem itd. Sa druge strane, korisnici očekuju kvalitetne servise, dostupnost mreže, garancije određenog kvaliteta i brz odziv sistema.

Imajući sve ovo u vidu, jasno je da struktura i kvalitet komunikacione mreže moraju permanentno da se povećavaju i poboljšavaju. Pored toga, neophodna je stalna evaluacija uređaja i algoritama za rutiranje, koji mogu da obezbede pouzdanu i kvalitetnu komunikaciju.

Danas postoji veliki broj stručnih radova koji na najrazličitije načine pokušavaju da doprinesu unapređenju kvaliteta prenosa signala. Kako su zahtevi sve složeniji, nameće se potreba za sve sofisticiranijim tehnologijama i alatima koji mogu da ponude bolje performanse.

Jadna ovakva grupa alata je bazirana na primeni modela i mehanizama koji postoji kod visoko inteligentnih živih bića, i naziva se veštačka inteligencija (*Artificial intelligence*). Posebnu podgrupu čine alati bazirani na principima rada ljudskog mozga, u smislu detekcije nadražaja, prenosa informacija, memorisanja i načina odlučivanja. Ova naučna disciplina obrađena je kroz Veštačke neuralne mreže (*Artificial neural networks*).

U ovoj disertaciji su prikazane pojedine mogućnosti veštačkih neuralnih mreža, date njihove komparativne prednosti u odnosu na standardne računarske uređaje i izvršena njihova klasifikacija u odnosu na veći broj kriterijuma.

Posebno je obrađena jedna grupa veštačkih neuralnih mreža, pod nazivom rekurentne neuralne mreže, iz razloga što pokazuju vrlo dobre rezultate u rešavanju složenih optimizacionih problema. Kako je istaknuti predstavnik ove grupe mreža Hopfield-ova neuralna mreža, to je ona izabrana za rešavanje transportnih problema kojima se bavi ova disertacija.

U disertaciji je detaljno analizirano kreiranje matematičkog modela Hopfield-ove neuralne mreže i mogućnosti hardverske realizacije istog. Posebna pažnja posvećena je definisanju termina energijske funkcije, koji ima ključnu ulogu u radu Hopfield-ove neuralne mreže. Obzirom na problem ispravnog izbora energijske funkcije, obrađene su relacije koje definišu opštu konvergenciju energijske funkcije i analizirani su uslovi za stabilnost rada ove mreže. Obzirom da se ova mreža može koristiti za rešavanje složenih optimizacionih problema, ukazano je na mogućnost pojave lažnih stanja koja se mogu javiti u njenoj implementaciji. Polazeći od opšteg modela Hopfield-ove neuralne mreže, njene primene na rešavanje problema Trgovačkog putnika, ali i modifikacija koje su drugi autori realizovali u cilju pronalaženja najkraće putanje, objašnjene su sve relacije koji opisuju datu mrežu, a koje su kasnije korišćene kao polazna osnova za dalje modifikacije koje uvodi disertacija.

Shodno opisanim potrebama za unapređenjem kvaliteta protokola za rutiranje, u ovoj disertaciji je razvijen modifikovani model Hopfield-ove neuralne mreže namenjen

dinamičkom *multicast* rutiranju u paketskom saobraćaju. Ukazano je na probleme u distribuciji i rutiranju multimedijalnog sadržaja, i na bazi definisanih uslova za njihov prenos, opisani su postojeći algoritmi i metode koje se trenutno koriste. Kako je primarni problem u *multicast* rutiranju formiranje *multicast* stabla, u ovoj disertaciji je predloženo rešenje bazirano na Hopfield-ovoj neuralnoj mreži. Da bi predloženo rešenje odgovaralo realnim uslovima rada, analizirana je višekriterijumska optimizacija pet različitih mrežnih parametara i opisan način za dobijanje *multicast* putanje u mreži proizvoljne topologije. Dobijeni rezultati su poređeni sa rezultatima dostupnim u stručnoj literaturi. Analizirajući veći broj različitih kriterijuma, dobijeni rezultati pokazuju bolji ili bar isti kvalitet. Pored toga, analiziran je veći broj performansi predloženog rešenja (brzina rada, potreban broj iteracija, verovatnoća blokade, skalabilnost rešenja, itd.).

U disertaciji je predložen i novi način određivanja optimalnog broja iteracija u radu Hopfield-ove neuralne mreže, i na taj način kreirana logika u cilju minimizacije potrebnog broja iteracija i vremena rada mreže. Pokazano je da dobijeni rezultati imaju daleko bolje performanse od sličnih u dostupnoj literaturi.

Imajući u vidu da je predloženo rešenje vezano za rutiranje informacija u računarskim mrežama, analizirani su i algoritmi za rutiranje u optičkim mrežama. Obzirom da sve veći broj komunikacionih mreža prelazi na tehnologiju optičkog vlakna, posebno zahtevni uslovi se nameću kod algoritama za rutiranje svetlosnog signala. U disertaciji je predložen novi algoritam za rutiranje i dodelu talasnih dužina u potpuno optičkim mrežama. Ovde su prikazane sve faze u kreiranju modela, modifikacije originalne topologije optičke mreže, kreiranje modifikovane energijske funkcije Hopfield-ove neuralne mreže i primena iste na problem rutiranja svetlosnog signala. Predloženo rešenje omogućava veliki stepen skalabilnosti i prilagodljivosti na realna ograničenja u pojedinim optičkim mrežama. Pored ovoga, analizirani su i rezultati za dodatni predloženi model koji rešava problem faze rutiranja (unutar algoritma rutiranja i dodela talasnih dužina), dok su za potrebe dodele talasnih dužina korišćeni, opisani, standardizovani algoritmi.

Kako je Hopfield-ova neuralna mreža pokazala dobre rezultate u domenu višekriterijumske optimizacije u domenu rutiranja signala, analizirana je i moguća primena njenog modifikovanog modela na rešavanje opštijih transportnih problema. U

disertaciji je predloženo rešenje za pronalaženje nove putne trase, koja je sastavni deo analize i planiranja saobraćaja i prostora. Obzirom da je potrebno analizirati uticaj geomorfoloških i društveno-ekonomskih karakteristika terena na izgradnju trase, ali i uticaj trase na političke, ekonomske i ekološke faktore, predloženo je rešenje na bazi višekriterijumske analize većeg broja nekonzistentnih faktora sa različitim uticajima. Predloženo rešenje je testirano u realnim uslovima na terenu Republike Srbije i može da posluži kao pomoćno sredstvo prilikom izrade studija o novim putnim pravcima.

Sva predložena rešenja, ili modeli kojima se dodatno mogu poboljšati postojeći algoritmi, izloženi u ovoj disertaciji, ukazuju da je primena Hopfield-ove neuralne mreže opravdana u većem broju različitih tipova problema koji zahtevaju rešavanje višekriterijumskih optimizacionih problema.

Ključne reči: Veštačke neuralne mreže, Hopfield-ova neuralna mreža, algoritmi za rutiranje, *multicast* rutiranje, Rutiranje i dodela talasnih dužina, planiranje putnih trasa, višekriterijumska optimizacija.

Naučna oblast: Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo

Uža naučna oblast : Neuralne mreže

UDK broj: 621.3

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS IN SOLVING OF TRANSPORTATION PROBLEMS

Abstract:

The twentieth century has been marked by the expansion and development of new computer applications as well as sophisticated electronic devices for various purposes. Low cost of computer components, Internet availability, continuous development and improvement of the network access, development of services that enable the widest range of options and compulsory education in the field of computer literacy, have generated billions of users worldwide.

Nowadays, the market of telecommunications users' devices and services, is extremely rich and it is constantly increasing, and being modified by more complex applications and devices. Among the large number of services, users are offered by highly sophisticated multimedia services that work in real time, interacting with one or more users. They have the opportunity to create and distribute multimedia content, to stream audio and video files, to create video conferences, chats, working with distributed databases, etc. Mobile devices now allow realization of almost all of the integrated users' service and functionalities, which until recently have been realized by special devices. Today we have the possibility of receiving TV signals on mobile devices, access to web and mail servers and services, as well as access to specialized services and information. Concerning very active market competition, and the fact that providers always want to offer new and better products, continuous development is inevitable, combined with constant improvement and application of new technological solutions.

All above mentioned services are based on transfer of large amounts of information, and on that way they are constantly increasing the density of traffic in communication networks. Modern services require network structure with higher bandwidth ranges, larger number of alternative paths, fast transfer, low delays etc. On the other hand, users expect high quality services, fast access to networks, the guarantee of certain quality and quick response systems.

Bearing this in mind, it is clear that the structure and quality of communication network permanently needs to grow and improve. In addition, ongoing evaluation of devices and algorithms for routing providing reliable and solid communication is needed..

Today, there are a large number of scientific papers aimed to improve the quality of signal transmission. With the increase of complexity of demands, the need for more sophisticated tools, that can offer better performances exists.

One such group of tools is based on application of models and mechanisms that exist in highly intelligent entities, is *artificial intelligence*. Its special sub-group consists of tools based on the principles of the human brain, in terms of stimulus detection, transmission, storage, and decision-making process. This scientific discipline is realized through *artificial neural networks*.

This dissertation presents capabilities of artificial neural networks, their comparative advantages over standard computing devices, and clasifies them in relation to a number of criteria.

Special emphasis is given on recurrent neural networks as a very important artificial neural networks. They show very good results in solving of complex optimization problems. As a prominent representative of this group of networks Hopfield neural network is considered here. This type of network has been chosen for solving of the transport problems, dealt with in this dissertation.

The dissertation examines in detail the creation of a mathematical model of Hopfield's neural network and the capabilities of its hardware implementation. Special attention has been paid to defining of the *Energy function*, which plays a key role in the Hopfield neural network implementation. Given the proper choice of energy function, the relations that define the general convergence of energy functions were handled and analyzed the conditions for the stability of the network. Since this network can be used for solving complex optimization problems, we point out the possibility of false situations that may arise in its implementation. Starting from the general model of Hopfield's neural network, its application in solving of the *Traveling salesman problem*, as well as modifications that were implemented by other authors with the goal of finding of the shortest path, all relationships that describe a given network are

explained. These have been used later on as a basis for further modifications introduced by this thesis.

In connection to the requirements described for improving of the quality of a routing protocol, in this dissertation, a modified model of Hopfield's neural network designed for dynamic *multicast* routing in packet traffic is shown. The problems in the distribution and routing of multimedia content were defined, and based on defined transfer preconditions the existing algorithms and methods that are currently used are described here. The primary problem in *multicast* routing is *multicast* tree establishment, and the solution based on the Hopfield's neural network is proposed here. In order to fit the proposed solution with the real conditions, the multicriteria optimization of five different network parameters with the description of obtaining of the multicast path in a network of arbitrary topology is explained. The results were compared with results available in the literature. By analyzing a number of different criteria, the obtained results show a better or at least the same quality of the final solution than others. In addition, we analyzed the performance of a number of solutions (operation speed, the required number of iterations, the probability of blocking, scalable solutions, etc.).

The dissertation proposes a new way of determining of the optimal number of iterations in the Hopfield neural network implementation. In this way a logic of minimizing of the required number of iterations and network operation time is derived. It is shown that the results are significantly better than similar ones in literature.

Since the proposed solution is given regarding the routing information in computer networks, the algorithms for routing in optical networks were analyzed, too. Having in mind the existence of increased number of communication networks and that it goes towards the optical fiber technology implementation, particularly demanding conditions are imposed to algorithms for routing of the optical signal. The dissertation proposes a new algorithm for routing and wavelength assignment in all-optical networks. This solution shows all of the stages in the creation of models, modifications of the original topology of optical networks, creating a modified energy function of Hopfield's neural network and usage of the same one in optical routing problem. The proposed solution allows a high degree of scalability and adaptability to the real limitations in certain optical networks. We have further analyzed the results of the

additional proposed model that solves the problem of routing phase (within the routing algorithm and assignment of wavelengths), while for the allocation of wavelengths we have used the described standardized algorithms.

Since Hopfield's neural network showed good results in the field of multicriteria optimization in the domain of routing signal, we analyzed its possible application of the modified model to solve more general transport problems. The dissertation proposed solution for finding optimal alignment of the new road junction, which is an integral part of business analysis and transportation planning. Whereas it is necessary to analyze the influence of geomorphologic features of the ground on construction of the route, and track the impact of political, economic and environmental factors, the proposed solution is based on multicriteria analysis of a number of factors inconsistent with the effects differed. The proposed solution is tested in real conditions on the ground of the Republic of Serbia, and it can be used as an aid in conducting studies on new roads.

All proposed solutions, or models that can further improve the existing algorithms, are presented here. They indicate that the use of Hopfield's neural network is justified in a number of different types of problems that need solving multicriteria optimization problems.

Keywords: Artificial neural networks, Hopfield neural networks, routing algorithms, multicast routing, routing and wavelength assignment, route selection problems, multicriteria optimization.

Scientific field: Electrical and computer engineering

Specific scientific field: Neural Networks

UDC: 621.3

SADRŽAJ

	Strana
I Spisak skraćenica	
II Spisak slika	
III Spisak tabela	
1. Uvod	1
1.1. Rešavanje problema <i>multicast</i> rutiranja u mrežama sa paketskom komutacijom	4
1.2. Rešavanje problema rutiranja i dodele talasnih dužina u optičkim mrežama	6
1.3. Rešavanje problema planiranja novih putnih pravaca u realnom okruženju	9
2. Veštačke neuralne mreže	14
2.1. Veštačka neuralna mreža naspram kompjutera	16
2.2. Razvoj veštačkih neuralnih mreža	19
2.3. Osnovne komponente neuralnih mreža	20
2.4. Način rada veštačke neuralne mreže	24
2.5. Realizacija veštačkih neuralnih mreža	30
2.6. Klasifikacija veštačkih neuralnih mreža	31
3. Hopfield-ova neuralna mreža	36
3.1. Matematički model Hopfield-ove neuralne mreže	40
3.2. Hardverska realizacija matematičkog modela Hopfield-ove neuralne mreže	43
3.3. Energijska funkcija	45
3.3.1. Dokaz opšte konvergencije energijske funkcije	48
3.3.2. Opšti uslovi stabilnosti Hopfield-ove neuralne mreže	52
3.3.3. Lažna stanja Hopfield-ove neuralne mreže	56
3.3.4. Postupak pronalaženja težinskih koeficijenata T_{ij} i njihov uticaj na stabilnost rada Hopfield-ove neuralne mreže	57
3.4. Osnovni model Hopfield-ove neuralne mreže za rešavanje otpimizacionih problema	61
3.4.1. Modifikacije Hopfield-Tank-ovog modela od strane drugih autora	62

4.	Primena Hopfield-ove neuralne mreže u dinamičkom <i>multicast</i> rutiranju paketskog saobraćaja	65
	4.1. Multimedijalni <i>multicast</i> sadržaji i servisi	67
	4.1.1. Uslovi za distribuciju multimedijalnog sadržaja	68
	4.2. Algoritmi za rutiranje	69
	4.2.1. Vrste i uticaji strukture stabala rutiranja kod <i>multicast</i> rutiranja	72
	4.2.2. Steiner-ovo stablo i njegova modifikacija	76
	4.3. Neuralna mreža za dinamičko višekriterijumsko <i>multicast</i> rutiranje	77
	4.3.1. Višekriterijumska optimizacija	77
	4.3.2. Pristupi rešavanju problema rutiranja	79
	4.3.3. Korišćeni ulazni faktori i kriterijumi u procesu rutiranja	80
	4.3.4. Modifikacija energijske funkcije za potrebe <i>multicast</i> rutiranja	83
	4.4. Rezultati višekriterijumskog <i>multicast</i> rutiranja dobijeni predloženim metodom	86
	4.4.1. Statistička analiza rezultata	96
	4.5. Optimizacija broja iteracija za rad neuralne mreže	101
	4.5.1. Predloženi postupak za određivanje optimalnog broja iteracija	103
	4.5.2. Rezultati primene predloženog metoda za redukciju broja iteracija	106
	4.6. Statistička obuka	106
	4.6.1. Proces zagrevanja i hlađenja	107
	4.6.2. Primena predloženog procesa u neuralnoj mreži	108
	4.6.3. Blok šema statističkog treniranja	109
	4.6.4. Rezultati dobijeni primenom statističke obuke	110
5.	Primena Hopfield-ove neuralne mreže u planiranju saobraćajnih (putnih) trasa	115
	5.1. Proces planiranja saobraćaja i prostora	120
	5.2. Modeli za planiranje putne mreže	125
	5.3. Kvantifikacija ulaznih podataka	127
	5.4. Struktura putne mreže	127
	5.5. Pravljenje modela za planiranje putne trase	130
	5.5.1. Realizacija predloženog modela za planiranje putne trase	132
	5.6. Primena Hopfield-ove neuralne mreže na rešavanje problema	133

planiranja putne mreže bazirane na višekriterijumskoj optimizaciji	
5.6.1. Izbor gradova i mape za implementaciju predloženog algoritma	134
5.6.2. Izbor faktora po kojima se vrši optimizacija	136
5.6.3. Obrada mape i kvantifikacija ulaznih faktora	137
5.6.4. Modifikacija energijske funkcije Hopfield-ove neuralne mreže za potrebe traženja putne trase bazirane na višekriterijumskoj optimizaciji	139
5.6.5. Način testiranja predloženog algoritma	141
5.6.6. Klasifikacija i kvantifikacija ulaznih faktora	141
5.6.7. Rezultati testiranja predloženog modela	153
6. Primena Hopfield-ove neuralne mreže u rešavanju problema	157
rutiranja u potpuno optičkim mrežama	
6.1. Arhitektura optičkih mreža	158
6.2. Topologija mreže i njeno modelovanje	161
6.3. Prenos informacija u optičkim mrežama	162
6.3.1. Osnovne tehnike rutiranja u optičkim mrežama	165
6.3.2. Algoritam <i>Routing and Wavelength Assignment</i>	168
6.4. Primena Hopfieldove neuralne mreže kod rutiranja u optičkim mrežama	172
6.4.1. Predlog algoritma za selekciju rute za rutiranje u optičkim mrežama baziranog na Hopfield-ovoj neuralnoj mreži	172
6.4.2. Predlog algoritma za rutiranje u optičkim mrežama na principu istovremene selekcije rute i dodele talasnih dužina, baziranog na Hopfield-ovoj neuralnoj mreži	178
6.5. Rezultati primene predloženog algoritma	182
Zaključak	186
Literatura	197
Biografija	207

I Skraćenice

ADALINE	<i>ADaptivni LINearni Element</i>
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
ARP	<i>Address Resolution Protocol</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
CMS _{St} TG	<i>Constrained Minimum Steiner Tree in Graph</i>
CNN	<i>Cellular Neural Networks</i>
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DLE	<i>Dynamic Lightpath Establishment</i>
ER	<i>Exhaust Routing</i>
FAR	<i>Fixed Alternate Routing</i>
FF	<i>Fixed order (first fit) assignment</i>
FR	<i>Fixed Routing</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GUI	<i>Graphic User Interface</i>
HDO	<i>Highway design optimization</i>
HDOM	<i>HDO model</i>
IGRP	<i>Interior Gateway Routing Protocol</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
JWRS	<i>Joint Wavelength Route Selection</i>
LCPR	<i>Least congested path routing</i>
LU	<i>Least used assignment</i>
MS	<i>Maximal sum</i>
MS _{St} TG	<i>Minimum Steiner tree in graph</i>
MU	<i>Most used assignment</i>
NP	<i>Nondeterministic Polynomial</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
QoS	<i>Quality of service</i>
RCL	<i>Relative capacity loss</i>
RO	<i>Random order assignment</i>

RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>
SLE	<i>Static Lighpath Establishment</i>
SPT	<i>Shortest Path Tree</i>
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WRON	<i>Wavelength Routed Optical Networks</i>

II Spisak slika

<i>Oznaka</i>	<i>Ime slike</i>	<i>Strana</i>
Slika 1.1.	Koncepti slanja paketa kod <i>unicast</i> i <i>multicast</i> rutiranja.	5
Slika 1.2.	Mogući način formiranja <i>multicast</i> stabla.	6
Slika 1.3.	Topologija mreže korišćena za demonstraciju rutiranja i dodele talasnih dužina u potpuno optičkim mrežama.	7
Slika 1.4.	Izabrane putanje za rutiranje u odnosu na topologiju mreže sa slike 1.3.	8
Slika 1.5.	Najkraća putanja između tačaka A i B u a) idealnim i b) u realnim uslovima.	9
Slika 1.6.	Jedna moguća optimalna putanja od tačke A do tačke B, u slučaju kada postoje dve oblasti (C_1^a i C_1^b) koje imaju različite jedinične cene po dužini trase.	10
Slika 1.7.	Tri moguće putanje od tačke A do tačke B, u slučaju kada postoje tri oblasti (C_1 , C_2 , C_3) koje imaju različite jedinične podoblasti sa aspekta cene po dužini trase (C_1^a , C_1^b , C_2 , C_3^a , C_3^b , C_3^c).	10
Slika 2.1.	Mozak čoveka.	21
Slika 2.2.	Grafička interpretacija izgleda a) jednog neurona i b) međusobne povezanosti neurona.	21
Slika 2.3.	Struktura biološkog neurona.	22
Slika 2.4.	Model veštačkog neurona: a) uprošćena forma i b) razvijen oblik.	23
Slika 2.5.	Prikaz slojevite arhitekture veštačke neuralne mreže.	25
Slika 2.6.	Grafički prikaz aktivacione funkcije odskočnog tipa.	27
Slika 2.7.	Grafički prikaz logičke aktivacione funkcije sa pragom.	27
Slika 2.8.	Grafički prikaz aktivacione funkcije sigmoidalnog tipa.	28
Slika 2.9.	Grafički prikaz sigmoidalne funkcije za različite vrednosti parametra α .	28
Slika 2.10.	Grafički prikaz lestvičaste jednodimenzione mreže.	32

Slika 2.11.	Grafički prikaz celularne neuralne mreže.	33
Slika 2.12.	Grafički prikaz rekurentne mreže.	34
Slika 3.1.	Struktura Hopfield-ove neuralne mreže sa četiri neurona i njihovim stanjima.	38
Slika 3.2.	Osnovna arhitektura Hopfield-ove neuralne mreže.	38
Slika 3.3.	Strukturna šema Hopfield-ove neuralne mreže pogodna za hardversku realizaciju.	39
Slika 3.4.	Model veštačkog neurona sa pragom.	40
Slika 3.5.	Grafik signum funkcije.	41
Slika 3.6.	Model Hopfield-ove neuralne mreže.	43
Slika 3.7.	Električna šema modela neurona u Hopfield-ovoj neuralnoj mreži.	43
Slika 3.8.	Električna šema realizacije Hopfield-ove neuralne mreže.	44
Slika 3.9.	Grafički prikaz dvodimenzionalnog faznog prostora Hopfield-ove neuralne mreže: a) usled promene stanja neurona b) mreže sa simetričnim, c) mreže sa nesimetričnim parovima.	47
Slika 3.10.	Grafički prikaz stanja mreže ako se energijska funkcija posmatra u dvodimenzionom sistemu.	52
Slika 3.11.	Grafički prikaz stanja mreže ako se energijska funkcija posmatra u trodimenzionom sistemu.	53
Slika 3.12.	Oblik energijske funkcije mreže sa dva neurona kada su $T_{11} = T_{12} = T_{22}$.	54
Slika 3.13.	Oblik energijske funkcije mreže sa dva neurona kada su $T_{11} = T_{22} < T_{12}$.	54
Slika 3.14.	Oblik energijske funkcije mreže sa dva neurona kada su $T_{11} = T_{22} > T_{12}$.	54
Slika 3.15.	Oblik energijske funkcije mreže sa dva neurona kada su $T_{11} = T_{12} < T_{22}$.	54
Slika 3.16.	Oblik energijske funkcije mreže sa dva neurona kada su $T_{11} < T_{12} < T_{22}$.	55
Slika 3.17.	Primer a) Matrice prelaza za četiri grada i b) Redosleda kretanja.	58

Slika 3.18.	Šematski prikaz najkraće putanje za četiri grada.	59
Slika 4.1.	Prednosti <i>multicast</i> rutiranja a) Primer potrebe da se paket kopira i šalje 100 puta za svih 100 destinacija i b) Primer upotrebe <i>multicast</i> rutera kada se šalje samo jedan paket do rutera, i tek tada se sadržaj multiplicira da bi se isporučio krajnjim korisnicima.	71
Slika 4.2.	Struktura stabla za a) <i>Source specific trees</i> i b) <i>Shared trees</i> .	73
Slika 4.3.	Korišćena početna topologija mreže [Park95].	88
Slika 4.4.	Dobijena <i>multicast</i> putanja za definisani S u grupu D^m zasnovana na ceni (rastojanju).	88
Slika 4.5.	Poređenje ukupne cene dobijenih putanja za svih pet algoritama.	89
Slika 4.6.	Poređenje broja iteracija potrebnih da se pronađe rešenje kod Ali&Kamoun-ovog, Park&Choi-jevog i predloženog algoritma.	89
Slika 4.7.	Dobijena <i>multicast</i> putanja za definisani skup S - D^m baziran na Ceni i Kapacitetu.	91
Slika 4.8.	a) Mrežna topologija nakon uvođenja uslova $K_{ij} \geq G_{ij}$ i b) Dobijena <i>multicast</i> putanja za definisane S - D^m bazirana na Ceni, Kapacitetu i Gustini saobraćaja.	92
Slika 4.9.	a) Redukovana mrežna topologija nakon uvođenja uslova $K_{ij} \geq G_{ij}$ i otkazivanja linkova R12-R16 i R11-R15 i b) Dobijena <i>multicast</i> putanja za definisane S - D^m bazirana na Ceni, Kapacitetu i Gustini saobraćaja.	92
Slika 4.10.	a) Redukovana mrežna topologija i b) Dobijena <i>multicast</i> putanja za definisane S - D^m bazirana na Ceni, Kapacitetu, Gustini saobraćaja i Kašnjenju na linkovima.	94
Slika 4.11.	a) Redukovana mrežna topologija i b) Dobijena <i>multicast</i> putanja za definisane S - D^m bazirana na Ceni, Kapacitetu, Gustini saobraćaja i Kašnjenju na linkovima uz uslov da je $T_{ij} < T_{max}$.	94
Slika 4.12.	a) Redukovana mrežna topologija i b) Dobijena <i>multicast</i>	95

putanja za definisane $S-D^m$ bazirana na ceni, kapacitetu, gustini saobraćaja i kašnjenju na linkovima uz uslov da je $T_{ij} < T_{max}$ i ruterom R1 koji je van funkcije.

Slika 4.13.	a) Redukovana mrežna topologija i b) Dobijena <i>multicast</i> putanja za definisane $S-D^m$ bazirana na Ceni, Kapacitetu, Gustini saobraćaja i Kašnjenju na linkovima uz uslov da je $T_{ij} < T_{max}$ i Statističkog opterećenja linkova.	96
Slika 4.14.	Srednja vrednost broja iteracija potrebnih da se dođe do konačne putanje u zavisnosti od broja rutera u mreži.	99
Slika 4.15.	Interpolirana srednja vrednost broja iteracija potrebnih da se dođe do konačne putanje u zavisnosti od broja rutera u mreži.	99
Slika 4.16.	Srednja vrednost potrebnog vremena [s] da se pronađe putanja u zavisnosti od broja rutera sa a) linearnom i b) logaritamskom razmerom po y osi.	100
Slika 4.17.	Srednja vrednost i varijansa broja iteracija potrebnih da se pronađe putanja u odnosu na broj rutera u mreži.	100
Slika 4.18.	Srednja vrednost i varijansa vremena [s] potrebnog da se pronađe putanja u odnosu na broj rutera u mreži.	101
Slika 4.19.	Tipičan oblik energijske funkcije.	102
Slika 4.20.	Energijske funkcije za više od 50 različitih mrežnih topologija i različitih $S-D^m$ kombinacija.	102
Slika 4.21.	Broj potrebnih iteracija da se pronađe putanja za više od 50 različitih mrežnih topologija i i različitih $S-D^m$ kombinacija.	103
Slika 4.22.	Odstupanje energijske funkcije unutar intervala [a, b].	104
Slika 4.23.	Srednji broj iteracija potreban za konačno rešenje u slučaju kada se predloženi metod (ne) koristi.	105
Slika 4.24.	Blok šema postupka statističkog treniranja neuralne mreže.	109
Slika 4.25.	Zavisnost koeficijenta M od vremena potrebnog neuralnoj mreži da dođe do rezultata, za slučaj različitih parova [$S-D^m$], kada nema statističkog treninga.	111
Slika 4.26.	Zavisnost vremena rada neuralne mreže od koeficijenta M za pojedinačne parove trening skupa bez statističkog treninga.	111

Slika 4.27.	Srednja vrednost najdužih putanja dobijena u slučaju kada se ne koristi tj. koristi statistički trening, za sve vrednosti koeficijenta M .	112
Slika 4.28.	Vreme rada neuralne mreže za slučaj kada se koristi tj. ne koristi statistički trening.	113
Slika 4.29.	Najduža putanja dobijena u slučaju kada se ne koristi tj. koristi statistički trening, sa koeficijentom $M=1$.	113
Slika 5.1.	Dostupnost lokaciji kod: a) Razruđene mreže i b) Urbane zone, gde pristup centralnom delu povećava vreme pristupa, zbog dodatnih uslova kretanja.	118
Slika 5.2.	Osnovni concept planiranja: Posledično prilagođavanje ponude budućoj tražnji [MALE04].	120
Slika 5.3.	Osnovni concept planiranja: Željeno i postojeće stanje kao glavni pokretači procesa [MALE04].	121
Slika 5.4.	Osnovni koncepti u procesu planiranja [MALE04].	121
Slika 5.5.	Strategijsko i operativno planiranje [MALE04].	122
Slika 5.6.	Opšti prikaz procesa planiranja saobraćaja [MALE04].	123
Slika 5.7.	Osnovni koraci u procesu planiranja saobraćaja [MALE04].	124
Slika 5.8.	<i>Point to point</i> struktura, veza preko Hab-a.	128
Slika 5.9.	Uticaj integracije na dostupnost u mreži i protok u njoj, a) početno stanje, i b) krajnje stanje dobijeno dodavanjem dva linka.	128
Slika 5.10.	Neke od topologija transportnih mreža a) Stvarni model u levom i apstraktni u desnom uglu leve slike, b) Topologija relativne lokacije, c) Opterećenje i kapacitet, d) Označavanja čvorova i linkova.	129
Slika 5.11.	Izbor putre trase za dve zadate lokacije.	131
Slika 5.12.	a) Neka od geografskih karakteristika koje treba razmotriti kod planiranja putnih trasa, b) Uticaj topologije terena na dozvoljene neravnine na putnoj trasi.	131
Slika 5.13.	Početna karta sa označenim gradovima Novi Sad i Valjevo.	134
Slika 5.14.	Režim zaštite u nacionalnom parku Fruška Gora.	135

Slika 5.15.	Mapa nakon podele na 25 oblasti.	138
Slika 5.16.	Mapa nakon podele na 100 oblasti.	138
Slika 5.17.	Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu <i>Reljef</i> datu u tabeli 5.2.	142
Slika 5.18.	Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu <i>Reljef</i> datu u tabeli 5.2.	142
Slika 5.19.	Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu <i>Reljef</i> datu u tabeli 5.3.	143
Slika 5.20.	Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu <i>Reljef</i> datu u tabeli 5.3.	143
Slika 5.21.	Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulazne matrice <i>Reljef</i> (datu u tabeli 5.2.) i <i>Reke</i> .	144
Slika 5.22.	Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulazne matrice <i>Reljef</i> (datu u tabeli 5.2.) i <i>Reke</i> .	144
Slika 5.23.	Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu <i>Reljef</i> (datu u tabeli 5.3.) i <i>Reke</i> .	145
Slika 5.24.	Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulazne matrice <i>Reljef</i> (datu u tabeli 5.3.) i <i>Reke</i> .	145
Slika 5.25.	Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu <i>Reljef</i> (datu u tabeli 5.3.) i <i>Reke</i> (kada su vrednosti 0.3 i 0.6 zamenjene sa 0.2 i 0.4).	145
Slika 5.26.	Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu <i>Životna sredina</i> datu u tabeli 5.5.	147
Slika 5.27.	Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu <i>Životna sredina</i> datu u tabeli 5.5.	147
Slika 5.28.	Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu <i>Životna sredina</i> datu u tabeli 5.6.	148
Slika 5.29.	Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu <i>Životna sredina</i> datu u tabeli 5.6.	148
Slika 5.30.	Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu <i>Ekonomija</i> datu u tabeli 5.8.	149
Slika 5.31.	Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu <i>Ekonomija</i>	149

	datu u tabeli 5.8.	
Slika 5.32.	Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu <i>Ekonomija</i> datu u tabeli 5.9.	150
Slika 5.33.	Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu <i>Ekonomija</i> datu u tabeli 5.9.	150
Slika 5.34.	Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu <i>Politička</i> datu u tabeli 5.11.	151
Slika 5.35.	Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu <i>Politička</i> datu u tabeli 5.11.	151
Slika 5.36.	Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu <i>Politička</i> datu u tabeli 5.12.	152
Slika 5.37.	Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu <i>Politička</i> datu u tabeli 5.12.	152
Slika 5.38.	Prikaz trase (iz Matlab-a) dobijen višekriterijumskom optimizacijom svih ulaznih parametara za kartu sa 5x5 oblasti.	153
Slika 5.39.	Prikaz trase (na fizičkoj karti) dobijen višekriterijumskom optimizacijom svih ulaznih parametara za kartu sa 10x10 oblasti.	153
Slika 5.40.	Prikaz trase (iz Matlab-a) dobijen višekriterijumskom optimizacijom svih ulaznih parametara za kartu sa 10x10 oblasti.	154
Slika 5.41.	Prikaz trase (na fizičkoj karti) dobijen višekriterijumskom optimizacijom svih ulaznih parametara za kartu sa 10x10 oblasti.	154
Slika 5.42.	Prikaz trase (na fizičkoj karti /dorađene ručno) dobijen višekriterijumskom optimizacijom svih ulaznih parametara za kartu sa 10x10 oblasti.	155
Slika 5.43.	Slojeviti prikaz putane trase dobijen višekriterijumskom optimizacijom svih ulaznih parametara za kartu sa 10x10 oblasti.	155
Slika 5.44.	Prikaz putne trase, uz dodatak karte sa rukom ucrtanom putanjom, dobijen višekriterijumskom optimizacijom svih	156

	ulaznih parametara za kartu sa 10x10 oblasti.	
Slika 6.1.	Jedna logička arhitektura rada optičke mreže.	159
Slika 6.2.	Organizacija logičke arhitekture unutar optičke mreže.	160
Slika 6.3.	Tipični način ostvarivanja konekcije unutar optičke mreže.	161
Slika 6.4.	Primeri Moore-ovih grafova.	162
Slika 6.5.	Primeri deBruijn-ovog i Kautz-og grafa.	162
Slika 6.6.	Arhitektura rutera talasnih dužina.	167
Slika 6.7.	Prosečna vrednost i standardna devijacija broja konverzija za testirane algoritme.	174
Slika 6.8.	Vreme simulacije na standardnom računaru Pentium IV, 1.5 GHz.	175
Slika 6.9.	Ukupan broj iteracija potreban za uspostavljanje odabrane putanje.	175
Slika 6.10.	Potreban broj iteracija za algoritam MU za svaku od 220 posmatranih topologija.	176
Slika 6.11.	Topologija mreže sa četiri rutera i tri talasne dužine.	178
Slika 6.12.	Predloženi model rutera za slučaj kada postoje maksimalno tri talasne dužine.	179
Slika 6.13.	Konačna modifikacija topologije mreže sa slike 6.11.	179
Slika 6.14.	Struktura novoformirane matrice C , sa slučajno dodeljenim vrednostima.	180
Slika 6.15.	Struktura dobijene matrice V , sa slučajno dodeljenim vrednostima.	181
Slika 6.16.	Korišćena početna topologija optičke mreže.	182
Slika 6.17.	Dobijena putanja pod uslovom da nema konverzije talasnih dužina u čvorovima mreže.	183
Slika 6.18.	Dobijena putanja pod uslovom da nema konverzije talasnih dužina u čvorovima mreže i da je čvor 3 nedostupan.	184
Slika 6.19.	Dobijena putanja pod uslovom da ima konverzije talasnih dužina u čvorovima mreže i da je čvor 3 nedostupan.	185

III Spisak tabela

<i>Oznaka</i>	<i>Ime tabele</i>	<i>Strana</i>
Tabela 2.1.	Mozak naspram kompjutera, poređenje karakteristika.	18
Tabela 4.1.	Poređenje osnovnih tipova stabala.	76
Tabela 4.2.	Poređenje pet algoritama sa aspekta ukupne cene putanje po njenim deonicama.	89
Tabela 4.3.	Broj iteracija potreban za pronalaženje rešenja u mreži sa 40 rutera i <i>unicast</i> rutiranjem.	106
Tabela 5.1.	Klasifikacija fizičkih karakteristika zemljišta – reljefa.	142
Tabela 5.2.	Raspodela vrednosti matrice <i>Reljef</i> po oblastima za kartu sa 5x5 oblasti.	142
Tabela 5.3.	Raspodela vrednosti matrice <i>Reljef</i> po oblastima za kartu sa 10x10 oblasti.	143
Tabela 5.4.	Klasifikacija uticaja na Životnu sredinu.	146
Tabela 5.5.	Raspodela vrednosti matrice <i>Životna sredina</i> po oblastima za kartu sa 5x5 oblasti.	146
Tabela 5.6.	Raspodela vrednosti matrice <i>Životna sredina</i> po oblastima za kartu sa 10x10 oblasti.	147
Tabela 5.7.	Klasifikacija ekonomske situacije.	148
Tabela 5.8.	Raspodela vrednosti matrice <i>Ekonomija</i> po oblastima za kartu sa 5x5 oblasti.	149
Tabela 5.9.	Raspodela vrednosti matrice <i>Ekonomija</i> po oblastima za kartu sa 10x10 oblasti.	150
Tabela 5.10.	Kategorizacija političkog uticaja.	151
Tabela 5.11.	Raspodela vrednosti matrice <i>Politička</i> po oblastima za kartu sa 5x5 oblasti.	151
Tabela 5.12.	Raspodela vrednosti matrice <i>Politička</i> po oblastima za kartu sa 10x10 oblasti.	152



<http://derrenbrown.co.uk/blog/2012/01/>

1. UVOD

Nagli napredak tehnologije, u poslednjih dvadeset godina, doprineo je velikim promenama u savremenom društvu. Ove migracije su se najviše ispoljile u oblasti primenjene elektrotehnike. Danas, standardni korisnik telekomunikacionih usluga ima fiksni telefon, mobilni telefon sa multimedijalnim sadržajima i aplikacijama za razmenu istog, pristup Internetu, digitalni TV signal itd. Pored toga, korisnicima se svakodnevno nude bolje i kvalitetnije usluge, koje treba da podrazumevaju veći protok, kvalitetniji signal, dodatne servise i slično [LATH09]. Iako se o servisima današnjeg kvaliteta pre dvadeset godina samo naslućivalo, savremeni napredak ukazuje na nastavak trenda ovakvog razvoja [ULRI08].

Veliku ulogu u omogućavanju ovakvih prednosti doprinela je komercijalizacija i veća eksploatacija optičkih vlakana [MEKH97, ILYA03, SIMM08]. Izgradnjom novih

mrežnih infrastruktura, proširivanjem postojećih topologija, zamenom bakarnih kablova optičkim i dovođenjem optičkog kabla do krajnjeg korisnika, savremena komunikaciona mreža je dobila neuporedivo veći kapacitet [SIMM08]. Veći kapacitet omogućava intenzivan razvoj boljih i kvalitetnijih servisa [ULRI08, LATH09]. Bolji servisi i usluge donose više novca, pa svi akteri u ovom lancu imaju želju ka daljem napretku. Iako je prelazak na optička vlakna verovatno pretpostavljao rešenja problema kapaciteta mreže za duži vremenski rok, eksplozivni razvoj saobraćaja neminovno zahteva da se i ovaj resurs racionalno troši.

U tom smislu, mogućnosti hardvera, i razvoja fizičke topologije komunikacione mreže, moraju biti praćeni razvojem protokola i uređaja za rutiranje, sa ciljem optimalne upotrebe (ipak ograničenih) resursa [PIOR04, WHIT05]. Obzirom da su protokoli za rutiranje bazirani na razvoju logike rada i prenosa signala kroz mrežu, veći prodor u doprinosu istraživača se ostvaruje baš u ovom polju. Mogućnosti simulacija, realizacija programskih logika i testiranja svakako omogućavaju kvalitetnije napretke u razvoju protokola nego fizičkog vlakna, u smislu tehnoloških postupaka.

Radovi savremenih autora ukazuju na različite doprinose u pojedinim oblastima rutiranja, sa manje ili više uslovljenim početnim stanjima mreže ili okruženja [BELL09, CHAK02, CHEN05, CIKO11, ELTA10, GALD10, SANT08, RELJ95, RELJ95a, KOST96, KOJI06a, KOJI06b, KOJI09c]. Posebnu pažnju privlače rešenja koja su generičkog tipa, i koja mogu da rade u realnim mrežnim okruženjima i u realnom vremenu. Iz tog razloga, različiti alati, logike i tehnologije se pokušavaju iskoristiti u cilju dobijanja boljih i kvalitetnijih rešenja [MEDH07].

Iako je tehnološki razvoj uzeo velikog maha, prirodnu inteligenciju čovaka, baziranu na radu mozga, još uvek nismo u potpunosti realizovali u formi mašine. Još uvek, mašine nisu dovoljne inteligentne da imaju svest, da mogu da se razmnožavaju i prilagođavaju uslovima sredine, kao što to radi čovek. Sa druge strane, fizička ograničenja rada čoveka, umor, koncentracija i potreba za odmorom, ne mogu da se porede sa neprekidnim radom mašine. Ovo je bilo prepoznato još 50-ih godina prošlog veka kada su McCulloch i Pitts predstavili matematički model biološkog neurona [MCCU43, FAUS93]. Ideja, koja se tada razvila, bila je kreiranje modela koji ume da poveže kreirane modele veštačkih neurona, sa ciljem rešavanja kompleksnih zadataka, kao što to radi ljudski mozak. Obzirom da ovaj model treba da funkcioniše na

principima rada biološkog nervnog sistema, pripao je alatima iz oblasti veštačke inteligencije (*Artificial Intelligence*) [LUGE05, ALPHA04, RUSS95] tj. grupi veštačkih neuralnih mreža (*Artificial neural networks*) [SIMP90, HAYK94, GRAU07, NASC94]. Pokušavajući da „imitiraju“ rad biološke neuronske mreže bilo je potrebno razmotriti: princip rada i modelovanje jednog neurona, način povezivanja neurona, način prenosa informacija, način memorisanja i način donošenja odluke. Ovako složene zahteve, bilo je vrlo teško realizovati na samom početku.

Od 50-tih pa do 70-ih godina prošlog veka, ova oblast istraživanja imala je veliki broj uspona i padova. U nekim trenucima je imala toliko puno oponenta da je postojala mogućnost prestanka daljih istraživanja. Ovakava situacija se menja od sredine 70-ih, kada se pojavljuje veliki broj istraživača koji polako ukazuju u kojim sve oblastima, i rešenjima problema, veštačke neuralne mreže pokazuju iste ili bolje rezultate od tada aktuelnih alata. Od tog trenutka, oblast veštačke inteligencije i veštačkih neuralnih mreža sve više dobija na značaju. Danas skoro da nema oblasti gde ne postoji neka primena veštačkih neuralnih mreža i gde nema aktuelnih daljih istraživanja [HAYK94, SIMPO90, GRAU07].

Postoji veliki broj podela veštačkih neuralnih mreža, u odnosu na veći broj kriterijuma [HAYK94, SIMPO90, GRAU07]. U ovoj disertaciji će se ukazati na neke osnovne podele, među kojima je i podela prema smeru prostiranja signala [HAYK94]. Na bazi ove podele, postoje dodatne podele koje opisuje neuralne mreže kod kojih se signal sa izlaza iterativno vraća na ulaz. Ova grupa mreža naziva se rekurentnim mrežama [HAYK94]. Polazeći od grupe rekurentnih neuralnih mreža, i njenog predstavnika Hopfield-ove neuralne mreže, pa njene modifikacije od strane drugih autora, ova disertacija će dodatno istražiti mogućnosti unapređenja i primene ove neuralne mreže u rešavanju nekoliko različitih problema iz najšire oblasti transporta [HAYK94, HOPF82]. Ova mreža je dosada pokazala dobre rezultate u rešavanju optimizacionih problema, u različitim oblastima [HOPF85, ALI93, RELJ95, KOJI06a, KOJI12b]. Imajući to u vidu, kao i to da je najveći broj realnih problema u savremenim telekomunikacijama složen višekriterijumski optimizacioni problem [MEDH07, LATH09, PIOR04], ova mreža će se primeniti u pronalaženju rešenja na savremene transportne probleme. Da bi se ukazalo na pozitivne strane primene Hopfield-ove

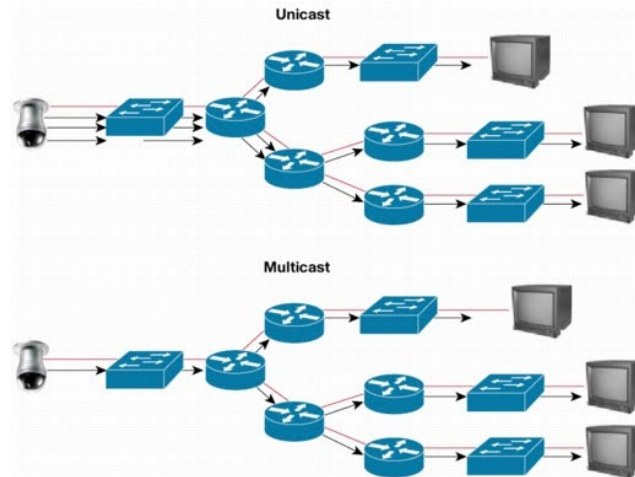
neuralne mreže, njena modifikacija i implementacija će se uraditi na tri sasvim različita tipa problema:

1. Rešavanje problema *multicast* rutiranja u mrežama sa paketskom komutacijom,
2. Rešavanje problema rutiranja i dodele talasnih dužina u optičkim mrežama i
3. Rešavanje problema planiranja novih putnih pravaca u realnom okruženju.

Sva tri modela podrazumevaju pronalaženje odgovarajućih rešenja u posmatranim oblastima, rad sa višekriterijumskom optimizacijom i rad sa realnim parametrima i okruženjem. Ova tri problema su izabrana jer su vrlo aktuelna, i postoji veliki broj drugih istraživača koji pokušavaju da pronađu bolja i kvalitetnija rešenja od aktuelnih.

1.1. Rešavanje problema multicast rutiranja u mrežama sa paketskom komutacijom

U oblasti rutiranja paketskog saobraćaja u računarskim mrežama, potreba za pronalaženjem „boljih“ algoritama za rutiranje je posebno dobila na značaju kada je došlo do povećanja obima saobraćaja [MEDH07, PARK04, PIOR04, WHIT05]. Ovo je posebno bilo izraženo početkom masovne distribucije multimedijalnog sadržaja, a posebno video signala u realnom vremenu [BENS07, IWAC08, KOMP93]. Poseban problem se javlja u slučaju potrebe garantovanjam određenog kvaliteta servisa [CINC01, STOJ04, PARK05]. Realna situacija u prenosnim mrežama je distribucija digitalizovanog TV signala i servis *Video od Demand* [ZINK05]. U situacijama kada veći broj korisnika treba da prima isti sadržaj, a posebno kada je taj sadržaj zahtevan sa aspekta prenosa i upotrebe resursa mreže, prenos tipa *unicast* može dovesti do kompletnog zagušenja mreže, slika 1.1. Naime, princip rada *unicast* veze je prenos kompletne grupe traženih paketa od tačke *A* do tačke *B*, onoliko puta koliko ima zahteva za konekcijom. Ovakvo rešenje je apsolutno neracionalno sa aspekta resursa mreže [MEDH07, WHIT05].

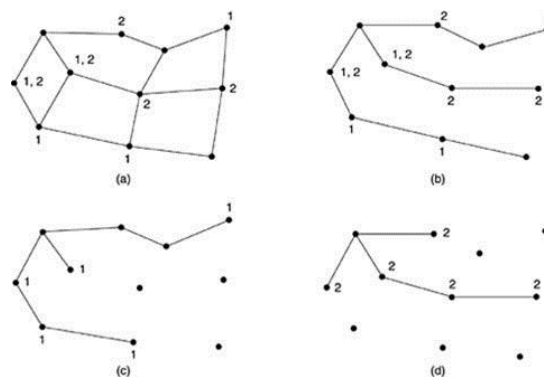


Slika 1.1. Koncepti slanja paketa kod *unicast* i *multicast* rutiranja.

(<http://nickcardenas.blogspot.com/2010/08/simple-multi-streaming.html>)

Da bi se ovaj problem rešio uvodi se princip *multicast* veze [BENS07, WEI94, CHAK02, CRIC04]. Ovaj pristup ima za cilj da se pronade stablo po kome će se prenositi paketi, uz uslov da stablo ima što manje grananja bližih korenu stabla [HWAN92, CHEN01, HAKI71]. Na ovaj način, sav identični saobraćaj se kroz jedan link, koji je deo stabla za rutiranje, prenosi samo jednom, bez obzira na broj korisnika. Ovakav način u mnogome štedi resurse mreže, ali zahteva složeniji način pripreme za prenos signala. Priprema se ogleda kroz logiku pronalazaženja stabla u zavisnosti od raspoloživih resursa mreže, parametara koji su dodeljeni linkovima, a koji utiču na izbor stabla, uz uslov da se ceo postupak završi što je pre moguće. Jedan od najčešćih modela za traženje stabla za rutiranje je Štajnerovo stablo (*Steiner tree*) [HWAN92, CHEN01, MEDH07].

Glavni problem u traženju Štajnerovog stabla je što ne postoji jednoznačna i egzaktna procedura za njegovo formiranje [HWAN92, CHEN01]. Šta više, problem traženja ovog stabla je *NP complete* problem [GARE79], što zahteva neki sofisticiran alat koji bi mogao da ponudi kraći postupak i zadovoljavajuće rešenje.



Slika 1.2. Mogući način formiranja *multicast* stabla.
(<http://train-srv.manipalu.com/wpress/?p=162751>)

Imajući u vidu mogućnosti veštačkih neuralnih mreža u rešavanju optimizacionih problema [HOPF85, PORN95, RAUC88, RELJ95, RELJ95a, KOST96], nameće se mogućnost da bi one mogle da se iskoriste za rešavanje celokupnog postupka *multicast* rutiranja, ali sa naglaskom na rešavanje problema pronalaženja Štajnerovog stabla, ili nekog od velikog broja njegovih modifikacija. U ovoj disertaciji će se pokazati da je izbor Hopfield-ove neuralne mreže bio opravdan i da ona može vrlo kvalitetno da odgovori na zadatke pronalaženja Štajnerovog stabla.

1.2. Rešavanje problema rutiranja i dodele talasnih dužina u optičkim mrežama

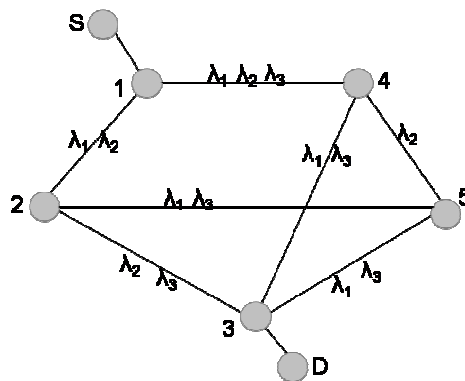
Obzirom da optička vlakna preuzimaju primarnu ulogu i savremenim telekomunikacionim mrežama, razvoj sofisticiranih uređaja i protokola za rutiranje ima bitnu ulogu u savremenoj naučnoj zajednici [SIMM08, ILYA03, MEKH97]. Do sada je definisan veliki broj algoritama koji se koriste za ove svrhe, i oni daju relativno bolje ili lošije rezultate u zavisnosti od zahtevanih karakteristika sistema [QIN03, TORN11, WANG00, ZHAN00].

U teoriji su poznata dva koraka u ostvarivanju konačnog cilja pronalaženja putanje za prenos svetlosnog signala [MEKH97]:

1. Rutiranje i
2. Dodela talasnih dužina.

Prva faza (Rutiranje) podrazumeva odabir putanje, na bazi nekog od postojećih algoritama za tu namenu [ILYA03, ZHAN00, MARK01]. Ova faza ima za cilj da se od skupa linkova u jednoj optičkoj mreži odaberu oni linkovi koji na najbolji način odgovaraju zahtevu za selekciju rute. Kriterijumi za ovu namenu mogu biti vrlo različiti (minimalan broj hop-ova, vođenje računa o preostalim resursima mreže, statistička analiza putanja iz prošlosti itd.). Dobijeno rešenje mora da povezuje izvorište i odredište, kontinualnom putanjom, koja nema „mrtve petlje“ ili „slepe završetke“.

Druga faza podrazumeva primenu nekog od algoritama za dodelu talasnih dužina, putanji koja je u prvoj fazi već određena [ILYA03, ZHAN00, MARK01]. U ovoj fazi se, na bazi nekog od kriterijuma, biraju talasne dužine dostupne na linkovima (koji pripadaju dobijenoj putanji iz prve faze rada). U ovoj fazi pored željenih kriterijuma, postoje i potencijalna ograničenja koja mogu kompletno promeniti dobijeni rezultat i usložniti proces dodele talasnih dužina. Ova ograničenja se najčešće odnose na mogućnost konverzije talasnih dužina u ruterima mreže [QIN03].

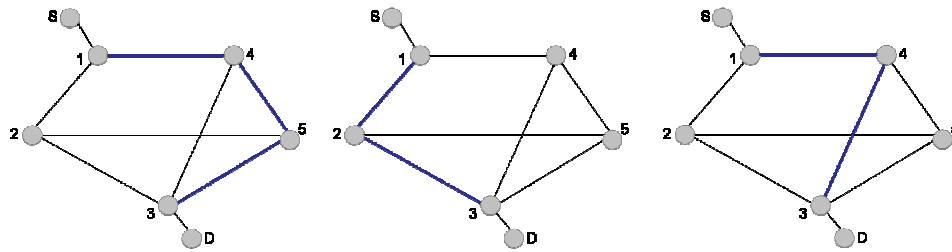


Slika 1.3. Topologija mreže korišćena za demonstraciju rutiranja i dodele talasnih dužina u potpuno optičkim mrežama.

Algoritmi koji se koriste u ove dve faze su međusobno nezavisni i najčešće ne posmatraju iste parametre. Pojedinačni algoritmi za obe faze su relativno jednostavni i brzo se realizuju. Međutim, zbog neusklađenosti ove dve faze, i njihove sekvencijalne realizacije, dobijeno rešenje vrlo često nije optimalno ili se možda i ne može pronaći [ILYA03, ZHAN00, MARK01]. Da bi

se ovo najjednostavnije demonstriralo, posmatrajmo mrežu na slici 1.3, gde je definisana relativno prosta topologija mreže i slučajno dodeljene talasne dužine pojedinim linkovima. Neka je ukupan broj čvorova mreže pet, broj talasnih dužina tri, a čvorovi 1 i 3 izabrani za izvorišni tj. odredišni.

Pretpostavimo da su na bazi tri različita kriterijuma dobijene tri putanje, prikazane na slikama 1.4.a, 1.4.b i 1.4.c.



Slika 1.4. Izabrane putanje za rutiranje u odnosu na topologiju mreže sa slike 1.3.

Obzirom da se prva faza odvija nezavisno od druge, može se dogoditi sledeće:

- Da se veza inicijalno ne može uspostaviti, jer za situaciju na slici 1.4.a. ne postoji zajednička talasna dužina na sva tri linka (u slučaju da nema moguće konverzije talasnih dužina u ruterima). Tada dolazi do blokade, koju je poželjno maksimalno minimizirati.
- Da se veza može uspostaviti na samo jednoj talasnoj dužini, slika 1.4.b, čime se mogući izbor svodi na minimum.
- Da se i nakon uspostavljanja veze, situacije opisane u tački b), veza tom putanjom ne može uspostaviti ukoliko nema konverzije talasnih dužina
- Da se zbog ograničenja koje unosi samo jedan link u putanji, slika 1.4.b., npr. link između takača 4 i 5, ne može realizovati cela putanja, itd.
- Da se veza može uspostaviti na nekoliko različitih talasnih dužina, slika 1.4.c, ali da nema strategije koja vodi računa o narednim konekcijama i raspoloživim resursima mreže.

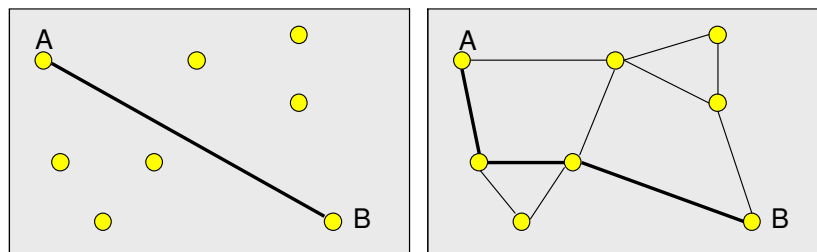
Da bi se ovi problemi minimizirali, predlaže se potpuno drugi pristup u rešavanju ovog problema, a to je objedinjavanje ove dve faze [MEKH97, ILYA03, ZHAN00, MARK01]. Na taj način, očekuje se kvalitetna raspodela

resursa mreže, i mogućnost definisanja prioriteta koji neće izazvati negativne posledice u nekoj narednoj fazi. Sa druge strane, objedinjavanje podrazumeva integraciju velikog broja kriterijuma i parametara koji su manje ili više povezani, a koji se do sada nisu uporedno analizirali. Dodatni problem je mogućnost da pojedini kriterijumi, iz ranijih različitih faza, sada budu suprotstavljenih zahteva.

Zbog svih navedenih potencijalnih problema, i potrebe za složenom višekriterijumskom optimizacijom, od Hopfield-ove neuralne mreže se može očekivati da ovaj problem reši. U ovoj disertaciji će se pokazati da je moguće primeniti modifikovani model Hopfield-ove neuralne mreže za potrebe objedinjenog pronalaženja putanje i dodele talasnih dužina u optičkim mrežama, i pri tome dobiti relativno dobre rezultate.

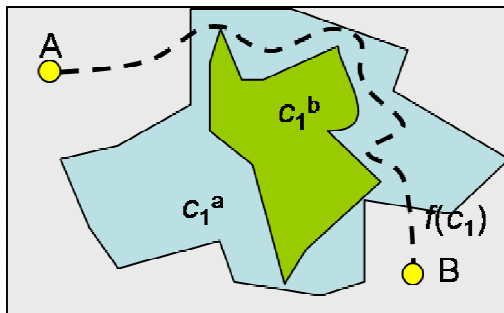
1.3. Rešavanje problema planiranja novih putnih pravaca u realnom okruženju

Proces analize i planiranja novih putnih pravaca zahteva izuzetno složene predradnje i vreme da bi se uradila odgovarajuća studija [JPPS09, JPZU05, DZGZ03]. Problem nastaje zbog mogućih obostranih uticaja prostornog okruženja tj. topologije i geomorfologije terena na proces izgradnje nove putne trase ali i uticaja trase na ekologiju pojedinih oblasti, političku i ekonomsku razvijenost [JPPS09, RODR06]. Problem povezivanja dve tačke u prostoru se može posmatrati idealistički kroz pravolinijsku vezu i realno u zavisnosti od uslova na terenu, slika 1.5.



Slika 1.5. Najkraća putanja između tačaka A i B u a) idealnim i b) u realnim uslovima.

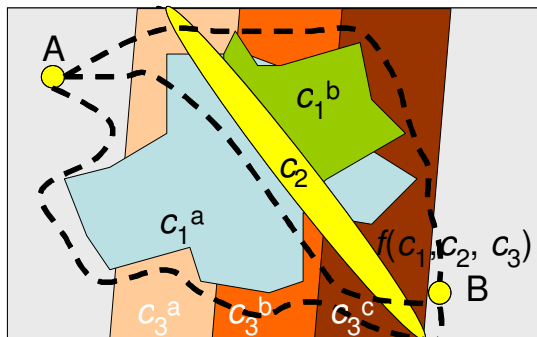
Ako se pođe od putanje u realnim uslovima, problem se usložnjava u situacijama kada postoje čak i dve vrste terena, koje utiču na različite jedinične cene izgradnje putne trase. Ovakva situacija je prikazana na slici 1.6.



Slika 1.6. Jedna moguća putanja od tačke A do tačke B, u slučaju kada postoje dve oblasti (C_1^a i C_1^b) koje imaju različite jedinične cene po dužini trase.

Situacija na slici 1.6. predstavlja relativno jednostavan ali demonstrativan način kojim se ukazuje na problem selekcije „najjeftinije“ rute. U zavisnosti od fizičkih rastojanja, cene po kilometru u oblasti C_1^a ili C_1^b , odabrana putanja može preseći obe oblasti u različitim kombinacijama dužina ili preseći samo jednu u određenoj dužini. Sve ove kombinacije zavise od konkretne situacije, dužine po pojedinim deonicama, cena izgradnje u oblastima i slično.

Problem se dodatno komplikuje ako se unutar jednog faktora terena (recimo topologije, ili geomorfologije, ili u najgorem slučaju oba), pojave interne klasifikacije, koje utiču na promenu jedinične cene izgradnje. U tom slučaju problem, pored više parametara, ima i više mogućih kriterijuma po kojima se može doneti konačna odluka. Primer ovakve situacije je dat na slici 1.7.



Slika 1.7. Tri moguće putanje od tačke A do tačke B, u slučaju kada postoje tri oblasti (C_1 , C_2 , C_3) koje imaju različite jedinične podoblasti sa aspekta cene po dužini trase (C_1^a , C_1^b , C_2 , C_3^a , C_3^b , C_3^c).

Obzirom da se u opštem slučaju može pojaviti proizvoljan broj karakterističnih oblasti, ali i dodatnih podela unutar njih, opisani problem je klasičan primer višekriterijumske optimizacije [RODR06]. Iz tog razloga, odlučeno je da se ispita efikasnost Hopfield-ove neuralne mreže i u ovom problemu. U disertaciji će se pokazati da je modifikovani model Hopfield-ove neuralne mreže zadovoljio inicijalne kriterijume i da se dobijeno rešenje može koristiti kao pomoćno sredstvo u procesu analize i planiranja novih putnih pravaca.

Ova disertacija ima za cilj da prikaže predložene modifikacije Hopfield-ove neuralne mreže i njihove implementacije u aktuelne transportne probleme u realnom okruženju. Predloženo je više direktnih ili indirektnih metoda modifikacije energijske funkcije Hopfield-ove neuralne mreže, kao i dodatnih algoritama za povećanje efikasnosti rada mreže, smanjivanje potrebnog broja iteracija i automatizacije pojedinih delova koda.

Svi predloženi algoritmi su realizovani u Matlabu ili u programskom jeziku C++. Prilikom realizacije koda nije korišćen ni jedan *toolbox*, ugrađene klase ili bilo koji drugi oblik struktura, čime je dobijen kod prilagođen za realizaciju u bilo kom drugom programskom jeziku ili razvojnom okruženju. Za potrebe vizuelizacije dobijenih rezultata, kreiran je poseban GUI u Matlab-u. Svi rezultati koji se dobijaju kao rezultat rada nekog od predloženih algoritama se čuvaju u *.m* (format Matlab fajla) i u *.xls* (format Microsoft Excel-a).

Za svaki od predloženih algoritama urađen je veliko broj simulacija i testiranja u različitim realnim ali i hipotetičkim situacijama. U toku testiranja praćeni su ne samo rezultati rada algoritama, nego i njihova efikasnost, brzina rada, verovatnoća dobijanja rezultata tj. blokade, itd. Svi korišćeni ulazni faktori su maksimalno moguće realno opisani i kvantifikovani, uz poseban osvrt na održavanju odnosa veličina prilikom transliranja u druge intervale vrednosti.

Materija ove disertacije je organizovana u sedam osnovnih poglavlja, dok je na kraju priložena lista korišćenih referenci.

U prvom poglavlju definisan je pojam veštačkih neuralnih mreža. Ukazano je na jednog predstavnika rekurentnih mreža i u kraćim crtama izložen razvoj događaja koji

prate postupak modifikacije i usavršavanja originalnog Hopfield-ovog modela. U skladu sa ciljem disertacije, ukazano je na tri oblasti u kojima će se implementirati modifikovano rešenje Hopfield-ove neuralne mreže. Za svako od njih ukratko je opisan problem koji je potrebno rešiti, ukazano na druga rešenja ili metode koje se mogu primeniti i sugerisan razlog za primenu veštačke inteligencije. Kako su sva tri tipa problema višekriterijumski optimizacioni problemi, zaključeno je da ima osnova da se za rešavanje pojedinih problema pokuša primena Hopfield-ove neuralne mreže.

U drugom poglavlju je dat kratak istorijski razvoj veštačkih neuralnih mreža. Posebna pažnja posvećena je matematičkom modelovanju bioloških neurona i mogućnost njihove realizacije primenom komponenata električnih kola. Ukazano je na tipove i podele neuralnih mreža, zakone učenja i prostiranja signala.

U trećem poglavlju detaljno je opisana Hopfield-ova neuralna mreža, kao tipični predstavnik jedne grupe veštačkih neuralnih mreža: Rekurentnih neuralnih mreža. Objasnjena je struktura ovog tipa mreže i definisane su matematičke relacije koje je opisuju. Definisan je pojam i oblik energijske funkcije Hopfield-ove neuralne mreže i dati neophodni matematički dokazi koji ukazuju na stabilnost, parametre koji na nju utiču i mogućnosti pojave lažnih stanja neuralne mreže. Kako je fizička realizacija predloženog modela posebno važna, jedan deo ovog poglavlja je posvećen mogućim hardverskim realizacijama. Na kraju ovog poglavlja dat je model Hopfield-ove neuralne mreže koji će služiti kao početni model za dalje modifikacije i implementacije u konkretnim primenama opisanim u narednim poglavljljima.

U četvrtom poglavlju opisana je modifikacija energijske funkcije Hopfield-ove neuralne mreže sa ciljem primene u postupku dinamičkog *multicast* rutiranja u mrežama sa paketskom komutacijom. U ovom poglavlju su definisani različiti tipovi rutiranja, njihove prednosti i mane, uslovi za distribuciju multimedijalnog sadržaja kao i uloga i načini formiranja *multicast* stabala. Objasnjena je i pojam višekriterijumske optimizacije i potreba za uvođenjem pojma Pareto optimalne putanje. Opisana je struktura predloženog algoritma, kao i ulazni faktori koji su korišćeni za potrebe simulacije. U uporednoj analizi sa rezultatima drugih autora ukazano je na kvalitet dobijene putanje sa aspekta cene i broja iteracija. Pokazana su poređenja sa drugim modelima za dobijanje *multicast* putanje kao i reakcije predloženog algoritma za karakteristične realne situacije

koje se mogu desiti u mreži. Predložen je i novi metod za određivanje optimalnog broja iteracija u toku rada mreže, što je i primenjeno u postupku dobijanja drugih rezultata.

U petom poglavlju je demonstrirana mogućnost primene Hopfield-ove neuralne mreže kod planiranja novih putnih pravaca. U ovom poglavlju definisani su osnovni principi procesa planiranja saobraćaja i prostora kao i modeli za planiranje i modelovanje putne mreže. Detaljno je opisan način realizacije predloženog algoritma i uloga Hopfield-ove neuralne mreže u njemu. Nakon definisanja konkretnih ulaznih faktora, kvantifikacije ulaznih vrednosti i primenjene metodologije, prikazani su rezultati koji odgovaraju realnim topološkim i geomorfološkim karakteristikama na primeru dva grada u Republici Srbiji.

U šestom poglavlju opisane su osnovne tehnike rutiranja, sa njihovim prednostima i manama, kod potpuno optičkih mreža. Ukazano je kako arhitektura mreže utiče na uspostavljanje svetlosnog puta kao i osnovni parametri mreže bitni za prenos signala. Objasnjeni su osnovni principi primene algoritama za rutiranje a posebna pažnja je data algoritmima pronalaženja putanje i dodele talasnih dužina. Detaljno je prikazan modifikovani model Hopfield-ove neuralne mreže koji se predlaže za rešenje problema objedinjavanja procesa izbora putanje i dodele talasnih dužina. Realizovana je logika kojom se Hopfield-ova neuralna mreža koristi i kao samostalni algoritam u fazi odabira putanje.

U Zaključku su sublimirani svi dobijeni rezultati kao i doprinosi ove disertacije.

Dobijeni rezultati pokazuju bolje ili identične karakteristike u odnosu na druge rezultate objavljene u stručnoj literaturi. Za pojedine predložene algoritme nije bilo moguće izvršiti kvalitativnu komparaciju rezultata, pa su detaljno opisani postupci i rezultati njihove primene, na realno okruženje, da bi stekao uvid u kvalitet predloženog rešenja.

Obzirom na sve dobijene rezultate, može se zaključiti da je bilo opravdano očekivanje da Hopfield-ova neuralna mreža može da ponudi bolje ili iste rezultate od drugih alata, i da treba dodatno istraživati mogućnosti ove neuralne mreže.



<http://scifi4me.com/2012/01/16/a-i-part-3-neural-networks/>

2. Veštačke neuralne mreže

Veštačke neuralne mreže predstavljaju alternativni pristup rešavanju logičkih problema u odnosu na konvencionalne računarske logike [ALPHA04, ROJA96, ALEK95]. Sama reč „veštačke“ sugeriše da je inspiracija za strukturu i logiku rada ovih mreža nastala pokušajem imitacije rada prirodnih neuralnih (neuronskih) veza i sistema. Povod za intenzivan razvoj veštačkih neuralnih mreža može se naći u sofisticiranosti rada ljudskog mozga, i stalne želje čoveka da ovako kompleksan i inteligentan sistem kreira i podredi svojim potrebama [FAUS93].

Neurologija, kao nauka koja se bavi proučavanjem nervnog sistema čoveka, još uvek nema odgovore na sva pitanja u vezi rada mozga. Međutim, za realizaciju prvih veštačkih neuralnih mreža dovoljne su bile, u tom trenutku, poznata anatomska građa i fiziološke funkcije mozga, koje nude informacije o strukturi, načinu prenosa impulsa i memorisanju željenih događaja [BROW94].

Veštačke neuralne mreže su samo jedan od tehničkih alata kojima se nauka i tehnologija služe da bi brzo i kvalitetno rešile složene probleme [ALPHA04, JANG97]. Postoji veliki skup tehnika i rešenja koja koriste mehanizme koje nalazimo kod živih bića i koja su inspiracija za nova naučna dostignuća [ALPA04, RUSS95, CHAK01, LIN96, JHA01, JONG00, KIM05, DORI99, KASSO1].

