

UNIVERZITET U BEOGRADU

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Dejan S. Vujić

**MODEL RADIO-MREŽE ZA PRISTUP  
U SLUČAJU VELIKIH SKUPOVA**

doktorska disertacija

Beograd, 2014

UNIVERSITY OF BELGRADE

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Dejan S. Vujić

**LARGE EVENTS RADIO ACCESS NETWORK  
MODEL**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2014

## **DETALJI O RADU I ČLANOVIMA KOMISIJE**

Naučno-nastavno veće Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu imenovalo je na svojoj 771. sednici, održanoj dana 25.02.2014. godine, imenovalo je komisiju za pregled i ocenu doktorske disertacije pod nazivom „Model radio-mreže za pristup u slučaju velikih skupova“ autora Dejana S. Vujića.

Članovi komisije imenovani za predgled i ocenu su:

### **Mentor**

Dr Miroslav L. Dukić, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

### **Članovi komisije**

Dr Predrag N. Ivaniš, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Dr Goran Z. Marković, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet

Dr Aleksandar M. Nešković, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Dr Milan Lj. Janković, docent  
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Dr Dejan Drajić, docent  
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

**Datum odbrane doktorske disertacije:**

**UDK broj:** 621.3

**Naučna oblast:** Elektrotehnika i računarstvo

**Uža naučna oblast:** Telekomunikacije (bežični telekomunikacioni sistemi)

**Ključne reči:** UMTS, radio-pristupna mreža, Monte-Carlo simulacija, veliki skupovi, specijalni događaji

## **DETAILS ABOUT DOCTORAL DISSERTATION AND COMMISSION MEMBERS**

Academic Council of School of Electrical Engineering, University of Belgrade, on its' 771<sup>st</sup> session, held on 02.25.2014, appointed a commission to review and evaluate the doctoral thesis entitled "Large Events Radio Access Network Model" by Dejan S. Vujic.

Members of the commission appointed for a review and evaluation are:

### **Mentor**

Dr Miroslav L. Dukić, full professor  
University of Belgrade – School of Electrical Engineering

### **Commission members**

Dr Predrag N. Ivaniš, associate professor  
University of Belgrade – School of Electrical Engineering

Dr Goran Z. Marković, associate professor  
University of Belgrade – Faculty of Transport and Traffic Engineering

Dr Aleksandar M. Nešković, associate professor  
University of Belgrade – School of Electrical Engineering

Dr Milan Lj. Janković, assistant professor  
University of Belgrade – School of Electrical Engineering

Dr Dejan Drajić, assistant professor  
University of Belgrade – School of Electrical Engineering

**Date of the defense of the doctoral dissertation:**

**UDC number:** 621.3

**Scientific area:** Electrical and computer engineering

**Scientific subarea:** Telecommunications (Wireless telecommunication systems)

**Key words:** UMTS, radio access network, Monte-Carlo simulation, large events, special events

## **REZIME**

Analizi problema organizacije radio-pristupne mreže i analizi kapaciteta u slučaju velikih skupova do sada nije bila posvećivana dovoljna pažnja. Razlozi za to su višestruki, počev od neprepoznavanja značaja problema u praksi, istraživačkim i praktičnim fokusom na makro radio-pristupne mreže zbog velikog broja korisnika u njima, do nejasnih kriterijuma za kategorizaciju i opisivanje ovakvih skupova pa samim tim i odgovarajućih radio-pristupnih mreža na ovakvim skupovima.

Predmet ovog rada jeste upravo da predloži metodu i prikaže rezultate istraživanja ponašanja korisnika na velikim skupovima, kao i da ponudi odgovarajuće objektivne mere za kategorizaciju skupova, procenu potrebnih resursa uz zadržavanje određenog kvaliteta usluge i rizika da se takav kvalitet naruši.

Uočeno je tokom analize da je kretanje posetilaca (korisnika mobilnih mreža) na velikim skupovima u grupama, kao i njihovo ponašanje, od velikog značaja za modelovanje saobraćaja i opterećenja mreže. Primećeno je da male promene u ponašanju korisnika mogu dovesti do značajnih promena u radio-pristupnoj mreži kao posledica velikog broja korisnika koji se ponašaju vrlo slično i istovremeno su aktivni.

Zbog toga, izvršena je kategorizacija (karakterizacija) skupova kako bi se odredio njihov značaj u odnosu na obim generisanog saobraćaja i broja opsluženih korisnika. Težinska funkcija je definisana kako bi se procenio ovaj značaj a zatim je na primeru Olimpijskih igara 2012 i objekata u Olimpijskom parku demonstrirana primena. Pomenuta funkcija zavisi od 3 parametra: položaj objekta u kom se skup održava (ili poznavanje konkretnog objekta), vremena kada se skup održava (vreme početka i završetka) i vrste dinamike skupa koji je predmet analize. Izvršena je podela velikih skupova na osnovu dinamike samog skupa. U osnovi, definisane su 2 vrste skupova sa

odgovarajućim saobraćajnim modelima na osnovu trajanja skupova, pauza u toku skupova itd. Ove dve vrste skupova su:

- skupovi velike dinamike. Ovo su skupovi na kojima posetioci kontinuirano prate dešavanja i gde aktivno učestvuju u navijanju ili u podršci nastupu umetnika. Za ove skupove je karakteristična mala upotreba telekomunikacionih servisa tokom trajanja događaja (aktivnosti na terenu) a povećano korišćenje u toku pauza. Predloženi saobraćajni modeli uzimaju u obzir trajanje pauza u toku događaja. Ovi tipovi događaja su manje zahtevni sa stanovišta ukupnog prenetog saobraćaja ali se odlikuju i velikim istovremenim korišćenjem servisa od strane korisnika. U satu koji prethodi održavanju skupa, ponašanje korisnika je određeno trećim modelom koji nije namenjen sportskim skupovima (objektima);
- skupovi male dinamike. Primeri skupova male dinamike su atletska, plivačka i biciklistička takmičenja ali i određeni koncerti, posebno nastupi predgrupa. Odlika ovih skupova je da posetioci (korisnici) ne učestvuju aktivno i kontinuirano u navijanju i da postoje dugi vremenski intervali neaktivnosti i na samom skupu (terenu). Zbog toga, korisnici u dužim vremenskim intervalima koriste telekomunikacione usluge da bi proverili stanje na drugim skupovima ili za svakodnevne poslove. Ovi skupovi su zahtevniji sa stanovišta ukupno prenesenog saobraćaja uz praktično konstantno opterećenje mreže.

Za skupove posetilaca (korisnika) u objektima koji nisu namenjeni sportskim događajima definisani su dodatni saobraćajni profili. U slučaju sportskih dešavanja, kao što su Olimpijske igre ili Univerzijada, ovi korisnici imaju prilike da posmatraju skupove na velikim informacionim ekranima, da posećuju oblasti namenjene okupljanju posetilaca itd.

Dodatna analiza je sprovedena u zavisnosti od položaja objekta u kom se održava veliki skup i udaljenosti od drugih objekata. Oblast u kojoj se održavaju veliki skupovi podeljena je u kvadrante gde svaki kvadrant sadrži jedan ili više objekata. Kvadrantu sa objektom od interesa je prema predloženom algoritmu dodeljen



identifikacioni faktor 1. Ostali kvadranti koji imaju zajedničku stranicu sa pomenutim imaju vrednost 2, sa zajedničkim uglom vrednost 3. Dalje, kvadranti koji dele stranicu sa kvadrantima sa faktorom 2 dobijaju identifikacioni faktor 4, a oni koji sa kvadrantima sa faktorom 3 dele stranice dobijaju oznaku 5. Proces se nastavlja dok postoje kvadranti. Ovaj proces koristi se da bi se:

- identifikovali svi objekti u oblasti gde se nalaze objekti u kojima se održavaju skupovi u odnosu na posmatrani objekat koji je predmet analize;
- kreirali težinski faktori za konačnu funkciju kategorizacije (karakterizacije) skupa koji su jednaki  $1/(n_1-n_2)$ , gde su  $n_1$  i  $n_2$  identifikacioni faktori kvadranta čiji se međusobni uticaj analizira. U slučaju kada se analizira uticaj objekata iz istog kvadranta, težinski faktor je jednak  $n$ , broju objekata u kvadrantu koji se analizira.

Treća analiza bavi se vremenom potrebnim korisnicima da dođu od jednog objekta u kom se održava veliki skup (ili da prođu pored njega) i drugog objekta u kom drugi skup počinje ili se završio. Za potrebe ove analize pomenuto vreme je izračunato na osnovu:

- vremena potrebnog da publika napusti objekat u kom se održavao skup;
- vremena potrebnog da publika dođe od jednog objekta u kom se održavao skup do drugog objekta, koristeći staze (putanje) između objekata u kojima se održavaju skupovi.

Pretpostavljena je brzina kretanja posetilaca od 3km/h i najnepovoljniji slučaj uniformisanog kretanja u grupi, najkraćim putem kao optimalnim i najkritičnijim. Kretanje korisnika dodatno se može analizirati primenom teorija kretanja grupa ili ponašanja pešaka, kako bi se odredile verovatnoće izbora određenih staza a time i broj potencijalnih korisnika na različitim stazama u oblasti u kojoj se nalaze objekti od interesa. Sve tri analize koje određuju konačnu težinsku funkciju pretpostavljaju da je radio-pristupna mreža projektovana tako da zadovolji inicijalni kapacitet u skladu sa očekivanim brojem korisnika (tj. brojem posetilaca i pratećim tehničkim osobljem) i vrstom dinamike skupa. Svrha predložene funkcije je da se utvrdi deo dana ili kritičan objekat kod koga može doći do preopterećenja mreže. Zbog toga, izvršena su analiza i

simulacija, i dat je predlog dimenzionisanja radio-pristupne mreže za očekivani broj korisnika. Takođe, razvijena je odgovarajuća funkcija troška kako bi se ocenio kvalitet predloženog rešenja mreže i pronašao optimalan odnos između kvaliteta mreže i troška njene izgradnje za potrebe velikih skupova.

Kao primer za demonstraciju primene predloženih algoritama iskorišćene su Olimpijske igre u Londonu 2012. godine i Olimpijski park u kom se nalazi većina objekata u kojima su održani skupovi vezani za Olimpijske igre. Za predviđeni broj korisnika (počev od 100 pa do 125,000) određeni su neophodni resursi za obradu signala (broj sektora), analizirano stanje radio-interfejsa i kapacitet RNC-a.

Na osnovu prikazanih rezultata se može zaključiti da promena u obimu saobraćaja može biti desetostruka poredeći maksimalne i minimalne zahteve. Na osnovu rezultata primene predložene funkcije troška i rezultata simulacije, može se zaključiti da je trošak obezbeđivanja neophodnih resursa stepenasta funkcija sa različitom cenom po Mb/s i broju angažovanih sektora, zbog diskretne prirode resursa i hardverskih ograničenja za ponudeni kapacitet. Može se zaključiti da dok god nije potrebno povećanje količine opreme (*upgrade*), troškovi po Mb/s se vrlo sporo menjaju sa stepeničastim promenama na kapacitetima kada je potrebno povećati (*upgrade-ovati*) opremu. Čak i u situacijama kada je potrebno dodati novu opremu, ukupni troškovi po Mb/s rastu vrlo sporo. Primetno je da i u situaciji kada nije potrebno dodati novu opremu ukupni troškovi za kapacitet vrlo malo rastu zbog povećanja ukupno prenetog saobraćaja sa povećanjem broja korisnika. U isto vreme, troškovi po Mb/s se smanjuju po pojedinačnom korisniku zbog boljeg iskorišćenja resursa i raspodele osnovnih troškova na veću grupu korisnika. Može se zaključiti da RNC ima značajan uticaj na funkciju troška zbog svoje vrednosti i zbog značajnog povećanja broja podržanih korisnika posle *upgrade*-a. Promena broja ploča sa CE-ovima manje utiče na funkciju troška zbog niske cene pojedinačne ploče u odnosu na cenu RNC-a i kompletne mreže. Pokazano je da se ušteda može ostvariti ako se odredi kritičan broj istovremenih korisnika koji se mogu podržati u mreži uz minimizaciju troška. Primenom predložene funkcije troška utvrđeno je da je uz nedostatak potrebnog kapaciteta u manje od 1% slučajeva moguće smanjiti količinu potrebne opreme za 10% stvarajući tako značajne uštede.

## **SUMMARY**

Radio access network (RAN) organisation and capacity analysis in the case of special events has not been given proper attention. The reasons for this are manifold, ranging from failure to recognize the importance of the problem in practice, research and practice focus on the macro RAN due to the large number of users in them, the vague criteria for classification and description of such events and therefore appropriate RAN description for such events.

The subject of this paper is to propose a method and present the results of user behaviour in large (special) events, as well as to provide appropriate objective measure for categorizing events, assessment of resources needed while keeping certain quality of service and the risk that such a quality will be distorted.

It was observed during the analysis of the crowd movement (mobile subscribers movement) in special events, as well as their behaviour is of great importance for modelling traffic and network load. It was noted that small changes in user behaviour can lead to significant changes in the RAN as a consequence of the large number of customers who behave very similarly and who are simultaneously active.

Therefore, events categorisation (characterisation) was performed in order to determine their significance in relation to the volume of traffic generated and the number of users served by. Weighting function is defined to evaluate the significance and special events in 2012 Olympic Games and the facilities in the Olympic Park have been used as an example to demonstrate the application of the proposed function. The aforementioned function depends on three parameters: the position of the venue in which the event took place (or knowing the specific venue), the time the event is being held (beginning and ending) and the types of event dynamics that is subject to analysis.

In essence, two types of event dynamics have been defined, with appropriate traffic models based on defines the two types of meetings with appropriate traffic models based on the duration of the event, breaks during the events and so on. These two event types are:

- high dynamics events. These are events where visitors continually monitor events and where they actively participate in cheerleading or in support of artists' performance. These events are characterised by low usage of telecommunications services during the the event and increased usage during the breaks. The proposed traffic models take into account the duration of pauses during the event. These types of events are less demanding from the point of total traffic transferred but are characterised by a large and simultaneous use of services by users. In the hour preceding the events, user behaviour is determined by the third model, which is designed for other venues;
- small dynamics events. Examples of such events are athletics, swimming and cycling competitions and some concerts, specially performances by the opening groups. A basic characteristic of these events is that visitors (users) do not participate actively in the continuous cheering and there are long periods of inactivity during the event. Therefore, users in longer time intervals are using telecommunications services in order to check the situation in the other venues, or for everyday tasks. These events are demanding from the standpoint of the transferred traffic with practically constant network load.

First analysis treats distance between the venues in the area of interest. The area has been sectioned in quadrants where each quadrant (ideally) has only one sport venue inside. Such quadrant is assigned identification number 1. In the case that there are multiple venues in the same quadrant (due to very short distances between the venues), quadrant is assigned additional identification number equal to  $1/n$  where  $n$  is the number of venues in the quadrant. All other quadrants with venues inside, sharing the side with the analyzed quadrant are assigned identification number 2 and all quadrants having shared corner (single point) with the quadrant of interest are assigned value 3. After that,

all quadrants who are sharing side with quadrants marked with 2 would be marked with number 4 and those sharing side with quadrants identified as 3 would be marked as 5 and so on until all quadrants are exhausted. This procedure is used to:

- identify all venues in the area of interest related to the specific venue which is in the focus of the analysis;
- create weighting factors for the final event characterisation function as which are equal to  $1/(n_1-n_2)$ , where  $n_1$  and  $n_2$  are identification values of the quadrants where the venues whose mutual influence is analyzed. In the case when influence between the venues in the same quadrant is analyzed, weighting factor is equal to  $n$ , the number of venues in the same, analyzed, quadrant.

Third analysis has been based on distance between the venues and between the venues and Common Domain area in order to estimate necessary time for users from one venue to reach or to pass next to the another venue and to reach or to pass Common Domain area as the area with biggest number of users in the Olympic Park. For this analysis, time has been calculated on two parameters:

- time necessary for the audience to leave the venue;
- time necessary to reach other venue using lanes in the area of interest.

It is assumed that average walking speed of visitors is 3km/h and worst case of unified and compact group passing next to the venue, by the shortest path, is analyzed. Crowd movement could be further analysed using the crowd movement theory of pedestrian behaviour theory, to determine the probability of selecting specific paths and therefore the number of potential users on different paths in the area containing the venues of interest.

All three types of analysis assume that capacity of the network is already dimensioned to satisfy initially assumed number of users and the role of event characterization is to show what period of the day or what part of the RAN might have high load. Therefore, an analysis, simulation and RAN dimensioning have been performed for the expected number of users. Appropriate cost function has been

developed in order to evaluate the quality of the proposed solution and to find the optimal balance between quality and cost of special events RAN.

Events in Olympic Games in London 2012 have been used as an example to demonstrate the application of the proposed algorithm. The Olympic Park contains most of the venues in which the Olympic events will take place. For the estimated number of users (ranging from 100 to 125,000) necessary resources for baseband signal processing have been determined (number of sectors has been determined), state of the radio-interface and capacity RNC have been analysed.

Based on the results it can be concluded that the change in the traffic volume can be tenfold compared the maximum and minimum requirements. Based on the results of the implementation of the proposed cost functions and the simulation results, it can be concluded that the cost of providing the necessary resources is step function with a different price per Mb/s and the number of engaged sectors, due to the discrete nature of resources and hardware limitations of the offered capacity. It can be concluded that as long as it is not necessary to increase the amount of equipment (to upgrade it), the cost per Mb/s is changing very slowly with a stepped change in capacity when upgrade should be performed. Even in situations when upgrade is needed, the total cost per Mb/s is growing very slowly. It is notable that in a situation where it is not necessary to make an upgrade, the total cost of capacity grows a little due to the increase of transferred traffic from the increasing number of users. At the same time, the cost per Mb/s is going down due to better resource utilisation and distributed costs on larger number of users. It can be concluded that the RNC has a significant impact on the cost function because of its value and because of the significant increase in the number of supported users after the upgrade. Changes in number of CE boards have smaller impact on the cost function due to the low cost of a single board in relation to the price of the RNC and the entire network. It is shown that savings can be achieved if we determine critical number of simultaneous users that can be supported in the network while minimizing the cost. It has been found that the lack of the required capacity in less than 1 % of cases can reduce the amount of equipment necessary for 10 % creating significant savings by using the proposed cost function.

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1 Pregled literature.....	2
1.2 Definicija velikog skupa i predmet istraživanja .....	3
1.3 Sadržina rada.....	5
<b>2. ANALIZA KAPACITETA RADIO-PRISTUPNE MREŽE.....</b>	<b>7</b>
2.1 Iskustva izgradnje radio-pristupne mreže i troškovna ocena kvaliteta mreže .....	7
2.2 Budžet radio-linka .....	11
2.3 Dostupnost servisa i verovatnoća blokade.....	14
2.3.1 Blokada poziva usled nedovoljnog kapaciteta radio-interfejsa (soft-blocking) .....	14
2.3.2 Analiza blokade resursa za obradu servisa (hard-blocking) .....	21
2.3.3 Interakcija između soft-blocking-a i hard-blocking-a .....	22
2.4 Struktura servisa i ponašanje korisnika.....	23
<b>3. SIMULACIONI MODEL I REZULTATI SIMULACIJE KAPACITETA MREŽE.....</b>	<b>29</b>
3.1 Simulacioni model .....	29
3.2 Korisnički profili i rezultati simulacije kapaciteta mreže.....	33
<b>4. FUNKCIJA TROŠKA.....</b>	<b>39</b>
4.1 Definicija funkcije troška .....	39
4.2 Rezultati simulacije funkcije troška .....	41
<b>5. PRIMER ANALIZE KAPACITETA.....</b>	<b>46</b>
5.1.1 Pretpostavke vezane za radio-interfejs .....	46
5.1.2 Pretpostavke vezane za planiranje kapaciteta .....	47

5.1.3 Dinamika skupa.....	47
5.1.4 Saobraćajni profil za skupove koji nisu sportski .....	52
<b>6. PONAŠANJE KORISNIKA I KRETANJE GRUPE.....</b>	<b>56</b>
6.1 Teorija kretanja pešaka .....	56
6.2 Modelovanje kretanja grupe i pojedinaca.....	59
6.3 Kategorizacija i parametrizacija grupe.....	62
<b>7. KATEGORIZACIJA SKUPA .....</b>	<b>66</b>
7.1 Funkcija kategorizacije skupova .....	67
7.2 Primer karakterizacije skupa .....	84
7.2.1 Karakterizacija skupa u košarkaškoj sali .....	85
7.2.2 Poređenje sa izabranim modelom iz literature .....	100
7.2.3 Karakterizacija oblasti namenjene okupljanju korisnika .....	101
7.3 Primer karakterizacije skupa koji nije sportski .....	121
<b>8. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>124</b>
<b>9. LITERATURA .....</b>	<b>128</b>
<b>10. SPISAK SKRAĆENICA .....</b>	<b>132</b>
<b>11. BIOGRAFIJA AUTORA .....</b>	<b>134</b>
<b>PRILOG 1 – IZJAVA O AUTORSTVU .....</b>	<b>136</b>
<b>PRILOG 2 – IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKOG RADA.....</b>	<b>137</b>
<b>PRILOG 3 – IZJAVA O KORIŠĆENJU .....</b>	<b>138</b>



## SPISAK SLIKA

Slika 2.1.1 – Primer mobilne privremene lokacije. ....	9
Slika 2.3.1 – Geometrija sistema. ....	16
Slika 2.3.2 – Horizontalni dijagram zračenja antene u slučaju lokacije sa 3 antene. ....	19
Slika 2.3.3 – Horizontalni dijagram zračenja antene u slučaju lokacije sa 6 antena. ....	20
Slika 3.1.1 – Tok simulacije. ....	30
Slika 3.1.2 – Olimpijski park u Londonu. ....	33
Slika 3.2.1 – Broj potrebnih sektora u slučaju različitih raspodela zahteva za PS servisima. ....	34
Slika 3.2.2 – Maksimalan broj sektora u slučaju 10,000 korisnika na skupu male dinamike, sa handoverom između ćelija, uniformnom raspodelom trajanja PS servisa i blokadom sesija u skladu sa Erlang C jednačinom. ....	36
Slika 3.2.3 – Histogram koji predstavlja broj potrebnih sektora za opsluživanje 10,000 korisnika na skupu male dinamike, sa handoverom između ćelija, uniformnom raspodelom trajanja PS servisa i blokadom sesija u skladu sa Erlang C jednačinom. ....	36
Slika 3.2.4 – Maksimalan broj sektora za opsluživanje 50,000 korisnika na skupovima male dinamike, sa handoverom između ćelija, uniformnom raspodelom trajanja PS servisa i blokadom sesija u skladu sa Erlang C jednačinom. ....	37
Slika 3.2.5 – Histogram koji prikazuje potreban broj sektora za opsluživanje 50,000 korisnika na skupovima male dinamike, sa aktivnim handoverom između ćelija, uniformnom raspodelom trajanja PS servisa i blokadom sesija određenom Erlang C jednačinom. ....	38
Slika 4.2.1 – Promena funkcije troška uzimajući u obzir broj sektora koji se mogu povezati na RNC, za različite modele ponašanja korisnika. ....	42
Slika 4.2.2 – Promene funkcije troška za rezultate i profil ponašanja korisnika prikazan na Sl.4.2.1. Izvršeno je 50 puta po 1,000 simulacionih ciklusa za 50,000 korisnika. ....	44
Slika 4.2.3 – Odnos između maksimalne i srednje vrednosti funkcije troška za ponašanje korisnika prikazano na Sl.4.2.1 i u Tab.2.4.1. ....	44
Slika 5.1.1 – Potreban broj sektora za košarkašku salu, za 10,000 posetilaca, za upotrebu PS servisa u skladu sa Gauss-ovom raspodelom, Tab.2.4.1. ....	48
Slika 5.1.2 – Potreban broj sektora za košarkašku salu, za 10,000 posetilaca, za upotrebu PS servisa u skladu sa uniformnom raspodelom, Tab.2.4.1. ....	49
Slika 6.2.1 – Kretanje grupe i pojedinca u 2D prostoru [42]. ....	61
Slika 7.1.1 – Susedni kvadranti sa objektima u njima, u okviru Olimpijskog parka. ....	70
Slika 7.1.2 – Numeracija kvadranta za potrebe kreiranja funkcije karakterizacije skupova. ....	70

Slika 7.1.3 – Položaj Stratford stanice Westfield tržnog centra u odnosu na Centar za sportove na vodi. ....	73
Slika 7.1.4 – Parametar T za kombinovano vreme pre početka skupa od interesa.....	83
Slika 7.1.5 – Parametar T za kombinovano vreme posle završetka skupa od interesa...	84
Slika 7.2.1 – Numeracija kvadranta u analizi karakterizacije događaja u košarkaškoj sali. ....	85
Slika 7.2.2 – Fundamentalni dijagram/verovatnoća prisustva posetioca. ....	101
Slika 7.2.3 – Numeracija kvadranta u analizi aktivnosti unutar prostora za okupljanje korisnika u Olimpijskom parku. ....	102
Slika 7.2.4 – Broj posetilaca tokom izabranog dana u prostoru namenjenom okupljanju posetilaca [53].....	106
Slika 7.2.5 – Vršni broj posetilaca u prostoru za okupljanje posetilaca [53].....	107
Slika 7.3.1 – Petrovaradinska tvrđava u Novom Sadu sa binama muzičkog festivala Exit [54]. ....	122
Slika 7.3.2 – Raspored stalnih lokacija baznih stanica na Petrovaradinskoj tvrđavi. ....	123

## **SPISAK TABELA**

Tabela 2.4.1 – Opseg parametara korišćenih u simulaciji, u slučaju skupova velike i male dinamike.....	26
Tabela 3.1.1 – Potrebni resursi za obradu signala u osnovnom opsegu učestanosti po jednom R99 saobraćajnom kanalu, [35].....	31
Tabela 5.1.1 – Saobraćajni profil korisnika na košarkaškoj utakmici tokom poluvremena.....	50
Tabela 5.1.2 – Saobraćajni profil korisnika u Olimpijskom parku koji ne prisustvuje sportskom događaju.....	54
Tabela 7.1.1 – Najkraće putanje između objekata u Olimpijskom parku iskazane u metrima.....	75
Tabela 7.1.2 – Kritično vreme između početka/kraja događaja u dva različita objekta iskazano u minutima (vreme izlaska iz objekta + vreme kretanja od objekta do objekta).....	77
Tabela 7.1.3 – Kritična rastojanja od objekata do oblasti namenjene okupljanju korisnika, iskazana u metrima.....	79
Tabela 7.1.4 – Kritična vremena da posetilac stigne do oblasti za okupljanje korisnika polazeći od raznih objekata u Olimpijskom parku (po završetku događaja), iskazana u minutima.....	79
Tabela 7.1.5 – Kritična rastojanja od objekata u Olimpijskom parku do Stratford stanice i vremena potrebna za njihov prelazak.....	80
Tabela 7.1.6 – Predložene vrednosti parametra T.....	82
Tabela 7.2.1 – Vrednosti parametra P za druge objekte i oblasti u okviru Olimpijskog parka.....	86
Tabela 7.2.2 – Program događaja na Olimpijskim igrama, u Olimpijskom parku, 4. avgusta 2012.....	88
Tabela 7.2.3 – Uticaj događaja u drugim objektima u Olimpijskom parku na događaj (skup) koji se održava u košarkaškoj sali.....	97
Tabela 7.2.4 – Vrednost parametra P za druge objekte u Olimpijskom parku i u bliskoj okolini.....	103
Tabela 7.2.5 – Raspored događaja u Olimpijskom parku 4. avgusta 2012. godine.....	108
Tabela 7.2.6 – Uticaj događaja u objektima u Olimpijskom parku na aktivnosti u prostoru namenjenom okupljanju posetilaca, za 4. avgust 2012. godine.....	117

## 1. UVOD

Planiranje radio-pristupne mreže od velikog je značaja pri planiranju sistema mobilne telefonije. Ovaj segment mreže predstavlja osnovnu vezu krajnjeg korisnika i jezgra mreže, odnosno servisa koje korisnik koristi. Zbog toga, radio-pristupna mreža se može oceniti kao ključan segment mreže koji ima najveći uticaj na korisnikovo iskustvo o kvalitetu korišćenja mreže (*Quality of Experience, QoE*) i kvalitetu ponuđenih servisa (*Quality of Service, QoS*).

Mreže četvrte generacije (*Long Term Evolution, LTE*), postaju sve više zastupljene. Početkom 2014. godine, skoro 300 komercijalnih mreža aktivno je u više od 70 zemalja. Međutim, do početka 2014. godine, ni jedan od operatora koji je primenio LTE u svojoj mreži nije ostvario nacionalno pokrivanje upotrebom LTE-a. Zbog toga se može tvrditi da je treća generacija mobilne telefonije bazirana na UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System, UMTS*) i paketskom prenosu na *downlink*-u i *uplink*-u velikim protocima (*High Speed Packet Access, HSxPA*) i dalje ključna tehnologija primenjena u mreži mobilnih operatora. Dodatno, razlike u potrebnim investicijama pri unapređenju mreže u LTE i njeno unapređenje u UMTS/HSxPA/HSPA+ ukazuju na niži trošak unapređenja mreža treće generacije u slučaju kada se ne uvodi LTE. Ovakav rezultat ima za posledicu relativno brzo unapređenje mreže uvođenjem HSxPA/HSxPA+ uz brzo povećanje protoka i kapaciteta mreže mobilne telefonije a pre svega radio-pristupne mreže. Ovakvo unapređenje može se smatrati kratkoročnim ali i opravdanim imajući u vidu:

- već ostvarena nacionalna pokrivanja mrežama treće generacije mobilne telefonije;

- potrebu da se brzo obezbedi dodatni kapacitet u mreži uz minimalne investicije;
- održavanje svakodnevnog posla (*business as usual*) tako da se korisnici ne remete prilikom korišćenja servisa.

Za razliku od LTE-a i WiMAX-a (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*, WiMAX), UMTS se karakteriše zajedničkom analizom kapaciteta i interferencije u mreži. Zbog toga se umesto kapaciteta sistema, u slučaju UMTS mreže, razmatra opterećenje mreže (*network load*).

## **1.1 PREGLED LITERATURE**

Planiranje radio-pristupnih mreža opisano je u mnogobrojnim radovima i velika pažnja je posvećena kako dimenzionisanju radio-interfejsa [1] tako i resursima u osnovnom opsegu učestanosti namenjenim za obradu korisničkih poziva (*Channel Elements*, CE) [2]. Nasuprot tome, združena analiza blokade radio-interfejsa i angažovanja resursa u osnovnom opsegu učestanosti nije tako često vršena koliko bi se moglo očekivati, imajući u vidu značaj oba elementa za radio-pristupnu mrežu baziranu na UMTS/HsxPA. Može se tvrditi da je čak u literaturi predstavljen mali broj sprovedenih analiza [3,4]. U [5,6] cilj prikazanih analiza je da se modeluje uticaj ponašanja krajnjih korisnika i servisa korišćenih na masovnim (velikim) skupovima na kapacitet celokupne mreže. Kao dodatak, definisana je funkcija troška sa ciljem utvrđivanja najefikasnije konfiguracije kontrolera radio-mreže (*Radio Network Controller*, RNC), [6], kao i na nivou radio-pristupne mreže, [5].

Velika pažnja u dosadašnjem istraživanju je bila posvećena makro radio-pristupnoj mreži jer se smatralo da je makro mreža odnosno mreža u spoljnoj sredini (*outdoor*) najvredniji segment radio-pristupne mreže. Iako je zaista bilo tako pre nekoliko godina, danas, kada se više od 80% poziva i sesija za prenos podataka ostvaruje iz zatvorenih prostora (*in-building*), analiza sistema u objektima (*In-Building System*, IBS) poprima sve veći značaj. Interesantne analize sistema unutar objekta prikazane su u [7,8], dok je analiza multiservisne radio-pristupne mreže prikazana u [9-12]. U ovim radovima se analizira radio-pristupna mreža, odnosno radio-interfejs, ali se ne analiziraju kapaciteti linkova i veze između baznih stanica (NodeB-ova) i kontrolera

radio-mreže. Analiza  $I_{ub}$  interfejsa prikazana je u [13] ali su analizirane samo servisne klase do protoka od 384kb/s. Ista analiza izvršena je za makro mrežu ali ne i za mrežu, odnosno sistem, u objektu.

Optimizacija makro radio-pristupnih mreža, zasnovana na troškovnom principu i verovatnoći prekida rada (*outage*), razmatrana je u [14,15] ali nije razmatran kapacitet radio-pristupne mreže, niti je razmatran kapacitet okosnice ili jezgra mreže. Algoritam za efikasno korišćenje kapaciteta okosnice heterogene mreže predložen je u [16] ali radio-pristupna mreža nije analizirana. Namera autora u [17] bila je da razviju analitički model koji bi povezoao zadovoljstvo korisnika upotrebom servisa u makro UMTS radio-pristupnoj mreži sa ostvarenim pokrivanjem i kapacitetom upotrebom specifičnih ETSI kriterijuma ali drugi delovi mreže nisu bili razmatrani. Svi ovi radovi tretiraju svakodnevno korišćenje servisa u radio-mreži u makro okruženju ali nema radova ili studija koji su analizirali specijalne (velike) skupove koji se odlikuju posebnim ponašanjem korisnika. Primeri ovakvih skupova su veliki sportski događaji ili muzički festivali. U [18,19] autori analiziraju samo *downlink* kapacitet (a time i samo kapacitet mobilnih terminala) u slučaju primene distribuiranih antenskih sistema (*Distributed Antenna System, DAS*) ali ne uzimaju u obzir specijalne skupove i ne analiziraju ponašanje korisnika i njihov uticaj na ukupni kapacitet mreže.

## **1.2 DEFINICIJA VELIKOG SKUPA I PREDMET ISTRAŽIVANJA**

Za razliku od regularnih makro mreža koje se karakterišu nejednakim opterećenjem radio-mreže (odnosno pojedinačnih ćelija), u slučaju specijalnih skupova primetno je veliko opterećenje u svim ćelijama, na relativno malom prostoru. Primeri specijalnih događaja su:

- sportski događaji poput Olimpijskih igara, svetskih i evropskih prvenstava u različitim sportovima, velikih fudbalskih stadiona i slično;
- muzički festivali;
- trgovački sajmovi i sajmovi različitih tematika.

Specijalni događaji kao što su Olimpijske igre su posebno interesantne i složene za analizu zbog različitog ponašanja korisnika tokom raznih vrsta skupova koji se

održavaju u isto vreme u raznim olimpijskim objektima koji su vrlo blizu jedni drugima (npr. Olimpijski park u Londonu 2012.). Slično Olimpijskim igrama, muzički festivali i sportska takmičenja kao što su prvenstva (fudbal, odbojka, rukomet itd.) odlikuju se istim ponašanjem (profilom) korisnika na pojedinačnom skupu jer korisnici prate istu vrstu događaja. Mora se napomenuti da su Olimpijske igre, gde se istovremeno odvijaju različiti tipovi sportskih događaja u istom okruženju i muzički festivali sa velikim brojem muzičkih scena sa istovremenim koncertima, bitno različiti od pojedinačnih sportskih ili kulturnih događaja zbog specifičnog ponašanja korisnika na malom prostoru.

Važno je analizirati specifične vrste skupova zbog jednakog i visokog nivoa opterećenja svih ćelija, specifičnog ponašanja korisnika i velike gustine korisnika. Specijalni skupovi nisu retki događaji, kako bi se to na osnovu samog naziva moglo zaključiti. Na primer, operatori u Velikoj Britaniji susreću se u toku jedne kalendarske godine sa više od 250 specijalnih (velikih) skupova u zemlji. Imajući u vidu učestalost ovakvih događaja, njihovu periodičnost, povećano interesovanje korisnika da prisustvuju ovakvim događajima, može se reći da je posvećena mala pažnja analizi ovakvih skupova i da praktično ne postoje radovi koji se bave ovom tematikom. Neka rešenja kao što su privremene lokacije sa stubovima nisu u potpunosti odgovarajuće, posebno za primenu unutar objekata, zbog građevinskih i konstrukcijskih problema, ograničene dostupnosti i ograničenog kapaciteta pa se moraju razmatrati alternativni načini rešavanja problema podrške ovakvim skupovima od strane operatora.

Moglo bi se reći da je problem analize radio-mreža na specijalnim, velikim, skupovima toliko specifičan da ni sam problem nema jedinstveno ime. Uobičajen naziv kod operatora za ovakve događaje poput velikih sportskih ili muzičkih događaja su specijalni događaji jer se radi o obimu saobraćaja i broju korisnika koji zahtevaju specijalne aktivnosti u relativno kratkom vremenskom periodu na određenom području. Nakon završetka događaja mreža se u datoj oblasti vraća u redovno, uobičajno, stanje. Isto tako, ovakvi događaji privlače veliki broj korisnika (gledalaca, učesnika, tehničkog osoblja itd.) zbog čega su ovi skupovi poznati i kao veliki ili masovni skupovi. Izuzetan primer velikog događaja predstavljaju utakmice tima američkog fudbala *Green Bay Packers* čiji stadion „*Lambeau Field*“ broji 80,751 sedišta. Ovaj broj posebno je

interesantan kada se zna da je stadion potpuno popunjen u vreme utakmice a da sam grad *Green Bay* broji 104,000 stanovnika dok sa okolnim mestima broji 306,000 stanovnika. Samim tim, može se reći da je praktično celokupan grad prisutan vikendom na utakmici, na jednom stadionu koji je znatno manje površine od samog grada. Zbog ovakvih odnosa korisnika u gradu i na pojedinačnom događaju ovi skupovi i imaju naziv veliki ili masovni. Sličan primer je i sa Olimpijskim igrama gde broj korisnika, istovremeno prisutnih na različitim sportskim događajima na relativno malom prostoru, značajno prelazi broj od 100,000 korisnika. Zbog svog trajanja od više dana pa i mesec dana, uz svakodnevno prisustvo velikog broja korisnika, ovi skupovi se nazivaju i veliki. Postojeća literatura vrlo slabo tretira pitanje radio-mreže namenjene ovakvim skupovima pa ne postoji ni finija podela između ovih skupova u smislu da postoje razlike između velikih, masovnih i specijalnih skupova. Stoga se u praksi svi ovi nazivi koriste kao sinonimi. Buduće istraživanje se može usmeriti i u pravcu definisanja razlika između skupova i utvrđivanja parametara na osnovu kojih bi se ovi skupovi mogli definisati u podkategorije.

### **1.3 SADRŽINA RADA**

Rad sadrži dve velike celine. Prvu celinu čini analiza kapaciteta radio-interfejsa i resursa za obradu servisa u osnovnom opsegu učestanosti. Drugu celinu čini analiza rizika preopterećenja radio-pristupne mreže usled ponašanja korisnika. U cilju prikaza pomenutih celina rad je organizovan na sledeći način. Poglavlje I predstavlja uvodno poglavlje u kom se definiše problem kapaciteta radio-pristupne mreže na velikim skupovima i prikazuju rezultati istraživanja u postojećoj literaturi. Potom se definiše predmet istraživanja prikazanog u radu. Poglavlje II bavi se analizom kapaciteta radio-interfejsa u UMTS radio-pristupnoj mreži. Analiziraju se budžet radio-linka, blokada i kapacitet radio-intefejsa i verovatnoća blokade elemenata za obradu signala u osnovnom opsegu učestanosti. Analizira se međusobna povezanost i uticaj ove dve vrste blokade. U III poglavlju prikazani su simulacioni model radio-pristupne mreže i rezultati simulacije kapaciteta. Na osnovu sprovedene analize i prikazanih rezultata definiše se moguća ušteda u potrebnim resursima mreže a da se zadrži identičan ili malo lošiji kvalitet servisa za krajnje korisnike. Poglavlje IV prikazuje predlog funkcije troška i prateća objašnjenja i motive za njeno kreiranje. Svrha predložene funkcije je utvrđivanje



kapaciteta mreže koji je kritičan sa stanovišta dodavanja nove opreme i značajnog povećanja troškova izgradnje mreže. Predložena funkcija utvrđuje granice postojećeg kapaciteta uz izabranu strukturu opreme (pre svega kontrolera radio-mreže) u cilju minimizacije investicije uz istu ili sličnu dostupnost servisa za krajnje korisnike. Poglavlje V prikazuje dva primera analize kapaciteta radio-pristupne mreže na velikim skupovima i to za košarkašku salu i prostor namenjen okupljanju posetilaca Olimpijskog parka, na Olimpijskim igrama u Londonu 2012. godine.

Poglavljem VI započinje prikaz rezultata analize rizika preopterećenja radio-pristupne mreže na velikom skupu. Poglavlje VI prikazuje pregled literature i modela za analizu ponašanja grupe i pojedinca (pešaka). Pored prikaza modela definišu se načini kategorizacije grupa i prikazuju konkretne vrednosti pojedinih parametara grupe i njihovo ponašanje na različitim skupovima. U VII poglavlju prikazan je predloženi model ponašanja posetilaca Olimpijskog parka koji su ujedno i korisnici UMTS mreže u Olimpijskom parku. Dat je predlog podele skupova u zavisnosti od dinamike skupa i potrebno obrazloženje za primenjenu podelu. Definišu se parametri težinske funkcije kojom se opisuje postojeći rizik preopterećenja mreže i prikazuju primeri analize i to ponovo za slučaj košarkaške sale i prostora namenjenog okupljanju posetilaca u Olimpijskom parku. Na kraju, vrši se poređenje predloženog modela sa izabranim modelom iz literature.

Poslednje, VIII poglavlje predstavlja zaključak. U okviru zaključka prikazani su sažeto rezultati primenjenih analiza, istaknute mogućnosti primene predloženih metoda analize i rezultata, kao i pravci mogućih daljih istraživanja stanja radio-pristupne mreže na velikim skupovima.

## **2. ANALIZA KAPACITETA RADIO-PRISTUPNE MREŽE**

### **2.1 ISKUSTVA IZGRADNJE RADIO-PRISTUPNE MREŽE I TROŠKOVNA OCENA KVALITETA MREŽE**

Izgradnja radio-pristupne mreže predstavlja najkompleksniji deo izgradnje mreže operatora mobilne telefonije iz više razloga:

- obimnosti izgradnje, imajući u vidu broj potrebnih baznih stanica, lokacija, prateće telekomunikacione, elektro-energetske i građevinske infrastrukture;
- brojnih regulatornih pitanja, počev od nivoa dozvoljenog zračenja, važećih dozvola za rad, građevinskih dozvola itd.;
- složenosti organizacije mreže, uključujući inicijalno planiranje kapaciteta i pokrivanja, kao i kasnije optimizacije mreže, uključujući i frekvencijsko planiranje.

Zbog toga, cena izgradnje radio-pristupne mreže u spoljnom okruženju (*outdoor*) je postala praktično dominantna u ukupnoj ceni mreže, posebno ako se razmatraju i tekući troškovi koji uključuju i iznajmljivanje lokacija i redovno održavanje mreže. Generalno, dosadašnji pristup operatora izgradnji mreže bio je određen postojećom konkurencijom na tržištu i dostupnim resursima. Postojeća konkurencija na tržištu primoravala je operatore da šire svoje prisustvo u urbanim sredinama, pre svega, gde je i najveći broj korisnika. Sa druge strane, regulatorni aspekti su ih prisiljavali da vrše pokrivanje i teritorije sa manjim brojem korisnika. Zbog toga su operatori u prvih 10 godina svog postojanja vršili vrlo intenzivnu izgradnju radio-pristupne mreže. Razvoj mreže pratila je upotreba raspoloživih resursa tj. korišćenje svih dostupnih radio-kanala kako bi se obezbedio potreban kapacitet i

minimizirala interferencija u radio-pristupnoj mreži. U kasnijem periodu izgradnje radio-pristupne mreže vršena su unapređenja postojeće mreže, uvođenjem novih tehnologija u okviru radio-pristupne mreže, kao i reorganizacija mreža u cilju ostvarivanja boljeg iskorišćenja resursa. Ove promene zahtevale su nove lokacije u urbanim sredinama, formiranje sistema unutar objekata (IBS) i povećanje složenosti upravljanja radio-pristupnom mrežom zbog međusobnih uticaja tehnologija i njihovog zajedničkog korišćenja (*inter-RAT* zahteva).

Poslednjih godina, svi operatori su suočeni sa potrebom da obezbede veće kapacitete u mreži i povećaju protoke krajnjim korisnicima. Posle inicijalne potrebe za pokrivanjem velike teritorije i sveprisutnošću, operatori se suočavaju sa potrebom da obezbede veliki kapacitet u celokupnoj mreži, pa i u radio-pristupnoj mreži. Zbog toga, može se reći da su današnje mreže mobilnih operatora dominantno ograničene po pitanju kapaciteta a ne opsega. Ovakav zahtev primorava operatore na uvođenje tehnologije poslednje generacije, primenu novih metoda obrade signala i izmene u antenskim sistemima kako bi povećali kapacitet. Istovremeno, vrši se i intenzivna izgradnja sistema u objektima, pre svega javnim, i izgranja malih ćelija (*small cells*) za poslovne korisnike srednje i male veličine, kao i za rezidencijalne korisnike.

Dosadašnja izgradnja radio-pristupne mreže je zbog toga bila manje ocenjivana primenom troškovnog modela, odnosno suštinske tehno-ekonomske analize koja bi pravdala izgradnju radio-pristupne mreže intenzitetom kakav je viđen prethodnih godina. Dosadašnje analize bile su višeg nivoa i obuhvatale su ukupne investicije uz relativno grube ulazne podatke potrebne za analizu, a ne postoji značajnija literatura koja se bavi detaljnim istraživanjem ovog pitanja za sisteme unutar objekata ili za mreže namenjene specijalnim skupovima.

Posebno interesantni su specijalni skupovi. Ovakvi događaji su česti u mreži svakog operatora. Njihove glavne odlike su:

- da se dešavaju u različitim delovima mreže odnosno da su geografski distribuirani u različitim delovima zemlje;
- da su u najvećem broju slučajeva periodični, odnosno da se dešavaju u istom periodu svake godine (tradicionalni skupovi);

- da zahtevaju vanredne resurse u mreži u kratkom vremenskom periodu (jedan dan ili do nedelju dana) a retko duže od nedelju dana;
- da se mogu odvijati u jednom objektu, više objekata ali i na (ograničenom) otvorenom prostoru;
- da ponašanje korisnika može biti uniformno, u skladu sa vrstom skupa koji se odvija, ali i različito ako se u isto vreme odvija više događaja (skupova);
- da privlače pažnju javnosti kao i krajnjih korisnika i da mogu uticati na njihovu percepciju kvaliteta mreže i utiska o peratoru.

Najčešći pristup operatora pri ostvarivanju potrebnih resursa za ovakve skupove je postavljanje privremenih lokacija (baznih stanica). Ovakve lokacije su privremenog karaktera i integrišu se u okviru makro radio-pristupne mreže. Osnovni nedostatak ovakvog pristupa je cena izgradnje privremene lokacije u slučaju postavljanja tzv. „pauk“ stuba i pratećih balasta. Brže postavljanje lokacije i efikasnije korišćenje na više događaja ostvaruje se korišćenjem mobilnih privremenih lokacija (*Cells on Wheels, COW*), SI.2.1.1.



*Slika 2.1.1 – Primer mobilne privremene lokacije.*

Cena pojedinačne mobilne stanice uporediva je sa cenom lokacije sa „pauk“

stubom a brže se integriše u mrežu i praktičnija je za primenu u slučaju kratkotrajnih skupova kao što su gradski maratoni (npr. Londonski maraton sa velikim brojem posetilaca) ili večernji koncerti popularnih grupa (npr. koncert grupe „Bijelo dugme“ u Beogradu 2005. godine, kada je bilo prisutno 150,000 posetilaca). Sve novopostavljene lokacije povezuju se sa postojećim kontrolerima baznih stanica (*Base Station Controller*, BSC) ili kontrolerima radio-mreže (*Radio Network Controller*, RNC).

Za manji broj skupova planira se realizacija zasebnih radio-pristupnih mreža koje uključuju i zasebne RNC-ove. Ovakvo rešenje prihvatljivo je u slučaju događaja dužeg trajanja kakve su Olimpijske igre, međunarodni trgovinski sajmovi (npr. *Expo* izložbe) ili automobilski sajmovi koji traju više nedelja. Međutim, postojeća literatura ne sadrži istraživanje optimalnog izbora opreme za radio-pristupnu mrežu za ovakve skupove, kao ni njihovo detaljno planiranje. Takođe, literatura ne sadrži analizu ili pregled ponašanja korisnika na ovakvim skupovima ili njihov međusobni uticaj na kvalitet mreže. Praktična iskustva u realizaciji ovakvih mreža su u glavnom vezana za praćenje (tokom skupa) i analizu (posle skupa) indikatora ključnih parametara mreže (*Key Parameters Indicators*, KPI). Nedostatak ovakvog pristupa je u prikupljanju informacija posle planiranja radio-pristupne mreže za specifičan specijalni skup zbog čega se može dobiti informacija o performansama mreže ali se ne može i izvršiti optimalno dimenzionisanje opreme tako da se ostvari optimalan odnos troškova izgradnje i kvaliteta ponuđenih servisa.

Stoga, u cilju ostvarivanja optimalnog odnosa između uložених sredstava i ostvarenog kvaliteta mreže, moguće je definisati smernice izgradnje radio-pristupne mreže za ovakve specijalne skupove kako bi se utvrdili potencijalni rizici tokom rada mreže, kao i definisati funkciju troška izgradnje sa ciljem utvrđivanja optimalnog odnosa uložеног i ostvarenog. Predložena analiza obuvata analizu radio-interfejsa i verovatnoću blokade poziva u slučaju velikih skupova, kao i funkciju troška za dimenzionisanje kapaciteta radio-pristupne mreže.

Kao primer primene predloženih rešenja iskorišćene su Olimpijske igre održane 2012. godine u Londonu, u Velikoj Britaniji.

## 2.2 BUDŽET RADIO-LINKA

Imajući u vidu da je pokrivanje signalom u UMTS/HsxPA određeno opterećenjem mreže i interferencijom, kako na *downlink*-u tako i na *uplink*-u, to planiranje UMTS/HsxPA mreže predstavlja veći izazov od planiranja GSM mreže. Na *uplink*-u, koji se obično smatra kritičnijim, radio-pokrivanje prostora unutar objekata ograničeno je sa nekoliko parametara. To su snaga na predaji, potrebne margine signala, dobici antena, gubici, osetljivost prijemnika (NodeB-a za *uplink*) i interferencija izazvana aktivnošću korisnika. Budžet radio-linka na *uplink*-u izražen je u funkciji maksimalnog dozvoljenog slabljenja,  $L_{MAX}^{UL}$ , koje je rezultat slabljenja radio-signala pri propagaciji od korisničkog terminala (predajnika) do bazne stanice (prijemnika). Maksimalno dozvoljeno propagaciono slabljenja može se prikazati kao, [5,6],

$$L_{MAX}^{UL} [\text{dB}] = P_{UE} [\text{dBm}] - M_{PC} [\text{dB}] - M_{IUL} [\text{dB}] - M_{LNF} [\text{dB}] + \\ + G_{UE} [\text{dBi}] + G_{BTS} [\text{dBi}] - L_{BL} [\text{dB}] - L_C [\text{dB}] - S_{BTS} [\text{dBm}] \quad (2.2.1)$$

gde je  $P_{UE}$  maksimalna snaga na predaji korisničkog terminala.  $M_{PC}$  je margina kontrole snage,  $M_{IUL}$  je margina povećanja šuma na *uplink*-u (*noise rise*), shodno jednačini (2.2.2),  $M_{LNF}$  je log-normalna fading margina,  $G_{UE}$  i  $G_{BTS}$  su dobici antena korisničkog terminala i NodeB-a, respektivno,  $L_{BL}$  je slabljenje usled apsorpcije u ljudskom telu (*body loss*),  $L_C$  je ukupno slabljenje kablova i konektora uključujući gubitke distribuiranog antenskog sistema i  $S_{BTS}$  je osetljivost NodeB-a.

Iako je margina kontrole snage,  $M_{PC}$ , prikazana kao jedan od parametara čija promena može uticati na propagaciono slabljenje [20], u praksi se ova margina u UMTS/HsxPA mreži ne koristi. Ovaj parametar prisutan je još od CDMA mreža baziranih na IS-95 standardu. Svrha  $M_{PC}$  je kompenzacija sporo (primenom algoritma otvorene petlje) i brzo promenljivog fadinga (primenom algoritma zatvorene petlje) kao što je opisano u [21]. Dobitak antene NodeB-a,  $G_{BTS}$ , zavisi od azimuta i elevacije koji su deo geometrije celokupne mreže kao što je prikazano prilikom analize performansi radio-interfejsa. Antena korisničkog terminala (*User Equipment*, UE) predstavljena je u daljoj analizi kao omnidirekciona antena sa 0dBi dobitka, kao pojednostavljeni model realog dijagrama zračenja antene korisničkog terminala. Tendencija je da sve veći broj korisnika koristi „pametne“ uređaje pa tako u mrežama mobilnih operatora u Velikoj

Britaniji više od 98% korisnika koristi *smart* telefone. Isto tako, primetna je tendencija da sve više korisnika koristi *tablet* uređaje kao krajnje terminale. Povećanje šuma na *uplink*-u usled aktivnosti korisnika može se izračunati kao, [22],

$$M_{IUL} [\text{dB}] = 10 \times \log_{10} \left( \frac{1}{1-\xi} \right) [\text{dB}], \quad (2.2.2)$$

gde  $\xi$  predstavlja opterećenja na *uplink*-u, obično podešeno na 0.5 (50% opterećenja ćelije) stvarajući tako dodatna 3dB interferencije (povećanja nivoa šuma).

Na *downlink*-u (vezi od bazne stanice ka korisničkom terminalu) budžet linka određen za pilot signal (*Common Pilot Channel*, CPICH) se koristi kako bi se utvrdio kvalitet signala i propagaciono slabljenje. Budžet radio-linka za CPICH i maksimalno dozvoljeno slabljenje na *downlink*-u mogu se odrediti kao, [6],

$$L_{MAX}^{DL} [\text{dB}] = P_{CPICH} [\text{dBm}] - M_{PC} [\text{dB}] - M_{LNF} [\text{dB}] - M_{IDL} [\text{dB}] + G_{BTS} [\text{dBi}] + G_{UE} [\text{dBi}] - L_{BL} [\text{dB}] - L_C [\text{dB}] - S_{UE} [\text{dBm}] \quad (2.2.3)$$

gde je  $P_{CPICH}$  snaga emitovanja pilot signala,  $G_{BTS}$  i  $G_{UE}$  dobici antena i  $S_{UE}$  osetljivost prijemnika korisničkog terminala.  $M_{PC}$  je margina kontrole snage, isto kao i u jednačini (2.2.1),  $M_{IDL}$  je margina povećanja nivo šuma na *downlink*-u, shodno jednačini (2.2.4) dok je  $M_{LNF}$  log-normalna margina za feding, kao u jednačini (2.2.1),  $L_{BL}$  je slabljenje usled apsorpcije u ljudskom telu i  $L_C$  ukupno slabljenje kablova i konektora uključujući i distribuirani antenski sistem. Povećanje nivoa šuma usled aktivnosti više korisnika na *downlink*-u može se izračunati kao, [5-6, 20-21]:

$$M_{IDL} [\text{dB}] = 10 \times \log_{10} \left[ 1 + \frac{(\delta + R_i) \times P_{TOT}}{N_0 \times F_{BTS} \times V_C \times 10^{L/10}} \right]. \quad (2.2.4)$$

Slabljenje  $L$ , iskazano u dB, definiše se kao,

$$L = L_{MAX}^{UL} + M_{PC} + M_{LNF} + L_{BL} + L_C - G_{BTS} - G_{UE} \quad (2.2.5)$$

dok je  $N_0$  spektralna gustina srednje snage (SGSS) aditivnog belog *Gauss*-ovog šuma (*Additive White Gaussian Noise*, AWGN),  $F_{BTS}$  je faktor šuma NodeB-a,  $V_C$  je protok

čipova,  $\delta$  je faktor neortogonalnosti (odnosno narušene ortogonalnosti) na ivici ćelije,  $R_i$  je odnos između primljene međućelijske (*intercell*) i unutarćelijske (*intracell*) interferencije na ivici ćelije a  $P_{TOT}$  je celokupna izlazna snaga NodeB-a. Jasno je da u slučaju dobre izolacije između ćelija i idealne ortogonalnosti kodova  $M_{IDL}$  je jednako nuli. U slučaju kada je narušena ortogonalnost između kodova i višćelijskog okruženja,  $M_{IDL}$  se određuje na osnovu relativnog odnosa prema nivou termalnog šuma na lokaciji korisničkog terminala. U slučaju mikro lokacija (obično unutar objekata),  $\delta$  se uobičajno usvaja da je jednako 0.15, [20], dok se za lokacije makro mreže, uobičajno usvaja da je  $\delta$  jednako 0.4 a  $R_i$  jednako 0.5, [23].

Pretpostavlja se da su pokrivanje radio-signalom i kvalitet servisa na *uplink*-u kritični zbog višekorisničkog okruženja i zbog toga potencijalno visoke međukorisničke interferencije. U slučaju govornog servisa, pokrivanje radio-signalom na *uplink*-u treba smatrati kritičnijim u odnosu na *downlink*, [23], bez obzira da li se radi o maloj ćeliji u objektu (*indoor*) ili velikoj ćeliji u makro mreži. Nasuprot tome, u slučaju servisa prenosa podataka, postoji značajna razlika između velikih ćelija u spoljnoj makro mreži i malih *indoor* ćelija u slučaju specijalnih događaja. Korisnici u ćelijama makro mreže imaju običaj da pretražuju Internet i *download*-uju sadržaje na svoje terminale. Korisnici na specijalnim događajima imaju običaj da *upload*-uju podatke koje su kreirali (npr. snimili kamerom terminala) na razne društvene mreže i to već tokom samog događaja. Samim tim, količine podataka prenesene na *uplink*-u i *downlink*-u su znatno izjednačenije. Može se reći da je *uplink* i dalje kritičniji jer su  $\delta$  i  $R_i$  relativno mali u slučaju malih ćelija (*small cells*) ili distribuiranih antenskih sistema. U slučaju distribuiranih antenskih sistema, resursi za procesiranje u osnovnom opsegu učestanosti, CE-ovi, su konsolidovani na jednom mestu. Većina korisnika ima liniju optičke vidljivosti (*Line of Site*, LoS) sa antenama distribuiranog antenskog sistema dok se istovremeno ostvaruje dobra izolacija između susednih ćelija i sektora.

Kao što je već pomenuto, pokrivanje radio-signalom u UMTS/HsxPA ćeliji određeno je aktivnošću korisnika i opterećenjem mreže. Zbog toga je neophodno da se izvrši združeni proračun radio-pokrivanja i kapaciteta kako efekat „disanja ćelije“ ne bi izazvao prazninu između oblasti pokrivanja pojedinačnih ćelija. Za razliku od GSM i drugih 2G sistema, računanje radio-pokrivanja i kapaciteta ne mogu biti razdvojeni.



Uobičajno je da se domet radio-pokrivanja izračuna uz pretpostavljeno opterećenje *uplink*-a od 50% ili 60% kako bi se sprečio efekat „disanja ćelije“. Previše mali procenat aktivnosti korisnika (opterećenja mreže) vodiće precenjenom dometu pokrivanja radio-signala u realnoj mreži. Nasuprot tome, previše veliko opterećenje mreže, iznad 60%, zahteva veliku vrednost margine višekorisničke interferencije,  $M_{IUL}$ , koja iznosi 4dB u slučaju opterećenosti ćelije od 60% i 7dB u slučaju opterećenja ćelije od 80%, kao što se može izračunati upotrebom jednačine (2.2.2).