Početak istraživanja i razvoja veštačkih neuralnih mreža bio je vezan za McCulloch-a i Pits-a koji su predstavili matematički model biološkog neurona [MCCU43, FAUS93]. Tada veliki broj istraživača aktivno prihvata novu disciplinu i sve više razvija način rada i nove strukture mreža. Samim tim i sve veći broj problema nalazi svoje rešenje primenom ovih mreža. Međutim, pojavljuju se i poteškoće koje u datom trenutku ne nalaze rešenja primenom veštačkih neuralnih mreža, od kojih je najpoznatiji problem realizacije *XOR* funkcije [ROJA96]. Paralelno sa tim javlja se i sve veći broj kritičara ovakvog rada. Međutim, privreda ulaže sve više novca u razvoj i implementaciju ovih mreža, čime se entuzijizam istraživača dodatno povećava. Na žalost, posle desetak godina od prvih koraka, sve više se odustajalo od implementacija neuralnih mreža, pa se i interesovanje za njih polako smanjuje. Na sreću, određen broj naučnika i dalje radi na poboljšanju performansi i rešavanju problema koji se paralelno procesiraju pomoću računara.

Razvoj veštačke inteligencije danas sagledavamo kroz međusobnu interdisciplinarnost matematike, fizike, neurologije, anatomije, teoriju obrade signala i sličnih naučnih disciplina. Cilj razvoja veštačke neuralne mreže je pokušaj da se razume i simulira rad ljudskog mozga, u smislu detekcije nadražaja (signala), prenosa istog, postupka donošenja odluka i načina pamćenja tj. zaboravljanja.

U osnovi, primenom veštačkih neuralnih mreža pokušava se napraviti veštački sistem sposoban da uči i donosi inteligentne odluke kao čovek [ALPHA04, LUGE05]. Ovo je posebno bitno kada se radi o velikoj količini podataka i kratkom vremenu potrebnom za njegovo procesiranje. Elektronska kola, koja se koriste u hardverskoj

realizaciji, rade brže nego pojedinačni neuron (nervni signali su spori), ali je mozak zbog velike povezanosti neurona i paralelnog procesiranja, brži od veštačkih neuralnih mreža. Sa druge strane pogodnosti koje nudi veštačka neuralna mreža su mogućnosti distribuiranja problema na više nivoa i više odvojenih faza, realizacije više paralelnih mreža i u krajnjem slučaju zamenljivost [ROJA96, SIMP90, HAYK94, ALEK95], što su karakteristike koje nedostaju mozgu. Takođe, kada se jednom napravi logika rada i nađe adekvatan način za rešavanje problema [ALPHA04], svaka naredna mreža se može napraviti vrlo brzo, dok obuka novog biološkog mozga da reši probleme nekog prethodnog (uz skup svih potrebnih znanja) traje godinama.

Ljudski mozak je veoma složen i kompleksan, pa su njegov rad i zakoni obrade informacija još uvek neistražena oblast [BROW94]. Prosečan ljudski mozak sadrži oko 10^{11} neuralnih ćelija sa izuzetno velikim brojem veza između njih. U ljudskom nervnom sistemu su, pored inicijalnih impulsa, za rešavanje određenog problema bitne i hemijske relacije koje nisu u potpunosti kontrolabilne. Iz tog razloga pokušaj kompletne simulacije i detaljno praćenje procesa rada predstavlja vrlo kompleksan, pa čak i nemoguć problem.

Na sreću, pokazalo se da za pojedine grupe problema može da se pronade rešenje koje je zadovoljavajuće, pa vrlo često i bolje, ili brže, u odnosu na primenu algoritamske logike računara, što je i tema ove disertacije. Danas veštačke neuralne mreže imaju veliku primenu u rešavanju optimizacionih problema, kontrole tokova signala, upravljanja, prepoznavanja slike i glasa i drugih vrlo sofisticiranih problema [WANG97, TSO97, ALEK95, RELJ95, ARAU01, BEAL90, BROW91, BROW94, CICH93, RELJ98].

2.1. Veštačka neuralna mreža naspram kompjutera

Imajući u vidu da je veštačka neuralna mreža pokušaj kopije biološkog nervnog sistema, proces rada se ne može smatrati jednoznačnim, unapred predvidivim i u potpunosti kontrolabilnim. Ovako složen sistem odluke donosi na bazi određene logike, ali i iskustva koje je dobijeno u različitim fazama učenja [ROJA96, SIMP90, HAYK94, ALEK95]. U fazama učenja neuralna mreža koristi karakteristiku mozga da memoriše određene podatke od interesa i da u konkretnoj situaciji, na bazi tog znanja, i određenih pravila, donese konačnu odluku [BEAL90]. To je razlog što se veštačke neuralne mreže

ne kreiraju za rešavanje jednog, striktno definisanog zadatka, nego se nakon obuke mogu primeniti na čitavu lepezu sličnih ulaznih podataka i dati odgovarajuće rešenje [FAUS93, HAYK94, ROJA96].

Sa druge strane kompjuter može da reši probleme samo ako imaju unapred definisanu metodologiju, što u mnogome ograničava sposobnost rešavanja problema. To implicira da se algoritam kreira fiksno, za tačno definisani problem i sa tačno definisanim postupcima u svakoj od iteracija.

U proseku neuron u mozgu radi brzinom od 100Hz, što je relativno sporo u poređenju sa kompjuterom koji u sekundi izvrši nekoliko miliona instrukcija. Zajedničko paralelno procesiranje svih prirodnih neurona u mogućnosti je da realizuje bilo koji proces neuporedivo brže od najbržih super računara, iako je brzina rada bioloških neurona reda milisekundi, u poređenju sa brzinama tranzistora koje su čak i ispod reda nanosekundi.

Uprkos toj maloj brzini u poređenju sa kompjuterom, biološka neuralna mreža može da izvede neke zadatke kao što je prepoznavanje, planiranje i upravljanje sa neobičnom lakoćom u odnosu na kompjuter. Razlog leži u velikoj međusobnoj povezanosti neurona i paralelnom procesiranju signala. Ova prednost donosi još jednu veliku razliku između kompjutera i biološkog nervnog sistema. Naime, većina kompjutera ne može biti korisna ako je samo jedna od komponenti oštećena dok je neuronska mreža u mogućnosti da dobro funkcioniše iako postoji značajno oštećenje delova mozga [HAYK98, ROJA96].

Osnovni rival veštačkim neuralnim mrežama je klasični računarski program. Razlike između ova dva sistema su izuzetno velike. Konvencionalni računari rade na logičkoj osnovi, sekvencijalno, deterministički ili sa vrlo niskim stepenom paralelizma. Ovi programi zahtevaju promenu svaki put kada se tip problema ili okruženja minimalno promeni. Promene su skupe, i u zavisnosti od problema i dugotrajne. Ako se naprave uporedne karakteristike pojedinih veličina [HAYK98, AMIT07], tada se dobijaju podaci prikazani u tabeli 2.1.

Kompjuter može biti pogodniji za rešavanje algoritamski opisanih problema dok su biološke neuralne mreže pogodnije za nealgoritamske probleme kao što je klasifikacija, prepoznavanje i odlučivanje. U tom smislu su i veštačke neuralne mreže

dobri kandidati za reševanje istih, s obzirom da se pojavljuju kao „naslednici“ bioloških sistema.

Tabela 2.1 – Mozak naspram kompjutera, poređenje karakteristika.

	Element	Veličina [m]	Brzina [Hz]	Arhitektura	Tolerancija greške	Sposobnost učenja	Energija u toku jedne iteracije [J/s]
Mozak	10^{11} neurona	10^{-6}	100	Paralelna, distribuirana	Da	Da	10^{-6}
Kompjuter	10^8 tranzistora	10^{-7}	10^9	Serijska, centralizovana	Ne	Mala	10^{-6}

Pored neuralnih mreža, postoje još neki napredni sistemi koji imaju svojstvo da rešavaju probleme na osnovu nedovoljno čvrsto postavljenih pravila. Najpoznatiji su genetski algoritmi, fazi logike, adaptivne memorije, asocijativne memorije i slično, ali su se neuralne mreže do sada pokazale najprihvatljivijim i najadaptivnijim [KOSK92, LUGE05, RUSS95, SIMP90, JHA07, KASS01].

Neke od karakteristika veštačkih neuralnih mreža mogu se klasifikovati kao [ROJA96, SIMP90, HAYK94, ALEK95]:

- 1) Neuralne mreže se koriste sa ciljem paralelnog (asinhronog ili sinhronog) distribuiranog procesiranja.
- 2) Mreža je fleksibilna i relativno malo osetljiva na ispad izvesnog broja neurona.
- 3) Sama se prilagođava promenama i stanjima koje uči i vrlo je imuna na najveći od problema savremenih sistema - šum.
- 4) Kao što je slučaj i u biološkim mrežama, svaki memorijski element je delokalizovan – raspodeljen je po celoj mreži, što dodatno povećava sposobnost rada mreže u slučaju prekida nekih veza među neuronima ili prestankom rada neurona. Iz tog razloga u neuralnim mrežama ne postoji klasično adresiranje, čime se sve manje nameću stroga pravila upotrebe klasičnih programskih paketa.

- 5) Svakako treba istaći da se u realizacijama veštačkih neuralnih mreža ne mogu postići brzine bioloških, jer je kompleksnost ovih mreža još uvek veliki tehnološki problem. Činjenica je međutim da je u složenim postupcima i obradama velikog broja podataka, neuralna mreža brža od konvencionalnih računarskih sistema, i da poseduje osobinu bolje stabilnosti u toku rada.

Brzina mreža svakako predstavlja važan segment, naročito kada se govori o mrežama koje zamenjuju uticaj čoveka. S obzirom da veštačke mreže mogu obraditi mnogo više informacija nego biološke, jer se mogu multiplicirati, eventualna sporost naspram bioloških bi se ovim načinom bar delimično izbegla.

2.2. Razvoj veštačkih neuralnih mreža

Prvi koraci u razvoju modela neurona realizovani su i opisani u [MCCU43]. Nakon istraživanja Hebb-a o zakonima ponašanja, dolazi do korenite promene u logici povezivanja veštačkih neurona, jer se uviđa da je logika rada neurona podjednako bitna kao i veze između njih. Kasnije je zaključeno da ove veze imaju različite efekte, i da nisu sve iste. Naime, ove veze zavise od vrste i jačine pobude, čime se uviđa jedan od koraka memorisanja i zaboravljanja informacija. Savremena neurologija je pokazala da se i među biološkom neuronima, veze stvaraju, pojačavaju-slabe i nestaju u zavisnosti od intenziteta i učestalosti kojom one prenose informacije od značaja. Na taj način, priroda je i u mozgu napravila selekciju među „boljim“ i „lošijim“ vezama, unoseći dinamiku u njihovo nastajanje ili nestajanje. Hebb-ova hipoteza tvrdi da promena sinaptičkih težina, u procesu učenja, ima glavnu ulogu u mehanizmu skladištenja informacija u biološkim neuralnim mrežama što je i kasnije pokazano [HAYK94].

Oko 1950. godine Frank Rosenblatt pronalazi jednoslojnu neuralnu mrežu poznatu pod nazivom *perceptron* [BORS93]. Perceptron je bio dvoslojna mreža sa sposobnošću učenja određenih vrsta klasifikacije, podešavanjem težinskih vrednosti koje su bile dodeljene vezama neurona. Veliko ograničenje unosi to što model perceptrona nije bio u mogućnosti da implementira *XOR* funkciju s obzirom da nije imao sposobnost da klasifikuje nelinearne razdvojive modele (elemente). Međutim

nedostaci ovog modela su prevaziđeni već 1958. godine kada su Frank Rosenblatt i Charles Wightman razvili prvi pravi neuroračunar. U tom periodu i Bernard Widrow razrađuje novi tip neurona poznat kao ADALINE (*ADaptive LINear Element*), sa prenosnom funkcijom $f(x)=x$, ali i odgovarajući zakon učenja [HAYK94].

U sedamdesetim godinama, pojavljuje se novi talas istraživača koji su dali veliki doprinos ovoj oblasti. Među njima su i Kohonen, Fukushima, Grossberg, Amari, Bryson, Ho, Werbos, Parker i drugi. Tada se pojavljuju samoorganizujuće mreže, njihove poboljšane verzije, dodatni slojevi za perceptron i slično. Početkom 80-ih, američka vojna agencija DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) postaje vrlo zainteresovana za neuralne mreže i ponovo se započinje intenzivno finansiranje istih [DARP88]. Osamdesetih godina John Hopfield pravi veliki doprinos povezujući neuralne mreže sa fizičkim sistemima i veličinama, čime ih čini potencijalnim kandidatima za realne probleme. Devedesetih godina Bart Kosko dokazuje da neuralne mreže i fazi logika definišu istu grupu problema čime se započinje intenzivna primena ove logike u računarskim sistemima [KOSK92]. Početkom devedesetih svi veći američki univerziteti uvode izučavanje neuralnih mreža u klasični nastavni program čime njihovo istraživanje počinje da biva sve masovnije. Danas skoro da nema oblasti gde se primenjuje veštačka inteligencija, a da nije analizirana primena veštačkih neuralnih mreža [FAHM97, HAYK98, LIN96, MULL90]. Shodno tome, može se zaključiti da se ova problematika ipak svrstava u red vrlo mladih i samim tim punim novih neistraženih mogućnosti koje nas očekuju.

2.3. Osnovne komponente neuralnih mreža

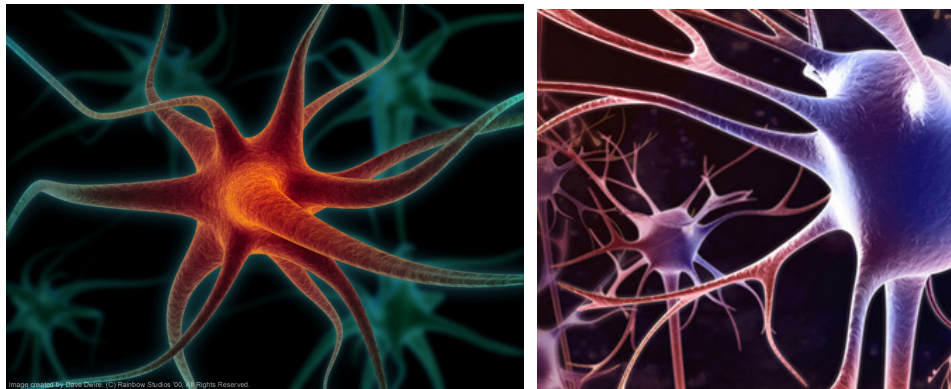
Kao što je već napomenuto, postoje dve opšte kategorije neuralnih mreža: biološke i veštačke neuralne mreže [TSOU97]. Biološke neuralne mreže su nervni sistemi živih bića koja imaju složeniji neurološki profil. Biološki nervni sistem čoveka, sa posebnim akcentom na mozak, najčešći je uzor za realizaciju veštačkih neuralnih mreža. Kao najsvesnije biće, i sa najvećim stepenom razvoja, ljudski mozak predstavlja najviši evolutivni stepen razvitka, i kao takav je nedovoljno istražen i kontrolabilan, slika 2.1. I pored toga, bazična znanja o strukturi i načinu rada ljudskog mozga su bili

dovoljni da se na osnovu njih kreiraju modeli i realizuje veštački neuron [FAUS93, ALEK95, HAYK98].



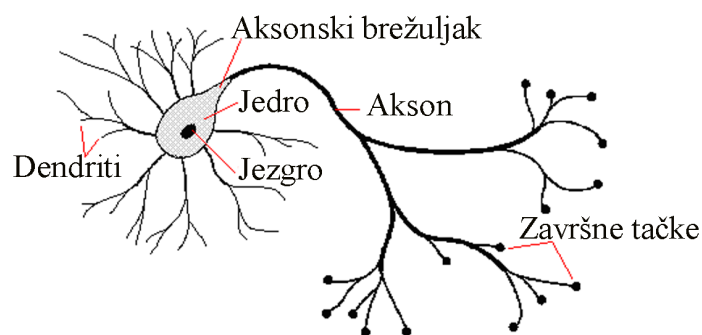
Slika 2.1. Mozak čoveka.

Poznavanje strukture mozga je od izuzetnog značaja, jer se ista pokušava realizovati u veštačkim mrežama. Model biološkog neurona sadrži uvek istu grupu elemenata kojima se povezuje za ostale neurone ili koje su njegov individualni deo. Ova vizuelizovana struktura prikazana je na slici 2.2.a. i 2.2.b.



Slika 2.2. Grafička interpretacija izgleda a) jednog neurona i b) međusobne povezanosti neurona (www.3dscience.com).

Neuron je osnovni element neuralne mreže [BROW94, HAYK94]. Neuron ima svoje ulaze i svoj izlaz. Ulazi neurona su dendriti. Prirodni neuroni imaju po nekoliko stotina dendrita. Dendrit se sa neuronom spaja preko sinapse. Neuronski izlaz naziva se akson, koji se dalje grana na aksonske ogranke i završne tačke, kojima informaciju iz neurona prosleđuje novim dendritima. Struktura biološkog neurona prikazana je na slici 2.3. [GUYT96]. Na ovaj način lako se uočava pojava slojevite organizacije jer izlazi jedne grupe neurona (sloja) predstavljaju ulaze nove grupe [HAYK94].



Slika 2.3. Struktura biološkog neurona.

Veštačke neuralne mreže su po strukturi, funkciji i obradi informacija slične biološkim neuronskim mrežama, ali se radi o veštačkim tvorevinama [HAYK98, ROJA96]. One su napravljene po uzoru na biološke, a direktno ih kreira i proizvodi čovek. Shodno tome biološki i veštački neuroni imaju skoro isti konceptijski sastav, samo se načini realizacije pojedinih funkcija razlikuju. Iz tog razloga, razvoj neuralnih mreža, u smislu njihove realizacije, biće sve kvalitetniji jer direktno zavisi od razvoja tehnologije. Ne treba isključiti mogućnost da će se u nekom trenutku kroz realizacije veštačkih neuralnih mreža možda prevazići i neki od problema u biološkim mrežama, na koje se nimalo ili vrlo malo može uticati. Sa druge strane, dalji naučni pomaci u razvoju i otkrivanju tajni bioloških mreža i mozga, u smislu načina rada i memorisanja podataka, omogućiće brži razvoj i implementaciju veštačkih neuralnih mreža u naučne i inženjerske primene.

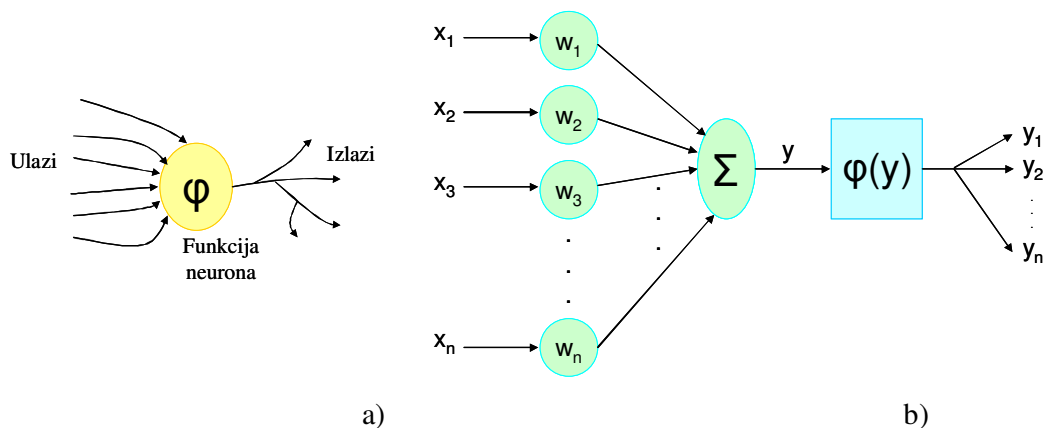
Shodno strukturi bioloških neurona, može se kreirati model, a zatim i fizička realizacija veštačkog neurona. Shodno strukturi na slici 2.3. može se napraviti „grub“ model veštačkog neurona prikazan na slici 2.4.a. Na slici 2.4.a. simbolom φ predstavljena je težinska suma i aktivaciona funkcija primenjena na težinsku sumu. Polazeći od ovog modela može se kreirati i razviti oblik koji uključuje sve potrebne parametre za simulaciju rada biološkog neurona. Ovakav model prikazan je na slici 2.4. gde su:

- x_i – ulazni podaci dendrita (ulazi veštačkog neurona),
- w_j – težinski koeficijenti dendrita,
- $\varphi(v_j)$ – aktivaciona funkcija,

y_j (akson i njegovi ogranci) – izlazi neurona i

v_j - težinska suma ulaza x_i .

Kao i biološki neuron, i veštački ima dendrite, sinapse i aksone. Sada se uticaj bioloških veza menja uticajem pojedinih konstanti na rad neurona. Ovo se najviše odnosi na promene i opis rada sinapsi kroz sinaptičke težine.



Slika 2.4. Model veštačkog neurona: a) uprošćena forma i b) razvijen oblik.

Preko svakog od dendrita stiže neka informacija koja se prosleđuje neuronu. Fizički posmatrano nisu sve informacije od dendrita podjednako bitne. Pojedini dendriti nose različite informacije, ali na izlazu treba da se pojave uticaji onih koji su, za dati proces, validni [SEUN98]. Ova osobina simbolično se kontroliše sinaptičkim težinama, koje su brojne vrednosti, i kojima se množi informacija sa dendrita. Nakon sinapsi sve skalirane veličine od dendrita stiču se u neuron gde se zbirno posmatraju. Ako ova suma ima vrednost koja je iznad praga posmatranog neurona, neuron će biti efikasan, i pomenuti signal modifikovati svojom funkcijom φ . Funkcija φ simboliše inteligentnu funkciju mozga [MASO56, MASO53]. Kao takva ova funkcija prenosa φ mora biti ograničena i neopadajuća [HAYK94].

Generalno posmatrano, kreiranje namenske veštačke neuralne mreže za rešavanje konkretnog problema zahteva izbor funkcije kojom će se menjati sinaptičke težine i funkcije samih neurona [GALU07]. U zavisnosti od tipa problema, mreže mogu da omoguće dva pristupa u rešavanju: princip razvrstavanja (*Classification*) i princip pridruživanja (*Association*) [CRAV93].

Princip razvrstavanja koristi karakteristike ulaznih podataka da bi pronašao sličnosti među njima i na taj način ih grupisao u manje grupe. Na ovaj način svi podaci na ulazu se dele u određen broj grupa, čime se mreža obučava na postojanje konačnog broja celina. Svaki novi podatak koji se pojavi na ulazu biće dodeljen nekoj od ranije formiranih grupa i na taj način klasifikovan u odnosu na prethodno naučene karakteristike te grupe.

Princip pridruživanja, sa druge strane, daje mogućnost rekonstrukcije ulaznog signala ili podatka koji je oštećen u prenosu ili degradiran šumom. Na ovaj način prepoznaje se i pretpostavlja deo koji nedostaje. Ovakav vid pridruživanja poznat je kao auto-pridruživanje. Sa druge strane, ulazni podatak može biti promenjen u samoj mreži i kao takav dodeljen nekoj grupi na izlazu mreže. Ovaj način pridruživanja naziva se hetero-pridruživanje. Bez obzira koji princip se koristi, ovaj vid rada mreža iskazuje upotrebu funkcija prenosa kao uvod u rešavanje problema memorisanja informacija u mozgu.

2.4. Način rada veštačke neuralne mreže

Haykin je opisao nekoliko važnih svojstava veštačkih neuralnih mreža (ANN-*Artificial Neural Network*) [HAYK94, ALEK95]:

1. ANN mogu biti linearne i nelinearne. Mnoge pojave u prirodi su nelinearne i važne su.
2. ANN uči tako što stvara relacije između ulaznih i izlaznih podataka.
3. ANN ima sposobnost da prilagođava težinske koeficijente sa promenama stanja i mreži.
4. Svaki neuron u mreži je pobuđen aktivnošću drugih neurona.
5. ANN ima sposobnost da se samoorganizuje, sačuva i distribuira informacije koje je primila tokom procesa učenja.
6. Paralelna priroda ANN čini je pogodnom za implementaciju u moderne elektronske komponente (VLSI), i kao takvom vrlo otpornom na greške.

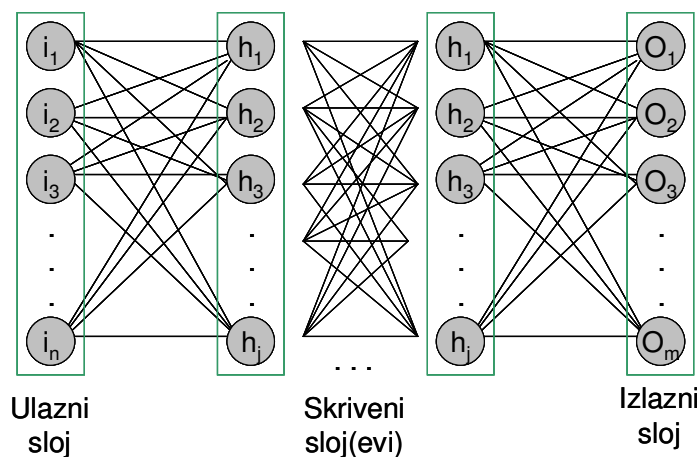
U poglavlju 2.3. je objašnjeno kako se biološki neuron može modelovati i realizovati pomoću neurona veštačke neuralne mreže. Da bi mreža činila celinu pored jednog

neurona mora postojati način da se kreira i poveže proizvoljan broj novih, koji treba da zadovolje navedena svojstva sa ciljem da kreiraju sredstvo koje može da donosi neke zaključke.

Ono što predstoji je da se definišu međusobni odnosi neurona, aktivacione funkcije neurona i definiše način učenja koje će se mreža podvrgnuti. U tom smislu, model veštačke neuralne mreže može se raščlaniti na tri segmenta [HAYK94]:

1. Arhitektura mreže,
2. Aktivaciona funkcija neurona i
3. Zakoni učenja.

Arhitektura mreže podrazumeva način vezivanja pojedinih neurona u celoj mreži. Zbog neophodne sistematizacije velikog broja neurona, svaka mreža je organizovana u slojeve [LEON98]. Svaki sloj je celina za sebe i neuroni unutar jednog sloja obavljaju tačno određenu funkciju. Svi slojevi su međusobno povezani, pri čemu su izlazi jednog sloja ulazi sledećeg, i tako dalje. Generalno gledano, mreže se klasifikuju u tri sloja: ulazni, izlazni i skriveni [BLAI01], [ROJA96]. Označavanje ovih slojeva najčešće je prvim slovom engleskih reči. Tako su neuroni ulaznog sloja označeni sa i (*input*), skrivenog sa h (*hidden*) i izlaznog sa o (*output*). Ulazni i izlazni sloj su oni slojevi kojima se podaci uvode ili uzimaju iz mreže dok je skriveni sloj međusloj kojim se tražena funkcija realizuje.



Slika 2.5. Prikaz slojevite arhitekture veštačke neuralne mreže.

Skriveni sloj može imati proizvoljan broj podslojeva u zavisnosti od potreba i kompleksnosti date mreže. Broj slojeva unutar skrivenog sloja (h_i) direktno se odražava na mogućnost rešavanja problema. Naime, kod postavljanja veštačke neuralne mreže jedan od prvih koraka predstavlja i definisanje broja slojeva potrebnih da dati problem reši. Tek nakon toga, definišu se međusobne veze i matematičke funkcije koje ih opisuju. Najčešće se u reprezentaciji mreže skriveni sloj crta kao jedinstven sloj, jer se time smanjuje kompleksnost crteža. Na slici 2.5. prikazana je struktura jedne veštačke neuralne mreže, kod koje je skriveni sloj predstavljen sa dva sloja, dok su ulazni i izlazni sloj predstavljeni sa različitim brojem ulaznih, odnosno izlaznih (neurona) signala. Broj ulaznih (i_i) i izlaznih (o_i) signala može, ali i ne mora, biti isti. U zavisnosti od problema koji se rešava, i strukture mreže koja je izabrana, ove dve veličine se izračunavaju ili su definisane početnim problemom [GALU07].

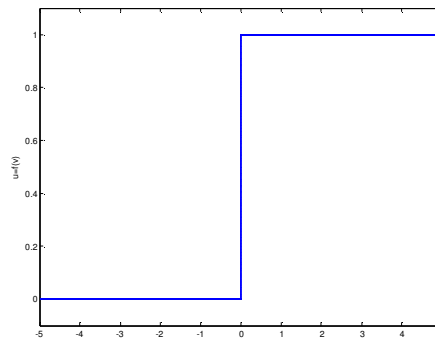
Aktivaciona funkcija neurona – predstavlja matematičku funkciju kojom neuron, ukoliko reaguje na prispelu informaciju, menja ulazni signal, i kao takav ga predaje ostalim neuronima. Definiše se na ulazu u mrežu i direktno zavisi od problema koji se rešava i dinamike signala koji se obrađuje. U savremenim veštačkim neuralnim mrežama, kao matematička interpretacija, funkcija prenosa najčešće se koristi u obliku [HAYK94, TSOU97, BLAI01]:

1. Odskočne (Hevisajdove) funkcije,
2. Logičke funkcije sa pragom i
3. Sigmoidalne (logaritamske, *arctan*-ne ili Gausove) funkcije.

Odskočna (Hevisajdova) funkcija je funkcija čija se vrednost u trenutku t promeni sa vrednosti 0 na 1. Promena se posmatra kao trenutna. Kao takva, ne može se u potpunosti realizovati realnim sistemima, ali je njena blaga aproksimacija realno izvodljiva u brzim sistemima. Stanjima 0 i 1 simbolično se označava stanje neurona kao neaktivno, tj. aktivno. Ovakav model se pojavio 1943. godine od strane neurofiziologa McCulloch-a i Pitts-a. Oni su stanje neurona posmatrali kao isključiva stanja u smislu nadražaja. Ako nadražaj postoji neuron je pobuđen i treba da obavi neku svoju funkciju, i suprotno. Pokazalo se da ovaj model predstavlja skromno ali za neke probleme efikasno rešenje, naročito ako se ima u vidu pojednostavljenje matematičkog

modela upotrebom odskočne funkcije. Na slici 2.6. prikazana je odskočna funkcija gde promenljiva v predstavlja ulazni signal.

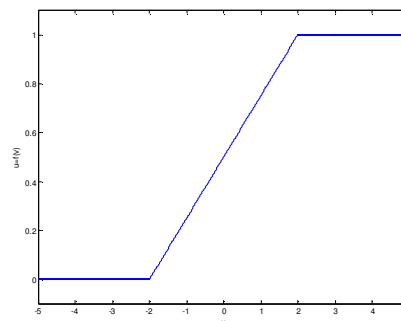
$$u = \varphi(v) = \begin{cases} 1, & v \geq 0 \\ 0, & v < 0 \end{cases}$$



Slika 2.6. Grafički prikaz aktivacione funkcije odskočnog tipa.

Logička funkcija sa pragom je slična odskočnoj, ali postoji vremenski deo u kome se dešava pomenuta promena. Ovim se predstavlja promena stanja u realnim vremenskim sistemima, što odgovara krajnjim implementacijama. Na ovaj način može se definisati prag nakon koga se tumači promena stanja, iako ona fizički ne dostiže vrednost 1. Opseg vrednosti prelaznog dela se definiše shodno potrebama u konkretnom slučaju, ali najčešće se uzima simetrični opseg $-x$ do x , dok su -1 i 1 krajnje granice intervala od interesa. Ova funkcija je često korišćena i iz razloga što predstavlja aproksimaciju nelinearnog pojačavača, koji se inače i koristi u praktičnoj realizaciji aktivacione tj. funkcije prenosa. Na slici 2.7. prikazana je funkcija sa pragom koja ima granične vrednosti 0 i 1.

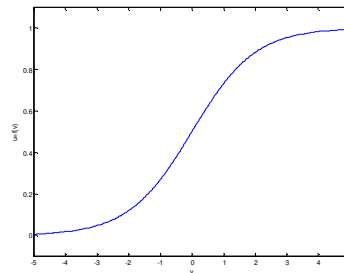
$$u = \varphi(v) = \begin{cases} 1, & v \geq 2 \\ 0.25v + 0.5, & -2 < v < 2 \\ 0, & v \leq -2 \end{cases}$$



Slika 2.7. Grafički prikaz logičke aktivacione funkcije sa pragom.

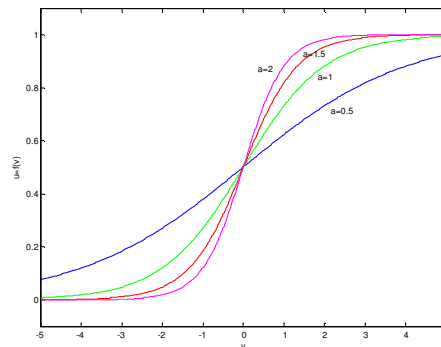
Sigmoidalna funkcija, slika 2.8, obuhvata veći broj dobro poznatih funkcija. Ove funkcije se najčešće primenjuju kao aktivacione funkcije zahvaljujući svojoj početnoj nelinearnosti koja odgovara funkcijama električnih komponenti potrebnih za realizaciju. Međutim, najvažnija karakteristika je da se, promenom jednog parametra ovih funkcija, nagibi krivih menjaju. Na taj način promena parametra direktno utiče na nagib krive čime se izlazni signal direktno modifikuje. Time se aktivacija jednog neurona čini dinamičkom, a samim tim i sposobnom da, u različitim početnim uslovima, kreira različite izlazne signale.

$$u = \varphi(v) = \frac{I}{1 + e^{-\alpha v}}$$



Slika 2.8. Grafički prikaz aktivacione funkcije sigmoidalnog tipa.

Na slici 2.9. prikazana je sigmoidalna funkcija sa različitim parametrima. Parametar α određuje nagib funkcije. Za veće vrednosti parametra α sigmoidalna funkcija sve više teži odskočnoj. Ova funkcija može biti realizovana i na neki drugi način, kao što je tangens hiperbolički, ali uvek zadržava osobine diferencijabilnosti na celom domenu što je važno za mnoge primene u analognim veštačkim neuralnim mrežama [HAYK94].



Slika 2.9. Grafički prikaz sigmoidalne funkcije za različite vrednosti parametra α .

Funkcije prenosa neurona ili aktivacione funkcije su neophodne da bi mreža mogla da nauči nelinearne funkcije. Ako toga ne bi bilo sve mreže bi bile na nivou perceptrona koji ima jedan ulaz i jedan izlaz. Drugi razlog za upotrebu nelinearnih funkcija je i pojava da se od kombinovanja ulaznih linearnih funkcija na izlazu svakako, kao posledica, dobija nelinearna.

Zakoni učenja - Učenje u neuralnim mrežama predstavlja ključni proces kojim se one razlikuju od klasičnih računarskih pristupa [RUSS95]. Samo učenje mreže podrazumeva proces podešavanja i korekcije vrednosti težinskih koeficijenata na sinapsama [BEAL90]. Ukoliko se nekim dendritom šalje više informacija neuronu, težinski koeficijent sinaptičke veze tog dendrita je sve veći, i obrnuto (što odgovara biološkim neuralnim mrežama i Hebb-ovom učenju). Na ovaj način neuron uči sa koje strane se pojavljuju informacije od značaja i koji „put ih donosi“. Ukoliko se nekim putem skoro nikada ne šalju informacije on polako „iščezava“, čime se njegov značaj smanjuje i sve je manja verovatnoća da će pojava neke informacije u njemu moći da promeni konačnu odluku. Eksitacijom ili inhibicijom nekih veza među neuronima pravi se razlika između manje-više bitnih informacija, dobro ili pogrešno naučenih i slično. Čovek svoje iskustvo i znanje stiče celog života, i na taj način sve više učvršćuje veze koje definišu informacije od interesa, dok proces zaboravljanja podrazumeva slabljenje ili uništenje neuralnih veza za slabo korišćene podatke. Kod veštačkih neuralnih mreža obučavanje se vrši skupom ulaznih parametara u zavisnosti od problema koji se rešava [GALL93, CARP87]. Ovaj skup treba da bude što je veći moguć, da bi mreža imala više prilike da pronađene zakonitosti, i sličnosti ojača sinaptičkim težinama. Iz tog razloga ovaj skup se često naziva trening skupom, i trebalo bi da sadrži sve reprezentativne uzorke za koje se mreža želi obučiti. Izostavljanje nekog uzorka može proizvesti da mreža nije u stanju da na odgovarajući ulazni signal odreaguje kako treba, ili da se delimično prilagodi i pokuša da „razume“ šta se od nje zapravo traži. Zbog realne pretpostavke da se nikada ne može napraviti takav trening skup koji bi sadržao sve moguće kombinacije, a naročito za složene probleme koji se rešavaju, procedura učenja, odabir trening skupa i način kontrole rezultata u toku rada, ima veliku ulogu u radu mreže. Kako se svi ovi koraci podvode pod fazu učenja, direktno se nameće stav o važnosti i sofisticiranosti ove faze u kreiranju veštačke neuralne mreže [FAUS93].

Obučavanje se najčešće deli na tri kategorije: nadgledano (*supervised*), nenadgledano ili samoorganizujuće (*selforganizing*) i delimično nadgledano [KOSK92]. Postoje i druge podele [HAYK94], [ROJA96] u kojima se ističu i hibridne varijante navedenih kategorija. S obzirom na problem koji se u ovom radu istražuje zadržaćemo se na osnovnoj podeli na tri navedene kategorije.

2.5. Realizacija veštačkih neuralnih mreža

Svaka neuralna mreža može se realizovati hardverski i softverski. Hardverski realizovane veštačke neuralne mreže su analogne, pa se svaki problem pomoću njih rešava u paralelnom procesiranju. Sam rad tih mreža može biti taktovan.

Najvažnije karakteristike veštačkih neuralnih mreža su:

1. Nema striktno definisanog algoritma, već se mreža obučava na osnovu trening skupa,
2. Raspodeljena memorija i
3. Paralelno procesiranje.

Softverska realizacija podrazumeva realizaciju na postojećim računarima pri čemu su neuroni i veze među njima virtuelni. S obzirom da se hardverskim neuralnim mrežama razvijaju postupci različiti od metoda zasnovanih na računarima, svaka softverska implementacija predstavlja relativno loše rešenje. Ova rešavanja pokušavaju da objedine dve bazično suprotne metode, što često daje lošije rezultate nego što bi se dobilo hardverskom realizacijom. Isto tako, softverka implementacija zavisi od brzine rada i tehničkih karakteristika računara. Kako se veštačke neuralne mreže koriste za rešavanje kompleksnih problema, vreme potrebno za obradu na klasičnim računarima često je nerealno dugo, čime i rešenje gubi na smislu. Iz tog razloga softverska realizacija se koristi kao test faza, dok se za konkretne realizacije u praksi koristi hardverska. Sa druge strane, hardverska realizacija podrazumeva složen i često skup postupak, koji je za probne ili interne potrebe neisplativ. Zato se nakon svih probnih faza u softverskoj realizaciji prelazi na hardversku, pa se često ne može ni govoriti o podeli nego integraciji ove dve vrste realizacije. Bez obzira da li se hardverska realizacija izvodi za masovnu ili individualnu potrebu, organizacija veštačke mreže i

njena izrada su uvek iste. U tom smislu postoji tačno definisan postupak izrade i delova koji se kasnije povezuju [CRAV93]. Osnovni delovi hardvera koji opslužuje veštačku neuralnu mrežu su:

- Interfejs,
- Sinapse,
- Neuroni,
- Veze među neuronima i
- Proces učenja.

Interfejs treba da omogući dovođenje spoljašnjih signala u veštačku neuralnu mrežu, i omogući njihovo odvođenje kao krajnjeg rezultata. U zavisnosti od problema koji se rešava, interfejs se mora prilagoditi ne samo vrsti signala nego i broju ulaznih neurona, koji nekada može biti relativno veliki, čime se realizacija usložnjava.

Sinapse treba da omoguće unutrašnju promenu signala koja je zasnovana na uticaju ostalih neurona mreže, skaliranih težinskim koeficijentima.

Neuroni treba da omoguće sumiranje svih signala koji se u njega stiču, njihovu modifikaciju i uslove za njegovo aktiviranje posredstvom praga odlučivanja.

Veze među neuronima treba da omoguće prenos signala, uz minimalnu degradaciju, nezavisno jedan od drugih. Ovo spada u veoma komplikovane probleme u realizaciji imajući u vidu da u opštem modulu svaki neuron treba da bude spojen sa svim ostalima u mreži [ALEK95, BEAL90, CARP87].

Na kraju, učenje predstavlja proces adaptivnog menjanja sinaptičkih težina shodno trening skupu ulaznih signala.

Više detalja o realizaciji mreža, koja nije predmet istraživanja ove teze, može se naći u literaturi [CRAV93].

2.6. Klasifikacija veštačkih neuralnih mreža

Veštačke neuralne mreže mogu se klasifikovati u mnogo kategorija shodno parametru po kome se klasifikacija vrši. Neki od parametara koji fundamentalno utiču na organizaciju i rad mreže su [MULL90, SIMP90, HAYK94, BEAL90, ALEK95]:

1. Broj slojeva,
2. Vrsta veza između neurona,

3. Vrsta obučavanja neuralnih mreža,
4. Smer prostiranja informacija,
5. Vrsta podataka koja se obrađuje.

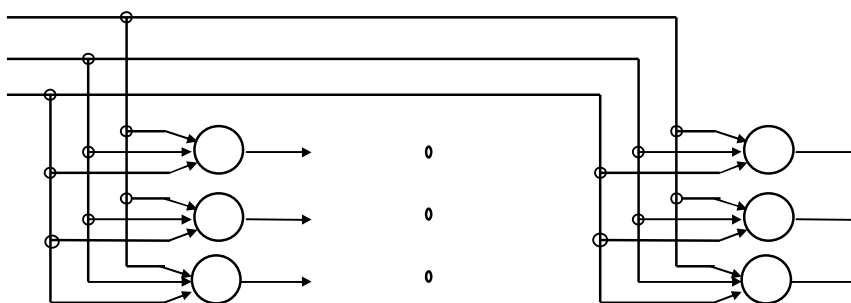
Shodno ovim parametrima, svaka mreža može se klasifikovati u neku od grupa koje povezuju slične parametre. Teško je govoriti o standardizovanoj podeli, jer se mreže neprestano razvijaju. U literaturi postoji veliki broj autora koji su dali svoje viđenje klasifikacije, a u ovom radu biće izložena podela koja se pojavljuje kao zajednička kod većine autora.

1. *Prema broju slojeva* mreže mogu biti jednoslojne i višeslojne. Jednoslojne mreže mogu se dalje deliti u zavisnosti od broja neurona, što odgovara mrežama realizovanim za rešavanje prostijih problema, dok se za veliki broj međuslojeva koristi termin višeslojne.

2. *Prema vrsti veza* između neurona mogu se izdvojiti sledeće grupe: slojevite, potpuno povezane, lestvičaste i celularne. Moguće su i kombinacije nekih od navedenih grupa.

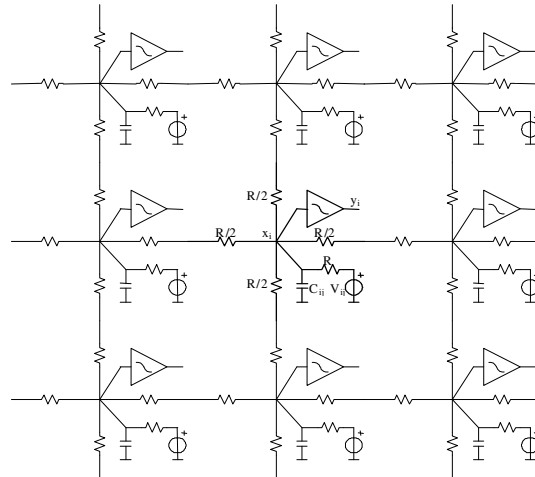
Slojevite mreže organizovane su u slojeve, tako da su izlazi jednog sloja ulazi sledećeg. Ovo je primenjeno kod realizacije ranije opisanog *backpropagation* algoritma. Na ovaj način tok signala kroz mrežu može se posmatrati sekvencijalno, dok je mreža pored logičke i strukturalno lako kontrolisana u postupku nadgledanja.

Potpuno povezane mreže su one mreže gde izlaz jednog neurona vodi ka ulazima ostalih u mreži. U ovom slučaju organizacija mreže se usložnjava, pogotovo imajući u vidu da se i neuroni izlaznog sloja povezuju sa neuronima ulaznog. Na ovaj način formira se petlja, i signali se teže nadgledaju. Ovakav tip neuralnih veza primenjen je i u realizaciji Hopfield-ovih mreža.



Slika 2.10. Grafički prikaz lestvičaste jednodimenzionone mreže.

Kod lestvičastih mreža postoje jednodimenzione, dvodimenzione i višedimenzione grupe polja neurona. Svaki od ulaza spojen je na sve ulaze neurona u tom polju. Izlaz iz polja može biti izlazni sloj, ili predstavljati ulaz novom polju neurona. U tom slučaju govori se o višedimenzionalnim grupama polja. Za razliku od potpuno povezanih mreža, ova mreža je bez povratne sprege, gde su neuroni raspoređeni u polja koja čine neku logičku celinu, slika 2.10.



Slika 2.11. Grafički prikaz celularne neuralne mreže.

Kod celularnih veza povezani su samo susedni čvorovi. Susednost čvorova definisana je logičkim vezama, dok se u nekim slučajevima može govoriti i o fizičkim blizinama. Ovakav tip veza među neuronima primenjen je kod celularnih neuralnih mreža (CNN), slika 2.11.

3. Prema vrsti obučavanja veštačke neuralne mreže se mogu podeliti na:

1. Nadgledano obučavanje - *Supervised training*,
2. Delimično nadgledano obučavanje i
3. Nenadgledano obučavanje - *Unsupervised training*.

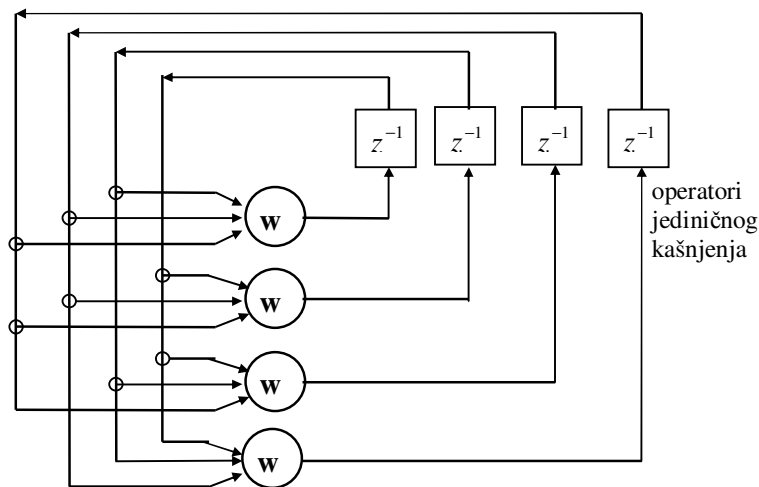
U poglavlju 2.4. je objašnjen značaj i problem obučavanja veštačkih neuralnih mreža.

4. Prema smeru prostiranja informacije u mreži mogu biti sa prostiranjem unapred (*feedforward*), kod kojih viši slojevi ne vraćaju informaciju u niže slojeve, ili

sa prostiranjem unazad (*backward*), gde viši slojevi vraćaju informacije nazad u niže slojeve. U literaturi se mreže sa prostiranjem unapred mogu naći i pod nazivom nerekurzivne, nerekurentne ili nepovratne, dok se mreže sa prostiranjem unazad mogu naći kao rekurzivne, rekurentne ili povratne [HAYK94, ALEK95, CARP87].

U mrežama sa prostiranjem unapred, najvažniju ulogu igraju prioriteta slojeva. Kako se tačno zna, koji sloj predaje kom sloju informacije, tačno se zna i tok signala. Ovakvom organizacijom postiže se velika stabilnost i brzina rada mreže.

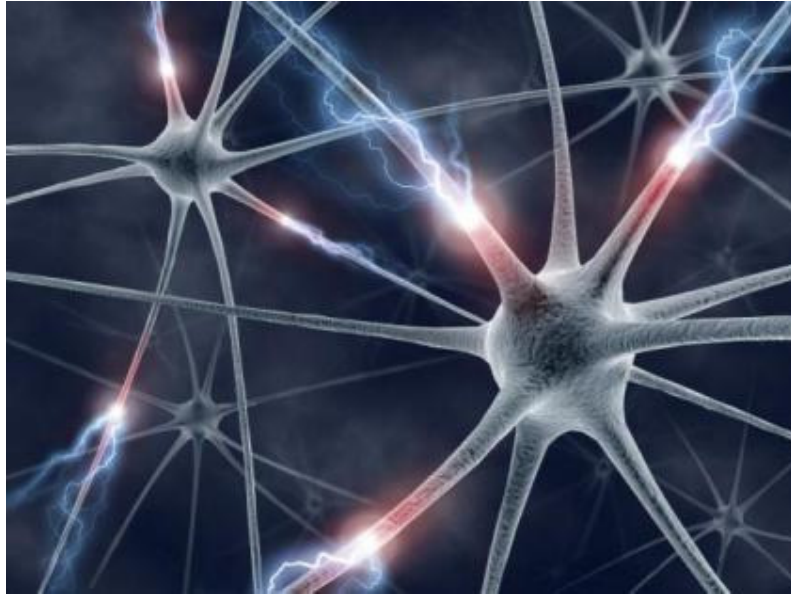
Kod mreža sa povratnom spregom (*feedback*) postoji izražena upotreba povratnih veza. Uvođenjem rekurzije direktno se utiče na stabilnost rada mreža. Iz tog razloga kod ovih mreža u samom početku treba očekivati pojave stabilnih i nestabilnih stanja. Sa druge strane, baš ovakva struktura mreža pokazuje se vrlo dobro u implementacijama koje zahtevaju primenu asocijativne memorije i rešavanje problema optimizacije, jer u iteracijama mogu same sebe dovesti u stanje koje obezbeđuje kvalitetno rešenje. Uvođenje povratne reakcije direktno dovodi i do povećanja efikasnosti mreže, jer se stanja koja nisu validna u svakoj sledećoj iteraciji brišu.



Slika 2.12. Grafički prikaz rekurentne mreže.

Najpoznatija mreža sa povratnom spregom je Hopfield-ova neuralna mreža koja će u ovom radu biti detaljnije opisana. Na slici 2.12. prikazana je struktura rekurentne mreže u kojoj se pored povratnih veza, od izlaznog ka ulaznom sloju, vrši i modifikacija signala operatorom vremenskog kašnjenja. Ova promena može biti i drugačija u zavisnosti od potreba u postupku rešavanja konkretnog problema.

5. *Prema vrsti podataka* mreže mogu biti analogne i digitalne. Ova podela je direktno uslovljena prirodom signala koji se koriste. Interesantno je istaći da, za razliku od savremenih primena digitalne tehnike, i sve većeg potiskivanja analogne, analogne mreže mogu dati čak i bolje rezultate. Ovo je posebno važno kod specifičnih signala kojima konverzija u digitalni može degradirati originalnu strukturu signala.



<http://neuralwiki.blogspot.com/2010/10/book-reference-for-neural-network.html>

3. Hopfield-ova neuralna mreža

Hopfield-ova neuralna mreža pripada grupi rekurentnih neuralnih mreža [HAYK94, HOPF85]. Kod ovih mreža, izlazni neuroni su povezani sa svim ulaznim neuronima, osim sopstvenog. Na taj način svaki od neurona svojim stanjem direktno utiče na sve ostale u mreži [HOPF82]. Na ovaj način svi ostali neuroni uče i prilagođavaju se promeni stanja svakog od njih, što bi u biološkoj interpretaciji bila

promena ponašanja jedinke u odnosu na grupu kojoj pripada. Kako su generalno uslovi u kojima grupa deluje slični, to je svaka od promena vrlo bitna jer doprinosi ukupnom rezultatu rada mreže. Na ovaj način se u veštačkim mrežama upotrebom rekurentnih mreža postiže interaktivnost koja postoji i u biološkim strukturama [GRAU07, HAYK94].

Kod Hopfield-ove neuralne mreže u povratnim granama najčešće postoje operatori jediničnog kašnjenja, tako da signal sa izlaza prvo bude zakašnjen i potom se vodi na sinapse drugih ulaznih neurona, koji su realizovani tako da svaki od njih rešava neki od segmenata definisanog problema [HAYK94].

Uticao povratnih signala može se dodatno ograničiti postavljanjem praga delovanja, čime se neke manje promene eliminišu, i mreža radi sa većim relativnim greškama [HOPF82]. Kako je organizacija ovih mreža slična organizaciji ostalih veštačkih neuralnih mreža, za probleme koji se rešavaju treba definisati sledeće :

1. Nelinearnost neurona unutar mreže,
2. Potrebu za simetričnošću sinaptičkih veza i
3. Broj povratnih veza unutar mreže.

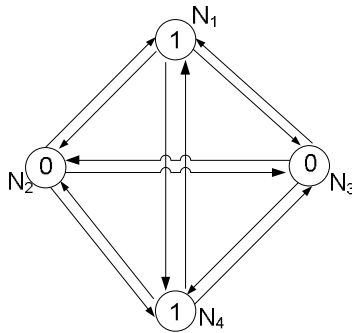
U zavisnosti od toga kakav je izbor parametara mreže, mreže poprimaju relativno različite strukture unutar iste klase rekurentnih mreža. Najpoznatije među ovim mrežama su Hopfield-ova mreža, Boltzmann-ov spoj i *Mean-field-theory* spoj [MOLT05, HAYK94, TSOU97, AMIT87].

Kao jednu od varijanti rekurentne neuralne mreže, J. J. Hopfield je predstavio u radu [HOPF82], koja je po njegovom imenu i dobila naziv. Jedan sloj Hopfield-ove neuralne mreže vrši procesiranje signala i na kraju vrši njegovu binarnu klasifikaciju [HOPF82, GRAU07]. Vrednosti na izlazu neuralne mreže su 0 ili 1 u zavisnosti da li je vrednost signala bila manja ili veća od praga. Kod nekih implementacija ove vrednosti su -1 i 1. Matematički posmatrano, izlaz neurona u izlaznom sloju je [HAYK94, CICH93, HOPF82]

$$v_i = \begin{cases} 1, & \text{ako je } \sum_j T_{ij} u_j \geq \theta_i \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad (3.1)$$

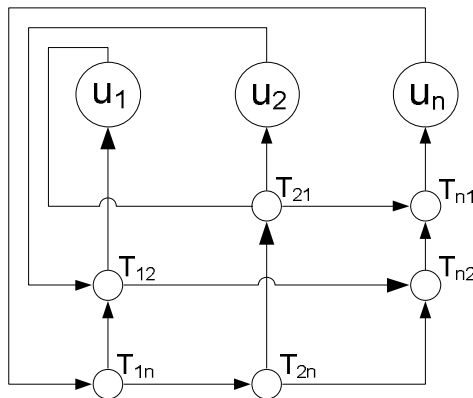
gde je T_{ij} težinski koeficijent za vezu između neurona i i j , u_j je stanje j -tog neurona a θ_i je definisani prag za i -ti neuron. Ovako definisane vrednosti neurona na njegovom

izlazu nazivaju se stanja neurona. Stanjima neurona opisano je i trenutno stanje Hopfield-ove neuralne mreže. U svakom trenutku ova stanja definišu jednu fazu rada, i svaka faza se može analizirati zasebno. U opštem slučaju stanje mreže je opisano vektorom $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, koji je skup nula i jedinica, čime se opisuju pojedinačna stanja neurona. Na primeru mreže sa četiri neurona i vektorom stanja $v = (1, 0, 0, 1)$ struktura mreže sa njenim stanjima data je na slici 3.1.



Slika 3.1. Struktura Hopfield-ove neuralne mreže sa četiri neurona i njihovim stanjima.

U svakoj iteraciji stanja neurona se menjaju shodno dolaznim signalima u neuron i težinskim koeficijentima na vezama sa ostalim neuronima. Kako je Hopfield-ova neuralna mreža potpuno povezana, rekurzivna stanja mreže se mogu samostalno menjati u svakoj od iteracija nakon samo jednog pobuđivanja mreže. Ukoliko nema drugih spoljašnjih pobuda, rekurzija u mreži doprinosi da u određenoj iteraciji Hopfield-ova neuralna mreža dođe u stabilno stanje [HOPF82, HAYK94]. Ovo stanje podrazumeva da su promene koje nastaju u svakoj narednoj iteraciji manje od praga i ne mogu promeniti pojedinačna stanja neurona.



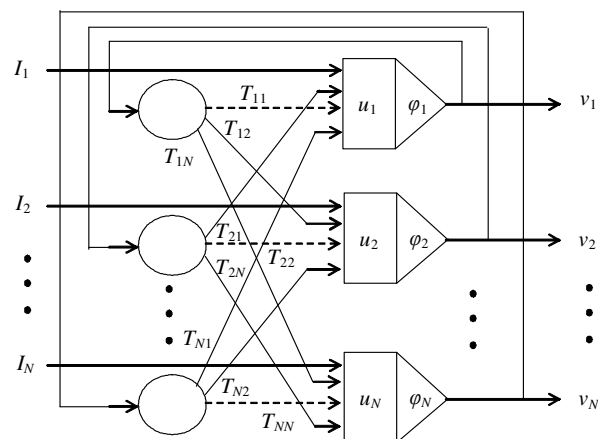
Slika 3.2. Osnovna arhitektura Hopfield-ove neuralne mreže.

Veze između neurona u Hopfield-ovoj neuralnoj mreži su ograničene sa dva uslova:

1. $T_{ii}=0$, za svako i (tj. neuron ne može pobuđivati samog sebe)
2. $T_{ij}=T_{ji}$ za svako $i-j$ (tj. međusobni uticaji dva neurona su istih težina).

Za ovako definisanu arhitekturu Hopfield-ove neuralne mreže može se nacrtati i grafička interpretacija gde u_n predstavlja početno stanje neurona, slika 3.2.

Imajući u vidu potrebu da se osnovna struktura sa slike 3.2. fizički realizuje, potrebno je gradivne komponente blok šeme zameniti aktivnim ili pasivnim komponentama električnih kola. Na slici 3.3. prikazana je osnovna struktura Hopfield-ove neuralne mreže u obliku strukturne šeme, pogodna za hardversku realizaciju, gde je sa u_i označena težinska suma ulaznih signala, T_{ij} težinski uticaji sinapsi a sa φ aktivaciona funkcija [HOPF82].



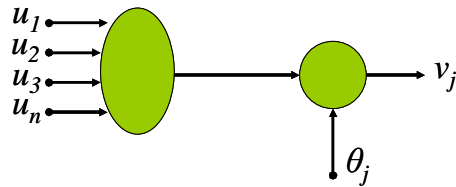
Slika 3.3. Strukturna šema Hopfield-ove neuralne mreže pogodna za hardversku realizaciju.

Kao i ostale rekurentne mreže i Hopfield-ova mreža je nelinearna, što joj daje mogućnost rešavanja složenih problema [HOPF82, HOPF84, HAYK94]. Ova mreža se zasniva na principu pamćenja informacija u dinamički stabilnim stanjima [HOPF82]. Svaka informacija se, u toku jedne iteracije, pamti u lokalnom minimumu energijske funkcije. Tokom rada, mreža teži da svoje izlaze podesi tako da svi konvergiraju ka jednom od grupe pomenutih lokalnih minimuma, i na takav način uđe u stabilno stanje. Taj minimum treba da bude minimum svih ostalih, pa se na taj način i očekuje

kvalitetna konvergencija ka globalnom minimumu čime se postiže rešenje optimizacionog problema.

3.1. Matematički model Hopfield-ove neuralne mreže

Hopfield-ova mreža najčešće koristi McCulloch-Pitts-ov model neurona što podrazumeva da su vrednosti izlaznih neurona +1 ili -1 [MCCU43]. Ako se pretpostavi da mreža ima N izlaznih neurona (neuroni u izlaznom sloju) tada je izlaz cele mreže matrica $v=[v_1, v_2, v_3, \dots, v_n]^T$. Vraćanjem informacije na ulaz može se reći da su neuroni i - j povezani sinaptičkom težinom T_{ji} , koja definiše uticaj signala u_i , i -tog neurona na j -ti neuron.



Slika 3.4. Model veštačkog neurona sa pragom.

Shodno modelu veštačkog neurona prikazanog na slici 3.4, posmatrajući jedan sloj ulaznih neurona, sa fiksnim pragom θ dovedenim spolja na j -ti neuron [LEON98], i stanje i -tog neurona koji je sa j -tim povezan sa T_{ji} , definiše se aktivacioni potencijal v_j kao [HOPF82, HAYK94]

$$v_j = \sum_{i=1}^N T_{ji} u_i - \theta_j \quad (3.2)$$

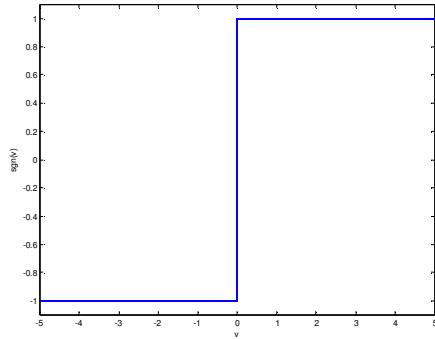
Nakon pobude j -ti neuron menja svoje stanje u_j , na osnovu izračunate promenljive v_j , kao

$$u_j = \begin{cases} +1, & v_j > 0 \\ -1, & v_j < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

ili drugačije

$$u_j = \text{sgn}(v_j) \quad (3.4)$$

gde je sgn (signum) funkcija definisana grafikom na slici 3.5.



Slika 3.5. Grafik signum funkcije.

Problem može da nastane ukoliko je $v_j=0$. Tada se mreži definišu pravila po kojima se vrši odlučivanje. Na primer, za slučaj kada je $v_j=0$ stanje j -tog neurona je nepromenjeno u odnosu na njegovo prethodno stanje [HAYK94].

Hopfield-ova mreža ima dva karakteristična stanja. To su:

1. Faza prikupljanja informacija (pamćenja),
2. Faza pozivanja prethodno prikupljenih informacija.

Faza pamćenja je relativno kratka u odnosu na ostale tipove neuralnih mreža i služi da bi mreža dobila određene ulazne podatke i počela da koriguje inicijalne vrednosti svojih težinskih koeficijenata. Ako se želi zapamtiti skup ξ_μ , gde je vektor ξ N -dimenzionalni, tada je $\{\xi_\mu | \mu=1,2,\dots,p\}$ gde se p vektora nazivaju osnovnom (fundamentalnom) memorijom i predstavljaju početna stanja mreže na osnovu kojih mreža vrši dalju obuku i koriguje težinske koeficijente.

Neka je $\xi_{\mu i}$ i -ti element osnovne memorije ξ_μ , gde je $\mu=1,2,\dots,p$, tada su, na osnovu Hebb-ovog zakona učenja, sinaptičke težine koje povezuju i -ti i j -ti neuron [KOSK92]

$$T_{ji} = \frac{1}{N} \sum_{\mu=1}^p \xi_{\mu j} \xi_{\mu i} \quad (3.5)$$

Kako se pobuđivanje neurona može vršiti samo od strane ostalih neurona u mreži, to zanči da ne postoji povratna veza ka posmatranom neuronu i tada je

$$T_{ii}=0 \quad (3.6)$$

Kombinujući relaciju 3.5. i uslov 3.6, matrica sinaptičkih težina \mathbf{T} , dimenzije $N \times N$, može se konačno zapisati kao

$$\mathbf{T} = \frac{1}{N} \sum_{\mu=1}^p \xi_{\mu} \xi_{\mu}^T - \frac{p}{N} \mathbf{I} \quad (3.7)$$

gde je $\xi_{\mu} \xi_{\mu}^T$ proizvod vektora ξ_{μ} sa samim sobom, a \mathbf{I} matrica vrsta, potrebna da bi matricna jednačina imala potpunu matricnu formu. Treba primetiti da je matrica \mathbf{T} simetrična tj. da su vrednosti $T_{ij}=T_{ji}$. Kako je uticaj i -tog neurona na j -ti neuron isti kao i uticaj j -tog neurona na i -ti, matrica \mathbf{T} se može zapisati i kao

$$\mathbf{T}^T = \mathbf{T} \quad (3.8)$$

Faza pozivanja podrazumeva dovođenje nepoznatog ulaznog signala u neuralnu mrežu, i očekuje se da mreža pronade neki od najbližih lokalnih minimuma, na osnovu podataka dobijenih u fazi pamćenja. Na ovaj način, neuralna mreža na bazi „prethodnog iskustva“ obrađuje ulazni signal i definisanim načinom rada dobija izlazni, koji treba da bude u korelaciji sa primenjenom logikom rada. Sa druge strane logika rada se definiše u skladu sa nekim zadatim ciljem, pa se na izlazu mreže dobija rešenje definisanog problema u obliku električnog signala.

Princip rada mreže podrazumeva da se, inicijalno, neuralnoj mreži definiše neko početno stanje. Ovo stanje uslovljava da se na izlazu pojavi neki N -dimenzionalni vektor \mathbf{v} , čije vrednosti su +1 ili -1, i koje ne odgovaraju ulaznom signalu jer su modifikovani početnim težinskim koeficijentima. Dovođenjem ovakvog probnog ulaznog vektora, mreža delimično ili u potpunosti definiše svoju osnovnu memoriju pripremajući se za dalji rad. Vrlo često ulazna stanja, kojima se započinje proces rada mreže, su slučajne veštački generisane vrednosti, dok je u realnim sistemima, to je signal šuma. Na osnovu ovih slučajnih ulaznih stanja neuroni dobijaju vrednosti +1 ili -1. Shodno rekurentnosti mreže i definisanih aktivacionih funkcija, nakon „puštanja“ mreže u rad, ova stanja će se menjati dok se ne postigne neko od stabilnih stanja.

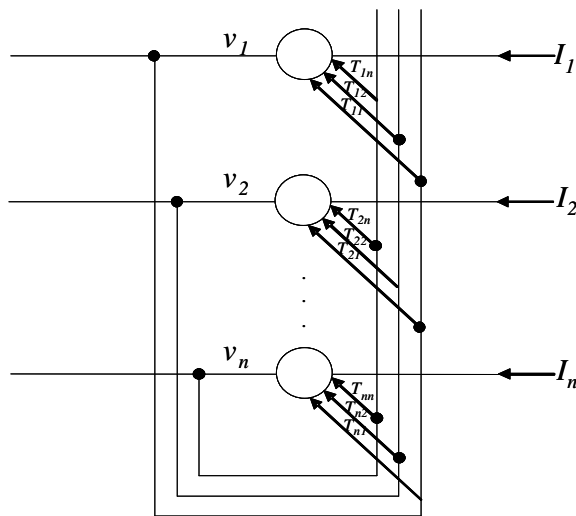
U iterativnom postupku mreža računa vrednosti aktivacione funkcije, za j -ti neuron i definiše izlaz v_j koji se vraća na ulaz kao u_j , ukoliko se u povratnoj spezi ne nalazi komponenta koja ne modifikuje vrednost signala. U skladu sa relacijama 3.2, 3.3 i 3.4, i pretpostavkom da je u povratnoj spezi realizovano samo vremensko kašnjenje signala, izlazni signal \mathbf{v} tada postaje

$$\mathbf{v} = \text{sgn}(\mathbf{T}\mathbf{v} - \boldsymbol{\theta}) \quad (3.9)$$

gde je \mathbf{T} matrica težinskih koeficijenata, a $\boldsymbol{\theta}$ matrica pragova [CARP87, BROW91, HAYK94]. Ukoliko vektor \mathbf{v} zadovoljava prethodnu jednačinu tada se taj vektor naziva stabilnim stanjem mreže ili fiksnom tačkom u faznom prostoru ovog sistema.

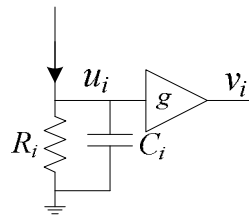
3.2. Hardverska realizacija matematičkog modela Hopfield-ove neuralne mreže

Analogna Hopfield-ova neuralna mreža je dinamički sistem međusobno povezan nelinearnim vezama kroz koje je Hopfield pokušao da simulira rad biološke neuralne mreže [HOPF82, LEON98]. Svaki neuron ove neuralne mreže na slici 3.6. predstavljen je krugom [ZAK03], dok I_i predstavlja bias struju [HOPF85].



Slika 3.6. Model Hopfield-ove neuralne mreže.

Struktura neurona može se predstaviti i električnom šemom prikazanoj na slici 3.7 [ZAK03]. Izlaz nelinearnog pojačavača ograničen je vrednošću $[0,1]$.

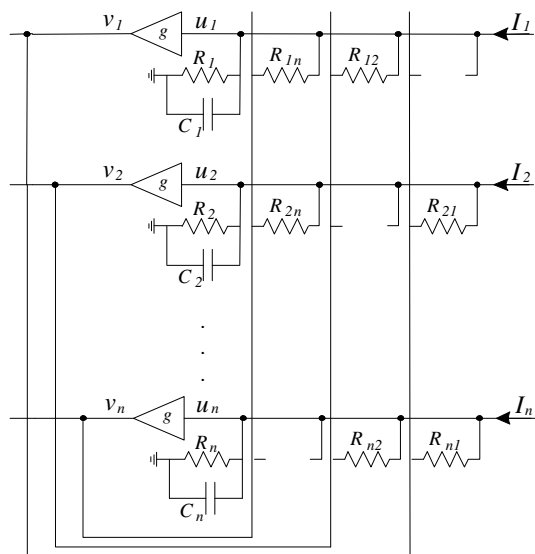


Slika 3.7. Električna šema modela neurona u Hopfield-ovoj neuralnoj mreži.

Uslov koji treba da zadovolji funkcija prenosa nelinearnog pojačavača je da je diferencijabilna na celom intervalu i monotono rastuća [HAYK94, HOPF84]. Ovo znači da ako je $u > u'$ tada je $g(u) > g(u')$. Tako definisana funkcija g naziva se aktivaciona funkcija. Jedna od mogućih aktivacionih funkcija je i sigmoidalna data sa

$$v = g(u) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha u}} \quad (3.10)$$

pri čemu je pozitivan parametar α nagib aktivacione funkcije g . Polazeći od modela Hopfieldove mreže sa slike 3.6. i električne šeme modela neurona sa slike 3.7, dobija se električno kolo za implementaciju Hopfield-ove neuralne mreže [ZAK03], slika 3.8.



Slika 3.8. Električna šema realizacije Hopfield-ove neuralne mreže.