Jasno je da  $M_{IUL}$  ima eksponencijalni rast sa porastom opterećenja ćelije. Sa druge strane, na osnovu jednačine (2.2.4), jasno je da veliki protoci korisničkih signala na *downlink*-u mogu izazvati značajnu interferenciju. Opterećenje ćelije određeno aktivnošću korisnika (korisničkim profilom), podela saobraćaja između *downlink*-a i *uplink*-a i broj poziva (*Busy Hour Call Attempts*, BHCA) i/ili broj sesija (*Busy Hour Session Attempts*, BHSA) u satu vršnog opterećenja imaće veliki uticaj na stanje (ponašanje) mreže i sveukupnu dostupnost mreže krajnjim korisnicima.

## **2.3 DOSTUPNOST SERVISA I VEROVATNOĆA BLOKADE**

### **2.3.1 BLOKADA POZIVA USLED NEDOVOLJNOG KAPACITETA RADIO-INTERFEJSA (SOFT-BLOCKING)**

Verovatnoća blokade servisa zahtevanog od strane korisnika određena je sa 2 međusobno nekorelisana parametra. Prvi parametar je verovatnoća dostupnosti radio-kanala odnosno radio-interfejsa, uz potrebnu verovatnoću greške po bitu (*Bit Error Rate*, BER) i protok. Drugi parametar je verovatnoća da postoje slobodni CE-ovi (u dovoljnom broju) u NodeB-u koji su neophodni za obradu zahtevanog servisa, [24]. Maksimalan broj podržanih korisnika u sistemu određuje se na osnovu analize promena ovih parametara kao funkcije koja zavisi od broja korisnika i njihovog ponašanja (saobraćajnog profila).

Za razliku od 2G sistema kod kojih je kapacitet određen dostupnim resursima kao što su vremenski slotovi u slučaju višestrukog pristupa na bazi vremenske raspodele (*Time Division Multiple Access*, TDMA) ili frekvencijskog kanala u slučaju višestrukog pristupa na bazi frekvencijske raspodele (*Frequency Division Multiple Access*, FDMA), CDMA sistemi poseduju virtuelni kapacitet određen nivoom interferencije koji trpi

krajnji korisnik.

Može se zaključiti, na osnovu interferencije koja potiče isključivo iz matične (domaće) ćelije, da je zahtevani odnos signal/šum (*Signal to Noise Ratio*, SNR), potreban da bi se zadovoljio zadati nivo kvaliteta servisa (*Grade of Service*, GoS) od 2% verovatnoće blokade radio-interfejsa (GoS=0.02), i verovatnoća greške po bitu (BER), za zahtevani servis, određen kao

$$SNR_{REQ} \leq \frac{E_b}{I_{INTRA} + N_0} = \frac{\frac{P_{S_i}}{V_b}}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^K \frac{P_{S_j}}{kV_c} + N_0}, \quad (2.3.1)$$

gde su  $K$  i  $P_{S_j}$ ,  $j=1, 2, \dots, K$ , broj i snage korisničkih signala na ulazu u prijemnik, respektivno.  $E_b$  je energija po bitu,  $N_0$  je SGSS AWGN, dok je  $I_{INTRA}$  spektralna gustina srednje snage interferirajućih korisnika i  $k=1$  ili  $k=1.5$  prema [25].

Različite metode se mogu primeniti pri uobličavanju impulsa i modulaciji kako bi se optimizovala snaga emitovanog signala i minimizirala interferencija. U slučaju idealne kontrole snage i nosilaca servisa (*bearer-a*) sa istim odnosom signal/šum i protocima, jednačina (2.3.1) može se uprostiti tako da je

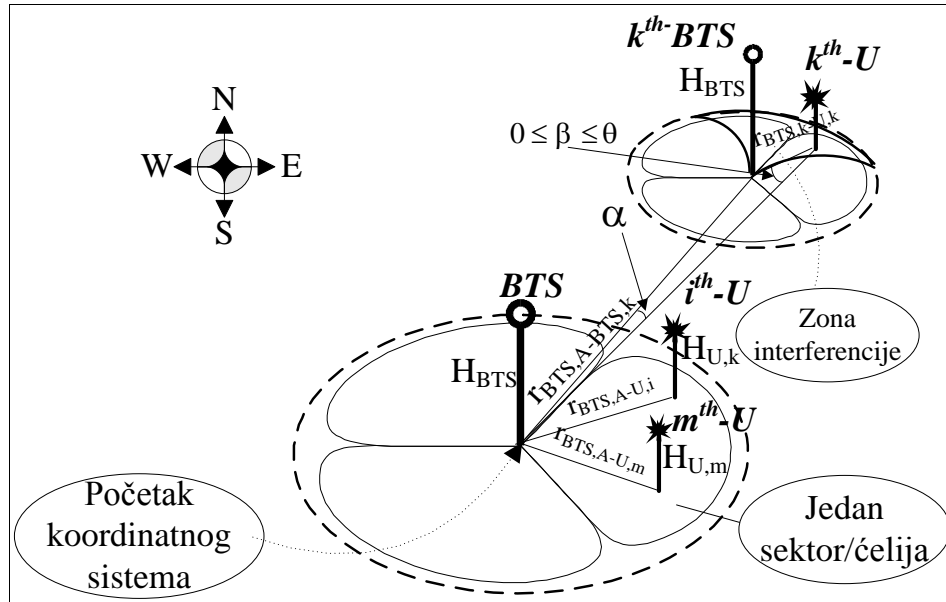
$$SNR_{REQ} \leq \frac{\frac{P_S}{V_b}}{\frac{(K-1) \times P_S}{kV_c} + N_0}, \quad (2.3.2)$$

gde je  $P_{S_j} = P_S$ ,  $j=1, 2, \dots, K$ .

Oblast u kojoj se interferirajući korisnici iz susednih ćelija mogu naći određena je širinom glavnog snopa zračenja antene korisničkog terminala, S1.2.3.1, [26], što je u slučaju mobilnih terminala (i korisnika) najčešće omnidirekciona antena. Ugao pod kojim se „vide“ interferirajući korisnici,  $\alpha$ , može se odrediti kao

$$\alpha = \theta \times \left( 1 + \frac{R}{r_{BTS,A-BTS,k}} \right), \quad (2.3.3)$$

gde je  $\theta$  jednako polovini širine širine glavnog snopa dijagrama zračenja korisničke antene,  $R$  je poluprečnik ćelije i  $r_{BTS,A-BTS,k}$  je rastojanje između analiziranog NodeB-a i NodeB-a u ćeliji u kojoj se nalazi interferirajući korisnik.



Slika 2.3.1 – Geometrija sistema.

Uzimajući u obzir interferirajuće korisnike iz susednih ćelija, prethodno definisani uslov za  $SNR_{REQ}$  u jednačini (2.3.1) postaje

$$\frac{E_b}{I_{INTRA} + I_{INTER} + N_0} = \frac{\frac{P_{S_i}}{V_b}}{\frac{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^K P_{S_j} + \sum_{m=1}^{K_{SEC}} P_{S_m}}{k \cdot V_c} + N_0} \geq SNR_{REQ}, \quad (2.3.4)$$

gde je  $K_{SEC}$  broj korisnika u interferirajućoj oblasti, Sl.2.3.1, jednak

$$K_{SEC} = \frac{K}{\pi R^2} \int_0^R \int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} r dr d\theta = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot K, \quad (2.3.5)$$

pretpostavljajući uniformnu raspodelu  $K$  korisnika u svakoj od ćelija (sektora).  $I_{INTER}$  i  $I_{INTRA}$  predstavljaju međućelijsku i unutarćelijsku spektralnu gustinu srednje snage interferencije, respektivno, koje se mogu izračunati slično kao u [ 27].

Za potrebe teorijske analize usvojene su kružne ćelije sa 3 sektora po ćeliji kao osnovna konfiguracija. U slučaju malih ćelija, koje se sreću u unutrašnjosti objekata i u studentskim gradovima (koji su prostorno slično organizovani objektima na velikim skupovima), linija optičke vidljivosti između antena NodeB-a i korisnika je ostvarena na većini lokacija na kojima se korisnici mogu nalaziti. Ovakva situacija je najbolje vidljiva u slučaju primene distribuiranih antenskih sistema.

Zbog toga je pretpostavljeno tokom analize da postoji linija optičke vidljivosti između antena NodeB-a iz susednih ćelija i antene terminala posmatranog korisnika. U slučaju specijalnih skupova ova pretpostavka ima osnova jer je sistem ograničen po kapacitetu a ne po dometu, sa distribuiranim antenskim sistemom koji obezbeđuje liniju optičke vidljivosti i sa brojnim ćelija u sistemu kako bi se obezbedio veliki kapacitet.

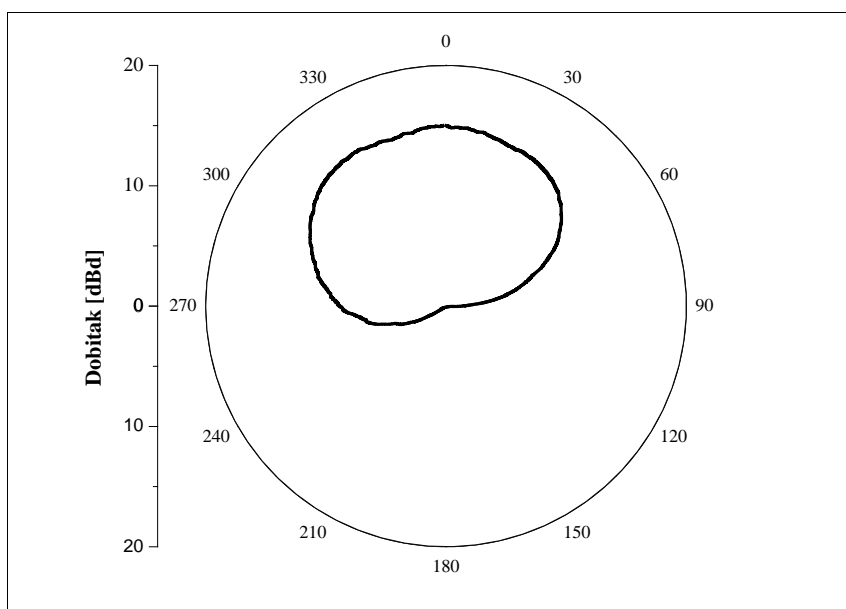
Za ćelije unutar objekata (*in-building*) sa omnidirekcionim antenama i lokacije na otvorenom prostoru sa 3 sektora, sa usmerenim antenama, kružne ćelije su usvojene kao najrealnije. Model kružne ćelije intuitivno je jasan i omogućava jednostavno razumevanje *handover* zona i preklapanja između ćelija. Na osnovu analize prikazane u [28], razlika između dvodimenzionalnih kružnih i šestougaoih ćelija po pitanju verovatnoće uspešnog *handover*-a i vremena potrebnog da se izvrši *handover* je manja od 15%. Resursi namenjeni obradi signala u osnovnom opsegu učestanosti (CE-ovi) konsolidovani su i zajednički (deljeni) za *outdoor* sektore (ćelije) na istoj lokaciji ili *in-building* sektor kako bi se ostvarilo bolje iskorišćenje. Optimalno pokrivanje uz minimalnu interferenciju između lokacija ostvareno je kontrolom emitovane snage (snage pilot signala) i tiltom antena NodeB-a. Sličan pristup izložen je i u [29,30], gde je predloženo uvođenje nove vrste koeficijenta pokrivanja radio-signalom koji bi poslužio kao mera uspešnosti optimizacije radio-pristupne mreže. U [31] je primenjen sličan pristup u slučaju femtoćelija i sistema u malim i srednjim preduzećima (*in-building*), koji se odlikuje mogućnošću virtuelno nezavisnih optimizacije radio-pokrivanja i minimizacije interferencije.

Korisnici koji prisustvuju specijalnim skupovima su uglavnom statični jer većinu vremena provode u posmatranju događaja. Njihovo pomeranje je sporo i vremenski je dominantno određeno dinamikom događaja koje posmatraju (skupovima kojima prisustvuju). Korisnici se kreću u velikim grupama u periodima pre početka i po

završetku događaja. Zbog ovakvog ponašanja korisnika, opterećenje mreže nije jednako u svim sektorima mreže koji pokrivaju oblast specijalnog skupa. Kako korisnici uglavnom nisu mobilni tokom posmatranja događaja, može se očekivati da će mali broj korisnika započeti *handover* proceduru sem ako ne započnu svoj razgovor u *handover* zoni između sektora, odnosno ćelija. Raspodela opterećenja po ćelijama može biti vrlo asimetrično, od vrlo velikog do vrlo malog opterećenja, kao što je slučaj na Olimpijskim igrama gde je veliki broj objekata lociran na malom prostoru. Na ovakvim skupovima, konsolidacija CE-ova se pokazuje kao najbolje rešenje za optimalno korišćenje resursa. Karakteristično je da može doći do brze promene opterećenja pojedinačnih ćelija, od vrlo malog opterećenja do maksimalnog, zbog kretanja velike grupe korisnika koji dolaze na događaj. Sa druge strane, sve suštinski aktivne ćelije su značajno opterećene tako da je opterećenje mreže uvek značajno. Stoga je jedno od rešenja problema minimizacije interferencije u kontroli snage i praktično gašenje pojedinačnih ćelija (sektora) u slučaju vrlo malog opterećenja. Postoji, naravno, i određeni rizik preopterećenja ćelija, odnosno mreže, zbog korisnika koji prolaze u blizini objekata (bilo otvorenih ili zatvorenih) i opterećuju *in-building* sisteme u kratkom vremenskom periodu ali zato potencijalno u velikom broju. Pitanje ponašanja korisnika, koje može dovesti do potencijalnog preopterećenja mreže, a koje se može numerički opisati kako bi bilo što objektivnije, ima veliki značaj u smislu istraživanja potencijalnog rizika i do sada u literaturi nije istraživano u slučaju radio-pristupnih mreža na velikim skupovima.

Bitno je napomenuti da su u slučaju *in-building* distribuiranih antenskih sistema, jedna grupa CE-ova, ili celokupni konsolidovani CE-ovi, u funkciji podrške ćelije čije je pokrivanje ostvareno preko više antena. Zbog toga se pojmovi sektora i ćelije u slučaju lokacija sa omnidirekcionim antenama mogu poistovetiti. Ako se pokrivanje oko antene posmatra kao ćelija, tada se u slučaju distribuiranih antenskih sistema može smatrati da jedan skup CE-ova (jedan sektor) kontroliše veći broj ćelija. Takođe, pojam ćelije se u evropskom okruženju poistovećuje sa sektorom, dok je u američkom okruženju pojam ćelije poistovećuje sa lokacijom. Prilikom analize u ovom radu usvojen je evropski pristup i sektori i ćelije su poistovećeni kada se razmatra kapacitet u osnovnom opsegu učestanosti, dok se u okviru radio-interfejsa, radio-sektori uglavnom posmatraju kao delovi ćelije ili se jasno napominje da se tretiraju kao sinonimi.

Za lokacije sa 3 sektora, antene sa glavnim snopom zračenja u dijagramu zračenja antene širine  $106^{\circ}$  su izabrane iz više razloga, Sl.2.3.2. Visine antena određene su na 10m od nivoa tla. Ova visina antene obezbeđuje da korisnici imaju liniju optičke vidljivosti sa antenama na lokacijama u spoljnom okruženju. Takođe, zbog velikog broja korisnika, očekuje se da je potreban veliki broj ćelija i sektora. U takvoj situaciji i geometriji mreže, korisnici će biti blizu lokacije i prijem signala izvan glavnog snopa zračenja antene neće predstavljati problem jer će nivo primljenog signala biti zadovoljavajući. Nasuprot tome, izabrana širina glavnog snopa, manja od  $120^{\circ}$  smanjuje međućelijsku interferenciju na granicama ćelija odnosno sektora zbog manjeg pojačanja antena van 3dB-skog opsega.

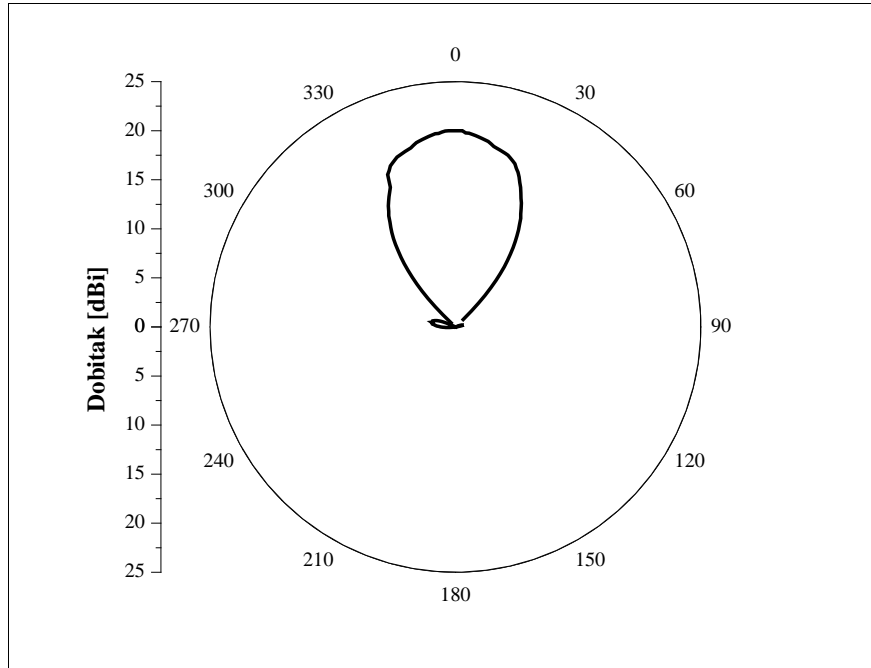


*Slika 2.3.2 – Horizontalni dijagram zračenja antene u slučaju lokacije sa 3 antene.*

Dalja poboljšanja su moguća uz upotrebu 6 sektora (ćelija) na istoj lokaciji tj. 6 antena sa uskim glavnim snopom zračenja (3dB-ski opseg antena jednak  $45^{\circ}$ ), Sl.2.3.3, ali se tada rizikuje pojava nešto većeg broja međusektorskih tj. unutarćelijskih (*intracell*) *handover*-a u slučaju veće mobilnosti korisnika.

Pri sprovedenoj analizi, azimuti antena su izabrani tako da se ostvari optimalno pokrivanje. Horizontalni dijagram zračenja antene za lokaciju sa 3 antene (sektora) prikazan je na Sl.2.3.2. maksimalan dobitak antene iznosi 15dBd sa širinom 3dB-skog opsega od  $106^{\circ}$ . Širina glavnog snopa u vertikalnom dijagramu zračenja antene iznosi

17<sup>0</sup>. Izabrana antena je kros-polarizovana sa  $\pm 45^0$  polarizacijom.



Slika 2.3.3 – Horizontalni dijagram zračenja antene u slučaju lokacije sa 6 antena.

Propagaciono slabljenje za  $i$ -tog korisnika modelovano je kao suma logaritamskih vrednosti gubitaka usled slabljenja u slobodnom prostoru, propagacije po višestrukim putanjama (*multipath*) i senčenja (*shadowing*),

$$L_i [dB] = 20 \log \left( \frac{4\pi d_i}{\lambda} \right) + \varphi_i + \eta_i, \quad (2.3.6)$$

gde je  $\varphi_i$  statistička promenljiva sa *Gauss*-ovom funkcijom gustine verovatnoće (*Probability Density Function*, pdf)  $\mathcal{N}(0, \sigma=8\text{dB})$  a  $\eta_i$  je statistička promenljiva opisana sledećom funkcijom gustine verovatnoće, [32]:

$$p_N(\eta) = \frac{10 \cdot 10^{-\eta/10}}{2 \cdot \ln 10 \cdot \sigma^2} \cdot \exp \left[ -\frac{10 \cdot 10^{\eta/10} + 10 \log A_{LOS}}{2 \cdot \sigma^2} \right] \cdot I_0 \left( \frac{10^{-\eta/20} \cdot 10 \log A_{LOS}}{\sqrt{\frac{\ln 10}{10}} \cdot \sigma^2} \right), \quad (2.3.7)$$

gde je  $\sigma=8\text{dB}$  a  $A_{LOS}$  snaga interferencije (sa LoS) izazvana iz drugih (susednih) ćelija.

Pretpostavljeno je da su propagaciona slabljenja signala za svakog korisnika

međusobno nezavisna tj.

$$E\left[\underbrace{\eta_i \cdot \eta_j}_{i \neq j}\right] = 0, \quad E\left[\underbrace{\varphi_i \cdot \varphi_j}_{i \neq j}\right] = 0, \quad E[\eta_i \cdot \varphi_j] = 0, \quad i, j = 1, 2, \dots, K. \quad (2.3.8)$$

Može se smatrati da posle dovoljno dugog perioda posmatranja i usrednjavanja, uzimajući u obzir uticaj fedinga i interferencije drugih korisnika, da se ukupna interferencija može modelovati konstantnom marginom jednakom,

$$M = 10 \log \left[ A_{LOS}^2 + 2K\sigma^2 \right] [\text{dB}], \quad (2.3.9)$$

tako da zahtevani odnos signal/šum,  $SNR_{REQ}$ , može biti određen na osnovu verovatnoće prekida rada tj. ispada (*outage*) radio-interfejsa kao,

$$P_{OUTAGE} = \Pr \{ SNR \geq SNR_{REQ} \} = \Pr \{ \mu \geq SNR_{REQ} - L_{FS} - M \}, \quad (3.3.10)$$

što je u posmatranom slučaju, uz usvojene početne pretpostavke, jednako

$$P_{OUTAGE} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \int_{SNR_{REQ} - L_{FS} - M}^{+\infty} e^{-\mu^2 / 2\sigma^2} d\mu = Q \left( \frac{SNR_{REQ} - L_{FS} - M}{\sigma} \right). \quad (2.3.11)$$

### **2.3.2 ANALIZA BLOKADE RESURSA ZA OBRADU SERVISA (HARD-BLOCKING)**

Uz pretpostavku da korisnici zahtevaju uslugu (servis) u skladu sa *Poisson*-ovom raspodelom, uz odgovarajuću raspodelu angažovanja (upotrebe) servisa kao što je definisano za svaku vrstu servisa, moguće je odrediti neophodan broj resursa za obradu signala u osnovnom opsegu učestanosti (hardverskih ploča sa CE-ovima) kako bi se ostvario zahtevani GoS.

Verovatnoća da korisnik neće dobiti traženi servis u vremenu definisanom vrstom traženog servisa jednaka je,



$$\begin{aligned}
 & \Pr \{ t_{\text{čekanje}} > t_{\text{servis}} \} = \\
 & = \Pr \{ \text{čekanje na servis} \} \cdot \Pr \{ t_{\text{čekanje}} > t_{\text{servis}} \mid \text{čekanje na servis} \} = \quad (2.3.12) \\
 & = \Pr \{ \text{čekanje na servis} \} \cdot e^{-\frac{(K-A)t}{H}},
 \end{aligned}$$

gde je verovatnoća da korisnik neće dobiti traženi servis određena *Erlang C* jednačinom:

$$\begin{aligned}
 \Pr \{ \text{čekanje na servis} \} & = \Pr \{ \text{svih } K \text{ CE-ova u NodeB-u su zauzeti} \} = \\
 & = \frac{\frac{A^K}{K!}}{\frac{A^K}{K!} + K \cdot \left(1 - \frac{A}{K}\right) \cdot \sum_{m=0}^{K-1} \frac{A^m}{m!}}, \quad (2.3.13)
 \end{aligned}$$

gde je  $A = \lambda / \mu = \lambda \times H$  intenzitet saobraćaja,  $\lambda$  broj poziva a  $H$  srednje vreme trajanje poziva posmatranog korisnika.

Verovatnoća da postoji bar jedna grupa slobodnih (i dostupnih) CE-ova za opsluživanje zahtevanog servisa definisana je sledećom jednačinom:

$$\begin{aligned}
 \Pr \{ t_{\text{čekanje}} \leq t_{\text{servis}} \} & = 1 - \Pr \{ t_{\text{čekanje}} > t_{\text{servis}} \} = \\
 & = 1 - \frac{\frac{A^K}{K!}}{\frac{A^K}{K!} + K \cdot \left(1 - \frac{A}{K}\right) \cdot \sum_{m=0}^{K-1} \frac{A^m}{m!}} \cdot e^{-\mu(K-A)t}. \quad (2.3.14)
 \end{aligned}$$

U slučaju (govornih) poziva, grupa CE-ova svodi se na pojedinačni CE i na pojedinačnog korisnika postavljajući tako maksimalan broj korisnika u okviru jedne ćelije odnosno sektora na  $K$  korisnika.

### **2.3.3 INTERAKCIJA IZMEĐU SOFT-BLOCKING-A I HARD-BLOCKING-A**

Verovatnoće nedostupnosti radio-interfejsa (*soft-blocking*) i nedostupnosti potrebnih CE-ova (*hard-blocking*) definišu ukupnu verovatnoću da korisnik neće dobiti zahtevani servis,

$$\begin{aligned} \Pr\{\text{prihvaćen servis}\} &= 1 - P_{\text{BLOCKING}} = \\ &= \Pr\{\text{odgovarajući broj CE-ova je raspoloživ i } SNR \geq SNR_{REQ}\} = \quad (2.3.15) \\ &\cong \Pr\{\text{odgovarajući broj CE-ova je raspoloživ}\} \cdot \Pr\{SNR \geq SNR_{REQ}\}. \end{aligned}$$

Ako se pretpostavi da su dostupnost (slobodnih) CE-ova i postizanje zahtevanog odnosa signal/šum međusobno nezavisne promenljive, moguće je zameniti znak približne jednakosti znakom jednakosti u poslednjem redu jednačine (2.3.15). Ove dve promenljive nisu u potpunosti nezavisne zbog toga što ostali korisnici u ćeliji i u mreži stvaraju interferenciju posmatranom korisniku ali istovremeno angažuju (zauzimaju) i određeni broj CE-ova. Ipak, ova pretpostavka o nezavisnosti je usvojena zato što propagacioni efekti, kao što je npr. fading, unose dovoljno neizvesnosti i statističke slučajnosti kako bi se moglo smatrati da je usvojena pretpostavka tačna.

## **2.4 STRUKTURA SERVISA I PONAŠANJE KORISNIKA**

Generalno, dve vrste događaja na specijalnim skupovima se mogu izdvojiti na osnovu uočenih potreba za kapacitetom i na osnovu ponašanja (saobraćajnog profila) korisnika, [5,6]. Prva vrsta skupova podrazumeva jako dinamične događaje kao što su fudbalske utakmice, rukometne ili košarkaške utakmice gde korisnici prate događaje na terenu vrlo pomno i koriste telekomunikacione servise uglavnom u specifičnim intervalima, npr. tokom poluvremena.

Druga vrsta događaja (skupova) može se okarakterisati kao slabo dinamična vrsta događaja (skupova). Primer ovakvih događaja su atletski mitinzi i muzički festivali. Na ovakvim skupovima, korisnici skoro kontinualno koriste telekomunikacione servise dok prate događaj koji posećuju, dok čekaju drugog atletičara da izađe na teren ili dok sledeći muzičar izađe na binu, ili čak i tokom slušanja muzičara (posebno na festivalima na otvorenom) kada prevashodno koriste servis prenosa podataka.

Treba primetiti da korisnici teže da koriste telekomunikacione servise i u satu pre početka događaja. Ovaj način ponašanja predstavlja treći scenario i treći tip ponašanja krajnjih korisnika koji nije direktno povezan sa samom vrstom događaja. Ovaj model ponašanja korisnika određen je i oblikovan kapacitetom sigurnosnih sistema

(tačaka) na ulazu u objekte, pri sigurnosnim proverama i kontrolom karata. U slučaju da se kontrole obavljaju brže, posetioци (korisnici) su savetovani da dođu kasnije pred početak događaja. Uticaj sigurnosnih kontrola i kontrola karata najbolje se vide kada se posmatra vreme potrebno da publika napusti veliki skup, kakav je na primer, fudbalska utakmica. Može se proceniti da je vreme potrebno za napuštanje velikog stadiona do 30 minuta, dok ulaz celokupne publike na stadion iznosi skoro 2 sata. Iako ovaj, treći, tip ponašanja korisnika nije identičan, ipak se može smatrati vrlo bliskim ponašanju korisnika u slučaju događaja male dinamike. Zbog toga, ovaj tip ponašanja korisnika i upotrebe mreže ne mora da se analizira kao specijalan slučaj ponašanja korisnika.

Svi ovi skupovi, a posebno skupovi male dinamike, odlikuju se velikom upotrebom servisa sa paketskom komutacijom (*Packet Switched*, PS), sa različitom aktivnošću korisnika i trajanjem (tzv. „životom“) nosioca servisa (*Radio Access Bearer*, RAB). Zbog upotrebe društvenih mreža i intenzivnog *upload*-a, analiza servisa *upload*-a podataka, kao što je primena HSUPA, postaje sve interesantnija. Servisi prenosa podataka koriste se zbog činjenice da ne zahtevaju tiho okruženje kakvo je potrebno za razgovore, diskretni su i generalno zadržavaju tragove o razmenjenim podacima, odnosno o ostvarenim sesijama. Dodatno, ovakvi servisi omogućavaju korisnicima da provere dešavanje i eventualne promene rezultata na drugim događajima koji se dešavaju istovremeno, da *upload*-uju materijale (video snimke ili slike) snimljene na skupu, na *website*-ove društvenih mreža ili da koriste servise koje redovno koriste kao što su provera *e-mail*-a, pretraživanje Interneta i drugi poznati servisi [33].