Ukoliko se primene Kirhofenovi zakoni na ulazu u svaki pojačavač, (pod pretpostavkom da je operacioni pojačavač idealan, tj. ulazna otpornost pojačavača beskonačno velika a ulazna struja zanemarljivo mala) dobija se

$$C_i \frac{du}{dt} + \frac{u_i}{R_i} = \frac{v_1 - u_i}{R_{i1}} + \frac{v_2 - u_i}{R_{i2}} + \dots + \frac{v_n - u_i}{R_{in}} + I_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.11)$$

Uvodeći transkonduktanse umesto otpornosti, pa dalje njihovim grupisanjem kao u [HOPF85, ZAK03], ima se:

$$T_{ij} = \frac{1}{R_{ij}}, \quad \frac{1}{r_i} = \sum_{j=1}^n T_{ij} + \frac{1}{R_i}. \quad (3.12)$$

Uključivanjem relacije 3.12 u 3.11 dobija se relacija

$$C_i \frac{du_i}{dt} + \frac{u_i}{r_i} = \sum_{j=1}^n T_{ij} v_j + I_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.13)$$

Dobijena relacija predstavlja matematički model promena stanja napona i struja u neuralnoj mreži, i predstavlja polaznu relaciju za sve dalje relacije kojima se opisuju stanja ove neuralne mreže.

3.3. Energijska funkcija

Energijska funkcija Hopfield-ove neuralne mreže predstavlja matematičku jednačinu koja sadrži sve relevantne promenljive i koja opisuje stanje izlaza u funkciji od ulaza [HAZK94, HOPF82, ZAK03]. Ova funkcija treba da bude definisana tako da njen minimum predstavlja optimalno ili željeno stanje mreže.

Energijska funkcija ne predstavlja fizičku energiju sistema ali se može koristiti kao objektivna funkcija mere stanja mreže koja se minimizira u svakoj iteraciji kada mreža menja svoja stanja. Da bi se obezbedila ova minimizacija, sa promenama stanja neurona, neophodno je da svi parametri i struktura mreže budu postavljeni na zadovoljavajući način. U takvom slučaju promene koje nastaju u energijskoj funkciji su ili stagnirajuće ili imaju redukcioni karakter sa promenom iteracije. U slučaju da se na stanja neurona utiče spoljašnim signalom, promena energijske funkcije mora da ima opadajući karakter, pri čemu se može zaustaviti u nekom od lokalnih ili globalnom minimumu. Da bi Hopfield-ova neuralna mreža radila na ovakav način neophodno je da zadovoljava uslov stabilnosti koji je u direktnoj vezi sa Lyapunov-om funkcijom [HOPF85]. Pokazano je da ulaskom neuralne mreže u stanje lokalnog minimuma nije moguće obezbediti konvergenciju energijske funkcije ka globalnom bez uvođenja spoljašnjih signala [HOPF85]. Iz tog razloga je odabir reda veličine spoljašnjih signala izuzetno bitan u preciznosti dobijenog rešenja pa zbog toga konačno rešenje nije uvek optimalno ali je u skupu rešenja bliskih optimalnom.

Vraćanje smeštenih informacija u mreži je omogućeno pomoću dinamičke procedure obnavljanja stanja neurona [FREE91]. Ovaj neuron je selektovan među onim neuronima koji treba da se promene, ali nasumice izabran u jednom trenutku vremena. Ova asinhrona dinamička procedura se ponavlja sve dok nema dalje promene stanja neurona. U verziji Hopfield-ove neuralne mreže proces stimulacije neurona podvrgava se zakonima verovatnoće. U takvoj situaciji prema neuronima se odnosimo kao stohastičkim neuronima. Korišćenjem stohastičkih neurona omogućava se dalje razvijanje i posmatranje mreže na statističkom nivou, „povezivanjem“ njenog ponašanja sa zadatim problemom.

Hopfield-ova mreža radi u nenadgledanom modu. Može se koristiti ili kao adresabilna memorija ili kao mašina za rešavanje problema optimizacije [HAZK94, FREE91, ROJA96]. U višestrukim optimizacionim problemima postoji diskretan sistem sa velikim, ali ograničenim, brojem mogućih rešenja. U njima se traži rešenje koje minimizira energijsku funkciju, a zasniva se na merenju trenutnih parametara sistema.

U Hopfield-ovoj realizaciji definisani su uslovi $T_{ij}=T_{ji}$, i $T_{ii}=0$ koji uz uslov $a_i > 100$, zadovoljavaju opšti uslov Liapunov-e stabilnosti [HOPF85]. Tada je energijska funkcija koja opisuje stanje mreže definisana sa [HOPF85]:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N T_{ij} v_j v_i - \sum_{i=1}^N I_i v_i . \quad (3.14)$$

Promena energije, koja se dešava sa promenom stanja neurona, tada je definisana sa

$$\frac{\partial E}{\partial v_i} = -\sum_{j=1}^N T_{ij} v_j - \sum_{i=1}^N I_i . \quad (3.15)$$

Na bazi relacija (3.15) i (3.13), dobija se relacija

$$C_i \frac{du_i}{dt} = -\frac{u_i}{R_i} - \frac{\partial E}{\partial v_i} \quad (3.16)$$

koja za stabilno stanje, kada nema promene signala, $du_i/dt=0$, može biti napisana kao

$$\partial E = -\frac{u_i}{R_i} \partial v_i . \quad (3.17)$$

Kako je izraz $u_i \partial v_i$ veći ili jedna nuli, to ∂E mora biti manji ili jednak nuli da bi sistem bio stabilan.

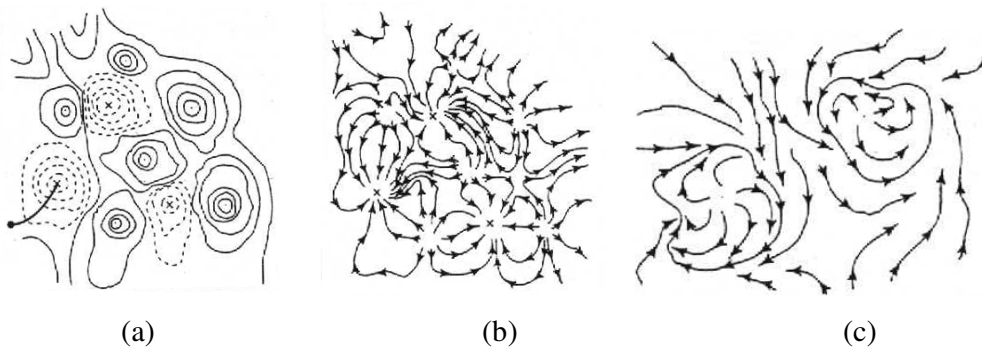
Za rekurentnu mrežu sa simetričnim sparivanjem, koja je ovde izložena, može se definisati energijska funkcija ili Lyapunov-a funkcija [HOPF84]:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_i \sum_{\substack{j \\ i \neq j}} T_{ji} v_i v_j + \sum_{j=1}^N \frac{1}{R_j} \int_0^{x_j} \varphi_j^{-1}(v_j) dv_j + \sum_{j=1}^N \theta_j v_j \quad (3.18)$$

gde je v_j izlaz neurona j povezan sa aktivacionim potencijalom u relaciji 3.4. Energijska funkcija 3.18. je specijalan slučaj teoreme Cohen-a i Grossberg-a [COHE83]. Značaj energijske funkcije E je da obezbeđuje osnovu za razumevanje specifičnih problema koje rekurentna mreža može da reši. Za sada je dovoljno primetiti da energijska funkcija E u potpunosti opisuje rekurentnu mrežu uključujući sve sinaptičke težine i sva stanja promenljivih u mreži. Za slučaj kada se prag θ_j menja sporo, u toku računanja stanja mreže, u radovima [HOPF84, COHE83] je pokazano da važi dokaz iz poglavlja 3.3.1. kojim se pokazuje da je energijska funkcija E monotono opadajuća funkcija stanja mreže.

Kada se mreža „pokrene“, sa bilo kojim početnim stanjem, kretaće se u pravcu opadanja energijske funkcije E sve dok ne dosegne lokalni minimum i dok u toj tački ne prestanu dalje promene. Lokalni minimum energijske funkcije predstavlja stabilne tačke faznog prostora. Ove stabilne tačke se takođe ponašaju kao *atraktori*, u smislu da svaka od njih deluje na svoju lokalnu sredinu privlačnim dejstvom.

Na slici 3.9. su grafici koji predstavljaju dvodimenzionalni fazni prostor [HOPF86] koji je opisan u prethodnom pasusu.



Slika 3.9. Grafički prikaz dvodimenzionalnog faznog prostora Hopfield-ove neuralne mreže: a) usled promene stanja neurona b) mreže sa simetričnim, c) mreže sa nesimetričnim parovima.

Svaka putanja na grafiku 3.9.b. odgovara nekom mogućem stanju mreže, pri čemu strelice pokazuju pravac kretanja. Svaka putanja se završava stabilnim stanjem što potvrđuje ulogu mreže da se u toku novih iteracija nastavlja sa minimizacijom energijske funkcije dok se ne stigne u „dno lokalne doline faznog prostora“, nakon čega se konvergencija zaustavlja. Na slici 3.9.a. je prikazano energetsko područje koje je posledica promena stanja neurona sa aspekta energije u toku kretanja prikazanog na slici 3.9.b. Svakom zatvorenom linijom prikazana je konstantna vrednost energijske funkcije E . Pune linije prikazuju maksimume, dok isprekidane ukazuju na minimume energije tj. doline u faznom polju. Najniže tačke dolina predstavljaju stabilna stanja faznog prostora. Slika 3.9.b. predstavlja rekurentnu mrežu sa simetričnim parovima. Ukoliko parovi nisu simetrični moguće su dodatne komplikacije koje su prikazane na slici 3.9.c. gde putanje dobijaju oscilatorna ponašanja [HOPF86]. Važno je naglasiti da je ipak moguće kreirati stabilnu rekurentnu mrežu čak i ako je asimetrična [CARP87].

3.3.1. Dokaz opšte konvergencije energijske funkcije

Sistem matematičkog modela od n nelinearnih diferencijalnih jednačina definiše model Hopfield-ove neuralne mreže [CICH93], pa se i konvergencija rada mreže može dokazati u sistemu matematičkih jednačina. Polazeći od relacije 3.13, Hopfield-ova neuralna mreža može se posmatrati i kao asocijativna memorija. Ovo leži u činjenici da se asimptotska stabilna stanja pod uticajem stanja susednih neurona menjaju (razvijaju) u vremenu [ROJA96]. Ovo ponašanje se može tumačiti kao modifikacija tj. progresivni napredak od „lošeg“ početnog stanja ka „ispravnom“ (željenom), koje je negde memorisano, što odgovara opštem pojmu asocijativne memorije [GRAU07]. Polazeći od činjenice da je aktivaciona funkcija g striktno rastuća i diferencijabilna, može se definisati funkcija g^{-1} koja je takođe diferencijabilna (u skladu sa teoremom o inverznoj funkciji). Uvršćujući ove smene u relaciju 3.13 dobija se

$$C_i \frac{dg^{-1}(v_i)}{dv_i} \frac{dv_i}{dt} + \frac{g^{-1}(v_i)}{r_i} = \sum_{j=1}^n T_{ij} v_j + I_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.19)$$

Neka je \mathbf{T} matrica sa elementima T_{ij} i $\mathbf{I} = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_n]^T$, tada se relacija 3.13 može napisati u matičnoj formuli kao [ZAK03]

$$\begin{bmatrix} C_i \frac{dg^{-1}(v_i)}{dv_i} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & C_i \frac{dg^{-1}(v_n)}{dv_n} \end{bmatrix} v(t) = \mathbf{T}v + \mathbf{I} - \begin{bmatrix} \frac{g^{-1}(v_1)}{r_1} \\ \vdots \\ \frac{g^{-1}(v_n)}{r_n} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Izraz za energijsku funkciju Hopfield-ove neuralne mreže tada se može napisati [POZN01] i kao

$$\begin{aligned} E(v) &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ij} v_i v_j - \sum_{i=1}^n I_i v_i + \sum_{i=1}^n \int_0^{v_i} \frac{g^{-1}(s)}{r_i} ds \\ &= -\frac{1}{2} v^T T v - I^T v + \sum_{i=1}^n \int_0^{v_i} \frac{g^{-1}(s)}{r_i} ds \end{aligned} \quad (3.21)$$

Polazeći od 3.21 i 3.8 i računajući gradijent energijske funkcije, dobija se

$$\nabla E(v) = -T v - I + \left[\frac{g^{-1}(v_1)}{r_1} \quad \dots \quad \frac{g^{-1}(v_n)}{r_n} \right]^T. \quad (3.22)$$

Uvodeći smenu za prvi član matrične jednačine 3.20 kao

$$S(v) = \begin{bmatrix} C_1 \frac{dg^{-1}(v_1)}{dv_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & C_n \frac{dg^{-1}(v_n)}{dv_n} \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

i uvršćivanjem u relaciju 3.22 dobija se

$$S(v)\dot{v}(t) = -\nabla E(v(t)) \quad (3.24)$$

Ova relacija pogodna je za analizu dinamike Hopfield-ove neuralne mreže.

Dokaz ograničenosti energijske funkcije

Polazeći od relacije 3.21 ima se [ZAK03]

$$|E(v)| \leq \frac{1}{2} \|T\| \|v\|^2 + \|I\| \|v\| + \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i} \left| \int_0^{v_i} g^{-1}(s) ds \right|. \quad (3.25)$$

Komponente vektora v su izlazi nelinearnih pojačavača i kao takvi su ograničeni na vrednosti iz intervala $[0,1]$. Iz tog razloga je $\|v\| = \|v\|_2 \leq \sqrt{n}$. Da bi energijska funkcija

bila ograničena dovoljno je pokazati da je i integral $\int_0^{v_i} g^{-1}(s)ds$ ograničen. Polazeći od izraza za inverznu funkciju g^{-1} , datu u 3.10 ima se

$$\frac{1}{v} = 1 + e^{-\alpha u}, \quad \frac{1}{v} - 1 = e^{-\alpha u}. \quad (3.26)$$

Logaritmovanjem obe strane relacije 3.26 ima se

$$\ln\left(\frac{1-v}{v}\right) = -\alpha u \quad (3.27)$$

$$\text{tj. } u = g^{-1}(v) = \frac{1}{\alpha}(\ln(v) - \ln(1-v)).$$

Koristeći simetrično svojstvo funkcije g^{-1} dobija se

$$\left| \int_0^{v_i} g^{-1}(s)ds \right| \leq \int_0^{v_i} |g^{-1}(s)|ds \leq -2 \int_0^{1/2} g^{-1}(s)ds. \quad (3.28)$$

što se može zapisati kao

$$\int \ln(s)ds = s \ln(s) - s. \quad (3.29)$$

Uvodeći smenu može se definisati relacija kao

$$\int \ln(1-s)ds = -(1-s)\ln(1-s) - s. \quad (3.30)$$

Na taj način se postiže

$$\begin{aligned} \int_0^{1/2} g^{-1}(s)ds &= \int_0^{1/2} \frac{1}{\alpha}(\ln(s) - \ln(1-s))ds \\ &= \frac{1}{\alpha}(s \ln(s) - s + (1-s)\ln(1-s) + s) \Big|_0^{1/2} \\ &= \frac{1}{\alpha}(s \ln(s) + (1-s)\ln(1-s)) \Big|_0^{1/2}. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Kako je

$$s \ln(s) = \frac{\ln(s)}{1/s} \quad (3.32)$$

tada se primenom Lopitalovog pravila dobija da je

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{\ln(s)}{1/s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1/s}{-1/s^2} = 0 \quad (3.33)$$

Primenjujući ovo na relaciju 3.31 dobija se

$$\int_0^{1/2} g^{-1}(s) ds = \frac{1}{\alpha} \ln(1/2) \quad (3.34)$$

Kombinovanjem 3.28 i 3.34 dobija se relacija

$$\left| \int_0^{v_i} g^{-1}(s) ds \right| \leq -2 \frac{1}{\alpha} \ln(1/2) \quad (3.35)$$

kojom je dokazano da je integral, pa samim tim i energijska funkcija, ograničena.

Dokaz 1: Promena energijske funkcije u vremenu nije pozitivan broj

Polazeći od relacije 3.24 i njenog elementa $v(t)$, i relacije 3.8, potrebno je dokazati da je

$$\frac{d}{dt} E(v(t)) \leq 0 \quad (3.36)$$

relacija koja zadovoljava Hopfield-ovu neuralnu mrežu. Polazeći od

$$\frac{d}{dt} E(v(t)) = (\nabla E v(t))^T \dot{v}(t) \quad (3.37)$$

i transformišući 3.24 u

$$\nabla E(v(t)) = -S(v(t))\dot{v}(t) \quad (3.38)$$

dobija se kombinacija 3.37 i 3.38 u obliku

$$\frac{d}{dt} E(v(t)) = -\dot{v}^T(t) S(v(t)) \dot{v}(t) = -\sum_{i=1}^n C_i \frac{dg^{-1}(v_i(t))}{dv_i} \dot{v}_i^2 \quad (3.39)$$

Kako je $C_i > 0$ i $v_i \in (0,1)$ ima se

$$\frac{dg^{-1}(v_i)}{dv_i} = \theta \left[\frac{1}{v_i} + \frac{1}{1-v_i} \right] > 0 \quad (3.40)$$

Na osnovu 3.40 proizilazi da je

$$\frac{d}{dt} E(v(t)) \leq 0 \quad (3.41)$$

relacija koju zadovoljava model Hopfield-ove neuralne mreže [ZAK03].

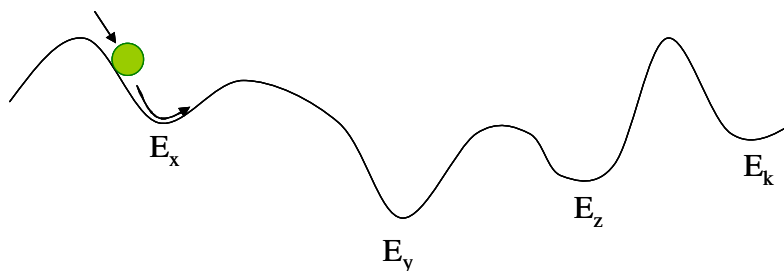
Na ovaj način obezbeđena je monotonost i opadajuće svojstvo energijske funkcije i njena konvergencija ka nekom stacionarnom i stabilnom stanju.

3.3.2. Opšti uslovi stabilnosti Hopfield-ove neuralne mreže

U Hopfield-ovom radu [HOPF82] prvi put je precizno formulisan fizički princip čuvanja informacija u dinamički stabilnim mrežama. Hopfield-ova ideja da se posmatraju pojedinačni događaji, u tom trenutku, izazvala je burne reakcije drugih istraživača. Naime, Hopfield uvodi neku vrstu energijske ravni, u kojoj se dozvoljava u dinamičkoj proceduri, da minimizira energiju mreže, na takav način da se ravan transformiše u trodimenzionalnu strukturu gde najniže tačke (doline) predstavljaju tačke privlačenja okolnih tačaka, čime stvaraju lokalne minimume. Najniža dolina predstavlja globalni minimum energijske funkcije i treba da garantuje stabilno stanje mreže [GRAU07].

Generalno posmatrano, stabilnost mreže je jedna od najbitnijih karakteristika svakog sistema [POZN98]. Ovo je posebno izraženo kod dinamičkih sistema, kao što su i neuralne mreže, koja lako mogu da dođu u oscilatorno ili divergentno stanje [YU01]. Pokazuje se da je stabilnost posebno bitna kod velikih i kompleksnih sistema, gde svaki od elemenata može direktno da utiču na nju [POZN01]. Kod realizacije Hopfield-ovde neuralne mreže, pored broja neurona, najveći uticaj na stabilnosti ma izbor elemenata matrice \mathbf{T} .

Uticaj matrice \mathbf{T} na energijsku funkciju i konvergenciju ka stabilnom stanju mreže najbolje se može prikazati grafički. Naime, energijska funkcija se u jednodimenzionom sistemu može predstaviti kao kriva, dok je rešenje posmatranog problema definisano telom koje se kreće po toj krivoj.

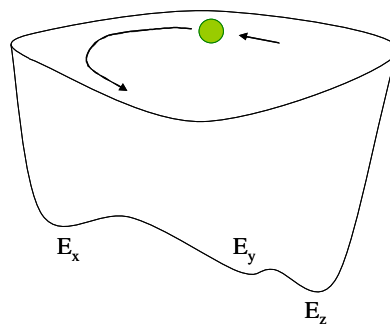


Slika 3.10. Grafički prikaz stanja mreže ako se energijska funkcija posmatra u dvodimenzionom sistemu.

Optimalno rešenje je ono koje je globalni minimum te funkcije u kome telo treba da se zaustavi. Oscilacije u energijskoj funkciji su određene inercijom koje ima telo. Iz tog razloga prekid rada mreže pre trenutka dolaska u stacionarno stanje može

prouzrokovati lažno stanje minimuma. Sa druge strane, sistem može doći u ravnotežu, i telo se pozicionirati u lokalnom minimumu što ne predstavlja optimalno rešenje. Ovaj problem se može rešiti statističkim treningom [KOJI09a]. Grafička interpretacija tela koje se kreće i energijske funkcije, u formi krive linije, je data na slici 3.10.

Energijska funkcija se, grafičkim prikazom, usložnjava ako se povećava broj neurona u mreži [BEAL90]. Za dva neurona, ona ima oblik ravni, slika 3.11, dok za n njih oblik hiper kocke u n -dimenzionalnom prostoru. Oznake E_x , E_y i E_z predstavljaju lokalne minimume energijske funkcije.



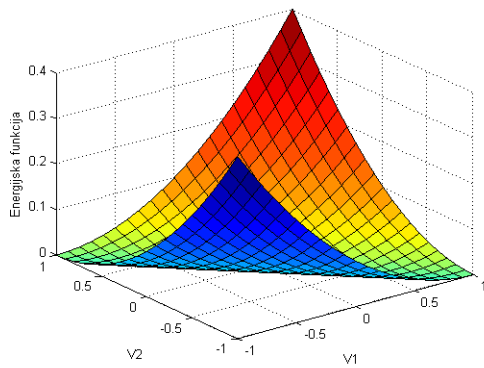
Slika 3.11. Grafički prikaz stanja mreže ako se energijska funkcija posmatra u trodimenzionom sistemu.

Oblik energijske funkcije na taj način definiše brzinu konvergencije i broj lokalnih minimuma. Uloga matrice \mathbf{T} je u tom smislu vrlo velika, jer u mnogome može da promeni oglik i nagib energijske funkcije, što direktno vodi do brzine pronalaženja rešenja i njegove tačnosti.

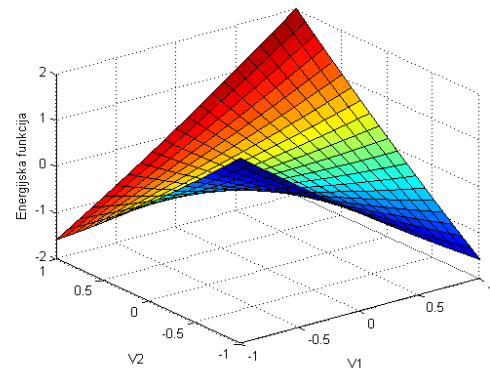
Polazeći od opšteg izraza 3.14, i posmatrajući samo neuralnu mrežu sa dva neurona ($n=2$), energijska funkcija, u odnosu na matricu \mathbf{T} , zavisi od četiri člana T_{11} , T_{12} , T_{21} i T_{22} . Ako pretpostavimo da je matrica \mathbf{T} simetrična, tada je $T_{12}=T_{21}$, pa postoje samo tri moguće vrednosti. Definišući da su vrednosti matrice \mathbf{V} u intervalu $[0,1]$, može se nacrtati oblik energijske funkcije u zavisnosti od različitih kombinacija T_{ij} .

Ovi grafikoni imaju za cilj da pokažu na koji način se energijska funkcija modifikuje kada se proizvoljno menjaju elementi T_{ij} , što svakako nije opšti slučaj, jer se tada koristi proračun da se nađu optimalne vrednosti ove matrice.

U slučaju kada su sva tri člana T_{ij} istih vrednosti dobija se oblik funkcije kao na slici 3.12.

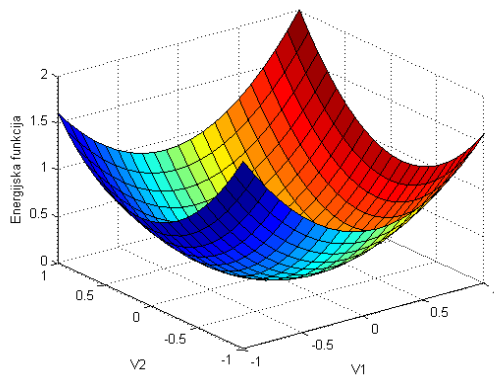


Slika 3.12. Oblik energijske funkcije mreže sa dva neurona kada su $T_{11} = T_{12} = T_{22}$.

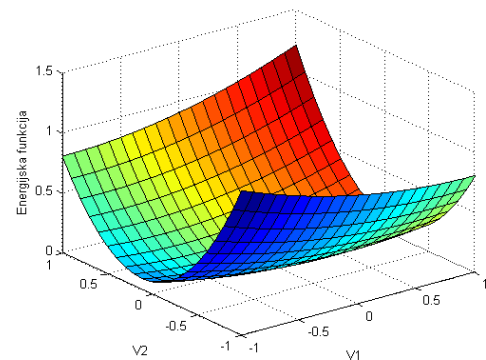


Slika 3.13. Oblik energijske funkcije mreže sa dva neurona kada su $T_{11} = T_{22} < T_{12}$.

U ovakvoj strukturi se vidi da energijska funkcija ima vrednosti 0, i da je oblik krive pogodan da zamišljeno telo uvek konvergira ka minimalnoj vrednosti. U slučaju da su T_{ii} manje vrednosti od T_{ij} , tada je oblik funkcije prikazan na slici 3.13 ($T_{ii} = 0.1$ i $T_{ij} = 0.9$)



Slika 3.14. Oblik energijske funkcije mreže sa dva neurona kada su $T_{11} = T_{22} > T_{12}$.

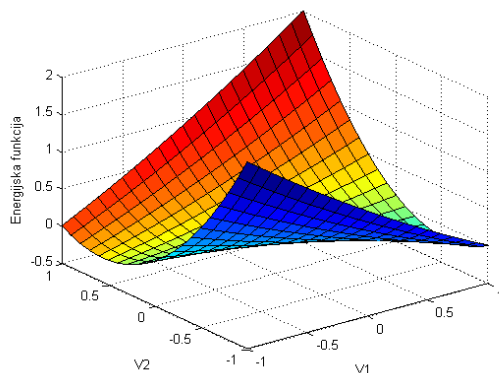


Slika 3.15. Oblik energijske funkcije mreže sa dva neurona kada su $T_{11} = T_{12} < T_{22}$.

U ovakvoj situaciji, postoje dva minimuma dok je oblik funkcije sličan kao i u 3.12. U obrnutom scenariju kada su vrednosti T_{ii} veće od T_{ij} ima se ($T_{ii} = 0.9$ i $T_{ij} = 0.1$) dobija se površ kao na slici 3.14.

U ovom scenariju oblik funkcije se bitno promenio i sada postoji samo jedna tačka minimuma što, pored veće brzine rada, smanjuje mogućnost greške. U slučaju da se i vrednosti T_{ii} razlikuju dobija se modifikovana forma, u odnosu na prethodnu sliku 3.14. Kada je ($T_{11}=0.1$, $T_{22}=0.9$ i $T_{12}=0.1$) dobija se oblik kao na slici 3.15.

Za slučaj da su sve tri vrednosti različite ($T_{11}=0.1$, $T_{22}=0.9$ i $T_{12}=0.5$), dobija se struktura kao na slici 3.16.



Slika 3.16. Oblik energjske funkcije mreže sa dva neurona kada su $T_{11} < T_{12} < T_{22}$.

Sve ove slike pokazuju na koji način i koliko se oblik energjske funkcije menja kada se vrše promene elemenata matrice \mathbf{T} . Iako su ove slike dobije za neuralnu mrežu sa dva neurona, može se pretpostaviti koliko ove promene utiču na promenu oblika u n dimenzionalnom prostoru.

Da bi se obezbedilo stabilno i brzo konvergentno rešenje potrebno je voditi računa o tri stvari:

1. Tačnoj matematičkoj formi za definisanje elemenata $T_{xi,yj}$
2. Vrednosti koeficijenata energjske funkcije koji direktno utiču na promenu $T_{xi,yj}$ i
3. Vrednostima i broju elemenata u matricama ulaznih parametara koje se optimizuju (u ovom slučaju rastojanje), jer i one direktno menjaju $T_{xi,yj}$.

Ne postoji egzaktna metoda za određivanje optimalnih vrednosti poslednja dva uslova, ali postoji nekoliko radova koji su pokušali da da doprinose u rešavanju bar pojedinačnih elemenata ovog problema [LI05, SCHU07, LAZA04, KOJI09b].

U ovom primeru posmatrana je neuralna mreža sa dva neurona, i pokazana je konvergencija ka stabilnim stanjima. Sam Hopfield je ukazao da mreža ne mora uvek da

konvergira ka optimalnom rešenju, ali da hoće ka grupi njemu bliskih. U poglavlju 3.3.1. dat je dokaz da energijska funkcija u opštem slučaju ima tendenciju opadanja i konvergencije ka stabilnom stanju, čime se potvrđuje Hopfield-ova tvrdnja.

3.3.3. Lažna stanja Hopfield-ove neuralne mreže

Polazeći od relacije 3.14, i pretpostavljajući da je $\mathbf{I}=0$, a težinski koeficijenti $T_{ij}=T_{ji}$, $T_{ii}=0$, i označavajući s_i kao stanje i -tog neurona gde je $i=1,2,\dots,N$, ima se [PATW99, HAYK94, BROW91, TSOU97, SYMI03]

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N T_{ji} v_i v_j \quad (3.42)$$

Ako se u iterativnom skupu, na nekom neuronu promenilo stanje sa +1 na -1 ili obratno, promena energije mreže biće iskazana

$$\Delta E = -\Delta s_j \sum_{i=1, i \neq j}^N T_{ji} s_i \quad (3.43)$$

Iz ovog izraza se zaključuje da energija ima monotono opadajuće svojstvo sve do trenutka dok ne dođe u lokalni minimum. Ako je

$$\sum_{i=1, i \neq j}^N T_{ji} s_i > 0 \quad (3.44)$$

tada je vrednost aktivacione funkcije s_j za j -ti neuron

$$s_j = \operatorname{sgn} \left(\sum_{i=1, i \neq j}^N T_{ji} s_i \right) = +1, \Delta s_j = 2 \quad (3.45)$$

i važi da je

$$\Delta E = -\Delta s_j \sum_{i=1, i \neq j}^N T_{ji} s_i < 0 \quad (3.46)$$

Međutim, ako je pak

$$\sum_{i=1, i \neq j}^N T_{ji} s_i < 0 \quad (3.47)$$

tada je

$$s_j = \operatorname{sgn}\left(\sum_{i=1, i \neq j}^N T_{ji}s_i\right) = -1, \Delta s_j = -2 \quad (3.48)$$

i sada je

$$\Delta E = -\Delta s_j \sum_{i=1, i \neq j}^N T_{ji}s_i < 0 \quad (3.49)$$

Ovde se vidi da je promena energije uvek negativna veličina čime se u fazi izvršavanja ukupna energija E uvek smanjuje. Ovaj proces smanjivanja se zaustavlja dolaskom u lokalni minimum.

Međutim, zbog negativnog predznaka promene energije u slučaju kada je promena sa +1 na -1 i obratno, može se govoriti o određenom vidu simetrije. Ovakva simetrija ima negativne efekte koji se kod Hopfield-ove mreže nazivaju lažnim stanjima. To znači da ako energijska funkcija ima lokalni minimum za stanje ζ , tada ima taj isti minimum i za stanje $-\zeta$. Pojave lažnih stanja su karakteristične za sve rekurentne mreže. I pored svih prednosti rekurentnih mreža u odnosu na ostale veštačke neuralne mreže, lažna stanja su jedna od najvećih mana. Nažalost, lažna stanja mogu biti indukovana na više načina od kojih je prethodno opisani najčešći. Pored ovakvog načina stvaranja lažnih stanja, ona se pojavljuju i kao posledica linearne kombinacije neparnog broja zapamćenih uzoraka [HAYK94].

Kao treći način, koji uzrokuje lažna stanja, pojavljuje se veliki broj memorisanih uzoraka. Ova pojava se naziva preobučavanje mreže. Ukoliko povratne veza ka originalnom neuronu ne bi bile ukinute, broj ovako nastalih lažnih stanja bio bi još veći.

Veći broj lažnih stanja dovodi do nestabilnosti koje Hopfield-ova mreža može imati. Ovo predstavlja potencijalni problem na koji treba računati u njihovoj implementaciji. Posebna pažnja se obraća na hardversku realizaciju kada se mora računati na pouzdanost samih komponenti [LEE93].

3.3.4. Postupak pronalazjenja težinskih koeficijenata T_{ij} i njihov uticaj na stabilnost rada Hopfield-ove neuralne mreže

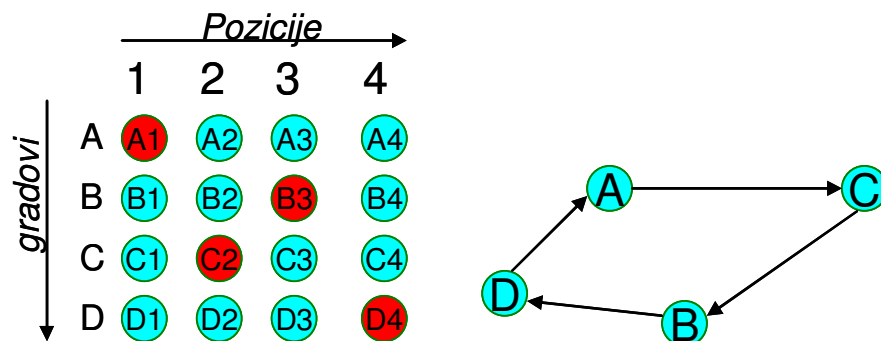
Rad Hopfield-ove neuralne mreže najviše je određen njenom strukturom (vezama između neurona) i energijskom funkcijom. Iz tog razloga su matrica

povezanosti \mathbf{T} i energijska funkcija E , kojom se definiše problem za rešavanje, direktno povezani. Postupak za određivanje elemenata matrice povezanosti započinje definisanjem opšteg oblika energijske funkcije (koji u sebi sadrži matricu \mathbf{T}), i definisanjem specifičnih delova, ove funkcije, koji odgovaraju definisanom problemu. Transformacijama ovih funkcija i svođenjem na oblik u kome se mogu porediti je način da se odrede elementi matrice \mathbf{T} . Naime, poređenjem i izjednačavanjem odgovarajućih koeficijenata uz pojedine promenljive, dobija se izraz za povezanost neurona, potrebnih da reše zadati problem. Ovaj postupak će biti prikazan na posznatom problemu trgovačkog putnika.

Problem trgovačkog putnika

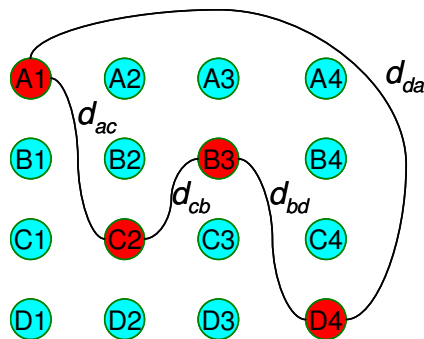
Jedan od klasičnih optimizacionih problema je problem trgovačkog putnika (TSP - *Traveling Salesman Problem*). Rešenje ovog problema podrazumeva da treba proći kroz dati skup od n gradova, koji su na međusobnim rastojanjima d_{ij} , tako da se obiđu svi gradovi samo jednom, a da se pređe najkraća moguća putanja [HOPF85].

Ako problem iskažemo algoritmom, to se može prikazati kvadratnom matricom (matricom prelaza), dimenzije n , čije vrste odgovaraju poziciji grada, a kolone redosledu prolaska kroz gradove. Primer jedne takve matrice i primer redosleda kretanja, za problem četiri grada, dat je na slici 3.17.



Slika 3.17. Primer a) Matrice prelaza za četiri grada i b) Redosleda kretanja.

Fizičko rastojanje koje je između ovih tačaka, na slici 3.18., označeno je sa d_{ij} . Matrica povezanosti \mathbf{T} treba da bude tako definisana da svojim težinskim koeficijentima omogući da mreža pronade baš ovu kombinaciju vrednosti tj. u ovom slučaju putanju ACBD.



Slika 3.18. Šematski prikaz najkraće putanje za četiri grada.

Za ovako definisan problem, može se upotrebiti opšti oblik energijske funkcije [GALL93], koji je modifikovana forma relacije 3.14,

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{x=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{y=1}^n \sum_{j=1}^n T_{xi,yj} V_{xi} V_{yj} - \sum_{x=1}^n \sum_{i=1}^n I_{xi} V_{xi} \quad (3.50)$$

Pod pretpostavkom da su sve vrednosti matrice \mathbf{I} jednake nuli, dobija se

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{x=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{y=1}^n \sum_{j=1}^n T_{xi,yj} V_{xi} V_{yj} \quad (3.51)$$

gde je V_{xi} izlaz neurona na poziciji x_i , $T_{xi,yj}$ koeficijent kojim se definiše jačina veze između neurona na poziciji x_i i y_j .

Energijska funkcija treba da obezbedi logiku kojom će definisani problem biti rešavan.

U ovom slučaju mogu se definisati tri uslova [HOPF85]:

1. Jedan grad treba da bude posećen samo jednom,
2. Svaki grad mora biti posećen i
3. Da dužina ukupne putanja bude minimalna.

Za ovakve uslove, može se definisati energijska funkcija u formi [HALI08]

$$E = \frac{A}{2} \sum_x \left(\sum_i V_{xi} - 1 \right)^2 + \frac{B}{2} \sum_i \left(\sum_x V_{xi} - 1 \right)^2 + \frac{C}{2} \sum_x \sum_{y \neq x} \sum_i d_{xy} V_{xi} (V_{y,i+1} + V_{y,i-1}) \quad (3.52)$$

Redosled članova sume u 3.52 odgovara redosledu definisanih uslova koje treba da obezbedi ova energijska funkcija. Konstante A, B i C služe da se njihovim kombinacijama postigne dobijanje prioriteta pojedinih uslova i kombinovanje sva tri

uslova (zbog različitih udela u konačnoj funkciji). Transformacijom relacija 3.52 dobija se

$$E = \frac{A}{2} \sum_x^n \left(\sum_i^n \sum_j^n V_{xi} V_{xj} - 2 \sum_i^n V_{xi} + 1 \right) + \frac{B}{2} \sum_i^n \left(\sum_x^n \sum_y^n V_{xi} V_{yi} - 2 \sum_x^n V_{xi} + 1 \right) + \frac{C}{2} \sum_x^n \sum_{y \neq x}^n \sum_i^n d_{xy} V_{xi} (V_{y,i+1} + V_{y,i-1}) \quad (3.53)$$

Da bi se relacija 3.53 prilagodila opštem obliku energijske funkcije 3.51, izraz se može napisati i kao

$$E = \frac{A}{2} \sum_x^n \sum_i^n \sum_y^n \sum_j^n \delta_{xy} V_{xi} V_{yj} - A \sum_x^n \sum_i^n V_{xi} + \frac{A}{2} \sum_x^n 1 + \frac{B}{2} \sum_x^n \sum_i^n \sum_y^n \sum_j^n \delta_{ij} V_{xi} V_{yj} - B \sum_x^n \sum_i^n V_{xi} + \frac{B}{2} \sum_i^n 1 + \frac{C}{2} \sum_x^n \sum_i^n \sum_y^n \sum_j^n (1 - \delta_{xy}) (\delta_{i,j+1} + \delta_{i,j-1}) d_{xy} V_{xi} V_{yj} \quad (3.54)$$

S obzirom da elementi koji imaju konstantne vrednosti nemaju efekta na poziciju minimuma energijske funkcije (zbog uticaja izvoda), oni se mogu eliminisati. Pored toga, član V_{xi} se može napisati i kao V_{xi}^2 ako se pretpostavi da je skup vrednosti $V_{xi} \in \{0,1\}$. Tada relacija 3.54 postaje [HALI08]

$$E = \frac{A}{2} \sum_x^n \sum_i^n \sum_y^n \sum_j^n \delta_{xy} V_{xi} V_{yj} - A \sum_x^n \sum_i^n \sum_y^n \sum_j^n \delta_{xy} \delta_{ij} V_{xi} V_{yj} + \frac{B}{2} \sum_x^n \sum_i^n \sum_y^n \sum_j^n \delta_{ij} V_{xi} V_{yj} - B \sum_x^n \sum_i^n \sum_y^n \sum_j^n \delta_{xy} \delta_{ij} V_{xi} V_{yj} + \frac{C}{2} \sum_x^n \sum_i^n \sum_y^n \sum_j^n (1 - \delta_{xy}) (\delta_{i,j+1} + \delta_{i,j-1}) d_{xy} V_{xi} V_{yj} \quad (3.55)$$

Poređenjem energijske funkcije definisane u 3.51 i 3.55 direktno se definišu koeficijenti veza među neuronima, tj. elementi matrice \mathbf{T} . U ovom slučaju to je [HALI08]

$$T_{xi,yj} = -A \delta_{xy} (1 - 2\delta_{ij}) - B \delta_{ij} (1 - 2\delta_{xy}) - C d_{xy} (1 - \delta_{xy}) (\delta_{j,i+1} + \delta_{j,i-1}) \quad (3.56)$$

Elementi matrice \mathbf{T} koji su na ovakav način određeni omogućuju da se energijska funkcija na najbolji način realizuje. Najčešće se koeficijenti A i B postavljaju na istu vrednost pa opšti element matrice \mathbf{T} postaje

$$T_{xi,yj} = -A (\delta_{xy} + \delta_{ij} - 4\delta_{xy} \delta_{ij}) - C d_{xy} (1 - \delta_{xy}) (\delta_{j,i+1} + \delta_{j,i-1}) \quad (3.57)$$

Drugi uslov koji doprinosi stabilnosti rada, očuvanju energijske funkcije i nalaženju optimalnog rešenja definisan je uslovom [ABE91, HALI08]

$$A > 2D \max_{x,y} (d_{xy}) \quad (3.58)$$

Ovaj uslov uključuje u razmatranje i odnos veličina koje učestvuju u konačnoj sumi energijske funkcije. Naime, ukoliko se rastojanje među gradovima ne skalira sa najvećom dužinom između dva grada, tada će poslednji član u 3.55 imati daleko veću vrednost od prethodna dva, i oni će biti zanemarljivo mali. Da bi se to izbeglo, a pod pretpostavkom da je koeficijent $A=B$, uvodi se uslov 3.58.

Definisanje konkretnih vrednosti za koeficijente energijske funkcije ima ključnu ulogu u kreiranju i stabilnosti rada neuralne mreže. Iz tog razloga prvo se mora razmotriti opšti aspekt stabilnosti i parametara koji na nju utiču, pa precizirati vrednost koeficijenata.

3.4. Osnovni model Hopfield-ove neuralne mreže za rešavanje optimizacionih problema

U jednom od svojih prvih radova, [HOPF82], biološki nervni sistem je inspirisao J. J. Hopfield-a da kreira model analogne računarske mreže, koji je i danas poznata kao Hopfield-ova neuralna mreža. Polazeći od ove mreže, 1985. godine, Hopfield i Tank u svom radu pokazuju mogućnosti ove mreže u rešavanju različitih vrsta optimizacionih problema [HOPF85].

Primarnu ulogu u radu Hopfield-ove neuralne mreže ima energijska funkcija, koja treba da matematičkom funkcijom opiše optimizacioni problem [HOPF84]. Način kreiranja energijske funkcije, i njen oblik, su ključni elementi kojima se obezbeđuje stabilan rad mreže i mogućnost da se dobije očekivano rešenje. Kao što je već ranije napomenuto, ne postoji egzaktan i univerzalan način za formiranje energijske funkcije, sem da mora biti monotono opadajuća, ali se dobrom matematičkom reprezentacijom problema i empirijskom proverom, može postići očekivani rezultat.

Pod uslovom da je energijska funkcija dobro kreirana, svi težinski koeficijenti i konstante pravilno izabrane, sistem bi trebalo da bude stabilan. Polazeći od ove pretpostavke, u iterativnom postupku promena energije na izlazu mreže treba da bude

sve manja i manja [HOPF84]. Uvođenjem određenog praga promene, rekursivni proces se prekida, i neuralna mreža bi trebalo da bude u stanju nekog od lokalnih minimuma energijske funkcije. Ovim se obezbeđuje da Hopfield-ova neuralna mreža pronađe optimalno, ili jednog od njemu bliskih rešenja, za posmatrani problem [HOPF84].

Za potrebe rešenja problema Trgovačkog putnika, polazeći od relacija 3.10 i 3.13, Hopfield i Tank predložili su energijsku funkciju oblika

$$E = \frac{A}{2} \sum_X \sum_i \sum_{j \neq i} v_{Xi} v_{Xj} + \frac{B}{2} \sum_i \sum_X \sum_{X \neq Y} v_{Xi} v_{Yi} + \frac{C}{2} \left(\sum_X \sum_i v_{Xi} - n \right)^2 + \frac{D}{2} \sum_X \sum_{Y \neq X} \sum_i d_{XY} v_{Xi} (v_{Y,i+1} + v_{Y,i-1}) \quad (3.59)$$

Prva tri člana energijske funkcije, gde su koeficijenti A , B i C relativno velike pozitivne vrednosti, obezbeđuju validnu putanju trgovačkog putnika dok poslednji termin treba da obezbedi najkraću putanju. Indeksi matrica su u formi modula n , da bi se ukazalo da je n -ti grad u putanji povezan i sa prvim i $n-1$ gradom, tj: $v_{Y,n+j} = v_{Yj}$. Sve oznake imaju dva indeksa u formi X_i , gde je prva oznaka vrste (koja odgovara gradu) a druga kolona (koja odgovara poziciji grada u konačnoj putanji) posmatrane matrice.

Na osnovu relacija (3.59), (3.14) i (3.13) Hopfield i Tank predlažu matricu konduktansi u formi

$$T_{Xi,Yj} = -A \delta_{XY} (1 - \delta_{ij}) - B \delta_{ij} (1 - \delta_{XY}) - C - D d_{XY} (\delta_{j,i+1} + \delta_{j,i-1}) \quad (3.60)$$

Gde je $\delta_{ii} = 1$, $\delta_{ij} = 0$, za $i \neq j$. dok je bias struja $I_{Xi} = Cn$.

U radu [HOPF85], Hopfield i Tank su pokazali da predloženi model daje vrlo dobra rešenja za potrebe optimizacije putanje trgovačkog putnika a da pri tome ima relativno malu složenost algoritma, posebno kada broj gradova raste. Efikasnost svog modela Hopfield je demonstrirao na složenom problemu trgovačkog putnika sa 30 gradova [HOPF85].

3.4.1. Modifikacije Hopfield-Tank-ovog modela od strane drugih autora

Nakon ovog rada veliki broj radova koristi modifikaciju ove energijske funkcije za različite optimizacione probleme. U radu [RAUC88] autori predlažu neuralnu mrežu

dimanzija $n \times m$ gde vrednost m , koja je manja od n , ukazuje na broj rutera u konačnoj putanji. Veliki nedostatak prvog rešenja je neophodnost prethodnog poznavanja broja rutera u najkraćoj putanji. Autori u radu [ZHAN89] predlažu dizajn neuralne mreže za traženje najkraće putanje između dve tačke. Ovo rešenje daje relativno dobre rezultate, ali problem predstavlja potreba za promenom konfiguracije neuralne mreže svaki put kada se promeni kombinacija izvorišta i odredišta. Dodatni problem je što je u njihovom predlogu matrica C_{xi} , u energijskoj funkcije, ima kvadratni eksponent, što direktno utiče na matricu sinaptičkih konduktansi. Kako u realnim uslovima, matrica C_{xi} ima relativno česte promene, ovakvo rešenje nije pogodno za realne primene. Sa druge strane, ovo rešenje je bilo vrlo značajno, jer direktno realizuje logiku Dijkstra algoritma.

Godine 1993. Ali-Kamoun predlažu primenu ove mreže na parametre koji ne moraju biti samo fizička rastojanja između gradova [ALI93] i uvode niz značajnih poboljšanja u Hopfield-ov model. Za mrežu sa n neurona, njihov model koristi $n(n-1)$ neuron da bi pronašao konačnu putanju. Razlog za ovo je uklanjanje svih elemenata po glavnoj dijagonali matrice. Matrica po kojoj se vrši optimizacija dobija opšti naziv matrica cena. Ali-Kamoun predlažu i drugačiji oblik energijske funkcije definisan kao

$$E = \frac{\mu_1}{2} \sum_X \sum_{\substack{i \neq X \\ (X,i) \neq (d,s)}} C_{xi} v_{xi} + \frac{\mu_2}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} \rho_{xi} v_{xi} + \frac{\mu_3}{2} \sum_X \left(\sum_{\substack{i \neq X \\ (X,i) \neq (d,s)}} v_{xi} - \sum_{i \neq X} v_{ix} \right)^2 + \frac{\mu_4}{2} \sum_i \sum_{X \neq i} v_{xi} (1 - v_{xi}) + \frac{\mu_5}{2} (1 - v_{ds}) \quad (3.61)$$

Matrica \mathbf{C} , sa vrednostima C_{xi} definiše cene linkova između dva čvora grafa tj. rutera (X i i). Pored ovoga, značajna novina u predlogu Ali-Kamouna je i uvođenje matrice povezanosti \mathbf{p} .

Element ove matrice ρ_{xi} može imati vrednost 1 (ako čvorovi X i i nisu povezani) ili 0 (ako su povezani). Na taj način, drugi sabirak u predloženoj energijskoj funkciji ima ulogu da nepostojeći linkovi ne budu sastavni deo konačne putanje. Treći sabirak treba da obezbedi validnost i konzistentnost putanje (ukoliko putanja ulazi u čvor, iz njega mora i izaći, pod uslovom da to nisu izvorišni i odredišni čvor). Četvrti sabirak treba da obezbedi konvergenciju mreže ka stabilnim stanjima, tj. da izlazne vrednosti neurona budu $v_i \in \{0,1\}$. U slučaju da je vrednost 1, posmatrani čvor se nalazi u konačnoj putanji, dok 0 označava suprotno. Poslednji sabirak ima ulogu da obezbedi da

se u konačnoj putanji nađe povratna veza od odredišta do izvorišta. Na ovaj način se obezbeđuje prisustvo izvorišta i odredišta u konačnoj putanji.

Polazeći od ovako definisane energijske funkcije, relacija 3.61, autori predlažu i odgovarajuću matricu konduktansi, datu kao

$$T_{Xi,Yj} = \mu_4 \delta_{XY} \delta_{ij} - \mu_3 (\delta_{XY} + \delta_{ij} - \delta_{jX} - \delta_{iY}) \quad (3.62)$$

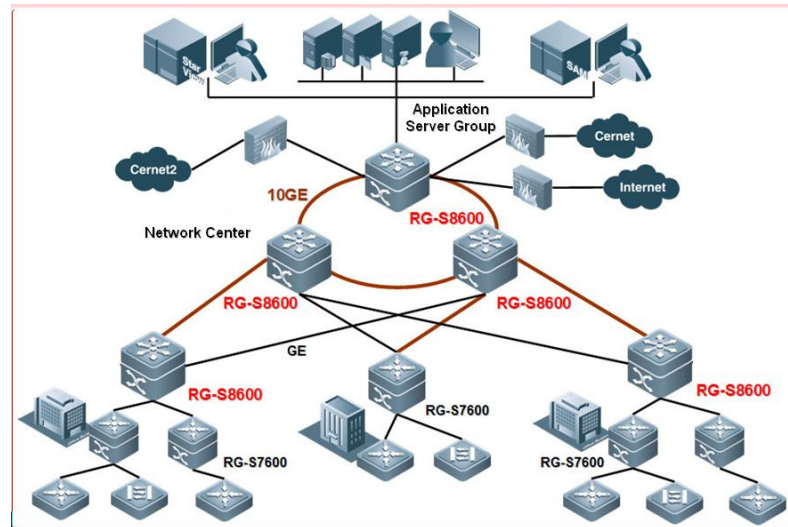
Glavni doprinos ovog rada je uspostavljanje matrice konduktansi kao konstante, dok su sve informacije u vezi sa povezanošću čvorova grafa tj. rutera, cenama linkova i slično dodeljene matrici Bias struje \mathbf{I} , definisane kao

$$I_{Xi} = -\frac{\mu_1}{2} C_{Xi} (1 - \delta_{Xd} \delta_{is}) - \frac{\mu_2}{2} \rho_{Xi} (1 - \delta_{Xd} \delta_{is}) - \frac{\mu_4}{2} + \frac{\mu_5}{2} \delta_{Xd} \delta_{is}$$

$$= \begin{cases} \frac{\mu_5}{2} - \frac{\mu_4}{2}, & \text{za } (X,i) = (d,s) \\ -\frac{\mu_1}{2} C_{Xi} - \frac{\mu_2}{2} \rho_{Xi} - \frac{\mu_4}{2}, & \text{u drugim slučajevima} \end{cases} \quad (3.63)$$

Predloženo rešenje Ali-Kamouna se pokazalo kao vrlo pogodno za realne implementacije, a naročito sa aspekta realne obrade signala. Iz tog razloga, ovo rešenje će se koristiti kao polazna osnova za sve dalje modifikacije sa ciljem rešavanja transportnih optimizacionih problema.

Daljim modifikacijama Ali-Kamoun-ovog modela, kao metrika se može koristiti veći broj, ili kombinacija, realnih fizičkih parametra za koje se traži najpovoljnija putanja [RELJ95, KOJI12, KOJI08c, KOJI09c, KOJI10, KOJI06]. U tim situacijama, promena oblika energijske funkcije će posledično modifikovati i matricu konduktansi i matricu Bias struja, koje su kod Ali-Kamouna definisane relacijama 3.62 i 3.63. Uvođenjem više od jedne ulazne matrice omogućava se istovremeno posmatranje više različitih ulaznih faktora istovremeno, i dozvoljava rešavanje složenijih realnih problema. Na ovaj način se Hopfield-ovom neuralnom mrežom postiže višekriterijumska optimizacija posmatranog problema, koja će biti neophodna u realnim implementacijama. Različiti primeri pomenute modifikacije i njihove primene u različitim vrstama transportnih problema, su opisane u poglavljima 4, 5. i 6.



<http://www.ruijienetworks.com/product/product.aspx?id=f8e176b8-2108-4254-b41f-5dee101e0661>

4. Primena Hopfield-ove neuralne mreže u dinamičkom multicast rutiranju paketskog saobraćaja

Savremene komunikacije korisnicima pružaju širok spektar novih mogućnosti i njihov broj je u stalnom porastu [LATH09, URLI08]. Imajući u vidu sve niže cene softvera i hardvera kao i zastupljenost računara kod krajnjih korisnika, ali i gradijent rasta istih, jasno se nameće potreba za sve sofisticiranijim komunikacionim sistemima koji mogu da omoguće ovakav obim komunikacije. Korisnici danas žele da komunikacija bude dostupna, pouzdana i kvalitetna za sve vrste sadržaja [MEDH07, LATH09, URLI08]. Sve češće korišćeni, i zahtevni, multimedijalni sadržaji direktno

pokazuju kvalitet komunikacione mreže [IWAC08, BENS07]. Kako se prenose velike količine podataka i kako percepcija krajnjeg korisnika direktno može da uoči nedostatke, naročito kod audio i video sadržaja, tehnološka rešenja moraju da prednjače u odnosu na produkciju sadržaja.

Dva najbitnija elementa u komunikacionoj mreži svakako predstavljaju infrastruktura (hardver) i protokoli (logika) koji se koriste za prenos [MEDH07, PIOR04, WHIT05]. Masovnijom primenom optičkih vlakana, čak i u pristupnim mrežama krajnjeg korisnika, problem infrastrukture je u mnogome poboljšana [SIMM08, BERN03, MEKH97]. Rešenje koje je doneo razvoj i implementacija optičkih kablova, problem kapaciteta linkova i brzine prenosa, rešava i za nekoliko narednih desetina godina. Ono što ostaje kao potencijalni problem je logika koja je potrebna da bi se za datu infrastrukturu pronašla najbolja rešenja u cilju kvalitetnog prenosa sadržaja [ZINK05, SIMM08, BERN03]. Ova logika podrazumeva ceo skup rešenja i preduslova od kojih najveći deo pripada procesu rutiranja. Ovaj proces predstavlja srž rešenja problema pouzdanog, optimalnog i kvalitetnog prenosa [PIOR04, WHIT05, MEDH07]. Imajući u vidu da pojedine aplikacije, tj. njihovi sadržaji, mogu biti uslovljeni minimalnim kašnjenjem u prenosu, i na taj način ostvariti uslove u pogledu obazbeđenja garantovanog kvaliteta signala, proces rutiranja postaje vrlo sofisticiran [GEDM02, PARK05, STOJ04]. Pored toga zahtevi za prenosom signala u realnom vremenu dodatno usložnjavaju procese u rutiranju [CINC01]. Mobilnost korisnika dodatno otežava problem projektovanja pa i eksploatacije mreže, jer se mnogo lakše mogu pojaviti zagušenja [WHIT05, PIOR04, BOUK09, RACK07]. Pri svemu ovome trebalo bi obezbediti da cela mreža bude što je moguće ravnomerno opterećena i da svaki od linkova može primiti i dodatni sadržaj, u slučaju iznenadne potrebe za tim [WHIT05, LATH09]. Čak i ako bi se realizovao algoritam koji može sve ove zahteve da uspešno realizuje, pa i da bude potpuno skalabilan, ne može se garantovati održivost ovakvog algoritma u dužem vremenskom periodu. Iako jedan od velikih problema predstavlja ograničenje tehnologije, uslovi koje nameće tržište, želje korisnika i poslovna konkurencija često nameću složenije uslove i potrebu za bržom tranzicijom ka boljim performansama [LATH09, URLI08, BOUK09, RACK07].

Uslovi prenosa multimedijalnog sadržaja su još kompleksniji u mobilnim komunikacijama [IWAC08, MUKH03, BOUK06]. Veliki broj kompanija, zbog dobiti

koja se ostvaruje, zahteva stalno nove servise koji će se nuditi novim ili naprednim korisnicima. U zavisnosti od infrastrukture svakog od operatera i broja prelazaka na druge mobilne ili fiksne mreže, uslovi rutiranja se izuzetno komplikuju [BOUK06, RACK07]. Pored toga što bežična komunikacija generalno ima lošije performanse od žičanih i što je prate i teškoće koje ne postoje u fiksnim mrežama (komunikacija u pokretu) postoji potreba garantovanja kvaliteta servisa [BOUK09, RACK07]. Da bi se postojeće mreže i kompletna infrastruktura mogle, na najbolji način, iskoristiti i u kasnijim fazama eksploatacije, za potrebe skalabilnosti, kvalitetno upravljanje ovakvim mrežama je jedan od najbitnijih zadataka [BOUK06, IWAC08, PIOR04].

Korisnici koji imaju sve više zahteva, i to sve kompleksnijih, počinju da zahtevaju sve složenije servise ili sve sofisticiranije dodatne zahteve postojećih. Ovakvi pravci se ne mogu predvideti na duži period, pa je i način potencijalnog rešavanja i implementacije ovih zahteva nemoguće predvideti u algoritmu za rutiranje. Iz tog razloga, postoji stalna potreba za usavršavanjem algoritama, softvera i uređaja za rutiranje uz samo jedan uslov: da korisnici imaju kvalitetnu distribuciju sadržaja bez obzira na njihovu kompleksnost [LATH09, NARB08, CHAK02].

4.1. Multimedijalni multicast sadržaji i servisi

Iako je u relativno bliskoj prošlosti bila nezamisliva ideja o prenosu velike količine podataka preko Interneta, ova ideja danas je postala deo svakodnevene potrebe korisnika. Pored velikih količina, danas govorimo o prenosu u realnom vremenu i to sa garantovanim kvalitetima servisa [CHAK02, STOJ04, CINC01, PARK05]. Na taj način se prenos videa i audia smatra ne novom, nego postojećom tehnologijom, dok se sada uvode novi zahtevi [LATH09, URLI08, NARB08].

Kako je Internet omogućio povezivanja velikog broja računara, a fizičke prepreke su prestale da postoje, veliki broj korisnika se okrenuo novim vidovima komunikacije [BOUK09, RACK07]. Pored najčešćih potreba klasičnih korisnika u vidu prenosa glasa (kroz telefoniranje preko Interneta) ili prenos video signala (telefoniranje uz vizuelnu komunikaciju) pojavljuju se dodatni zahtevi čak i kod standardnih korisnika [LATH09, CIKO11]. Danas su pojmovi videa na zahtev (*video-on-demand*), vesti na zahtev (*news-on-demand*), umreženih korisnika u *on-line* igricama, socijalnih mreža,

telemedicine, video konferencija i distribuiranih baza podataka itd. postali deo širokog spektra korisnika i nalaze primenu u svakodnevnim aktivnostima [ZINK05, URLI08, GLIS06]. Ovakvi servisi korisnicima omogućavaju relativno veliki komfor kod upotrebe multimedijalnih servisa, ali se njihova realizacija sa aspekta celokupnog sistema za prenos prilično komplikuje [WHIT05, WU06, KOST11].

Prenos savremenih multimedijalnih sadržaja u mnogome se može razlikovati od klasičnog prenosa podataka [PARK05, PIOR04, MEDH07]. Osnovna razlika je što se u savremenim komunikacijama više ne podrazumeva samo razmena podataka između jednog izvorišta i jednog odredišta [SEIF08, PIOR04]. Sada se komunikacija multimedijalnih sadržaja od jednog (ili više) izvorista i najčešće više odredišta, skoro podrazumeva [DAVI01, SMIL02, LATH09]. U slučaju video konferencijskih veza taj broj dolazi i do 100. Dodatni problem koji se pojavljuje kod prenosa signala u realnom vremenu je kašnjenje i dostupnost trenutnog kapaciteta tj. zagušenja komunikacione mreže [PARK05, CINC01]. Ovi činioci mogu predstavljati velike probleme iz prostog razloga što ih krajnji korisnik uočava vrlo brzo i bez velikog stručnog znanja.

4.1.1. Uslovi za distribuciju multimedijalnog sadržaja

Klasične distributivne mreže najčešće omogućavaju servis prenosa signala po principu najboljeg mogućeg puta u zatečenom stanju, ili unapred definisanim skupom putanja [MEDH07, PIOR04]. Uz to, polazna pretpostavka za tip komunikacije je najčešće point-to-point. Protoci i uslovi koje zahteva prenos multimedijalnog sadržaja utiču na uslov da se protokoli moraju razvijati paralelno, i za transportni i za aplikacioni sloj. Predložena rešenja bi trebalo da budu što je moguće optimalna sa aspekta rasterećenja komunikacione mreže i složenosti samog algoritama za rutiranje [WHIT05]. Krajnji efekat se uvek posmatra kroz ocenu kvaliteta servisa (*QoS*) [PARK05]. Kada se radi o multimedijalnim servisima to se odnosi na način prenosa paketa od njegovog izvorišta pa do odredišta. Ovaj put i kvalitet isporuke direktno zavisi od nekoliko parametara [MEDH07, PIOR04]:

1. Kašnjenja (vreme koje je potrebno za prenos paketa duž cele putanje),
2. Džitera (varijacije kašnjenja u toku prenosa paketa),

3. Širina propusnog opsega (koji je u direktnoj vezi sa protokom između dve fizičke ili logičke tačke u mreži, kapacitetom i tehničkim ograničenjima na prvom sloju OSI referentnog modela i tehničkim karakteristikama mrežne opreme,
4. Pouzdanosti (u smislu srednje greške u procesu prenosa izazvane tehničkim ili logičkim problemima).

Svi ovi problemi moraju se rešavati na nivou protokola za rutiranje i algoritama koji se u procesu rutiranja primenjuju. Očigledno je da su ovo samo neki od potencijalnih faktora koji mogu doprineti lošem kvalitetu prenosa a samim tim i nezadovoljstvu krajnjeg korisnika. Sa druge strane garantovanjem određenog kvaliteta servisa, svaki od problema na koji se možda trenutno i ne može uticati, treba da ima mogućnost da se prevaziđe u vrlo kratkom vremenskom intervalu, što zahteva visok nivo interaktivnosti protokola za rutiranje. Uz navedena ograničenja i uslove, i veliki broj dodatnih, uloga i potreba za kvalitetnim i vrlo sofisticiranim protokolima za rutiranje je neminovna [MEDH07, WHIT05, SARK08].

4.2. Algoritmi za rutiranje

Rutiranje predstavlja proces prenosa informacija kroz komunikacionu mrežu od izvorišta do odredišta [MEDH07, PARK04]. Sa tehničke tačke gledišta, rutiranje predstavlja direktnu vezu između dva sloja OSI referentnog modela: II (*data link layer*) i III (*network layer*). Rutiranje se, kao termin u procesu realizacije prenosa sadržaja, pojavljuje u stručnoj literaturi od 80-ih godina prošlog veka kada sve više malih i srednjih mreža dobija homogeno okruženje.

Rutiranje u osnovi podrazumeva dve faze rada [PIOR04]:

1. Određivanje putanje za prenos podataka i
2. Prenos informacija u formi paketa.

Polazeći od takve terminologije, proces prenosa paketa dobija naziv paketska komutacija (*packet switching*) [PIOR04].

Proces rutiranja u paketskoj komutaciji se dodatno komplikuje ako se razmatra i broj korisnika koji su istovremeno zainteresovani za primanje istog tipa sadržaja, a koji nekada ne mora da bude u istom vremenskom intervalu (npr. *video-on-demand*) [ZINK05]. Ovakva komunikacija je sve češća kod savremenih multimedijalnih servisa, mada je vrlo kompleksna sa aspekta optimizacije i racionalizacije resursa mreže [MEDH07, ZINK05, WHIT05].

U zavisnosti od broja korisnika, koji istovremeno dobijaju isti sadržaj, mogu se definisati različiti tipovi komunikacija kao [PIOR04, MEDH07]:

1. *Unicast* komunikacija (gde se podaci šalju samo jednom određenom korisniku),
2. *Broadcast* komunikacija (gde se podaci šalju svim uređajima određene mreže. Pored ovog u specijalnim slučajevima *broadcast* se može koristiti i za slanje samo određenoj grupi korisnika čija adresa je nepoznata što je slučaj kod ARP protokola),
3. *Multicast* komunikacija (gde se podaci šalju tačno definisanoj grupi korisnika u mreži).

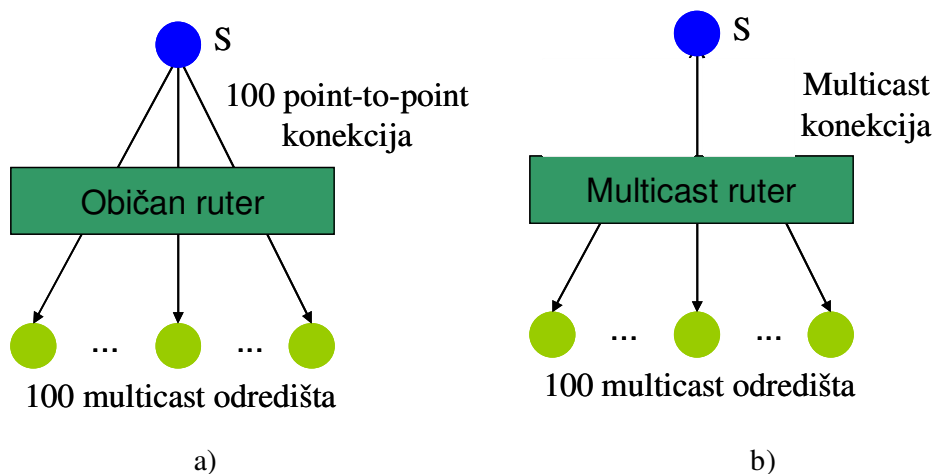
Unicast komunikacija je pogodna samo kada se koristi za razmenu jedinstvenog sadržaja između dva korisnika. Svaka druga komunikacija se može posmatrati i kao multiplicirani *unicast* ali se resursi mreže neracionalno troše. Uzrok se nalazi u načinu na koji *unicast* vrši slanje poruka. Naime, svaka poruka se kopira i šalje onoliko puta koliko se puta komunikacija zahteva. Svaki put putanja slanja je inicijalno nezavisna od prethodne, i na taj način se u mreži mogu istovremeno naći isti paketi koji se šalju različitim putanjama, što je uzrok neracionalne upotrebe resursa mreže, slika 4.1.a.

Broadcast komunikacija je korisna samo u slučaju slanja iste informacije svim korisnicima mreže. U realnim uslovima najčešća primena *broadcast*-a je u slučaju slanja sistemskih poruka, dok se ređe koristi kod primena konkretnih aplikacija za široki broj korisnika. Polazeći od tog stava, *broadcast* kao i *unicast*, nepotrebno troši resurse mreže. Sa druge strane slanje velikog broja paketa korisnicima ili mašinama koje tu informacije i nisu tražile, ali moraju da je do nekog nivoa procesiraju, opterećuje i njihove procesore kao i samu komunikacionu mrežu.

Multicast se može posmatrati i kao ograničeni *broadcast*, ali je u tom slučaju njegova primena neefikasna. Sa druge strane može se posmatrati i kao višestruki *unicast*

što predstavlja još lošije rešenje. Iz tog razloga *multicast* predstavlja optimalno rešenje u slučaju da je unapred definisana grupa korisnika koja određenu informaciju treba da primi iz istog izvorišta u istom ili bliskom vremenskom intervalu. Ovo je naročito pogodno kod video i audio konferencijskih veza ili kod distribucije audio ili video programa registrovanoj grupi korisnika [ZINK05]. Multicast komunikacija u odnosu na broadcast komunikaciju, slika 4.1.b., ima tri osnovne prednosti [MEDH07, PIOR04, BENS07]:

1. Slanjem paketa samo određenoj grupi korisnika štedi se kapacitet i opterećenost linkova a dobija na efikasnosti ispravnim upravljanjem resursima mreže,
2. Distribucija sadržaja je limitirana na korisnike koji su unapred definisani, što može biti vrlo pogodno kod videa na zahtev,
3. U slučaju slanja poverljivih informacija restrikcija korisnika može biti definisana i na predajnoj strani.



Slika 4.1. Prednosti *multicast* rutiranja a) Primer potrebe da se paket kopira i šalje 100 puta za svih 100 destinacija i b) Primer upotrebe *multicast* rutera kada se šalje samo jedan paket do rutera, i tek tada se sadržaj multiplicira da bi se isporučio krajnjim korisnicima.

Sa druge strane, ovakva komunikacija zahteva vrlo sofisticirane metode i algoritme kojima se ceo proces realizuje u skladu sa idejom o *multicast* komunikaciji [BENS07, CHAK02, PARK99].