Treba primetiti da su operatori primorani da za velike skupove planiraju svoje radio-pristupne mreže tako da zadovolje najmanji predviđeni protok (protok garantovan korisniku) i da tako dođu do ukupnog protoka (trenutnog i vršnog protoka na skupu), umesto da analiziraju protoke i prenesenu količinu podataka po korisniku za potreban servis kao u [34]. Za potrebe analize, pretpostavljeno je da svaki korisnik koristi HSDPA sa minimalnim protokom od 3.6Mb/s i sa brojem HSUPA korisnika koji će biti isti ili manji od broja korisnika HSDPA.

Razvijen je simulacioni model kako bi se procenio potreban kapacitet na velikim skupovima pretpostavljajući ponašanje, odnosno saobraćajni profil korisnika koji je prikazan u Tab.2.4.1. Aktivnost korisnika je uniformno raspodeljena, sa aktivnošću

ispod 50% u slučaju skupova male dinamike i preko 50% u slučaju skupova velike dinamike. Pretpostavljeno je uniformno trajanje u slučaju skupova male dinamike dok kod skupova velike dinamike trajanje RAB-a prati *Gauss*-ovu raspodelu sa srednjom vrednošću jednakom trajanju pauze u toku događaja (npr. poluvreme) i varijacijom koja iznosi 25% trajanja pauze. BHCA/BHSA imaju uniformnu raspodelu za obe vrste skupova.

Za servise sa komutacijom kola (*Circuit Switched*, CS) usvojena je verovatnoća blokade radio-interfejsa od 2% dok su servisi sa komutacijom paketa (PS) modelovani kao pozadinski (*background*), *best effort* servisi, ukoliko nije drugačije navedeno. Pretpostavljeno je na osnovu iskustva proizvođača opreme da je ukupni *overhead* od 26% prisutan zbog 10% dozvoljene retransmisije na drugom sloju (L2) i 15% za baferisanje saobraćaja kako bi se izbegao *overflow*. Signaliziranje je pojednostavljeno i zasnovano na vrsti servisa koji se koristi i broju korisnika koji koristi izabrani servis.

*Tabela 2.4.1 – Opseg parametara korišćenih u simulaciji, u slučaju skupova velike i male dinamike.*

<i>Skupovi</i>	<i>Male dinamike</i>			<i>Velike dinamike</i>		
<i>Vrsta servisa/bearer-a</i>	<i>BHCA/ BHSA</i>	<i>Aktivnost</i>	<i>Trajanje RAB-a</i>	<i>BHCA/ BHSA</i>	<i>Aktivnost</i>	<i>Trajanje RAB-a</i>
Govor 12.2	0.5-1.3	0.38-0.9	120±30	0.3-0.9	0.38-0.8	120±30
CS UDI 64	0.02-0.06	0.38-0.9	120±30	0.02-0.06	0.38-0.9	120±30
PS 64/64	0.01-1	0.05-0.5	10-500	0.1-1	0.5-0.8	120±30 30-120
PS 128/64	0.01-1	0.05-0.5	10-500	0.1-1	0.5-0.8	120±30 30-120
PS 384/64	0.01-1	0.05-0.5	10-500	0.1-1	0.5-0.8	120±30 30-120
PS Streaming 384/64	0.01-1	0.05-0.5	10-500	0.1-1	0.5-0.8	120±30 30-120
HSDPA 3.6M/64	0.01-1	0.05-0.5	10-500	0.1-1	0.5-0.8	120±30 30-120

<i>Skupovi</i>	<i>Male dinamike</i>			<i>Velike dinamike</i>		
<i>Vrsta servisa/bearer-a</i>	<i>BHCA/ BHSA</i>	<i>Aktivnost</i>	<i>Trajanje RAB-a</i>	<i>BHCA/ BHSA</i>	<i>Aktivnost</i>	<i>Trajanje RAB-a</i>
HSDPA 3.6M/384	0.01-1	0.05-0.5	10-500	0.1-1	0.5-0.8	120±30 30-120
HSDPA 3.6M/HSUPA	0.01-1	0.05-0.5	10-500	0.1-1	0.5-0.8	120±30 30-120
Aktivnost	Ispod 50%			Preko 50%		

Tokom analize ostvarenog saobraćaja i verovatnoće blokade servisa analizirani su različiti slučajevi kako bi se utvrdila prosečna količina prenetog saobraćaja i njegove varijacije usled promena u ponašanju korisnika i servisa koje koriste. Zbog toga su tri parametra menjana tokom sprovedene analize: broj *handover*-a, raspodela saobraćaja i model blokade saobraćaja.

Tokom sprovedene analize, analizirani su modeli usamljene ćelije i „ćelije u mreži“. Pristup koji razmatra isključivo usamljenu ćeliju zasniva se na nepostojanju *handover*-a. Ovaj model odgovara situaciji kada korisnik stoji ili sedi u okviru male ćelije, dok koristi izabrani servis. Drugi model, odnosno scenario, podrazumeva „regularnu“ situaciju ćelije u okviru UMTS radio-pristupne mreže sa aktivnim *handover*-om. Za drugi scenario je određeno da u *handover* ne može ući više od 20% korisnika u okviru jedne ćelije, odnosno da se ne može angažovati više od 20% resursa ćelije. Generalno, ovaj model pokriva situacije gde se korisnici kreću kroz objekat ili između objekata u kojima se odvijaju događaji.

Modelovano je, takođe, više klasa kvaliteta servisa (QoS) i *radio-bearer*-a. Dve vrste CS i 6 vrsta PS servisa su modelovani za potrebe simulacije, uključujući HSDPA/R99 servise. Kao što je već navedeno, za CS servise je usvojena ciljna blokada radio-interfejsa od 2%. Verovatnoća blokade poziva je simulirana generisanjem odgovarajućeg broja korisnika i potvrđena *Erlang B* jednačinom.

Dva scenarija su analizirana u slučaju PS servisa. Prvi scenario podrazumeva da se korisnicima stavljaju na raspolaganje slobodni resursi u trenutku zahteva za servisom, dok u slučaju da ne postoji dovoljno slobodnih resursa, usluga se odbija i beleži se informacija o blokadi pristupa servisu. Drugi scenario podrazumeva da se ponašanje korisnika može modelovati u skladu sa *Erlang C* jednačinom, kao merom statističke dostupnosti resursa. Usvojeno je u toku simulacije da je vreme čekanja na uslugu praktično beskonačno, odnosno da može biti znatno duže u odnosu na vreme korišćenja servisa. Za skupove male dinamike usvojena je isključivo uniformna raspodela trajanja RAB-a (od 10 do 500 sekundi), dok su za skupove velike dinamike usvojena trajanja RAB-a sa *Gauss*-ovom raspodelom (120 sekundi sa 30 sekundi devijacije) i uniformnom raspodelom (od 30 do 120 sekundi).

## 3. SIMULACIONI MODEL I REZULTATI SIMULACIJE KAPACITETA MREŽE

### 3.1 SIMULACIONI MODEL

Tok simulacije prikazan je na Sl.3.1.1. Simulacija je izvršena za različit broj korisnika, počev od 100 pa do 125,000 korisnika. Najmanji broj korisnika interesantan je za analizu u slučaju usamljene ćelije. Najveći izabrani broj korisnika interesantan je sa stanovišta analize kompletnog događaja jer broj korisnika na sportskim i muzičkim manifestacijama često ide i do tako velikog broja korisnika. Posle generisanja korisnika, profili korisnika se kreiraju u skladu sa vrstom događaja (skupa), mogućnošću *handover*-a i trajanja RAB-a, Sl.3.1.1. Na osnovu vrste događaja generišu se BHCA/BHSA, aktivnost i trajanje RAB-a za svakog pojedinačnog korisnika koji se simulira. Za svaki od mogućih servisa, odgovarajući broj CE-ova se rezerviše i oslobađa pošto istekne vreme trajanja RAB-a, u skladu sa Tab.2.4.1.

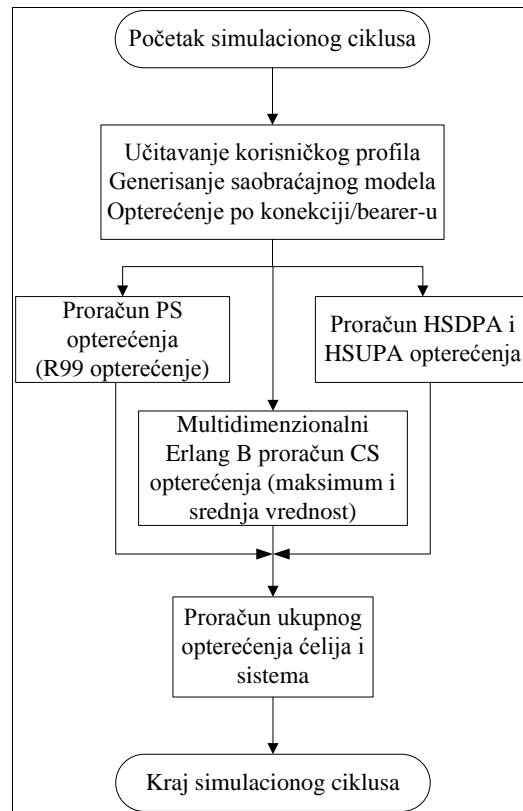
Generalno, broj korišćenih CE-ova jednak je,

$$N_{CE} = \sum_{i=1}^L N_{USER_i} \times F_{B_i}, \quad (3.1.1)$$

gde je  $N_{CE}$  ukupan broj CE-ova na *downlink*-u ili na *uplink*-u, neophodan za maksimalni saobraćaj,  $N_{USER_i}$  je broj istovremeno aktivnih korisnika za svaku od  $L$  vrsta (klasa) *bearer*-a koji se koriste i  $F_{B_i}$  je broj CE-ova angažovanih za izabrani *bearer* (servis), shodno Tab.3.1.1, respektivno. Treba naglasiti da se skup CE-ova (*pool*) namenjen HSDPA odvojeno koristi od CE-ova koji se koriste za R99 saobraćaj. Ova podela određena je tako da se CE-ovi namenjeni za R99 saobraćaj mogu koristiti za HSxPA, pri čemu konverzacioni servisi imaju viši prioritet od servisa prenosa podataka. To znači da



govorni saobraćaj ima najviši prioritet dok se HsxPA i R99 saobraćaj prenosa podataka kombinuju tako da se ostvari najbolje iskorišćenje CE-ova.



Slika 3.1.1 – Tok simulacije.

Iskorišćenost CE-ova za R99 saobraćaj određuje se kao,

$$U_{CE} = K_{SHO} \times \left( \sum_{i=1}^L F_{B_i} \times N_{SF_i} \right), \quad (3.1.2)$$

posebno za *downlink* i *uplink*, gde je  $K_{SHO}$  faktor koji uključuje meki (*soft*) *handover*. Iskorišćenost CE-ova u skupu namenjenom za HsxPA može se odrediti na sličan način kao i za R99 saobraćaj.

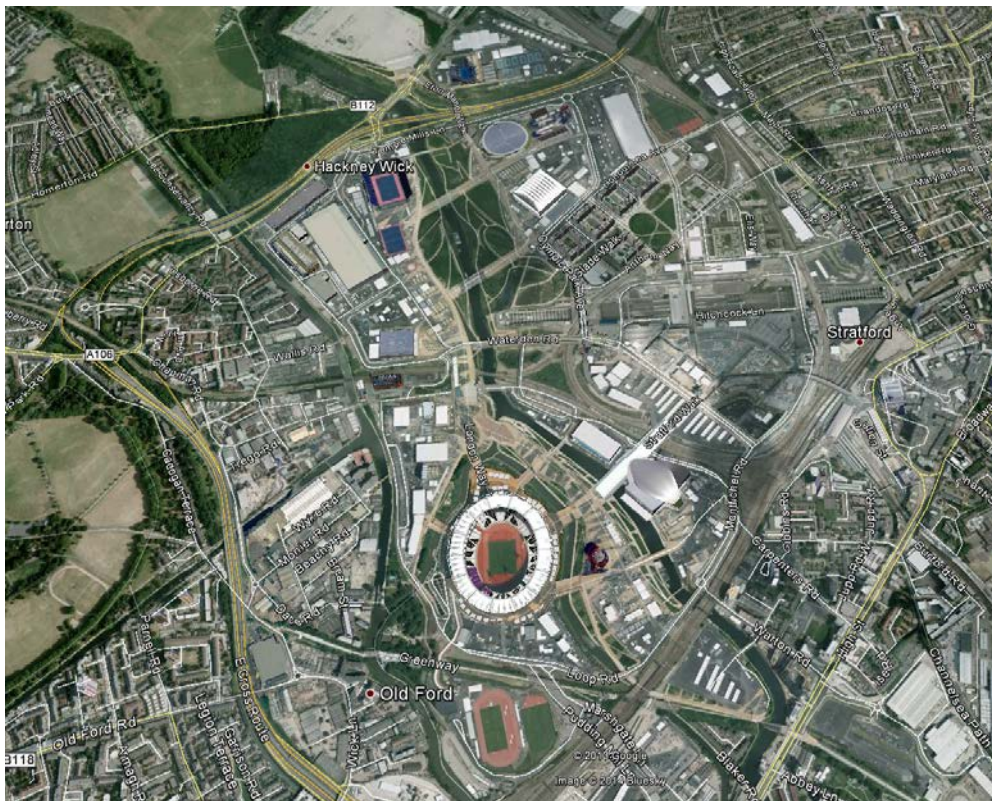
Pretpostavljeno je da je svaki NodeB, sa 3 sektora (ćelije) i jednim nosiocem, je opremljen sa 1224 CE-ova. Od 1224 CE-a, 144 se koristi za opsluživanje dva planera saobraćaja (*scheduler-a*). Svaki *scheduler* upravlja sa 72 CE-a za HSDPA i HSUPA. Skup CE-ova za HSxPA odvojen je od ostalih CE-ova dostupnih u NodeB-u.

*Tabela 3.1.1 – Potrebni resursi za obradu signala u osnovnom opsegu učestanosti po jednom R99 saobraćajnom kanalu, [35].*

<b>RAB</b>	<b>Klasa saobraćaja</b>	<b>CS/ PS</b>	<b>Maksimalan protok po RAB-u [kb/s]</b>	<b>Potreban broj CE-ova po konekciji</b>		<b>Minimalan faktor širenja spektra po bearer-u</b>	
				<i>Uplink</i>	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>	<i>Downlink</i>
AMR govor	Konverzacioni	CS	12.2	1	1	64	128
UDI	Konverzacioni	CS	64	4	4	16	32
Paketski	Interaktivni/ Pozadinski	PS	16	1	1	64	128
Paketski	Interaktivni/ Pozadinski	PS	32	2	2	32	64
Paketski	Interaktivni/ Pozadinski	PS	64	4	4	16	32
Paketski	Interaktivni/ Pozadinski	PS	128	4	4	8	16
Paketski	Interaktivni/ Pozadinski	PS	256	9	9	4	8
Paketski	Interaktivni/ Pozadinski	PS	384	12	12	4	8

Za svaki generisani broj korisnika, 1,000 simulacionih ciklusa je ponovljeno 50 puta kako bi se proizvela odgovarajuća statistika i eliminisale ekstremne vrednosti koje bi se ostvarile uz izuzetno malu verovatnoću. Za izabrani scenario iz Tab.2.4.1, za svaku pojedinačnu simulaciju (jedna od 50) generišu se slučajne vrednosti za parametre scenarija, za svakog pojedinačnog, generisanog, korisnika (od 100 do 125,000). Svaka simulacija ponavlja se 50 puta i maksimalna, srednja i minimalna vrednost potrebnog broja sektora se određuje. Takva grupa od 50 simulacija je ponovljena 1,000 puta i u matrici dimenzija  $50 \times 1,000$  maksimalna, srednja i minimalna vrednost broja sektora se utvrđuje, kao i globalni maksimum, srednja vrednost i globalni minimum.

Pored modelovanja resursa namenjenih obradi signala u osnovnom opsegu učestanosti, radio-interfejs je modelovan tako što se inicijalno posmatra sistem sa jednim nosiocem koji se može povećati do 3 nosioca po lokaciji, u zavisnosti od potrebnog kapaciteta radio-interfejsa. Glavno ograničenje je održavanje opterećenja ćelije do 60%. Za svakog korisnika generišu se propagacioni gubici na osnovu njegove slučajno generisane pozicije, a u odnosu na najbližu lokaciju NodeB-a. Definisano je da se na svakoj lokaciji mogu formirati do 6 sektora (ćelija) sa 3 nosioca tako da se radio-interfejs pokazuje da nije ograničavajući faktor. Lokacije sa 3 sektora (ćelije) i jednim nosiocem su definisane kao početne prilikom simulacije. Kao primer, Olimpijski park poslednjih Olimpijskih igara održanih u Londonu 2012. godine korišćen je kao osnovna zona sa odgovarajućom geometrijom i rasporedom objekata unutar parka (oblast okvirnih dimenzija  $2\text{km} \times 2\text{km}$ ), Sl.3.1.2. Dodatni razlog zbog kog se radio-interfejs ne pokazuje kao ograničavajući faktor je mogućnost da se obezbedi korisnicima pristup upotrebom distribuiranog antenskog sistema ili postavljanjem dodatnih lokacija (nodeB-ova) u okviru makro mreže. Ove mogućnosti su često korišćene u slučaju specijalnih skupova i često se tada mogu videti privremene lokacije u okolini gde se skup održava ili u okviru prostora samog skupa.



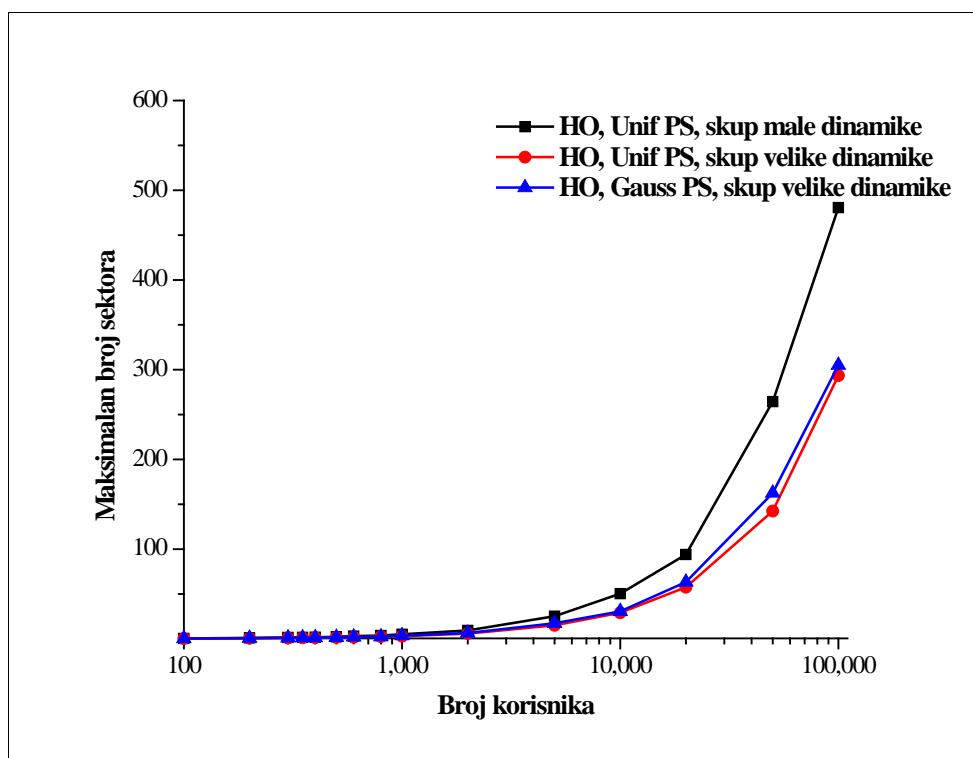
Slika 3.1.2 – Olimpijski park u Londonu.

### 3.2 KORISNIČKI PROFILI I REZULTATI SIMULACIJE KAPACITETA MREŽE

Potreban broj sektora određen na osnovu aktivnih korisnika prikazan je na Sl.3.2.1. Dva scenarija su prikazana, oba sa aktivnim *handover*-om i sa i bez modelovanja saobraćajnog kapaciteta koristeći *Erlang C* jednačinu za PS servise. Pretpostavljeno je da se skup velike dinamike odvija sa uniformno distribuiranim zahtevima za PS sesijama u jednom slučaju i sa *Gauss*-ovom raspodelom u drugom, shodno Tab.2.4.1.

Rezultati simulacije pokazuju da je broj korisnika direktno proporcionalan broju potrebnih sektora. Takođe, jasno je da u slučaju PS servisa sa *Gauss*-ovom raspodelom neophodan nešto veći kapacitet u odnosu na slučaj sa uniformnom raspodelom, uz iste vrednosti ostalih parametara. Ovo je može objasniti potrebom da se praktično isti broj korisnika opslužuje u kraćem vremenskom periodu u poređenju sa slučajem kada je raspodela saobraćaja (zahteva korisnika za uspostavljanjem veze ili sesije) uniformna (kao što je to generalno slučaj na skupovima male dinamike). Treba primetiti da zbog dužeg

korišćenja servisa i uniformno distribuiranih zahteva korisnika za servisima, u slučaju skupova male dinamike će se ostvariti bolje iskorišćenje resursa tj. CE-ovi će veći deo vremena biti zauzeti, u opštem slučaju uz veći broj potrebnih sektora za isti broj korisnika, ali uz manji broj potrebnih sektora za prenos ukupno iste ili malo veće količine podataka.



Slika 3.2.1 – Broj potrebnih sektora u slučaju različitih raspodela zahteva za PS servisima.

Razlika između skupova sa velikom i malom dinamikom primećuje se u slučajevima kada zahtevi svih korisnika treba da budu opsluženi. Međutim, ta razlika nije izražena u slučajevima malog broja korisnika. U slučaju skupova velike dinamike nije posebno uočljiva ni razlika u raspodeli trajanja *bearer*-a jer korisnici na dinamičnim skupovima nemaju vremena da koriste servise i imaju običaj da duži vremenski period ne koriste servise. Obezbeđivanje servisa za 100,000 korisnika može zahtevati 350 sektora kada se primenjuje *Erlang C* jednačina i 480 sektora u slučaju opsluživanja 125,000 korisnika koji posećuju skup male dinamike, uz uslov da zahtev za svaku sesiju i svaki poziv budu ispunjeni a ne odbijeni.

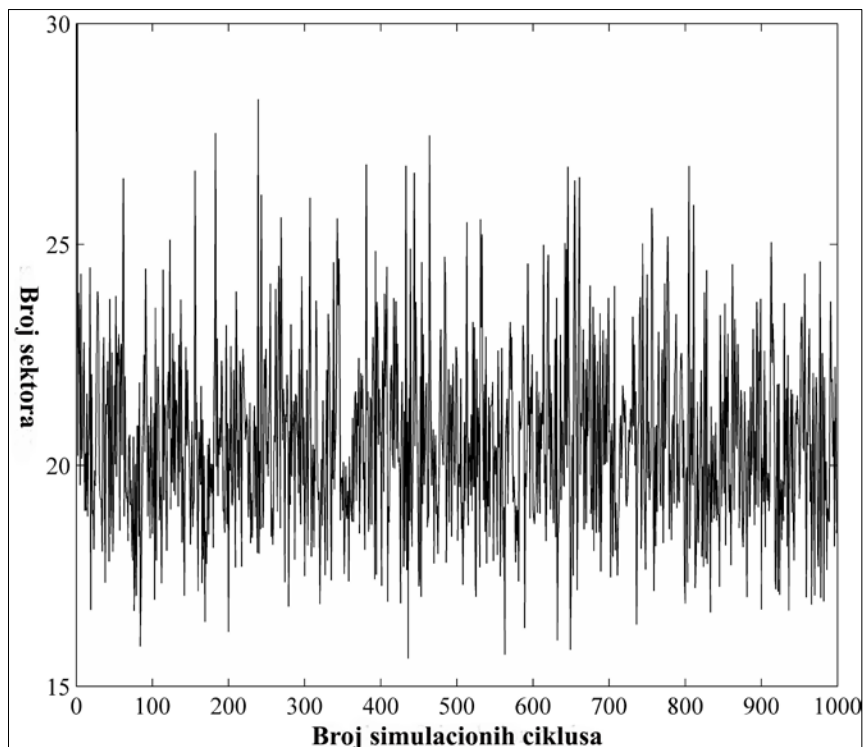
Rezultati simulacije pokazuju da je, prateći *Erlang C* jednačinu, sobračaj na

*downlink*-u nešto veći od saobraćaja na *uplink*-u ali je ta razlika u obimu saobraća do 20%. Zbog toga se može smatrati da je sistem ipak ograničen potrebnim kapacitetom na *uplink*-u. Ovo je posebno interesantno na velikim skupovima gde korisnici imaju običaj da koriste velike protoke na *uplink*-u da bi *upload*-ovali velike dokumente (npr. video-snimke sa ceremonija otvaranja ili izvođenja umetnika na koncertima). Jasno je na osnovu prikazanih scenarija da krajnji korisnici mogu lako da budu nezadovoljni ponuđenom uslugom u tako zahtevnom okruženju, što na kraju ima loš uticaj na operatora i zadovoljstvo korisnika uslugom.

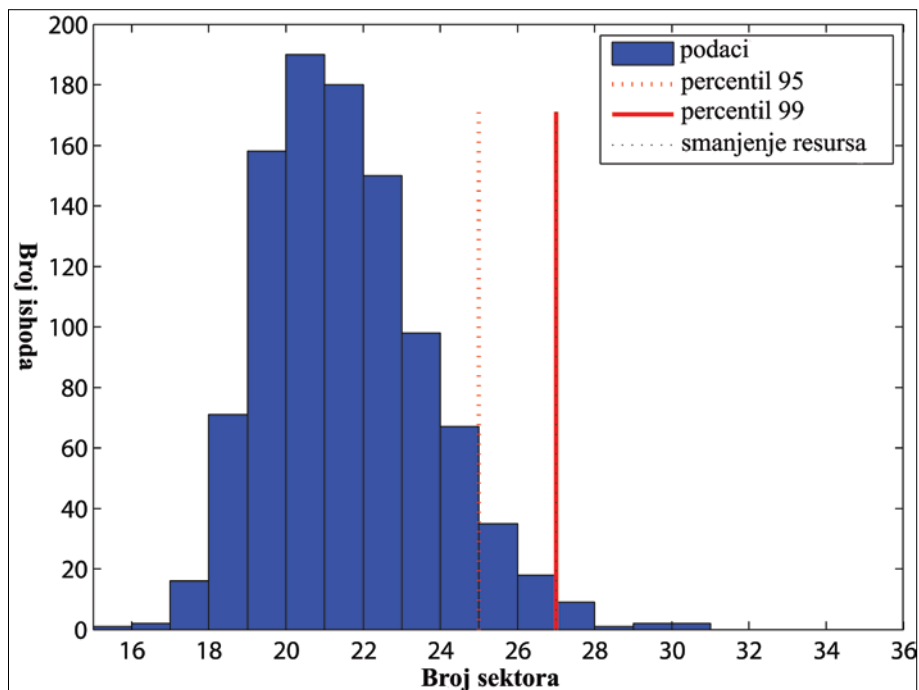
U scenarijima u kojima je ukupan saobraćaj opslužen gotovo trenutno i ne dolazi do blokade, ograničavajući faktor je kapacitet na *downlink*-u. Zbog velikog zahtevanog kapaciteta (i ukupnog protoka), sistem nije ograničen interferencijom ili protokom na *uplink*-u već kapacitetom na *downlink*-u koji je potrebno obezbediti krajnjim korisnicima. Treba naglasiti da takav scenario zahteva veliki broj sektora i lokacija, odnosno izuzetno veliki resursi mogu biti angažovani na ispunjenju korisničkih zahteva ali će zauzvrat utisak korisnika o kvalitetu mreže (i QoE i QoS) biti izuzetno pozitivan.

Na SI.3.2.2, prikazani su rezultati simulacije za 10,000 korisnika (posetilaca) na skupu sa malom dinamikom, gde je aktivan *handover* između ćelija, sa uniformnom distribucijom trajanja PS servisa čija blokada je određena *Erlang C* jednačinom. Može se videti sa SI.3.2.2, da za ponovljenih 50 simulacija u 1,000 ciklusa (ukupno 50,000 simulacija), da postoji mala varijacija potrebnog broja sektora od ciklusa do ciklusa. Razlika između srednjeg i maksimalnog potrebnog broja sektora pokazuje moguću varijaciju potrebnog kapaciteta i potrebne investicije u dodatnu opremu.

Analizirajući raspodelu broja potrebnih sektora po simulacijama, SI.3.2.3, može se zaključiti da više od 99% svih potencijalnih zahteva za kapacitetom mogu biti zadovoljeni sa smanjenim resursima. Jasno je da u ovom slučaju treba instalirati najmanje 27 sektora kako bi se obezbedio adekvatan servis. Linija za 99% ishoda prelazi preko linije koja pokazuje umanjeње ukupnih resursa za 10%. Iako se pojedinačni specijalni događaj održava jednom godišnje ili jednom u više godina, ukupan broj specijalnih događaja u mreži jednog operatora iznosi više od 100 tako da umenjeње potrebnih resursa od 10% predstavlja značajnu uštedu koja ima mali uticaj na zadovoljstvo korisnika uslugom i ponuđene servise.