Kada se proces rutiranja posmatra sa strane pošiljaoca tada se podela može izvršiti na [MEDH07, IWAC08, PRIOR04]:

1. *point-to-point* (jedan pošiljaoc i jedan primalac),
2. *point-to-multipoint* (jedan pošiljaoc i n primaoca),
3. *multipoint-to-multipoint* (m pošiljaoca i n primaoca).

I u slučaju kada se definiše grupa korisnika na prijemu, ili grupa na predajnoj strani, uvodi se pojam *grupe*. Grupa je sinonim za multicast komunikaciju. Elementi grupe mogu biti: mašine, procedure, aplikacije ili korisnici. Svi oni mogu tražiti i dobijati istu informaciju u procesu slanja [PRIOR04, PARK99].

4.2.1. Vrste i uticaji strukture stabala rutiranja kod multicast rutiranja

Postupak slanja paketa od izvorišta do grupe korisnika na odredištu podrazumeva [HAKI71, MEDH07, PIOR04]:

1. Pronalaženje “najpovoljnije” putanje u mreži koja povezuje sve korisnike grupe. Dodatni uslov može biti i da se broj grananja u konačnoj putanji redukuje i što duže zadrži zajednička struktura stabla. Na taj način dobija se *spanning tree* za konkretnu strukturu mreže i odgovarajuće korisnike koji pripadaju ciljnoj grupi. Ovako dobijeno stablo nije *full spanning tree* ali sadrži najmanje one mrežne grupe u kojima se nalaze konkretni korisnici.
2. Prenos jednog paketa duž prethodno pronađenog *spanning tree*
3. Kopiranje pristiglog paketa u ruteru koji je u krajnjoj grani *spanning tree* da bi se distribuiralo krajnjim korisnicima.

Postoji nekoliko različitih stabala koja se mogu koristiti za potrebe *multicast* rutiranja. Svako od njih ima svoje prednosti i mane i njihov izbor zavisi od konkretnog slučaja za implementaciju. Najbitniji uticaj stabla odnosi se na ukupno kašnjenje u postupku prenosa tj. na složenost algoritma i potrebnog vremena za njegovo određivanje. Ova dva uslova su najčešće opozitna: ukoliko je algoritmu potrebno više vremena da pronađe putanju tada se vreme kašnjenja tokom prenosa smanjuje. Na žalost, nemoguće je unapred proceniti, za svaki konkretan slučaj, da li je bolje više vremena

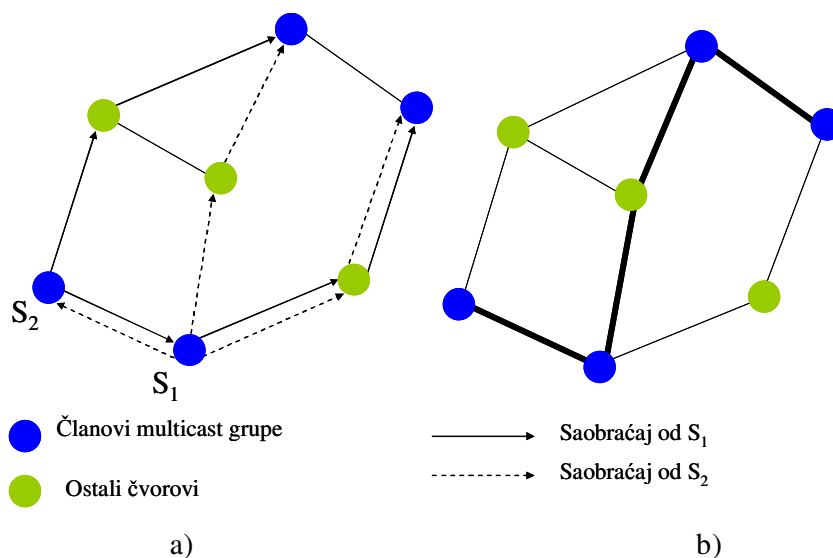
omogućiti algoritmu i kolika će se ušteda na kraju postići sa kašnjenjem. Iz tog razloga postoji veći broj potencijalnih stabala, pa se odluka za izvor stabla donosi u odnosu na strukturu mreže i zahteva koji se nameću pred projektanta sistema.

Jedna od podela stabla može se izvršiti na [HAKI71, KURO12, PERL85, WEI94]:

1. *Shared tree/specific tree*
2. *Shortest path tree*
3. *Steiner tree*
4. *Centered tree*

a) *Specific tree/Shared tree*

Pre svake podele, *multicast tree* se može podeliti na dve osnovne kategorije: *The source specific trees* ili *Shared trees* [WEI94, PERL85, KURO12]. *Specific tree* se gradi u odnosu na konkretno izvoriste. Ovo stablo se za to izvoriste ne modifikuje, a za svako naredno izvoriste se pravi drugo stablo, iako se svi korisnici nalaze u istoj *multicast* grupi. Ova činjenica je osnovna mana *specific tree*. Pod pretpostavkom da je potrebno kreirati jedno-direkciono stablo, jedan primer ovog stabla prikazan je na slici 4.2.



Slika 4.2. Struktura stabla za a) *Source specific tree* i b) *Shared tree*.

Sa druge strane *shared tree* se kreira tako da obuhvati sve korisnike u *multicast* grupi. Na taj način se struktura stabla ne menja bez obzira koji korisnik vrši slanje i predstavlja izvorište u tom trenutku. Kod ovog stabla uticaj grana grafa u odnosi na pravac prenosa informacija više nije bitan. Primer takvog bidirekcionog stabla za istu grupu korisnika i mrežu kao na slici 4.2.a prikazan je na slici 4.2.b.

Glavna razlika između ova dva tipa stabla je broj stanja koja treba da se pamte za različite grupe korisnika ili izvorišta u smislu ispravnog konfigurisanja stabla i rada mreže. U tom smislu, *specific tree* je vrlo nepovoljan izbor jer se za svako izvorište mora pamtit po još jedna struktura stabla. To znači da se u čvorovima mreže mora smestiti informacija koje je reda $f(G*S)$, gde je G broj *multicast* grupa u mreži a S predstavlja prosečan broj izvorišta po jednoj multicast grupi. U slučaju *shared tree* broj informacija koje se skladište je reda $f(G)$.

b) *Shortest path tree*

Ovo stablo je jedno od najčešće korišćenih u aktuelnim algoritmima za rutiranje [HWAN92, MEDH07, PIOR04, WHIT05]. Razlog ove činjenice leži u tome što je postupak kreiranja ovog stabla relativno jednostavan i brz [KOU81]. Postupak kreiranja je relativno jednostavan jer je svaki od najudaljenijih elemenata stabla (listovi) povezan najkraćom putanjom sa korenom stabla. Postupak kreiranja ovog tipa stabla se svodi na n faza primene nekog od poznatih algoritama za određivanje najkraće putanje (najčešće korišćen je Dijkstra ili Belman-Ford) [PIOR04, CORM01].

U procesu prenosa paketa, kašnjenje do krajnjih korisnika je minimalno jer je svakom obezbeđena minimalna putanja, što je velika prednost ovog stabla. Međutim, iskorišćenost resursa je neekonomična. Svaka grana stabla je birana nezavisno od ostatka stabla i na taj način se postiže isti efekat kao i kod m primena unicast komunikacije. Na taj način se za veliki broj korisnika u *multicast* grupi može dogoditi da se svi linkovi mreže upotrebe za kreiranje stabla [KOMP93].

c) *Steiner tree*

Steiner tree pripada grupi *shared* stabla i omogućava povezanost svih pripadnika *multicast* grupe sa minimalnom upotrebom resursa mreže [CHEN01, HAKI71, CHAK01, PERL85, WEI93, KURO12]. To je razlog što ovaj tip stabla ima vrlo dobre

početne karakteristike, međutim kreiranje ovog stabla je *NP complete* problem, pa je za velike mreže njegovo kreiranje vrlo kompleksno i može iziskivati mnogo vremena [GARE79]. Problem kreiranja ovog stala je dobro poznat u teoriji grafova, i postoji veliki broj pokušaja da se način traženja ovog stabla optimizuje [GARE79, PIOR04, CHAK01]. Jedan od glavnih razloga za njegovu primenu je što se dobija optimalno rešenje sa aspekta cene. S obzirom na kompleksnost problema neophodna je upotreba sofisticiranih alata [CHEN01, CORM01, CHAK01, PARK98, KOMP93]. Do sada su najčešće upotrebljivane heurističke metode, dok će se u ovom radu kreiranje osnovnog stabla ali i njegove modifikacije realizovati primenom Hopfield-ove neuralne mreže [KOJI06a, KOJI07b, KOJI08a].

d) *Centered tree*

Glavna prednost *shared* stabla je mogućnost redukovanja broja stanja i količine informacija koja treba da se memoriše u čvorovima mreže [KURO12, PERL85, WEI94]. Steiner-ovo stablo ovaj problem može da reši, ali je postupak njegovog kreiranja vrlo kompleksan. Kreiranje *centered tree* je vrlo jednostavno ali se zahteva poznavanje svih čvornih mesta u mreži. Da bi se povezali svi krajnji korisnici *multicast* grupe potrebno je sve ih povezati najkraćim putanjama sa unapred određenim čvornim mestima u mreži. Na taj način efikasnost ovog stabla je direktno povezana sa brojem i pozicijom čvornih mesta koje se definišu statički, što predstavlja manu ovog stabla.

Poređenje svih do sada opisanih vrsta stabala sa aspekta nekoliko različitih parametara je prikazano u tabeli 4.1.

Pokazuje se da je Steiner-ovo stablo sa najboljim performansama [HAKI71, KURO12, WEI94], ali se zbog svoje kompleksnosti ređe koristi. Balansiranje brzine rada, i karakteristika potrebnih za prenos multimedijalnog saobraćaja, najbolje se postiže sa SPT - *shortest path tree*. Malo kašnjenje je vrlo dobra osobina ovog stabla, ali se racionalizacija resursa mreže potpuno zanemaruje. Iz tog razloga, najčešća je upotreba *centered tree* moguć način da se svi uslovi izbalansiraju i na taj način svesno odstupa od ideje traženja najboljeg rešenja.

Tabela 4.1. Poređenje osnovnih tipova stabala.

	<i>Shortest path tree</i>	<i>Steiner tree</i>	<i>Centered tree</i>
Kompleksnost	Mala	Velika	Mala
Dinamičnost	Dobra	Loša	Dobra
Cena	Visoka	Niska	Srednja
Broj stanja mreže	$f(G*S)$	$f(G)$	$f(G)$
Kašnjenje	Malo	Srednje	Srednja
Koncentracija	Mala	Velika	Velika

Kako je primena veštačkih neuralnih mreža pogodna za rešavanje pojedinih kompleksnih problema, u ovoj disertaciji će prednosti Steiner-ovog stabla pokušati maksimalno da se iskoriste, bez ustupka dugom procesu pronalaženja rešenja.

4.2.2. Steiner-ovo stablo i njegova modifikacija

Matematički posmatrano, Steiner-ovo stablo je težinski graf $G=(V,E)$ gde su V čvorovi a E grane (linkovi) tog grafa [HWAN92, KOU81, KURO12, WEI93, WEI94]. Neka je za takav graf definisan podskup $D \subseteq V$. Steiner-ovo stablo (*Steiner tree*) je stablo u grafu G koje spaja sve čvorove u $D=\{d_1,d_2,\dots,d_K\}$. Dodatnom restrikcijom definiše se i minimalno Steiner-ovo stablo (*Minimum Steiner tree in graph - MStTG*) kao stablo za koje je ukupno rastojanje na njegovim granama minimalna vrednost među svim mogućim Steiner-ovim stablima za dato G i D [CHEN01]. U takvom stablu postoji mogućnost da se koriste čvorovi $D'=\{d_1,d_2,\dots,d_K,\dots,d_{K'}\}$, gde je $D' \supseteq D$. Čvorovi koji su elementi $(D'-D)$ se nazivaju Steiner-ovi čvorovi [CHAK01, HAKI71, WEI93].

Problem pronalaženja Steiner-ovog stabla spada u „*NP-complete*“, i algoritmi za njegovo izračunavanje datiraju od sedamdesetih godina prošlog veka [GARE79]. Uvođenjem ograničenja u smislu kvaliteta servisa, a naročito kada se radi o prenosu zahtevnih video signala u realnom vremenu dobijaju se *Constrained Minimum Steiner Tree in Graph (CMStTG)* [CHEN01]. Ova ograničenja odnose se na kašnjenje u

prenosu, varijacije u kašnjenju i propusni opseg [HAKI71].

Ovakva interpretacija Steiner-ovog stabla, u formi grafa, je vrlo pogodna za računarske implementacije i nalazi sve veću primenu u algoritmima za rutiranje, pa će se *Constrained Minimum Steiner Tree in Graph* koristiti i u ovoj disertaciji. Osnovni razlog za to je optimalnost koje Steiner-ovo stablo nudi kod određivanja *multicast* putanja u složenoj i dinamičkoj topologiji mreže [CHAK01, KOMP93], čime se algoritam za rutiranje može koristiti za realne komunikacione mreže [CORM01, KURO12].

4.3. Neuralna mreža za dinamičko višekriterijumsko multicast rutiranje

Rutiranje u komunikacionim mrežama se u najvećem broju slučajeva zasniva na najkraćoj putanji između izvorišta i odredišta [MEDH07, PIOR04, WHIT05, KURO12]. Problem najkraće putanje, tj. njene složenije reprezentacije kod problema trgovačkog putnika, dobro je poznat problem u teoriji grafova [CORM01]. Ovaj problem bazira svoje rešenje na najkraćoj fizičkoj putanji, što se u problemima komunikacionih mreža retko može direktno primeniti. Iz tog razloga uvodi se pojam Cene. Cena je kvantitativna mera koje se dodeljuje linku na isti način kao i rastojanje između dva grada kod problema trgovačkog putnika. U tom smislu, rastojanje, d_{ij} , između gradova i i j , menja se sa cenom, C_{ij} , koja je dodeljena linku između rutera i i j , i koja treba da opiše uslove prenosa signala po tom linku. Na ovaj način se može posmatrati proces rutiranja baziran na više kriterijuma, od kojih će svaki ponaosob biti dodeljen pojedinim linkovima, i formirati konačnu karakteristiku linka [KOJI06a, KOJI12b, KOJI08a, KOJI04, KOJI05].

4.3.1. Višekriterijumska optimizacija

Imajući u vidu uslove u realnim komunikacionim mrežama, savremeni algoritmi za rutiranje moraju da obuhvate čitav niz kriterijuma na bazi kojih je potrebno pronaći putanju [CIKO11, CINC01, ARAU01, WEI95, ALI93, KOJI06a]. Više kriterijuma dodatno komplikuje proces pronalaženja putanje ali i vreme procesiranja do pronalaženja krajnjeg rešenja. Shodno postojanju više različitih ulaznih faktora i

kriterijuma po kojima se vrši optimizacija putanje za rutiranje, ovaj problem se naziva zadatkom višekriterijumske optimizacije [STEU86, EHRG05, ELTA10, CHEN05].

Generalno posmatrano, cilj procesa optimizacije je pronalaženje najbolje varijante iz niza mogućih varijanti u smislu usvojenog kriterijuma. Kriterijum predstavlja meru za poređenje prilikom odabira najbolje varijante [OPRI98]. Kriterijum se izražava funkcijom koja za najbolju varijantu treba da dostigne globalni ekstremum.

Još 1896. Godine Pareto uvodi prvu formulaciju višekriterijumske optimizacije [OPRI98]. Nakon toga ovaj termin se primenjuje u teoriji igara kao i u ekonomiji za potrebe pronalaženje tržišne ravnoteže [OPRI98]. U opštem slučaju, problem višekriterijumske optimizacije za nedinamičke sisteme definiše se kao maksimum $\max_{x \in X} F(x)$ gde je $F(x)$ vektorska kriterijumska funkcija čije su komponente pojedinačne kriterijumske funkcije $f_i(x)$, $i=1, \dots, n$, gde je n broj kriterijuma ili kriterijumskih funkcija dok x predstavlja vektorsku promenljivu. Oznaka X predstavlja dopustivi skup [OPRI98]. Funkcija max ukazuje da rešenje treba da maksimizira sve kriterijumske funkcije $f_i(x)$.

Termin neinferiorno rešenje, $x^+ \in X$, je rešenje zadatka $\max_{x \in X} F(x)$ ako ne postoji drugo $x' \in X$, tako da je $F(x') \geq F(x^+)$ i $f_i(x') \geq f_i(x^+)$ bar za jedno i [OPRI98]. Ovakvo rešenje se u literaturi može naći i pod nazivom Pareto optimalno, efikasno ili dominantno.

U primenjenim optimizacionim postupcima u domenu telekomunikacija mogu se posmatrati dva osnovna slučaja: uticaj više ulaznih faktora istovremeno i uticaj više kriterijuma po kojima se uticaj faktora paralelno optimizuje do dobijanja konačnog rešenja [STEU86, EHRG05]. Kada se posmatra prvi aspekt, problem se svodi na težinsku zastupljenost svakog od posmatranih faktora u konačnoj brojnoj vrednosti kojom se opisuje link [WHIT05, DAVI01]. Na taj način, traženje optimalne putanje se svodi na najčešću primenu Dijksra algoritma i traženje najkraće putanje.

Sa druge strane, uticaj više paralelno procesiranih faktora, može usložnjiti algoritam ukoliko su bar dva faktora sa međusobno suprotnim ili isključivim delovanjem [CHEN05]. Na žalost, kod problema rutiranja postoji više takvih kontradiktornih uslova čime se problem dodatno usložnjava.

Kod primene Hopfield-ove neuralne mreže, matematička reprezentacija rešenja problema se svodi na minimizaciju energijske funkcije, u kojoj su sadržani svi kriterijumi i uslovi za pronalaženje traženog rešenja. U daljem tekstu će se za svaki od posmatranih problema definisati predloženi oblik energijske funkcije, kao i sve neophodne veličine koje se u tim funkcijama pojavljuju, i kao uslov za traženje pojedinih putanja podrazumevaće se traženje optimuma predloženih energijskih funkcija.

4.3.2. Pristupi rešavanju problema rutiranja

Polazeći od potrebe da se u svakom postupku rutiranja redukuje broj odbačenih ili izgubljenih paketa, racionalno iskoriste resursi mreže, saobraćaj efikasno distribuira i kontroliše, i minimizuje svaka vrsta kašnjenja, proces rutiranja mora da razmatra i dodatne uslove [MEDH07, PIOR04, SIMM08, EHRG05, RELJ95, KOJI06a, KOJI06, KOJI08a, KOJI04].

Uvođenje dodatnih uslova i ulaznih faktora (kapacitet linkova, gustina saobraćaja, kašnjenje itd.) može se urediti na dva načina. U prvom slučaju svi dodatni parametri se skaliraju na isti opseg, svakom dodeli težinski koeficijent i nakon sumiranja dobije se jedinstven broj kojim se reprezentuje link u formi njegove cene. Na taj način svaki link je opisan samo jednim brojem koji kvantifikuje sve parametre na kojima treba da se bazira rutiranje [PIOR04, MEDH07, PARK04]. U drugom slučaju, potrebno je realizovati višekriterijumsku optimizaciju u pravom smislu te reči, i svaki od parametara posmatrati ponaosob, i u korelaciji sa ostalima, na datom linku ali i okruženju [CHEN05, KOJI06a]. Na taj način se svaki link opisuje sa n parametara gde je n broj različitih ulaznih faktora po kojima je potrebno izvršiti optimizaciju [KOJI06a, BELL09].

Prednost prvog načina je to što je proces kojim se nakon formiranja cene linkova dolazi do optimalne putanje relativno jednostavan, i svodi se na traženje najkraće putanje [CORM01, PIOR04, MEDH07, WHIT05]. Za te potrebe može se koristiti i neki od postojećih algoritama koji imaju svoju softversku ili hardversku realizaciju, poput Dijkstra algoritma [DIJK59]. Brzina rada ovakvih algoritama je relativno velika i njihov rad je pouzdan.

Drugi način je u osnovi drugačiji i sa sobom nosi optimizaciju i balansiranje između svakog pojedinačnog parametra. Na taj nači dobija se Pareto optimalno rešenje, koje najčešće nije optimalno [LEGRO10, ESCH90, EHRT05]. Kao i kod prvog načina, i ovde se uvode težinski koeficijenti kojima se daju prioriteta pojedinim faktorima i na taj način se njihov uticaj na konačnu putanju razlikuje [KOJI06a, ALI93, BELL09]. Putanja koja se dobije na ovakav način je mnogo bolja sa aspekta racionalizacije resursa mreže, realnog uticaja pojedinačnih faktora i odnosa prema nekoj narednoj putanji, koja treba da se formira za potrebe sledećeg rutiranja. Međutim, ovakva složenost zahteva složen način računanja i dovoljno vremena koje eksponencijalno raste sa brojem čvorova komunikacione mreže [CORM01, STEU86, ESCH90, KOJI09a]. Pored toga uloga algoritma kojim bi se ovakva optimizacija i izbor putanje izvršila je veoma velika i njegova složenost zahteva primenu naprednih tehnologija [HAYK94, NASC94, GUPT03, RELJ95, RELJ95a, KOST96, KOJI08a, KOJI12d, KOJI10b].

Ova disertacija daje prikaz jednog rešenja kojim se ovaj algoritam definiše i integriše u sistem koji treba da bude baziran na rutiranju u odnosu na višekriterijumsku optimizaciju.

4.3.3. Korišćeni ulazni faktori i kriterijumi u procesu rutiranja

Algoritam za rutiranje u realnim mrežama, sa akcentom na racionalizaciju resursa mreže treba da ima mogućnost višekriterijumske optimizacije odgovarajućih ulaznih faktora [CHEN05, KOJI06a, KOJI08a]. Predloženi algoritam ove disertacije uključuje u donošenje odluke sledeće ulazne faktore:

1. Cenu linkova,
2. Kapacitet linkova,
3. Trenutnu gustinu saobraćaja na njima,
4. Kašnjenje na linkovima,
5. Stističku analizu vezanu za prethodnu pripadnost linkova pojedinim putanjama.

1. Cena linkova je označena sa matricom **C**. Ovaj parametar je najčešće korišćen kod drugih autora i može da opisuje različite fizičke parametre [ALI93, ARAU01, CHAK01, CHAK02, PORN95, HOPF85, CHEN05]. Može biti simbolično predstavljam

fizičkom dužinom linka ali je najčešće u tu vrednost dodata i cena izgradnje, održavanja i korišćenja pojedine deonice ili podmreže. Ovaj parametar je jedan od najbitnijih u uslovima realnog saobraćaja kada postoje zakupljene deonice puta, tranzitni linkovi ili mobilna infrastruktura. Cena linka je najčešće statička veličina, ili je slabo promenljiva, jer je unapred definisana politikom raspodele i korišćenja resursa.

2. *Kapacitet linkova* je označen matricom \mathbf{K} . Ovaj faktor definiše propusni opseg svakog od linkova u mreži, u smislu maksimalnog protoka koji se može ostvariti. Za razliku od faktora Cena, kod Kapaciteta je izuzetno bitna mogućnost definisanja različitih vrednosti za oba pravca u prometu saobraćaja. Ova karakteristika mreže inicijalno nije podržana od strane autora, koji su pomenuti u smislu doprinosa za primene Hopfield-ove neuralne mreže, i prikazana je u radovima drugih autora [CHEN05, WHIT05]. Faktor Kapacitet se dimenziono posmatra kao broj paketa u jedinici vremena, koji je moguće preneti kroz link, a za krajnjeg korisnika je to brzina download-a tj. upload-a.

3. *Trenutna gustina saobraćaja* je označena matricom \mathbf{G} . Ovaj faktor pokazuje kakva je raspoloživost i dostupnost svakog od linkova u trenutku kada se vrši izbor putanje za naredno rutiranje [PIOR04, PARK04, PARK99]. Ova matrica ima vrednosti koje se najbrže menjaju i koja direktno utiče na promenu logičke topologije mreže. Naime, gustina saobraćaja treba da ukaže koliko je resursa, za svaki od smerova, na svakom od linkova, slobodno u trenutku odlučivanja. U zavisnosti od toga, formira se pomoćna promenljiva $K_{ij} - G_{ij}$, koja kvantitativno opisuje svaki od linkova sa aspekta njegove potencijalne zauzetosti.

Uloga višekriterijumske optimizacije je da pokuša da ova razlika bude što je moguće veća, i da saobraćaj rutira što je više moguće ravnomerno. U slučaju da se sav protok jednog linka iskoristi, tj. da je $K_{ij}=G_{ij}$, pomenuti link se prividno briše iz topologije mreže, jer sa aspekta narednog rutiranja on nema nikakvog efekta. Zbog ograničenja bafera, u svakom od čvorova mreže može doći do odbacivanja paketa i gubljenja dela saobraćaja. Ovaj faktor može da reši i taj problem, na taj način što se može postaviti uslovna granica da je $G_{ij} < G_{ij}^*$, čime se dati link koji je opterećen

privremeno sklanja iz skupa dostupnih, sve dok se saobraćaj na njemu, tj. u baferima, ponovo ne vrati u stanje koje je regularno.

Kako je neuralna mreža projektovana da minimizuje energijsku funkciju, i na taj način dođe do rešenja problema, reprezentacija kapaciteta i gustine saobraćaja na linkovima data je u formi $[1 - (K_{ij} - G_{ij})]$. Na taj način kombinacija što većeg kapaciteta i što manjeg saobraćaja, na određenom linku, taj link predstavlja kao direktnog kandidata za deo naredne rute.

4. *Kašnjenje na linkovima* je označeno matricom **T**. Kašnjenje predstavlja jedan od najbitnijih parametara kada se radi o projektovanju mreže, njenoj upotrebi i algoritmima za rutiranje [PIOR04, MEDH07, CHEN05]. Ovaj ulazni faktor je posebno važan kod prenosa multimedijalnog sadržaja, u realnom vremenu, koji se distribuira većoj grupi korisnika. Ova disertacija obuhvatiće kašnjenje koje je definisano na samom linku i kašnjenem u pridruženim čvornim završecima. U radu [CHEN05], upotrebljen je genetski algoritam za potrebe rutiranja u sličnim okolnostima, ali sa raščlanjivanjem termina kašnjenja na sve njegove bitne segmente u zavisnosti od mesta gde može da nastane ili gde se najizraženije manifestuje.

U radu [KOJI08c] korišćena su kašnjenja: kašnjenje na linku, u čvoru kao posledica procesiranja, ukupno kašnjenje na putanji i varijacija kašnjenja. Pokazano je da je ovaj model mreže u mogućnosti da podjednako dobro radi sa jednim ili više tipova kašnjenja. Kao i kod gustine saobraćaja postoje dodatni uslovi koji određene linkove mogu privremeno isključiti iz konačne putanje ali i iz topologije mreže.

Ovaj uslov kod kašnjenja je definisan maksimalno dozvoljenim kašnjenjem na linku T_{max} . Ukoliko je za neki link $T_{ij} \geq T_{max}$ to znači da je vreme propagacije signala predugo, ili je varijacija kašnjenja veća od dozvoljene, pa se link isključuje iz putanje i vrši rekalkulacija rute. Ovakve pojave su vrlo važne kod video striminga sa garantovanim kvalitetom servisa.

5. *Statistička analiza* je označena matricom **S**. Ovaj faktor ukazuje na statističku analizu vezanu za prethodnu pripadnost linka pojedinim putanjama. Na osnovu njega se direktno može definisati statistička opterećenost linkova u vremenu i na taj način administratoru mreže ukazati na potencijalne probleme. Sa druge strane, ako je neki

link, ili grupa njih, stalno uključena u neku putanju oni se mogu proglasiti i stalnim delovima nekih trasa i na taj način ubrzati rad algoritma. Pored ovoga, direktno se može ukazati na problem vruće ili hladne rezerve sa aspekta njene realizacije, ali i ukazati na resurse mreže koje dodatno treba unaprediti. Izuzetno važan udeo ovog parametra je i mogućnost da se pojedinim rutama zabrani prolazak kroz određene linkove ukoliko se oni procene kao opterećeni, komercijalno zaštićeni, nepovoljni sa tehničkog aspekta ili ako na bilo koji način mogu narušiti regularan rad mreže.

Svaki od pomenutih ulaznih faktora ima težinski koeficijent i na taj način njegov uticaj može biti veći ili manji. Vrednosti svih opisanih faktora su stvarne i sam algoritam ih pre upotrebe skalira sa najvećom internom vrednošću. Na taj način dobija vrednosti u maksimalnom intervalu [0-1]. Ova karakteristika algoritma je vrlo bitna jer svaki od parametara ima različite opsege u kojima ispravno funkcioniše i svaki od njih se napretkom tehnologije može dodatno povećati ili smanjiti. Pored težinskih koeficijenata postoji i mogućnost da se pojedini parametri potpuno uklone iz procesa optimizacije i na taj način se skрати vreme potrebno za rad. Ovo je realizovano softverskim uticajima na odgovarajuće elemente matrice \mathbf{p} i/ili \mathbf{V} .

4.3.4. Modifikacija energijske funkcije za potrebe multicast rutiranja

Relacije 3.6.1 do 3.6.3 rešavaju problem pronalaženja putanje za datu kombinaciju izvorišta S i odredišta D . Ova putanja je bazirana na trenutnom stanju ulaznih faktora u mreži ali je optimizacija izvršena samo po jednom faktoru (Ceni). Kako je u poglavlju 4.2.1 objašnjena potreba za formiranjem *multicast* stabla, jednačine od 3.6.1 do 3.6.3 treba modifikovati tako da se isti model mreže upotrebi i za tu namenu, ali i da se dodatno u proces rutiranja uključi višekriterijumsko odlučivanje, na bazi većeg broja ulaznih faktora. U poglavlju 4.3.3. prikazani su svi realni mrežni faktori po kojima može da se izvrši višekriterijumska optimizacija konačne putanje za rutiranje. Kako se Hopfield-ova neuralna mreža do sada pokazala kao dobar kandidat za rešavanje složenih optimizacionih problema, jedan od ciljeva disertacije je da se ova mreža iskoristi i za višekriterijumsko dinamičko multicast rutiranje.

Prva modifikacija, koju je potrebno realizovati, odnosi se na uslov *multicast* rutiranja, tj. da se iz jednog izvorišta (S) sadržaj upućuje ka m odredišta $D_1 - D_m$. U opštem slučaju, u zavisnosti koji način *multicast* stabla se primenjuje, potrebno je pronaći m putanja od izvorišta do svakog pojedinačnog odredišta. U skladu sa racionalizacijom resursa mreže, ove putanje ne treba da budu nezavisne, pa se relacije date sa 3.6.1-3.6.3 moraju modifikovati. U najgorem slučaju, ove relacije koje deluju u obliku jednog algoritma, se mogu pozvati m puta i naći m nezavisnih putanja. S obzirom da se ove putanje i njihova korelacija može inicijalno kreirati na više različitih načina, može se dobiti skup putanja, od kojih neka može biti optimalna ili bliska optimalnoj.

U skladu sa materijom u poglavlju 4.2.1. i 4.2.2, tj. vrstama, prednostima i manama pojedinih struktura *multicast* stabla, predložene modifikacije treba napraviti sa ciljem dobijanja *Constrained Minimum Steiner Tree in Graph*.

Polazeći od [PORN95], potrebno je kreirati skup destinacijskih čvorova D^m i veze u obliku stabla koje će povezati odredište sa svakim od njih kroz veze $S-D^1, S-D^2 \dots$ i $S-D^m$. Prvo se mora uvesti promena matrice izlaznih napona veštačkih neurona u skladu sa [PORN95] i definisati faktor uticaja višesturkih destinacija kao

$$f(v)_{xi}^m = \frac{I}{I + \sum_{\substack{j \\ j \neq m \\ j \in D}} v_{xi}^j} \quad (4.2)$$

Ovaj faktor treba da ukaže na promenu elemenata, svih matrica \mathbf{V}^m , za svaku od m destinacija. Ako se elementi ovih matrica simbolično zapišu kao v_{xi}^m , tada je konačna vrednost stanja neurona u izlaznom sloju definisana kao

$$v_{xi} = v_{xi}^m \frac{I}{I + \sum_{\substack{j \\ j \neq m \\ j \in D}} v_{xi}^j} \quad (4.3)$$

Na ovaj način sve pojedinačne putanje $S-D^m$ su uključene u proračun putanje $S-D^j$, gde je j podskup skupa m . Na taj način se dobija racionalizacija stabla sa aspekta resursa mreže jer se neki od čvorova skupa m koriste kao tranzitni čvorovi ka krajnjim odredištima skupa j . Ovakva modifikacija matrice prenosa uslovljava da se u energijskoj funkciji svi članovi promene, ali da se i način računanja same energijske funkcije modifikuje. Ova promena se odnosi na pojedinačna računanja delova energijske

funkcije koji se odnose na svaki od čvorova koji pripadaju *multicast* grupi. U skladu sa ovim, kao druga potrebna modifikacija, konačna energijska funkcija se računa kao suma

$$E = \sum_{\substack{m=1 \\ m \in D_m}} E^m \quad (4.4)$$

Konačna modifikacija energijske funkcije 3.61, koja je u skladu sa relacijama 4.2 - 4.4 je data sa

$$\begin{aligned} E^m = & \frac{\mu_1}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} C_{Xi} \cdot v_{xi}^m f(v)_{xi}^m + \frac{\mu_2}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} \rho_{Xi} \cdot v_{xi}^m + \frac{\mu_3}{2} \sum_X \left(\sum_{i \neq X} v_{xi}^m - \sum_{i \neq X} v_{ix}^m \right)^2 \\ & + \frac{\mu_5}{2} (I - v_{ms}^m) + \frac{\mu_7}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} T_{Xi} \cdot v_{xi}^m f(v)_{xi}^m + \frac{\mu_6}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} [I - (K_{Xi} - G_{Xi})] \cdot v_{xi}^m f(v)_{xi}^m \\ & + \frac{\mu_8}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} (I - S_{Xi}) \cdot v_{xi}^m f(v)_{xi}^m + \frac{\mu_4}{2} \sum_i \sum_{X \neq i} v_{xi}^m \cdot (I - v_{xi}^m) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Ovakva modifikacija direktno utiče na promenu dinamike *i*-tog neurona koja je tada

$$\frac{dU_{xi}^m}{dt} = -\frac{U_{xi}^m}{\tau} - \frac{\partial E^m}{\partial v_{xi}^m} \quad (4.6)$$

Ova dinamika se u razvijenom obliku može prikazati kao

$$\begin{aligned} \frac{dU_{xi}^m}{dt} = & -\frac{U_{xi}^m}{\tau} - \frac{\mu_1}{2} C_{xi} f(v)_{xi}^m \cdot (I - \delta_{xm} \delta_{is}) - \frac{\mu_2}{2} \rho_{xi} (I - \delta_{xm} \delta_{is}) - \frac{\mu_3}{2} \sum_{\substack{y=1 \\ y \neq x}} (v_{xy}^m - v_{yx}^m) \\ & + \frac{\mu_3}{2} \sum_{\substack{y=1 \\ y \neq i}} (v_{iy}^m - v_{yi}^m) - \frac{\mu_4}{2} (I - 2v_{xi}^m) + \frac{\mu_5}{2} \delta_{xm} \delta_{is} - \frac{\mu_6}{2} [I - (K_{Xi} - G_{Xi})] f(v)_{xi}^m \cdot \\ & (I - \delta_{xm} \delta_{is}) - \left\{ \frac{\mu_7}{2} T_{xi} + \frac{\mu_8}{2} (I - S_{Xi}) \right\} \cdot f(v)_{xi}^m (I - \delta_{xm} \delta_{is}) \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\forall (x, i) \in \bar{N} \times \bar{N} / x \neq i$$

U skladu sa definisanim promenama, mora se izvršiti i promena aktivacione funkcije kao:

$$v_{xi}^m = g_{xi}^m(u_{xi}^m) = \frac{1}{1 + e^{-a_{xi}^m u_{xi}^m}} \quad (4.8)$$

Vrednosti matrica pojedinih ulaznih faktora direktno utiču na strukturu mreže u skladu sa restriktivnim početnim uslovima. Ovi uslovi su iskazani kroz matricu povezanosti ρ na sledeći način

$$\rho_{xi} = \begin{cases} 1 & \text{ako je } (C_{xi} = 0 \mid K_{xi} = 0 \mid K_{xi} - G_{xi} \leq 0 \mid T_{xi} \geq T_{\max}) \\ 0 & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad (4.9)$$

Na ovaj način pojedini linkovi mreže se pre početka rada algoritma za rutiranje isključuju iz skupa linkova, a samim tim nemaju mogućnosti da se nađu u konačnoj putanji.

Na bazi definisanih ulaznih faktora, poglavlje 4.3.3, i primene istih u modifikovanoj Hopfield-ovoj neuralnoj mreži, poglavlje 4.3.4, kreirana je struktura koja će se koristiti za potrebe određivanja višekriterijumskog *multicast* stabla.

4.4. Rezultati višekriterijumskog *multicast* rutiranja dobijeni predloženim metodom

Polazeći od relacija 3.62 i 4.2–4.9 kreirana je aplikacija sa grafičkim okruženjem u programskom jeziku Matlab. Vrednosti matrica ulaznih faktora su generisane random funkcijom u intervalu od 0 do 1. Algoritam je testiran na velikom broju mrežnih topologija i u različitim početnim uslovima saobraćaja. Posmatrane su i potpuno i delimično povezane mreže sa različitim koeficijentom povezanosti. Svi linkovi koji su korišćeni su bidirekciono sa simetričnim i nesimetričnim vrednostima. Na ovaj način realizovana je simulacija realnog okruženja u većem broju karakterističnih situacija.

Sva testiranja su rađena na računaru Laptop Gericom, CPU 2.6GHz, 512MB RAM, 40GB HardDisk, Windows XP Professional, Service Pack 2. Korišćen je Matlab verzije 6.5. Sav kod koji je napisan ne koristi ni jedan od *toolbox*-ova Matlaba, i sav kod je pisan upotrebom samo osnovnih programskih struktura [KOJI04a]. Razlog za ovakav način pisanja koda je da se on lako može prevesti u bilo koji drugi programski jezik i da ne zavisi od ugrađenih funkcija ili alata samog Matlaba, koji je korišćen samo za razvojno okruženje.

Parametri neuralne mreže koji su korišćeni su: $\tau = 1$, $a_{xi}^m = 1$, $g_{xi}^m = g$. Konstante μ_{1-8} , definisani u relacijama 4.5 i 4.7, su izabrane sa inicijalnim vrednostima 1500, 3500, 4500, 480, 3500, 1600, 1650 i 1700, respektivno. Neuronu su inicijalno pobuđeni sa $-0.00001 \leq \delta U_{xi}^m \leq +0.00001$, što može predstavljati nivo šuma. Pavilan izbor vrednosti konstanti μ_{1-8} , drugih parametara neuralne mreže i načina skaliranja ulaznih faktora, ima ključnu ulogu u stabilnosti rada neuralne mreže i njenom ishodu [KOJI11]. Iz tog razloga predložene vrednosti su utemeljene u teorijskim osnovama ali su delom i modifikovane u skladu sa empirijskim rezultatima koji su dobijani u toku rada.

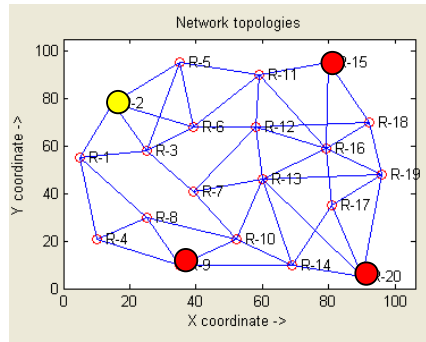
Pokretanjem opisanog algoritma prolazi se kroz sledeće faze:

1. Kreiranje slučajno definisane topologije mreže (ako nije uslovljeno drugačije)
2. Definisane vrednosti za sve matrice ulaznih faktora
3. Definisane izvorišta i m destinacija
4. Određivanje multicast stabla primenom opisanih modifikacija u poglavlju 4.3.4.
5. Memorisanje dobijenog stabla u formi izlazne matrice stanja \mathbf{V} u *.m i *.xls format.

Kraj simulacija može da se realizuje na dva načina. Prvi da je mreža dostigla maksimalno definisan broj iteracija (što se dešava u manje od 1% slučajeva), a u skladu sa [HOPF84], ili da se primeni predloženi algoritam za određivanje optimalnog broja iteracija, koji je detaljno objašnjen u poglavlju 4.5. U oba slučaja, maksimalno definisan broj iteracija je *broj čvorova x 100*.

Na kraju rada mreže, vrednosti matrice prelaza \mathbf{V} se zaokružuju na vrednosti 0 ili 1. Ovo zaokruživanje se vrši na sledeći način: ako je $V_{xi} \leq 0.5$ tada se zaokružuje na 0 dok je u suprotnom 1.

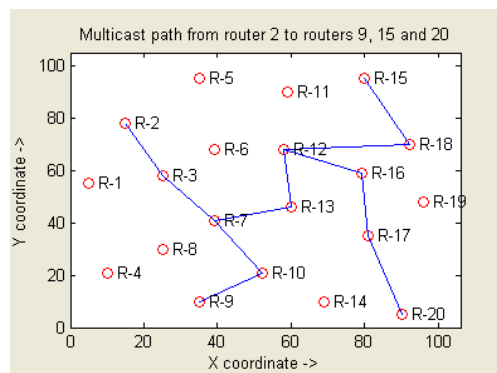
Rezultati koji su ovde prikazani su dobijeni na topologiji mreže koja je korišćena i u radu [PARK95], i prikazana je na slici 4.3. U mreži postoji 20 čvorova i 45 bidirekcionih linkova. Izvorište je u čvoru $S=2$ dok je odredište *multicast* grupe u čvorovima $D^m = \{9,15,20\}$.



Slika 4.3. Korišćena početna mrežna topologija mreže [PARK95].

Da bi se predloženi algoritam uporedio sa rezultatima različitih autora datih u [ALI93, PARK98, ARAU01], uvešće se restrikcija za sve dodatne ulazne faktore i odlučivanje raditi samo na bazi parametra *Cena*. U radu [PARK98] su dati uporedni rezultati četiri različita algoritma i to: Ali-Kamoun-ov, Dijkstra, Kruska-MTS-ov i Park-Choi-jev dok su u radu [ARAU01] dati dodatni uporedni rezultati. Da bi svi ostali dodatni faktori, osim parametra *Cena*, bili neutralni, u pomenutom testiranju, vrednosti matrica (**K**, **T** i **S**) su postavljene na vrednosti 0.5, a vrednosti matrice **G** na 0, jer je u tom slučaju njihov uticaj neutralizovan.

Na 4.4 prikazano je dobijeno *multicast* stablo za definisani skup čvorova, mreže sa slike 4.3, kada se kao metrika koristi parametar *Cena*. U tabeli 4.2 se date uporedne karakteristike korišćenih algoritama [PARK98] i predloženog modela, sa aspekta ukupne cene putanje.



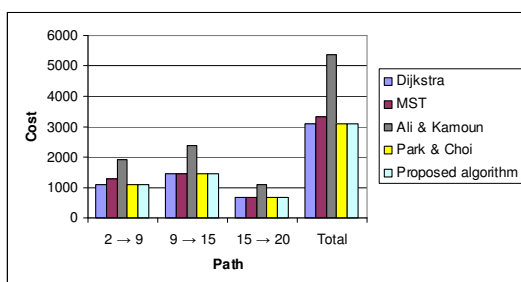
Slika 4.4. Dobijena *multicast* putanja za definisani S u grupu D^m zasnovana na *Ceni* (rastojanju).

Tabela 4.2. Poređenje pet algoritama sa aspekta ukupne cene putanje po njenim deonicama.

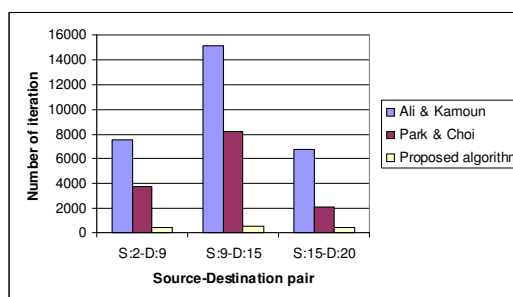
S → D	2 → 9	9 → 15	15 → 20	Ukupno
Dijkstra	1098	1475	671	3114
MST	1284	1475	671	3330
Ali - Kamoun	1946	2385	1101	5342
Park - Choi	1098	1475	671	3114
Predloženi algoritam	1098	1475	671	3114

Prikazani rezultati pokazuju da su minimalna ukupna cena i pojedinačne cene po deonicama dobijene kod Dijkstra i Park-Choi algoritma. Predloženi algoritam je takođe pronašao najpovoljnije rešenje i ono je poredivo sa ostalima u grupi, slika 4.5. Ovaj rezultat pokazuje samo jedan aspekt rešenja problema rutiranja. Kvalitet odabira putanje je bitan faktor zbog brzine propagacije signala i kašnjenje na linkovima, ali je brzina pronalaženja ovog rešenja još važnija. Vreme procesiranja direktno utiče na formiranje novog stabla u procesu rutiranja ili rekalkulacije rute i igra ključnu ulogu u mogućem odbacivanju paketa, što je vrlo izraženo kod video *streaming*-a.

Kako su različiti algoritmi realizovani primenom različitih tehnika ili pokrenuti na računarima različitih performansi, nije moguće napraviti objektivno poređenje sa aspekta brzine rada. Zbog toga se kao mera brzine koristi broj iteracija koji je potreban da se proces završi.



Slika 4.5. Poređenje ukupne cene dobijenih putanja za svih pet algoritama.



Slika 4.6. Poređenje broja iteracija potrebnih da se pronađe rešenje kod Ali&Kamoun-ovog, Park&Choi-jevog i predloženog algoritma.

Uporedni broj iteracija potreban da se pronađe putanja prikazana na slici 4.4, za mrežu sa slike 4.3, je prikazan na slici 4.6. Broj iteracija je dat za svaku od pojedinačnih

destinacija. Pokazuje se da predloženi algoritam ima vrlo dobre karakteristike u odnosu na vreme konvergencije.

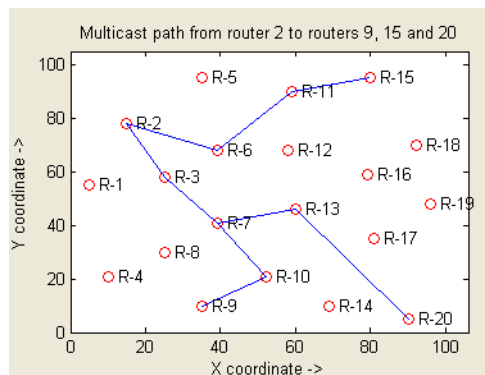
Kako je predloženi algoritam pokazao da može da postigne karakteristike koje su najbolje u odnosu na poređene algoritme, postavlja se pitanje kakve će rezultate dati u slučaju kada se uključe i ostali dodatni parametri, koji su za potrebe dosadašnjih poređenja bili neutralni. Na žalost, u dostupnoj literaturi nema podaka koji se odnose na *multicast* rutiranje sa višekriterijumskom optimizacijom, pa rezultati koji slede ne mogu biti eksplicitno poređeni. Umesto toga koristiće se ista početna topologija mreže da se na postojećim čvorovima za izvorište i odredište pokaže uticaj i rad algoritma, kada se uključuju dodatni kriterijumi i parametri.

Ukoliko se na početku u proračun uključi i podatak o Kapacitetu linkova, moguće je očekivati da se u zavisnosti od konkretnih vrednosti pomenuta ruta promeni. Vrednosti matrice Kapacitet, za bidirekzione linkove, definisani su kodom datim u listingu 3.1. Vrednosti koje su dobijene, su u intervalu [0.45-1], i zaokružene su na tri decimalne.

Listing koda 3.1.

```
function matrica_kapacitet = kreiraj_matricu_kapacitet(n)
    matrica_kapacitet=rand(n,n);
    for i=1:n,
        for j=1:n,
            if (matrica_kapacitet (i,j) <0.45)
                matrica_kapacitet (i,j)= matrica_kapacitet (i,j)+0.56;
            end
        end
    end
end
```

Ukoliko se na ovakav način uključi i faktor Kapacitet, uz već postojeći Cena, dobija se putanja koja je prikazana na slici 4.7. Algoritam koji je dobijen na ovakav način predstavlja jednu od najčešće korišćenih modifikacija IGRP-a koji se koristi u CISCO ruterima [WHIT05].



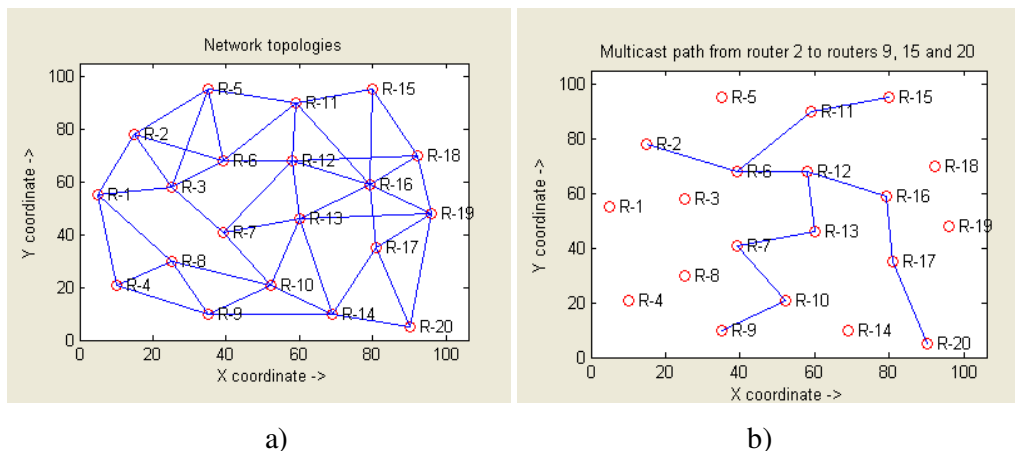
Slika 4.7. Dobijena *multicast* putanja za definisani skup $S-D^m$ baziran na Ceni i Kapacitetu.

Sledeća analiza odnosi se na uticaj gustine saobraćaja. Svaki od linkova je opisan sa trenutnom Gustinom saobraćaja na njemu. Za potrebe ovog testiranja vrednosti su dobijene kodom prikazanim u listingu 3.2. Na ovaj način dobijene su vrednosti u intervalu [0-0.7], zaokružene na tri decimale.

Listing koda 3.2.

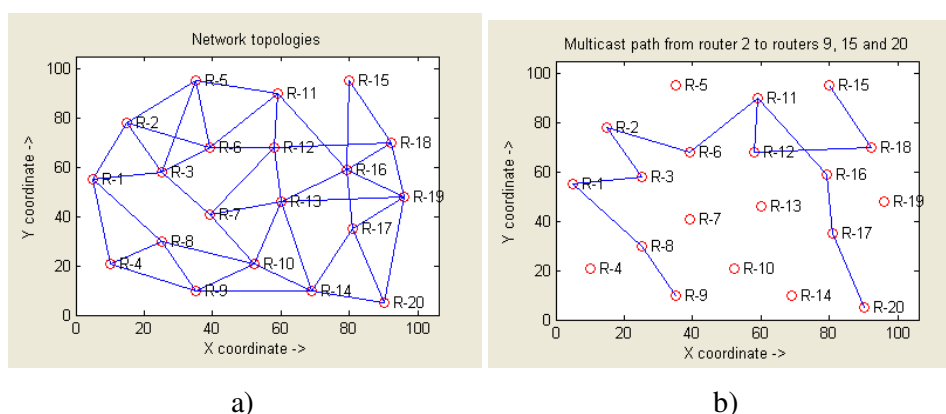
```
function matrica_saobracaj = kreiraj_matricu_saobracaj(n)
    matrica_saobracaj = rand(n,n);
    for i=1:n,
        for j=1:n,
            if(matrica_saobracaj(i,j) > 0.7)
                matrica_saobracaj(i,j) = matrica_saobracaj(i,j) - 0.45;
            end
        end
    end
end
```

Faktor Gustine saobraćaja ima dvostruku ulogu. Sa jedne strane potrebno je izvršiti minimizaciju ukupnog saobraćaja po pojedinim linkovima mreže a sa druge postoji uslov da je $K_{ij} \geq G_{ij}$. Ovaj uslov je u skladu sa realnim stanjem mreže u kome se kroz link može preneti samo paketa koliki je kapacitet tog linka. Na slici, 4.8.a prikazana je redukovana topologija mreže nakon primene uslova $K_{ij} \geq G_{ij}$. Putanja koja uključuje faktore Cenu, Kapacitet i Gustinu saobraćaja je prikazana na slici 4.8.b.



Slika 4.8. a) Mrežna topologija nakon uvođenja uslova $K_{ij} \geq G_{ij}$ i b) Dobijena *multicast* putanja za definisane $S-D^m$ bazirana na Ceni, Kapacitetu i Gustini saobraćaja.

Ovaj model pruža dobru mogućnost za simuliranje realnog mrežnog okruženja. Jedna od pojava koja se može realno desiti je pad linka i potreba da algoritam za rutiranje brzo primi tu informaciju i izvrši rekalkulaciju rute. Ovakav primer je prikazan na slici 4.9 gde je simuliran pad linkova između čvorova (rutera) R12-R16 i R11-R15. Ova dva linka su inicijalno pripadala ruti i sada se očekuje da neuralna mreža odreaguje na novonastalu promenu i pronađe novu putanju bez ova dva linka. Pokazalo se da je i ovakva situacija uspešno savladana, i da je zadržano maksimalno dugo Streiner-ovo stablo, posmatrano od njegovog korena.



Slika 4.9. a) Redukovana mrežna topologija nakon uvođenja uslova $K_{ij} \geq G_{ij}$ i otkazivanja linkova R12-R16 i R11-R15 i b) Dobijena *multicast* putanja za definisane $S-D^m$ bazirana na Ceni, Kapacitetu i Gustini saobraćaja.

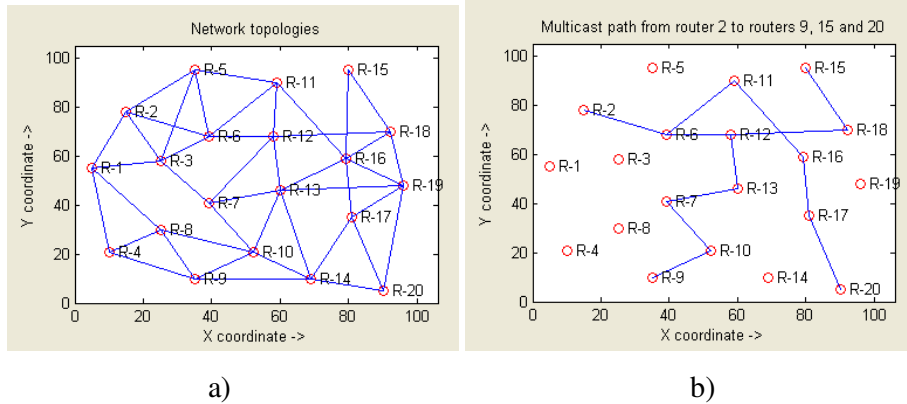
Pored ova tri, može se uključiti i još jedan faktor koji treba da učestvuje u optimizaciji. U ovom slučaju to je kašnjenje na linkovima. Na taj način algoritam postaje još kompleksniji. Cilj algoritma je da na putanji bude što manje kašnjenja na pojedinim deonicama. Vrednosti koje su korišćene za matricu Kašnjenje su dobijene primenom koda datog u listingu 3.3. Na ovaj način dobijene su vrednosti u intervalu [0-0.5], zaokružene na tri decimale.

Listing koda 3.3.

```
function matrica_kasnjenje = kreiraj_matricu_kasnjenje(n)
    matrica_kasnjenje = rand(n,n);
    for i=1:n,
        for j=1:n,
            if(matrica_kasnjenje(i,j) >0.5)
                matrica_kasnjenje(i,j) = matrica_kasnjenje(i,j) - 0.5;
            end
        end
    end
end
```

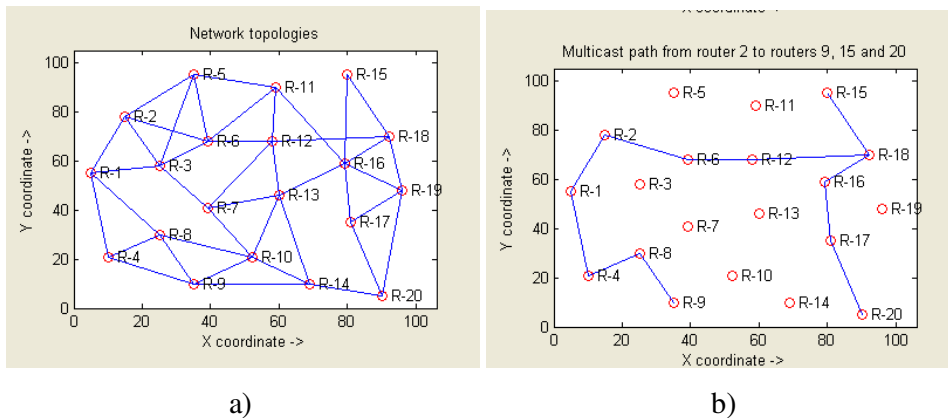
Uvođenjem ovog, četvrtog, faktora sve više dolazi do izražaja složenost pronalaženja rešenja. Sada algoritam treba da pronađe putanju sa što je moguće nižom cenom, većom razlikom između kapaciteta i gustine saobraćaja i manjim kašnjenjem. Sa aspekta kašnjenja to znači da svaki link sa velikim kašnjenjem ima malu verovatnoću da se pojavi u konačnoj putanji. Na slici 4.10 je prikazana putanja za sva četiri parametra.

Rešenje na slici 4.10 je dobijeno samo na osnovu višekriterijumske analize koja je rađena bez dodatnih kriterijuma. Da bi se pokazala još jedna od prednosti predloženog algoritma, uvešće se i uslov da svi linkovi na kojima je kašnjenje veće od maksimalno dozvoljenog T_{max} ne smeju da se nađu u konačnoj putanji, bez obzira koliko su ostali parametri na tom linku povoljni.



Slika 4.10. a) Redukovana mrežna topologija i b) Dobijena *multicast* putanja za definisane $S-D^m$ bazirana na Ceni, Kapacitetu, Gustini saobraćaja i Kašnjenju na linkovima.

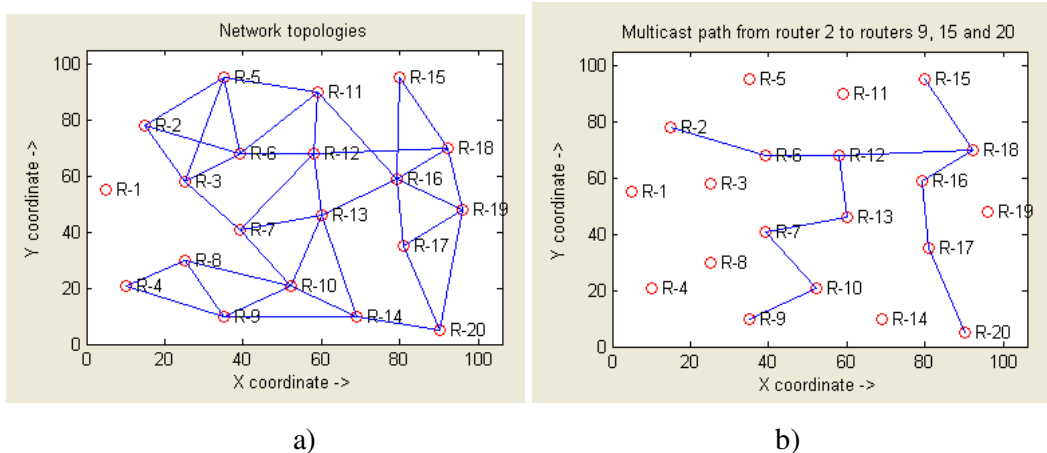
Za potrebe ove simulacije korišćena je vrednost $T_{max}=0.45$. Ovako dobijena putanja prikazana je na slici 4.11. Vidi se da je ovaj kriterijum promenio putanju koja je dobijena bez ovog kriterijuma, što znači da su u rešenju na slici 4.10 postojali linkovi koji bi unosili nedozvoljeno veliko kašnjenje.



Slika 4.11. a) Redukovana mrežna topologija i b) Dobijena *multicast* putanja za definisane $S-D^m$ bazirana na Ceni, Kapacitetu, Gustini saobraćaja i Kašnjenju na linkovima uz uslov da je $T_{ij} < T_{max}$.

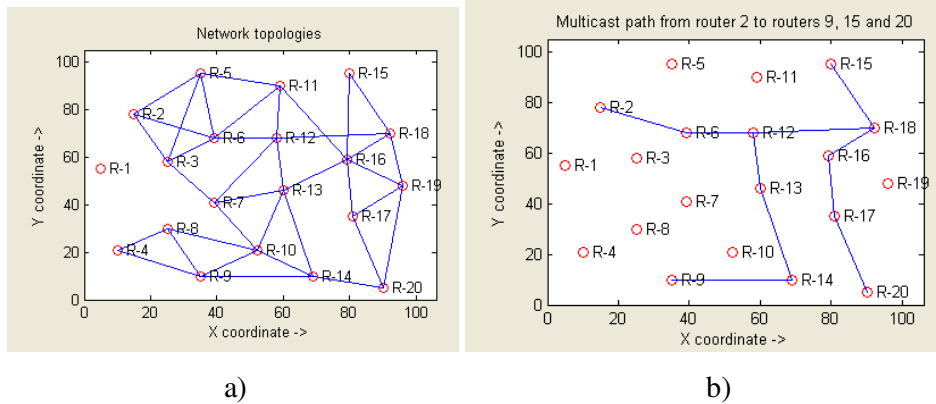
Na slici 4.12 je prikazana jedna od mogućnosti predloženog algoritma kada se radi u situacijama koje su moguće u realnim komunikacionim mrežama. Pretpostavimo da je ruter R1, koji je bio sastavni deo multicast putanje prikazane na slici 4.11, sada van funkcije. Ovakva promena je složenija od mogućnosti pada linka, jer uključuje

izbacivanje ne jednog nego svih linkova koji su direktno vezani na taj ruter. Ovakva situacija će na konkretnom primeru zahtevati promenu dosadašnjeg dela putanje R2-R1-R4-R8-R9, ali i obezbeđenje neke druge putanje do destinacije R9.



Slika 4.12. a) Redukovana mrežna topologija i b) Dobijena *multicast* putanja za definisane $S-D^m$ bazirana na ceni, kapacitetu, gustini saobraćaja i kašnjenju na linkovima uz uslov da je $T_{ij} < T_{max}$ i ruterom R1 koji je van funkcije.

Poslednji, ali ne i manje važan, je parametar statističkog opterećenja linkova. Pretpostavimo da se analizom vrednosti ovog parametra došlo do zaključka da je link između rutera R13-R7 i R7-R10 potrebno osloboditi za druge namene. Vrednosti ovih linkova su statički promenjena na vrednosti 0.1 u odnosu na neutralne vrednosti 0.5. Ovakva promena je sa aspekta neuralne mreže prilično velika i treba da dovede do promene stanja tih linkova u odnosu na njihovu pripadnost nekom od delova putanje. Sa druge strane, osnovna funkcija algoritme obezbeđena kroz inertnost neuralne mreže je da se što manji broj linkova u putanji menja, ukoliko do promena mora da dođe, da se ruting tabele i opšte funkcionisanje mreže ne bi dramatično narušili. Sa druge strane to komplikuje složenost algoritma koji ovu putanju treba da pronađe. Konačna putanja sa ovim uslovom je prikazana na slici 4.13.



Slika 4.13. a) Redukovana mrežna topologija i b) Dobijena *multicast* putanja za definisane $S-D^m$ bazirana na Ceni, Kapacitetu, Gustini saobraćaja i Kašnjenju na linkovima uz uslov da je $T_{ij} < T_{max}$ i Statističkog opterećenja linkova.

Prikazani rezultati pokazuju da Hopfield-ova neuralna mreža može uspešno da realizuje potrebnu logiku rutiranja u mrežama sa paketskom komutacijom, a posebno kada je potrebno analizirati veći broj ulaznih faktora koji utiču na proces donošenja odluka. Uz ove mogućnosti, pokazano je da predloženi model može uspešno da reši problem pronalaženja *multicast* stabla i u uslovima višekriterijumske optimizacije.

4.4.1. Statistička analiza rezultata

Pored rezultata prikazanih u prethodnom poglavlju, urađen je veliki broj drugih testiranja predloženog algoritama. Ova testiranja su bila vrlo bitna, obzirom da je poznato da korišćena Hopfield-ova neuralna mreža ne mora uvek da obezbedi optimalno rešenje (zbog konvergencije ka lokalnim minimumima), ili da može da divergira, čime se rešenje i ne može naći [HOPF82, HOPF84]. U predloženom algoritmu uključeno je nekoliko rešenja koja treba da minimizuju većinu neželjenih efekta Hopfield-ove neuralne mreže. To se najviše odnosi na empirijska podešavanja koeficijenata mreže, uvođenje relativnog praga za okončanje rada mreže, provera rešenja statističim obukama i kontinuiranu proveru vrednosti u matrici prelaza.

I pored toga mogu se desiti neželjeni ishodi, i njima će se posvetiti naredna analiza.

a) *Problemi i rešenja vezani za nenalaženje putanje*

Ovaj problem se odnosi na slučajeve kada neuralna mreža divergira i ne može da ponudi nikakvo rešenje. U takvim situacijama može da se detektuju dve faze:

a1) Da se dostigne maksimalno predviđen broj iteracija (*broj_čvorova_mreže* x 100) a da mreža još uvek ne konvergira (u skladu sa predloženim algoritmom za redukciju broja iteracija). U tom slučaju mreža daje rešenje, ali ono nije zadovoljavajuće (to je neko među rešenje koje je mreža još uvek „popravljala”, ali se prekidom „zatekla” u tom stanju). Ovo rešenje može da bude i potpuno neupotrebljivo u zavisnosti od načina divergencije mreže. Ovakvih situacija je bilo manje od 1%. Programski je rešeno da se u tom slučaju algoritam ponovo pokrene, uz dodatno skaliranje svih elemenata ulaznih matrica sa vrednošću 1.1 i svakim narednim inkrementirajućim korakom od 0.1, do dostizanja nekog prihvatljivog rešenja. Prihvatljivo rešenje je svako ono koje ima konzistentnu putanju i koje uključuje sva odredišta i definisano izvorište. Predloženo skaliranje se odnosi na sve elemente matrica ulaznih faktora na način da se dele predloženom veličinom.

a2) Da konačna matrica **V** ima samo jednu jedinicu, kojom identifikuje izvorište (*S*) i odredište (*D*). Ovo znači da parametri mreža za konkretnu situaciju nisu bili odgovarajući. U tom slučaju mogu se posmatrati dva podscenarija:

a21) Program detektuje stanje jedne jedinice u matrici **V**, menja mrežne i započinje novi ciklus traženja, iz početka, uz primenu modifikovanih parametara neuralne mreže. Promena parametara, u odnosu na postojeće, realizovana je kao: $\mu_1^* = \mu_1 - 100$, $\mu_{2,3,4,5,6,7}^* = \mu_{2,3,4,5,6,7} + 300$, gde su novodobijene vrednosti označene sa *. Na ovaj način se vreme rada, najmanje, duplira zbog ponavljanja celog procesa izračunavanja. Ovakvih događaja je u proseku bilo manje od 2%.

a22) Program detektuje stanje jedne jedinice u matrici **V**, i ako se ne želi u novi ciklus, ovo se tumači kao blokada. Ovakvih događaja je u proseku bilo manje od 2%.

b) Verovatnoća blokade

Za izvršenih 55 grupa merenja, sa slučajno izabranim S i D_i , kao i konfiguracijom mreže i mrežnih parametara, tir puta se desilo da je mreža došla do kraja predviđenog broja iteracija. Od toga dva puta je pronađena putanja koja nije zadovoljavajuća (program je prekinut pre konvergencije energijske funkcije) i jednom sa stanjem kada putanje nema (jedna jedinica u matrici V).

Ako se definiše da nema ponovnog pokretanja programa, i da je ovaj slučaj blokada, tada je verovatnoća blokade $1/55 \times 100\% = 1.818\%$.

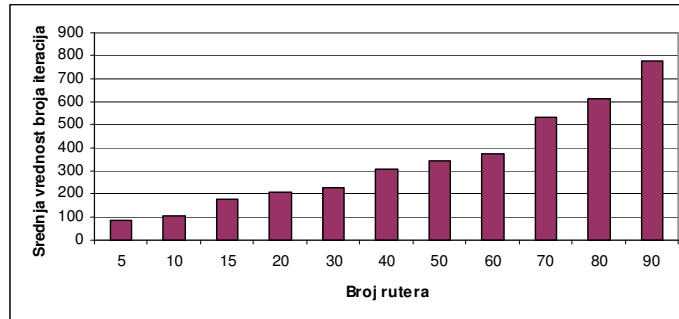
c) Složenost algoritma i vreme potrebno za njegovo izvršavanje u odnosu na broj rutera u mreži

Imajući u vidu da je red složenosti algoritma veoma bitan za njegovu hardversku implementaciju, kreiran je dodatni program koji sam generiše vrednosti ulaznih matrica, strukturu mreže, izvorišta i četiri odredišta, *rand*-om funkcijom. Cilj ovog programa je da beleži srednje vreme koje je potrebno da se dođe do krajnjeg rešenja i uoči zavisnost od broja rutera. Iako primarna ideja neuralnih mreža nije da se njihov rad simulira na računaru, iako se tada dobijaju daleko lošiji rezultati nego u hardverskoj implementaciji, a imajući u vidu da se sva merenja rade na personalnom računaru, ova grupa merenja je ipak urađena.

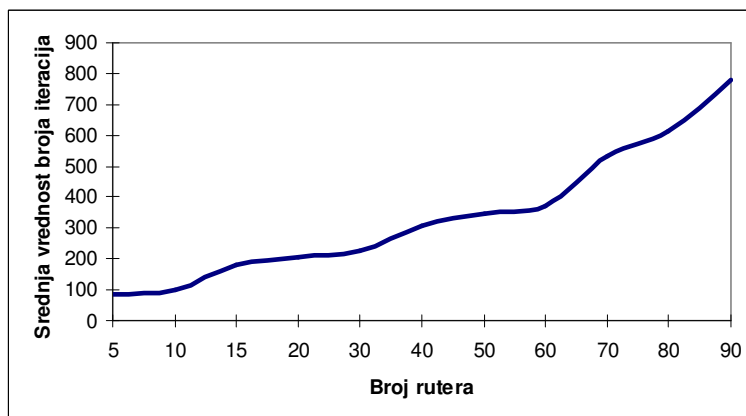
Mreža je testirana za sledeći broj rutera: 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 i 90. Pri tome treba naglasiti da je za broj rutera veći od 30-40 potpuno neracionalno koristiti jednu mrežu za nadgledanje saobraćaja, jer se problem usložnjava. U takvim situacijama koristi se više manjih mreža, uz kreiranje klastera, i jedna centralizovana za ivične rutere, kao i u realnim Cisco sistemima [WHIT05]. Za svaki broj rutera u mreži izvršeno je po pet merenja (pet potpuno drugačijih vrednosti ulaznih matrica, S i D_1, D_2, D_3, D_4). Za svako merenje beleženo je vreme potrebno da se dođe do krajnje putanje, u sekundama, i broj iteracija kroz koje prolazi neuralna mreža. Dobijeni rezultati su poređeni po nekoliko kriterijuma.