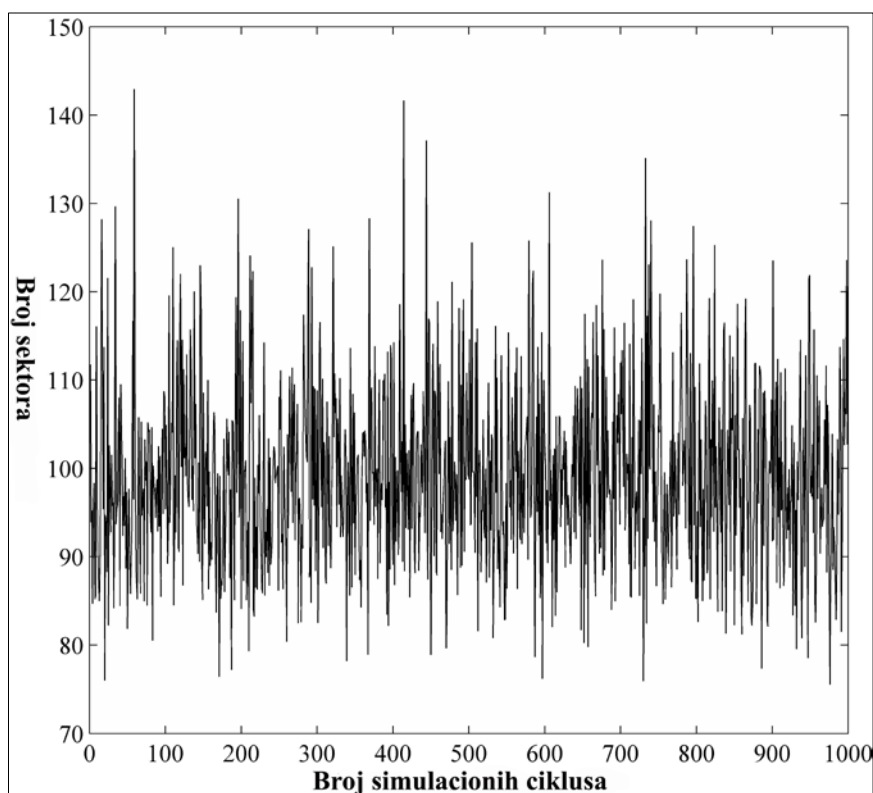


Slika 3.2.2 – Maksimalan broj sektora u slučaju 10,000 korisnika na skupu male dinamike, sa handoverom između ćelija, uniformnom raspodelom trajanja PS servisa i blokadom sesija u skladu sa Erlang C jednačinom.



Slika 3.2.3 – Histogram koji predstavlja broj potrebnih sektora za opsluživanje 10,000 korisnika na skupu male dinamike, sa handoverom između ćelija, uniformnom raspodelom trajanja PS servisa i blokadom sesija u skladu sa Erlang C jednačinom.

Na Sl.3.2.4 prikazan je potreban broj sektora za 50,000 korisnika, sa istim ponašanjem kao i korisnici za koje su rezultati prikazani na Sl.3.2.3.

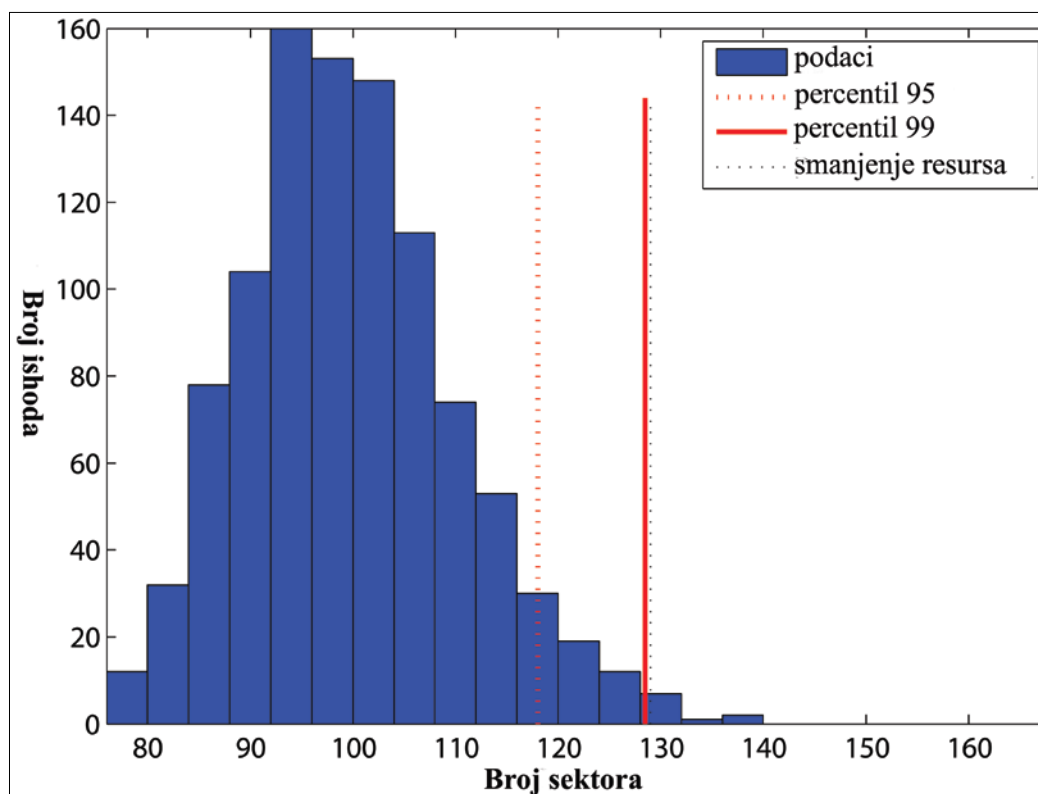


*Slika 3.2.4 – Maksimalan broj sektora za opsluživanje 50,000 korisnika na skupovima male dinamike, sa handoverom između ćelija, uniformnom raspodelom trajanja PS servisa i blokadom sesija u skladu sa Erlang C jednačinom.*

Može se videti na Sl.3.2.4 da je maksimalan broj sektora potreban za opsluživanje svih korisnika, utvrđen u okviru svih sprovedenih simulacija, iznosio 144 sektora. Takođe, na Sl.3.2.5 se može primetiti da je u ostalim simulacijama broj potrebnih sektora za oko 10% manji od maksimalnog i da u 10 simulacija broj sektora iznosi od 130 do 140 (od ukupno 50,000 simulacija). Ovo znači da je moguće umanjiti količinu potrebnih resursa za 10% a da tada u manje od 1% događaja može doći do povećanja blokade servisa i to za manje od 1%. Nasuprot tome, smanjenje količine potrebnih resursa (opreme, pratećeg softvera i radova) za 10% stvorilo bi značajne finansijske uštede i omogućilo bi jednostavniju izgradnju manje komplikovane radio-pristupne mreže. Može se videti sa Sl.3.2.2 i Sl.3.2.4 da prelaz preko broja sektora koji zahteva dodatnu opremu je mnogo češći u slučaju 10,000 nego u slučaju 50,000 korisnika. Zbog toga je investicija u neophodne resurse i u dodatnu rezervu opravdana



na početku izgradnje sistema, odnosno na početku rada. Samim tim, analiza broja slučajeva u kojima se prevazilazi instalirani kapacitet mora biti određen kako bi se odredio rizik potencijalnog manjka kapaciteta i potrebe za instalacijom dodatne opreme (hadvera sa pratećim softverom i radovima).



Slika 3.2.5 – Histogram koji prikazuje potreban broj sektora za opsluživanje 50,000 korisnika na skupovima male dinamike, sa aktivnim handoverom između ćelija, uniformnom raspodelom trajanja PS servisa i blokadom sesija određenom Erlang C jednačinom.

## **4. FUNKCIJA TROŠKA**

### **4.1 DEFINICIJA FUNKCIJE TROŠKA**

Istraživanje vezano za kreiranje funkcije troška rizika (cene rizika), odnosno izgradnje dodatne infrastrukture, ima za cilj da proizvede objektivnu meru kvaliteta projektovanog rešenja. Ovakvi rezultati istraživanja viđeni su ranije u literaturi koja tretira razne vrste telekomunikacionih sistema i mreža. U [36], sprovedena je troškovna analiza i razvijeni su odgovarajući modeli za različite vrste servisa ali se radi isključivo o servisima prenosa podataka baziranim na Internet protokolu (*Internet Protocol*, IP). Slično istraživanje, usmereno na proceduru izgradnje optičke pristupne mreže sa ciljem ostvarivanja optimalnih kapitalnih (*Capital Expenditures*, CAPEX) i tekućih (*Operational Expenditures*, OPEX) troškova prikazano je u [37]. U [38], razni servisi u UMTS mreži su razmatrani kako bi se predvideo optimalan poluprečnik ćelije u radio-pristupnoj mreži. Analiza je sprovedena za različita okruženja ali je uključivala mali broj korisnika u poslovnim prostorijama, sa ponašanjem korisnika usvojenim iz makro mreža, i kapacitet RNC-a nije analiziran sa stanovišta troška izgradnje i koristi koja se time ostvaruje (tzv. *cost/benefit* analiza). Osnovni parametar pri optimizaciji bio je poluprečnik ćelije zbog čega se analiza nije direktno bavila investicijama i optimizacijom resursa za obradu signala u osnovnom opsegu učestanosti.

Primetno je da se u literaturi ne sreću analize koje obuhvataju radio-pristupne mreže namenjene specijalnim skupovima. Zbog toga je analizirana složenost i relativan kapacitet radio-pristupne mreže na osnovu funkcije troška koja se može povezati sa pojedinačnim NodeB-om, predstavljajući investiciju u neohodan broj CE-ova ili u zahtevani kapacitet, ili eventualno povećanje kapaciteta RNC-a. Kapacitet RNC-a je ograničen sa nekoliko faktora [23] koji mogu imati uticaj na ukupnu funkciju troška pa

se zbog toga i moraju uzeti u razmatranje. Ovi se faktori mogu grupisati u skladu sa oblastima na koje mogu imati uticaj:

- ukupan broj korisnika koji koriste servis prenosa govora ili prenosa podataka, sa njihovim BHCA/BHSA, što će odrediti ukupan broj Erlanga i prenesenu količinu podataka;
- ukupan kapacitet  $I_{ub}$ ,  $I_{ur}$  i  $I_u$  prikazan u Mb/s; i
- ukupan kapacitet komutacije, iskazan u Mb/s, ukupan broj kontrolisanih NodeB-ova i ukupan broj korišćenih radio-nosilaca (RF nosilaca).

Analiza je sprovedena i vrednosti funkcije troška su određene za različit broj korisnika na velikom skupu, počev od 100 korisnika pa do 125,000 korisnika. Definisana je funkcija troška kako bi se ocenila efikasnost projekta radio-pristupne mreže i ocenio trošak (cena) po protoku korisnika i trošak po korisniku, koji su definisani kao mera optimalne cene i doprinosa (*cost/benefit*) predloženog rešenja mreže. Određene su ekstremne vrednosti i srednja vrednost funkcije troška za 1,000 simulacionih ciklusa ponovljenih 50 puta. Kao što je već napomenuto, za izabrane scenarije prikazane u Tab.2.4.1, za pojedinačnu simulaciju (jednu od 1,000 odnosno 50,000 ukupno) generišu se slučajne vrednosti za parametre definisanog scenarija za konstantni, usvojeni broj korisnika (od 100 do 125,000). Svaka simulacija je u okviru jedne grupe ponovljena 1,000 puta i i utvrđene su maksimalna, minimalna i srednja vrednost funkcije troška. Takva grupa od 1,000 simulacija je ponovljena 50 puta, kreirana je matrica dimenzija koja sadrži ekstreme i srednje vrednosti za svih 50 ponavljanja i utvrđeni su globalni maksimum i globalni minimum, kao i srednja vrednost svih 50,000 simulacija. Pretpostavljeno je da za mali broj korisnika potrebna mala investicija u opremu, planiranje i radove povezane sa izgradnjom mreže. Istovremeno, inicijalni troškovi izgradnje mreže ne mogu biti zanemareni i troškovi korišćenih resursa (planiranje, oprema sa pratećim softverom, prenosni sistemi/kapaciteti, radio-interfejs) su veći po Mb/s nego u slučaju kada je skupu prisutan veliki broj korisnika.

Zbog toga, definisana je funkcija troška na osnovu normalizovanog kapaciteta koji oprema podržava i relativnog troška povećanja kapaciteta. Funkcija troška

definisana je kao,

$$\text{trošak} = \begin{cases} C_{IN} + e^{\frac{T_A}{T_A^m}}, & V_{TOT} \leq 450 \frac{\text{Mb}}{\text{s}}, \\ C_{IN} + S \times \frac{V}{V_m} \times e^{\frac{T_A}{T_A^m}} & N \leq N_C \quad V_{TOT} \geq 450 \frac{\text{Mb}}{\text{s}}, \\ C_{IN} + S \times \left\lfloor \frac{N}{N_C} \right\rfloor \times \frac{V}{V_m} \times e^{\frac{T_A}{T_A^m}} & N > N_C \quad V_{TOT} \geq 450 \frac{\text{Mb}}{\text{s}}. \end{cases} \quad (4.1.1)$$

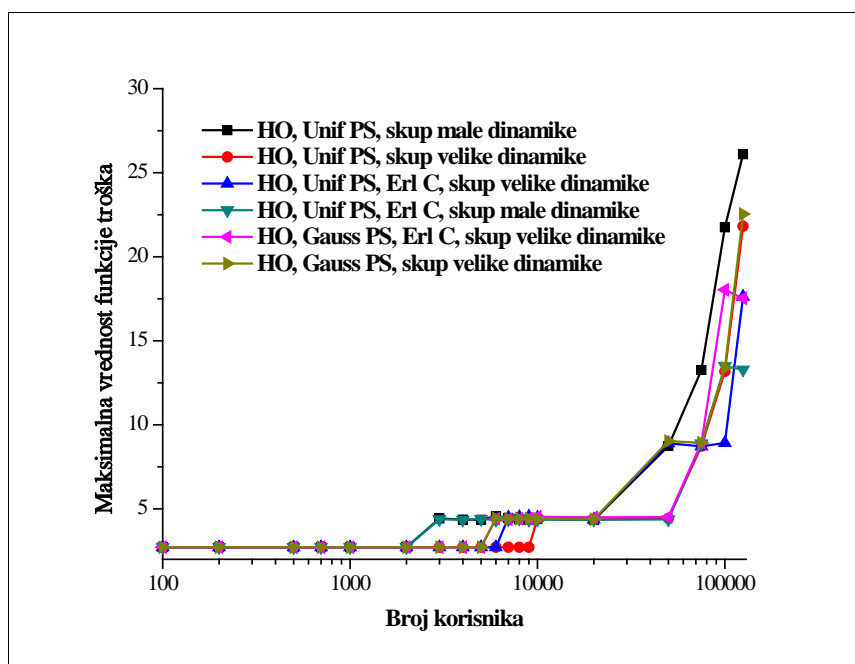
gde je  $T_A$  srednja vrednost protoka po korisniku uključujući *downlink* i *uplink* i sve RAB-ove, u svim ciklusima i simulacijama za izabrani broj korisnika na skupu,  $T_A^m$  je maksimalan srednji protok po korisniku uključujući *downlink*, *uplink* i sve RAB-ove, opet u svim ciklusima i simulacijama za izabrani broj korisnika na skupu,  $N$  je broj sektora,  $N_C$  je maksimalan broj sektora koje RNC može opslužiti i koje transportni sistem može opslužiti,  $V$  je srednji protok po pojedinačnom korisniku,  $V_m$  je maksimalni protok po pojedinačnom korisniku za izabranu simulaciju i  $V_{TOT}$  je ukupni ostvareni protok u sistemu.

U jednačini (4.1.1),  $\lfloor N/N_C \rfloor$  predstavlja celobrojnu vrednost količnika zaokruženu na prvi veći ceo broj, parametar  $S$  (težinski faktor) je izabran da bude jednak 50% normalizovane vrednosti nove opreme i ukupni težinski faktor funkcije treba da bude takav da je dva puta veći od slučaja kada je protok u sistemu ispod 450Mb/s. Za protoke u mreživeće od 450Mb/s, parametar  $S$  u funkciji troška postavljen je na vrednost 1.5.  $C_{IN}$  predstavlja inicijalni trošak planiranja i instalacije opreme sa pratećim softverom na početku rada mreže, koji postoji čak i ako nema aktivnih korisnika u mreži.  $C_{IN}$  normalizovana vrednost odgovarajuće monetarne jedinice (npr. 1€).

## 4.2 REZULTATI SIMULACIJE FUNKCIJE TROŠKA

Maksimalna vrednost funkcije troška, za različite slučajeve, prikazana je na SI.4.2.1. Svi prikazani slučajevi uključuju međucelijski (*intracell* i *intercell*) *handover*, dok raspodela trajanja PS servisa prati uniformnu ili *Gauss*-ovu raspodelu trajanja. Sistem je predviđen da tako da do blokade dolazi u skladu sa *Erlang C* jednačinom ili

da u sistemu nema blokade. De vrste skupova su analizirane – skupovi male i velike dinamike sa različitim raspodelama PS servisa za skupove velike dinamike. Ostali parametri su usvojeni shodno Tab.2.4.1 i Tab.3.1.1. Minimalna vrednost funkcije troška iznosi 1 i predstavlja slučaj kada nema aktivnih korisnika u mreži. Analizirajući promene funkcije troška, može se uočiti da je minimalna vrednost na Sl.4.2.1 jednaka 2.72, čak i u slučaju veoma malog broja korisnika. Ovo se može objasniti troškom koji se stvara jer se moraju angažovati odgovarajući resursi kako bi se izgradila mreža i započeo rad. Maksimalna vrednost funkcije cene može imati vrlo različite vrednosti u zavisnosti od ponašanja korisnika (korisničkog profila). Može se videti da u slučaju skupova male dinamike, gde svi su korisnički zahtevi opsluženi, funkcija troška ima vrednost 26 dok u slučaju blokade servisa u skladu sa *Erlang C* jednačinom taj trošak pada na 13.3.



Slika 4.2.1 – Promena funkcije troška uzimajući u obzir broj sektora koji se mogu povezati na RNC, za različite modele ponašanja korisnika.

Funkcija troška za skupove velike dinamike ima vrednost u opsegu od 17.5 do 22.5 a uočava se da su događaji na kojima raspodela trajanja PS servisa prati *Gauss*-ovu raspodelu da su kritičniji sa stanovišta troška realizacije. Najveće vrednosti funkcije troška javljaju se za najveći broj korisnika (125,000 korisnika) ali se uočava da je promena vrednosti funkcije troška reda 10 puta dok je broj korisnika porastao 1,250

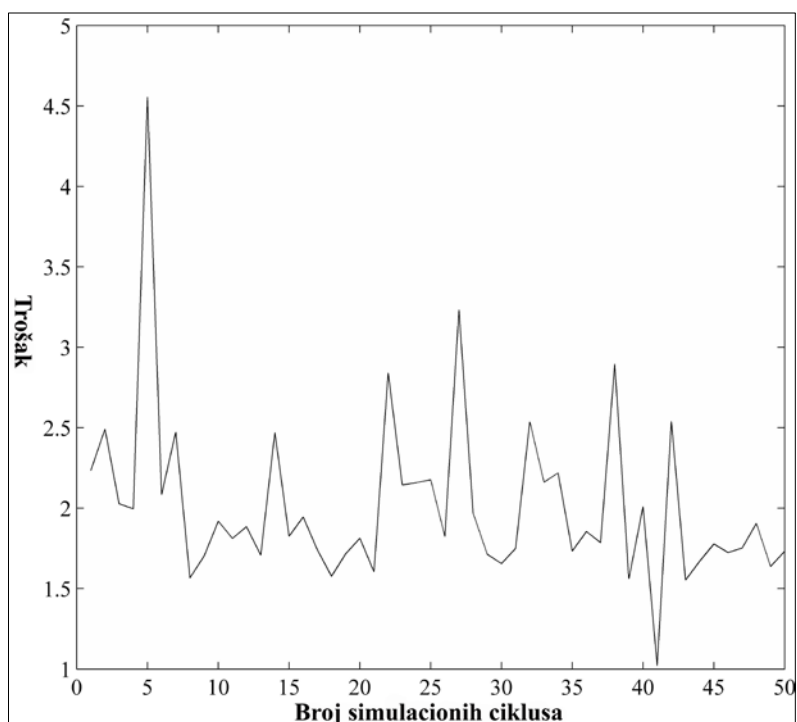
puta. Ovo znači da porast troškova pri realizaciji mreže a na osnovu i instaliranog kapaciteta može biti čak i desetostruk tokom specijalnih skupova, ukazujući tako na velike varijacije ukupnog protoka u mreži. Ova promena (varijacija) je znatno veća u poređenju sa uobičajnim ponašanjem korisnika u makro mreži tokom uobičajnog ponašanja mreže. Rezultati prikazani u [5,6] ukazuju da troškovi obezbeđivanja potrebnog kapaciteta krajnjim korisnicima mogu da se upetostruče kada ne postoji ograničenje u broju sektora koji se mogu povezati na jedan RNC.

Može se videti da je porast vrednosti funkcije troška znatno brži i veći i u situacijama kada je neophodno opslužiti sve korisničke zahteve bez blokade servisa. Glavni razlog za ovakvo ponašanje funkcije troška jeste porast korisničke aktivnosti tokom relativno dugih pauza tokom događaja (skupa). Jasno je da će tokom skupova male dinamike sistem imati bolje iskorišćenje resursa i ukupno veću količinu prenetih podataka u odnosu na skupove velike dinamike. Zbog intenzivnog korišćenja servisa, čak i za mali broj korisnika, veliki protoci su potrebni, odnosno susreću se velike količine prenetih podataka i velike investicije u potrebne resurse. Sa druge strane, tokom skupova velike dinamike, ponašanje korisnika je određeno prekidima u toku događaja kao što su pauze i poluvreme. Trajanje svih RAB-ova je određeno trajanjem pomenutih pauza i zato je vidljiv relativno spor rast uz jasne promene koje ukazuju kada je potrebno instalirati dodatnu opremu. Iskorišćenje resursa za skupove velike dinamike je manje efikasno zbog činjenice da se upotreba servisa dominantno zahteva na mahove (u *burst-u*), za razliku od skupova male dinamike. Zbog pojednostavljenja prikaza,  $C_{IN}$  je izabrano da iznosi 0. U slučaju kada je  $C_{IN}$  različito od 0, uočava se konstantan trošak i celokupna funkcija troška se izdiže ka većim vrednostima.

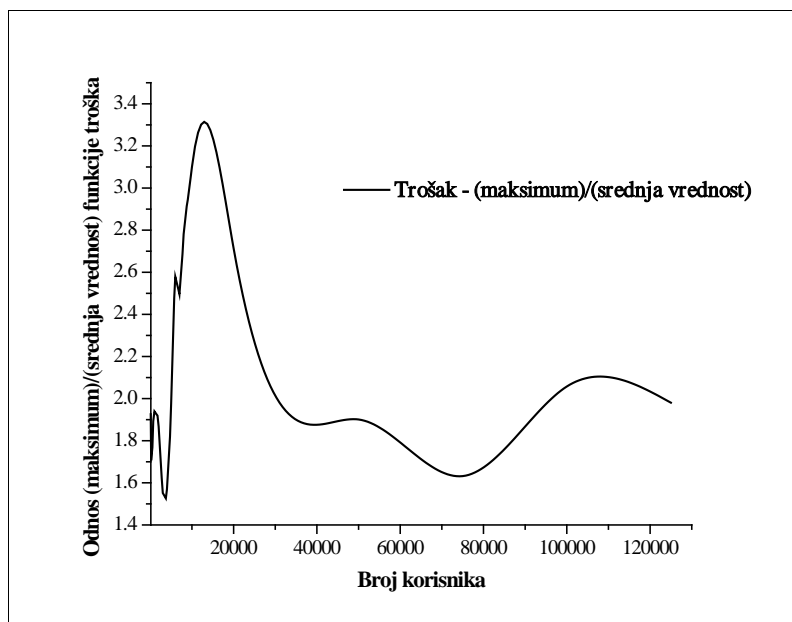
Primer potencijalne promene funkcije troška prikazan je na Sl.4.2.2, za slučaj kada skupu male dinamike prisustvuje 50,000 korisnika, sa aktivnim *handover*-om između ćelija, uniformnom raspodelom trajanja PS servisa i blokadom servisa u skladu sa *Erlang C* jednačinom. Isti scenario je korišćen i za prikaz rezultata na Sl.3.2.4 i Sl.3.2.5.

Može se primetiti da funkcija troška ima relativno značajne promene tokom simulacija tako da precizan izbor broja instaliranih sektora može dovesti do značajnih ušteda. Odnos između maksimalnih i srednjih vrednosti funkcije troška tokom

simulacionih ciklusa, za izabrani broj korisnika, analiziran je za skupove sa malom i sa velikom dinamikom i prikazan na Sl.4.2.3.



Slika 4.2.2 – Promene funkcije troška za rezultate i profil ponašanja korisnika prikazan na Sl.4.2.1. Izvršeno je 50 puta po 1,000 simulacionih ciklusa za 50,000 korisnika.



Slika 4.2.3 – Odnos između maksimalne i srednje vrednosti funkcije troška za ponašanje korisnika prikazano na Sl.4.2.1 i u Tab.2.4.1.

Rezultati simulacije pokazuju da se funkcija troška menja brzo u slučaju skupova male dinamike, čak i za mali broj istovremeno aktivnih korisnika zbog potrebe da se obezbede veliki protoci u mreži. Ova značajna promena funkcije troška može da se primeti čak i za mali broj korisnika, između 5,000 i 6,000 kada svi pozivi i sve sesije moraju biti opsluženi bez blokade. Jasno je da je ispravan izbor instalacija opreme koja će pružiti veliki kapacitet već na samom početku rada mreže. Ispravnost ovog pristupa potvrđena je na Olimpijskim igrama 2012, na osnovu pošanja korisnika i ukupnog saobraćaja u mreži. Potvrđeno je da korisnici unutar istog objekta (događaja) imaju isti način ponašanja pa tako i isti saobraćajni profil, stvarajući veliki saobraćaj čak i u slučaju malog broja korisnika.

U slučaju skupova velike dinamike mogu se primetiti velike promene u potrebnom kapacitetu i potreba da se instalira nova oprema u slučaju kada je broj korisnika na skupu između 10,000 i 20,000 kao što se može videti na SI.4.2.1 i SI.4.2.3. Za 50,000 korisnika, obe vrste skupova zahtevaju jednake investicije u resurse (opremu, prateći softver, planiranje, prenosne sisteme itd.).

Može se zaključiti da je vrsta velikog skupa najvažniji parametar koji će uticati na ponašanje korisnika i zahteve vezane za kapacitet. Drugi parametar koji treba uzeti u razmatranje je kvalitet usluge bilo kao kvalitet ponuđenog servisa (QoS) bilo kao meru dostupnosti (GoS). Ovi parametri imaju veliki uticaj na obim resursa koji su potrebni u jednom trenutku da se zadovolje zahtevi krajnjih korisnika. Konkretno, određeni broj blokiranih poziva ili neuspelih sesija prenosa podataka u skladu sa *Erlang C* jednačinom čine sistem ekonomski povoljnijim ali isto tako mogu uticati i na ponašanje korisnika. Kako korisnici imaju običaj da ostanu na istoj lokaciji i u istom broju, u dužem vremenskom periodu, korisnici će na osnovu dostupnosti mreže imati utisak kvaliteta usluge i na osnovu toga će doneti generalizovanu odluku o kvalitetu celokupne mreže i samom operatoru. Ovo je značajna razlika u odnosu na makro mrežu gde su korisnici mobilniji i kreću se u širim oblastima. Slično kao i u makro mrežama, treba razmotriti i pitanje *handover*-a koji angažuje CE-ove u različitim ćelijama (sektorima).



## **5. PRIMER ANALIZE KAPACITETA**

### **5.1.1 PRETPOSTAVKE VEZANE ZA RADIO-INTERFEJS**

Kao primer analize kapaciteta na skupu u objektu izdvojena je košarkaška utakmica u košarkarškoj sali, držana u okviru kvalifikacionog dela košarkaškog turnira na Olimpijskim igrama u Londonu 2012. Sprovedena analiza odnosi se na slučaj kada korisnici koriste servise prenosa podataka u skladu sa pretpostavkama iz Tab.2.4.1 u slučaju skupova velike dinamike. Iskazane vrednosti odgovaraju trajanju pauza između četvrtina.

Prilikom planiranja kapaciteta radio-interfejsa i resursa potrebnih za obradu signala u osnovnom opsegu učestanosti potrebno je sprovesti analizu koja se sastoji iz više delova i to:

- analizu radio-pristupne mreže u objektu (uključujući i prostor ispred objekta) kako bi se odredio potreban kapacitet i proverilo pokrivanje unutar objekta za planirani broj posetilaca i prisutno tehničko osoblje;
- modelovanje i analizu spoljne makro radio-pristupne mreže u Olimpijskom parku kako bi se odredio kapacitet mreže na otvorenom u parku, procenile *handover* zone i procenio kapacitet koji može da posluži kao podrška mreži unutar objekta;
- analizu i modelovanje makro radio-pristupne mreže u Olimpijskom parku i makro mreže izvan parka kako bi se procenila međusobna interakcija i uticaj na kvalitet servisa kod korisnika koji ulaze u Olimpijski park ili ga napuštaju.

Za potrebe analize radio-interfejsa usvojene su sledeće pretpostavke:

- na raspolaganju su do tri UMTS radio-kanala širine 5MHz, u opsegu 2.1GHz;
- sam objekat i Olimpijski park su dovoljno izolovani tako da nema potrebe da se vrši rezervisanje radio-kanala isključivo za upotrebu u objektu (*in-building*) ili u spoljnoj radio-pristupnoj mreži. Zbog toga se svi radio-kanali mogu koristiti za mrežu unutar objekta, kako je prvobitnom analizom i predviđeno;
- Svi kanali se koriste za UMTS i HSxPA. Jedan od kanala se proglašava za primarni za pružanje HSxPA servisa;
- distribuirani antenski sistem u objektu koristi omnidirekcionu ili usmerenu antenu dijagrama zračenja prikazanih u prethodnoj analizi, a pozicija antena je tako izabrana da se maksimizira radio-pokrivanje.