Na slici 4.14 prikazana je srednja vrednost broja iteracija, do pronalaženja konačnog rešenja, u zavisnosti od broja rutera. Interpolirana kriva srednjih vrednosti broja iteracija, sa slike 4.14, prikazana je na slici 4.15. Na slici 4.16 prikazano je srednje

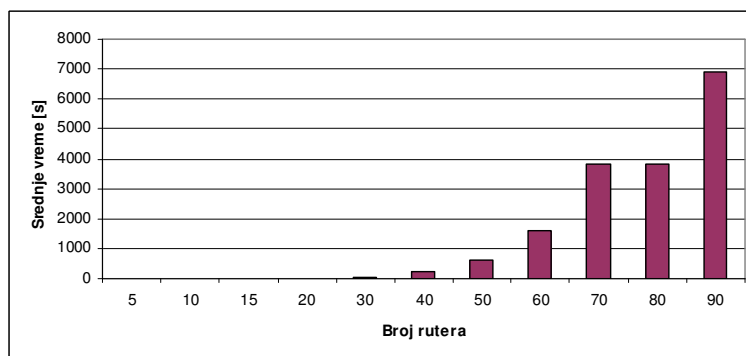
vrema do pronalaženja konačnog rešenja u zavisnosti od broja rutera, s tim što je na slici 4.16.a korišćena linearna a na slici 4.16.b logaritamska podela po y osi.



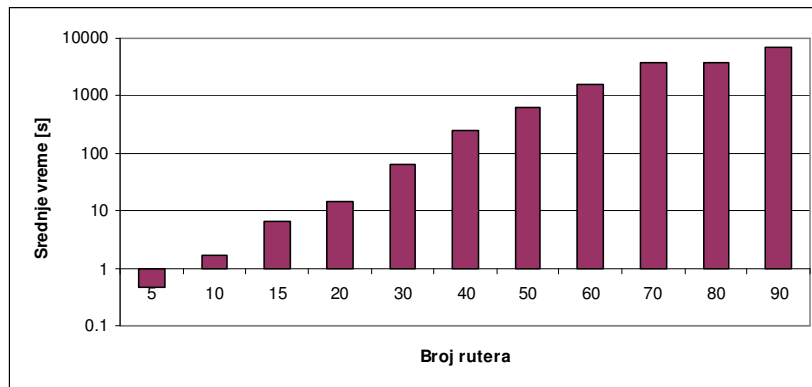
Slika 4.14. Srednja vrednost broja iteracija potrebnih da se dođe do konačne putanje u zavisnosti od broja rutera u mreži.



Slika 4.15. Interpolirana srednja vrednost broja iteracija potrebnih da se dođe do konačne putanje u zavisnosti od broja rutera u mreži.



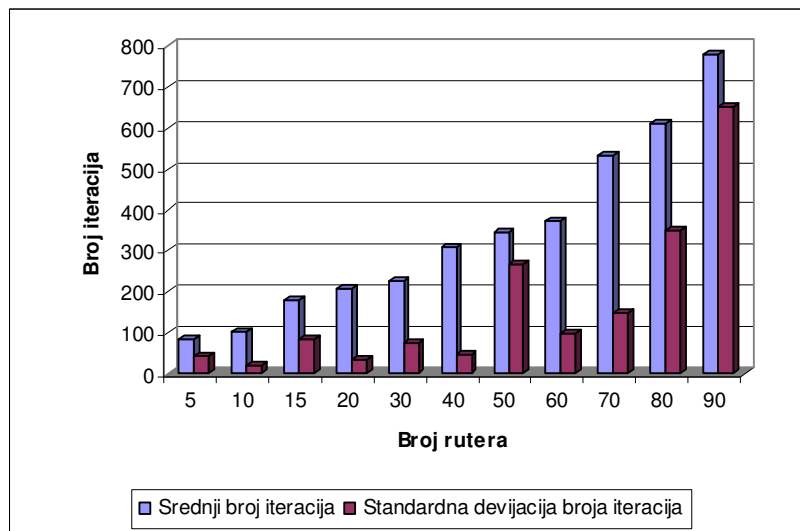
a)



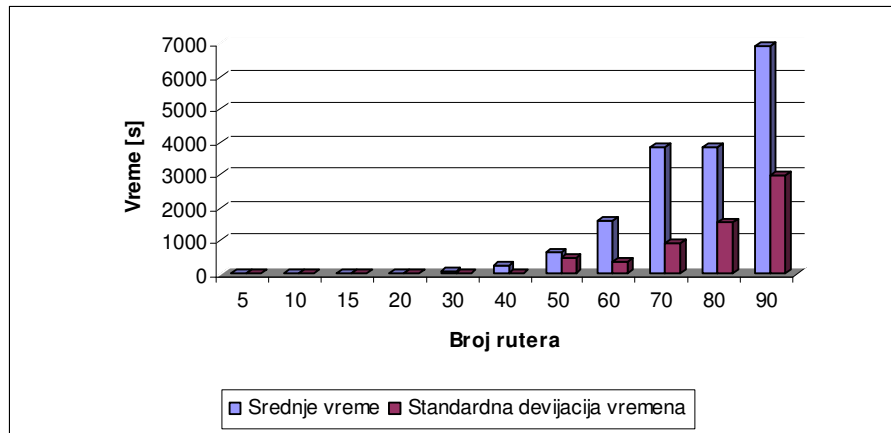
b)

Slika 4.16. Srednja vrednost potrebnog vremena [s] da se pronade putanja u zavisnosti od broja rutera sa a) linearnom i b) logaritamskom razmerom po y osi.

Na slici 4.17 prikazane su srednja vrednosti i varijansa potrebnog broj iteracija do pronalazenja konačnog rešenja u odnosu na broj rutera u mreži. Na slici 4.18 prikazane su srednja vrednosti i varijansa vremena potrebnog da se pronade konačno rešenje u odnosu na broj rutera u mreži.



Slika 4.17. Srednja vrednost i varijansa broja iteracija potrebnih da se pronade putanja u odnosu na broj rutera u mreži.



Slika 4.18. Srednja vrednost i varijansa vremena [s] potrebnog da se pronade putanja u odnosu na broj rutera u mreži.

4.5. Optimizacija broja iteracija za rad neuralne mreže

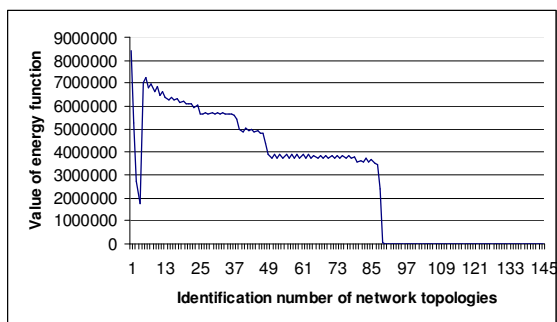
Neuralna mreža je dinamička struktura koja u zavisnosti od početnog stanja i ulaznih parametara treba da dođe do rešenja problema. Ova struktura modifikuje svoja stanja u svakoj iteraciji svoga rada. Broj iteracija potrebnih da bi neuralna mreža dostigla stabilno stanje (koje u ovom slučaju odgovara izboru optimalne putanje) zavisi od vrednosti ulaznih faktora i početnog stanja mreže, koje se često unosi kao šum. Kako svi podaci nisu unapred definisani ni poznati, nemoguće je unapred predvideti potreban broj iteracija. Da bi se osiguralo pronalaženje rešenja, najčešće se koristi fiksni i dovoljno veliki broj iteracija, npr. $100 \times n$, gde je n broj rutera u mreži. U toku testiranja je empirijski potvrđeno da je ovaj broj dovoljan u preko 99% slučajeva, ali je u pojedinim slučajevima on nepotrebno veliki jer ne poboljšava rezultat, a povećava vreme obrade.

Dostizanje željenog rešenja, a samim tim i broj iteracija koji je potreban za to rešenje, je svaki put drugačiji i ne može se predvideti. Iz tog razloga, postoje dva načina za prestanak rada Hopfield-ove neuralne mreže.

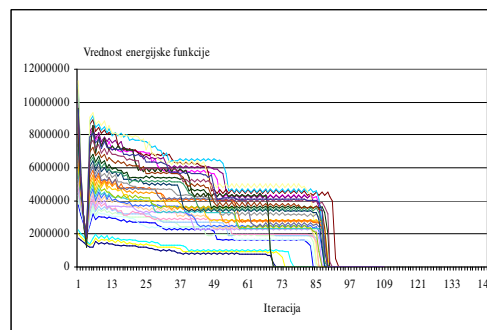
Prvi način je da se iscrpe sve programski predviđene iteracije i zaključno sa poslednjom, trenutno stanje neuralne mreže, proglasi krajnjim rešenjem. Ovakav način se ne preporučuje, jer to znači da mreža nije uspela regularno da završi svoj rad, i rešenje koje se najčešće dobija nije očekivano rešenje. Sa druge strane, neuralna mreža

se zbog problema divergencije energijske funkcije na neki način mora ograničiti. Najčešće je to uslov koji proističe iz analize oblika energijske funkcije i svodi se na trenutak njene stagnacije. Ovo je drugi način na koji se može okončati rad neuralne mreže.

Na slici 4.19 prikazan je standardni oblik energijske funkcije. Primetno je da se nakon prve dekade iteracija pojavljuje nagli pad i zatim skok vrednosti, nakon čega energijska funkcija treba da ima monotono opadajuće svojstvo. Ovo svojstvo uslovljeno je jednačinom kojom se opisuje energijska funkcija i opštim pravilima koja za nju važe, a definisana su relacijama 3.14, 3.15, 3.17 i 4.5.



Slika 4.19. Tipičan oblik energijske funkcije.

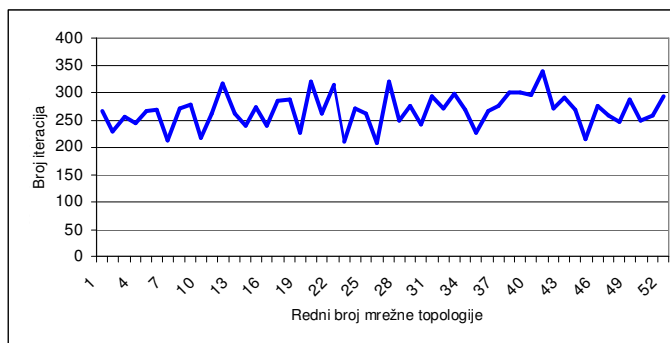


Slika 4.20. Energijske funkcije za više od 50 različitih mrežnih topologija i različitih $S-D^m$ kombinacija.

Posmatrajući Hopfield-ovu neuralnu mrežu, za predloženi algoritam, i prateći oblik energijske funkcije za različite topologije mreža, početne uslove, vrednosti ulaznih parametara i kriterijuma koji su zadavani mreži došlo se do zaključka da je oblik energijske funkcije sa slike 4.19 reprezentativan i da se može koristiti kao srednja vrednost svih dobijenih grafika energijskih funkcija. To je potvrđeno i skupom od preko 50 energijskih funkcija dobijenih u više od 50 različitih mrežnih uslova i topologija prikazanih na slici 4.20. Iz tog razloga realizovan je algoritam za određivanje optimalnog broja iteracija. Ovaj postupak je baziran na traženju 10 uzastopnih vrednosti, što bi bila potvrda da je funkcija došla u stanje stagnacije. Opisano stanje, koje se interaktivno računa, trebalo bi da implicira prekid rada neuralne mreže. Ovakvo rešenje je pokazalo uspeh u 99% testiranih slučajeva, što je bilo zadovoljavajuće imajući u vidu doprinos u vidu smanjenja broja iteracija i vremena potrebnog za

procesiranje [KOJI06a].

Primenjujući metod redukcije pokazuje se da se rad neuralne mreže, za različite tipove mrežnih topologija, može smatrati relativno predvidivim, ako se govori o intervalu broja iteracija. Oscilacije potrebnog broja iteracija, da se dobije krajnje rešenje, ako se koristi predloženi metod redukcije je prikazan na slici 4.21. Ovi rezultati su testirani na različitim mrežnim topologijama mreže koja ima isti broj rutera. Problem koji nastaje je kada se mrežna topologija uopštava i kada se broj rutera inicijalno ne zna ili se menja u kratkim vremenskim intervalima. U takvim situacijama, predloženi metod redukcije nije optimalan, iako daje tačne rezultate, pa se mora primeniti neki drugi.



Slika 4.21. Broj potrebnih iteracija da se pronade putanja za više od 50 različitih mrežnih topologija i i različitih $S-D^m$ kombinacija.

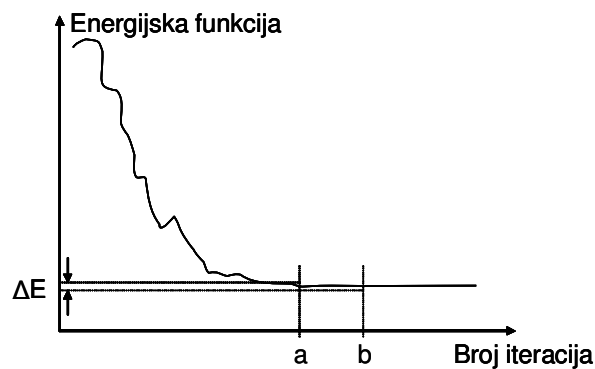
Obzirom da je testiranje vršeno za različite mrežne topologije i za različit broj rutera, došlo se do zaključka da nema direktne korelacije između optimalnog broja iteracija i broja elemenata mreže. Međutim, primetno je da taj broj ne prelazi vrednost od 350 iteracija, što je daleko manje od standardne vrednosti ($\text{broj_rutera} \times 100$), što bi u ovom slučaju dostizalo i $80 \times 100 = 8000$ iteracija. Na ovaj način, napravljena bi bila ušteda više od 80%.

4.5.1. Predloženi postupak za određivanje optimalnog broja iteracija

Za redukciju broja iteracija mogu se primeniti različita rešenja. Najčešće se prati vrednost energijske funkcije i poredi sa unapred definisanom vrednošću praga. U trenutku postizanja praga, prekida se iterativni postupak, i kao konačno rešenje se

usvaja ono koje je neuralna mreža tada dostigla. Međutim, analiza ovakvog rešenja je ukazala da se često javljaju greške. Razlog je uslovljen opisanim oscilacijama energijske funkcije, i prilično je izražen na početku pokretanja neuralne mreže. Dodatni problemi u stabilnosti rešenja, i stanja energijske funkcije, javljaju se kod multidestinacijskog rutiranja, što je zahtevalo novi pristup u definisanju trenutka kada treba izvršiti prekid.

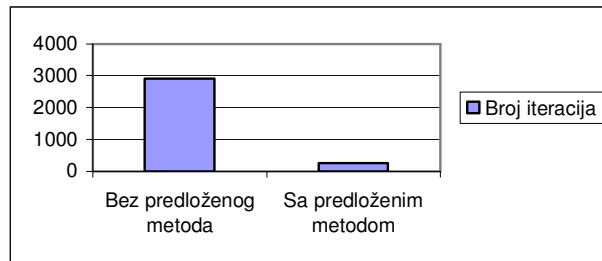
Analizirajući ponašanje energijske funkcije, sa promenom broja iteracija, u velikom broju različitih mrežnih topologija, došlo se do zaključka da je teško definisati fiksni prag koji bi obuhvatio različite početne uslove. Kao ilustracija toga, na slici 4.20 je prikazan dijagram promene vrednosti energijske funkcije u funkciji broja iteracija, u mreži sa $n=29$ čvorova, za različite mrežne konfiguracije i različite početne uslove. Sa dijagrama na slici 4.20 vidi se da mreža dolazi u stabilno stanje nakon 70 do 100 iteracija, što je znatno manje od kriterijuma $100 \times n$ (što bi dalo vrednost 2900). Ovaj prag je drugačiji za svaku topologiju mreže i za različite vrednosti ulaznih matrica i parametara. Definisanje apsolutne vrednosti praga je nemoguće, pa je ovde uveden pojam „relativnog praga“. Naime, energijska funkcija ima tendenciju pada, a zatim stagnacije, kada se neuralna mreža sporo približava stabilnom stanju [KOJI06a]. Polazeći od tog stava, ovde se kao kriterijum prekida predlaže dozvoljeno apsolutno odstupanje ΔE_p unutar nekog intervala broja iteracija $[a, b]$. U radu [KOJI09b] je usvojeno je da je $b=1.1a$, a $\Delta E_p=0.001$. Ovakav način rada može se grafički predstaviti dijagramom na slici 4.22.



Slika 4.22. Odstupanje energijske funkcije unutar intervala $[a, b]$.

Tokom izvršavanja programa pravi se pozadinski fajl u kome se zapisuje

vrednost energijske funkcije za datu iteraciju. Za svaku iteraciju a , u trenutku kada se dostigne iteracija b , proverava se kolika je vrednost ΔE , slika 4.22. Ako je ova vrednost veća od dozvoljenog praga ΔE_p , proces se nastavlja, a u protivnom proces se obustavlja i iteracija b proglašava poslednjom iteracijom. Kako je proces dodatnog zapisivanja podataka opterećujući za sam procesor, uvedene su neke restrikcije u cilju efikasnijeg delovanja. Prvo je uveden uslov da se za $a \leq 100$ ne vrši provera, jer se pokazalo da je u preko 99.9% slučajeva oscilovanje energijske funkcije bilo relativno veliko unutar prvih 100 iteracija. Kao druga restrikcija, nakon 100 iteracija provera se vrši za svaku petu iteraciju. Time se može postići greška od maksimalno četiri iteracije, ali je ušteda u procesorskom vremenu 80%. Ovakav način restrikcije broja iteracija daje vrlo dobre rezultate kada se radi o postignutoj brzini rada. Ušteda u broju iteracija je više od 11 puta u slučaju primene predloženog metoda za redukciju. Rezultat primene redukcije u cilju određivanja optimalnog broja iteracija potrebnih za pronalaženje konačne putanje su prikazani na slici 4.23.



Slika. 4.23. Srednji broj iteracija potreban za konačno rešenje u slučaju kada se predloženi metod (ne) koristi.

Ovakav način redukcije broja iteracija je pokazao dobre rezultate u 92% testiranih slučajeva. To znači da je u tom primerima dobijena putanja bila ista kao i kod primene standardnog, maksimalnog, broja iteracija. U preostalim 8% redukcija nije dala poboljšanje postupka jer je promena energijske funkcije, do kraja maksimalno predviđenog broja iteracija, bila veća od ΔE_p , pa je postignut maksimalan broj iteracija. Ovo bi bio slučaj i kod rada bez primene algoritma za redukciju broja iteracija.

4.5.2. Rezultati primene predloženog metoda za redukciju broja iteracija

Predloženi algoritam za redukciju potrebnog broja iteracija je poređen sa rezultatima rada Araujo i autora [ARAU01]. U radu je analizirana mrežna topologija sa 40 rutera i *unicast* rutiranjem. Parovi *S* i *D* su slučajno birani. Autori rada su, pored njihovog predloženog algoritma, dali rezultate i za model Park-Chio, inicijalno opisan u radu [PARK98]. Uporedni rezultati poređenja ova dva, i predloženog, algoritma su dati u tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Broj iteracija potreban za pronalaženje rešenja u mreži sa 40 rutera i *unicast* rutiranjem.

	Park - Choi	Araujo	Predloženi algoritam
Broj iteracija	7489	1628	480

Rezultati pokazuju da je Araujo postigao uštedu u redukciji broja iteracija od oko 80% u odnosu na rezultat Park-Choi, koji koristi maksimalno definisan broj iteracija u svakom ciklusu. Nakon testiranja predloženog algoritma, dobijena je ušteda od oko 95% u odnosu na Park-Choi algoritam tj. oko 70% u odnosu na Araujo model. Jasno je da je ušteda koja je ostvarena vrlo velika, i pokazuje da se model Hopfield-ove neuralne mreže može dodatno unaprediti, i time biti još pogodniji za implementacije u realnom okruženju.

4.6. Statistička obuka

Statistička obuka neuralnih mreža podrazumeva skup koraka koji se primenjuju na neuralnu mrežu nakon određene faze njenog rada, sa ciljem da se postignu bolji rezultati u obuci i nalaženju najboljeg rešenja [GRAU07, GEMA84]. Osnovna ideja koja se primenjuje kod statističke obuke je da se izvrši promena težinskih koeficijenata (iterativno sa malim promenama) i posmatra rezultat. Ukoliko se za datu iteraciju dobije bolji rezultat od prvobitnog, ova promena težinskih koeficijenata se prihvata, ili odbacuje u suprotnom [GRAU07, KOJI09a]. Ovo se najčešće primenjuje u završnoj fazi rada, i koristi se u svrhe provere ponuđenog rešenja mreže. Ako se u postupku

statističkog treninga ipak pronađe bolje rešenje, ono se prihvata, a mreža dodatno modifikuje novopronađenim koeficijentima [GRAU07, GEMA84].

U slučaju Hopfield-ove neuralne mreže, trening se vrši na osnovu vrednosti energijske funkcije. Ukoliko se promenama, koji se kreiraju u fazi treninga, postigne manja vrednost energijske funkcije, promena se smatra dobrom i prihvata se [GRAU07, KOJI09a]. Na ovaj način moguće je da će se pronaći rešenje koje je bolje od ponuđenog, ali je mana to što nema garancije da će se takvo rešenje pronaći, a potrebno je izdvojiti dodatno vreme zaokonačanje celog procesa.. Sa druge strane, postoji i problem veličine promene koja se u ovom postupku generiše. Ukoliko su promene male, može se doći u stanje lokalnog minimuma, pa svaka naredna promena neće „imati dovoljno snage“ da iz ovog minimuma izađe i počne sa traženjem novog, koji može biti i globalni i dovesti do optimalanog rešenja. Ipak, ako su promene velike, lako se može dobiti „nestabilna“ mreža (oscilator) koja uz to preskače sve lokalne minimume i ne može naći optimalno rešenje [GRAU07].

Rešenje za izbor početne veličine i stepena promena ulaznih parametara može se rešiti primenom metoda koje su poznate i koriste se u oblasti metalurgije. Postupak kojim se užareni materijal sporo hladi (*annealing*) da bi se postigle željene karakteristike materijala, može biti iskorišćen u svrhu nalaženja veličine promene kojima će se testirati neuralne mreža.

4.6.1. Proces zagrevanja i hlađenja

U metalurgiji se manipulisanjem temperaturom, i gradijentom promene iste, mogu postići različiti efektni na materijal. U cilju pravljenja bolje legure materijala i odnosa među molekulima, metal se prvo zagreva na temperaturu koja je iznad tačke topljenja. U tečnom stanju, molekuli imaju najveću kinetičku energiju i prelaze najduže putanje u haotičnom kretanju. Hlađenjem se energija smanjuje pa i kretanja postaju sve manja do trenutka dolaska u stanje najniže energije [GRAU07]. Kretanje molekula definisano je Boltzman-ovom verovatnoćom raspodele kao

$$p(E) = e^{-\frac{E}{KT}} \quad (4.10)$$

Veličina $p(E)$ predstavlja verovatnoću da će se sistem naći u stanju kada je njegova energija E . Parametar K je Boltzman-ova konstanta dok je T apsolutna temperatura (u Kelvinima). Promenom temperature direktno se utiče na verovatnoću da se sistem nađe u stanju sa energijom E , pa su veličine promene temperature povezane sa veličinama verovatnoće. Ako se u relaciji (4.10) posmatra promena energije sistema ΔE [GRAU07], tada relacija (4.10) postaje

$$p(\Delta E) = e^{-\frac{\Delta E}{KT}} \quad (4.11)$$

Relacija 4.11 će predstavljati način da se detektuje nastala promena energijske funkcije Hopfield-ove neuralne mreže, i na taj način pored zaključka o efikasnosti promene, definiše i prag u odnosu na koga će se predložena promena prihvatiti ili ne.

4.6.2. Primena predloženog procesa u neuralnoj mreži

Za ovaj slučaj trening kome se podvrgava neuralna mreža može se podeliti u sledeće faze [GRAU07, KOJI09a]:

1. Postavljanje parametra T na neku veliku vrednost.
2. Generisanje izlaza neuralne mreže (na bazi trening skupa) i određivanje energijske funkcije za takav slučaj.
3. Generisanje slučajnog koeficijenta kojim će se ulazni signali korigovati, pa na bazi njih traženje izlaza i nove energijske funkcije.
4. Ako je nova vrednost energijske funkcije manja, tada se promena na ulazu usvaja kao stabilno i trajno stanje, dok se u suprotnom računa $p(\Delta E)$ za predloženu promenu u skladu sa (10). Ukoliko je dobijena verovatnoća veća od neke slučajne veličine r (izabrane iz intervala [0-1]) tada se ulazna promena zadržava, dok se u suprotnom odbacuje, i predlaže se nova promena.
5. Postupak se ponavlja od tačke 2, uz promenu parametra T (sa opadajućem tendencijom).

Prethodno opisani problem sa „preletanjem“ tj. „hvatanjem“ nekog od lokalnih minimuma rešen je naknadnim uslovom u tački 4, kada se na bazi verovatnoće promene

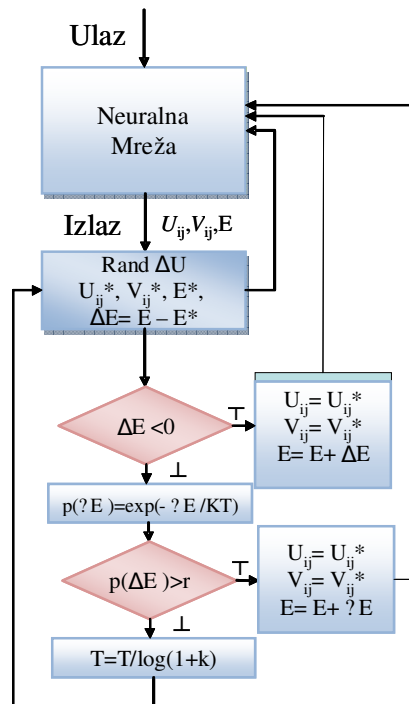
energije i slučajnog broja, sa kojim se poredi ova promena, mreži omogućava da u nekim situacijama pokuša da promeni stanja ka kome konvergira. Sa druge strane, nelinearnim smanjenjem temperature, rešava se problem definisanja koraka promene ovog parametra a samim tim i promene energijske funkcije. Za potrebe ove disertacije promena temperature se kroz svaku od iteracija k definiše sa

$$T(k) = \frac{T_0}{\log(1+k)} \quad (4.12)$$

Ovakva promena temperature garantuje konvergenciju ka globalnom minimumu [GEMA84, GRAU07].

4.6.3. Blok šema statističkog treniranja

Na slici 4.24, prikazana je blok šema kojom se opisuje kompletan postupak statističkog treniranja, predložena za primenu kod Hopfield-ove neuralne mreže.



Slika 4.24. Blok šema postupka statističkog treniranja neuralne mreže.

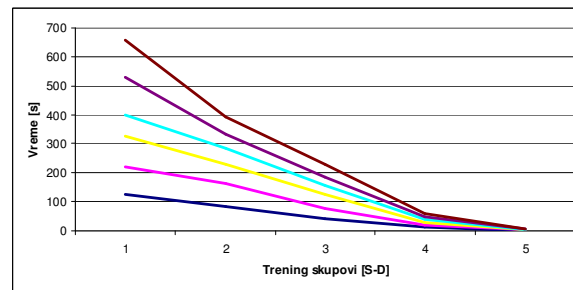
Na ulazu u neuralnu mrežu nalazi se skup matrica ulaznih faktora definisan u poglavlju 4.3.3. Obradom ovih podataka na izlazu neuralne mreže se dobijaju matrice stanja ulaza \mathbf{U} i izlaza \mathbf{V} , kao i vrednost energijske funkcije E .

Ulaskom u prvi blok za statistički trening, slučajno se generiše matrica $\Delta\mathbf{U}$, koja se dodaje matrici \mathbf{U} i na taj način je menja. Maksimalne vrednosti u matrici $\Delta\mathbf{U}$ su skalirane na 0.1, i na taj način se promena smatra minimalnom. Na bazi ovako promenjene matrice ulaznih stanja ponovo se vrši pokretanje neuralne mreže. Nakon toga na izlazu mreže se pojavljuju nove vrednosti matrica \mathbf{U} , \mathbf{V} i energijske funkcije označene sa \mathbf{U}^* , \mathbf{V}^* i E^* . Na bazi prvobitne vrednosti energijske funkcije i novo dobijene računa se parametar $\Delta E = E - E^*$. Ukoliko je ova promena manja od nula, to znači da je nova vrednost energije manja, pa samim tim i bolja, što znači da postoji bolje rešenje od onoga koji je inicijalno pronašla neuralna mreža. Iz tog razloga, sva trenutna stanja \mathbf{U}^* , \mathbf{V}^* i E^* se postavljaju kao regularna, i ulazi se u novu iteraciju. U slučaju da je ΔE veća od nule, dobijeno rešenje se ne odbacuje apriori, iako nije pogodno. Pre konačnog odbacivanja vrši se računanje verovatnoće $p(\Delta E)$ i poređenje sa slučajno odabranom vrednošću r . Ukoliko je data verovatnoća veća, privremene vrednosti se postavljaju kao stalne. Na taj način se omogućava da mreža ima mogućnost da pogrešnim setovanjem početnih stanja pokuša da izađe iz konvergencije lokalnog minimuma, i eventualno nađe drugi, koji je optimalan. Ako se ispostavi da takav ne postoji u narednim iteracijama ovaj nedostatak će se korigovati. Na kraju celog procesa, parametar T se svakom narednom iteracijom umanjuje, i na taj način simulira proces hlađenja materijala opisan u [GRAU07, KOJI09a].

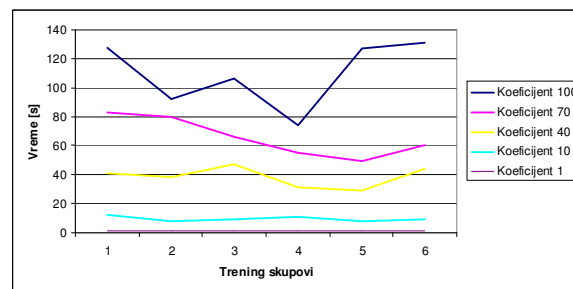
4.6.4. Rezultati dobijeni primenom statističke obuke

Polazeći od strukture mreže prikazane u poglavlju 4.4, i dobijene izlazne matrice \mathbf{V} , primenjen je opisani metod statističke obuke. Metod obuhvata skup koraka definisanih slikom 4.24, dok je kraj simulacije definisan stagnacijom energijske funkcije i maksimalnom oscilacijom u deset uzastopnih iteracija od 0,0000001. Na kraju rada programa, vrednosti matrica su zaokružene na 1 ako je $V_{xi}^m \geq 0.5$ ili 0 u ostalim slučajevima. U ovim primerima $S=1$ dok je skup od četiri destinacije D^m slučajno generisan iz skupa svih ponuđenih destinacija.

Ukupan broj iteracija kroz koji mreža inicijalno prolazi je definisan kao $i=N*M$, gde je N broj čvorova u mreži (fiksno za datu mrežu) a M koeficijent kojim se mreži dozvoljava da u većem broju iteracija izvrši konvergenciju ka stabilnom stanju. U inicijalnim rezultatima, vrednost koeficijenta M je bila 100, što je i ovde uzeto kao početna vrednost. Međutim, da bi se posmatrao efekat treninga, ovaj parametar je umanjivan u koracima i to: 100, 70, 40, 10 i 1. Kao ulazni trening skup slučajno je izabrano šest parova $[S-D^m]$ (*source-multi destination*). Za svakog od njih izvršeno je merenje najduže putanje u pronađenom stablu i vreme koje je potrebno da se ceo proces simulacije (računajući inicijalizaciju, crtanje grafika i skladištenje podataka za dalju obradu). Na slici 4.25 prikazana je zavisnost koeficijenta M za svaki od parova $[S-D^m]$ od potrebnog vremena za dobijanje krajnjeg rezultata. Svaka linija predstavlja skup od pet podataka (za vrednosti M) i to redom za iste grupe parova.



Slika 4.25. Zavisnost koeficijenta M od vremena potrebnog neuralnoj mreži da dođe do rezultata, za slučaj različitih parova $[S-D^m]$, kada nema statističkog treninga.



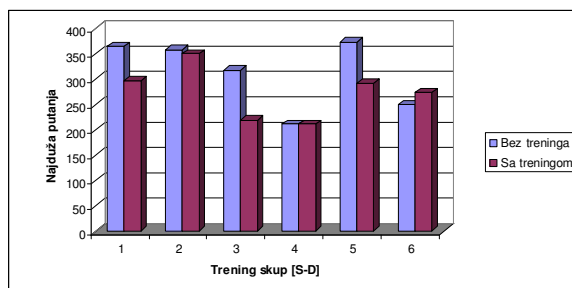
Slika 4.26. Zavisnost vremena rada neuralne mreže od koeficijenta M za pojedinačne parove trening skupa bez statističkog treninga.

Na slici 4.25 se vidi da je smanjenjem broja iteracija i vreme za obradu (približno) eksponencijalno manje, i da se u slučaju kada je broj iteracija veći pojavljuju veće oscilacije za slučajno izabrane parove $[S-D^m]$. Ovo se još bolje može primetiti na slici 4.26, gde je prikazana zavisnost grupe parova za konkretne vrednosti koeficijenta M . Svaka od linija predstavlja potrebno vreme rada mreže za različite parove $[S-D^m]$, pri istom koeficijentu.

Svaka linija na slici 4.26 predstavlja varijaciju vremena za isti par čvorova ali za različite koeficijente M . I u ovom slučaju se primećuje da je najveća varijansa primetna za slučaj kada se koristi najveći koeficijent. Posledica ovako velike varijacije, sa druge strane, je veća preciznost predloženog rešenja, jer je vreme za konvergenciju energijske funkcije povećano.

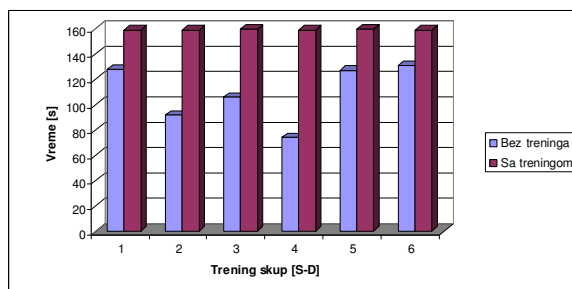
Direktnim poređenjem rada neuralne mreže, u slučaju da se koristi statistički trening, mogu se posmatrati dva parametra: dužina najduže putanje u predloženom stablu i vreme potrebno za rad.

Najduža putanja je ona, koja u skupu više destinacija, ima najveću sumu pojedinačnih linkova od kojih je sastavljena. Ovaj parametar direktno oslikava preciznost rada neuralne mreže i kvalitet predloženog rešenja. Ovo je posebno izraženo kod Hopfield-ove neuralne mreže, kod koje konačno rešenje ne mora da bude optimalno, ali je uvek u skupu rešenja koja su bliska optimalnom. Na slici 4.27, prikazane su najduže putanje za slučaj kada neuralna mreža radi bez i sa treningom. Vidi se da u većini slučajeva najduža putanja, za slučaj kada se koristi statistički trening, kraća nego u slučaju bez treninga. Ovo ukazuje na mogućnost da se korišćenjem treninga, u konkretnim slučajevima, može postići veća preciznost u radu neuralne mreže.



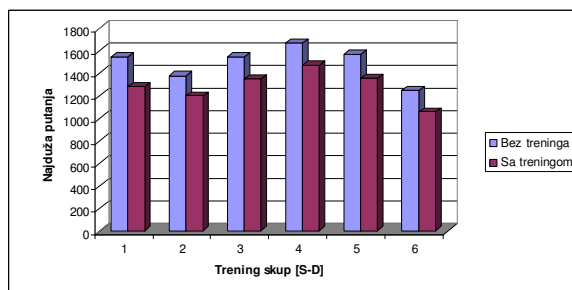
Slika 4.27. Srednja vrednost najdužih putanja dobijena u slučaju kada se ne koristi tj. koristi statistički trening, za sve vrednosti koeficijenta M .

Ovim se potvrđuje i inicijalna ideja da se primenom statističkog treninga postigne bolje konačno rešenje. Međutim, kao loša karakteristika ove primene pojavljuje se povećani broj iteracija potrebnih za dobijanje konačnog rešenja, slika 4.28. Naime, primenom statističkog treninga, broj iteracija se povećava po osnovu dodatka koda koji vrši trening, ali i indirektno jer se kod njega ne može primeniti mehanizam adaptivnog smanjenja broja iteracija predloženog u poglavlju 4.5, a samim tim i ukupno vreme rada.



Slika 4.28. Vreme rada neuralne mreže za slučaj kada se koristi tj. ne koristi statistički trening.

Iz tog razloga ukupan broj iteracija potreban u slučaju statističkog treninga je uvek veći (i konstantan) u odnosu na slučaj kada neuralna mreža radi bez treninga. Kao potvrda da primena trening skupa uvek daje bolje rešenje je i grafik na slici 4.29.



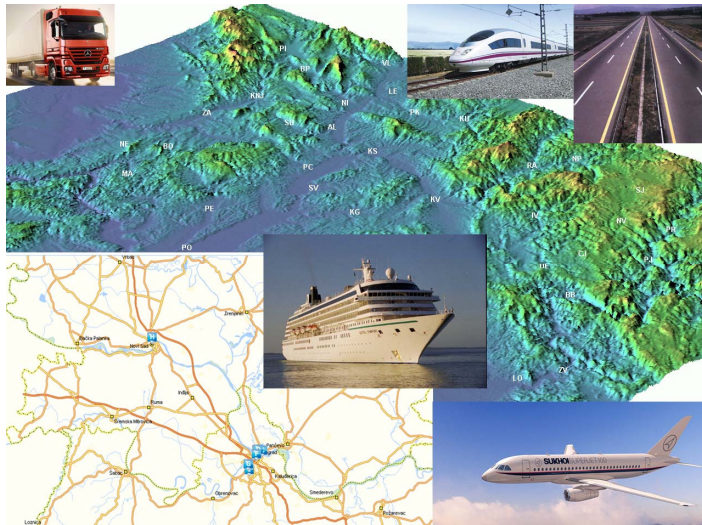
Slika 4.29. Najduža putanja dobijena u slučaju kada se ne koristi tj. koristi statistički trening, sa koeficijentom $M=1$.

Na njemu je prikazano poređenje najduže putanje kada je $M=1$, za slučaj sa i bez treninga. U ovakvoj situaciji, neuralna mreža mora da da pogrešno rešenje jer je broj iteracija $i=N$, što je nedovoljno za konvergenciju energijske funkcije. Iz tog razloga su i

dužine ekstremno veće, ali se u svakoj od situacija primenom statističkog treninga dobijaju bolja rešenja.

Analizirajući mogućnosti primene statističkog treninga dolazi se do zaključka da je njegova efikasnost u najvećem broju slučajeva opravdana, ali neminovno zahteva duže vreme procesiranja. Obzirom da se bez primene statističkog treninga može dobiti rezultat koji nije zadovoljavajući, ili vrlo blizak njemu, primena ima treninga ima smisla u situacijama kada brzina nije primarni faktor, nego potreba za preciznošću dobijenog rešenja.

Predloženi algoritam za trening može uspešno da se iskoristi u interakciji sa predloženim modelom Hopfield-ove neuralne mreže, što daje mogućnost njene kvalitetnije implementacije. Svakako treba napomenuti da poboljšanje koje doprinosi statistička obuka ukazuje da postoji dodatni prostor da se unapređuje i sam model Hopfield-ove neuralne mreže i njegova preciznost u dobijanju konačnog rešenja.



5. Primena Hopfield-ove neuralne mreže u planiranju saobraćajnih (putnih) trasa

Transport predstavlja jednu od najvažnijih i najčešćih ljudskih aktivnosti savremenog vremena [HAGG84, RIMM85]. Transport u osnovi predstavlja fizičku vezu između oblasti i ljudi i kao takav predstavlja multidisciplinarnu vezu kojom su povezani različiti uticaji [BANI02, MILL01]. Kao najbitniji uticaji mogu se istaći [RODR06]:

1. *Istorijski uticaji* (Uticaji transporta u prošlosti imali su ključne uloge u razvoju pojedinih civilizacija, njihovom prosperitetu, odbrani i opstanku. Kao takvi, neki od ovih transportnih puteva i običaja i danas se koriste u svakodnevnom prometu.)

2. *Socijalni* (Transport direktno utiče na edukaciju, zdravlje i kulturni identitet grupe ljudi koji su nastanjeni u nekoj geografskoj lokaciji. Transport i kretanja ljudi omogućavaju da se socijalni aspekti nacije upoznaju, mešaju i vremenom unapređuju, ali i da se život ljudi u lokalnoj zajednici obogati drugim sadržajima koji su njima nepoznati.)

3. *Politički* (Vlada ima ključnu ulogu u razvoju strategija kojima se definišu novi putni pravci i na taj način direktno utiče na podsticaj pojedinih oblasti na razvoj. Sa druge strane ovaj jak uticaj ima i vrlo negativne posledice, pa je na osnovu političkih odluka vrlo često novo i skupo rešenje potpuno nekorisno ili bar manje pogodno od nekog drugog. U ovim situacijama interesne grupe građana mogu na indirektan način uticajem na političke strukture kreirati razvojnu politiku svog okruženja, pa se socijalni i politički aspekti vrlo često prepliću [RODR00].)

4. *Okruženje* (Okruženje predstavlja jedan od vrlo bitnih faktora naročito poslednjih decenija kada skoro sve zemlje sveta propisuju vrlo stroga pravila vezana za narušavanje životne sredine [BANI02]. Ovo se indirektno odnosi na kvalitet života građana, zdravstveni aspekt, uticaj na pijaće vode, erozije tla, ugrožavanje zelenih površina, posebnih biljnih i životinjskih vrsta itd. Vrlo često ovi uticaju u mnogome utiču na cenu ili odluku kuda i kako predvideti kretanja vozila i ljudi.)

5. *Ekonomski* (Razvoj neke oblasti direktno je povezan sa razvojem putne mreže u svojoj neposrednoj okolini. Naročito su izražene potrebe za različitim vrstama transporta kojima se proizvodi industrije mogu dopremiti/odpremiti. (železnička mreža, autoputevi, aerodromi i slično). Veza sa ekonomskim uticajima je vrlo rekurzivna, jer ovi elementi utiču na transport, a sam transport kreira uslove za razvoj i postizanje dobrih ekonomskih rezultata [RODR00, BOGA04].)

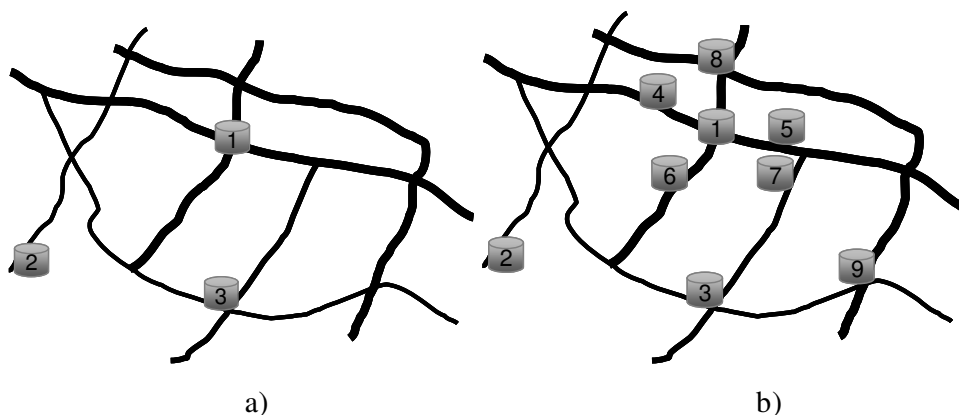
Pored ovih mogu se posmatrati i dodatni uslovi koji su naročito izraženi u proračunima koji su aktuelni u poslednjoj deceniji [RODR06]:

a) *Gradijent promene u povećanju zahteva zajednice* (Ne mora postojati direktna veza, ali najčešće postoji, između velikog broja ljudi u nekom geografskom okruženju i potreba za transportom. Postoje oblasti gde je izražena potreba stanovništva za svakodnevnim transportom u cilju obavljanja radnih aktivnosti van grada, pa je i fluktacija među gradskim putevima visoko izražena. Pored toga, privatna upotreba automobila se razlikuje za različite strukture ljudi: od potrebe do statusnog simbola. Zajednice sa ekonomijama koje su orijentisane industrijski imaju veće zahteve od onih koje su orijentisane tržišno i slično.)

b) *Smanjenje cene* (Potreba za što jeftinijim rešenjima može iz korena da naruši zaključak koji je dobijen na bazi svih dosada izloženih principa. Cena po jedinici dužine ili cena po efektivnom učinku nakon njegove izgradnje može da promeni plan da autoput prođe kroz tačke *A* i *B*, ako se zaključi da se ove tačke mogu povezati železnicom ili rečnim putem jeftinije. Često se efekti posmatraju kratkoročno i problem se rešava lokalno, jer je količina novca nedovoljna za projekte i planove od opšteg interesa. Iz tog razloga mogućnost ušteda na bilo kojoj deonici puta treba ozbiljnu uključiti u analizu i to ne samo zbog niže ukupne cene, nego zbog mogućnosti narušavanja kompletnog projekta u njegovoj realizaciji.)

c) *Proširenje postojeće infrastrukture* (Prethodne dve stavke problem posmatraju kvalitativno i kvantitativno. U realnom životu se rešenja retko kreiraju počevši od nulte pozicije, nego uvek predstavljaju skup kojim se postojeća infrastruktura proširuje ili rekonstruiše. Iz tog razloga potreba za racionalnim korišćenjem zemljišta u okruženju postojeće infrastrukture je mnogo bitnija i realno složenija, jer se najčešće radi o urbanim zonama, koje imaju malo prostora a velike potrebe za proširenjem.)

d) *Dostupnost* (Transport u realnom okruženju vrlo često nameće neophodne restrikcije. Iz tog razloga postoji potreba za ulicama bez saobraćaja, jednosmernih, dvosmernih sa zabranama pojedinim tipovima vozila (kamionima..) i slično. Iz tog razloga sama struktura putne mreže ne ukazuje inicijalno na dostupnost pojedinim objektima ili tipovima vozila svakoj tački. Pored toga, eventualna proširenja uvek imaju za cilj da favorizuju pojedine zone koje se nalaze u centralnom delu ili koje su ispresecane sa drugim transportnim pravcima, slika 5.2. Dostupnost zato predstavlja vrlo kompleksan pojam i nema egzaktne formule za njegovo računanje ili kvantifikaciju [VICT05].)



Slika 5.1. Dostupnost lokaciji kod: a) Razruđene mreže i b) Urbane zone, gde pristup centralnom delu povećava vreme pristupa, zbog dodatnih uslova kretanja.

e) *Vreme* (U uslovima gradskih gužvi i neadekvatne organizacije saobraćaja najkraća putanja nije uvek i ona za koju je potrebno najmanje vremena da bi se prešla, slika 1. Iz tog razloga projektovanje novih ili nadogradnja postojećih transportnih ruta mora uzeti u obzir i efekat kojim se pored smanjenja gužvi posmatra i vreme koje korisnicima potencijalno treba smanjiti za istu trasu, čime se opravdava izdatak za novu trasu.)

Parametri koji su nabrojani imaju najviše efekta u fazama koje podrazumevaju planiranje i analizu. Ako se projektovanje izdvoji kao posebna faza, i ako se pretpostavi da ovoj fazi prethode analize koje uključuju sve prethodno navedene uticaje, tada se u ovoj fazi pojavljuju potpuno novi i možda najozbiljniji problemi koje treba uspešno rešiti [KRUG07]. Naime, rezultati analiza mogu da ponude savršena rešenja ali se ona možda ne mogu realizovati u realnom životu. Sa te tačke posmatrano, bilo bi možda poželjno da se svi parametri uključe u analizu, ali se takvom načinu rešavanja najčešće ne pristupa u realnosti. Problem se posmatra u slojevitoj organizaciji, što podrazumeva da implementacija rešenja dolazi na kraju svih ostalih. Imajući u vidu da su svi do sada nabrojani uticaju društveno sociološki nameće se jasan problem kome se još nije posvetila pažnja a to je zemljište, u najširem smislu te reči.

Fizičke karakteristike geografskog prostora nameću velika ograničenja u transportu [BRIG72, HUGI92]. Tri osnovne karakteristike kopnenog prostora mogu se tako sagledati kroz [RODR06]:

1. *Topologija* (Geografski objekti kao što su planine i doline direktno utiču na obim, kvalitet, strukturu i cenu transporta. Najčešće se putni pravci izgrađuju u dolinama ili planinskim usecima što nameće kako fizička predisponiranost terena, tako i cena i resursi potrebni za izgradnju infrastrukture. Ne treba zanemariti ni saobraćaj koji je namenjen ovim trasama, jer bez obzira na teškoće i cenu izgradnje, kvalitet transporta nije isti na putevima sa velikim nagibima i krivinama u odnosu na ravne i prave trase. Iz tog razloga topologija terena ima vrlo visok korektivni faktor na konačni izbor putne trase.)

2. *Hidrografiju* (Reke su imale vrlo veliku istorijsku ulogu u određivanju staništa i putnih pravaca. Putevi uz reke najčešće obezbeđuju lako obradivo i ravno zemljište. Najčešće su ovakvi putevi najbliži način da se stigne između dva grada, koji su opet bili vezani za reke. Pored ovih istorijskih, postoje i savremeni razlozi za razmatranje uticaja hidrografije na transport uopšte. Naime, velika količina transportnog sadržaja se prevozi vodenim putem: reke, mora ili jezera. Kako su ovo najjeftinije saobraćajnice izgradnja luka i pristaništa mora biti u direktnoj vezi sa kopnenim saobraćajnicama. Iz tog razloga mora postojati ukrštanje saobraćajnica i mogućnost da se različite trase realizuju različitim vidovima saobraćaja. Hidrografija nameće i ograničenja u smislu prepreka za kopneni saobraćaj pa samim tim direktno utiče na povećanje cena u slučaju da se moraju graditi mostovi, vijadukti i slično.)

3. *Klimu* (Klimatski elementi kao što su vetar, padavine, vlažnost vazduha i temperatura najviše utiču na realizaciju transporta. Opseg njihovog delovanja može se prostirati od zanemarljivog do vrlo velikog uticaja. Realizacija transporta (ukrcavanje/iskrcavanje robe ili kretanja putnika) može biti ozbiljno ugrožena sa snežnim padavinama, jakim kišama, ledom i maglom. Ovi efekti su u direktnoj relaciji sa mikroklimom ili lokalnom klimom posmatrane regije. Brzina vetrova, na primer, može biti presudna za cenu i sigurnost vazdušnog saobraćaja. Iz tih razloga uticaji klime su vrlo značajni i bitni pri svakom projektovanju i proceni transporta, naročito ako se posmatraju duže relacije kada dolazi do značajnijih promena klimatskih elemenata).

Fizička ograničenja u osnovi deluju kao apsolutne i relativne prepreke za kretanje. Apsolutne prepreke podrazumevaju geografske karakteristike koje se moraju rešiti fizičkim delovanjem (izgradnjom mosta ili tunela) [BANI02]. Relativne prepreke

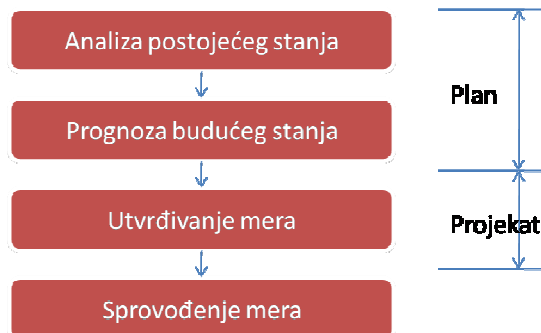
su one koje se ne mogu otkloniti a utiču na brzinu, kvalitet i cenu transporta (usporavanje ili obilazak zbog suženja, leda, kanala i slično).

Pored ovih, postoji još veliki broj uticaja čiji efekat se može posmatrati na transportu. Različiti autori definišu manje ili više slične podele, ali se kroz prethodno nabrojane može sublimirati svaki bitniji parametar koji utiče na analizu i efekte prevazilaženja realnih transportnih problema [BELL97, RODR06].

Svaki od uticaja se mora kvantifikovati i posmatrati kroz svoju težinsku vrednost u procesu donošenja odluka vezanih za realizaciju ili predikciju transportnih problema. Kako su svi ovi uticaji po svojoj prirodi, obimu i vrsti delovanja potpuno različiti, jasno je da je mehanizam kojim bi svi oni bili istovremeno posmatrani vrlo komplikovan. Dodatna otežavajuća okolnost je što se rešavanjem uticaja (u pozitivnom smislu) direktno negativno utiče na druge, pa i rešenje ne može da bude optimalno. U ovom slučaju mora se tražiti rešenje, koje će biti rezultat analize jedne složene višekriterijumske optimizacije.

5.1. Proces planiranja saobraćaja i prostora

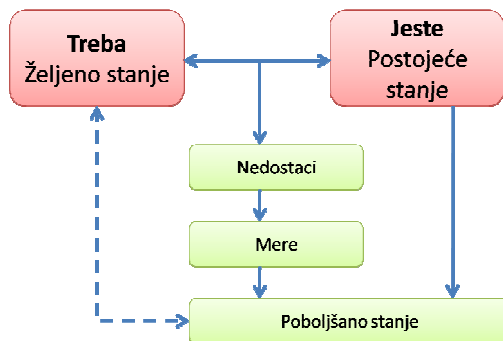
Proces planiranja saobraćaja podrazumeva različite nivoe planiranja počev od stratezijskog do planiranja gradnje, eksploatacije i održavanje objekata [MALE04]. Planiranje saobraćaja i prostora predstavlja skup većeg broja koraka i tehnika koje ponekada mogu biti vrlo kompleksni. Međutim, postoji ceo skup zadataka koji se mogu realizovati kroz planiranje neposrednih aktivnosti sa ciljem da ublaže ili reše problem u funkcionisanju elemenata sistema.



Slika 5.2. Osnovni koncept planiranja: Posledično prilagođavanje ponude budućoj tražnji [MALE04].

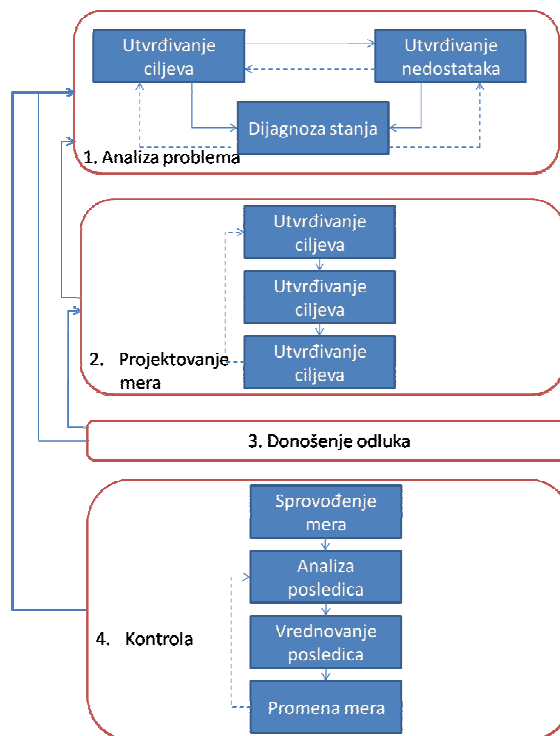
Osnovni procesi planiranja podrazumevaju metodološki pristup i rad sa linijskom sekvencijalnom strukturom koja se sastoji od četiri koraka prikazanih na slici 5.2.

Sredinom 60-tih godina prošlog veka postavljene su metodološke osnove koje imaju drugačiji pristup problemu [MALE04], i gde se linijska struktura delimično modifikuje. Ovo je prikazano na slici 5.3.



Slika 5.3. Osnovni koncept planiranja: Željeno i postojeće stanje kao glavni pokretači procesa [MALE04].

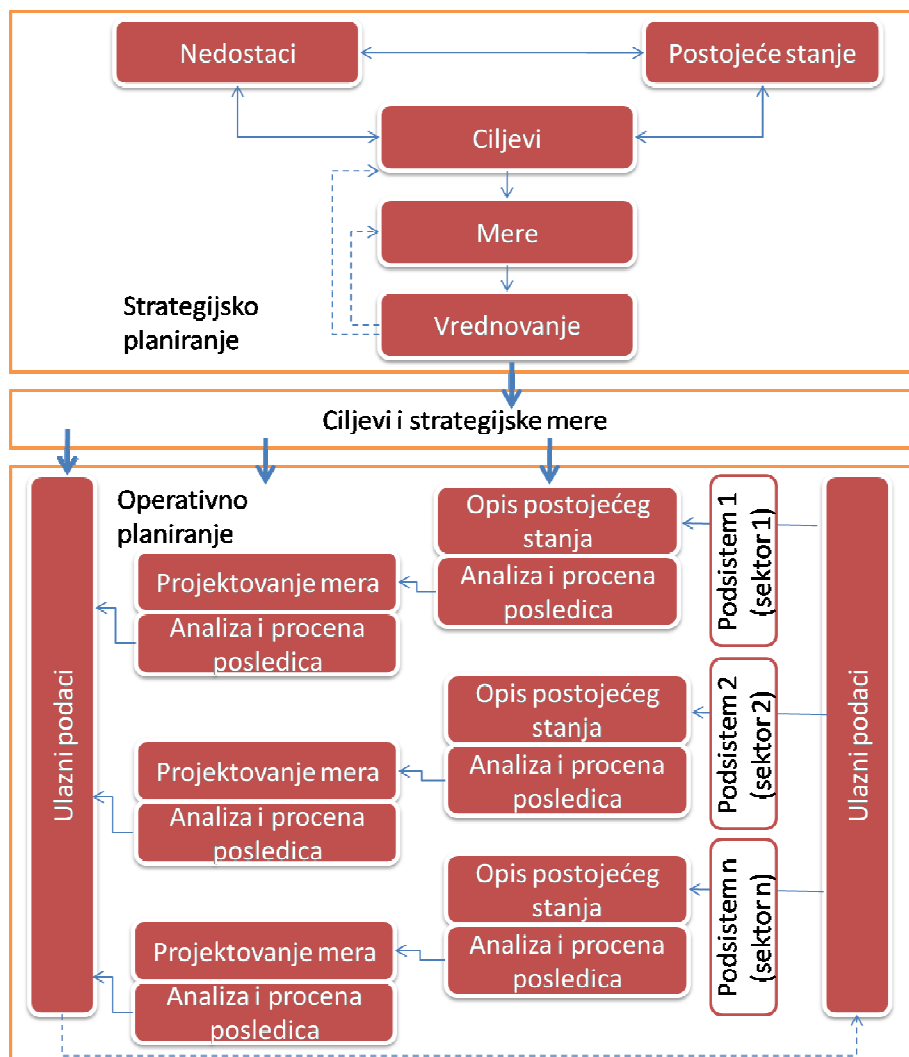
U ovom pristupu glavno mesto zauzimaju pokretači procesa a to su željeno stanje i postojeće stanje. Prelazak iz jednog u drugo stanje definisano je kroz skup podkoraka i analiza: Nedostaci, Mere i Pobljšanje.



Slika 5.4. Osnovni koncepti u procesu planiranja [MALE04].

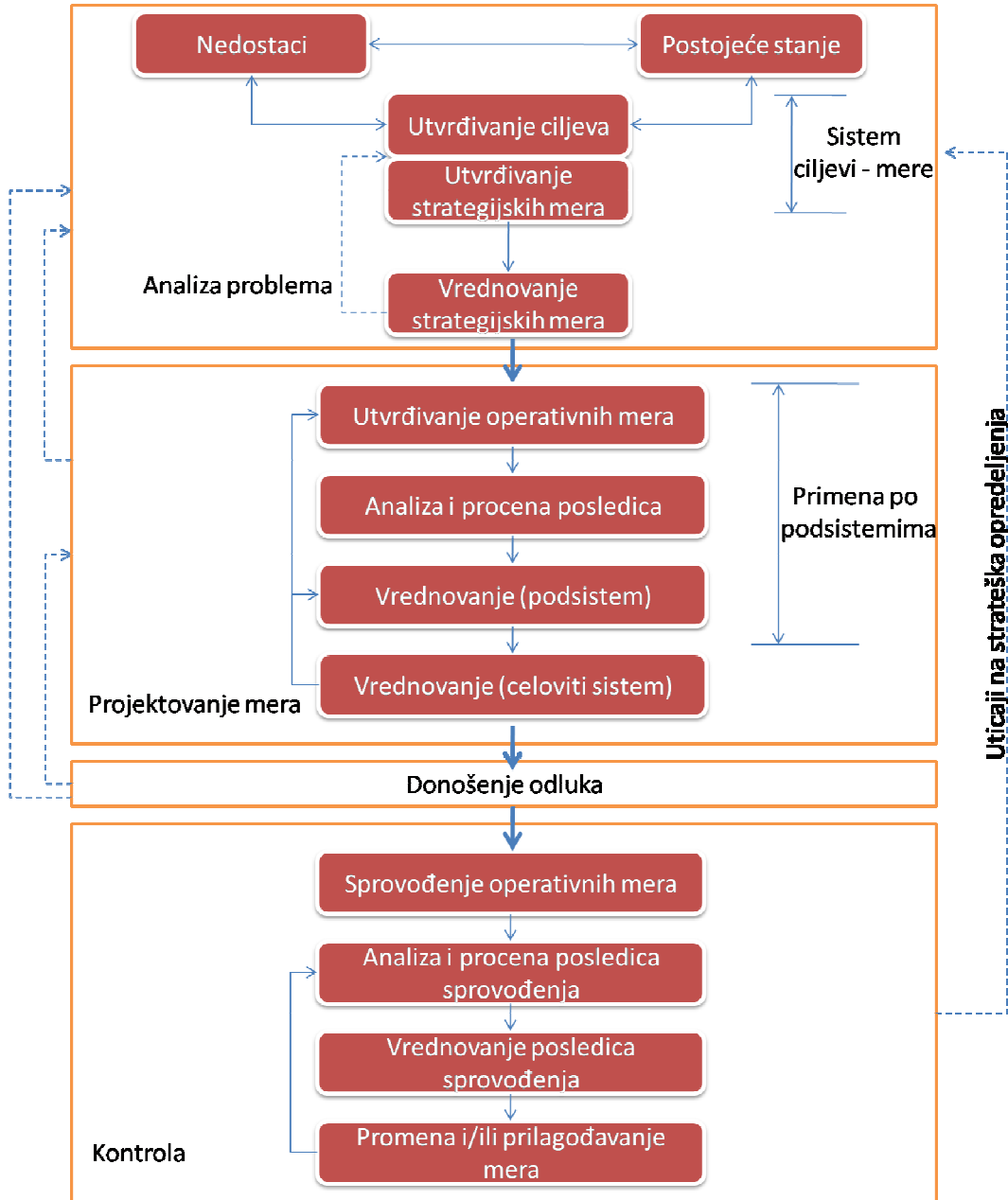
Ovaj model je dalje razrađen u podprocese planiranja gde su uočena četiri osnovna koraka: Analiza problema, Projektovanje mera, Donošenje odluke i Kontrola [MALE04]. Ovakav koncept procesa planiranja je prikazan na slici 5.4. Četiri detektovana koraka imaju za cilj da precizno identifikuju i klasifikuju podfaze koje su u funkciji konačnog cilja. Na ovaj način dolazi do većeg broja mogućih korektivnih mera i kontrolnih aktivnosti, čime koncept dobija na kvalitetu.

U zavisnosti od nivoa planiranja, planiranje na nivou pojedinačnih sektora (operativno planiranje) predstavlja saobraćajnu osnovu realnog sistema. Na rad operativnog planiranja utiče strategijsko planiranje koje podrazumeva dugoročni plan prostornog razvoja [MALE04]. Pojedinačne faze i koraci kod strategijskog i operativnog planiranja prikazani su na slici 5.5.



Slika 5.5. Strategijsko i operativno planiranje [MALE04].

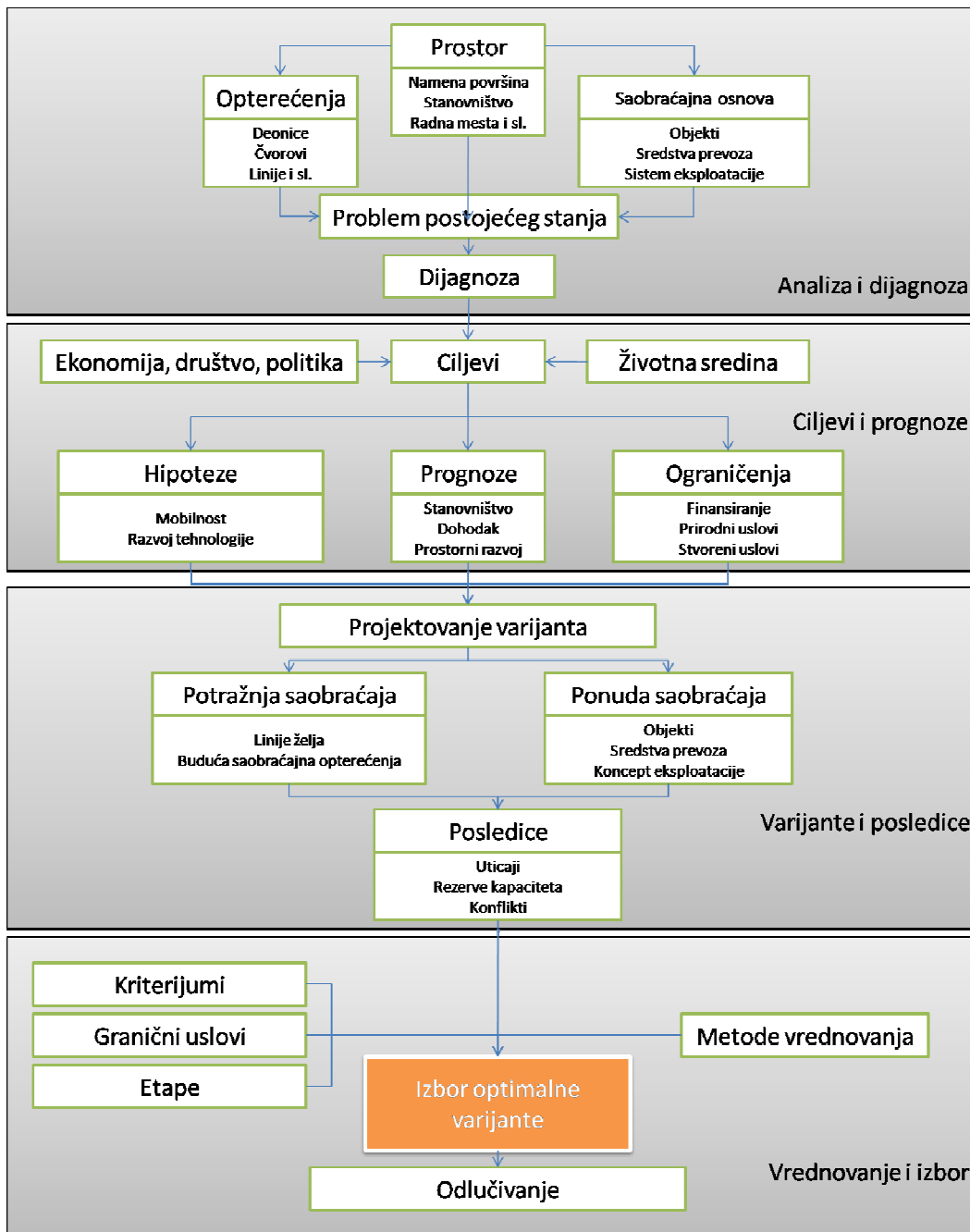
Na osnovu koncepta planiranja, slika 5.4, i stavu o stratezijskom i operativnom planiranju, slika 5.5, formira se opšti prikaz procesa planiranja saobraćaja. Ovaj prikaz dat je na slici 5.6.



Slika 5.6. Opšti prikaz procesa planiranja saobraćaja [MALE04].

Nakon faze planiranja saobraćaja dolazi druga faza koja podrazumeva definisanje ciljeva na osnovu objektivnih uticaja. Ovi uticaji mogu imati najširi mogući aspekt ekonomija, društvo i politika razvoja kao i ciljevi očuvanja i unapređenja životne

sredine [MALE04]. Ovi uticaji često mogu imati suprotna dejstva i uslove, čime se process planiranja usložnjava. Pored toga u [MALE04] je prikazano da process planiranja saobraćaja, sa svim svojim koracima i fazama unutar tih koraka, predstavlja vrlo kompleksan problem. Osnovni koraci u procesu planiranja prikazani su na slici 5.7.



Slika 5.7. Osnovni koraci u procesu planiranja saobraćaja [MALE04].

U ovoj disertaciji prikazaće se jedno softversko rešenje koje ima za cilj da pomogne u završnom koraku („Vrednovanje i izbor“), prikaznoj na slici 5.7, i to u fazi „Izbor optimalne varijante“, pod uslovom da su prethodna tri koraka ranije realizovana.

5.2. Modeli za planiranje putne mreže

Modeli kojima se vrši planiranje putne mreže najčešće se zasnivaju na minimizaciji ukupne cene [JHA04, MILL01, BELL97, HOOV48]. U zavisnosti koje i koliko pojedinačnih parametara koriste ovi mogli su manje ili više složeni i zahtevaju različite alate za njihovu realizaciju [JONG03]. Ovi modeli se najčešće odnose na planiranje i procenu efekata velikih saobraćajnica – autoputeva ili magistralnih puteva [MILL01]. Modeli *Highway alignment optimization models* [JONG98, JHA00a] su kreirani tako da optimizuju zahteve za izgradnju autoputeva samo sa aspekta ukupne cene. Međutim, savremena zakonodavstva i naknadne analize zahtevaju da se aspekt planiranja posmatra mnogo šire i sagledaju svi pozitivni i negativni uticaji kako materijalnih tako i kvalitativnih vrednosti.

U tom smislu u [JONG98, JHA04], definišu se karakteristike za “dobar model optimizacije autoputeva” kao:

- a) razmatranje svih vrsta cena podjednako (i faktora koji utiču sa velikim i malim iznosima),
- b) formulacija svih bitnih zahteva,
- c) omogućiti ostvarenje realnih zahteva,
- d) biti u mogućnosti da se realizuju trase sa velikim zakrivljenjima,
- e) istovremeno vršiti optimizaciju i zahteva i troškova,
- f) pronaći rešenje blisko optimalnom na globalnom nivou,
- g) kreirati efikasan algoritam za predloženi model,
- h) omogućiti stalnu implementaciju i proveru algoritma,
- i) razmotriti ukrštanja, mostove i tunele sa aspekta cene,
- j) automatski izbegavati nedostupne regione i
- k) biti kompatibilan sa GIS-om.

Postoji relativno puno modela koji vrše klasičnu optimizaciju za potrebe planiranja putne trase (Howard et al., 1968; Thomson and Sykes, 1988; Shaw and Howard, 1981, 1982; OECD, 1973; Turner and Miles, 1971; Turner, 1978; Athanassoulis and Calogero, 1973; Parker, 1977; Trietsch and Handler, 1985; Trietsch, 1987a,b; Hogan, 1973; Nicholson et al., 1976) [JHA04]. Svi oni su bazirani na proračunima baziranim na promenama, dinamičkom programiranju, numeričkim metodama, linearnom programiranju [MILL01]. Mana skoro svih njih je nemogućnost da se uključivanja pojedinih parametara ili promenljivih koje se ne mogu eksplicitno opisati kao linearne funkcije ili vrednosti dobijene nekom statističkom metodom.

Veliki deo ovih problema rešili su genetski algoritmi [JONG98, JHA00c, JHA03] koji su se pokazali kao vrlo efikasni u planiranju i realizaciji modela za optimizaciju većeg broja parametara kod autoputeva [KIM05, JHA07]. Njihova dodatna prednost je mogućnost istovremene optimizacije većeg broja zahteva (*horizontal and vertical alignments*) kao i uključivanje podataka iz GIS-a [JHA00b, JHA01, BUTL01].

Sve kompleksniji uslovi u realnom okruženju, kao i ekonomski [BOGA04] i politički efekti, traže nove modele koji će pored cena fizičkih troškova materijala i rada uključiti i mnogo dodatnih aspekata [JONG03, JONG00]. Mana velikog broja predloženih algoritama je što krajnju odluku donose na bazi jedinstvene cene. Ova cena formira se na bazi više kriterijuma, tako što svaki od njih ima svoj težinski faktor, i na kraju u sumi daje jedinstvenu vrednost koja se dodeljuje deonici puta ili regionu. Na taj način nema višekriterijumskog odlučivanja i balansiranja među parametrima u smislu njihovog optimalnog izbora. Dodatni problem je što uvođenje različitih vrsta uticaja, iako iskazano u novcu, ne može uvek biti linearno posmatrano sa ostalim troškovima jer dolaze iz potpuno različitih sfera i kao konačni cilj imaju različite interese. Pored svih direktnih, moraju se uključiti i viši ciljevi koji se odnose na ugroženost ljudi i životne sredine [HOYL98]. Iako putna mreža ima za cilj da služi nama samima, često se negativni efekti njene izgradnje i upotrebe vraćaju kao bumerang. Imajući u vidu različitost i broj pojedinih zahteva, nameće se potreba za modelom koji bi vršio višekriterijumsku optimizaciju i pokušao da izbalansira različite uslove i njihovo poreklo tj. cilj [KOJI06c].

5.3. Kvantifikacija ulaznih podataka

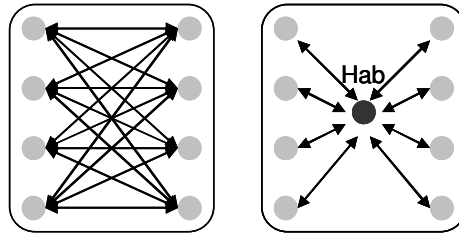
Postoje dva metoda kojima se ovaj problem može sagledati i kvantitativno opisati [RODR06]:

1. Povezanost: Najegzaktnija mera kvaliteta transporta je povezanost tj. broj kombinacija kojima se iz jedne tačke može stići u drugu. Povezanost je u direktnoj vezi sa fizičkim ali i potencijalnim vezama između dve tačke u regionu. Matrica povezanosti treba da prikaže potencijalne veze svakog od čvorova u jednoj mreži. Ukoliko veza postoji vrednost ove matrice treba da bude 1, dok u suprotnom 0. Broj vrsta tj. kolona u matrici odgovara broju čvorova (koji mogu biti raskrsnice, gradovi ili tranzitne tačke) u mreži.

GIS: Geografski informacioni sistem (GIS) je informacioni sistem specijalizovan za unos, skladištenje, analizu i generisanje izveštaja vezanih za (prostorno orijentisane) geografske podatke [RODR06, JHA04, LO02]. GIS, pored povezanosti, predstavlja drugi metod za kvantitativno sagledavanje problema i analize transporta [BUTL01, LO02]. Poseban deo aplikacije koji je posvećen transportu i rešavanju transportnih problema unutar ovog sistema nosi oznaku GIS-T [MILL01, JHA00b, SHAW02]. Postoje četiri osnovne komponente GIS-T, koje doprinose njegovoj efikasnosti: kodovanje, upravljanje, analiza i izveštaji [RODR06, LO02] kojima se omogućuje ostvarivanje kranjih ciljeva korisnika. Detaljan opis ovih funkcionalnosti dat je u [RODR06, MILL01].

5.4. Struktura putne mreže

Putna mreža se najčešće predstavlja analogijom sa računarskom mrežom tj. njenom strukturom uz dodatak gustine saobraćaja [RODR06, JHA04]. Termin mreža se odnosi na okruženje koje se može predstaviti direktnom vezom sa računarskom mrežom koja se sastoji od čvorova i linkova kojima su povezani. Različite vrste saobraćaja mogu se ekvivalentirati sa različitim tipovima prenosa podataka u računarkoj mreži. U tom smislu kao najniži nivo logičke i hardverske veze može se posmatrati HUB. U putnoj mreži "HUB" omogućava veću fleksibilnost sistema koncentracijom saobraćaja [RODR06]. Na slici 5.8 je prikazano kako se 16 nezavisnih veza može zameniti sa 8 upotrebom HUB-a.

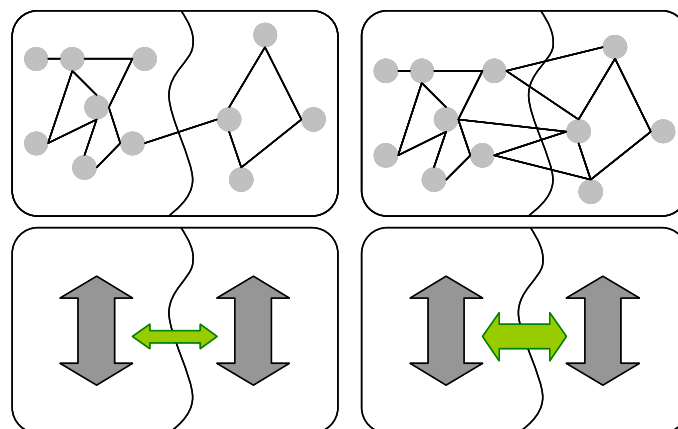


Slika 5.8. Pont to point struktura, veza preko Hab-a.

Osnovne prednosti upotrebe HUB su [RODR06]:

- Ekonomičnost sa aspekta proširivosti broja konekcija čime se nudi veći obim servisa,
- Ekonomičnost sa aspekta potencijalnog razvoja i distribucije sistema,
- Ekonomičnost sa aspekta deljenja resursa čime se postiže niža cena.

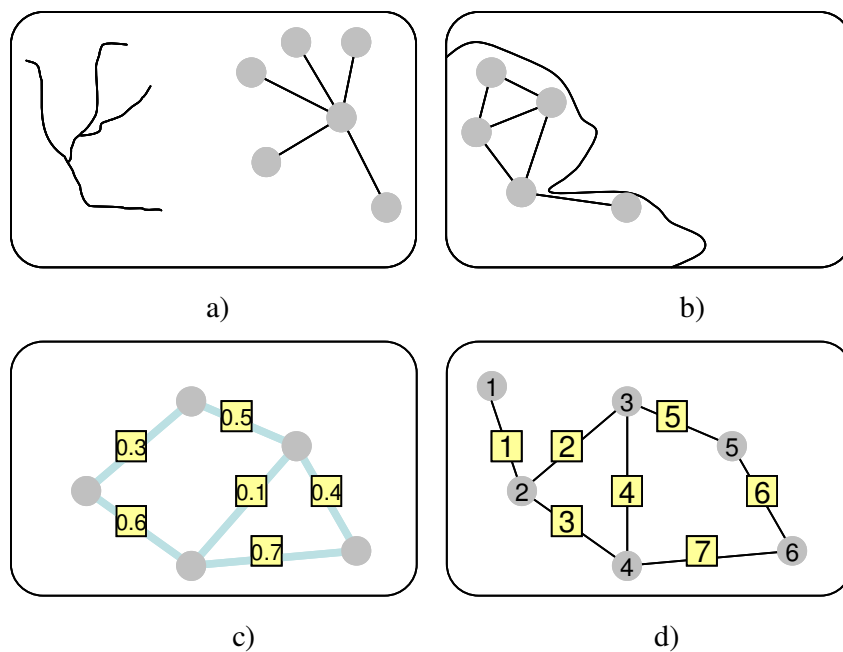
Kao i u računarskim mrežama tako i u putnoj infrastrukturi, veza koja je usmerena na jednu putanju je loša. Na ovaj način se mogu dobiti kašnjenja ali i potpuni prekid usled otkaza takvih linkova. Efikasnost mreže može se meriti primenom teorije grafova i mrežnom analizom [BLAC03, RODR06]. Analizom se jasno ukazuje na linkove koji imaju male/velike dostupnosti i koji predstavljaju usko grlo transporta [VICT05]. Na osnovu toga jasno se pokazuje koje tačke treba dodatno spojiti da bi se povećala efikasnost cele mreže.



Slika 5.9. Uticaj integracije na dostupnost u mreži i protok u njoj, a) početno stanje, b) krajnje stanje dobijeno dodavanjem dva linka.

Na slici 5.9.a prikazana je početna struktura putne mreže u formi grafa [RODR06]. Vertikalnom linijom presečen je link koji predstavlja usko grlo saobraćaja. Identifikacijom ovog linka, i povećanjem broja linkova koji ovu kritičnu vezu pojačavaju, dobija se mreža na slici 5.9.b kod koje je dostupnost cele mreže umnogome povećana dodavanjem samo dva linka.

Primer na slici 5.9 je samo jedan od mnogih gde se pokazuje da je reprezentacija putne mreže u formu grafa dosta preglednija i bolja. Imajući u vidu veliki broj klasifikacija, i posmatrajući samo češće korišćene topologije, može se izvršiti podela putnih mreža i prema njihovim grafičkim predstavama. U tom smislu, klasifikacija topologija može biti izvršena na mnogo načina, a neke od njih su predstavljene na slikama 5.10.a do 5.10.d [RODR06].



Slika 5.10. Neke od topologija putnih mreža a) Stvarni model u levom i apstraktni u desnom uglu leve slike, b) Topologija relativne lokacije, c) Opterećenje i kapacitet, d) Označavanja čvorova i linkova.

Imajući u vidu podele koje su prikazane na slici 5.10, projektovanje mreža koje su bazirane na velikom broju dosada izloženih kriterijuma, počinje prezentacijom mreže u jednoj ili više formi izloženih grafova. Model mreže koji će se kreirati u ovoj disertaciji uzeće u obzir topologije i njihove grafičke reprezentacije na slikama 5.10a, 5.10c, 5.10d. Pored ovih postoji veliki broj drugih modela topologija [RODR06,

MILL01], ali ostale topologije se mogu uključiti u kreiranje modela, ali su one bitnije u fazi analize saobraćaja, dok se o ovom delu posmatra samo planiranje putne trase.

5.5. Pravljenje modela za planiranje putne trase

Prvi korak u rešavanju optimizacionog problema je pravljenje modela [MILL01]. Model treba da prikaže način reprezentacije fizičkog problema nekoj matematičkoj formi koja će biti pogodna za realizaciju algoritma [JHA04].

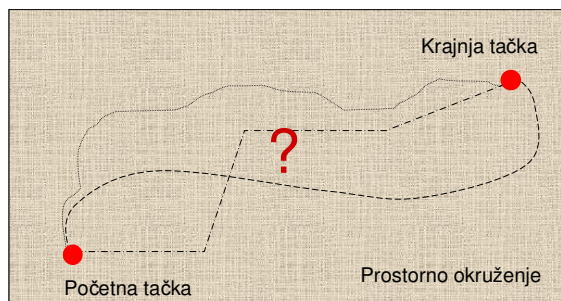
U stranoj literaturi se najčešće koristi termin *Highway design optimization* (HDO) za selekcije rute između dve tačke u prostoru uz uslov minimizacije ukupne cene i skup dodatnih uslova [JHA04]. Ovi uslovi mogu biti definisani u postupku planiranja, izgradnje ili korišćenja putne trase [TOLL95]. Najčešće su to: minimalna upotreba velikih prevoja i krivina, korišćenje postojećih tranzitnih čvorišta, smanjenje uticaja na okolinu i slično [JONG98]. Da bi se napravio dizajn neohodno je napraviti HDO model (HDOM) [JHA04]. Dobar model mora da zadovoljava osnovne karakteristike i specifične koje nameće teren ili investitor. Osnovne karakteristike su opisane u poglavlju 5.4, dok se specifične najčešće odnose na [JHA04, RIMM85]:

- Uticaj topografije terena,
- Definisane vlasničkih prava i mogućnosti gradnje na pojedinačnim deonicama,
- Ekološke uticaje.

Pored ovih uslova postoje mnogi drugi koji se odnose na procene cena izgradnje po jedinici dužine u zavisnosti od konfiguracije terena, troškova skladištenja materijala i odvoženja otpada, uticaja reka i vodenih površina na oštećenja i drenaže i slično. Uloga GIS-a u takvim slučajevima je vrlo bitna jer daje veliki broj informacija koje mogu uticati na odluku o izboru trase [MILL01, BUTL01]. Kako je proces planiranja prva faza u izradi, od nje se mora početi sa uključivanjem svih relevantnih uslova koji će se postaviti u projektu do samog kraja. Kako faza priprema obuhvata mnogo detaljnije analize, moguće je u fazi planiranja neke faktore koji su ekonomski manje značajni preskočiti, pa u narednim fazama uključiti. Iz tog razloga, i model koji će se predložiti u ovoj disertaciji će se baviti samo ključnim parametrima da bi demonstrirao mogućnost modela i algoritma.

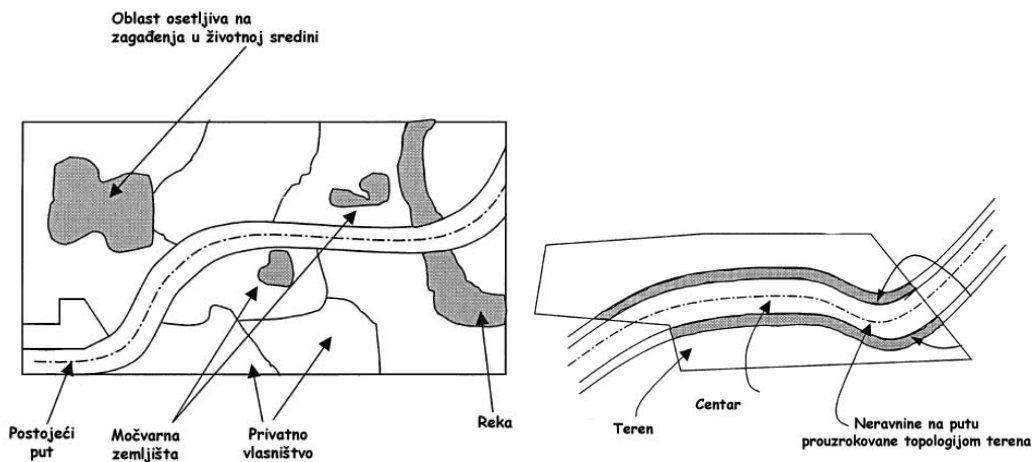
Imajući u vidu sve karakteristike koje model mora da zadovolji, njegova primarna osobina mora da bude mogućnost višekriterijumske optimizacije [SHAR06, JHA03].

Prvi korak je definisanje početne i krajnje tačke koje treba razmatrati u planiranju putne trase [JHA04]. Polazeći od tih podataka potrebno je definisati i zonu oko i između ovih tačaka koja će biti potencijalna zona izgradnje. Slika 5.11 pokazuje izbor dve tačke u prostoru i putanju koja ih spaja.



Slika 5.11. Izbor putne trase za dve zadate lokacije.

Polazeći od prostora između ove dve tačke oblik i dužina putanje će zavisi i menjati se uvođenjem svakog novog parametra ili uslova. Krajnji cilj je pronalaženje putanje koja treba da ima minimalnu cenu i da obuhvati analizu i izbalansiranost što većeg broja definisanih uslova [RODR06, BELL97, JHA04]. Na slici 5.12.a prikazana je hipotetička oblast i izbor putne trase u odnosu na topologiju terena, reke i močvarne oblasti, ugroženost životne sredine i oblasti koje imaju posebne zahteve [JHA04].



Slika 5.12. a) Neka od geografskih karakteristika koje treba razmotriti kod planiranja putnih trasa, b) Uticaj topologije terena na dozvoljene neravnine na putnoj trasi.

Ovo su najčešće korišćeni uslovi u prvoj iteraciji planiranja. Pored njih najvažniji je uticaj topologije terena. Ovaj uticaj može da bude na mikro i makro nivou tj. može opisivati dodatne troškove za lokalno izravnavanje terena ili troškove izgradnje na različitim tipovima i strukturama zemljišta. Ovaj uslov direktno je vezan i sa visinom terena i morfologijom terena. Na slici 5.12.b. slikovito je prikazan uticaj terena na oblik putne trase.

Nakon definisanja početne i krajnje tačke, definisanja svih vrsta geomorfoloških, socijalnih, političkih i ekonomskih faktora koji će se analizirati, potrebno je primeniti jedan od oblika transformacije realnih uslova na terenu u matematički graf, i izvršiti kvantifikaciju ulaznih parametara. Na taj način, dobijeni model će biti povezani graf, gde čvorovi grafa imaju reprezentaciju fizičkih lokacija, dok linkovi predstavljaju fizičke veze posmatranih lokacija, opisane sa proizvoljnim brojem parametara. Ovi parametri predstavljaju kvantifikovane vrednosti svih posmatranih faktora.

5.5.1. Realizacija predloženog modela za planiranje putne trase

Opšti uslovi

U skladu sa ključnim uticajima na transport a samim tim i na putnu mrežu, predloženi model treba da uključi u razmatranje sledeće parametre:

- Topologiju terena,
- Politički i
- Ekonomski uticaj.

Kako se topologija terena može posmatrati kroz veliki broj uticaja i zahteva, ovaj model će uključiti dva aspekta topologije: reljef (u odnosu na fizičke karakteristike terena i nadmorsku visinu) i hidrografiju [HUGI92]. Imajući u vidu sve značajnija zakonska akta ili nevladine agencije koje se bave uticajima na životnu sredinu, uključice se i taj parametar. Životna sredina treba da definiše tipove tla i mogućnost narušavanja biljnog i životinjskog sveta na njima, kao i uticaj na čoveka. Na taj način se dobija pet različitih parametra koje treba uključiti u višekriterijumsku analizu:

1. Morfološke karakteristike (reljef),
2. Reke,
3. Životna sredina,

4. Ekonomska situacija,
5. Politički uticaj.

Uslovi i cilj modela

Glavni aspekt modela treba da bude minimizacija cene i povećanje dostupnosti kroz proširenje postojeće infrastrukture, što odgovara uslovima definisanim u uvodu poglavlja 5. Model treba da obezbedi sve zahteve definisane u 5.2, s tim što će se za potrebe demonstracije koristiti podaci koji nisu direktno preuzeti iz GIS-a, ali model omogućava kompatibilnost sa istim.

Imajući u vidu modele prikazane u poglavlju 5.6, ovaj model će predstavljati sublimaciju sva tri metoda koja su prikazana. Cilj je od svakog modela iskoristiti najbolje karakteristike i objediniti ih u jednom, novom, modelu. To podrazumeva da se realni uslovi moraju definisati strukturom grafa (težinskog) kao što to predviđa prvi metod. Dodatno poboljšanje može se ostvariti uvođenjem posebnih vrsta veza i težinskih koeficijenata što odgovara strukturi sa slika 5.10.a i 5.10.c o povezivanju realnih fizičkih vrednosti sa strukturom grafa. Polazeći od postavki u poglavlju 5.5. i matičnih reprezentacija ulaznih parametara svi parametri treba da se distribuiraju na svaki od linkova grafa, i svojim vrednostima definišu težinsku meru po kojoj će se vršiti optimizacija. Topologija terena i kartografija, kao i rutiranje će biti realizovano u skladu sa strukturom sa slike 5.10.d. u poglavlju 5.4.

Cilj konačne putanje treba da bude balansiranje svih pomenutih parametara, sa minimizacijom ukupne cene, međusobnim balansiranjem pojedinačnih zahteva i preporukama definisanim u poglavlju 5.2.

5.6. Primena Hopfield-ove neuralne mreže na rešavanje problema planiranja putne mreže bazirane na višekriterijumskoj optimizaciji

Uzimajući u obzir sve do sada navedene uslove koji utiču na racionalno korišćenje putne mreže, ukazuje se potreba da se problem planiranja putnih trasa posmatra kao višekriterijumski [SHAR06, JHA03]. Na taj način se mogu razmatrati

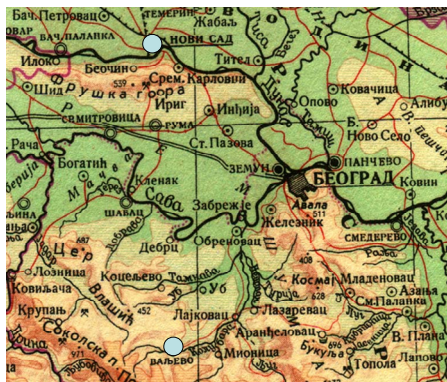
veći broj faktora koji neminovno uslovljavaju izbor lokacije za mrežnu infrastrukturu ali i efekti koje potencijalni saobraćaj izaziva na životnu sredinu.

Polazeći od opšteg problema koji treba rešiti u cilju kvalitetnijeg projektovanja putne mreže sa velikim brojem zadatih kriterijuma i posebnim akcentom na cenu [RODR06, BELL9, HOOV48, JHA04], ova disertacija nudi jedno rešenje koje je bazirano na radu Hopfield-ove neuralne mreže.

5.6.1. Izbor gradova i mape za implementaciju predloženog algoritma

Kako se primena rešenja ne bi prikazivala u virtuelnim uslovima, za potrebe ove teze odabrana su dva grada u Republici Srbiji koja nemaju direktnu putnu trasu, a pripadaju geografski različitim regijama i uslovima reljefa.

Cilj predloženog metoda je da se pronade putanja koja treba da definiše pravac izrade putne trase od grada Novog Sada (na severu) do Valjeva (na jugu) prikazane mape, slika 5.13.

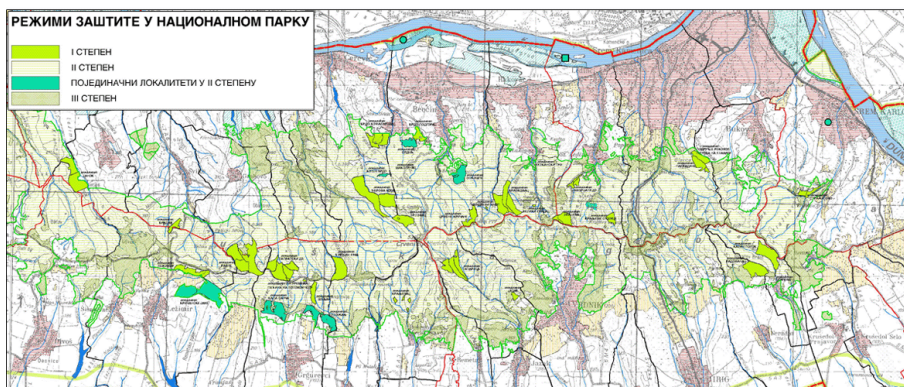


Slika 5.13. Početna karta sa označenim gradovima Novi Sad i Valjevo.

Kao početna, korišćena je karta Republike Srbije u razmeri (1:1 250 000). Ova karta je redukovana tako da gradovi Novi Sad i Valjevo budu neposredno na severu, tj. jugu. U skladu sa ovako dobijenom vertikalnom dimenzijom karte, karta je dodatno modifikovana na istu dimenziju po pravcu istok-zapad. Na taj način dobijena je kvadratna karta prikazana na slici 5.13. Kvadratna struktura karte nije neophodna ali je poželjna za implementaciju predloženog metoda.

Razlog za izbor ovih gradova, za demonstraciju predloženog algoritma, je:

- Direktna pravac nije odgovarajući jer se južno od Novog Sada nalazi planina, pa se očekuje da algoritam pokaže mogućnost zaobilaznja iste,
- Oblast oko planine i planina Fruška Gora su Nacionalni park pa se potencijalna izgradnja dodatno komplikuje, slika 5.14.
- Od Novog Sada do Valjeva se mora preći više od jedne reke što i ovaj kriterijum uključuje u izbor (Dunav, Tisa, Tamiš, Sava, Kolubara, Drina, Morava,),
- Valjevo se nalazi okruženo planinama sa svih strana osim jedne, pa se testira mogućnost algoritma da to pronađe. Sa druge strane, tim prilazom teče reka, pa se dodatno analizira i mogućnost algoritma da predvidi i dodatne prelaze reke ili praćenje toka Kolubare,
- Veliki broj gradova između ova dva grada, kao i njihova nejednaka ekonomska razvijenost daju mogućnost definisanja različitih ekonomskih zahteva u cilju traženja konačne trase.



Slika 5.14. Režim zaštite u nacionalnom parku Fruška Gora.

[<http://www.npfruskagora.co.rs/srpski/ostalo/karta.htm>]

Planiranje, projektovanje i izrada puteva je vrlo veliki i obiman posao, i izrada odgovarajućih studija može trajati veoma dugo [KRUG07]. Cilj ovog algoritama je da bude dodatno sredstvo i da olakša složene poslove izrada studija o planiranja i uticaju na životnu sredinu, koja se regularno sprovodi kod izrade putne trase.

5.6.2. Izbor faktora po kojima se vrši optimizacija

S obzirom da je izvorna ideja za implementaciju ovog algoritma preuzeta iz zadanog problema u [RODR06], ali i sa realnim planovima koji su autoru bili dostupni [JPZU05, JPPS09, DZGZ03], za ovaj algoritam korišćeno je veći broj kriterijuma. Hopfield-ova neuralna mreža, koja treba da pronađe rešenje za višekriterijumsku funkciju, u ovom slučaju imaće pet različitih parametara (ulaza):

1. Morfološke karakteristike (reljef),
2. Reke,
3. Životna sredina,
4. Ekonomska situacija,
5. Politički uticaj.

Svaki od elemenata ovih parametara odgovara nekoj skaliranoj fizičkoj ceni izgradnje hipotetičke putne trase po jedinici dužine. Stoga je cilj da se pronađe najpovoljnije rešenje za trasu koje će u obzir uzeti svih pet početnih parametara. Kao početna, tj krajnja tačka puta, izeti su gradovi Novi Sad i Valjevo.

Da bi se podaci sa mape uneli u predloženi algoritam, početna mapa je podeljena na $n \times n$ podoblasti. Predloženi algoritam ne mora da radi samo sa kvadratnim oblastima, ali je inicijalni problem definisan na takav način [RODR06], pa je i ovde uzeto da to bude kvadratna oblast. Svakoju oblasti je dodeljena skalirana numerička vrednost, za svaki od parametara, u intervalu od 0 do 1. Vrednost 0 definiše da se za izgradnju jedinicu mere putne trase ne mora platiti ništa dok je 1 najviša moguća vrednost. Parametri su dodeljeni po slobodnoj proceni autora a u skladu sa dostupnim materijalima koji definišu svaki od parametara.

Način klasifikacija i kvantifikacije korišćenih elemenata:

1. Za potrebe reljefa, klasifikacija je izvršena kroz visinske zone (6) dobijene sa fizičke karte. Najniže oblasti imaju najmanju a najviše najveću cenu.
2. Za potrebe reka posmatrana je fizička karta na sledeći način: početna pozicija unutar svake od oblasti (delova karti nakon deljenja na $n \times n$ segmenata) je severozapadna. Ako se iz te pozicije može stići u istu tu poziciju, okolnih oblasti, cena je nula. Međutim, ako se iz te pozicije ne može stići do okolnih, sem prelaskom preko reke, cena veze, početne i te susedne oblasti, je određena

veličinom (širinom reke). Reke su klasifikovane u dve grupe: velike (Dunav, Drina, Sava, Morava) i srednje (Tisa, Tamiš, Begej, Kolubara). Ostale manje reke, kao i postojeći prelati preko njih, nisu razmatrane.

3. Životna sredina je definisana u skladu sa tipom zemljišta i oblastima koje su proglašene za parkove ili zaštićene oblasti. Na taj način sva neobrađiva (ostala) zemljišta imaju najmanju dok nacionalni parkovi imaju najveću cenu.
4. Ekonomska mapa oslikava realnu analizu razvoja jedne regije. Procene koje se dobijaju analizom „države” ukazuju koje oblasti su od interesa i kojima treba dodatna stimulacija u vidu putne infrastrukture. U tom smislu država definiše i stimuliše pojedine zone da se razvijaju. Dodatno, treba da se posmatra i želja građana da pored njihovog grada (okoline) prođe put. Donacije države ili pojedinih gradova definišu cenu pojedinih oblasti, dok su najskuplje one oblasti koje niko ne donira [BOGA04].
5. Politička mapa oslikava uticaj pojedinih struktura koje imaju interes da putna trasa prođe bliže ili dalje od pojedinih gradova. Na taj način se lobiranjem i izdvajanjem dodatnih sredstava za ispunjenje njihovih zahteva direktno utiče i na izbor trase. Za ovaj parametar proizvoljno su izabrana tri grada kojima treba konvergirati (za koje se pozitivno lobira) i tri kojima ne treba (negativno lobiranje).

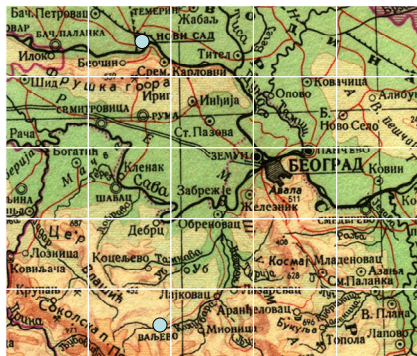
5.6.3. Obrada mape i kvantifikacija ulaznih faktora

Mapa sa slike 5.13 je dodatno deljena na dva načina, i tako su dobijene dve podele koje će se odvojeno posmatrati.

U prvoj podeli mapa se deli na 5x5 (25) oblasti, i traži se putna trasa. Cilj ove podele je da se ukaže na problem dodele jedinstvenog parametra nekoj oblasti jer u većoj oblasti postoji više različitih podoblasti, čiji se identitet tada gubi. Međutim, bez obzira na to okvirna putanja mora ostati donekle slična. Kod ove razmera veličina kocke je 25x25km.

U drugoj podeli postoji 10x10 (100) oblasti. Dobijena putanja je sada mnogo preciznija i tačnije odgovara promenama fizičko-geografskih uslova. Ovako dobijena putanja je dovoljno precizna da se u konačnoj fazi koju treba da analizira stručno lice

može dobiti krajnje rešenje. Kod ove razmere veličina kocke je 12.5x12.5km. Na slikama 5.15 i 5.16 su prikazane oblasti nakon izvršene prve i druge podele.



Slika 5.15. Mapa nakon podele na 25 oblasti.



Slika 5.16. Mapa nakon podele na 100 oblasti.

Pored navedenih razloga još jedan je vrlo bitan za prikaz mogućnosti predloženog metoda. Naime, algoritam mora biti u mogućnosti da podjednako dobro i precizno radi na mapama različitih razmera i broja oblasti. Povećavanjem broja oblasti rešenje je sve preciznije, ali je i inicijalni posao veći, jer se svaka dobijena oblast mora pojedinačno opisati odgovarajućim parametrima. U ovom primeru pokazaće se da se povećavanjem broja oblasti opšti pravac trase ne menja mnogo, već se samo koriguje sa uvođenjem podoblasti. Na taj način se preciznost može postići na onolikom nivou koliko se to želi, tj. na koliko početnih oblasti se mapa podeli.

U oba slučaja, podela mapa na $n \times n$ sektora definiše način kako se fizička struktura može predstaviti programskom okruženju u matematičkoj formi. U skladu sa poglavljem 5.4 svaka oblast predstavlja jedan čvor mreže. Simbolično se čvor u grafičkom predstavljanju postavlja u centar oblasti. Svaki čvor povezan je sa 8 susednih oblasti ili manje za krajnje čvorove. Takvom notacijom za kartu gde je broj oblasti 5x5 izvorište putne trase (Novi Sad) je u čvoru 2 a odredište (Valjevo) u 22, dok je kod podele 10x10 izvorište u čvoru 4 a odredište u čvoru 94.

5.6.4. Modifikacija energijske funkcije Hopfield-ove neuralne mreže za potrebe traženja putne trase bazirane na višekriterijumskoj optimizaciji

Polazeći od opšteg modela Hopfield-ove neuralne mreže opisanog u trećem poglavlju, i relacijom 3.61, kao i njene modifikacije za potrebe planiranja putne trase, dobija se alat sa grafičkim okruženjem pogodan za lak i brz rad.

Energijska funkcija u ovom slučaju ima modifikovan oblik dat relacijom 5.1.

$$\begin{aligned}
 E = & \frac{\mu_1}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} (FK_{Xi} + RM_{Xi}) v_{Xi} + \frac{\mu_2}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} \rho_{Xi} v_{Xi} + \frac{\mu_3}{2} \sum_X \left(\sum_{i \neq X} v_{Xi} - \sum_{i \neq X} v_{iX} \right)^2 + \frac{\mu_4}{2} \sum_i \sum_{X \neq i} v_{Xi} (1 - v_{Xi}) \\
 & \frac{\mu_5}{2} (1 - v_{ds}) + \frac{\mu_6}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} ZS_{Xi} v_{Xi} + \frac{\mu_7}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} ES_{Xi} v_{Xi} + \frac{\mu_8}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} PU_{Xi} v_{Xi}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Gde su ulazne matrice:

- FK** – fizičke karakteristike zemljišta (reljef),
- RM** - rečna mreža,
- ZS** – životna sredina,
- ES** – ekonomska situacija i
- PU** – politički uticaj.

Konstante μ_{2-5} imaju istu ulogu kao i istoimene konstante u poglavlju 4.4 dok μ_1 treba da minimizuje ukupnu cenu puta sa aspekta racionalne upotrebe tipa zemljišta i prelaza preko reka, μ_6 da minimizuje negativan uticaj na životnu sredinu, μ_7 da maksimizuje pozitivan ekonomski uticaj i μ_8 da maksimizuje povoljnu „političku klimu“ i lobije za pojedine trase puta. Kako Hopfield-ova neuralna mreža radi na principu minimizacije energijske funkcije, to svaki od njenih članova u idealnom slučaju treba da ima minimalno moguće stanje. Kako je uticaj pojedinih faktora povoljan kada su mu vrednosti male, to takva kvantifikacija tih elemenata ima pozitivan uticaj. Ovo je slučaj sa reljefom, rekama i uticajem na životnu sredinu. Sa druge strane kod ekonomskog i političkog uticaja u realnim uslovima je poželjno da se njihov efekat maksimizira. Da bi se to uskladilo sa opštim principom rada Hopfield-ove neuralne mreže, i najbolji uticaj kroz energijsku funkciju posmatrao kao minimalan postoje dva načina da se to realizuje. Prvi da se svaka od ulaznih matrica **X** u relacijama postavi kao **I-X** i na taj način poželjne veće vrednosti energijskoj funkciji predstave kao minimalne. Ovakav način

pripreme ulaznih parametara je iskorišćen kod implementacije Hopfield-ove neuralne mreže za potrebe multicast rutiranja u poglavlju 4.3.4. U ovom modelu primeniće se drugi način koji se svodi na promenu inicijalnih vrednosti matrica tako da budu u skladu sa minimalističkim pristupom energijske funkcije. Na taj način su klasifikacije i kvantifikacije izvršene tako da je uvek minimalna vrednost pojedinih parametara ona koja je najpoželjnija. Na taj način se dalje procesiranje i vreme potrebno za matematičke operacije u postupku rada neuralne mreže neznatno skraćuju.

Konstante μ_{1-8} imaju vrednosti 375, 2500, 1500, 475, 2500, 400, 420 i 450, respektivno.

Matrica ρ predstavlja podatak o povezanosti čvorova, i definisana je kao:

$$\rho = \begin{cases} 1, & \text{ako link od čvora } X \text{ do čvora } i \text{ ne postoji} \\ 0, & \text{u ostalim slučajevima} \end{cases} \quad (5.2)$$

Matrica i svi ostali elementi energijske funkcije koji nisu direktno vezani za ulazne matrice koje odgovaraju problemu selekcije putne trase imaju ista značenja kao i u poglavlju 3.4, pa se sada neće detaljno opisivati.

Za energijsku funkciju definisanu sa 5.1 bias struja je tada definisana sa:

$$\begin{aligned} I_{Xi} &= -\frac{\mu_1}{2}(FK_{Xi} + RM_{Xi})(1 - \delta_{Xd} \delta_{is}) - \frac{\mu_2}{2} \rho_{Xi} (1 - \delta_{Xd} \delta_{is}) - \frac{\mu_4}{2} + \frac{\mu_5}{2} \delta_{Xd} \delta_{is} \\ &\quad - \frac{\mu_6}{2} ZS_{Xi} (1 - \delta_{Xd} \delta_{is}) - \frac{\mu_7}{2} ES_{Xi} (1 - \delta_{Xd} \delta_{is}) - \frac{\mu_8}{2} PU_{Xi} (1 - \delta_{Xd} \delta_{is}) \\ &= \begin{cases} \frac{\mu_5}{2} - \frac{\mu_4}{2}, & \text{ako je } (X, i) = (d, s) \\ -\frac{\mu_1}{2}(FK_{Xi} + RM_{Xi}) - \frac{\mu_2}{2} \rho_{Xi} - \frac{\mu_4}{2} - \frac{\mu_6}{2} ZS_{Xi} - \frac{\mu_7}{2} ES_{Xi} - \frac{\mu_8}{2} PU_{Xi} & \text{u suprotnom.} \end{cases} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Ako se relacije 5.1 i 3.16 uvrste u opšte jednačine modela Hopfield-ove mreže prikazanih u poglavlju 3.4. dobija jednačina pogodna za kompjutersku implementaciju.

$$\begin{aligned} C_i \frac{du_i}{dt} &= -\frac{u_i}{R_i} - \frac{\mu_1}{2}(FK_{Xi} + RM_{Xi})(1 - \delta_{Xd} \delta_{is}) - \frac{\mu_2}{2} \rho_{Xi} (1 - \delta_{Xd} \delta_{is}) - \mu_3 \sum_{Y \neq X} (v_{XY} - v_{YX}) \\ &\quad - \frac{\mu_4}{2}(1 - 2v_{Xi}) + \frac{\mu_5}{2} \delta_{Xd} \delta_{is} - \frac{\mu_6}{2} ZS_{Xi} \cdot (1 - \delta_{Xd} \delta_{is}) - \frac{\mu_7}{2} ES_{Xi} (1 - \delta_{Xd} \delta_{is}) \\ &\quad - \frac{\mu_8}{2} PU_{Xi} \cdot (1 - \delta_{Xd} \delta_{is}) + \mu_3 \sum_{Y \neq X} (v_{iY} - v_{Yi}) \end{aligned} \quad (5.4)$$

Polazeći od relacija 5.1, 5.3 i 5.4 kreiran je korisnički orijentisan program sa grafičkim okruženjem u programskom paketu Matlab 6.5. Kao i u poglavlju 4.4 (rutiranje) sav kod je pisan upotrebom samo osnovnih programskih izraza i struktura i ni jedan od toolbox-ova nije korišćen. Na ovaj način kod je lako moguće prilagoditi bilo kom drugom programskom jeziku ili razvojnom okruženju.

5.6.5. Način testiranja predloženog algoritma

Da bi se pokazao pravi efekat višekriterijumske optimizacije, program je testiran u dve različite faze rada. U prvom slučaju kao ulazni podaci, učitani pojedinačni parametri po kojima se vrši optimizacija (reljef, reke, uticaj na životnu sredinu, ekonomska situacija, politički uticaj). Za svaki, ponaosob, je tražena putanja od Novog Sada do Valjeva (za mapu 5x5 i 10x10). Jedino je parametar reke posmatran u kombinaciji sa reljefom. Na ovaj način su dobijene pojedinačne putanje za svaki od parametara. Zatim su svi parametri posmatrani istovremeno (višekriterijumski izbor) i to za obe mape. Dobijeno rešenje, treba da pokaže da se ono ne može dobiti prostim aritmetičkim kombinacijam pojedinačnih rešenja (dobijenih u prvom slučaju), niti njihovom interpolacijom, što pokazuje svojstvo neuralne mreže da „balansira” među parametrima i izvrši kvalitetnu višekriterijumsku optimizaciju.

5.6.6. Klasifikacija i kvantifikacija ulaznih faktora

a) Reljef

Najkraće rastojanje između dve tačke je svakako prava linija. Međutim, ako se posmatra realno fizičko okruženje tada će putanja prolaziti kroz oblasti različitih geomorfoloških oblika i struktura. U tom slučaju pripremne aktivnosti za izradu puta imaju potpuno različite cene pa najjeftinija putanja neće biti i najkraća. Od mreže se očekuje da nađe rešenje za slučaj kada je klasifikacija terena, sa aspekta fizičkih ograničenja, izvršena na šest oblasti u zavisnosti od nadmorske visine što je prikazano u tabeli 5.1. Sa povećanjem nadmorske visine zbog fizičkih ograničenja i težih uslova gradnje najveća cena je dodeljena najvišoj nadmorskoj visini.

Tabela 5.1. Klasifikacija fizičkih karakteristika zemljišta – reljefa







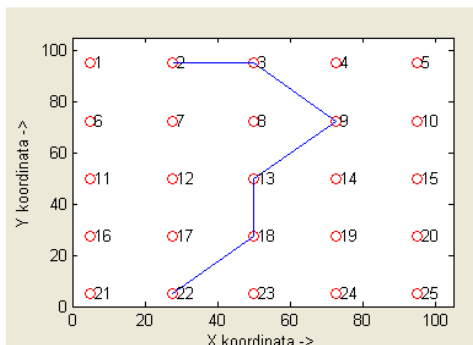
Visina [m]	Cena	Simbol na karti
0 - 100	0.05	
100 - 200	0.15	
200 - 400	0.35	
400 - 600	0.55	
600 - 1000	0.75	
1000 - 1500	0.9	

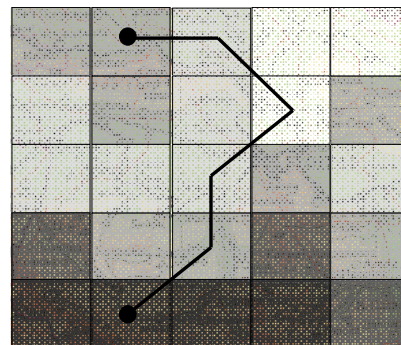
Tabela 5.2. Raspodela vrednosti matrice *Reljef* po oblastima za kartu sa 5x5 oblasti.

0.35	0.35	0.15	0.05	0.05
0.15	0.35	0.15	0.05	0.35
0.15	0.15	0.15	0.35	0.15
0.55	0.35	0.35	0.55	0.35
0.75	0.75	0.75	0.75	0.55

Polazeći od kvantifikacije date u tabeli 5.1. može se formirati ulazna matrica *Reljef* koja odgovara matematičkoj reprezentaciji grafa, tabela 5.2. Vrednosti elementa u matrici odgovara poziciji odgovarajuće oblasti na fizičkoj karti i usvojene klasifikacije terena.



Slika 5.17. Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu *Reljef* datu u tabeli 5.2.



Slika 5.18. Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu *Reljef* datu u tabeli 5.2.

U prvom slučaju, dobijena putanja od čvora 2 (Novi Sad) do čvora 22 (Valjevo), kada se posmatra samo matrica *Reljef*, iz tabela 5.2 je prikazana na slici 5.17.

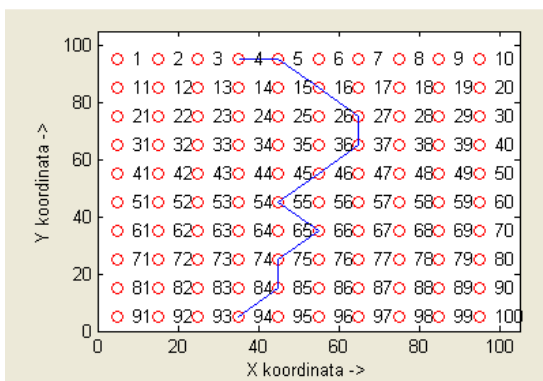
Posmatrajući istu putanju, pod istim uslovima kao i za sliku 5.17, ali na fizičkoj karti preko koje su postavljene zasenčene oblasti koje odgovaraju klasifikaciji iz tabele 5.1, dobija se slika 5.18.

Ukoliko se posmatra mapa, slika 5.18. na kojoj je izvršena podela na 10x10 oblasti, i klasifikacija terena data u tabeli 5.1, dobija se ulazna matrica *Reljef* i za ovakvu mapu, tabela 4.8.

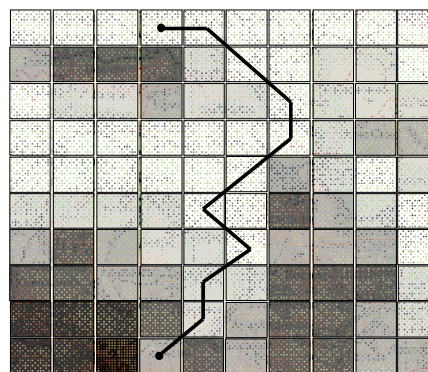
Tabela 5.3. Raspodela vrednosti matrice *Reljef* po oblastima za kartu sa 10x10 oblasti.

0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
0.35	0.55	0.55	0.55	0.15	0.05	0.05	0.15	0.15	0.05
0.05	0.15	0.15	0.35	0.15	0.15	0.05	0.15	0.15	0.15
0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.35	0.35
0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.35	0.15	0.05	0.15
0.15	0.15	0.15	0.15	0.05	0.05	0.55	0.35	0.15	0.05
0.35	0.55	0.35	0.15	0.15	0.05	0.35	0.35	0.35	0.05
0.55	0.55	0.35	0.35	0.15	0.15	0.55	0.55	0.55	0.15
0.75	0.75	0.75	0.55	0.15	0.35	0.55	0.55	0.35	0.15
0.75	0.75	0.9	0.35	0.55	0.35	0.55	0.55	0.35	0.35

U prvom slučaju, dobijena putanja od čvora 4 (Novi Sad) do čvora 94 (Valjevo), kada se posmatra samo matrica *Reljef*, iz table 5.3, je na slici 5.19.



Slika 5.19. Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu *Reljef* datu u tabeli 5.3.



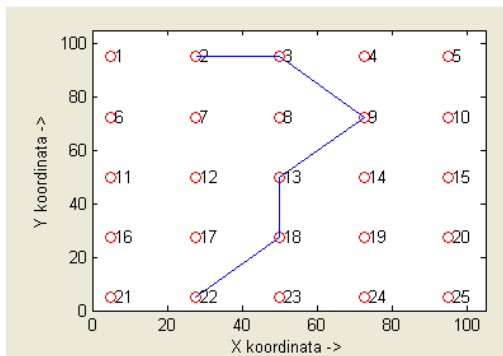
Slika 5.20. Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu *Reljef* datu u tabeli 5.3.

Posmatrajući putanju sa slike 5.19, ali na fizičkoj karti preko koje su postavljene zasenčene oblasti koje odgovaraju klasifikaciji iz table 5.1, dobija se slika 5.20.

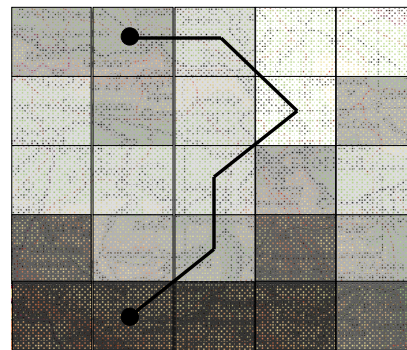
b) Reljef i reke

Parametar reke nije posmatran posebno jer cene oblasti u kojima nema prelaska preko reka su definisane kao 0. Na taj način dobila bi se proizvoljno duga putanja koja u sebi ne bi imala prelazak. Iz tog razloga, reke su posmatrane kao dodatak reljefu, pri čemu je vršeno sabiranje cene reljefa i reka za svaku pojedinačnu oblast. Klasifikacija reka izvršena je na velike (Dunav, Drina, Sava, Morava), srednje (Tisa, Tamiš, Begej, Kolubara) i male. Težinski parametri dodeljeni ovim klasifikacijama su 0.6, 0.3 i 0, respektivno. Ova vrednost treba da ukaže na cenu koja se mora uračunati ukoliko se neka od reka iz pomenute klasifikacije prelazi sa predviđenom trasom. Iz tog razloga, klasifikacija reka izvršena je prema njihovoj širini i dostupnosti, a ne prema veličini sliva, brzini ili kapacitetu vode.

Polazeći od kvantifikacije za reke i prethodno definisanih tabela 5.2 za reljef, dobijena je putanja koja je prikazana na slici 5.21. Putanja koja je ovako dobijena ne razlikuje se od putanje dobijene kada se u obzir uzima samo reljef. Razlog je gruba podela u oblastima gde prelazak preko reka ima potencijalni uticaj. Ista ova putanja prikazana na fizičkoj karti sa označenim grafički prikazanim vrednostima pojedinih oblasti prikazana je na slici 5.22.



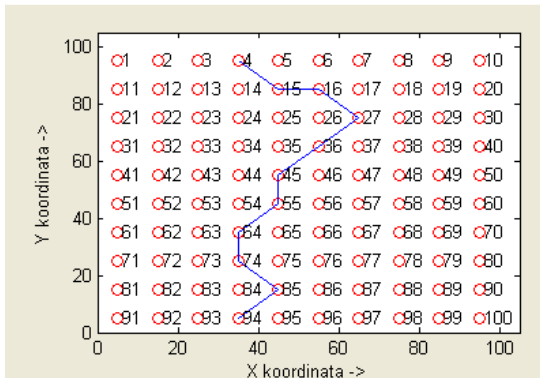
Slika 5.21. Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulazne matrice *Reljef* (datu u tabeli 5.2.) i *Reke*.



Slika 5.22. Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulazne matrice *Reljef* (datu u tabeli 5.2.) i *Reke*.

Posmatrajući uticaj reljefa i reka na karti sa podelom na 10x10 oblasti dobija se putanja prikazana na slici 5.23. Za razliku od slike 5.21 sada se jasno primećuje razlika u odnosu na dobijenu mapu sa parametrom reljef. Putanja prikazana na fizičkoj karti, slika 5.24, pokazuje da je uticaj reka bio takav da je putanja išla uz rečno korito, prešla

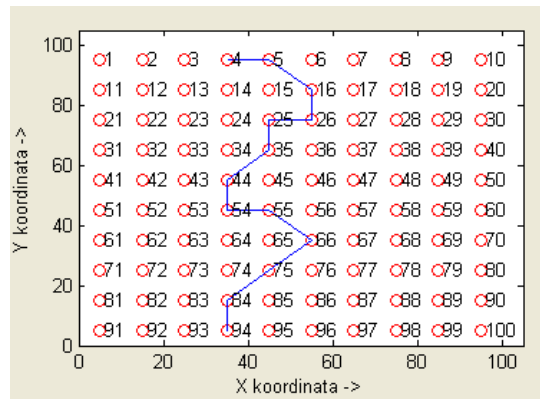
reku i nastavila uz drugu. Uticaj reka ovde je prevashodno vođen vrednostima koje su definisane u matrici reljef. Najveći uticaj koji ulazni faktor Reka može da ima, je definisan kao prva kategorija, i izabran da bude 0.6. U odnosu na maksimalnu vrednost 1, promenom ovog odnosa, uticaj reka se može manje ili više uzeti u izbor konačne putanje.



Slika 5.23. Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu *Reljef* (datu u tabeli 5.3.) i *Reke*.



Slika 5.24. Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulazne matrice *Reljef* (datu u tabeli 5.3.) i *Reke*.



Slika 5.25. Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu *Reljef* (datu u tabeli 5.3.) i *Reke* (kada su vrednosti 0.3 i 0.6 zamenjene sa 0.2 i 0.4).

U slučaju da se za cene prelaska preko reke usvoje drugi parametri doći će do značajnog promena konačne putanje. Na slici 5.25. je prikazana putanja kada su vrednosti matrice *Reke* umesto 0.3 i 0.6 definisane kao 0.2 i 0.4, respektivno. Na ovaj način uticaj reljefa je veći, a proizvoljnim odabirom se može podesiti željeni odnos.

c) *Životna sredina*

U razvijenim zemljama, a naročito u zemljama Evropske unije, Ministarstvo za životnu sredinu definišu oblasti od prirodnog značaja za stanovništvo (nacionalni parkovi, prirodni rezervati, šume...). Prolaskom putne trase kroz ili pored neke od ovih oblasti smatra se da je došlo do ugrožavanja životne sredine pa je i cena koja se tom prilikom plaća srazmerna nastaloj šteti. Kod različitih tipova zemljišta šteta se oslikava kroz uništavanje flore i faune, devastaciju tla, uništenjem biomase, zagađenjem vazduha. Ova narušavanja su definisana zakonom kao i oblasti i njihova kategorizacija prema njihovom značaju. U tom smislu izvršena je klasifikacija na pet oblasti prikazanih u tabeli 5.4. Ovakva klasifikacija nije univerzalna i za potrebe disertacije je izabrana jedna od velikog broja mogućih rešenja.

Tabela 5.4. Klasifikacija uticaja na Životnu sredinu






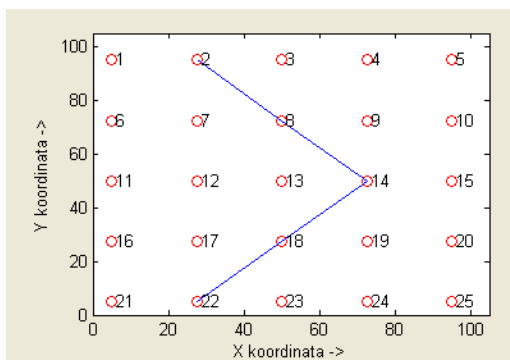
Visina [m]	Cena	Simbol na karti
Ostalo	0.15	
Poljoprivredno	0.2	
Šume	0.5	
Prirodni Rez	0.7	
Nacionalni Park	0.9	

Tabela 5.5. Raspodela vrednosti matrice *Životna sredina* po oblastima za kartu sa 5x5 oblasti.

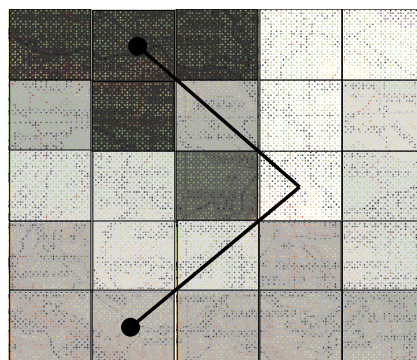
0.9	0.9	0.9	0.15	0.15
0.5	0.9	0.5	0.15	0.2
0.2	0.2	0.7	0.15	0.2
0.5	0.2	0.2	0.5	0.2
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Polazeći od ovakve klasifikacije, definisana je i tabela 5.5. koja prikazuje raspodelu vrednosti ovog parametra na strukturu mreže, matricu *Životna sredina*.

Polazeći od podataka u tabeli 5.5, dobijena je putanja po ovom parametru, slika 5.26. Ista putanja prikazana je i na fizičkoj karti, slika 5.27, uz označavanje odgovarajućih oblasti u skladu sa brojnim vrednostima koje su im dodeljene.



Slika 5.26. Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu *Životna sredina* datu u tabeli 5.5.

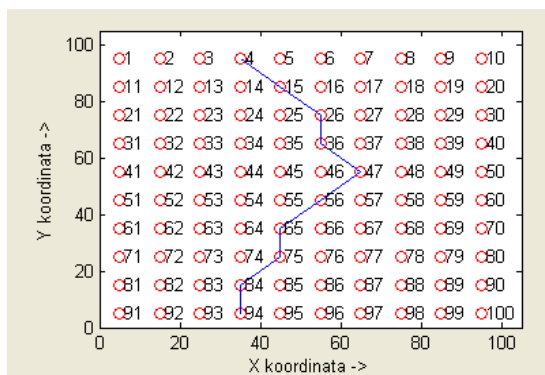


Slika 5.27. Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu *Životna sredina* datu u tabeli 5.5.

Ukoliko se primeni ista klasifikacija i na mapu sa 10x10 oblasti dobija se matrica *Životna sredina* data kroz tabelu 5.6. Na bazi ovih podataka dobijena je putanja koja je prikazana u okruženju Matlab-a, slika 5.28, i na fizičkoj karti, slika 5.29.

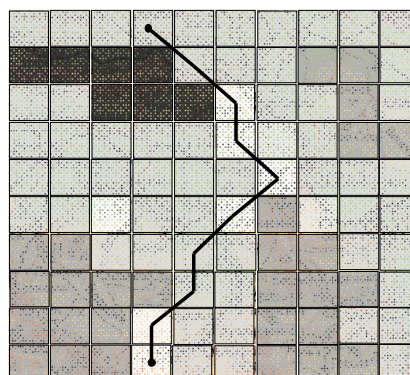
Tabela 5.6. Raspodela vrednosti matrice *Životna sredina* po oblastima za kartu sa 10x10 oblasti.

0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.9	0.9	0.9	0.9	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	0.2
0.2	0.2	0.9	0.9	0.9	0.15	0.2	0.2	0.5	0.2
0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.15	0.15	0.2	0.5	0.5
0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.15	0.2	0.2	0.2
0.2	0.2	0.15	0.2	0.2	0.15	0.5	0.15	0.2	0.2
0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	0.2	0.2
0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.5	0.5	0.5	0.2
0.5	0.5	0.5	0.15	0.2	0.2	0.5	0.5	0.2	0.2
0.5	0.5	0.5	0.15	0.2	0.2	0.5	0.5	0.5	0.2



Slika 5.28. Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu *Životna sredina* datu u tabeli

5.6.



Slika 5.29. Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu *Životna sredina* datu u tabeli 5.6.

datu u tabeli 5.6.

d) *Ekonomski uticaj*

Posmatranjem ekonomske situacije dolazi se do zaključka da su neke oblasti (locirane oko gradova) manje ili više pogodne za prolazak putne trase pored (kroz) njih. U tom smislu postoje oblasti u kojima građani samoinicijativno žele bolju putnu vezu, jer se njihov razvoj time povećava, i spremni su da delom i sami finansiraju trasu u njihovoj okolini. Sa druge strane država definiše strategiju razvoja za pojedine opštine i budžetom predviđa one za koje će izdvojiti dodatna sredstva za podsticaj i razvoj. Sredstva koja izdvaja država su mnogo veća od onih koje daju građani pa su te oblasti definisane manjom cenom, dok su najskuplje oblasti one koje niko ne donira. U tom smislu izvršena je kategorizacija na 5 različitih oblasti, i dodeljene su im skalirani težinski koeficijenti kao u tabeli 5.7.

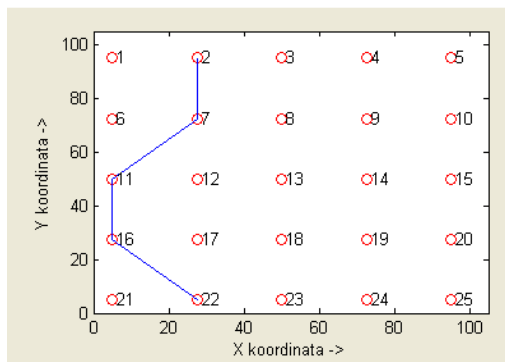
Tabela 5.7. Klasifikacija ekonomske situacije.

Visina [m]	Cena	Simbol na karti
Oblast koje nije finansirana	0.95	
Oblast koji finansiraju građani sa manje sredstava	0.75	
Oblast koji finansiraju građani sa više sredstava	0.5	
Oblast koji finansira država sa manje sredstava	0.25	
Oblast koji finansira država sa više sredstava	0.05	

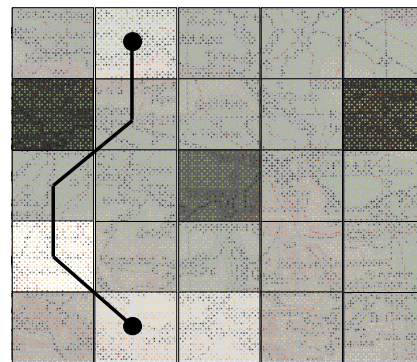
Polazeći od kvantifikacije u tabeli 5.7, dobijena je matrica *Ekonomija*, data kroz tabelu 5.8. Na bazi ovih podataka dobijena je putanja prikazana na slici 5.30. Ista ova putanja prikazana na fizičkoj karti sa osenčenim oblastima u skladu sa tabelom 5.7 prikazana je na slici 5.31.

Tabela 5.8. Raspodela vrednosti matrice *Ekonomija* po oblastima za kartu sa 5x5 oblasti.

0.5	0.25	0.5	0.5	0.5
0.95	0.5	0.5	0.5	0.95
0.5	0.5	0.75	0.5	0.5
0.05	0.5	0.5	0.5	0.5
0.5	0.25	0.25	0.5	0.5



Slika 5.30. Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu *Ekonomija* datu u tabeli 5.8.



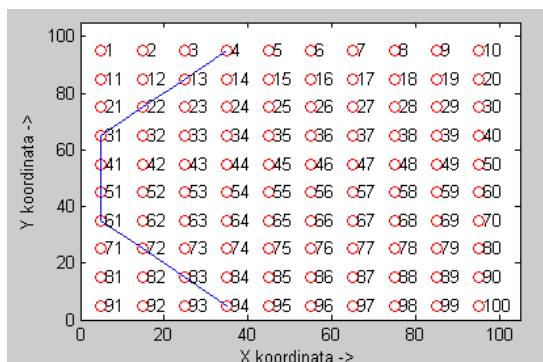
Slika 5.31. Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu *Ekonomija* datu u tabeli 5.8.

U skladu sa kategorizacijom u tabeli 5.7, i mapom gde je podela izvršena na 10x10 oblasti, dobijena je nova matrica *Ekonomija*, i prikazana je u tabeli 5.9.

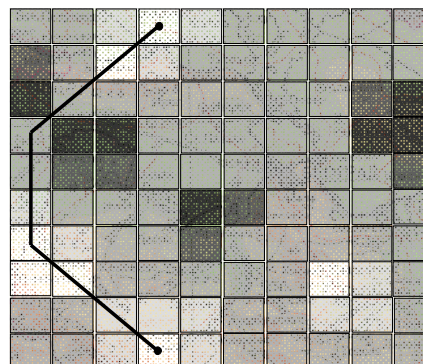
Tabela 5.9. Raspodela vrednosti matrice *Ekonomija* po oblastima za kartu sa 10x10 oblasti.

0.5	0.5	0.25	0.05	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.75	0.5	0.05	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.95	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75	0.95
0.5	0.95	0.95	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.95	0.95
0.5	0.75	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75
0.25	0.5	0.5	0.5	0.95	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5
0.05	0.25	0.5	0.5	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.05	0.05	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.05	0.25	0.5
0.5	0.5	0.25	0.25	0.25	0.5	0.5	0.25	0.25	0.5
0.5	0.5	0.25	0.05	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Na osnovu podataka iz tabele 5.9 dobijena je putanja koja je prikazana na slici 5.32, kao i na slici 5.33.



Slika 5.32. Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu *Ekonomija* datu u tabeli 5.9.



Slika 5.33. Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu *Ekonomija* datu u tabeli 5.9.

e) Politički uticaj

Pored veoma važnih fizičkih faktora i državnog uticaja postoji i ljudski faktor. On se oslikava kroz lobije koji imaju interes na zemljištu koje može biti deo putne trase. U tom smislu ovi lobiji su spremni da doniraju deo troškova ukoliko put prođe pored njihove zone od interesa. Sa druge strane postoje grupe (najčešće označene sa *NIMBY-Not In My Back Yard*) koje se protive izgradnji puta u njihovoj oblasti i javnim agitovanjem prouzrokuju kašnjenja i opstrukcije što investitoru zadaje dodatni trošak.

U skladu sa ovim stavovima izvršena je klasifikacija na pet oblasti koje su prikazane u tabeli 5.10.

Tabela 5.10. Kategorizacija političkog uticaja.






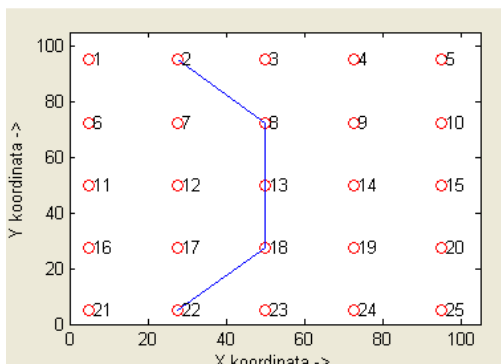
Visina [m]	Cena	Simbol na karti
Centar grada koji hoće put	0.05	
Bliža okolina onih koji hoće	0.2	
Neutralno	0.6	
Bliža okolina onih koji neće	0.8	
Centar grada koji neće put	1	

Tabela 5.11. Raspodela vrednosti matrice *Politička* po oblastima za kartu sa 5x5 oblasti.

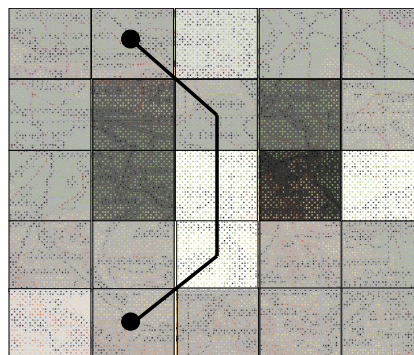
0.6	0.6	0.2	0.6	0.6
0.6	0.8	0.6	0.8	0.6
0.6	0.8	0.05	1	0.05
0.6	0.6	0.05	0.6	0.6
0.2	0.6	0.6	0.6	0.6

Za ovaj slučaj izabrana je sledeća pretpostavka: gradovi Ruma, Šabac i Beograd ne žele da putna trasa prolazi kroz njih dok gradovi Lazarevac, Smederevo i Obrenovac to žele. Na taj način formirana je matrica *Politička*, koja je data u tabli 5.11.

U skladu sa podacima iz tabele 5.11, dobijena je putanja prikazana na slici 5.34, kao i na slici 5.35.



Slika 5.34. Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu *Politička* datu u tabeli 5.11.



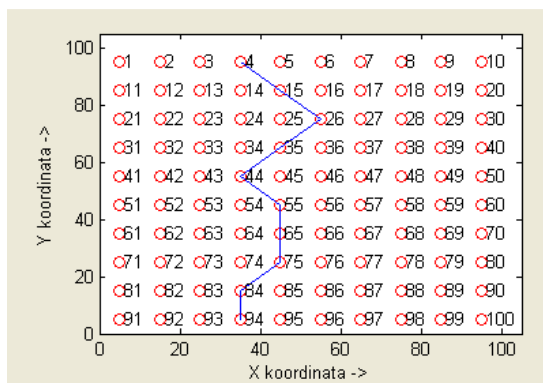
Slika 5.35. Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu *Politička* datu u tabeli 5.11.

Polazeći od kategorizacije u tabeli 5.10, matrica *Politička* za mapu sa 10x10 oblasti data je u tabeli 5.12.

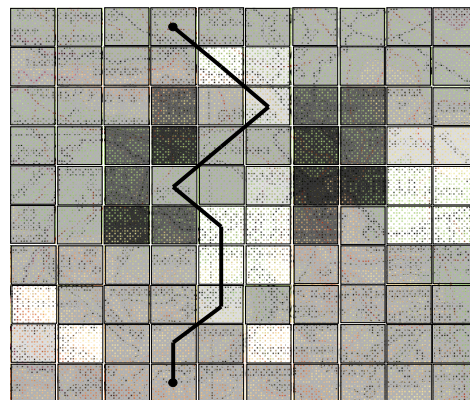
Tabela 5.12. Raspodela vrednosti matrice *Politička* po oblastima za kartu sa 10x10 oblasti.

0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
0.6	0.6	0.6	0.6	0.2	0.05	0.6	0.6	0.6	0.6
0.6	0.6	0.6	0.8	0.6	0.2	0.8	0.8	0.6	0.6
0.6	0.6	0.8	1	0.6	0.6	1	0.8	0.2	0.2
0.6	0.6	0.8	0.6	0.6	0.2	1	1	0.05	0.05
0.6	0.6	1	0.8	0.05	0.05	0.8	0.6	0.05	0.05
0.6	0.6	0.8	0.6	0.05	0.05	0.6	0.6	0.6	0.6
0.05	0.6	0.6	0.6	0.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
0.2	0.05	0.6	0.6	0.6	0.05	0.6	0.6	0.6	0.6
0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

Ako se neuralnoj mreži ovaj parametar nudi kao jedini tada je putanja od izvorišnog grada – Novi Sad do odredišnog – Valjevo prikazana na slici 5.36. Ista putanja na fizičkoj karti uz grafički prikaz vrednosti dodeljenih pojedinim oblastima je data na slici 5.37.



Slika 5.36. Prikaz putanje (iz Matlab-a) za ulaznu matricu *Politička* datu u tabeli 5.12.

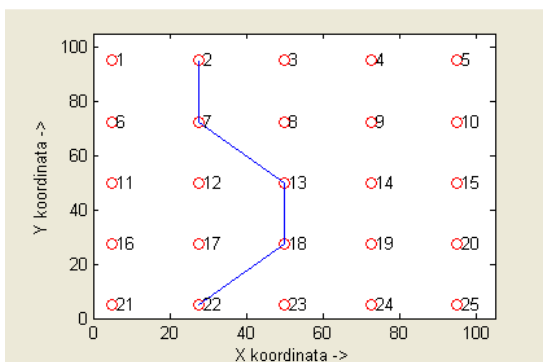


Slika 5.37. Prikaz putanje (na fizičkoj karti) za ulaznu matricu *Politička* datu u tabeli 5.12.