### **5.1.2 PRETPOSTAVKE VEZANE ZA PLANIRANJE KAPACITETA**

Ponašanje posetilaca košarkaške sale može se modelovati kao ponašanje korisnika na skupu velike dinamike. Za skup velike dinamike, za strukturu servisa prikazanih u Tab.2.4.1 izvršena je analiza pretpostavljajući da takav saobraćajni profil odgovara kratkim prekidima između četvrtina na košarkaškim utakmicama. Pretpostavljeno je da se u okviru NodeB-a angažuju resursi za obradu signala u osnovnom opsegu učestanosti u skladu sa Tab.3.1.1.

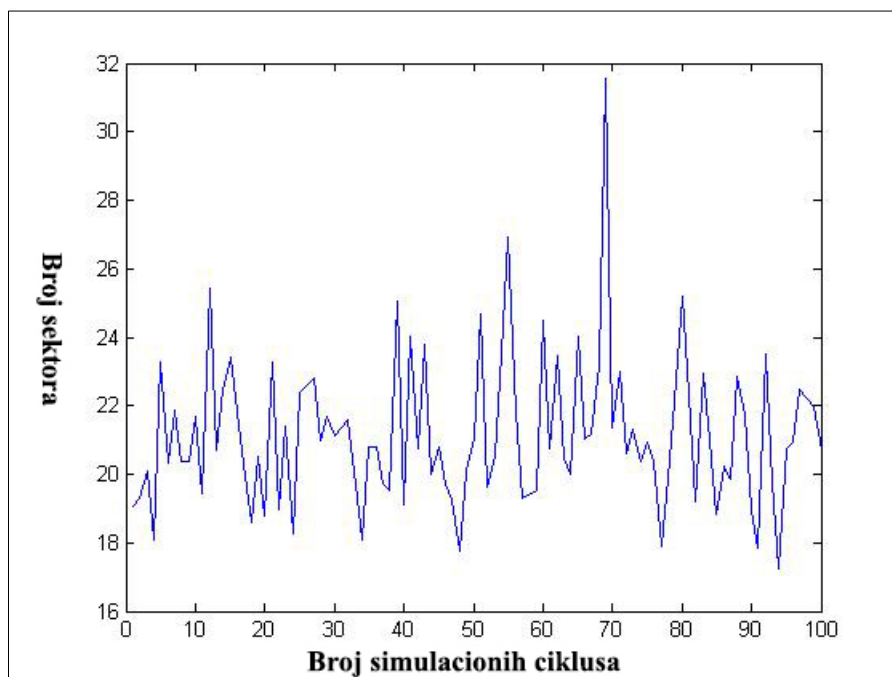
### **5.1.3 DINAMIKA SKUPA**

Košarkaške utakmice svrstavaju se u skupove velike dinamike za koje je karakteristično da se pojavljuju veći nivoi saobraćaja u toku kratkih pauza. Ovakvo povećanje saobraćaja manje je u slučaju redovnih, ligaških, košarkaških utakmica gde odluka o pobedniku u jednoj utakmici nije kritična. Sa druge strane, u slučaju istovremenih skupova koji bitno utiču na aktere u njima, upotreba telekomunikacionih usluga u toku pauza je znatno povećana. U slučaju košarkaških utakmica na Olimpijskom turniru dolazi do povećane upotrebe telekomunikacionih servisa u pauzama zbog praćenja skupova koji se odvijaju paralelno sa posmatranim skupom (drugi sportovi u toku kvalifikacija ili praćenje utakmica poslednjeg kola kada se donosi

odluka o nastavku takmičenja). Pored kratkih pauza između prve i druge, i treće i četvrte četvrtine, poluvreme u trajanju od 10 minuta je dodatna i najveća pauza u toku košarkaške utakmice. Pretpostavljeno je da se u toku svih pauza koristi servis prenosa govora, dok se u kratkim pauzama koriste i paketski servisi za prenos podataka, za proveru *e-mail*-a i pretraživanje Interneta da bi se proverili rezultatima na drugim skupovima, kao i *streaming* servisi (PS i HSDPA) tokom poluvremena kako bi se pogledali najzanimljiviji detalji na drugim skupovima.

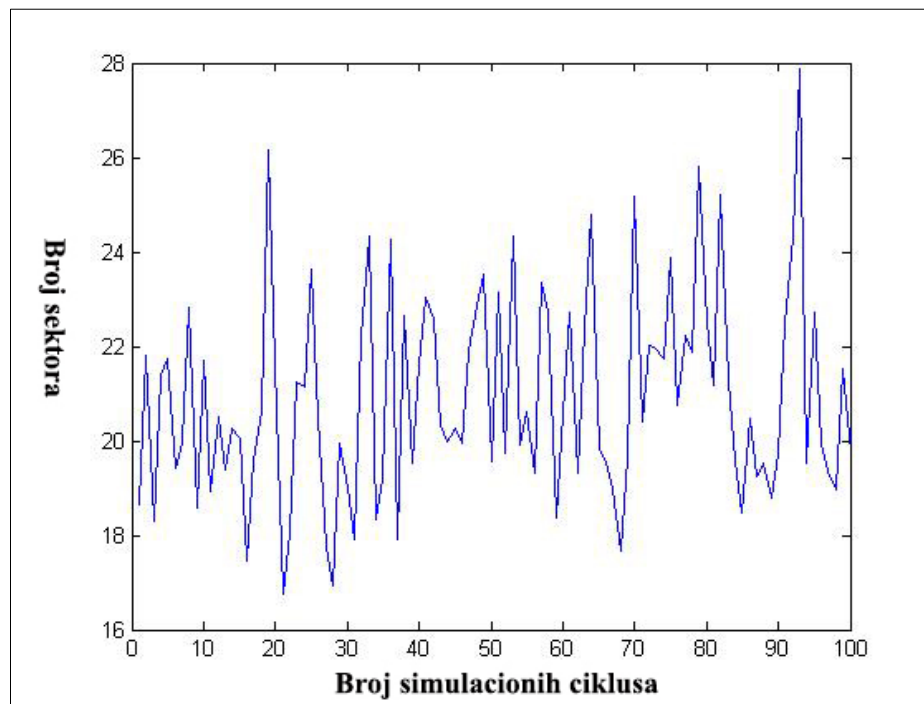
Tokom trajanja utakmice pretpostavljeno je da korisnici u vrlo malom broju koriste telekomunikacione servise i zbog toga nije sprovedena analiza za periode trajanja utakmica. Sprovede su analize izvršene za isti broj korisnika kao i u prethodno prikazanoj analizi (od 100 do 125,000) zbog uniformnosti i uporedivosti rezultata, iako se efektivni kapacitet sale kreće do 10,000 korisnika. Usrednjavanje je izvršeno za 50 simulacija u 100 simulacionih ciklusa.

Na Sl.5.1.1 prikazan je broj potrebnih sektora za slučaj 10,000 posetilaca u slučaju kada je aktiviran *handover*, kapacitet određuje u skladu sa *Erlang C* jednačinom i raspodela trajanja PS servisa prati *Gauss*-ovu raspodelu.



*Slika 5.1.1 – Potreban broj sektora za košarkašku salu, za 10,000 posetilaca, za upotrebu PS servisa u skladu sa Gauss-ovom raspodelom, Tab.2.4.1.*

Na Sl.5.1.2 prikazan je potreban broj sektora, dobijen simulacijom, u slučaju kada korisnici u košarkaškoj sali koriste servise u skladu sa uniformnom raspodelom, Tab.2.4.1.



*Slika 5.1.2 – Potreban broj sektora za košarkašku salu, za 10,000 posetilaca, za upotrebu PS servisa u skladu sa uniformnom raspodelom, Tab.2.4.1.*

Kao što je primećeno i u okviru prethodne analize, skupovi velike dinamike, posebno u slučajevima kada korisnici koriste servise istovremeno, predstavljaju najkritičniju grupu skupova. U datom slučaju, raspodela vremena korišćenja servisa u skladu sa *Gauss*-ovom raspodelom je nešto kritičnije jer posetioci praktično svih 120 sekundi pauze aktivno koriste telekomunikacione servise dok pri uniformnoj raspodeli ovo vreme nešto kraće.

Drugi primenjeni saobraćajni profil za korisnike odnosi se na 10-ominutnu pauzu u poluvremenu kada posetioci provode više vremena u upotrebi telekomunikacionih servisa (govorni pozivi i praćenje drugih skupova), Tab.5.1.1. Ovaj model se zasniva na BHSA između 0.1 i 0.3 za sesije prenosa podataka ali uz znatnu dužu upotrebu servisa. Odnos između *downlink*-a i *uplink*-a za PS servise je 4.5:1. Za CS servise (pozive i CS prenos podataka) BHCA u opsegu od 0.5 do 0.6 je usvojen.

Tabela 5.1.1 – Saobraćajni profil korisnika na košarkaškoj utakmici tokom poluvremena.

RAB	QoS klasa	DL/UL	DL/UL podela	RB podela	BHCA	Ukupno trajanje RAB-a [s]	Trajanje RAB-a [s]	Protok po bearer-u [kb/s]	Aktivnost korisnika	Ukupno mErl/Korisnik	mErl/Korisnik	b/s/Korisnik	Verovatnoća blokade [%]	
													50%	60%
													opterećenje ćelije	
Govor (CS)	Konverzionici	DL	1	-	0.6	147	147	12.2	0.67	24.5	24.50	200.263	0.06	0.01
		UL	1	-	0.6		147	12.2	0.67		24.50	200.263		
CS prenos podataka	Konverzionici/ Streaming	DL	1	-	0.05	230.	230.4	64	1	3.2	3.20	204.8	0.82	0.17
		UL	1	-	0.05	4	230.4	64	1		3.20	204.8		
PS 64/64	Best Effort	DL	0.83	0.1	0.1	18	14.94	64	0.8	0.5	0.42	21.248	0.51	0.11
		UL	0.17	0.1	0.1		3.06	64	0.6		0.09	3.264		
PS 64/128	Best Effort	DL	0.83	0.1	0.1	36	29.88	128	0.8	1	0.83	84.992	0.16	0.03
		UL	0.17	0.1	0.1		6.12	64	0.6		0.17	6.528		

<i>RAB</i>	<i>QoS klasa</i>	<i>DL/UL</i>	<i>DL/UL podela</i>	<i>RB podela</i>	<i>BHCA</i>	<i>Ukupno trajanje RAB-a [s]</i>	<i>TrajanjeRAB-a [s]</i>	<i>Protok po bearer-u [kb/s]</i>	<i>Aktivnost korisnika</i>	<i>Ukupno mErl/Korisnik</i>	<i>mErl/Korisnik</i>	<i>b/s/Korisnik</i>	<i>Verovatnoća blokade [%]</i>	
													<i>50%</i>	<i>60%</i>
													<i>opterećenje ćelije</i>	
PS 64/384	Best Effort	DL	0.83	0.1	0.1	61.2	50.796	384	0.8	1.7	1.41	433.4592	0.31	0.07
		UL	0.17	0.3	0.1		10.404	64	0.6		0.29	11.0976		
HSDPA/64	Best Effort	DL	0.83		0.3	14.4	11.952	3600	0.8	1.2	1.00	2868.48	1.94	0.41
		UL	0.17	0.15	0.3		2.448	64	0.6		0.20	7.8336		
HSDPA/384	Best Effort	DL	0.83		0.3	14.4	11.952	3600	0.8	1.2	1.00	2868.48	0.24	0.05
		UL	0.17	0.3	0.3		2.448	384	0.6		0.20	47.0016		
PS 384	Streaming	DL	0.95	0.7	0.1	417.	396.72	384	0.95	11.6	11.02	4020.096	1.71	0.36
		UL	0.05	0.05	0.1	6	20.88	64	0.35		0.58	12.992		

#### **5.1.4 SAOBRAĆAJNI PROFIL ZA SKUPOVE KOJI NISU SPORTSKI**

Treća vrsta skupova u Olimpijskom parku su skupovi koji nisu sportske prirode. Ovakvi skupovi održavaju se u objektu namenjenom konferencijama (za novine i elektronske medije), oblasti namenjenoj okupljanju posetilaca Olimpijskog parka (*Common Domain*) i na sportskim skupovima ali u satu koji prethodi početku skupa. Korisnici u ovakvim prilikama koriste skup raznorodnih servisa:

- servis prenosa govora – Prenos govora predstavlja osnovni servis. Realna je pretpostavka da će korisnici na otvorenom (npr. u oblasti namenjenoj okupljanju korisnika) da koriste više ovu vrstu servisa od korisnika u sportskim objektima koji prate skupove, zbog toga što će koristiti priliku da dogovore susrete sa porodicom i prijateljima u parku kao i da bi „popunili“ vreme između skupova. Takođe, spoljna sredina je znatno pogodnija za razgovore zbog niže buke u odnosu na skupove u objektima u parku kao i zbog toga što telefonski pozivi neće ometati skup;
- prenos podataka komutacijom kola – Servis prenosa podataka primenom komutacije kola angažuje protok od 64kb/s na *downlink*-u i *uplink*-u. Pretpostavka je da korisnici ovu vrstu servisa koriste za video-pozive i za kratki *streaming* video-materijala. Zbog velikih informacionih ekrana namenjenih praćenju raznih sportskih skupova koji se održavaju istovremeno, realno je očekivati da se ovaj servis malo koristi, što je generalno slučaj i pri svakodnevnom korišćenju mreže od servisa korisnika;
- Prenos podataka paketskom komutacijom – Pretpostavka je da korisnici koriste PS servise za proveru svoje elektronske pošte, pretraživanje Interneta u vremenu između skupova ili pri napuštanju Olimpijskog parka. Više *bearer*-a za PS servise je definisano, počev od PS 64/64 do PS 384/64. Očekivanje je da se ovakav servis koristi kao *best effort* pri pretraživanju Interneta i za *streaming*;
- prenos paketskih podataka velikim protocima (HSxPA) – Očekuje se da većina korisnika koristi pametne uređaje (*smart* telefone) koji imaju

mogućnost prenosa podataka velikim protocima na *downlink-u* i *uplink-u* (HSDPA/HSUPA). Dominantni servisi su pristup Internetu i *streaming*.

Na osnovu kombinacije servisa korisnicima koji ne prisustvuju sportskom skupu a nalaze se u Olimpijskom parku, definisan je saobraćajni profil prikazan u Tab.5.1.2. Predviđeno je da svi PS servisi budu *back-up*-ovani sa PS 64/64 servisom dok HSDPA/HSUPA se *back-up*-uje sa HSDPA/R99 servisima.



Tabela 5.1.2 – Saobraćajni profil korisnika u Olimpijskom parku koji ne prisustvuje sportskom događaju.

<i>RAB</i>	<i>QoS klasa</i>	<i>DL/UL</i>	<i>DL/UL podela</i>	<i>RB podela</i>	<i>BHCA</i>	<i>Ukupno trajanje RAB-a [s]</i>	<i>Trajanje RAB-a [s]</i>	<i>Protok po bearer-u [kb/s]</i>	<i>Aktivnost korisnika</i>	<i>Ukupno mErl/Korisnik</i>	<i>mErl/Korisnik</i>	<i>b/s/Korisnik</i>
Govor (CS)	Konverzionici	DL	1	-	0.6	156.6	156.6	12.2	0.67	26.1	26.10	213.3414
		UL	1	-	0.6		156.6	12.2	0.67		26.10	213.3414
CS prenos podataka	Konverzionici/ Streaming	DL	1	-	0.05	257.04	257.04	64	1	3.57	3.57	228.48
		UL	1	-	0.05		257.04	64	1		3.57	228.48
PS 64/64	Best Effort	DL	0.58	0.1	0.1	43.2	25.056	64	0.8	1.2	0.70	35.6352
		UL	0.42	0.1	0.1		18.144	64	0.6		0.50	19.3536
PS 64/128	Best Effort	DL	0.5	0.1	0.1	36	18	128	0.8	1	0.50	51.2
		UL	0.5	0.1	0.1		18	64	0.6		0.50	19.2

<i>RAB</i>	<i>QoS klasa</i>	<i>DL/UL</i>	<i>DL/UL podela</i>	<i>RB podela</i>	<i>BHCA</i>	<i>Ukupno trajanje RAB-a [s]</i>	<i>Trajanje RAB-a [s]</i>	<i>Protok po bearer-u [kb/s]</i>	<i>Aktivnost korisnika</i>	<i>Ukupno mEr/Korisnik</i>	<i>mEr/Korisnik</i>	<i>b/s/Korisnik</i>
PS 64/384	Best Effort	DL	0.59	0.1	0.1	61.2	36.108	384	0.8	1.7	1.00	308.1216
		UL	0.41	0.3	0.1		25.092	64	0.6		0.70	26.7648
HSDPA/64	Best Effort	DL	0.68		0.3	26.4	17.952	3600	0.8	2.2	1.50	4308.48
		UL	0.32	0.15	0.3		8.448	64	0.6		0.70	27.0336
HSDPA/384	Best Effort	DL	0.83		0.3	44.4	36.852	3600	0.8	3.7	3.07	8844.48
		UL	0.17	0.3	0.3		7.548	384	0.6		0.63	144.9216

## **6. PONAŠANJE KORISNIKA I KRETANJE GRUPE**

### **6.1 TEORIJA KRETANJA PEŠAKA**

Pešačenje se može smatrati najprirodnijim načinom kretanja, međutim, može se smatrati i najkomplikovanim za analizu, u poređenju sa slučajevima kada se za kretanje koriste različita prevozna sredstva. Razlog za to je činjenica da sam proces pešačenja nije obavezno povezan sa postojećom infrastrukturom, kao što je to slučaj sa raznim prevoznim sredstvima gde se odgovarajućim znacima ili infrastrukturom može uticati na pravac kretanja ljudi. Zapravo, u slučaju pešačenja, vrlo heterogena infrastruktura (objekti/zgrade, prelazi, trgovci, tržni centri, restorani, informacijski pultovi itd.) može imati uticaj na konačne odluke osoba koje se kreću. Zbog toga je ponašanje pešaka moguće podeliti u više radnji uslovljenih izborom samih pešaka. Ovi izbori su često korelisani a neki nisu ni specifični za proces pešačenja, međutim, jednostavnije se analiziraju u slučaju kada se posmatraju kao nezavisni procesi.

Kretanje posetilaca velikih skupova može se posmatrati u više segmenata (skupova procesa). Ovi segmenti analize uključuju različite periode i različite lokacije korisnika. Podela kretanja posetilaca velikih skupova može se analizirati u dva segmenta.

Prvi segment predstavljaju periodi dolaska i odlaska na veliki skup. Prilikom analize dolaska posetilaca na skup potrebno je analizirati kretanje posetilaca. To uključuje analizu transportnog sistema u okolini lokacije održavanja velikog skupa kao što su vrste transportnih sredstava (voz, metro, autobus, lični automobili), njihov kapacitet u smislu transporta, periodičnost i redovnost transporta i ruta kretanja u blizini lokacije velikog skupa (stanice, parking prostor, prilaz ulazima mestu održavanja skupa i sl.).

Drugi segment predstavlja boravak na skupu. U toku boravka na skupu, posetioци mogu biti praktično statični i posmatrati dešavanja na skupu. Takođe, u zavisnosti od lokacije na kojoj se skup održava, kao i broja skupova koji se održavaju na lokaciji, posetioци se mogu kretati od skupa do skupa. Tada je njihovo kretanje dominantno u grupi, uz slično ponašanje članova grupe (posetilaca) koje zbog brojnosti posetilaca ima veliki uticaj na stanje skupa.

Primer detaljnije podele procesa vezanih za kretanje pešaka prikazan je u [39] gde su procesi, između ostalih, razvrstani i na sledeće:

- izbor aktivnosti koja dovodi do putovanja, odnosno do kretanja. Ova odluka može biti “strateškog” nivoa u smislu odluke da se obavi kretanje ali i mikro nivoa da se odabere odgovarajuća putanja u mikro okruženju. Očigledno je “strateški” nivo odluke za velike skupove povezan za samu odluku da se određenom skupu prisustvuje. U slučaju Olimpijskih igara ova odluka se donosi ranije (zbog nabavke ulaznica) a samo kretanje Olimpijskim parkom je određeno prostornom i vremenskom organizacijom skupova, i interesovanjem posetilaca;
- izbor odredišta na koje se putuje, koji često određuje i prevozno sredstvo kretanja. Za “strateški” nivo odluke o putovanju ovaj nivo analize odnosi na izbor odgovarajućeg transportnog sredstva i vremena dolaska na skup. U slučaju Olimpijskih igara ovaj nivo se odnosi na izbor voza, metroa, autobusa ili sopstvenog automobila kao prevoznog sredstva, vremena dolaska na izabrani skup kao i ulaza u Olimpijski park koji se koristi za ulazak. Jasno je da se unutar samog parka posetioци mogu kretati isključivo peške (izuzev posebnih kategorija kakve su posetioци sa posebnim potrebama ili deca);
- izbor načina kretanja gde je pešačenje jedna od opcija. Pored ove odluke, može se izdvojiti i odluka o izboru kretanja uz stepenice, pokretne stepenice, ili liftom. U slučaju Olimpijskih igara pešačenje u Olimpijskom parku je praktično jedina opcija za veliku većinu posetilaca. Za skupove u objektima postoji dilema da li se posetioци odlučuju za stepenice, liftove ili pokretne stepenice pri dolasku i odlasku sa skupa, dok se još nalaze u objektu;

- izbor rute kretanja koja je određena atraktivnošću sadržaja uz putanju. Primeri izbora putanje kretanja obrađeni su u brojnoj literaturi. Na primer, u [40], jednom od prvih radova na ovu temu, analiziraju se potrebni sadržaji na putanji kretanja korisnika kako bi se posetioci tržnih centara usmeravali pri kretanju. Niz radova bavi se kombinovanjem tehnika predikcije ponašanja pešaka na osnovu više različitih parametara koji se posmatraju kao međusobno korelisani. Jasno je da je raspored informacionih pultova, ekrana za praćenje sportskih događaja (skupova), postavljanje sadržaja za zabavu ključno pri usmeravanju posetilaca Olimpijskog parka. Drugi skup bitnih faktora čine raspored objekata unutar Olimpijskog parka kao i satnica održavanja skupova;
- utvrđivanje brzine kretanja pešaka koja se razlikuje od raspoloženja pešaka, pola i starosti, kao i od broja pešaka na putanji (gustine). Brzine kretanja pešaka su u velikoj većini slučajeva određene empirijski za različite kategorije pešaka. U slučaju Olimpijskih igara, brzina kretanja posetilaca parka mogu varirati u zavisnosti da li posetioci čekaju početak sledećeg skupa i imaju dovoljno vremena za šetnju po parku, da li posećuju isključivo jedan skup i da li procenjuju da stižu kao što je planirano ili ne;
- utvrđivanje interakcije između pešaka. Interakcija između članova grupe je ključna sa stanovišta ponašanja grupe koja sledi vođu (*leader–follower* odnos) i bira odgovarajuću putanju a analizirane su i osobine pešaka koje vode spontanom formiranju grupe koja se kreće istom putanjom [41]. Takođe, značajan broj radova se bavi i analizom uticaja sredine na ponašanje pešaka. Problem pri analizi interakcije između članova grupe jeste što su praktična merenja nemoguća i predstavljaju uglavnom predikciju izbora. Parametri koji se mogu izdvojiti su blizina osobe u grupi koja se određuje za vođu kao i brzina kretanja grupe koju vođa određuje. U slučaju velikih skupova, kakve su Olimpijske igre, treba imati u vidu da članovi osoblja (počev od redara pa do najviših organizacionih pozicija) su prisutni na skupovima, uniformisani su (jasno se izdvajaju u grupi) pa kao takvi autoritativno mogu predstavljati vođe grupa i usmeravati ih odgovarajućom brzinom i izabranim putanjama.

Teorija analize kretanja pešaka i grupa imaju svoje poreklo u projektovanju transportnih sistema i infrastrukture. Kao takva nije ranije direktno primenjena u analizi ponašanja korisnika telekomunikacionih usluga i njihovom brojanju u svakodnevnom radu mreža. Ovo je posebno primetno pri inicijalnoj izgradnji makro mreža kada se ovakvi (mikro) podaci o ponašanju i kretanju pešaka i, generalno, populacije, zanemaruju. Sa druge strane, u slučaju specijalnih skupova, kada se uočava veliki broj posetilaca na relativno malom prostoru, analiza kretanja pojedinaca i grupe su od izuzetnog značaja u određivanju potrebnog kapaciteta telekomunikacionih sistema. Ova analiza sprovodi se ne samo za ukupan broj korisnika već i za trenutne vrednosti ili za promenu broja korisnika u kraćim vremenskim intervalima (npr. 15, 30 ili 60 minuta).

## **6.2 MODELOVANJE KRETANJA GRUPE I POJEDINACA**

Postojeća istraživanja ponašanja grupa i pojedinaca motivisana su:

- zahtevima bezbednosti ljudi, što za posledicu ima prevashodno analizu brzine i ponašanja grupe prilikom evakuacije;
- ekonomskim faktorima, što za posledicu ima prevashodno analizu pojedinca u kupovini ili kretanju u okolini tržnih centara; kao i
- infrastrukturnim pitanjima, kada se analiza obavlja na makro nivou, za velike prostore (delove grada).

Takve analize su u velikoj većini bazirane na matematičkim modelima kretanja fluida i gasova, i polaze od zakona održanja mase, momenta i energije [42]. Dalja modifikacija osnovne teorije vrši se za konkretne primene u analizi saobraćaja i kretanja pešaka i grupe u makro sredinama [43].

Modeli koji se zasnivaju za teoriji kretanja fluida i gasova odnose se na makro sredine pa se mogu klasifikovati kao globalni ili makro modeli. U široj literaturi postoje primeri primene makro modela u cilju analize ponašanja grupa posetilaca raznih skupova, pre svega, prilikom evakuacije, ali generalno ovi modeli se ne bave interakcijom na nivou pojedinačnog posetioca. Modeli koji se bave pojedinačnim posetiocem skupa i njegovom interakcijom sa ostalim posetiocima mogu se klasifikovati

kao mikro modeli.

Bez obzira na vrstu modela, osnovnu karakteristiku modela čini fundamentalni dijagram koji predstavlja vezu između gustine grupe (saobraćaja), brzine kretanja grupe (saobraćaja) i protoka (fluksa). Fundamentalni dijagram definiše zavisnost fluksa od saobraćajnih uslova. Niz modela je poznato u literaturi kao što su: *Lighthill-Whitham-Richards-ov* (LWR) model [44,45], koji se primenjuje kao osnovni teorijski model, *Greenshields-ov* [42,46], *Greenberg-ov* model [47], kao i razni generalizovani modeli zasnovani na navedenim.

Kao najčešći i najpoznatiji model ponašanja saobraćaja i grupe koristi se LWR model, sa odgovarajućim modifikacijama koje omogućavaju analizu u dvodimenzionalnom prostoru i za pešake (grupe) a ne samo za saobraćaj.

Jednodimenzioni LWR model pretpostavlja da je fluks  $f$ , jednak

$$f = \rho \times v, \quad (6.2.1)$$

gde je  $\rho$  gustine saobraćaja (grupe)  $v$  brzina, a sam model jednak je

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} f(t, x) = 0. \quad (6.2.2)$$

*Greenshields-ov* model pretpostavlja linearnu zavisnost brzine od gustine grupe,

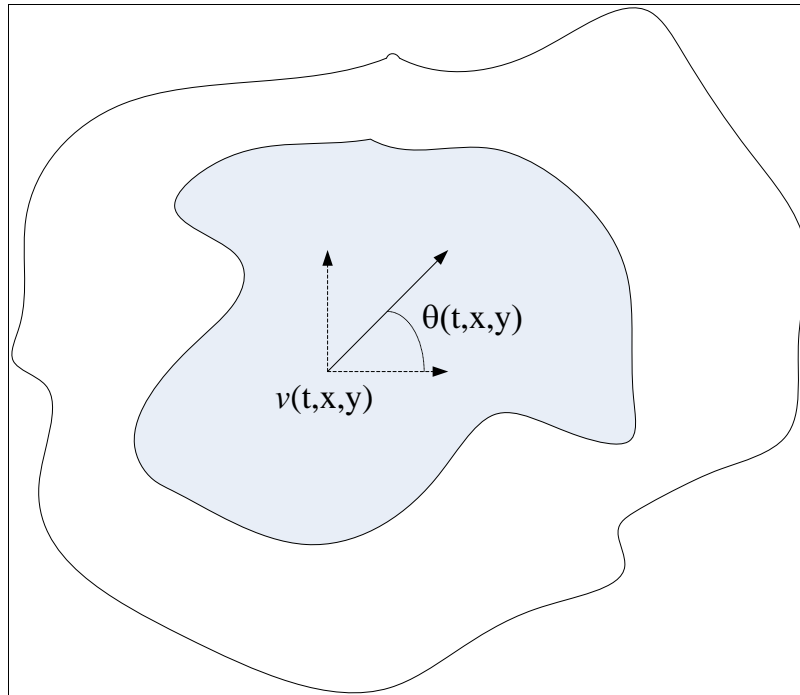
$$v(\rho) = v_f \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right), \quad (6.2.3)$$

gde je  $v_f$  brzina pri minimalnom saobraćaju (tzv. slobodna brzina kada nema drugog saobraćaja) i  $\rho_m$  maksimalna gustina saobraćaja (grupe) kada nastupa zagušenje, odnosno kada brzina postaje 0.

LWR model za modelovanje dvodimenzionalnog ponašanja, sa uvrštenim *Greenshields-ovim* modelom zavisnosti brzine grupe od gustine grupe jednak je, [42],

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial x} v_f \cos \theta \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right) \rho + \frac{\partial}{\partial y} v_f \sin \theta \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right) \rho = 0 \quad (6.2.4)$$

gde  $\theta(t,x,y)$  predstavlja veličinu koja određuje pravac kretanja grupe i pojedinaca, i zavisi od vremena i koordinata u 2D prostoru, Sl.6.2.1. Takođe, slobodna brzina  $v(t,x,y)$  zavisi od koordinata u 2D prostoru omogućavajući tako sa uglom  $\theta(t,x,y)$  modelovanje kretanje grupe u različitim prostorima, pa čak i zatvorenim. Na ovaj način omogućeno je modelovanje kretanja grupe na otvorenom, po stazama, ali i u objektima, znajući njihovu arhitekturu (školski hodnici, galerije, stadioni itd.).



*Slika 6.2.1 – Kretanje grupe i pojedinca u 2D prostoru [42].*

Dati LWR model može se napisati u sledećoj formi [42],

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(t, x, y) + \nabla q(t, x, y) = 0, \quad (6.2.5)$$

gde je  $q(t,x,y)$

$$q = v_f \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right) \rho \begin{vmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{vmatrix}. \quad (6.2.6)$$

U ovom modelu određene su dve sopstvene vrednosti koje su uočljive kada se model predstavi u kvazi-linearnoj formi,



$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial x} \left[ v_f \cos \theta \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right) \rho_x \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ v_f \sin \theta \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right) \rho_y \right] = 0. \quad (6.2.7)$$

Sopstvene vrednosti su [42],

$$\lambda_1 = \frac{\partial}{\partial x} \left[ v_f \cos \theta \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right) \rho \right] = v_f \cos \theta \left( 1 - \frac{2\rho}{\rho_m} \right) \quad (6.2.8)$$

i

$$\lambda_1 = \frac{\partial}{\partial y} \left[ v_f \sin \theta \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right) \rho \right] = v_f \sin \theta \left( 1 - \frac{2\rho}{\rho_m} \right). \quad (6.2.9)$$

### **6.3 KATEGORIZACIJA I PARAMETRIZACIJA GRUPE**

Osnovni problem u analizi ponašanja pojedinaca i grupa jeste u specifičnosti primenjenih analiza i rezultata koji su komplikovani za širu primenu izvan naučne i stručne sredine koja je kreirala određeni model. Osnovni razlog ograničenog transfera znanja leži u značajnoj subjektivnosti vrednosti parametara razvijenog modela. Pokušaj da se izvrši objektivna podela vrsta grupa i parametrizacija modela analize ponašanja grupe izvršena je u [48]. Utvrđeno je 6 osnovnih vrsta grupa na osnovu 3 parametra:

- grupe u objektu ili na otvorenom;
- spore ili brze grupe;
- stagnirajuće ili ritmične grupe.

Klasifikacija grupe može se izvršiti relativno objektivno na osnovu sledećih osobina:

- fizičke granice skupa. Skup koji se održava u objektu ograničen je samim objektom i eventualno odgovarajućim prostorom ispred objekta koji se nalazi do kapija sa kontrolom pristupa. Ovaj prostor je ujedno i prostor (zajedno sa objektom) koji se opslužuje jednim distribuiranim antenskim sistemom. U slučaju skupova na otvorenom to je površina prostora na kom se skup održava (ako je jedan koncert u pitanju) a ako je više koncerata u pitanju, bez

međusobnih ograda onda fizičke granice i ne postoje. Konačno, moguće je skup okarakterisati i kao skup kod koga postojanje fizičkih granica nije bitno za karakterizaciju grupe;

- psihološke granice skupa. Psihološke granice postoje u slučaju kada postoje razlozi koji pojedinca ograničavaju u pristupanju grupi. Takav je primer navijačkih grupa suprotstavljenih timova. Navijači suparničkog tima ne ulaze u grupu navijača protivničkog tima. U slučaju da ovakvih ograničenja nema, tada nema ni psiholoških granica. Ovo je primer navijača pri pojedinačnim takmičenjima ali i timskih takmičenja u slučaju sportova poput plivanja, skokova u vodu ili hokeja na travi. Kao i u slučaju fizičkih granica, postoji i situacija kada psihološke granice nisu bitne za karakterizaciju grupe;
- kretanje u slučaju kada se pojedinci kreću na osnovu spoljnih uticaja, stoje ili kada njihovo kretanje nije važno za grupu, odnosno za karakterizaciju grupe;
- gustina grupe koja može biti mala, srednja ili velika i koja povezuje broj članova grupe sa površinom koju grupa zauzima. Ako gustina nije bitna za karakterizaciju grupe tada se može usvojiti da ovaj parametar nije relevantan. Na velikim skupovima gustina grupe je uobičajno velika na samom skupu dok grupe koje na putu do ciljnog objekta prolaze pored drugih objekata mogu imati i malu gustinu;
- rast grupe koji može biti mali, srednji ili veliki i opisuje sklonost grupe da sa vremenom raste. Ako rast grupe nije bitan za njenu karakterizaciju može se i zanemariti. Rast grupe na velikim skupovima je veliki ali isto tako se grupa i vrlo brzo razilazi po završetku skupa;
- odredište koje može biti blizu ili daleko. Ovo je cilj ka kom se grupa kreće. Može se desiti da odredište kretanja grupe nije važno pa se tada ovaj parametar može zanemariti. U slučaju specijalnih skupova u jednom objektu jasno je da je sam objekat odredište grupe. U slučaju grupe objekata, kakvi postoje u Olimpijskom parku, svaki objekat pojedinačno je odredište;

- Životni vek ili trajanje grupe odnosi se na vreme proteklo do rasturanja grupe. Ovo vreme može biti kratko, srednje ili dugo. Takođe, može se desiti da vreme do rasturanja grupe nije bitno za analizu.

Ponašanje korisnika na velikim skupovima analizirani su u literaturi za pojedinačne skupove. Kao najinteresantiji skupovi analizirani su skupovi na fudbalskim stadionima (pojedinačne ligaške utakmice) i to prevashodno sa stanovišta evakuacije i bezbednosti posetilaca skupa.

Iskustva posmatranja korisnika koji posećuju skup na stadionu *Club Atletico River Plate*-a u Buenos Airesu (kapacitet 66,000 posetilaca) pokazuje da bezbednosne kontrole stvaraju gužve koje dovode do gustine od 3 posetioca po m<sup>2</sup>. Najveće gužve stvaraju se 30 minuta pre početka utakmice, [49].

Analiza evakuacije posetilaca ESPRIT Arene u Dizeldorfu, kapaciteta 55,000 posetilaca, pokazuje da je brzina posetilaca u vanrednim situacijama do 2.5km/h na stepenicama, između spratova, dok na ravnim delovima iznosi do 5.4km/h. Svaka vrsta vrata određuje kapacitet i predstavlja potencijalno „usko grlo“. Analiza ukazuje da je za potpunu analizu svih posetilaca Arene potrebno između 18 i 25 minuta, [50].

U slučaju kada se grupa kreće, primećeno je da članovi grupe teže da održe „privatni“ (slobodni) prostor oko sebe, udaljavajući se od prepreka i drugih članova grupe [51]. Utvrđeno je za male brzine kretanja da pri polovljenju rastojanja koje predstavlja „privatno“ rastojanje, član grupe pokušava da promeni pravac kretanja ili da na neki drugi način zaobiđe prepreku ili drugog člana grupe, čime narušava svoju brzinu kretanja. Isto tako, pri većim brzinama kretanja i većim grupama, članovi grupe počinju da se ponašaju matematički neodređeno, sa dosta slučajnosti u ponašanju, zbog čega je *fuzzy* logika jedno od mogućih rešenja modelovanja korisnika u ovakvim situacijama. U ovom slučaju rastojanja su manja od polovine rastojanja koje čini „privatni“ prostor člana grupe.

Vreme do rasturanja grupe na muzičkom koncertu [48], kao primeru skupa na otvorenom, određeno je zvonastom krivom, definisanom izrazom

$$V(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (6.3.1)$$

gde je  $V$  verovatnoća pojavljivanja člana grupe u grupi, odnosno grupe,  $x$  je koordinata (vremenska ili prostorna),  $\mu$  koordinata (vremenska ili prostorna) kada funkcija (verovatnoća) ostvaruje vrednost 1 i  $\sigma$  varijansa. Ista kriva može da posluži kao model i verovatnoće postojanja pojedinca ili grupe na lokaciji koordinate  $x$  ali i za definisanje postojanja pojedinca ili grupe u određenom vremenskom intervalu.

## **7. KATEGORIZACIJA SKUPA**

Ponašanje korisnika u svakoj telekomunikacionoj mreži predstavlja osnov za planiranje potrebnog kapaciteta. Planiranje radio-pristupne mreže na velikim skupovima posebno je interesantno imajući u vidu veliki broj korisnika na relativno malom prostoru i uticaj njihovog ponašanja. Procena ponašanja korisnika na velikim skupovima ima značaj zbog velikog broja korisnika jer tada mala odstupanja u predikciji saobraćajnog profila korisnika imaju veliki uticaj na ukupni kapacitet radio-pristupne mreže. Ponašanje korisnika na skupovima je do sada bilo predmet izučavanja u literaturi koja se bavi prevashodno evakuacijom ljudi ali ne i u smislu uticaja ponašanja i kretanja pojedinačnog korisnika ili grupe na radio-pristupnu mrežu. Analiza ponašanja korisnika posebno je interesantna u slučaju velikih skupova koji se održavaju istovremeno, na malom međusobnom rastojanju, kada ponašanje korisnika na jednom skupu može imati značajan uticaj na stanje mreže na drugom skupu i povećati rizik neočekivanog preopterećenja radio-pristupne mreže na jednom od skupova. Najbolji primer velikih skupova koji se održavaju istovremeno su Olimpijske igre i dešavanja u okviru Olimpijskog parka. Kao primer za predstavljanje analize i rezultata analize iskorišćene su Olimpijske igre održane u Londonu 2012. godine.

Kako bi se procenio potencijalni rizik povezan sa kretanjem korisnika u grupi (tzv. kretanje grupe) i aktivnošću korisnika tokom boravka u Olimpijskom parku, svaki objekat unutar Olimpijskog parka je analiziran na osnovu nekoliko kriterijuma:

- vrste događaja;
- pozicije objekta u Olimpijskom parku;
- rastojanja između objekata u Olimpijskom parku i rastojanja između najpopularnijih lokacija unutar Olimpijskog parka.

## **7.1 FUNKCIJA KATEGORIZACIJE SKUPOVA**

Tri vrste velikih skupova se održavaju u Olimpijskom parku. Dve vrste skupova su utvrđene i definisane na osnovu dinamike skupa, a zatim je za svaku vrstu definisan odgovarajući saobraćajni model imajući u vidu, pored vrste skupa, koliko je i trajanje skupa, kakve pauze postoje u toku trajanja sportskih događaja itd.. Dve vrste skupova uočene u Olimpijskom parku su:

- skupovi velike dinamike. Skupovi ove vrste su košarkaške, fudbalske i odbojkaške utakmice i ostali sportski događaji koji uključuju gledaoce čija je pažnja konstantno usmerena na tok utakmice i koji aktivno učestvuju u navijanju. Ovi skupovi su karakteristični po tome što se telekomunikacioni servisi malo koriste tokom samih utakmica i sa povećanim korišćenjem telekomunikacionih servisa tokom pauza između četvrtina ili tokom poluvremena (u pauzama utakmica). Na osnovu vrste događaja, razvijen je saobraćajni model za događanja u sali namenjenoj košarkaškim utakmicama, rukometnoj sali, na stadionu za hokej na travi i za Olimpijski stadion kada se na njemu odigravaju fudbalske utakmice. Istim model se može primeniti i u slučaju vaterpolo utakmica. Svaki saobraćajni model uzima u obzir dužinu trajanja pauza tokom i između sportskih događaja i podrazumeva da će korisnici intenzivno koristiti servise tokom najduže pauze. Ovi skupovi su ocenjeni kao manje kompleksni i njihova kompleksnost je ocenjena težinskim faktorom jednakim 1;
- skupovi male dinamike. Skupovi male dinamike su atletska takmičenja, događanja na Velodromu i u Centru za vodene sportove. Za ove skupove je karakteristično da gledaoci ne učestvuju aktivno u navijanju i da tokom samog događaja postoji značajan broj perioda kada nema aktivnosti učesnika. Zbog toga je očekivano da gledaoci (korisnici) koriste svoje telefone, odnosno uređaje, duži vremenski period kako bi pratili najzanimljivija zbivanja sa drugih sportskih događaja ili da pretražuju Internet kako bi videli aktuelne rezultate na drugim skupovima koji se održavaju istovremeno ili su se prethodno održali. Ovo ponašanje korisnika čini ovu vrstu skupova zahtevnijim po pitanju ukupnog kapaciteta koji treba

obezbediti. Ovi skupovi su ocenjeni kao složeniji skupovi i njihov faktor kompleksnosti je postavljen na vrednost 2.

Treba imati u vidu da skupovi velike dinamike mogu vrlo lako da se transformišu u skupove male dinamike ukoliko događaji (utakmice) koje se posmatraju nisu interesantne. Takve promene se najčešće dešavaju tokom kvalifikacija kada se susreću ekipe nejednakog kvaliteta i tada se radio-pristupne mreže operatora nalaze pod većim opterećenjem. Iako je pažnja zvaničnika i javnosti usmerena na dane kada se održavaju finalna takmičenja i borbe za medalje, ti dani, zbog svoje dinamike i činjenice da se održava praktično jedno takmičenje u datom trenutku, nisu kritični dani po pitanju opterećenja radio-pristupne mreže i upotrebe telekomunikacionih servisa. Dani kada se održavaju kvalifikaciona takmičenja su znatno zahtevniji od dana kada se odigravaju finalna takmičenja.

Za Međunarodni novinarski centar (IBC/MPC) i druge objekte koji nemaju sportsku namenu, korišćen je treći, „regularan“, saobraćajni model. U pitanju je sličan model modelu koji mobilni operator koristi za svoju spoljnu (*outdoor*) makro radio-pristupnu mrežu. Zbog toga je i analiza u slučaju trećeg saobraćajnog modela ista kao i u slučaju makro mreže operatora. Za ove nesportske objekte i za zajedničke prostore u Olimpijskom parku, razvijen je poseban model. Korisnici u ovim objektima imaju prilike da prate sportske događaje na velikim ekranima namenjenim za emitovanje različitih sportskih događaja. Vreme zadržavanja u ovim objektima i zajedničkim oblastima u parku su različita od vremena zadržavanja u prethodno opisanim sportskim objektima. Ovakvi objekti nisu uključeni u prethodnu analizu razvrstavanja objekata na osnovu vrste skupova koji se održavaju jer ih posećuju predstavnici štampanih i elektronskih medija (TV i članovi novinskih redakcija) pa je teško modelovati ponašanje i kretanje ovih posetilaca Olimpijskog parka, jer je ono određeno delom rasporedom događaja u Olimpijskom parku a delom poslovnim obavezama na koje ovi korisnici ne mogu uticati.

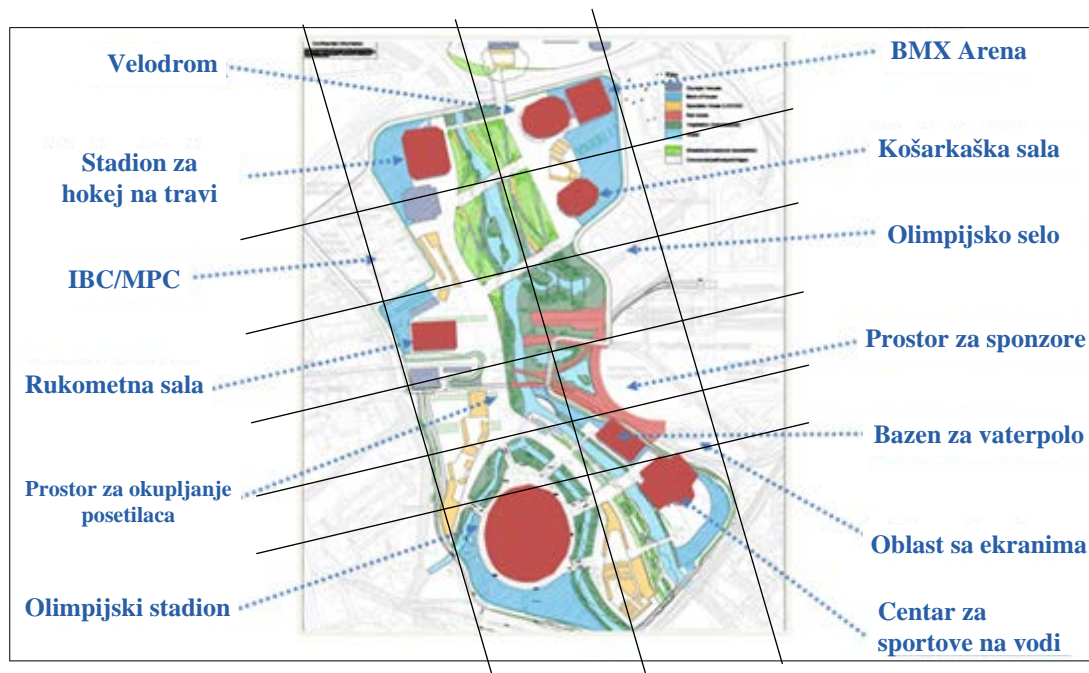
Kao što je već navedeno, položaj objekta u kom se održava skup može bitno uticati na svoje okruženje. Kada se u bliskoj okolini istovremeno ili u bliskim vremenskim intervalima održavaju drugi veliki skupovi, tada međusobni položaj objekata i kretanje korisnika mogu imati veliki uticaj na radio-pristupnu mrežu preko

koje korisnici pristupaju servisima.

Na osnovu pozicije objekta unutar Olimpijskog parka, Sl.7.1.1, sprovedena je još jedna analiza. Ova, druga, analiza bavi se pozicijom objekta u Olimpijskom parku i rastojanjem između objekata u njemu. Olimpijski park je podeljen u kvadrante gde svaki kvadrant (u idealnom slučaju) sadrži samo jedan (sportski) objekat. Takvom kvadrantu je dodeljen identifikacioni faktor 1. U slučaju kada se u okviru istog kvadranta nalazi više objekata (zbog malog rastojanja između njih), kvadrantu se dodeljuje dodatni identifikacioni faktor jednak  $1/n$  gde je  $n$  broj objekata unutar kvadranta. Svi kvadranti koji sadrže objekte, a koji dele stranicu sa posmatranim kvadrantom, dobijaju identifikacioni faktor jednak 2. Svi kvadranti koji dele teme („ćošak“) sa posmatranim kvadrantom imaju identifikacioni faktor jednak 3. Posle njih, svi kvadranti koji dele stranicu sa kvadrantima čiji je identifikacioni faktor jednak 2, imaju identifikacioni faktor jednak 4 a oni kvadranti koji dele stranicu sa kvadrantima faktora 3 imaju identifikacioni faktor jednak 5. Ova dodela identifikacionih faktora kvadrantima se nastavlja sve dok svi kvadranti ne dobiju odgovarajući identifikacioni (težinski) faktor. Ova procedura se koristi da bi se:

- identifikovali svi objekti u sklopu Olimpijskog parka u odnosu na objekat od interesa, u kom se održava skup koji je predmet analize;
- kreirali težinski faktori za konačnu karakterizaciju događaja (kategorizaciju skupa) koji su jednaki  $1/(n_1-n_2)$ , gde su  $n_1$  i  $n_2$  identifikacioni faktori kvadranta čiji se međusobni uticaj (odnosno skupova u njima) ispituje. U slučaju kada se analizira uticaj objekata unutar istog kvadranta, težinski faktor je jednak  $n$ , gde je  $n$  jednako broju objekata koji se nalaze u okviru istog, analiziranog, kvadranta. U slučaju kada se objekat nalazi u 2 kvadranta, kvadrant sa manjom vrednošću će se koristiti za potrebe dalje analize, Sl.7.1.2.





Slika 7.1.1 – Susedni kvadranti sa objektima u njima, u okviru Olimpijskog parka.

15	14	13	12	11	12	13	14	15
14	10	9	8	7	8	9	10	14
13	9	6	5	4	5	6	9	13
12	8	5	3	2	3	5	8	12
11	7	4	2	1	2	4	7	11
12	8	5	3	2	3	5	8	12
13	9	6	5	4	5	6	9	13
14	10	9	8	7	8	9	10	14
15	14	13	12	11	12	13	14	15

Slika 7.1.2 – Numeracija kvadranta za potrebe kreiranja funkcije karakterizacije skupova.

Važno je da se ograniči broj kvadranta koji se koriste u analizi jer se većina analize zasniva na srednjim vrednostima. Zbog toga će veliki broj udaljenih kvadranta

sa malim težinskim faktorima uticati na ukupnu vrednost težinske funkcije i sniziti njenu vrednost. Preporučuje se da se broj kvadranta ograniči na jednu izraženu oblast kao što je Olimpijski park, jedna klaster ili superklaster, ili na oblast sa jednim lokacijskim kodom (*Location Area Code, LAC*). Oblast uticaja može se postaviti i na osnovu maksimalnog dometa signala korisnika u posmatranom i susednim kvadrantima. Domet signala bi odredio i broj kvadranta koji u segmentu radio-interfejsa mogu uticati na posmatrani objekat. Sa druge strane, u slučaju konsolidacije resursa za obradu signala u osnovnom opsegu učestanosti, ovako određena zona, odnosno broj kvadranta možda nije dovoljan jer je moguće da veće lokacije i objekti u više kvadranta dele iste resurse namenjene obradi signala u osnovnom opsegu učestanosti. Veličina kvadranta može biti ograničena na grupu susednih NodeB-ova ili čak na jedan objekat ili lokaciju u slučaju mikro analiza (analiza u mikro mreži ili u mreži malih ćelija).

Važno je posedovati i informaciju o inicijalnom broju korisnika koji se očekuje (zasnovan na veličini objekta ili broju prodatih karata) kako bi se oblasti sa velikom koncentracijom korisnika posmatrale kao kvadranti (npr. u slučaju Olimpijskog parka, prostor za okupljanje posetilaca tzv. *Common Domain*). Za potrebe analize u Olimpijskom parku, skup kvadranta koji se analiziraju je ograničen na kvadrante koji sadrže objekte unutar Olimpijskog parka i u vrlo bliskoj okolini parka u slučaju da sadrže objekte koji su od interesa za analizu.

Treća analiza bavi se rastojanjem između objekata unutar Olimpijskog parka i prostora (oblasti) za okupljanje posetilaca (*Common Domain*) kako bi se procenilo neophodno vreme da posetioци stignu od jednog objekta do drugog ili da prođu pored drugog objekta na putu do trećeg ili do oblasti za okupljanje posetilaca, koja je ujedno i oblast sa najvećim brojem korisnika u Olimpijskom parku. U okviru ove analize vreme se računa na osnovu 2 parametra:

- vreme neophodno publici da napusti objekat (počevši od 10 minuta potrebnih publici da napusti rukometnu salu pa do 30 minuta da napusti Olimpijski stadion);

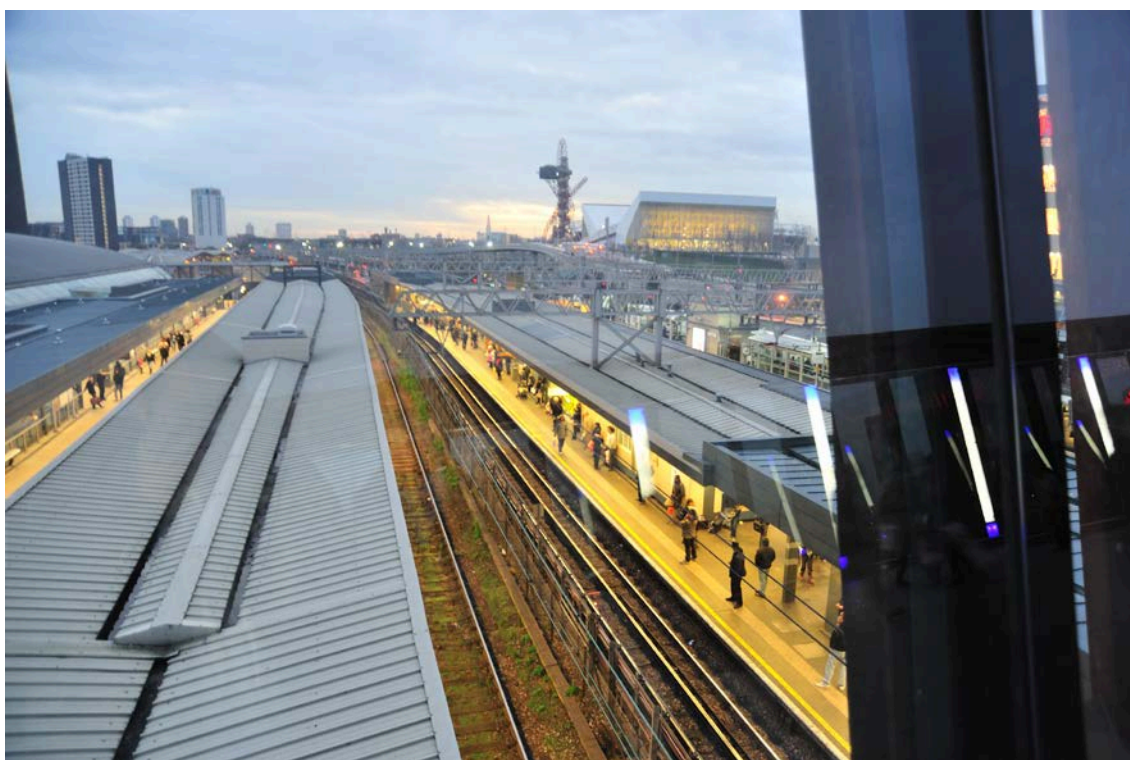
- vreme neophodno da stignu do drugog objekta koristeći pešačke staze u Olimpijskom parku (uz pretpostavku da se koriste najkraće putanje između objekata).

Rastojanje između objekata računa se na osnovu postojećih pešačkih staza i usvajajući najkraće putanje za kretanje između objekata od interesa. Ova rastojanja su prikazana u Tab.7.1.1. Ove putanje ne moraju biti optimalne ili najpopularnije. Najpopularnije putanje se određuju na osnovu dužine staze i sadržaja uz pešačke staze, kao što su informacioni ekrani, objekti za zabavu uz staze itd. Međutim, za kretanje između dva objekta putanjom koja obuhvata i treći objekat na putanji, moguće je izvršiti analizu od početnog objekta do objekta na putanji (kao ciljnog) a zatim od objekta na putanji do krajnjeg objekta. Zbir vremena, praktično, predstavlja potrebno vreme za stizanje od početnog do posmatranog, krajnjeg objekta. Realna je pretpostavka da pored svih staza postoje odgovarajući informacioni ekrani i objekti ili prostor za zabavu tako da se korisnici odlučuju za najkraći put do objekta u kom se održava događaj.

Prostor za okupljanje posetilaca je najinteresantnija oblast u okviru Olimpijskog parka. Ova oblast je otvoreni prostor na kom se nalazi nekoliko objekata koji nemaju sportsku namenu. Ovi objekti su informacioni pultovi, restorani brze hrane i objekti za zabavu posetilaca. Većina posetilaca u Olimpijskom parku, koji čekaju na početak sledećeg događaja ili koji traže određene informacije, će provesti određene vreme u oblasti za okupljanje posetilaca. Zbog toga je važno da se proceni vreme potrebno da posetilac stigne od bilo kog objekta u Olimpijskom parku do oblasti za okupljanje posetilaca i da se ova oblast tretira kao jedan objekat koji je vrlo često posećen od strane korisnika.

U Tab.7.1.2 i Tab.7.1.3 vremena (iskazana u minutima) da posetilac dođe do odabranog objekta ili do oblasti namenjene za okupljanje posetilaca, izračunata su na osnovu procenjenih vremena neophodnih za napuštanje objekta (prvi broj u zagradi) i vremena da se pređe rastojanje između objekata dato u Tab.7.1.1 i Tab.7.1.3 (drugi broj u zagradi). Vremena potrebna da se iz bilo kog objekta iz Olimpijskog parka stigne do oblasti namenjene za okupljanje korisnika, uključujući vreme za izlazak iz objekta (prvi broj u zagradi) i vremena da se hodajući stigne do oblasti (drugi broj u zagradi), prikazana su u Tab.7.1.4.

Iako (međunarodna) železnička stanica u Stratfordu i stanica podzemne železnice (metro), Sl.7.1.3, nisu deo Olimpijskog parka, železnička stanica Stratford ima veliki značaj za planiranje radio-pristupne mreže u oblasti u okolini Olimpijskog parka, [52]. Većina korisnika koristi voz ili metro stanicu. Imajući u vidu broj korisnika koji će koristiti voz ili metro (80,000 u toku dana a 60,000 iz Olimpijskog parka), može se očekivati da su vozovi i metro „usko grlo“ za odvođenje posetila iz Olimpijskog parka u centralni deo Londona i u druge gradove. Može se očekivati da će korisnici provesti 2 sata u oblasti u okolini Stratford stanice. Ovo vreme uključuje njihovo vreme pešačenja od Olimpijskog parka do stanice (ili parkinga za vozila), vreme provedeno u gledanju velikih televizora na kojima se prate prenosi događaja iz Olimpijskog parka, vreme provedeno u kupovini u tržnom centru u Stratfordu, na stanici, i vreme čekanja voza na samoj stanici. Imajući prethodno opisano ponašanje korisnika u vidu, Tab.7.1.5 prikazuje rastojanja između objekata u Olimpijskom parku i stanice kao i vreme potrebno da se od svakog objekata i oblasti namenjene okupljanju korisnika u Olimpijskom parku stigne do Stratford stanice.



*Slika 7.1.3 – Položaj Stratford stanice Westfield tržnog centra u odnosu na Centar za sportove na vodi.*

Pretpostavljeno je da je prosečna brzina kretanja posetioca u Olimpijskom parku 3km/h i najgori slučaj kada se kompaktna grupa korisnika kreće pored objekta koji se analizira. U praksi se može očekivati nešto razuđenija grupa korisnika (zbog različite brzine kretanja posetilaca) jer se korisnici mogu razdvojiti i krenuti različitim stazama ka izlazima iz parka. Objekti sa kraćim vremenom potrebnim da se stigne do njih smatraju se kritičnijim u analizi.