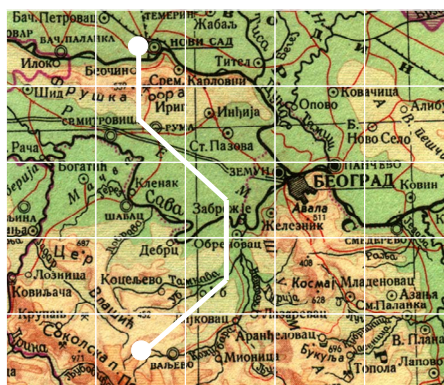
5.6.7. Rezultati testiranja predloženog modela

Svi do sada prikazani rezultati su dobijeni za dva tipa podela 5x5 i 10x10 oblasti, ali samo za slučaj kada se koristi jedan parametar. Cilj ovih rezultata je da pokažu različitost koja se dobija u takvim uslovima i problem koji nastaje kada je ove putanje potrebno objediniti u jednu. U takvom slučaju dobijeno rešenje možda neće biti optimalno, ali je postupak višekriterijumske optimizacije neuphodan. Dobijanje ovakvog rešenja je vrlo sofisticiran posao i za tu svrhu pokazaće ce mogućnost neuralnih mreža da reše ovaj problem.

Polazeći od svih definisanih parametara i modifikacije energijske funkcije, u poglavlju 5.6.4, dobijena je trasa za mapu sa 5x5 oblasti, prikazana na slici 5.38.



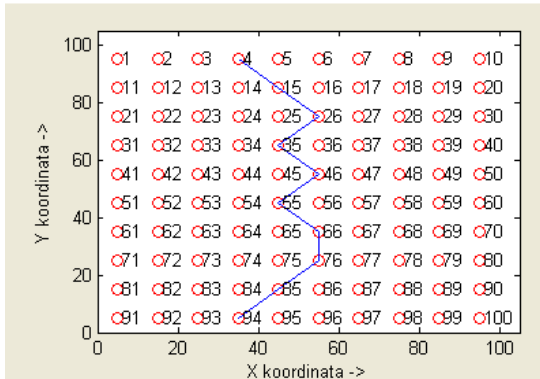
Slika 5.38. Prikaz trase (iz Matlab-a) dobijen višekriterijumskom optimizacijom svih ulaznih parametara za kartu sa 5x5 oblasti.



Slika 5.39. Prikaz trase (na fizičkoj karti) dobijen višekriterijumskom optimizacijom svih ulaznih parametara za kartu sa 10x10 oblasti.

Ista putanja kao na slici 5.38. prikazana je i na slici 5.39. ali ucrtana na fizičku kartu koja je korišćena. Prvo što se uočava je da se dobijena trasa ne može dobiti aritmetičkim sabiranjem pojedinačnih faktora prikazanih u poglavlju 5.6.6, niti njihovom interpolacijom. To jasno ukazuje da problem višekriterijumske optimizacije ima svoje zakonitosti i mora da ga rešava neki vid veštačke inteligencije. Posmatrajući samu trasu kao rešenje, na mapi sa relativno grubom podelom, uočava se da rešenje odgovara svim definisanim uslovima kroz pojedine parametre. Gruba podela najviše se pokazuje kod prve deonice puta gde je prelaz prikazan preko Fruške Gore i ne zna se

jasno njegova trasa, a samim tim i kvalitet rešenja. Ove nedostatke rešava preciznija klasifikacija oblasti i za slučaj 10x10 oblasti putna trasa je prikazana na slikama 5.40, 5.41 i 5.42.



Slika 5.40. Prikaz trase (iz Matlab-a) dobijen višekriterijumskom optimizacijom svih ulaznih parametara za kartu sa 10x10 oblasti.

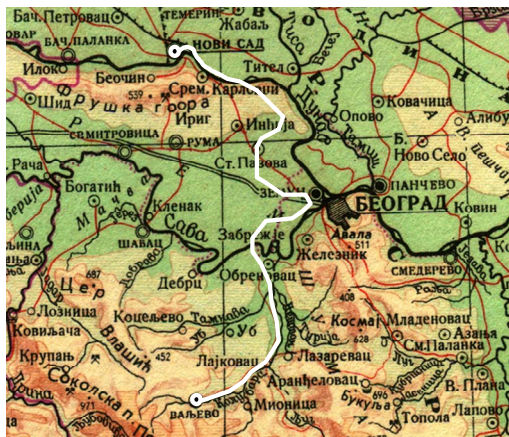


Slika 5.41. Prikaz putne trase (na fizičkoj karti) dobijen višekriterijumskom optimizacijom svih ulaznih parametara za kartu sa 10x10 oblasti.

Prikaz iste putanje na fizičkoj karti, slika 5.41, pokazuje da je ponuđeno rešenje usklađeno sa svim zahtevima koji su inicijalno postavljeni. Sa aspekta reljefa, ponuđena putanja je prošla kroz oblasti koje su niže nadmorske visine, a i ukupna dužina putanje je relativno zadovoljavajuća. Zaobiđene su sve planine i prilaz Valjevu je onakav kako je jedino bilo logično rešenje. Veće reke su presečene minimalan broj puta, a sve rečne doline su maksimalno iskorišćene. Ovo je naročito iskazano kod pravca uz Dunav i Kolubaru. Sa aspekta životne sredine maksimalno su iskorišćene sve preporučene odnosno zaobiđene oblasti koje su kategorizovane kao bitne za druge namene. Ekonomski efekat i politički uticaj je dobijen tačno onako kako su u specifikaciji i definisani. Naime svi gradovi koji nisu želeli put su zaobiđeni dok su na putanji oni koji su za njega lobirali.

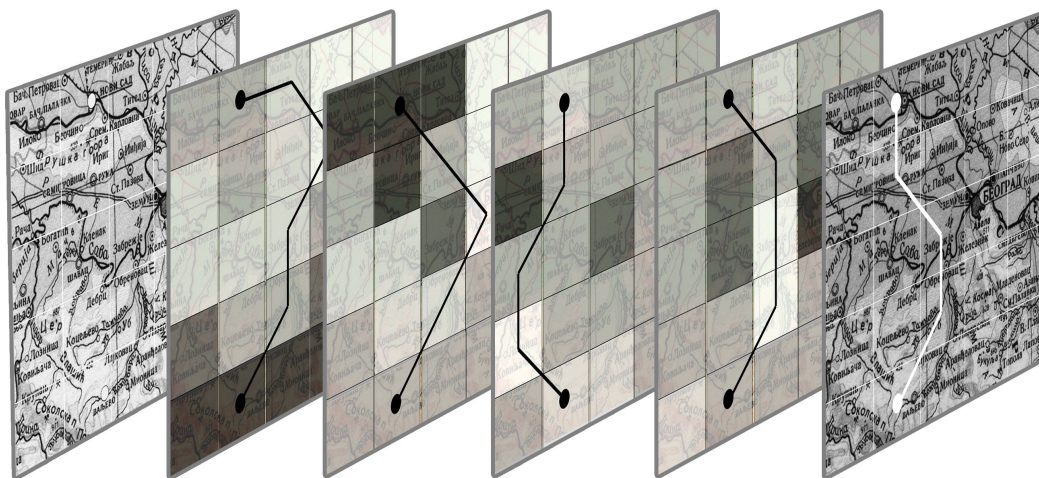
Na slici 5.42. prikazana je rukom ucrtana putanja dobijena na bazi putanje sa mnogo većim brojem oblasti. Ova putanja se od programske razlikuje samo po tome što ne postoje pojedini prenaplašeni uglovi koji nastaju spajanjem centara posmatranih

oblasti. Na ovoj putanji se još bolje sagledavaju svi realizovani uslovi u skladu sa početnim zahtevima.

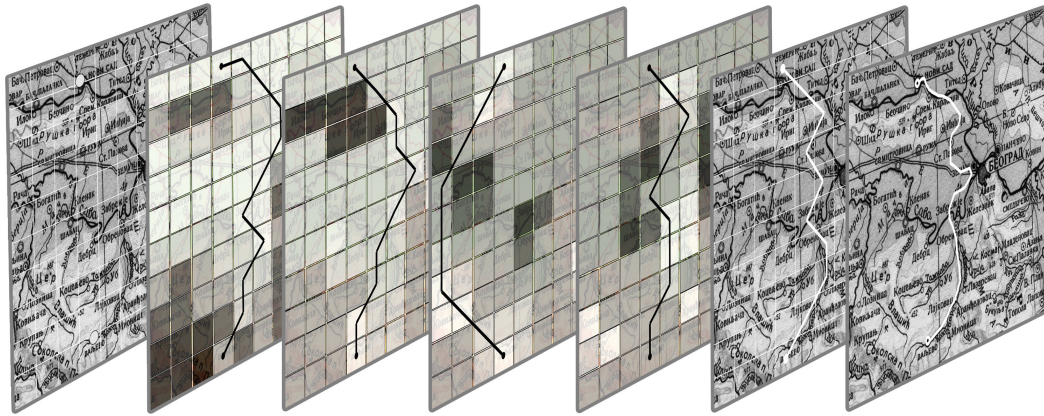


Slika 5.42. Prikaz putne trase (na fizičkoj karti /dorađene ručno) dobijen višekriterijumskom optimizacijom svih ulaznih parametara za kartu sa 10x10 oblasti.

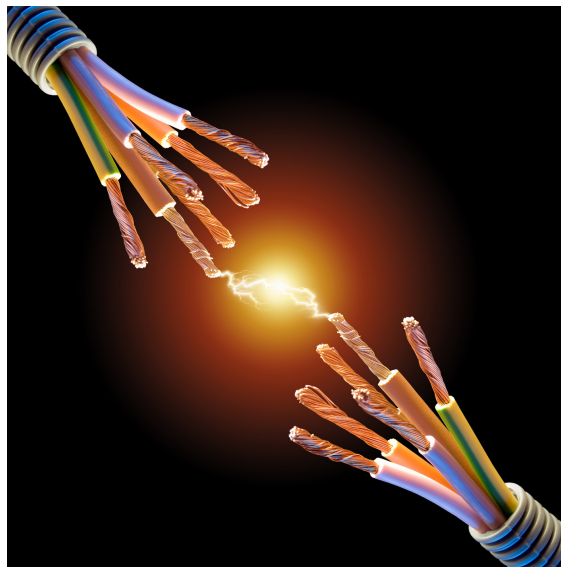
U skladu sa paralelnim načinom prikaza kod višekriterijumskih rešenja, na slikama 5.43 i 5.44. prikazana je početna mapa, putanje za svaki od pojedinih parametara i konačna putanja dobijena na bazi višekriterijumske optimizacije. Ovakvim prikazom jasno je da je putna trasa nelinearna kombinacija pojedinačnih putanja i da se mora pronaći primenom sofisticiranije metode od klasičnih analitičkih.



Slika 5.43. Slojeviti prikaz putne trase dobijen višekriterijumskom optimizacijom svih ulaznih parametara za kartu sa 10x10 oblasti.



Slika 5.44. Prikaz putne trase, uz dodatak karte sa rukom ucrtanom putanjom, dobijen višekriterijumskom optimizacijom svih ulaznih parametara za kartu sa 10x10 oblasti.



<http://www.freegreatpicture.com/lightning-and-optical/optical-fiber-cable-6300>

6. Primena Hopfield-ove neuralne mreže u rešavanju problema rutiranja u potpuno optičkim mrežama

Optičke komunikacije u ovom trenutku predstavljaju jedan od najsofisticiranih i najefikasnijih oblika telekomunikacione infrastrukture [SIMM08, ILYA03, MEKH97]. Skoro sve razvijene zemlje su svoje putne mreže zasnovali na ovoj tehnologiji, što pokazuje njen neprikosnoveni položaj u komunikacionim mrežama. Ekspanzija najrazličitijih vrsta korisničkih ali i mrežnih servisa uslovlila je potrebu da korisnički optički priključci stignu što bliže do krajnjeg korisnika [ZHU03, STER00].

Na taj način se omogućuje da krajnji korisnici imaju izuzetno širok spektar mogućnosti u smislu broja i kvaliteta usluga.

Optičko vlakno omogućava prenos velike količine podataka, što najčešće premašuje očekivane potrebe korisnika [SIMM08, ILYA03, ZHU03]. Međutim, sve veći broj korisnika, i sve zahtevniji tehnički uslovi za pojedine servise polako zauzimaju raspoložive kapacitete [ZHU03]. Iz tog razloga danas su sve aktuelnija pitanja koja se odnose na problematiku rutiranja i racionalnog trošenja optičkih resursa jer se optimalnim korišćenjem može omogućiti dodatni protok na postojećoj infrastrukturi [TORN11, GALD10, STER00].

U daljem tekstu će, u kraćim crtama, biti prikazana organizacija i arhitektura optičkih sistema nakog čega će biti dat pregled tehnika rutiranja kao i problemi, prednosti i mane pojedinih rešenja.

Polazeći od prednosti i mana ovih rešenja, predložiće se jedno rešenje za rutiranje u optičkim mrežama bazirano na Hopfield-ovoj neuralnoj mreži.

6.1. Arhitektura optičkih mreža

Telekomunikacione mreže su neophodne da bi omogućile najrazličitije oblike komunikacija između korisnika. Mreža koje je do sada tradicionalno omogućavala prenos signala i govora je telefonska mreža. Kroz ovu mrežu može se preneti ATM (*Asynchronous Transfer Modem*) i IP (*Internet protocol*) saobraćaj zato što zahtevaju slične raspodele resursa [FICH04, COME06]. Međutim, ove mreže su ograničene svojim kapacitetom i brzinom, i vrlo intenzivno „ustupaju“ mesto optičkim sistemima [MEKH97]. Uvođenjem optičkih mreža dobila se mogućnost prenosa kako ova dva servisa tako i velikog broja dodatnih servisa. Ovo je omogućeno zahvaljujući opštim karakteristikama optičkih mreža: veliki propusni opseg, mali gubici u prenosu, niža cena infrastrukture, imunost na šum i elektromagnetne interference, fleksibilnost, lakša mogućnost održanja zahtevanog kvaliteta nivoa signala na većim rastojanjima, kompaktnost, sigurnost, privatnost i otpornost na koroziju [SIMM08, STER00, ILYA03].

Da bi optička mrežna infrastruktura mogla da omogući distribuciju sadržaja širokog spektra i heterogenosti, a istovremeno i geografske rasprostranjenosti, mreža mora zadovoljiti veliki broj zahteva, od koji su neki kategorisati kao [STER00]:

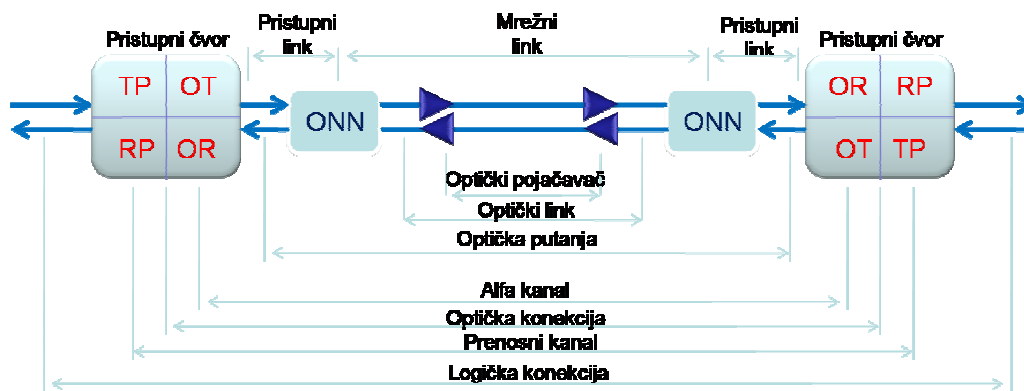
1. Konekcija sa aspekta krajnjih korisnika (Podrška velikom broju krajnjih korisnika, Podrška velikog broja različitih tipova konekcija po svakoj krajnjoj tački, Omogućavanje efikasnog rada više različitih servisa),
2. Kvalitetne performanse (Izuzetno velike brzine među čvornim mestima (reda stotina terabita u sekundi), Velike brzine krajnjih korisnika (reda gigabita u sekundi), Mala kašnjenja na ukupnoj putanji, Visok nivo odnosa signal-šum, mali broj grešaka, Malo vreme procesiranja u čvorovima, Adaptivnost u pristizanju podataka različitim brzinama, Brza detektovanja i popravke grešaka),
3. Strukturne karakteristike mreže (Skalabilnost, Mogućnost proširenja posredstvom modula, Ispravan rad mreže i nakon "ispadanja" pojedinih delova),
4. Tehnološke karakteristike (Mali broj optičkih primopredajnika u prijemnim stanicama, Ograničena kompleksnost optičkih primopredajnika, Ograničen broj i dužina optičkih kablova, Efikasno korišćenje optičkog spektra).

Da bi se sve ove karakteristike i zahtevi paralelno realizovali pogodno je rad optičke mreže podeliti u više logičkih slojeva. Na slici 6.1 prikazana je jedna od mogućih podela u formi logičke arhitekture mreže [STER00] .

Virtuelna konekcija – Aplikacioni nivo		
Logički sloj	Logička putanja	
	Logička konekcija	
Fizički sloj	Optički sloj	Formiranje kanala za prenos podataka
		Formiranje optička konekcija
		Formiranje λ - Kanala
		Formiranje optičke putanje
	Sloj vlakna	Optičko vlakno (link)
		Optički uređaji za konekciju i prenos

Slika 6.1. Jedna logička arhitektura rada optičke mreže.

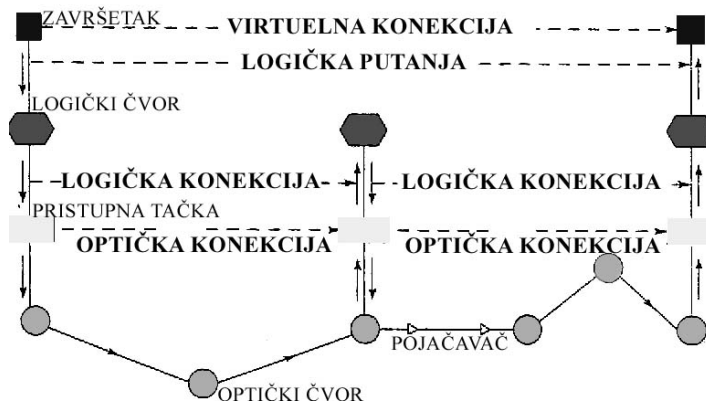
Najniži sloj, fizički sloj tj. vlakno, ima ulogu da prenose nestruktuiran niz podataka. Svi među slojevi, do Aplikacionog nivoa, imaju ulogu da omoguće kvilitetan i pouzdan prenos korisničkih podataka. Ako se predložena logička organizacija, posmatra u kontekstu realnog prenosa signala, onda se mogu uočiti sledeći elementi u prenosu signala [STER00], kao na slici 6.2.



Slika 6.2. Organizacija logičke arhitekture unutar optičke mreže.

Pristupni čvor, na slici 6.2, može biti ili krajnji korisnik ili jedan od rutira u mreži, čime se mreža modularno proširuje. Bez obzira na funkciju, svaki čvor ima jedan dolazni i jedan odlazni link. Ako je posmatrani čvor, čvor nižeg prioriteta u mreži, onda je on posredstvom pristupnog linka povezana sa rutirajućim čvorom, tj. čvorom višeg prioriteta. Između ovih čvorova definisan je optički link, koji u sebi ima niz optičkih pojačavača. Alfa kanal definiše putanju od predajnika do prijemnika željenog uređaja, posmatrano sa aspekta fizičke veze, dok termin Logička konekcija predstavlja skup tehnika kojima se podaci između dve tačke fizički razmenjuju. Prenosni kanal i Optička konekcija se među koraci koji preciznije definišu faze prenosa signala kroz mrežu.

Za grafičko predstavljanje konkretnog ostvarivanja optičke veze može se koristiti dijagram na slici 6.3 [STER00]. Ovaj, uprošćeniji način komunikacije, prikazuje najbitnije elemente u postupku ostvarivanja veze, između izvorišnog i destinacijskog čvora.



Slika 6.3. Tipični način ostvarivanja konekcije unutar optičke mreže.

Ovako predstavljen vid uspostavljanja logičke veze, može se koristiti kao generički model, što znači da se može primeniti u svim tipovima optičkih mreža, ali se dodatno može modifikovati shodno različitim zahtevima [STER00]. Osnovna razlika je bazirana na topologiji mreže, što uslovljava složenost algoritama, posebno u logičkoj konekciji, zaduženog za određivanje putanje prenosa signala.

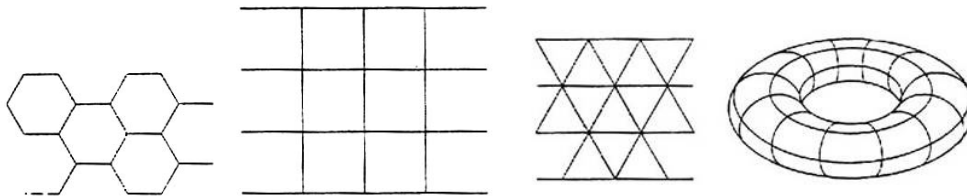
6.2. Topologija mreže i njeno modelovanje

Topologija mreže je jedan od bitnih faktora koji uslovljava optimalnu primenu nekog algoritma za rutiranje unutar mreže. Optimalnost konačnog rešenja se može sagledati kroz zadržavanje nivoa signala, obezbeđivanje maksimalnog mogućeg odnosa signal-šum, minimalno vreme propagacije, efikasno iskorišćenje spektra i mogućnost prenosa signala bez obzira na eventualne promene u topologiji mreže itd [STER00, ILYA03, GALD10, MEKH97]. U tom kontekstu analizira se optimalna konfiguracija mreže tj. njen model. Najpoznatiji modeli su Moore-ovi grafovi [BROU11, STER00]. Moore definiše promenljivu V kao broj čvorova mreže i E kao broj linkova u mreži. Parametar A je broj linkova koji se stiču u datom čvoru. Ovaj parametar bi trebalo održavati malim zato što fizička cena čvora naglo raste sa promenom broja linkova. Parametar D je najveće rastojanje između dva čvora u mreži. S obzirom da ovaj parametar direktno utiče na slabljenje kvaliteta signala ovaj parametar treba da bude što je moguće manji. Na ovim parametrima Moore zasniva svoju relaciju i definiše maksimalni broj čvorova N (red mreže) kao [STER00]

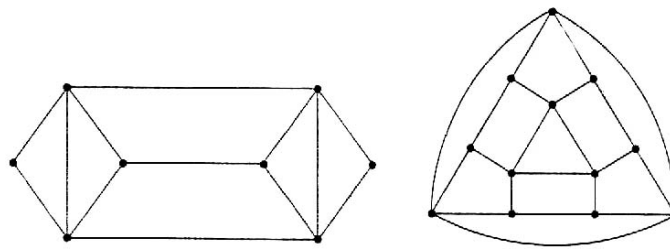
$$N_{Moore}(\Delta, D) = 1 + \Delta \sum_{i=0}^{D-1} (\Delta - 1)^i = \frac{\Delta(\Delta - 1)^D}{\Delta - 2} - 2, \Delta > 2 \quad (6.1)$$

Najveći broj mreža je potpuno povezan graf pa samim tim Moore-ov parametar D je 1. Mreže sa parametrom $D=2$ su već mnogo ređe i za recimo $\Delta=3$ kao i za $\Delta=7$ postoji samo po jedan Moore-ov graf.

Sa aspekta Moore-ovih grafova najoptimalniji raspored čvorova bio bi u mrežama koje imaju veliki stepen simetrije. Na slici 6.4 prikazani su neki primeri grafova koji su u dvodimenzionalnim ravnima dok je u poslednjem primeru uvedena i treća koordinata. Dve varijante mreža koje su dosta „gušće“ strukture su deBruijn i Kautz gde se na proizvoljan način mogu zadavati parametri D i Δ [STER00]. Na slici 6.5 prikazana su dva grafa koji predstavljaju deBruijn-ove i Kautz-ove grafove sa parametrima $\Delta=4$ i $D=3$.



Slika 6.4. Primeri Moore-ovih grafova.



Slika 6.5. Primeri deBruijn-ovog i Kautz-ovog grafa.

6.3. Prenos informacija u optičkim mrežama

Optička mreža je definisana kao komunikacioni sistem u kome se koristi svetlosni signal, umesto električnog, da bi se informacija poslala od jedne do druge tačke [MEKH97]. U tom procesu, svetlosni signal može prolazi kroz niza optičkih vlakana, pojačavača, rutera i drugih elemenata optičke mreže. Da bi prenos signala bio

pouzdan, a resursi mreže maksimalno iskorišćeni, neophodno je da se definiše procedura po kojoj će se vršiti prenos informacija kroz optičku mrežu. Ova procedura treba da definiše kriterijume, pravila i način kako se vrši uspostavljanje svetlosnog puta i prenos podataka. Za mrežu koji ima veći broj komponenata mreža i korisnika ova procedura postaje protokol za rutiranje [BERN03].

U skladu sa fizičkom i logičkom arhitekturom mreže, jedan od bitnih koraka kod primene protokola za rutiranje je definisanje topologije mreže, koja će obezbediti fizički sloj. Mrežna topologija pored broja čvorova, i linkova kojima su čvorovi povezani, podrazumeva i tip optičkog vlakna tj. broj talasnih dužina koje su na raspolaganju za prenos signala, što često zahteva primenu složenih algoritama za rutiranje. Polazeći od ovih početnih uslova, sledeći korak u komunikaciji dve tačke u mreži predstavlja proces rutiranja, tj. pronalaženja i ostvarivanja logičke konekcije [SIMM08, STER00].

Svelosni put predstavlja potpunu optičku konekciju od izvorišnog do odredišnog čvora. Uspostavljanjem ovakve veze, na svim linkovima se rezerviše talasna dužina na kojoj se informacija prenosi, i ona ostaje nedostupna za sve druge prenose. Završetkom pomenutog prenosa ova talasna dužina se stavlja na raspolaganje za neki od sledećih prenosa. Cilj koji se teži postići u optičkim mrežama je da se celokupna putanja zadrži u optičkom domenu. Ranije, ali i neke od aktuelnih optičkih mreža imaju proces opto-električne konverzije u tranzitnim čvorovima da bi postupak rutiranja i odlučivanja bio obavljen u električnom domenu. Razvojem WRON (*Wavelength Routed Optical Networks*) ceo postupak prenosa i rutiranja ostaje u domenu optičkog signala [ZHAN00].

Slanje svetlosti kroz jedno optičko vlakno može se realizovati na više načina, u smislu talasnih dužina, što uslovljava tehnologija izrade optičkog vlakna. Omogućavanjem da se jedno vlakno može koristiti za više talasnih dužina svetlosti, kapacitet prenosa signala i iskorišćenost vlakna je dodatno povećana. Ovakav način prenosa omogućen je razvojem WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) tehnologije [MURT02, MUKH00, GALD10].

Matematički modelovano, svaka mreža može se posmatrati kao skup od M linkova između pojedinih čvorova mreže (u realnoj implementaciji to se odnosi na rutere u mreži) u oznaci $l_i=[s_i;d_i]$ gde su s_i i d_i početni i krajnji čvor linka l_i . Tada oznaka $(s_i;d_i)_k$ može označavati logičku putanju između čvorova s i d na talasnoj dužini k .

Uvodeći oznake: N - broj čvorova, L - broj linkova, F - broj parova optičkih vlakana koji je isti za svaki link, W - spektar određenog broja talasnih dužina, WF - izraz koji će predstavljati kapacitet linka, mogu se definisati neki opšti kriterijumi i pravila kod presona signala kroz optičku mrežu [STER00].

Posmatrajući neku od putanja $d(s_i, d_i)$ koja predstavlja rastojanje između izvorišnog i destinacijskog čvora za neku konekciju c_i sumu $\sum^d = \sum_{i=1}^M d(s_i, d_i)$ nazivamo ukupnim rastojanjem za datu konekciju, tj. svetlosni put [STER00]. Posmatrajući monomodna vlakna, s obzirom na pretpostavku da je pri prolasku kroz vlakno ukupan kapacitet vlakna zauzet, dužina date veze može se iskazati kao $2LFW$ gde je 2 pokazatelj da za svaku vezu moraju biti obezbeđena dva vlakna za dvostranu vezu, L je broj linkova kroz koje se ostvaruje veza i WF kapacitet linka [STER00], imamo

$$\sum_d 2LFW \Rightarrow W \geq \frac{\sum^d}{2LF} \quad (6.2)$$

Iz ovih relacija dobija se minimalan broj talasnih dužina potreban za ostvarivanje date konekcije. Ukoliko je konekcija c_i imala H_i skokova definiše se ukupan broj skokova za skup od M konekcija kao $\sum^H = \sum_{i=1}^M H_i$, pri čemu je prikladnije posmatrati srednju vrednost broja skokova definisanu kao $\bar{H} = \sum^H / M$. Takođe se definiše i srednja vrednost parametra Δ kao $\bar{\Delta} = 2L / N$. Tada je najniža granica za ukupan broj talasnih dužina u mreži data kao [STER00]

$$W_{Net} = \frac{\sum^H}{2LF} \frac{N}{N} = \frac{M\bar{H}}{\bar{\Delta}NF} \geq \frac{\sum^d}{\bar{\Delta}NF} \quad (6.3)$$

Ovaj restriktivni faktor utiče na stalni raznoj algoritama za rutiranje kako bi se ovako ograničeni načini prenosa maksimalno klavitetno iskoristili unutar jednog sistema [QIN03, BERN03, MURT02, MUKH00]. S tim u vezi definišu se i dva pojma koja se odnose na pomenute načine slanja podataka.

Rutiranje u optičkim mrežama može biti ograničeno i mogućnošću promene talasne dužine u čvoru mreže [MEKH97, QIN03]. Naime, cena uređaja koji mogu da menjaju talasnu dužinu signala u toku njegovog prenosa je skuplja od varijanti kada se koristi ista talasna dužina. Uslovljavanje za konzistencijom talasne dužine unosi dosta rigorozan uslov sa aspekta racionalnog iskorišćenja resursa mreže, naročito u

situacijama dinamičkog okruženja i velike fluktuacije broja korisnika i količine saobraćaja. Sa druge strane, cena mreže u kojoj bi svaki čvor mogao da shodno potrebama rutiranja dolaznu talasnu dužinu konvertuje i drugu odlaznu, je relativno skupa. Iz tog razloga, najšea situacija u relanim mrežama je kombinacija jedne i druge tehnologije tj. pojedine čvorne tačke imaju mogućnost konverzije talasnih dužina dok određen deo drugih to nema. Ovo omogućava da se dalji problem efikasnog rutiranja premesti sa domena tehnologije i ograničenja u fizičkoj realizaciji na drugi nivo: logički. Na taj način postupak rutiranja i složenost algoritma za rutiranja treba da obezbedi maksimalno dobro iskorišćenje svih resursa mreže u realnom vremenu [BERN03, ZHAN00].

6.3.1. Osnovne tehnike rutiranja u optičkim mrežama

Jedna od osnovnih podela u tehnikama rutiranja je na statičko i dinamičko rutiranje [ZHAN00, STER00, BERN03].

U statičkom rutiranju podrazumeva se veza tipa point-to-point, na nivou logičke konekcije, između dve pristupne tačke. Kod ovakvog tipa rutiranja, potrebno je unapred definisati način rutiranja signala za sve parove tačaka u mreži, čime se dobija logički povezan graf. Kod ovog tipa rutiranja se pretpostavlja da je veza između jednog para čvorova relativno dugo postojana, pa je i opravdano traženje putanje koje samo po sebi zahteva određeno vreme za proračun, ali se neće često ni menjati. Ovakvo rutiranje je unapred definisano i ne uzima u obzir stanje u mreži.

Sa druge strane, dinamičko rutiranje predstavlja način da se putanja odredi na bazi određenog broja realnih parametara i to onog trenutka kada je zahtev za određenu konekciju stigao. Na taj način nema garancije da će se za isti par čvorova putanja ponoviti ali je omogućeno da se nova putanja formira na bazi aktuelnog stanja mreže i na taj način pokuša što racionalnija raspodela resursa optičke mreže [KOJI08b, KOJI07c].

Da bi se postupak rutiranja uspešno sproveo do kraja potrebno realizovati četiri koraka:

1. Definirati izvorišni i odredišni čvor
2. Odrediti putanju kojom će se vršiti prenos,

3. Odrediti i zauzeti određenu talasnu dužinu, ili više njih na različitim deonicama,
4. Poslati/Primiti svetlosni signal.

Ovaj problem rutiranja poznat je pod imenom *RWA (Routing and Wavelength Assignment)* [STER00, ZHAN00, MUKH00, MURT02, BERN03]. Postoji veliki broj predloženih rešenja za ovaj problem, koji se u osnovi mogu podeliti na dva tipa:

- Rutiranje u odnosu na saobraćaj i
- Rutiranje u odnosu na talasne dužine.

Rutiranje u odnosu na saobraćaj može biti:

1. SLE (*Static Lighpath Establishment*)
2. DLE (*Dynamic Lighpath Establishment*)

Kod SLE metode podrazumeva se poznat i stalan saobraćaj po linkovima. Pored matrice saobraćaja (obim saobraćaja po svakom od linkova) na početku samog postupka potrebno je poznavati i topologiju mreže. Cilj je minimizirati mrežne kapacitete potrebne za dati saobraćaj pre nego što mreža počne da se koristi, tj. minimizirati sumu

$$\sum_{P_{sd} \in P} \sum_{\lambda \in W} CP_{sd}^{*\lambda} \quad (6.4)$$

gde je P skup svih putanja, W skup svih talasnih dužina na svakom od vlakana, P_{sd} svetlosni put od izvorišta do odredišta, CP_{sd}^{λ} kapacitet putanje P_{sd} na talasnoj dužini λ gde je iskorišćen minimalan broj talasnih dužina od svih ponuđenih linkova i $CP_{sd}^{*\lambda}$ kapacitet putanje na talasnoj dužini λ nakon uspostavljanja svetlosnog puta.

Ovi proračuni, koji za posledicu imaju određivanje ruta i njima dodeljene talasne dužine, rade se u *offline* režimu.

Suprotno od SLE, DLE je pogodan za promenljiv saobraćaj. Kod ove metode topologija mreže je poznata pre početka odlučivanja (po nekada topologija može biti promenljiva), ali matrica saobraćaja nije. Cilj je maksimizirati slobodne mrežne kapaciteta u svakom trenutku kada se pojavi novi zatev za prenos kroz mrežu tj. maksimizirati razliku

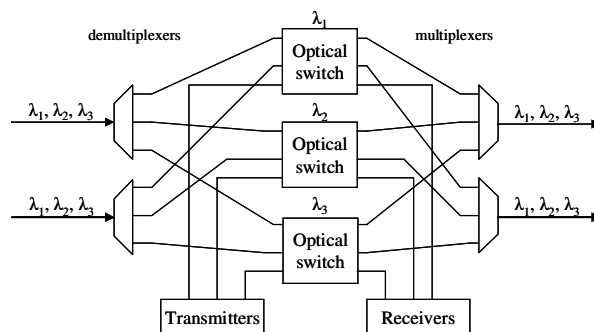
$$\sum_{P_{sd} \in P} \sum_{\lambda \in W} CP_{sd}^{\lambda} - \sum_{P_{sd} \in P} \sum_{\lambda \in W} CP_{sd}^{*\lambda} \quad (6.5)$$

Sa druge strane, rutiranje u odnosu na talasne dužine može se podeliti na:

- Rutiranje sa promenom talasnih dužina u čvorovima mreže i
- Rutiranje bez promene talasnih dužina u čvorovima mreže.

Upotrebom konverzije talasnih dužina dobija se mnogo veći skup mogućih rešenja u problemu rutiranja [MEKH97]. Na ovaj način pojedine talasne dužine i linkovi mogu se mnogo efikasnije upotrebiti nega kada su one rezervisane za jednu talasnu dužinu duže celog puta svetlosti. Sa druge strane ovakav način traži neki vid centralizovanog nadgledanja, ili mehanizme kojima pojedini čvorovi u mreži mogu da znaju sve o susednim čvorovima i njihovim talasnim dužinama i konačnim putanjama koje prolaze preko nekog *point-to-point* linka. Takođe se povećava složenost a i vreme procesiranja u samom čvoru. Sa druge strane dva čvora, i link među njima, imaju potpunu slobodu u cilju izbora talasne dužine za dolazeće signale, i svakako kao posledicu veći koeficijent iskorišćenja linka. U literaturi postoji više tipova talasne konverzije [MEKH97, STER00, BERN03]. Tri osnovne kategorije su:

1. Potpuna konverzija (*Full Conversion*) gde se svaki od dolaznih signala konvertuje u neki od ponuđenih izlaznih
2. Ograničena konverzija (*Limited Conversion*) gde se dolazni signala konvertuju u tačno određenu podgrupu izlaznih talasnih dužina
3. Fiksna konverzija (*Fixed Conversion*) gde se za svaki od dolaznih signala konverzija vrši u tačno definisanu izlaznu talasnu dužinu.



Slika 6.6. Arhitektura rutera talasnih dužina.

Bez obzira na tip konverzije, ruter koji ima mogućnost promene talasne dužine ima zadatak da dolazni saobraćaj na talasnoj dužini λ_i nakon konverzije prenese na

talasnoj dužini λ_j . Jedno moguće rešenje realizacije ovakvog rutera je objavljeno u [MEKH97] i prikazano na slici 6.6.

Upotrebom mreže koja ne vrši konverziju talasnih dužina, već za celu putanju unapred definiše jedinstvenu koju zauzima do prestanka procesa prenosa povećava se verovatnoća blokade i znatno degradira karakteristike mreže [STER00, ZHAN00, MUKH00, MURT02, BERN03]. Problem se može manifestovati kroz više načina:

Na nekim od linkova postoji mogućnost slanja zahtevanom talasnom dužinom, ali je putanja do tog linka na toj talasnoj dužini nemoguća,

Može se desiti da je putanja kroz mrežu suviše velika i komplikovana zbog zahteva za primenu samo jedne od talasnih dužina,

Lako se mogu stvoriti „uska grla“ na linkovima koji imaju manji broj ponuđenih talasnih dužina ili je posmatrana talasna dužina često korišćena u mreži itd.

Na ovaj način neki od najvažnijih parametara mreže nekada se moraju zanemariti da bi se putanja uopšte i uspostavila. Primenama rerutiranja talasnih dužina ovi problemi se izbegavaju, pa parametri kao što su broj hopova, kašnjenje, zagušenja i slično ponovo postaju relevantni parametri u procesu odlučivanja.

6.3.2. *Algoritam Routing and Wavelength Assignment*

Kako je već napomenuto, najčešći način rutiranja u optičkim mrežama je baziran na dve faze: Rutiranju i Dodeli talasnih dužina [STER00, ZHAN00]. Ova dva procesa najčešće se dešavaju nezavisno i svaki za sebe ima veći broj načina kako se može realizovati [KOJI07a].

Podela algoritama za selekciju rute može se izvršiti na pet glavnih pod kategorija [ZHAN00, MARK01, MEKH97]:

1. Fiksno rutiranje (*Fixed Routing* - FR)
2. Fiksno Alternativno rutiranje (*Fixed Alternate Routing* - FAR)
3. Iscrpljujuće rutiranje (*Exhaust Routing* -ER)
4. Najmanje opterećena putanja (*Least congested path routing* -LCPR) i
5. Istovremena selekcija talasne dužine i rute (*Joint Wavelength Route Selection* - JWRS)

1. Algoritam FR podrazumeva unapred definisane putanje za svaku od kombinacija izvor-odredište. Kada dođe zahtev za upotrebu te rute mreža će uspostaviti svetlosni put za prenos podataka. Ukoliko se desi da na bilo kom od linkova unapred definisana talasna dužina ne može da se obezbedi, konekcija će biti neostavriiva. Prednosti ovakvog načina rutiranja su: brzo rutiranje, kratko vreme potrenmo za definisanje putanja, lak postupak implementacije. Mane su: veliki procenat blokada i neotpornost na promene u mreži.
2. Algoritam FAR je modifikacija algoritma fiksnog rutiranja. Svaka od putanja se takođe računa pre početka rutiranja u mreži, ali se sada za svaki od parova izvor-odredište odredi skup mogućih ruta koji predstavlja podskup svih mogućih ruta za vezu datog para čvorova. Jedna od ruta kandidata biće odabrana na zahtev za uspostavljanje veze. Prednosti ovakvog načina rutiranja su: brzo rutiranje, mogućnost izbegavanja putanja koja je trenutno nedostupna, relativno prost način rutiranja i smanjenje broja blokada.
3. Algoritam ER daje poboljšanje u odnosu na prethodna dva metoda. Kod ovog načina rutiranja mreža mora da omogući prosleđivanje trenutnih podataka i da se njihova eventualna promena dinamički detektuje. Na osnovu podataka i stanja svih linkova u mreži definišu se sve rute koje postoje od izvorišnog do destinacijskog čvora. Tada se na osnovu kriterijuma svake od ruta bira najbolja ruta kojom se vrši prenos zahtevanog saobraćaja. Sam proces odlučivanja najčešće je zasnovan na Dijkstra algoritmu. Prednosti ovakvog načina rutiranja su: Mala verovarnoća blokade u mreži i poboljšane karakteristike FR i FAR metoda. Mane su: sporije odlučivanje i poreba za saznavanjem svih promena i stanju u mreži.
4. Kod metode LCPR postoji grupa unapred definisanih putanja od izvornog ka odredišnom čvoru. Kada se pojavi zahtev za prenos nekog signala algoritam pronalazi najbolju od ponuđene grupe putanja po kriterijumu najmanjeg opterećenja sa stanovišta upotrebe talasnih dužina. Tako linkovi koji imaju manje talasnih dužina na kojima se šalju drugi signali u tom trenutnu postaju više verovatni da će biti izabrani kao najpovoljniji. Prednosti ovakvog načina rutiranja su: mala verovarnoća blokade u mreži i poboljšane karakteristike FR i

FAR metoda. Mane su: kompleksno odlučivanje i poreba za saznavanjem svih promena i stanju u mreži.

5. Poslednji tip iz ove grupe algoritama je metod JWRS. Ovaj algoritam je baziran na nedostacima prethodnih, pri čemu su sve dobre karakteristike zadržane. Ranije opisani algoritmi posmatraju pojedinačno putanju i talasnu dužinu, ili zajedno ali po nekom redosledu prioriteta. Međutim pokazalo se da je uporedno poređenje i odlučivanje mnogo kvalitetnije [MARK07]. Pored toga što rutu i talasnu dužinu posmatra istovremeno, algoritam ova dva parametra vidi kao grupu parametara. Na taj način ruta se opisuje sa više potencijalnih parametara. Najčešće korišćeni parametri su: broj hopova, kapacitet, kašnjenje, verovarnoća zauzetosti, verovatnoća otkaza itd, dok se talasna dužina opisuje parametrom najveće-najmanje korišćenosti, prostorne raspodeljenosti itd. Na osnovu svih ovih parametara istovremeno se izračunava konačna cena za svaku od ponuđenih putanja koja uključuje i putanju i talasnu dužinu. Nakon definisanja cena za sve linkove a samim tim i putanje, bira ce putanja sa najmanjom cenom. Ukoliko se neki parametri žele manje ili više istaći, podaci koji ih opisuju se množe nekim faktorom skaliranja, čime se izbegava prioriteto dominiranje pojedinih karakteristika. Prednosti ovakvog načina rutiranja su: Mala verovarnoća blokade u mreži i Poboljšane karakteristike FR, FAR i LCR metoda. Mane su: kompleksno odlučivanje i potreba za saznavanjem svih promena i stanju u mreži.

Opisani metodi se odnose na realizaciju prve faze RWA procesa tj. rutiranje. Drugi deo ovog procesa, dodela talasnih dužina, se takođe može realizovati na nekoliko razčitih načina. U literaturi postoji veći broj ponuđenih metoda, ali se najčešće podela sastoji od [ZHAN00, MARK01, MEKH97]:

1. *Fixed order (first fit) assignment* – FF
2. *Most used assignment* - MU
3. *Least used assignment* – LU
4. *Random order assignment*- RO
5. *Maximal sum* - MS
6. *Relative capacity loss* - RCL

1. Algoritam FO podrazumeva da je unapred definisana lista prioriteta pojedinih talasnih dužina, i po toj listi se vrši dodela. Jedini kriterijum koji se koristi je eventualna zauzetost konkretne talasne dužine, kada se uzima sledeća sa liste.
2. Algoritam MU pretražuje zastupljenost talasnih dužina na svakom od linkova, počevši od one talasne dužine koja je najzastupljenija.
3. Algoritam LU pretražuje zastupljenost talasnih dužina na svakom od linkova, počevši od one talasne dužine koja je najmanje zastupljena.
4. Algoritam RO podrazumeva dodelu talasne dužine, iz skupa ponuđenih, po slučajnom izboru.
5. MS i RCL algoritmi se uglavnom preporučuju za multi-fiber networks [BARR97, ZHAN98]. MS algoritam ima za cilj da maksimizuje preostale kapacitete na linkovima, nakon uspostavljanja svetlosnog puta. Kapacitet putanje je suma svih pojedinačnih kapaciteta linkova za sve talasne dužine na njima, dok se kapacitet putanje na talasnoj dužini λ_i definiše kao broj vlakana na kojima je talasna dužina λ_i dostupna za novu putanju. MS na taj način pokušava da odabere talasnu dužinu tako da i nakon njenog zauzimanja ostane relativno dovoljno kapaciteta za naredne svetlosne puteve.
6. Sa druge strane RCL je baziran na MS sa ciljem da minimizuje gubitke u kapacitetu. Ovaj algoritam treba da uzme u obzir dinamiku u dostupnom kapacitetu, pre ali i nakon zauzimanja nekih talasnih dužina po linkovima, za ostvarivanje budućih konekcija.

Pored svih tehnika i algoritama koji su izloženi nameće se potreba za još sofisticiranijim načinima rutiranja koji bi dodatno unapredili dobre karakteristike postojećih i smanjili njihove potencijalne mane [FILH11, GAO03, WANG00]. Najveći prostor za dalji intezivni napredak je u postupku rerutiranja talasnih dužina u čvorovima. Ovaj postupak treba da minimizira broj promena talasnih dužina u toku svetlosne putanje uz zadržavanje kvaliteta originalnog signala. Na taj način, uz dodatnu centralizaciju cele mreže, raspodela resursa i eventualna potreba za rerutiranjem trebala bi da obezbedi najracionalniju upotrebu postojećih resursa, smanji verovatnoću blokade, i optimalno koristi sve ponuđene kapacitete mreže.

6.4. Primena Hopfieldove neuralne mreže kod rutiranja u optičkim mrežama

Obzirom da Hopfield-ova neuralna mreža pokazuje dobre rezultate u rešavanju optimizacionih problema, a da se problem rutiranja u optičkim mrežama svakako može svrstati u vrlo sofisticirane, nameće se pitanje moguće primene ove neuralne mreže kod rutiranja u optičkim mrežama. Kako je već pokazano da se Hopfield-ova neuralna mreža može koristiti u paketskoj komutaciji kao zamena Dijkstra algoritma, a kako se isti algoritam koristi za npr. algoritam iscrpljujućeg rutiranja, opravdano je očekivanje da će primena veštačkih neuralnih mreža moći da ponudi odgovarajuće rezultate.

6.4.1. Predlog algoritma za selekciju rute za rutiranje u optičkim mrežama baziranog na Hopfield-ovoj neuralnoj mreži

Analizirajući prednosti i mane svih opisanih algoritama za selekciju rute, realizovan je poseban algoritam baziran na Hopfield-ovoj neuralnoj mreži. Ovaj algoritam treba da iskoristi dobre strane iscrpljujućeg rutiranja i algoritma najmanje opterećene putanja ali da omogući delimično prevazilaženje njihovih mana (sporog i kompleksnog odlučivanja) [ZHAN00, MARK01, MEKH97].

Za ove potrebe iskorišćen je Ali Kamounova modifikacija energijske funkcije Hopfield-ove neuralne mreže, definisan relacijom (6.6)

$$E = \frac{\mu_1}{2} \sum_{x=1}^n \sum_{\substack{i=1 \\ (x,i) \neq (d,s)}}^n C_{xi} V_{xi} + \frac{\mu_2}{2} \sum_{x=1}^n \sum_{\substack{i=1 \\ (x,i) \neq (d,s)}}^n \rho_{xi} V_{xi} + \frac{\mu_3}{2} \sum_{x=1}^n \left\{ \sum_{i=1}^n V_{xi} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq x}}^n V_{ix} \right\}^2 + \frac{\mu_4}{2} \sum_{\substack{x=1 \\ x \neq i}}^n V_{xi} (1 - V_{xi}) + \frac{\mu_5}{2} (1 - V_{ds}) \quad (6.6)$$

Polazna pretpostavka je da postoji mreža, proizvoljne topologije (proizvoljan broj čvorova, povezanost linkovima među njima i proizvoljan broj i raspodela talasnih dužina po linkovima) i da je poznata raspodela talasnih dužina po linkovima. U ovakvoj mreži postoji N čvorova mreže (rutera) i skup od W talasnih dužina koje su proizvoljno raspoređene po linkovima.

Cilj predloženog algoritma je pronalaženje putanje na bazi maksimiziranja slobodnog kapaciteta, racionalnog korišćenja postojećih resursa i analizi broja slobodnih

talasnih dužina po linku sa uslovom da se konverzija talasnih dužina minimizuje a kriterijum najkraće putanje zadovolji.

Da bi se relacija (6.6) iskoristila za potrebe selekcije rute na opisani način, uvedene su neophodne modifikacije u implementaciji:

a) Matrica povezanosti ρ je definisana kao

$$\rho_{xi} = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{x,i} (\lambda_z)_{x,i} = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.7)$$

Za sve čvorove mreže $x, i \in N; x \neq i; N = \{1, 2, \dots, n\}$ i sve talasne dužine $\lambda_z, z = 1, 2, \dots, W$.

Na ovaj način vrednost elementa matrice ρ između čvora x i i je 1 ako na tom linku ne postoji ni jedna "slobodna" talasna dužina. Na taj način, neuralna mreža ne analizira linkove na kojima nema dostupnih talasnih dužina i process rada se uprošćava i ubrzava.

b) Matrica C , koja inicijalno predstavlja matricu cena, odnosno njen element C_{xi} sada je definisan kao

$$C_{xi} = \begin{cases} 1 & \text{if } k = 0 \\ 0.7/k & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.8)$$

gde je k vrednost koja zavisi od raspodele talasnih dužina i definisan aje kao

$$k = \sum_z \sum_x \sum_i (\lambda_z)_{x,i} . \quad (6.9)$$

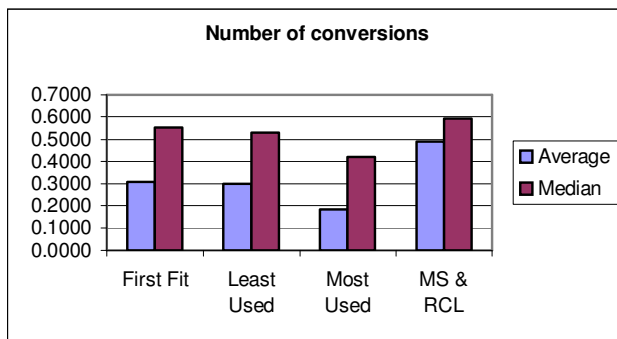
Na ovaj način cena linka koji nema dostupne talasne dužine je 1, tj. kao najveća moguća cena programski će se odbaciti. Sa druge strane, ukoliko se na linku nalazi veći broj dostupnih talasnih dužina, promenljiva k će imati srazmerno veću vrednost, i cena tog linka će biti manja. Na taj način se forsiraju linkovi sa većim brojem talasnih dužina da budu deo konačne putanje. Vrednost 0.7 je izabrana empirijski. Kako je interval mogućih vrednosti za matricu C definisan radom Hoprield-ove neuralne mreže, vrednost 0.5 se nalazi na sredini tog intervala, i može se smatrati neutralnom. U konkretnoj primeni to znači da se konkretan link ne stimuliše da bude u konačnoj putanji. Kako je vrednost 1 maksimalna cena, a kako se konačna cena dobija kao

količnik sa promenljivom k, odabrana je vrednost 0.7, da se linkovi sa malo talasnih dužina ne bi stimulisali. Sa druge strane, linkovima sa većim brojem talasnih dužina (većim od 2), cena linka je manja ili jednaka od 0.35 što direktno stimuliše posmatrani link da bude u konačnoj putanji.

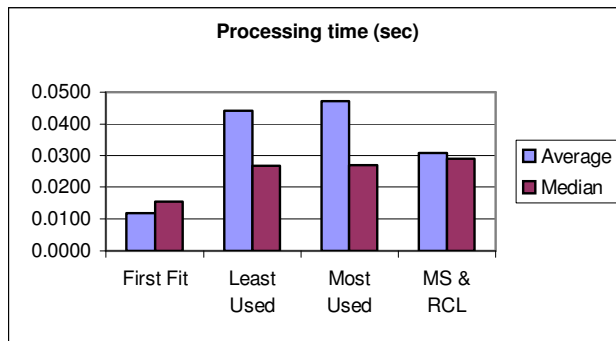
Nakon definisanja algoritma za selekciju rute, primenjeni su standardni algoritmi za dodelu talasnih dužina (FF, LU, MU, MS i RCL). Nakon toga dobijeni rezultati su međusobno upoređeni. Metod MS je primenjen zajedno sa RCL metodom.

Korišćena je topologija mreža koja ima osam čvorova i šest talasnih dužina koje su slučajnom raspodelom dodeljene linkovima. Struktura mreže je generisana programski (random opcijom). U toku merenja rezultata korišćeno je preko 50 različitih topologija, i za svaku je slučajno generisan par izvor-odredište. Za svaku topologiju je definisan scenario od bar četiri izbora para izvor-odredište, bez ponavljanja. Na taj način posmatrano je preko 220 različitih mrežnih situacija.

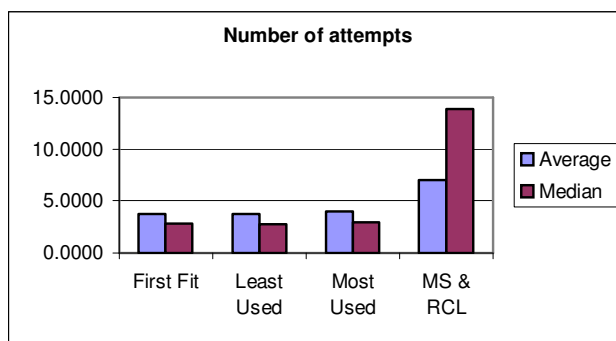
Prvi parametar koji je analiziran je broj konverzija koje su bile potrebne da se realizuju da bi se dobila konačna ruta. Radi lakšeg poređenja, prikazane su srednje vrednosti i standardna devijacija za svaki od analiziranih parametara. Najmanji broj konverzija je imao algoritam MU (0.2 srednja vrednost / 0.4 standardna devijacija), dok je MS&RCL algoritam imao najveći broj konverzija (0.5 / 0.6), slika 6.7.



Slika 6.7. Prosečna vrednost i standardna devijacija broja konverzija za testirane algoritme.



Slika. 6.8. Vreme simulacije na standardnom računaru Pentium IV, 1.5 GHz.



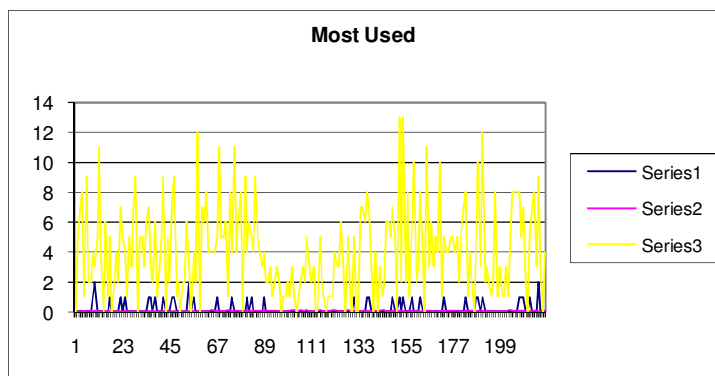
Slika. 6.9. Ukupan broj iteracija potreban za uspostavljanje odabrane putanje.

U postupku simulacije korišćen je računar (standard Pentium IV, 1.5 GHz). Obzirom da je procesorsko vreme vrlo bitno kod algoritama za rutiranje, i taj parameter je posmatran, slika 6.8. Kod koji je realizovan pisan je u Matlab-u, i nije dodatno optimizovan, obzirom da se radi o simulacijama neuralne mreže. Međutim, bez obzira na to, relativno vreme je dobar pokazatelj za različite algoritme u smislu procesorskog vremena potrebnog da se dođe do rešenja. U ovom merenju, FF algoritam je bio najbrži, što je i očekivano obzirom da ne traži nikakvu posebnu logiku prilikom donošenja odluke. Dobre rezultate pokazao je MS&RCL algoritam, dok je najlošije imao algoritam MU.

Posebno bitnu ulogu ima broj iteracija koji je potreban algoritmu da dođe do konačnog rešenja. Naime, ukoliko se nakon postupka primene algoritma dođe do blokade, algoritam se ponovo aktivira da bi pokušao da nađe drugu putanju, i tako redom do uspostavljanja. Na taj način, broj iteracija potrebnih da se dobije konačno rešenje (u jednom ciklusu) nije objektivan parametar ako se ispostavi da taj algoritam

ima veliku verovatnoću blokade. Iz tog razloga, broj iteracija po jednom ciklusu je uvećavan za onoliko ciklusa tj. iteracija koliko je potrebno algoritmu da se uspostavi svetlosni put. Ovaj parametar, nazvan brojem pokušaja, pokazao je da MS&RCL algoritam ima prilično loše karakteristike, dok su drugi međusobno relativno bliski, slika 6.9.

Analizom svih ovih rezultata dolazi se do zaključka da je MS&RCL algoritam vrlo često sa lošijim karakteristikama, dok MU i FF imaju bolje karakteristike u različitim pokazateljima. Ovo je relativno očekivano ako se posmatraju situacije opisane u rezultatima, ali sa druge strane ne može dovesti do zaključka da je MS&RCL algoritam loš, obzirom da jedini vodi računa o pojedinim resursima mreže. Uz to, dinamika promena, potrebnog broja iteracija, za različite topologije ukazuje na vrlo dinamičnu strukturu, slika 6.10, što u realnim uslovima može da predstavlja problem.



Slika 6.10. Potreban broj iteracija za algoritam MU za svaku od 220 posmatranih topologija.

Svi ovi rezultati ukazuju da primena veštačke inteligencije u parcijalnoj primeni ne može umnogome da dovede do poboljšanja pojedinih bitnih karakteristika algoritma, i da se rešenje mora tražiti na potpuno drugom polju. Najveći broj savremenih stručnih radova ukazuje da je paralelni proces izbora rute i dodele talasnih dužina najbolje rešenje, jer sekvencijalni postupak uvek dovodi do ograničenja postupka u drugoj fazi rada [MARK07]. Kako je objedinjavanje ove dve faze složen optimizacioni problem sa velikim brojem parametara, postoji realan osnov da se ovaj problem reši Hopfield-ovom neuralnom mrežom.

6.4.2. Predlog algoritma za rutiranje u optičkim mrežama na principu istovremene selekcije rute i dodele talasnih dužina, baziranog na Hopfield-ovoj neuralnoj mreži

Kao što je već napomenuto u poglavlju 6.3.2, RWA problem se ne mora posmatrati kroz dva odvojene faze, nego je to moguće uraditi i kroz objedinjenu proceduru. U literature se taj algoritam naziva JWRS. Kao još jedan vid implementacije Hopfield-ove neuralne mreže, pozakaće se predloženi algoritam za potrebe rutiranja u optičkim mrežama. Obzirom da je sada potrebno raditi dve faze u jednoj, i obzirom na njihovu suštinsku različitost, predloženo rešenje neće koristiti ni jedan od opisanih algoritama za selekciju rute odnosno dodelu talasnih dužina. Predloženo rešenje ponudiće potpuno nov pristup u rešavanju ovog problema, pri čemu ključnu odluku u odlučivanju ima modifikovani model Hopfield-ove neuralne mreže.

Kao i u poglavlju 6.4.1. polazna pretpostavka je da postoji mreža, proizvoljne topologije (proizvoljan broj čvorova, povezanost linkovima među njima i proizvoljan broj i raspodela talasnih dužina po linkovima) i da je poznata raspodela talasnih dužina po linkovima. Ovaj algoritam pored svih uslova koje je trebalo i prethodno opisani da zadovolji ima dodatne realne uslove i ograničenja:

1. Omogućen je proizvoljan odabir i broj rutera koji rade konverziju talasnih dužina
2. Omogućeno je proizvoljno definisanje težinskih koeficijenata za konverzije iz jedne u drugu konkretnu talasnu dužinu (na primer konverzija iz λ_1 u λ_2 ima težinski koeficijent 0.1 dok konverzija iz λ_1 u λ_5 ima težinski koeficijent 0.3)
3. Omogućeno je da težinski koeficijenti konverzije imaju različite vrednosti, čak i za iste parove konverzija, u različitim ruterima (na primer konverzija iz λ_1 u λ_2 , u ruteru R1, ima težinski koeficijent 0.1 dok konverzija iz λ_1 u λ_2 , u ruteru R2, ima težinski koeficijent 0.2)
4. Omogućeno je da se pojedine konverzije u pojedinim ruterima zabrane
5. Omogućeno je favorizovanje rada bez konverzije, ukoliko je to tehnički moguće u trenutku odlučivanja
6. Omogućeno je da se favorizuje talasna dužina sa kojom se kreće iz izvorišnog čvora, kao i talasna dužina sa kojom se dolazi do odredišnog čvora

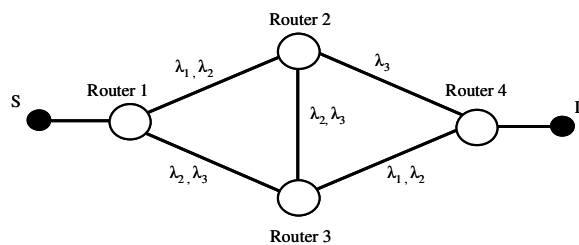
Predloženi algoritam ima nekoliko faza koje se sekvencijalno odvijaju i koje su originalno predložene za ovaj algoritam:

- Modifikacija topologije originalne mreže
- Automatsko kreiranje svih matrica ulaznih faktora u skladu sa modifikovanom topologijom
- Procesiranje ulaznih faktora u Hopfield-ovoj neuralnoj mreži
- Inverzna konverzija izlaznih matrica neuralne mreže dobijene za modifikovanu topologiju
- Grafički prikaz dobijenih rezultata

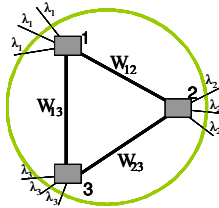
a) *Modifikacija topologije originalne mreže*, podrazumeva primenu kreiranog modela rutera na ukupno topologiju mreže. Kao rezultat se dobija potpuno nova topologija, koja se može koristiti za potrebe rada neuralne mreže.

Predloženi model za svaki od rutera mreže se predstavlja kao posebna podmreža. Ova mreža ima onoliko internih čvorova koliko ima različitih talasnih dužina koje se stiču, preko bilo kod direktno povezanog linka, na ovaj ruter. Ovaj uslov se može uniformno generalisati kao ukupan broj različitih talasnih dužina u mreži. Interni čvorovi mreže su povezani internim linkovima, u oznaci W_{ij} , označavajući težinski koeficijent konverzije između talasne dužine λ_i i λ_j u posmatranom ruteru.

Ako se posmatra prost model mreže, na slici 6.11, sa četiri rutera i tri talasne dužine, gde su ruteri 1 i 4 izabrani za izvorišni odnosno odredišni, predloženi model rutera bi izgledao kao na slici 6.12.

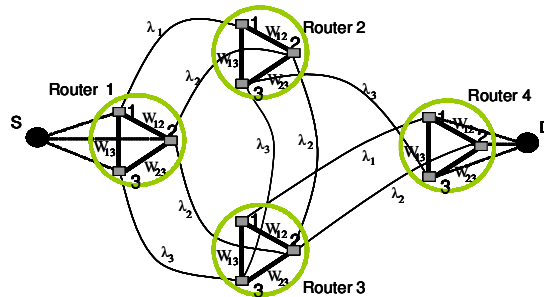


Slika 6.11. Topologija mreže sa četiri rutera i tri talasne dužine.



Slika 6.12. Predloženi model rutera za slučaj kada postoje maksimalno tri talasne dužine.

Nakon modifikacije rutera, potrebno je modifikovati i svaki od linkova mreže. Svaki link se modeluje sa onoliko novih linkova koliko ima maksimalno dozvoljenih talasnih dužina. Na taj način svaki novi link je namenjen za prenos po samo jednoj talasnoj dužini. Svaki novi link između dva novomodelovana rutera, je povezan sa odgovarajućim internim čvorovima rutera, koji su dodeljeni konkretnoj talasnoj dužini. Na primeru topologije sa slika 6.11, i modela rutera sa slika 6.12, konačna modifikacija mreže, nakon modifikacije linkova, je prikazana na slici 6.13. Originalni link sa slike 6.11, između rutera 1 i 2, sada je modifikovan u dva nova, jer je imao dve talasne dužine koje su mu dodeljene (λ_1 i λ_2). Kako je u modifikaciji rutera, interni čvor sa oznakom 1, dodeljen za talasnu dužinu λ_1 a čvor 2 za λ_2 , to je novoformirani link između originalnih rutera 1 i 2 za talasnu dužinu λ_1



Slika 6.13. Konačna modifikacija topologije mreže sa slike 6.11.

b) *Automatsko kreiranje svih matrica ulaznih faktora u skladu sa modifikovanom topologijom* podrazumeva postupak kreiranja svih matrica ulaznih faktora (matrice ρ , matrice cene C , matrica raspodele talasnih dužina, itd.) u skladu sa novodovijenom topologijom mreže. Ovaj postupak predstavlja primenu niza matematičkih transformacija sa ciljem dobijanja novoformiranih matrica koje su ranga Broj_Rutera x

Broj_Talasnih_Duzina. Ako se pretpostavi da su talasne dužine slučajno raspoređene po linkovima, sa slike 6.11, i da su cene linkova slučajno izabrane, novoformirana matrica **C**, može imati izgled kao na slici 6.14. Vrednosti elemenata dobijene matrice po glavnoj dijagonali su uvek 0, jer se konverzija iste talasne dužine ne vrši.

		Ruter 1			Ruter 2			Ruter 3			Ruter 4		
		λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3
Ruter 1	λ_1	0	0.01	0.02	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0
	λ_2	0.01	0	0.01	0	0.8	0	0	0.8 (1)	0	0	0	0
	λ_3	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0.8	0	0	0
Ruter 2	λ_1	0.8	0	0	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0
	λ_2	0	0.8	0	0.5	0	0.5	0	0.8	0	0	0	0
	λ_3	0	0	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0.8
Ruter 3	λ_1	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.8	0	0
	λ_2	0	0.8	0	0	0.8	0	0.5	0	0.5	0	0.8(1)	0
	λ_3	0	0	0.8	0	0	0	0.5	0.5	0	0	0	0
Ruter 4	λ_1	0	0	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0.01	0.01
	λ_2	0	0	0	0	0	0	0	0.8	0	0.01	0	0.01
	λ_3	0	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0.01	0.01	0

Slika 6.14. Struktura novoformirane matrice **C**, sa slučajno dodeljenim vrednostima.

Elementi matrice, slika 6.14, koji su u preseku iste oznake rutera po vertikali i horizontali, ukazuju na cenu konverzije talasne dužine u drugu talasnu dužinu u tom ruteru. Npr. vrednost 0.02, u trećoj koloni prvog reda matrice sa slike 6.14, ukazuje na cenu konverzije talasne dužine λ_1 u λ_2 u Ruteru 1. Sa druge strane, vrednost 0.8, u četvrtoj koloni prvog reda matrice ukazuje na cenu linka koji predstavlja vezu Rutera 1 i Rutera 2 po talasnoj dužini λ_1 . Na ovaj način cene linkova i cene konverzija talasnih dužina su dovedene na isti nivo uticaja, i predstavljeni su istim parametrom u novodobijenoj mreži. Koraci koji su do sada opisani se rade samo jednom na početku inicijalizacije mreže, tako da u svakom narednom zahtevu za dobijanje putanje, neće uticati na brzinu rada ili složenost algoritma.

c) *Procesiranje ulaznih faktora u Hopfield-ovoj neuralnoj mreži* podrazumeva pokretanje koda koji relizuje Hopfield-ovu neuralnu mrežu i koja koristi sve novoformirane matrice ulaznih faktora. Način formiranja nove matrice **C** je objašnjen u prethodnoj tački, dok se matrica **p** formira po standardnim principima korišćenog Hopfield-Tank modela, ali u odnosu na novoformiranu matricu **C**. Kao izlaz iz neuralne mreže dobija se matrica **V**, koja je ranga kao i novoformirana matrica **C**.

d) Inverzna konverzija izlaznih matrica neuralne mreže dobijene za modifikovanu topologiju predstavlja fazu u kojoj se matematičkim relacijama vrši inverzan proces u odnosu na fazu Automatskog kreiranja svih matrica ulaznih faktora u skladu sa modifikovanim topologijom. U ovoj fazi se vrši transformacija matrice \mathbf{V} u matricu \mathbf{V} ranga $Broj_ruter\ x\ Broj_ruter$. Na taj način se dobija matrica koja ukazuje na konačnu putanju dobijenu ovom procedurom u smislu redosleda rutera u toj putanji. Istovremeno, na bazi originalne matrice \mathbf{V} , jasno se dobija raspodela talasnih dužina po odabranoj putanji, čime se postupak određivanja rute i dodele talasnih dužina objedinjuju, što je i bio cilj predloženog algoritma. Na slici 6.15, prikazana je moguć izgled matrice \mathbf{V} .

		Router 1			Router 2			Router 3			Router 4		
		λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3
Router 1	λ_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	λ_2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	λ_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Router 2	λ_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	λ_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	λ_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Router 3	λ_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	λ_2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	λ_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Router 4	λ_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	λ_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	λ_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Slika 6.15. Struktura dobijene matrice \mathbf{V} , sa slučajno dodeljenim vrednostima.

U skladu sa opštom teorijom Hopfield-ove neuralne mreže, vrednosti u izlaznoj matrici \mathbf{V} , su nakon zaokruživanja 0 ili 1. Vrednost 1 ukazuje da će se link, na koji ukazuje pozicija posmatrane vrednosti 1, naći u konačnoj putanji. Vrednost 0 ukazuje da taj link nije deo konačne putanje. U primeru sa slike 6.15, postoje tri vrednosti 1. Vrednost 1 koja je u preseku drugog reda i osme kolone ukazuje da se nakon polaska iz izvorišnog čvora (Ruter 1) dolazi u Ruter 3 i to talasnom dužinom λ_2 . Nakon toga, vrednost 1 u preseku osmog reda i sedme kolone ukazuje da je u Ruteru 3 došlo do konverzije talasne dužine i to: od dolazne λ_2 u odlaznu λ_1 . Poslednja vrednost 1 na preseku sedmog reda i desete kolone ukazuje da je ruta iz Ruter 3, sa talasne dužine λ_1 , u sledećem hopu došla do Ruter 4 na talasnoj dužini λ_1 , gde se i završava obzirom da je određište Ruter 4.

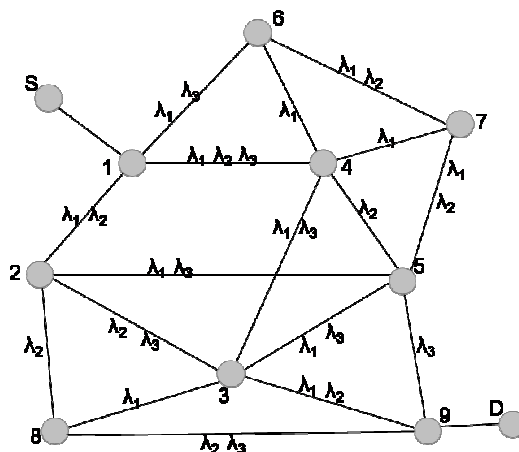
Na ovaj način dobijeno je objedinjeno traženje rute i talasnih dužina koje će se toj ruti dodeliti.

e) *Grafički prikaz dobijenih rezultata* je završna, ali ne i obavezna, faza rada predloženog algoritma. Ova faza podrazumeva grafički prikaz originalne topologije mreže i iscrtavanje svih linkova koji učestvuju u konačnoj putanji. Ova faza ima za cilje prikaz rezultata korisniku i ne utiče na način donošenja odluke.

Na ovaj način dobijeno je rešenje koje ne mora biti implementirano sa neuralnom mrežom. Naime, nakon predloženih modifikacija topologije mreže generička dobija se struktura mreže gde je svaki link opisan samo jednim parametrom (u ovom slučaju je to postojanje talasne dužine). Ako se želi pronaći optimalna putanja, dovoljno je primeniti bilo koji algoritam za traženje najkraće putanje (npr. Dijkstra) i dobijeno rešenje će imati formu optimalne putanje sa izvršenim fazama rutiranja i dodele talasnih dužina.

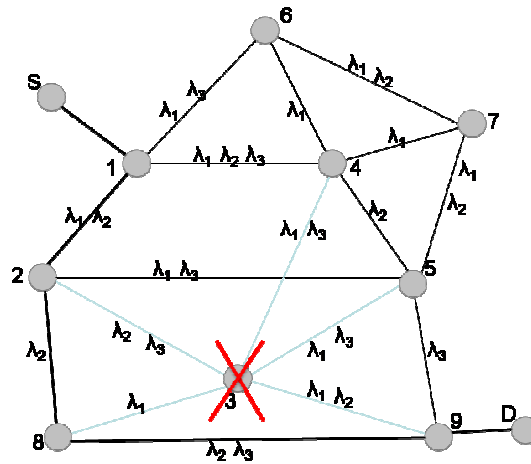
6.5. Rezultati primene predloženog algoritma

Predloženi algoritam za istovremenu selekciju rute i dodelu talasnih dužina je realizovan u programskom jeziku C++. Izlazna matrica \mathbf{V} je za potrebe demonstracije rezultata u ovom poglavlju ručno interpretirana. Posmatrana je topologija mreže sa devet čvorova i tri talasne dužine, pri čemu je povezanost čvorova i raspodela talasnih dužina po linkovima data na slici 6.16.



Slika 6.16. Korišćena početna topologija optičke mreže.

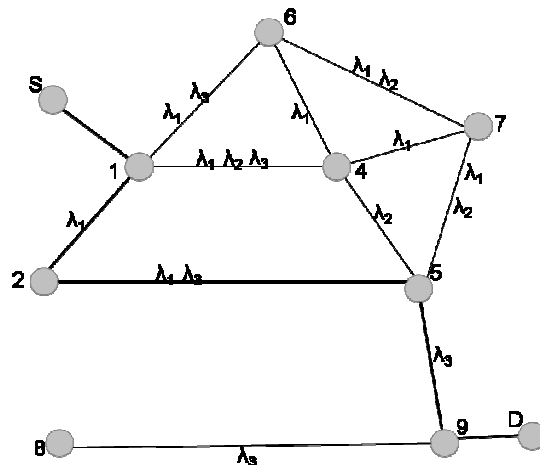
mreže, i algoritam ima potpuno drugačiju početnu situaciju prilikom donošenja odluke o narednoj putanji.



Slika 6.18. Dobijena putanja pod uslovom da nema konverzije talasnih dužina u čvorovima mreže i da je čvor 3 nedostupan.

U takvim okolnostima, dobija se putanja prikazana na slici 6.18. Ukoliko se u ovoj fazi dozvoli konverzija talasnih dužina u čvorovima mreže, dobiće se ista putanja kao i na slici 6.18. Razlog za ovo je sposobnost algoritma da vodi računa o narednim putanjama i opterećenju mreže. Alternativna putanja je bila S-1-2-5-9-D, ali se u tom slučaju link između čvorova 5-9 kompletno zauzima, čime se potencijalno povećava verovatnoća blokade u narednim iteracijama rada algoritma, jer se smanjuje ukupan broj linkova u mreži. Pod pretpostavkom da je ostvaren optički put na slici 6.18. dolazi do promene topologije mreže jer link 2-8, postaje kompletno zauzet. Izbor blokade ovog linka u odnosu na 5-9 se može smatrati boljom opcijom, jer promena topologije nije definisana redukcijom linkova neposredno uz izvorišni tj. odredišni čvor.

U narednoj iteraciji algoritma, ne postoji ni jedna putanja koja se može realizovati bez konverzije talasnih dužina. Ukoliko se smatra da je ova mogućnost dozvoljena, putanja koja se dobija je prikazana na slici 6.19.



Slika 6.19. Dobijena putanja pod uslovom da ima konverzije talasnih dužina u čvorovima mreže i da je čvor 3 nedostupan.

Dobijena putanja, prikazana na slici 6.19, je rezultat minimalnog mogućeg broja konverzija talasnih dužina. Konverzija je realizovana u čvoru 5, a do tog čvora korišćena je talasna dužina λ_1 . Za istu putanju, pod istim uslovima, moglo je da dođe i do konverzije u čvoru 2 (iz λ_1 u λ_3). U situacijama kada nema posebne logike kojom se definiše koje od dva ili više rešenja, koja se mogu smatrati podjednako dobrim, se bira, algoritam slučajnim odabirom selektuje jednu iz ponuđenog skupa.

Nakon realizacije i ovog svetlosnog puta, za naredni zahtev došlo bi do blokade, jer nije moguće ostvariti fizičku vezu sa odredištem dok se neka od zauzetih talasnih dužina ne oslobodi.

Prikazani rezultati ukazuju na adaptivnost predloženog algoritma i njegovu mogućnost da pronađe odgovarajuću putanju vršeći istovremenu selekciju rute i dodelu talasnih dužina istoj. Glavna prednost predloženog algoritma je što ne zavisi od topologijem mreže, broja korišćenih talasnih dužina i njihove distribucije po linkovima. Treba reći, da se kao nedostatak može uzeti potencijalna nestabilnost u radu Hopfield-ove neuralne mreže, što je posebno izraženo kod usklađivanja parametara energijske funkcije sa povećanjem broja neurona u mreži. U potencijalnim realnim primenama ovo se lako može prevazići klasterizacijom mreže i centralizovanim nadgledanjem klastera.



7. ZAKLJUČAK

U poslednje tri decenije intenzivan razvoj veštačke inteligencije omogućio je sofisticirane alate za rešavanje različitih vrsta optimizacionih problema [ROJA96, ALEK95, RUSS95, DORI99, KASS01, JHA01]. Veštačke neuralne mreže spadaju u grupu popularnih i vrlo atraktivnih alata koje se permanentno usavršavaju i razvijaju [HAYK98, ROJA96, MULL90]. Danas postoji veliki broj podela i vrsta veštačkih neuralnih mreža, što ukazuje na mogućnosti različitih vrsta njihovih implementacija. Hopfield-ova neuralna mreža je predstavnik grupe rekurentnih neuralnih mreža koja je u radovima velikog broja autora primenjivana za rešavanje različitih vrsta problema

[HOPF84, ALI93, PARK98, ARAU01]. Njene dobre karakteristike u rešavanju optimizacionih problema, bile se glavni razlog zašto je korišćena i u ovoj disertaciji.

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije je primena Hopfield-ove neuralne mreže u rešavanju različitih vrsta optimizacionih problema. Obzirom da transportni problemi obuhvataju širok spektar različitih primena u komunikacionim mrežama i saobraćaju, ova disertacija je razmotrila tri različita aspekta u rešavanju realnih problema. Iz domena komunikacionih mreža, razmatrana je optimizacija procesa rutiranja. Obzirom da se komunikacione mreže mogu posmatrati na nivou prenosa signala kroz tranzitnu i lokalnu mrežu, analizirana su dva različita tipa rutiranja.

Kako su optičke komunikacije postale vrlo atraktivne, pre svega zbog povećanog propusnog opsega, i kako sve češće optičko vlakno dolazi do kraja pristupne mreže, analizirana je mogućnost poboljšanja procesa rutiranja u potpuno optičkim mrežama, primenom modifikovanog oblika Hopfield-ove neuralne mreže.

Sa druge strane, potreba za sve sofisticiranijim mrežnim i korisničkim servisima, zahteva sve složenije algoritme za rutiranje koji maksimalno mogu da iskoriste resurse mreže ali da istovremeno obezbede određene kvalitete servisa. Ovo je posebno izraženo u sve prisutnijoj distribuciji multimedijalnog sadržaja u realnom vremenu. Iz tog razloga analizirana je mogućnost poboljšanja *multicast* rutiranja u mrežama sa paketskim saobraćajem.

Da bi se pokazala mogućnost primene Hopfield-ove neuralne mreže i u rešavanju drugih tipova optimizacionih problema, analiziran je problem izbora putanje za potrebe planiranja nove putne trase.

Kako sva tri problema, sa svojim specifičnostima, zahtevaju složen postupak rešavanja i analizu velikog broja različitih tipova promenljivih faktora, parametara i uslova, za sva tri tipa opisanih problema, analizirano je napredno donošenje odluka na bazi višekriterijumske analize [CIKO11, CINC01, WEI95]. Ovaj postupak podrazumeva paralelnu optimizaciju svih posmatranih podataka i definisanih kriterijuma, sa ciljem dobijanja optimalnog rešanja [EHRG05, STEU86]. Ovo rešenje treba da obezbedi racionalnu upotrebu posmatranih resursa i iskorišćenje istih. Kako je proces višekriterijumske optimizacije složena međuzavisnost većeg broja posmatranih inputa, sa često suprotstavljenim delovanjima, dobijeno rešenje se može nazvati

optimalnim samo pod određenim uslovima. U takvim situacijama, termin optimalnog rešenja, se pod određenim uslovima menja terminom Pareto optimalnog rešenja [LEGR10, ESCH90, BALI01].

Najčešći način rešavanja višekriterijskih optimizacionih problema se svodi na kvantifikaciju svake od posmatranih ulaznih veličina, njihovo sumiranje i dobijanje jednog broja koji treba da reprezentuje određenu „cenu“ [WHIT05, DAVI01]. Ovaj broj može opisivati status linka u komunikacionim mrežama, brojnu vrednost dodeljenu određenoj površi u prostorno orijentisanim problemima, brojnu vrednost nekog geometrijskog pojma u n -dimenzionalnom prostoru itd. Na taj način problem izbora optimalne putanje se svodi na rešavanje problema trgovačkog putnika ili najkraće putanje. Iako se time različite vrste posmatranih ulaznih veličina, njihova kvantifikacija i paralelna obrada vrlo grubo analiziraju, omogućava se relativno brz i jednostavan proces rada. To je razlog zašto se najčešće korišćeni protokoli za rutiranje i njihove metrike baziraju baš na opisanom principu.

Prvi algoritmi, preteče algoritama za rutiranje, najčešće su zasnovani na minimizaciji rastojanja. Pod pojmom "rastojanje" može se podrazumevati dužina puta ili linka, sa jedne strane, ili vreme propagacije signala, sa druge strane, za poznate uslove prenosa u nekom medijumu (ako se problem rešava u domenu telekomunikacija). Kako je broj realnih faktora koji mogu da utiču na kvalitet prenosa i načina rutiranja signala sve veći (fizička cena izgradnje infrastrukture, održavanje, kvalitet kablova i mrežnih urežaja, tehnička ograničenja opreme, mogućnosti i brzina kablova i uređaja za rutiranje, degradacija signala, kašnjenje u prenosu, kašnjenje u procesiranju itd.) nameće se potreba za složenijim algoritmima za rutiranje koji mogu da analiziraju veći broj uslova, parametara i inputa [CHEN05, LEGR10, KOJI06a]. Ovo je posebno bitno kod *real-time* prenosa signala koji zahtevaju garanciju kvaliteta servisa [CINC01, STOJ04].

Poseban problem koji savremeni i budući algoritmi treba da analiziraju, je permanentno povećanje broja korisnika, intenziteta saobraćaja na mreži, povećanja broja tipova servisa i usluga koje se nude, povećanje broja mrežnih i korisničkih aplikacija, ali i internih mrežnih informacija koje se razmenjuju kroz mrežu u cilju njenog kvalitetnijeg rada. Uz ovo, potrebno je analizirati strukture i topologije mreža koje su vrlo promenljive i koje se relativno brzo šire. Ovo proširenje često nema predvidiv rast i modifikacije koje će uneti u topologiji mreže.

Kako bi se svi navedeni razlozi uzeli u obzir, i kako bi korišćenje ograničenih resursa mreže bilo maksimalno racionalno, neminovno se nemeće potreba za sve složenijim i sofisticiranijim uređajima i protokolima za rutiranje.

Cilj ove disertacije je da, za pojedine probleme u realnom okruženju, ponudi poboljšanje postupaka za rešavanje složenih višekriterijumskih problema primenom veštačkih neuralnih mreža. Obzirom da neuralne mreže rade na principu paralelne i distribuirane arhitekture (čime se postiže velika brzina u radu), da imaju sposobnost učenja i prilagođavanje novonastalim promenama, memorisanja karakterističnih stanja i znanja, ispravnom radu i prilikom otkazivanja pojedinih delova (neurona ili sinapsi), radu sa nepotpunim ili nedovoljno definisanim ulaznih skupom podataka, postoji stalno usavršavanje i implementacija pojedinih modela veštačkih neuralnih mreža za potrebe rešavanja problema rutiranja. Polazeći od tih pretpostavki, ova disertacija nudi poboljšane modele, i rezultate testiranja istih, na primeru implementacije u tri različite oblasti.

U radu je, najpre, razmotrena uloga i način rada i mogućnost realizacije veštačke neuralne mreže, koja je bazirana na principima rada bioloških neurona [BROW94, HAYK98]. Ukazano je na osnovne tipove i podele koje se mogu izvršiti među ovim mrežama, i posebno analizirana grupa rekurentnih neuralnih mreža. Obzirom da je izabrana Hopfield-ova neuralna mreža, posebna pažnja je posvećana njenoj strukturi, principima rada i hardverskoj realizaciji. U radu [HOPF85], ona se prvi put koristi za rešavanje optimizacionih problema. Autori su definisali strukturu mreže i njenu energijsku funkciju, i kroz rezultate prikazali njenu efikasnost u rešavanju mogućih optimizacionih problema. Nakon toga, modifikacijama, Ali i Kamoun u radu [ALI93] daju novi pristup u kojima se koristi problema trgovačkog putnika. Pokazujući da mreža može da pronađe rešenje koje je uvek u grupi najboljih, potvrđuju kvalitet i efikasnost Hopfield-ovog modela.

U ovoj disertaciji je predloženo nekoliko modifikacija Hopfield-ove neuralne mreže sa ciljem pronalazjenja rešenja koje je bazirano na višekriterijumskoj optimizaciji. Predložena rešenja treba da omoguće rad u strukturama proizvoljne topologije sa mogućnošću da se svakom linku tj. uređaju za rutiranje ili prostornoj oblasti dodeli veći broj realnih fizičkih faktora, uslova i eventualnih ograničenja. Polazeći od rada [KOJI04b], u kome je razmatrano samo fizičko rastojanje kao input algoritma, pa

proširene modele koji uzimaju u obzir i nekoliko drugih realnih ulaznih faktora [KOJI05, KOJI06a], razvio je nekoliko modifikacija energijske funkcije i algoritama koji su adaptivni i skalabilni, a koji mogu da ponude kvalitetnija rešenja u pojedinim problemima rutiranja.

Shodno promenama koje algoritam, predložen u ovoj disertaciji, unosi u odnosu na algoritam [ALI93], izvršena je i modifikacija parametara koji učestvuju u energijskoj funkciji. Poseban akcenat stavljen je na izbor konstanti koje su predložene [TAN05], pa su, prema postavci problema i rezultatima koji su dobijeni, definisani novi predlozi za ove vrednosti. Analiziran je i parametar nagiba aktivacione funkcije, u zavisnosti od brzine konvergencije energijske funkcije i njene minimizacije. Posebna pažnja je posvećena optimizaciji potrebnog broja iteracija koje dovode do rešenja. Na ovaj način razvijen je poseban algoritam sa ciljem ubrzanja rada neuralne mreže. Ponuđen je i način dodatne kontrole predloženog rešenja, korišćenjem metode statističke obuke.

Predloženi algoritam je realizovan u programskom paketu Matlab i programskom jeziku C++, pri čemu nije korišćena ni jedna od ugrađenih funkcija Toolbox-a za implementaciju neuralne mreže ili specijalizovane klase. Na ovaj način, kod je napisan upotrebom osnovnih programskih naredbi i lako je prilagodljiv svakom drugom programskom jeziku. Algoritam je simuliran na PC računaru, i svi rezultati su dobijeni na taj način. Iako je poznato da se na ovaj način u velikoj meri gubi prednost hardverski realizovanih veštačkih neuralnih mreža, dobijeni rezultati pokazuju bolje ili iste rezultate u pojedinim merenjima sa rezultatima dostupnim u stručnoj literaturi.

Analiza rezultata dobijenih primenom predloženih algoritama izvršena je prema velikom broju različitih kriterijuma. Izvršena je analiza uticaja pojedinih ulaznih faktora, vrednosti konstanti koje učestvuju u energijskoj funkciji, opsega njihovih promena, opsega vrednosti ulaznih promenljivih, brzine rada, verovatnoće blokada, lažnih stanja koja se pojavljuju u postupku rada Hopfield-ove neuralne mreže i rešavanja neželjenih stanja u koje algoritam može da dođe.

Predloženi algoritmi su kreirani tako da se može izabrati skup faktora po kojima se vrši optimizacija rutiranja, sa mogućnošću zadavanja težinskih koeficijenata i definisanja uticaja pojedinih inputa, i kao takav poređen je sa sličnim algoritmima u literaturi.

Za potrebe rutiranja u komunikacionim mrežama sa paketskom komutacijom, predložena je modifikacija energijske funkcije, kao i algoritam, kojim se realizuje multicast rutiranje u mreži proizvoljne topologije. U tu svrhu je kreirana modifikacija kojom se pronalazi minimalno Steiner-ovo stablo sa mogućim ograničenjima (*Constrained Minimum Steiner Tree in Graph*) [CHEN01]. Ova modifikacija energijske funkcije je dodatno unapređene definisanjem opšteg modela za *multicast* rutiranje.

Prvo je vršeno poređenje sa rezultatima većeg broja autora i algoritmima: Dijkstra Kruska MTS-ov, Ali Kamoun-ov i Park Choi-jevim, kada se kao metrika koristi jedan parametar koji se definiše stanje linka. Zatim su dati uporedni rezultati sa predloženim algoritmima [AHN01, ALI93, PARK98]. Novi algoritam je poređen sa aspekta dobijanja *multicast* putanje, pojedinačnih deonica do odredišta i ukupne dužine predloženog stabla. Posebna pažnja posvećena je realizaciji algoritma za smanjivanje broja iteracija potrebnih za pronalaženje rešenja, i postignuto je poboljšanje koje je za bar jedan red veličine veće od uporednih algoritama [ARAU01]. Analizirana je složenost predloženog algoritma i kvalitet dobijenih rešenja u zavisnosti od broja rutera u mreži. Posebno su posmatrane adaptivne mogućnosti predloženog algoritma kada se analizira veći broj ulaznih faktora (kapacitet linka, gustina saobraćaja, kašnjenje na linkovima i statističkog opterećenja linka). Uz to, simulirane su i realne situacije u komunikacionim mrežama: zagušenje linka, pad linka, pad rutera i izbegavanje nedozvoljenog kašnjenja. Zbog mogućih lažnih stanja Hopfield-ove neuralne mreže analizirane su situacije i predložena rešenja kojima se izbegava blokada pojedinih delova mreže ili nemogućnost realizacije predviđenog prenosa signala. S obzirom da je predložen algoritam kojim se broj iteracija potrebnih za pronalaženje rešenja redukuje, predložena je i logika za kontrolu kvaliteta dobijenog rezultata i njegovog eventualnog poboljšanja. Ovo je realizovano primenom postupka koji je inicijalno poznat u metalurgiji, a bazira se na sporom hlađenju materijala sa ciljem dobijanja željenih karakteristika.

Za potrebe rutiranja u optičkim mrežama, prvo su analizirani osnovni preduslovi za ostvarivanje optičkog puta, karakteristične faze i proces rutiranja svetlosnog signala. Posebno su analizirane prednosti i mane standardnih algoritama za rutiranje u potpuno optičkim mrežama, sa ciljem da se ukaže na moguće primene i rešenje pojedinih nedostataka. Ukazano je na algoritme koji se mogu koristiti za fazu rutiranja i fazu

dodele talasnih dužina odabranoj putanji [ZHAN00, MARK01, MEKH97]. U tom cilju, kreiran je modifikovani model energijske funkcije Hopfield-ove neuralne mreže koji treba da realizuje prvu fazu tj. da primenom veštačke inteligencije odabere što kvalitetinu putanju po kojoj će se vršiti prenos optičkog signala. S obzirom da je ovakav tip rutiranja realizovan u dve faze (rutiranje i dodela talasnih dužina) ukazano je na nedostatke ovakvog načina rada i prednosti objedinjavanja dve navedene faze. Kako je ovakav proces inicijalno složena višekriterijumska analiza, predložen je i kompletan postupak za modifikaciju topologije posmatrane optičke mreže, skaliranje, kvantifikaciju i predprocesiranje ulaznih podataka, i algoritam koji treba da pronađe odgovarajuću putanju i izvrši dodelu talasnih dužina toj putanji. Ovaj algoritam je baziran na posebno modifikovanoj energijskoj funkciji i načinu dvostruke konverzije podataka.

Za potrebe predikcije nove putne trase, predloženo je novo rešenje bazirano na Hopfield-ovoj neuralnoj mreži. Ono ima za cilj da, analizom većeg broja nekonzistentnih ulaznih faktora, pronađe putnu trasu, u realnom okruženju. Moguća primena ovog algoritma je pomoć prilikom izrade složenih dokumentacija koje su sastavni deo projektovanja, procene uticaja na okolinu i životnu sredinu, za svaku novu saobraćajnicu. Za te potrebe, prvobitno su analizirani pojam i uticaji na putnu mrežu, njeno modelovanje, kvantifikacija ulaznih podataka i na bazi toga predloženo rešenje za pravljenje modela za planiranje putne trase. Predložena je jedna modifikacija energijske funkcije koja uključuje pet najčešće korišćenih realnih faktora: morfološke karakteristike terena, uticaj reka, životne sredine, ekonomske situacije i politički uticaji. Prikazana je i mogućnost primene predloženog modela na primeru dva grada u Republici Srbiji, na bazi realnih parametara u dve različite rezolucije terena. Na ovaj način, ukazano je da se preciznost dobijenog rešenja može podešavati shodno potrebama projekta i da ne zavisi od predloženog modela energijske funkcije Hopfield-ove neuralne mreže.

Svi predloženi modeli modifikacije energijske funkcije, metode za predprocesiranje i algoritmi koji rešavaju opisane višekriterijumske probleme, imaju za cilj pronalaženje rešenja datih problema, sa novim pristupom ili boljim performansama, od dostupnih u stručnoj literaturi. Sva predložena rešenja se mogu implementirati kao deo veće celine ili kao samostalna rešenja. Dodatno, bolje performanse mogu se očekivati hardverskim

realizacijama neuralnih mreža, za koje su dati mogući hardverski modeli. Jedan od ciljeva ove disertacije je da ukaže na mogućnosti Hopfield-ove neuralne mreže i njene moguće modifikacije i implementacije u realnim okruženjima i rješavanju aktualnih optimizacionih problema. Obzirom da je to prikazano za tri relativno različita aspekta i tipa problema, realno je očekivati moguće primene i u drugim specifičnim optimizacionim problemima.

U ovoj disertaciji predloženo je nekoliko novih modifikacija energijske funkcije Hopfield-ove neuralne mreže, koje u testiranjima pokazuju dobre rezultate. Najznačajniji doprinosi su:

- Razvijen je novi algoritam za višekriterijumsku optimizaciju *multicast* rutiranja u mrežama sa paketskim saobraćajem, zasnovan na veštačkim neuralnim mrežama. Izabran je Hopfieldov model rekurentne neuralne mreže.
- Algoritam, pri optimizaciji rutiranja, uzima u obzir više kriterijuma čiji se broj, po potrebi, može i ograničiti, odnosno modifikovati težinskim koeficijentima.
- Algoritam ima generički način pronalaženja Steiner-ovog stabla za proizvoljnu mrežnu topologiju.
- Predloženo rešenje se jednostavno može prilagoditi svim topologijama telekomunikacione mreže. Povećanje broja čvorova mreže znači i povećanje broja neurona u neuralnoj mreži. Sa aspekta korisnika, ništa se ne menja, jer on bira broj čvorova u predloženom algoritmu. Sa stanovišta hardverske realizacije, to bi značilo da se, u okviru maksimalno predviđenog broja neurona (a time i broja rutera u mreži), vrši uključivanje veza ka potrebnom broju neurona.
- Ponuđeno rešenje uspešno može da se prilagodi svim realnim problemima koji se mogu dogoditi u komunikacionoj mreži (otkazivanje linka ili nekog od uređaja za rutiranje tj. dodavanje novih i promene topologije mreže).
- Na osnovu oblika energijske funkcije, predložen je adaptivni metod koji minimizuje potreban broj iteracija potrebnih za pronalaženja putanje. Ovaj model je testiran u različitim mrežnim uslovima i dodatno upoređen sa rezultatima rada. [ARAU01]

- Ponuđeno rešenje uzima u obzir opterećenje i propusni opseg linkova, čime se može smanjiti verovatnoća zagušenja.
- Predloženi algoritam može da analizira i nekoliko vrsta kašnjenja koja se javljaju u postupku prenosa signala, kao i da vrši njihovu optimizaciju. Na taj način može se naći odgovarajuća putanja koja može da ponudi najbolji kvalitet posmatranog servisa.
- Predloženo rešenje ima mogućnost definisanja ograničenja kojima se može izbeći preduga propagacija signala zbog pojedinih kašnjenja u mreži ili gubitak paketa zbog preopterećenja linkova.
- Rezultati primene algoritma su upoređeni sa sličnim algoritmima u literaturi. Poređenje je izvršeno sa Dijkstra algoritmom, kada se kao metrika koristi rastojanje među linkovima, a zatim i sa drugim rešenjima iz raspoložive literature [AHN01, ALI93, PARK98].
 - U pogledu potrebnog broja iteracija, predloženi algoritam daje poboljšanje za više od jednog reda veličine.
 - U pogledu statističkih pokazatelja, statistike prvog i drugog reda, rezultati su isti ili bolji od istih kod drugih autora.
- Uočena je pojava „inertnosti“ algoritma, koja je posledica rekurentnog pristupa. Ova pojava, inače, odgovara ponašanju nervnog sistema.
- Uočena su moguća lažna stanja i ukazano je na faktore kojima se utiče na stabilnost Hopfield-ove neuralne mreže
- Predloženo je algoritamsko rešenje za prevazilaženje neregularnih rešenja, a koja su posledica loše konvergencije energijske funkcije
- Ispitivanjem brzine konvergencije algoritma, ustanovljeno je da se uvek bira rešenje koje je blisko optimalnom (izborom putanja u kojima se samo jedan parametar razlikuje na trećoj-četvrtoj decimali).
- Predložen je algoritam na bazi statističke obuke, koje ima za cilj verifikaciju dobijenog rešenja i njeno potencijalno poboljšanje. Ovaj algoritam je generičkog

tipa i može se primeniti na bilo koju modifikaciju energijske funkcije Hopfield-ove neuralne mreže

- Predložen je algoritam za planiranje putne trase baziran na većem broju ulaznih faktora. Ovaj algoritam podrazumeva i faze obrade fizičke mape, kvantifikacije ulaznih faktora, modifikacije energijske funkcije i implementacije u grafičko okruženje. Predloženi algoritam je testiran u realnim uslovima sa različitim rezolucijama krajnjeg rešenja sa ciljem da se ukaže na moguću promenu preciznosti dobijenog rešenja.
- Pokazano je da se kod primene višekriterijumske optimizacije putne trase mora koristiti posebna logika (u ovom slučaju neuralna mreža) i da konačna putanja ne može biti interpolacija ili matematički definisana relacija između pojedinačno posmatranih faktora.
- Predloženi algoritam za selekciju putne trase je realizovan tako da može da objedini, ponekad opozitne, uticaje različitih fizičkih ili društvenih faktora.
- Predložen je algoritam za realizaciju procesa rutiranja u potpuno optičkim mrežama, koji se može koristiti sa bilo kojim drugim algoritmom za dodelu talasnih dužina.
- Realizovan je poseban algoritam za primenu Hopfield-ove neuralne mreže za potrebe rutiranja i dodele talasnih dužina, kao objedinjenog procesa, u potpuno optičkim mrežama. Ovaj algoritam automatski definiše matrice povezanosti, matrice cena, transformacije originalne topologije mreže u formu prihvatljivu za primenu neuralne mreže, i omogućava rad sa proizvoljnim brojem talasnih dužina koje su proizvoljno raspoređene po linkovima.
- Predložena je logička transformacija optičkog rutera sa mogućnošću konverzije talasnih dužina u automatski kreiranu podmrežu. Na ovaj način omogućeno je definisanje potpune ili limitirane konverzije talasnih dužina u optičkom multipleksoru, kao i definisanje težinskih koeficijenata kojima se pojedine konverzije (ne) stimulišu.
- Predložena je dvostrana logička transformacija topologije optičke mreže, sa proizvoljnom povezanošću i raspodelom talasnih dužina, u topologiju koja ima

linkove kojima je dodeljena samo jedna talasna dužina. Na ovaj način, složen proces rutiranja i dodele talasnih dužina se može rešavati i primenom bilo kog algoritma za traženje najkraće putanje.

- Sva predložena rešanja i modifikacije mogu da rade sa mrežama proizvoljne topologije, linkovima koji imaju više od jednog dodeljenog ulaznog faktora, bidirekcionim linkovima kojima je moguće definisati različite vrednosti za različite smerove prenosa signala i proizvoljnim izborom izvorišta, tj. jednog ili više odredišta.

Na kraju, kao poseban kvalitet predloženog algoritma, treba istaći da se on može realizovati hardverski u CMOS VLSI tehnologiji. Time do punog izražaja mogu doći sve prednosti rada veštačkih neuralnih mreža:

- izvanredno velika brzina rada usled paralelnog procesiranja,
- brzina rada je (praktično) nezavisna od dimenzije mreže (tj. nezavisna od broja čvorova),
- jednostavna mogućnost proširivanja mreže (skalabilnost),
- ista arhitektura je primenljiva za različite uslove saobraćaja.

Dalja istraživanja bi trebalo usmeriti ka analizi uticaja ranga ulaznih matrica na promene konstanti u energijskoj funkciji, i obezbeđivanju njihovih vrednosti u automatizovanom postupku, u cilju garantovanja stabilnosti neuralne mreže.

Takođe treba istaći moguće pravce daljeg razvoja algoritma u mrežama celularne, ili sličnih, struktura obzirom da dodatne benefite koji se tako mogu ostvariti.

Imajući u vidu opštost algoritma, treba navesti da se on može implementirati u bilo koji tip telekomunikacione mreže pa i u bežične ili *Ad Hoc* mreže.

LITERATURA

Skraćenica

Puna referenca

- [ABE91] S. Abe, "Determining Weights of the Hopfield Neural Networks", *Proc. International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN'91)* Helsinki, pp. 1507-1510, June, 1991.
- [ALEK95] I. Aleksander, H. Morton, *An Introduction to Neural Computing*, Intl Thomson Computer Pr, 1995.
- [ALI93] M. Ali, F. Kamoun, "Neural networks for shortest path computation and routing in computer networks", *IEEE Trans. on Neural Networks*, No. 6(4), pp. 941–953, 1993.
- [ALPHA04] E. Alpaydin, *Introduction to Machine Learning*, The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England, 2004.
- [AMIT87] D. J. Amit, H. Gutfreund, H. Sompolinsky, "Information storage in neural networks with low levels of activity", *Physical Review A*, Vol. 35, No. 6, pp. 2293-2303, 1987.
- [ARAU01] F. Araujo, B. Ribeiro, L. Rodrigues, "A neural network for shortest path computation", *IEEE Trans. Neural Networks*, No. 5(12), pp. 1067–1073, 2001.
- [BALI01] J. Balicki, "Evolutionary algorithms for multicriteria optimization of program module allocations", *15th International Conference on Multiple Criteria Decision Making (MCDM)*, Vol. 507, pp. 273–281, Springer-Verlag, 2001.
- [BANI02] D. Banister, *Transport Planning*, London: Spon, 2002.
- [BARR97] R. A. Barry, S. Subramaniam, "The MAX-SUM wavelength assignment algorithm for WDM ring networks", in *Proc. OFC'97*, Feb. 1997.
- [BEAL90] R. Beale, T. Jackson, *Neural Computing – An Introduction*, Institute of Physics Publishing, 1990.
- [BELL09] A. Bellabas, M. Molnar, S. Lahoud, "Heuristics for Multicriteria Routing Problem", *International Conference on Communications Computers and Applications*, Amman, Jordan, 2009.
- [BELL97] M. G. H. Bell, Y. Iida, *Transportation Network Analysis*, Wiley & Sons, 1997.
- [BENS07] A. Benslimane, *Multimedia Multicast on the Internet*, ISTE Ltd 2007.
- [BERN03] G. Bernstein, B. Rajagopalan, D. Saha, *Optical Network Control: Architecture, Protocols and Standards*, Addison-Wesley Professional, 2003.
- [BLAC03] W. Black, *Transportation: A Geographical Analysis*, Guilford. 2003.
- [BLAI01] A. Blais, "An introduction to neural networks", IBM Developer works, <http://www.128.ibm.com/developerworks/linux/library/l-neural/>, July 2001.
- [BOGA04] D. Bogart, "Turnpike Trusts and the Transportation Revolution in Eighteenth Century England", 2004, http://orion.oac.uci.edu/~dbogart/transportrev_oct13.pdf
- [BORS93] A. Borst, M. Egelhaaf, H. S. Seung, "Two-dimensional motion perception in flies", *Neural Computation* 5, pp. 856-868, 1993.
- [BOUK06] A. Boukerche, *Handbook of Algorithms for Wireless Networking and Mobile Computing*, Taylor & Francis Group, 2006.
- [BOUK09] A. Boukerche, *Algorithms and Protocols For Wireless and Mobile Ad Hoc Networks*, John Wiley & Sons, 2009.

- [BRIG72] K. Briggs, *Introducing Transportation Networks*, London: University of London Press, 1972.
- [BROU11] A. E. Brouwer, W. H. Haemers, *Spectra of Graphs*, Springer, 2011.
- [BROW91] T. X. Brown, "Neural network design for switching network control", Caltech Ph. D. Thesis, 1991.
- [BROW94] M. Brown, C. J. Harris, *Neurofuzzy adaptive modelling and control*, Prentice Hall, 1994.
- [BUTL01] J. A. Butler, K. J. Dueker, "Implementing the Enterprise GIS in Transportation Database Design", *Urban and Regional Information Systems Association (URISA) Journal*, 13(1), pp. 17–28, 2001.
- [CARP87] G.A. Carpenter, M.A.Cohen, S.Grossberg, Technical comments, "Computing with neural networks", *Science* 235, pp. 1226-1227, 1987.
- [CHAK01] G. Chakraborty, "Genetic Algorithm Approaches to Solve Various Steiner Tree Problems", *Steiner Trees in Industries*, Kluwer Academic, pp. 71-100, 2001.
- [CHAK02] D. Chakraborty, G. Chakraborty, N. Shiratori, *Multicast: Concept, Problems, Routing Protocols, Algorithms and QOS Extensions*, Tohoku University, Japan.
- [CHEN01] X. Cheng, D. Du, *Steiner Trees in Industry*, Springer, 2001.
- [CHEN05] H. Chen, B. Sun, "Multicast routing optimization algorithm with bandwidth and delay constraints based on GA", *Journal of communication and computer*, Vol. 2, No. 5, Ser. No. 6, May 2005, USA.
- [CICH93] A.Cichocki, R. Unbehauen, *Neural Network for Optimazation and Signal Processing*, Wiley, 1993.
- [CIKO11] L. Cikovskis, S. Vdovins, I. Slaidins, "Multipath Routing with Adaptive Carrier Sense for Video Applications in Wireless Ad-hoc Networks", *Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija*, No. 6(112), pp. 37–42, 2011.
- [CINC01] G. Činčikas, R. Plėštys, "The Influence of Information Delay on Packet Transmission Networks for the Service Quality", *Electronics and Electrical Engineering. - Kaunas: Technologija*, No. 2(31), pp. 54-57, 2001.
- [COHE83] M. A. Cohen, S. Grossberg, "Absolute stability of global pattern formation and parallel memory storage by competitive neural networks", *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics* SMC-13, pp. 815-826, 1983.
- [COME06] D. E. Comer, *Internetworking with TCP/IP: Principles, Protocols, and Architecture*, Prentice Hall, 2006.
- [CORM01] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein, *Introduction to Algorithms*, The MIT Press 2001.
- [CRAV93] M. P. Craven, "Inter-chip communication in an analogue neural network utilising frequency division multiplexing", Ph.D. Thesis, University of Nottingham, 1993.
- [CRIC04] J. Crichigno, B. Baran, "Multiobjective multicast routing algorithm" *11th International Conference on Telecommunications*, Fortaleza, Brazil, 2004.
- [DALT78] R. Dalton, J. Garlick, R. Minshull, A. Robinson, *Networks in Geography*, London: George Philip, 1978.
- [DARP88] DARPA (Defense Advanced Research Project Agency), "DARPA neural network study", *AFCEA International Press*, Fairfax, VA, 1988.
- [DAVI01] J. Davidson, T. Fox, *Deploying Cisco Voice over IP Solutions*, Cisco press 2001.
- [DIJK59] E.W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs", *Numerische Mathematik*, No. 1, pp. 269–271, 1959.
- [DORI99] M. Dorigo, G. Di Caro, "Ant colony optimization: a new meta-heuristic", *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*, 1999. Vol. 2, Washington, DC, USA.
- [DZGZ03] Direkcija za građevinsko zemljište, "Generalni projekat i prethodna studija opravdanosti", http://www.beoland.com/ump/stud%20opravd_deo1.pdf, 2003.

- [EHRG05] M. Ehrgott, *Multicriteria optimization*, Springer Verlag, 2005.
- [ELTA10] R. Eltarras, M. Eltoweissy, Adaptive Multi-Criteria Routing for Shared Sensor-Actuator Networks., Conference 'GLOBECOM', pp. 1-6, 2010 .
- [ESCH90] H. Eschenauer, J. Koski, A. Osyczka, *Multicriteria Design Optimization: Procedures and Optimization*, Springer Verlag, Berlin, 1990.
- [FAHM97] H. Fahmy, G. Develekos, C. Douligeris, "Application of neural networks and machine learning in network design", *IEEE J. on Selected areas in Comm.*, Vol.15, No.2, pp. 226-237, February 1997.
- [FAUS93] L. Fausett, *Fundamentals of Neural Networks-Architectures, Algorithms and Applications*, Prentice Hall, 1993.
- [FICH04] G. Fiche, G. Hebuterne, *Communicating Systems and Networks: Traffic and Performance*, London and Sterling, VA 2004.
- [FILH11] J. F. Martins-Filho, D. A. R. Chaves, C. J. A. Bastos-Filho, H. A. Pereira, "Applications of computational intelligence in optical networks", *Proc. of 13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) 2011*, pp. 1-4., Stockholm, 26-30 June 2011.
- [FREE91] J. A. Freeman, D. M. Skapura, *Neural Networks – Algorithms, Application and Programming Techniques*, Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [GALD10] L. Galdino, J. Maranhao, J. C. Costa, I. B. Martins, F. Durand, E. Moschim, L. H. Bonani, "Evolution of dynamic routing wavelength code assignment in WDM/OCDM OBS network", *Proc. Sarnoff Symposium 2010 IEEE*, pp. 1-5, 12-14 April 2010.
- [GALL93] S. I. Gallant, *Neural Network Learning and Expert Systems*, MIT Press, 1993.
- [GALU07] A. I. Galushkin, *Neural Networks Theory*, Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [GAO03] B. Gao, Y. Yang, C. Chen, *Implementing A Constraint-based Shortest Path First Algorithm in Intelligent Optical Networks*, Mahi Networks, 2003.
- [GARE79] M. R. Gareg, D. S. Johnson, *Computer and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, Freeman, New York, 1979.
- [GEDM02] R. Gedmantas, R. Plėštys, "The Evaluation of Packets Delays in the Variable Throughput Rotes", *Kaunas: Technologija*, No. 5(40), pp.38-41, 2002.
- [GEMA84] S. Geman, D. Geman, "Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images", *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intelligence*, PAM 1-6, pp. 721-741, 1984.
- [GLIS06] S. G. Glisic, *Advanced Wireless Networks 4G Technologies*, Wiley, 2006.
- [GOUD05] A. Goudie, *The human impact on the natural environment*, 6th edition, Wiley Blackwell, 2005.
- [GRAU07] D. Graupe, *Principles of Artificial Neural Networks*, Advanced Series on Circuits and Systems, Vol. 6, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007.
- [GRAU07] D. Graupe, "Principles of artificial neural network", *Advanced series on circuits and systems – Vol.6*, World Scientific Publishing, 2007.
- [GUPT03] M. M. Gupta, L. Jin, N. Homma, *Static and Dynamic Neural Networks - From Fundamentals to Advanced Theory*, John Wiley & Sons, Inc. 2003.
- [GUYT96] A. C. Guyton, J.E. Hall, *Textbook of medical physiology*, W. B. Saunders, 1996.
- [HAGG84] P. Haggett, *Geography: A Modern Synthesis*, 3th edn, Longman, 1984.
- [HAKI71] S. L. Hakimi, "Steiner's problem in graphs and its implications" *Networks*, Vol. 1, No.1, pp. 113-133, 1971.
- [HALI08] U. Halici, "Artificial neural network", Lec. notes, www.eee.metu.edu.tr/~halici/
- [HARR99] R. Harrington, "Transport: Then, Now, and Tomorrow", *Royal Society of Arts Journal*, Vol.CXLVI, No. 5488, 1999.
- [HAYK94] S. Haykin, *Neural networks- a comprehensive foundation*, MacMillan collage Publishing Company, Inc., 1994.
- [HAYK98] H.Simon, *Neural Networks: A comprehensive Foundation*, 2nd Edition, Pearson Education, 1998.

- [HOOV48] E. M. Hoover, *The Location of Economic Activity*, McGraw-Hill, 1948.
- [HOPF82] J. J. Hopfield, "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities," *Proc. Nat. Acad. Sci.*, Vol. 79, pp. 2554–2558, 1982.
- [HOPF84] J. J. Hopfield, "Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons", *Proc. Natl. Acad. Sci, USA* 81, pp. 3088-3092, 1984.
- [HOPF85] J. J. Hopfield, D. W. Tank, "Neural' computations of decision in optimization problems", *Biol. Cybern.*, No. 52, pp. 141–152, 1985.
- [HOYL98] B. Hoyle, R. Knowles, "Transport Geography: An Introduction", *Modern Transport Geography*, 2nd edn, pp.1–12, London: Wiley, 1998.
- [HUGI92] P. J. Hugill, *World Trade since 1431*, Johns Hopkins University Press, 1992.
- [HWAN92] F. K. Hwang, D. S. Richards, *Steiner Tree Problems*, Networks, Vol. 22, No.1, pp. 55-89, 1992.
- [ILYA03] M. Ilyas, H. T. Mouftah, *The Handbook of Optical Communication Networks*, CRC Press, 2003.
- [IWAC08] G. Iwacz, A. Jajszczyk, M. Zajackowski, *Multimedia Broadcasting and Multicasting in Mobile Networks*, John Wiley & Sons, 2008.
- [JANG97] J. S. Jang, C. T. Sun, E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Compting: A computational approach to learning and machine intelligence*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ 07458, 1997.
- [JHA00a] M. K. Jha, "A geographic information systems-based model for highway design optimization", Ph. D. dissertation, University of Maryland, MD, 2000.
- [JHA00b] M. K. Jha, P. Schonfeld, "Geographic Information System–Based Analysis of Right-of-Way Cost for Highway Optimization", *Transportation Research Record 1719*, No. 00-1065, pp. 241-9, 2000.
- [JHA00c] M. K. Jha, P. Schonfeld, "Integrating Genetic Algorithms and Geographic Information System to Optimize Highway Alignments", *Transportation Research Record 1719*, No. 00-1060, pp. 233-240, 2000.
- [JHA01] M. K. Jha, C. McCall, P. Schonfeld, "Using GIS, Genetic Algorithms, and Visualization in Highway Development", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 16(6), pp. 399–414, 2001.
- [JHA03] M. K. Jha, "Criteria-Based Decision Support System for Selecting Highway Alignments", *Journal of Transportation Engineering*, pp. 33-41, 2003.
- [JHA04] M. K. Jha, P. Schonfeld, "A highway alignment optimization model using geographic information systems", *Transportation Research Part A* 38, pp. 455–481, 2004.
- [JHA07] M. K. Jha, A. Maji, "A Multi-Objective Genetic Algorithm for Optimizing Highway Alignments", *Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multicriteria Decision Making*, 2007.
- [JONG00] J. C. Jong, M. K. Jha, P. Schonfeld, "Preliminary Highway Design with Genetic Algorithms and Geographic Information Systems", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 15, pp. 261–271, 2000.
- [JONG03] J. C. Jong, P. Schonfeld, "An evolutionary model for simultaneously optimizing three-dimensional highway alignments", *Transportation Research, Part B* 37B (2), pp. 107–128, 2003.
- [JONG98] J. C. Jong, "Optimizing highway alignments with genetic algorithms", Ph.D. dissertation, University of Maryland, College Park, MD, 1998.
- [JORD05] A. Jordan, *Environmental policy in the European Union*, Earthscan, 2005.
- [JPPS09] J. P. Putevi Srbije, "Strateško planiranje u sektoru puteva", J.P.P. Srbije, 2009.
- [JPZU05] J. P. Zavod za urbanizam Vojvodine, "Strategije razvoja i kategorizacije putne mreže u Vojvodini", http://www.arhiurb.vojvodina.gov.rs/postavljen/15/STRATEGIJA-RAZVOJA-I-KATEGORIZACIJE-PUTNE-MREZE-U-VOJVODINI.pdf?id_menu=41, 2005.

- [KASS01] I. Kassabalidis, M. A. El-Sharkawi, R. J. Marks, P. Arabshahi, A. A. Gray, "Swarm Intelligence for Routing in Communication Networks", IEEE Globecom, 2001.
- [KIM04] E. Kim, M. K. Jha, D. J. Lovell, P. Schonfeld, "Intersection Modeling for Highway Alignment Optimization", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 19, pp. 119–129, 2004.
- [KIM05] E. Kim, M. K. Jha, B. Son, "Improving the computational efficiency of highway alignment optimization models through a stepwise genetic algorithms approach", *Transportation Research Part B* 39, pp. 339–360, 2005.
- [KOJI04] N. Kojic, I. Reljin, B. Reljin, "Neural network for finding optimal path in packet - switched network", *Proc. of 7th Seminar NEUREL*, pp. 91–96, 2004.
- [KOJI04a] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Simulator procesa rutiranja u mrežama sa paketskim saobraćajem", TELFOR, Beograd, Nov. 23-25, 2004.
- [KOJI04b] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Izbor optimalne putanje pomoću neuralne mreže" ETRAN, Čačak, 2004.
- [KOJI05] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Optimal Routing in Packet Switching Network by using Neural Network", Conf. EUROCON-2005, Belgrade, Nov. 21-24, 2005.
- [KOJI06] N. Kojic, I. Reljin, B. Reljin, "Neural network for optimization of routing in communication networks", *FACTA UNIVERSITATIS*, Series: Electronics and Energetics, 2006. No. 2(19), pp. 317–329.
- [KOJI06a] N. Kojić, "Optimizacija rutiranja u mrežama sa paketskim saobraćajem", Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet Beograd, 2006.
- [KOJI06b] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Routing in optical networks by using neural network", *Proc. of 8th Sem. NEUREL*, pp. 65-68, Beograd, Sept. 25-27, 2006.
- [KOJI06c] N. Kojić, R. Stokić, I. Reljin, B. Reljin, "Poboljšanje planiranja drumskog saobraćaja primenom Hopfield-ovih neuralnih mreža", TELFOR, Beograd, Nov. 21-23, 2006.
- [KOJI07a] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Different wavelength assignment techniques in all-optical networks controlled by neural network", *Proc. 8th Conference TELSIS-2007*, Vol. 2, pp. 401-404, Niš, Sept. 26-28, 2007.
- [KOJI07b] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Primena neuralnih mreža za dinamičko multicast rutiranje video signala" TELFOR Beograd, Nov. 20-22, 2007.
- [KOJI07c] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Rutiranje i dodela talasnih dužina u optičkim mrežama primenom Hopfield-ove neuralne mreže" 51. konferencija ETRAN, jun 4-6, Igalo, Crna Gora, 2007.
- [KOJI08a] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Dinamičko multicast rutiranje primenom Hopfield-ove neuralne mreže", Telekomunikacije, Broj 1, pp. 76-85, 2008.
- [KOJI08b] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Poboljšanje postupka rutiranja u optičkim mrežama", TELFOR, Beograd, Nov. 25-27, 2008.
- [KOJI08c] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Rutiranje u mrežama sa paketskom komutacijom bazirano na kašnjenju primenom neuralne mreže", 52. konferencija ETRAN, Jun 8-12, Palić, Srbija, 2008.
- [KOJI09a] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Poboljšanje rada Hopfield-ove neuralne mreže primenom statističke obuke" XV YU INFO 09, 8-11 mart 2009. Kopaonik.
- [KOJI09b] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Određivanje minimalnog broja iteracija neuralne mreže za pronalaženje Pareto optimalne putanje pri rutiranju paketskog saobraćaja" ETRAN, Vrnjačka Banja, Jun 15-19, 2009.
- [KOJI09c] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "All-Optical Network with Simultaneous in-node Routing and Wavelength Assignment", *TELFOR Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 18-21, 2009.
- [KOJI09c] N. Kojić, "New Road Route Service Based on Hopfield Neural Network", 13th International Student Conference on Electrical Engineering, POSTER 2009,

- May 21, Prague, 2009.
- [KOJI09c] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Hopfield-ova neuralna mreža za paketsko rutiranje sa statičkim rutama", XVII Telekomunikacioni forum -TELFOR 2009, Zbornik radova str. 298-301, Beograd, Nov. 24-26, 2009.
- [KOJI10] N. Kojić, Marija Zajeganović Ivančić, I. Reljin, B. Reljin, "New algorithm for packet routing in mobile ad-hoc networks", *Journal of Automatic Control*, Vol 20, pp. 9-16, 2010.
- [KOJI10b] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Jedno rešenje problema rutiranja mobilnim agentom primenom Hopfield-ove neuralne mreže", 54. ETRAN, Donji Milanovac, Jun 7-10, 2010.
- [KOJI11] N. Kojić, Irini Reljin, Branimir Reljin, "Uticaj parametara energijske funkcije na stabilnost rada Hopfield-ove neuralne mreže", Međunarodni naučno-stručni Simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2011, Jahorina, 16.-18. mart 2011.
- [KOJI12b] N. Kojic, I. Reljin, B. Reljin, "Hybrid routing protocol for wireless mesh network based on neural network", *Journal Sensors, Sensors Networks*, 12(6), pp. 7548-7575, 2012. doi:10.3390/s120607548.
- [KOJI12d] N. Kojić, M. Pavlović, I. Reljin "Dynamic routing algorithm based on artificial intelligence", ICIST 2012 - 2nd International Conference on Information Society Technology, 29.2. - 3.3.2012. Kopaonik, Serbia.
- [KOMP93] V. P. Kompella, "Multicast Routing for Multimedia Communication", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, Vol. 1, No. 3, pp. 286-92, 1993.
- [KOSK92] B. Kosko, *Neural Networks and Fuzzy Systems*, Prentice Hall, NJ, 1992.
- [KOST11] A. Kostic-Ljubisavljevic, S. Mladenovic, V. Acimovic-Raspopovic, A. Samcovic, "The Analysis of Network Performance with Different Routing and Interconnection Methods", *Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija*, 2011, No. 2(108), pp. 43–46
- [KOST96] P. Kostić, I. Reljin, and B. Reljin, "Cellular neural network for solving routing problems in manhattan street networks," *Int. Journal of Theoretical Electrical Eng.*, no. 6, pp. 106–113, 1996, Thessaloniki (Greece).
- [KOU81] L. Kou, G. Markowsky, L. Berman, "A Fast Algorithm for Steiner Trees", *Acta Informatica* 15, pp. 141-5, 1981.
- [KRUG07] P. E. Krugler, C. M. Chang-Albitres, K. W. Pickett, R. E. Smith, I. V. Hicks, R. M. Feldman, S. Butenko, D. H. Kang, S. D. Guikema, "Asset Management Literature Review and Potential Applications of Simulation, Optimization, and Decision Analysis Techniques for Right-of-Way and Transportation Planning and Programming", Texas Transportation Institute The Texas A&M University System College Station, April 2007.
- [KURO12] J. Kurose, K. Ross, *Computer Networking: A Top-Down Approach, 6/E*, Addison-Wesly, 2012.
- [KWON08] J. Kwon, P. Varaiya, "Effectiveness of California's High Occupancy Vehicle (HOV) system", *Transportation Research Part C* 16, pp. 98–115, 2008.
- [LATH09] B. P. Lathi, Z. Ding, *Modern Digital and Analog Communication Systems* (Oxford Series in Electrical and Computer Engineering), Oxford University Press, USA, 2009.
- [LAZA04] O. Lazaro, D. Grima, "Real-time operational aspects of Hopfield neural network based dynamic channel allocation scheme", *Electronics Letters*, Vol. 40, Issue 18, pp. 1141-1143, 2004.
- [LEE93] S. Lee, S. Chang, "Neural networks for routing of communication networks with unreliable components", *IEEE trans. on Neural Networks*, Vol.4, No. 5, September 1993.
- [LEGR10] J. Legriel, C. Le Guernic, S. Cotton, O Maler, "Approximating the pareto front of multi-criteria optimization problems", *TACAS*, Vol. 6015 of *LNCS*, pp. 69-83. Springer, 2010.

- [LEON98] C. T. Leondes, *Algorithms and Architectures*, Academic Press, 1998.
- [LI05] H. Li, X. Gu, "Algorithm of neuron-reduced Hopfield neural network routing in communication networks", In *Proceedings of Communications Circuits and Systems 2005*, pp. 938.
- [LIN96] C. T. Lin, G. Lee, *Neural Fuzzy Systems: A Neural-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems*, Prentice-Hall Inc., NJ, 1996.
- [LO02] C. P. Lo, A. K. W. Yeung, *Concepts and Techniques of Geographic Information Systems*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [LUGE05] G. F. Luger, *Artificial Intelligence-Structures and Strategies for Complex Problem Solving*, Addison-Wesley, 2005.
- [MALE04] M. Maletin, *Planiranje saobraćaja i prostora*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2004.
- [MARK01] G. Marković, V. Aćimović-Raspopović, S. Lazović, "Dinamičko rutiranje saobraćaja u mrežama sa komutacijom kanala - Poređenja nekih metoda", TELFOR 2001.
- [MARK07] G. Marković, D. Todorović, V. Aćimović-Raspopović, "Routing and wavelength assignment in all-optical networks based on the bee colony optimization", *AI Communication – The European Journal of Artificial Intelligence* 20, pp. 273-285.
- [MASO53] S.J. Mason, "Feedback theory- some properties of signal-flow graphs", *Proceedings of the Institute of Radio Engineers* 41, pp. 1244-1156, 1953.
- [MASO56] S.J. Mason, "Feedback theory- further properties of signal-flow graphs", *Proceedings of the Institute of Radio Engineers* 44, pp. 920-926, 1956.
- [MCCU43] W.S. McCulloch, W. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", *Bulletin of mathematical biophysics* 5, pp. 115-133, 1943
- [MEDH07] D. Medhi, K. Ramasamy, *Network Routing: Algorithms, Protocols, and Architectures*, Elsevier 2007.
- [MEKH97] B. Mukherjee, *Optical Communication Networks*, McGraw-Hill, 1997.
- [MERL92] P. Merlin, *Géographie des Transports, Que sais-je?*, Paris: Presses Universitaires de France, 1992.
- [MILL01] H. J. Miller, S.L. Shaw, *GIS-T Data Models in Geographic Information Systems for Transportation: Principles and Applications*, Oxford: Oxford University Press, 2001. http://www.gisvisionmag.com/Book/miller_shaw.pdf
- [MOLT05] C. Molter, U. Salihoglu, H. Bersini, "Storing static and cyclic patterns in an Hopfield neural network", Technical report, Laboratory of artificial intelligence (IRIDIA-ULB), February 2005.
- [MUKH00] B. Mukherjee, "WDM Optical Communication Networks: Progress and Challenges" *IEEE JSAC*, Vol.18, pp. 1810-1824. Oct. 2000.
- [MUKH03] A. Mukherjee, S. Bandyopadhyay, D. Saha, *Location Management and Routing in Mobile Wireless Networks*, Artech House, 2003.
- [MULL90] B. Muller, J. Reinhardt, *Neural Networks: an introduction*, Springer-Verlag, 1990.
- [MURT02] C. S. R. Murthy, M. Gurusamy, *WDM Optical Networks -Concepts, Design and Algorithms*, Prentice Hall, 2002.
- [NARB08] L. Narbutaite, B. Dekeris, "Triple Play Services Packet Scheduling Performance Evaluation", *Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija*, 2008. No. 6(86). pp. 85–88.
- [NASC94] C. L. Nascimento Jr., "Artificial Neural Networks in Control and Optimization", Ph. D thesis, University of Manchester, February 1994.
- [OPRI98] S. Opricović, *Višekriterijumska optimizacija sistema u građevinarstvu*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1998.
- [PARK04] B. Parkhurst, *Routing first-step*, Cisco Press, September 2004.
- [PARK05] K. I. Park, *QOS In Packet Networks*, Springer Science & Business Media, 2005.

- [PARK98] D.C. Park, S.E. Choi, "A neural network based multi-destination routing algorithm for communication network", *Proc. Int. Conf. Neural Networks*, Anchorage, USA, pp. 1673–1678, 1998.
- [PATW99] A. Patwardhan, G. Serpen, "Simultaneous recurrent neural networks for static optimization problems", 1999. <http://www.eecs.utoledo.edu>
- [PERL85] R. Perlman, "An Algorithm for Distributed Computation of a Spanning Tree in an Extended LAN", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* Vol. 15 (4), pp. 44–53, 1985.
- [PIOR04] M. Pióro, D. Medhi, *Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks*, Elsevier, 2004.
- [PORN95] C. Pornavalai, G. Chakraborty, N. Shiratori, "A neural network approach to multicast routing in real-time communication networks", *Third International Conference on Network Protocols (ICNP'95)*, pp. 332-339, 1995.
- [POZN01] A. S. Poznyak, E. N. Sanchez, W. Yu, "Differential neural networks for robust nonlinear control Identification", *State Estimation and Trajectory Tracking*, World Scientific Publishing Co., Singapore, 2001.
- [POZN98] A. S. Poznyak, W. Yu, E. N. Sanchez, J. P. Perez, "Stability Analysis of Dynamic Neural Control", *Expert System with Applications*, Vol.14, No.1, pp. 227-236, 1998.
- [QIN03] H. Qin, S. Zhang, Z. Liu, "Dynamic routing and wavelength assignment for limited-range wavelength conversion", *IEEE Communication Letters*, pp. 136-138, March 2003.
- [RACK07] S. Rackley, *Wireless Networking Technology - From Principles to Successful Implementation*, Elsevier 2007.
- [RAUC88] H. Rauch, T. Winarske, "Neural networks for routing communication traffic", *IEEE Cont. Syst. Mag.*, pp. 26–30, 1988.
- [RELJ95] B. Reljin, I. Reljin, "Rešavanje problema rutiranja pomoću neuralnih mreža", *Zbornik 13. simpozijuma o novim tehnologijama u PTT-u*, Saobraćajni fakultet, Beograd, Dec. 1995.
- [RELJ95a] I. Reljin, P. Kostić, B. Reljin, "Jedno rešenje problema rutiranja primenom koncepta celularnih neuralnih mreža", *Zbornik trećeg telekomunikacionog foruma*, TELFOR-95, Beograd, dec. 1995.
- [RELJ98] I. Reljin, "Kontrola ATM čvora pomoću neuralne mreže", doktorska disertacija, ETF, Beograd 1998.
- [RIMM85] P. Rimmer, "Transport Geography", *Progress in Human Geography*, pp. 271–277, 1985.
- [RODR00] J. P. Rodrigue, *L'espace économique mondial*, Presses de l'Université du Québec, 2000.
- [RODR06] J. P. Rodrigue, C. Comtois, B. Slack, *The Geography of Transport Systems*, Taylor & Francis e-Library, 2006.
- [ROJA96] R. Rojas, J. Feldman, *Neural Networks: A Systematic Introduction*, Springer, 1996.
- [RUSS95] S. J. Russel, P. Norvig, *Artificial Intelligence – A Modern Approach*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
- [SANT08] R. A. Santos, A. González, M. García-Ruiz, A. Edwards, L. Villaseñor, V. Rangel, "Analysis of Topological and Geographical Multicast Routing Algorithms on Wireless Ad Hoc Networks", *Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija*, No. 2(82), pp. 23–28, 2008.
- [SARK08] S. K. Sarkar, T. G. Basavaraju, C. Puttamadappa, *Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Principles, Protocols, and Applications*, Taylor & Francis Group, LLC, 2008.
- [SCHU07] W. H. Schuler, C. J. A. Bastos-Filho, A. L. I. Oliveira, "A Hybrid Hopfield Network-Simulated Annealing approach to Optimize Routing Processes in

- Telecommunications Networks”, *Proc.on Seventh International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, ISDA 2007., Rio de Janeiro, Brazil, pp. 58-63, Oct. 2007.
- [SEIF08] R. Seifert, J. Edwards, *The All-New Switch Book: The Complete Guide to LAN Switching Technology*, Wiley Publishing, Inc., 2008.
- [SHAR06] M. A. Sharifi, L. Boerboom, K. B. Shamsudin, L. Veeramuthu, “Spatial Multiple Criteria Decision Analysis in Integrated Planning for Public Transport and Land Use Development Study in Klang Valley, Malaysia”, *ISPRS Technical Commission II Symposium*, Vienna, 12 – 14, July, 2006.
- [SHAW02] S. L. Shaw, “Book Review: Geographic Information Systems in Transportation Research”, *Journal of Regional Science*, 42(2), pp. 418–21, 2002.
- [SIMM08] J. M. Simmons, *Optical Network Design and Planning*, Springer-Verlag, 2008.
- [SIMP90] P. Simpson, *Artificial neural system*, Pergamon, Elmsford, NY, 1990.
- [SMIL02] A. Smiljanic, “Scheduling of Multicast Traffic in High-Capacity Packet Switches”, *IEEE Communication Magazine*, No. 40(11), pp. 72–77, 2002.
- [STER00] T. Stern, K. Bala, *Multiwavelength Optical Networks: A Layered Approach*, Addison-Wesley, 2000.
- [STEU86] R.E. Steuer, *Multiple criteria optimization: Theory, computation, and application*, JohnWiley & Sons, 1986.
- [STOJ04] M. Stojanovic, V. Acimovic-Raspopovic, “A Novel Approach for Providing Quality of Service in Multiservice IP Networks”, *FACTA UNIVERSITATIS (NI_S)*, Series: Electronics and Energetics, No. 17, pp. 261–274, 2004.
- [SYMI03] K. J. Symington, A. J. Waddie, M. R. Taghizadeh, J. F. Snowdon, “A neural-network packet switch controller: scalability, performance and network optimization”, *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol.14, No.1, pp. 28–34, 2003.
- [TAAF96] E. J. Taaffe, H. L. Gauthier, M. E. O’Kelly, *Geography of Transportation*, 2nd edn, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.
- [TEOD98] D. Teodorović, K. Vukadinović, *Traffic Control and Transport Planning: A Fuzzy Sets and Neural Networks Approach*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1998.
- [TEOD07] D. Teodorović, *Transportne mreže*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2007.
- [TEOD12] D. Teodorović, M. Šelmić, *Računarska inteligencija u saobraćaju*, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2012.
- [TOLL95] R. Tolley, B. Turton, *Transport Systems, Policy and Planning: A Geographical Approach*, Harlow: Longman, 1995.
- [TORN11] M. Tornatore, F. Dikbiyik, B. Mukherjee, “(3W-) Availability-Aware Routing in optical WDM networks: when, where and at what time”, In *Proc. Of 13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1-5, 26-30 June, 2011.
- [TSO97] H. L. Tsoukalas, E. R. Uhrig, *Fuzzy and neural approaches in engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [ULRI08] H. F. Ulrich, E. P. Lehrmann, I. Abe, P. S. Andre, D. J. Atkin, *Telecommunications Research Trends*, Nova Science Pub Inc, 2008.
- [VICT05] Victoria Transport Policy Institute, “Defining, Evaluating and Improving Accessibility”, *Transport Demand Management Encyclopedia*, 2005. <http://www.vtpi.org/tm/tm84.htm>
- [VUJO96] M. Vujošević, M. Stanojević, *Metode optimizacije - lokacijski, mrežni i višekriterijumski modeli*, FON, 1996.
- [WANG00] Y. Wang, “Intelligent mesh based optical network routing and restoration”, *International Conference on Communication Technology Proceedings*, 2000.

- WCC - ICCT 2000, Vol 1, Beijing, 21-25.8.2000.
- [WANG97] L. X Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice Hall, NJ, 1997.
- [WEI93] L. Wei, D. Estrin, "A comparison of multicast trees and algorithms", Tech. Rep. USC-CS-93-560, Computer Science Department, University of Southern California, 1993.
- [WEI94] L. Wei, D. Estrin, "The trade-offs of multicast trees and algorithms," *ICCCN'94*, 1994.
- [WHIT05] R. White, D. Slice, A. Retana, *Optimal Routing Design*, Cisco Press, June 2005.
- [WU06] J. Wu, *Distributed System Design*, CRC Press LLC, 2006.
- [YU01] W. Yu, X. Li, "Some Stability Properties of Dynamic Neural Networks", *IEEE Transactions on Circuits and Systems, Part I*, Vol.48, No.2, pp. 256-259, 2001.
- [ZAK03] S. H. Zak, *Systems and Control*, Oxford University Press, 2003.
- [ZHAN00] H. Zhang, J.P. Jue, B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks", *SPIE Opt. Networking Magazine*, Vol. 1, No. 1, pp. 47-60, Jan. 2000.
- [ZHAN89] L. Zhang, S. Thomopoulos, "Neural network implementation of the shortest path algorithm for traffic routing in communication networks", *Proc. Int. Joint Conf. Neural Networks*, June 1989.
- [ZHAN98] X. Zhang, C. Qiao, "Wavelength assignment for dynamic traffic in multi-fiber WDM network", *Proc. ICCCN '98*, pp. 479-485, Lafayette, LA, Oct. 1998.
- [ZHU03] K. Zhu, B. Mukherjee, "A Review of Traffic Grooming in WDM Optical Networks: Architecture and Challenges", *Optical Networks Magazine*, 2003.
- [ZINK05] M. Zink, *Scalable Video on Demand: Adaptive Internet-based Distribution*, Wiley, 2005.

Mr Nenad Kojić, dipl. inž.

OBRAZOVANJE

Magistarski rad, sa temom "*Optimizacija rutiranja u mrežama sa paketskim saobraćajem*" odbranio na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 2006. godine, pod rukovodstvom dr Irini Reljin.

Diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu Univerziteta u Beogradu 2003.

KRETANJA U SLUŽBI

Od 2005. – do danas - Visoka škola strukovnih studija za informacione i komunikacione tehnologije, u zvanju predavača u oblasti Elektrotehnika i računarstvo.

Od 2004. – 2005. - honorarno na Višoj školi za informacione i komunikacione tehnologije.

Od 2003. – 2004. - Srednja tehnička PTT škola, profesor elektrotehničke grupe predmeta.

Kao autor ili koautor ima tri rada u međunarodnim časopisima sa impakt faktorom, tri rada u međunarodnim časopisima i četiri u domaćim stručnim časopisima. Ima objavljenih sedam knjiga, od kojih su najveći broj pomoćni udžbenici. U zbornicima međunarodnih konferencija ima dvadesetsedam objavljenih radova, dok u zbornicima domaćih pedesetri rada. Član je domaćih stručnih društava Etran i Telekomunikacije i član je Grupe za digitalnu obradu slike, telemedicinu i multimediju", Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Od 2007. godine recezent je radova domaće konferencije Telekomunikacioni forum (TELFOR).

Usavršavao se iz oblasti multimedije (Stručna praksa na Queen Mary University of London, pod pokroviteljstvom prof. Ebroul Izquierdo-a u okviru projekta COST 292 - *Semantic multimodal analysis of digital media.*), računarskih mreža (CISCO

akademija), programiranja, elektronskog poslovanja, berzanskog trgovanja, animacija i sl.

U toku nastavnih aktivnosti angažovan na predmetima Web dizajn, Web programiranje, Web programiranje PHP, Web programiranje ASP, Baze podataka, Multimedijale komunikacije, Kompresije i Elektronika.