Tabela 7.1.1 – Najkraće putanje između objekata u Olimpijskom parku iskazane u metrima.

<b>Objekat</b>	<b>Košarkaška sala</b>	<b>Velodrom i BMX Arena</b>	<b>Stadion za hokej na travi</b>	<b>IBC/MPC</b>	<b>Rukometna sala</b>	<b>Olimpijski stadion</b>	<b>Bazen za vaterpolo</b>	<b>Centar za sportove na vodi</b>
<b>Košarkaška sala</b>	-	250	550	600	470	930	850	1,050
<b>Velodrom i BMX Arena</b>	250	-	220	550	700	1,300	1,070	1,250
<b>Stadion za hokej na travi</b>	550	220	-	180	470	1,050	1,070	1,250
<b>IBC/MPC</b>	600	550	180	-	270	810	970	1,160
<b>Rukometna sala</b>	470	700	470	270	-	450	620	780
<b>Olimpijski stadion</b>	930	1,300	1,050	810	450	-	240	250

<i>Objekat</i>	<i>Košarkaška sala</i>	<i>Velodrom i BMX Arena</i>	<i>Stadion za hokej na travi</i>	<i>IBC/MPC</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Olimpijski stadion</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>	<i>Centar za sportove na vodi</i>
<i>Bazen za vaterpolo</i>	850	1,070	1,070	970	620	240	-	130
<i>Centar za sportove na vodi</i>	1,050	1,250	1,250	1,160	780	250	130	-

*Tabela 7.1.2 – Kritično vreme između početka/kraja događaja u dva različita objekta iskazano u minutima (vreme izlaska iz objekta + vreme kretanja od objekta do objekta).*

<i>Objekat</i>	<i>Košarkaška sala</i>	<i>Velodrom i BMX Arena</i>	<i>Stadion za hokej na travi</i>	<i>IBC/MPC</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Olimpijski stadion</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>	<i>Centar za sportove na vodi</i>
<i>Košarkaška sala</i>	-	20 (15+5)	26 (15+11)	27 (15+12)	25 (15+10)	34 (15+19)	32 (15+17)	36 (15+21)
<i>Velodrom i BMX Arena</i>	15 (10+5)	-	15 (10+5)	21 (10+11)	24 (10+14)	36 (10+26)	32 (10+22)	35 (10+25)
<i>Stadion za hokej na travi</i>	26 (15+11)	20 (15+5)	-	19 (15+4)	25 (15+10)	36 (15+21)	37 (15+22)	40 (15+25)
<i>IBC/MPC</i>	12 (0+12)	11 (0+11)	12 (0+12)	-	6 (0+6)	9 (0+9)	20 (0+20)	24 (0+12)
<i>Rukometna sala</i>	20 (10+10)	24 (10+14)	20 (10+10)	16 (10+6)	-	19 (10+9)	23 (10+13)	26 (10+16)
<i>Olimpijski stadion</i>	49 (30+19)	56 (30+26)	51 (30+21)	47 (30+17)	39 (30+9)	-	35 (30+5)	35 (30+5)



<i>Objekat</i>	<i>Košarkaška sala</i>	<i>Velodrom i BMX Arena</i>	<i>Stadion za hokej na travi</i>	<i>IBC/MPC</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Olimpijski stadion</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>	<i>Centar za sportove na vodi</i>
<i>Bazen za vaterpolo</i>	27 (10+17)	34 (10+24)	34 (10+24)	30 (10+20)	23 (10+13)	15 (10+5)	-	13 (10+3)
<i>Centar za sportove na vodi</i>	36 (15+21)	40 (15+25)	40 (15+25)	39 (15+24)	31 (15+16)	20 (15+5)	18 (15+3)	-

Tabela 7.1.3 – Kritična rastojanja od objekata do oblasti namenjene okupljanju korisnika, iskazana u metrima.

<i>Objekat</i>	<i>Košarkaška sala</i>	<i>Velodrom i BMX Arena</i>	<i>Stadion za hokej na travi</i>	<i>IBC/MPC</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Olimpijski stadion</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>	<i>Centar za sportove na vodi</i>
<i>Oblast okupljanja posetilaca</i>	710	970	770	590	250	220	470	640

Tabela 7.1.4 – Kritična vremena da posetilac stigne do oblasti za okupljanje korisnika polazeći od raznih objekata u Olimpijskom parku (po završetku događaja), iskazana u minutima.

<i>Objekat</i>	<i>Košarkaška sala</i>	<i>Velodrom i BMX Arena</i>	<i>Stadion za hokej na travi</i>	<i>IBC/MPC</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Olimpijski stadion</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>	<i>Centar za sportove na vodi</i>
<i>Oblast okupljanja posetilaca</i>	30 (15+15)	30 (10+20)	31 (15+16)	12 (0+12)	15 (10+5)	34 (30+4)	20 (10+10)	28 (15+13)

*Tabela 7.1.5 – Kritična rastojanja od objekata u Olimpijskom parku do Stratford stanice i vremena potrebna za njihov prelazak.*

<i>Objekat</i>	<i>Stratford stanica</i>	
	<i>Rastojanje [m]</i>	<i>Vreme stizanja [min]</i>
<i>Košarkaška sala</i>	700	14
<i>Velodrom i BMX Arena</i>	1,000	20
<i>Stadion za hokej na travi</i>	1,320	27
<i>IBC/MPC</i>	1,140	23
<i>Rukometna sala</i>	800	16
<i>Olimpijski stadion</i>	520	11
<i>Bazen za vaterpolo</i>	240	5
<i>Centar za sportove na vodi</i>	260	5
<i>Oblast okupljanja posetilaca</i>	650	13

Analiza koja je sprovedena ima za cilj da definiše metriku koja će za rezultat dati numeričku vrednost kojom će moći da se opiše svaki događaj. Takvo ocenjivanje ima za cilj da eliminiše, koliko je to god moguće, subjektivno ocenjivanje koliko je događaj (skup) kritičan po pitanju svog uticaja na radio-pristupnu mrežu i njene performanse u Olimpijskom parku, uključujući sisteme unutar objekata. Na ovaj način stvara se logična veza između sistema unutar objekata i makro sloja radio-pristupne mreže u Olimpijskom parku. Pored analize kapaciteta i radio-pokrivanja sistema unutar objekata i makro sloja radio-pristupne mreže, novi nivo interakcije je ostvaren i skupovi su višestruko opisani na osnovu njihovih osobina.

Konačni cilj je da se uvede relativna mera uticaja objekata unutar Olimpijskog parka. Konačna vrednost težinske funkcije kojom se ocenjuje rizik preopterećenja mreže i uticaj posetilaca jednog događaja (skupa) na drugi može se na početku dobiti na osnovu opštih i najčešćih vrednosti parametara koji učestvuju u njoj. Dalje unapređenje funkcije i povećanje preciznosti moguće je na osnovu analize kapaciteta i ponašanja

korisnika na prethodnim velikim skupovima (npr. muzički festivali, utakmice fudbalske lige ili utakmice ragbi lige itd.).

Različite težinske funkcije se mogu primeniti ali je usvojena linerna funkcija pretpostavljajući da svi faktori imaju linearan uticaj na konačnu vrednost težinske funkcije

Ukupna vrednost težinske funkcije (težinski faktor) određena je kao,

$$W = a \times D + b \times P + c \times T, \quad (7.1.1)$$

gde je  $a=0.4$  skalirajući koeficijent vezan za vrstu skupa dok  $D$  opisuje dinamiku skupa kao:

$$D = \begin{cases} 1, & \text{skup male dinamike,} \\ 2, & \text{model skupa koji nije sportski,} \\ 3, & \text{skup velike dinamike.} \end{cases} \quad (7.1.2)$$

Parametar  $P$  predstavlja poziciju objekta u Olimpijskom parku, određenu težinskim faktorima funkcije karakterizacije skupa koji su jednaki  $1/(n_1-n_2)$ , gde su  $n_1$  i  $n_2$  identifikacioni faktori kvadranta u kojima se nalaze objekti a čiji je međusobni uticaj analiziran u jednačini (7.1.3). U slučaju kada se određuje uticaj između objekata u okviru istog kvadranta, težinski faktor je jednak  $n$ , gde je  $n$  broj objekata u istom kvadrantu. Vrednosti parametra  $P$  su:

$$P = \begin{cases} \frac{1}{n}, & \text{objekti u istom kvadrantu,} \\ \frac{1}{n_1-n_2}, & \text{objekti u različitim kvadrantima.} \end{cases} \quad (7.1.3)$$

Usvojena vrednost za skalirajući koeficijent  $b$  iz jednačine (7.1.1) iznosi 0.3.

Skalirajući koeficijent  $c$  u jednačini (7.1.1) određen je tako da ima vrednost 0.3 tako da je ukupni zbir sva 3 koeficijenta jednak 1,

$$a + b + c = 1. \quad (7.1.4)$$

Parametar  $T$  predstavlja vreme potrebno za napuštanje skupa (objekta) i za dolazak od ostalih objekata do objekta od interesa. Ovaj parametar značajno zavisi od

organizacije i rasporeda skupova na velikom skupu kakve su Olimpijske igre i zbog toga može imati iznačajno različite vrednosti u zavisnosti od vremena početka i kraja svakog pojedinačnog događaja. Parametar  $T$  ne zavisi samo od vremena početka ili kraja događaja već i od vremena potrebnih da se stigne do objekta od interesa pre početka događaja, kao i vremena potrebnog da se objekat napusti po završetku događaja (skupa). Ova vremena za različite objekte od interesa nisu ista te se moraju uzeti u obzir. Zbog toga je predloženo više vrednosti za parametar  $T$  u Tab.7.1.6. Dodatno, svaka vrednost može se skalirati verovatnoćom da će korisnik proći pitanjom (stazom). U konkretnom slučaju ovakvo skaliranje nije primenjeno jer je izvršena analiza najnepovoljnijeg slučaja da će svi korisnici proći analiziranom putanjom. Dalje unapređenje modela se može ostvariti primenom različitih modela ponašanja pešaka odnosno analizom kretanja grupe kako bi se odredila raspodela korisnika po stazama (putanjama) za pomenuto skaliranje.

Parametar  $T$  računa se na sledeći način. Za svaki događaj u drugom objektu se određuje vreme od interesa pre početka događaja u objektu od interesa. Vreme potrebno da se stigne od jednog objekta do drugog (posmatranog) se dodaje na razliku vremena između početka dva događaja a tada se na osnovu ukupnog vremena vrši izbor vrednosti parametra  $T$  prema vrednostima predloženim u Tab.7.1.6.

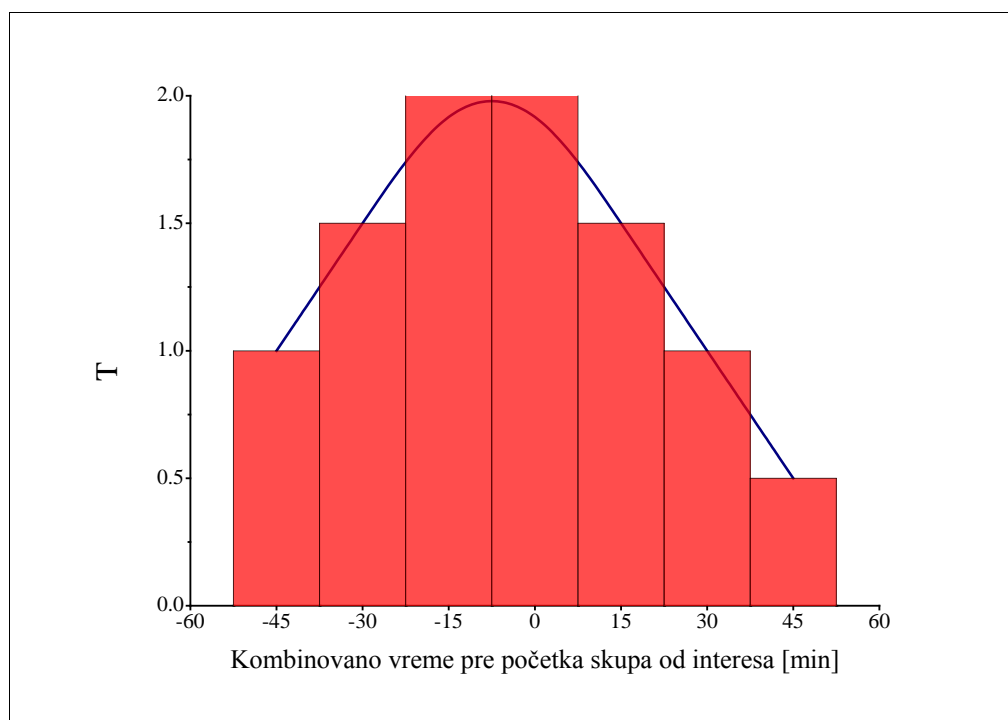
Za trenutak kada se završava događaj od interesa, određuju se vremena završetka ostalih događaja i vreme potrebno da se stigne od jednog objekta do drugog. Razlika vremena između završetaka događaja i vremena da se stigne od jednog do drugog objekta se oduzimaju. Ovako ukupno dobijeno vreme se koristi da se u Tab.7.1.6 pronade vrednost za parametar  $T$ .

*Tabela 7.1.6 – Predložene vrednosti parametra  $T$ .*

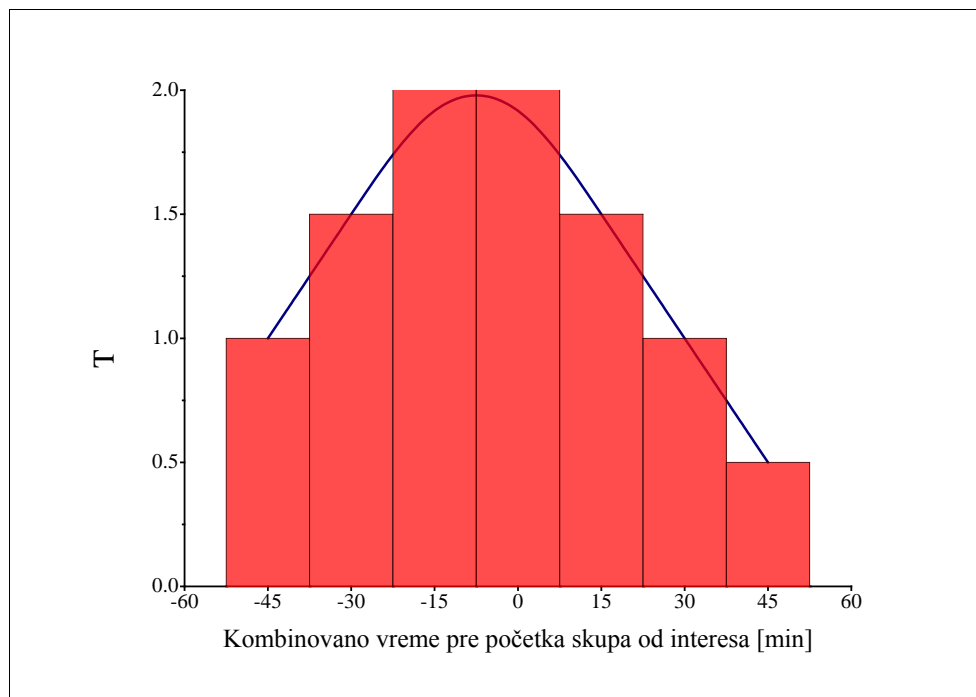
<i>Kombinovano vreme pre početka događaja od interesa</i>	<i><math>T</math></i>	<i>Kombinovano vreme posle završetka događaja od interesa</i>	<i><math>T</math></i>
-60 – -46	0.5	-60 – -46	0.25
-45 – -31	1	-45 – -31	0.75

<i>Kombinovano vreme pre početka događaja od interesa</i>	<i>T</i>	<i>Kombinovano vreme posle završetka događaja od interesa</i>	<i>T</i>
-30 – -16	1.5	-30 – -16	1.5
-15 - 0	2	-15 - 0	2.5
0 – 15	2	0 – 15	2
16 – 30	1.5	15 – 30	1.5
31 – 45	1	31 – 45	1
45 – 60	0.5	45 – 60	0.5

Vrednosti parametra  $T$  za kombinovano vreme pre početka skupa i posle završetka, prikazani su na Sl.7.1.4 i Sl.7.1.5. Pored histograma definisanih u Tab.7.1.6, prikazane su i optimizovane krive koje se mogu koristiti za praćenje promene parametra  $T$  kao i za potencijalnu analizu ponašanja posetilaca u kraćim vremenskim intervalima od 15 minuta, odnosno na nivou jednog minuta.



Slika 7.1.4 – Parametar  $T$  za kombinovano vreme pre početka skupa od interesa.



*Slika 7.1.5 – Parametar  $T$  za kombinovano vreme posle završetka skupa od interesa.*

Ukupna vrednost  $W$  je suma težinskih koeficijenata koji se odnose na vrstu skupa (događaja), srednju težinsku vrednost položaja objekta u Olimpijskom parku (usrednjenu u smislu analize pozicije u odnosu na sve ostale objekte u Olimpijskom parku) i srednju težinsku vrednost vremenskog uticaja za svaki objekat (događaj) koji utiče na događaj od interesa.

Za potrebe povećanja preciznosti „treniranjem“ koeficijenata može se primeniti model veštačkih neuralnih mreža (*Artificial Neural Network*, ANN) ili kognitivna tehnika.

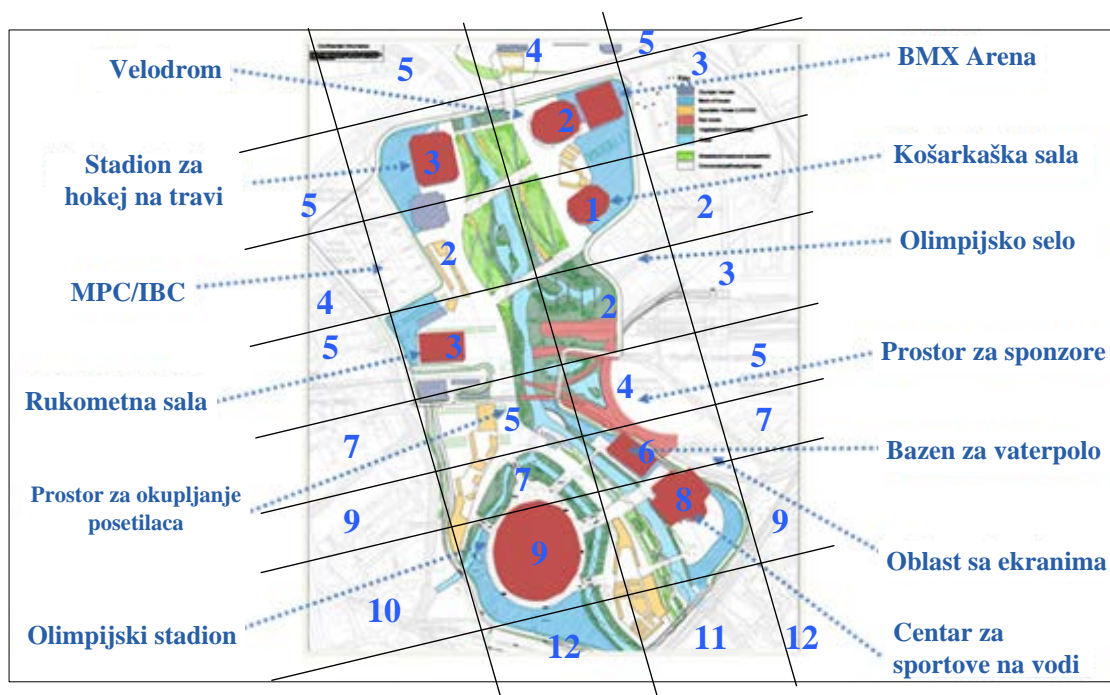
## **7.2 PRIMER KARAKTERIZACIJE SKUPA**

Događaji u dva objekta su analizirani kao primer određivanja težinskih faktora i funkcije za karakterizaciju događaja (skupova). Jedan objekat je košarkaška sala, standardan sportski objekat koji se koristi tokom Olimpijskih igara, dok je drugi prostor namenjen okupljanju korisnika u Olimpijskom parku, kao oblast sa više malih objekata gde se zadržava najveći broj posetilaca Olimpijskog parka.

### 7.2.1 KARAKTERIZACIJA SKUPA U KOŠARKAŠKOJ SALI

Košarkaška sala nalazi se u severnom delu Olimpijskog parka, pored Velodroma i BMX Arene (na svernoj strani) i stadiona za hokej na travi (na zapadnoj strani). Oblast koja okružuje košarkašku salu je podeljena u više kvadranta i svaki kvadrant je numerisan u skladu sa prethodno opisanim algoritmom, Sl.7.2.1.

Svi događaji planirani da se održe u košarkaškoj sali su skupovi (događaji) velike dinamike. Ovi događaji uključuju košarkaške utakmice tokom Olimpijskih igara i rukometne utakmice u završnoj fazi takmičenja. Obe vrste događaja posećuju korisnici koji se ponašaju na vrlo sličan način pa se i proračun kapaciteta vrši po vrlo sličnim profilima korisnika. Zbog toga, parametar  $D$  je izabran da bude jednak 1.



Slika 7.2.1 – Numeracija kvadranta u analizi karakterizacije događaja u košarkaškoj sali.

Košarkaška sala je jedini objekat u kvadrantu označenom faktorom 1. Ostali kvadranti su numerisani u skladu sa predloženim algoritmom. Kako je košarkaška sala jedini objekat u prvom kvadrantu to nema dodatnog težinskog faktora koji se može povezati sa prvim kvadrantom. Vrednosti za parametar  $P$  koja potiče od drugih objekata prikazane su u Tab.7.2.1.



*Tabela 7.2.1 – Vrednosti parametra P za druge objekte i oblasti u okviru Olimpijskog parka.*

<i>Objekat</i>	<i>Numeracija kvadranta [n<sub>2</sub>]</i>	<i>Vrednost parametra P</i> $[\frac{1}{n_2-n_1}]$	<i>Srednja vrednost P</i>		
			<i>Samo za sportske objekte u Olimpijskom parku</i>	<i>Sportski objekti i IBC/MPC i oblast namenjena okupljanju korisnika</i>	<i>Objekti u Olimpijskom parku i objekti od interesa izvan parka</i>
Velodrom	2	1	0.50136	0.5288359	0.496886
BMX Arena	2	1			
Stadion za hokej na travi	3	1/2			
Rukometna sala	3	1/2			
Bazen za vaterpolo	6	1/5			
Centar za sportove na vodi	8	1/7			
Olimpijski stadion	7 & 9	1/6			
IBC/MPC	2	1	-		
Oblast okupljanja posetilaca	5	1/4			

<i>Objekat</i>	<i>Numeracija kvadranta</i> $[n_2]$	<i>Vrednost parametra P</i> $[\frac{1}{n_2-n_1}]$	<i>Srednja vrednost P</i>		
			<i>Samo za sportske objekte u Olimpijskom parku</i>	<i>Sportski objekti i IBC/MPC i oblast namenjena okupljanju korisnika</i>	<i>Objekti u Olimpijskom parku i objekti od interesa izvan parka</i>
Sponsorski deo	4	1/3		-	
Olimpijsko selo	2	1			
Oblast sa veklikim ekranima	6	1/5			
Stratford stanica	7	1/6			

Vrednost parametra  $T$  određena je analizom vremenskog rasporeda događaja u svim objektima u Olimpijskom parku. Kao primer, izvršena je analiza za jedan dan kada se održavaju kvalifikacione utakmice u košarkaškoj sali. Tokom kvalifikacija se održava znatno veći broj događaja u Olimpijskom parku čineći tako Olimpijski park zahtevnijom sredinom za pružanje telekomunikacionih usluga. Kao primer događaja organizovanih u toku jednog dana u Olimpijskom parku izabran je 4. avgust. Vremenski raspored (program) događaja za ovaj dan prikazan je u Tab.7.2.2.

Tabela 7.2.2 – Program događaja na Olimpijskim igrama, u Olimpijskom parku, 4. avgusta 2012.

Vreme	Košarkaška sala	Velodrom	Rukometna sala	Stadion za hokej na travi	Centar za sportove na vode	Bazen za vaterpolo	
08:00							
08:15				11+30=41			
08:30				Kvalifikacije 2 utakmice			
08:45							
09:00	Kvalifikacije 2 utakmice						
09:15			10+(-30)=-20				
09:30							
09:45		5+(-60)=-55					17+(-60)=-43
10:00			Omnium Leteći krug Sprint		Kvalifikacije 2 utakmice		Kvalifikacije 2 utakmice
10:15							
10:30							
10:45							

Vreme	Košarkaška sala	Velodrom	Rukometna sala	Stadion za hokej na travi	Centar za sportove na vode	Bazen za vaterpolo	
11:00		Kvalifikacije 1/16 finala					
11:15							
11:30							
11:45		15+(-90)=-75 15+(-165)=-150					
12:00							
12:15							27+(-60)=-33 27+(-125)=-98
12:30							26+(-45)=-19 26+(-120)=-94
12:45							
13:00							20+(-15)=5 20+(-90)=-70
13:15							

Vreme	Košarkaška sala	Velodrom	Rukometna sala	Stadion za hokej na travi	Centar za sportove na vode	Bazen za vaterpolo
13:30				11+(-30)=-19 11+45=56		
13:45				Kvalifikacije 2 utakmice		
14:00						17+(-60)=-43 17+15=32
14:15			10+(-75)=-65 10+0=10			Kvalifikacije 2 utakmice
14:30	Kvalifikacije 2 utakmice		Kvalifikacije 2 utakmice			
14:45						
15:00						
15:15						
15:30						
15:45				5+(-150)=-145 5+(-90)=-85		

Vreme	Košarkaška sala	Velodrom	Rukometna sala	Stadion za hokej na travi	Centar za sportove na vode	Bazen za vaterpolo		
16:00		Omnium						
16:15		30km trka						
16:30		Eliminaciona trka						
16:45								
17:00		Sprint						
		1/16 repasaž						
17:15		1/8 finala i repasaži						27+(90)=-63 27+(-165)=-138
17:30		Trka za plasman od 9-12 mesta						
17:45								
18:00		Timska takmičenja 1. runda i finala Ceremonija proglašenja				20+(-45)=-25 20+(-120)=-100	26+(-45)=-19 26+(-120)=-94	
18:15	pobednika				Kvalifikacije			

Vreme	Košarkaška sala	Velodrom	Rukometna sala	Stadion za hokej na travi	Centar za sportove na vode	Bazen za vaterpolo
18:30						2 utakmice
18:45				11-15=-4 11+60=71		
19:00		15+15=30 5+(-60)=-55		Kvalifikacije 2 utakmice		
19:15			10+(-45)=-35 10+30=40		21+(-45)=-24 21+30=51	
19:30					1500m slobodnim stilom Finale, ceremonija proglašenja pobednika	
19:45						
20:00	Kvalifikacije 2 utakmice		Kvalifikacije 2 utakmice		4×100m štafeta (M&W) Finale, ceremonija	
20:15						
20:30						
20:45						

<i>Vreme</i>	<i>Košarkaška sala</i>	<i>Velodrom</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Stadion za hokej na travi</i>	<i>Centar za sportove na vode</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>
21:00					proglašenja pobjednika  50m slobodnim stilom Finale, ceremonija proglašenja pobjednika	
21:15					36+(-165)=-129	27+(-165)=-138
21:30						
21:45						
22:00						
22:15						
22:30						
22:45						
23:00			20+(-75)=-55	26+(-75)=-51		



<i>Vreme</i>	<i>Košarkaška sala</i>	<i>Velodrom</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Stadion za hokej na travi</i>	<i>Centar za sportove na vode</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>
23:15						
23:30						
23:45						
00:00						

Brojevi dati u Tab.7.2.2 predstavljaju kombinovane vrednosti vremena (iskazane u minutima) koje se koriste za određivanje vrednosti parametra  $T$  na osnovu Tab.7.1.6. Crni brojevi predstavljaju vrednosti dobijene na osnovu analize uticaja na događaj od interesa u posmatranom objektu od strane događaja koji se održavaju u drugim objektima, koji počinju ili se završavaju u isto ili u približno isto vreme po rasporedu. Crveni brojevi predstavljaju vremena dobijena na osnovu analize uticaja događaja u drugim objektima na događaj od interesa u posmatranom objektu koji se završavaju pre posmatranog događaja ili počinju malo po završetku posmatranog događaja.

Prema rasporedu, 4. avgusta su planirana 3 događaja u košarkaškoj sali. Parametar  $T$  za prvi događaj (skup) je izračunat kao suma svih vrednosti parametra  $T$  za svaki objekat.

U slučaju kada se događaj u objektu od interesa (tj. u košarkaškoj sali) završava i kada događaj u drugom objektu počinje, kao vrednost za parametar  $T$  koristi se kombinovano vreme za vreme posle završetka događaja. Na isti način, kada se analiziraju vremena završetka događaja u drugim objektima u odnosu na vreme početka događaja od interesa, kreira se kombinovano vreme za analizu početka događaja.

Može se videti da ostali objekti, u zavisnosti od vremena u toku dana, imaju različit uticaj na posmatrani događaj i objekat (košarkašku salu) iskazanu u vrednosti parametra  $T$ . Potvrđuje se da završeci događaja u drugim objektima, koji se završavaju pre događaja od interesa u košarkaškoj sali, nemaju uticaja na rizik preopterećenja radio-pristupne mreže u blizini košarkaške sale (pojavljivanjem prevelikog broja korisnika ispred košarkaške sale), Tab.7.2.3.

Na osnovu prethodno opisanog algoritma, izračunate su pojedinačne vrednosti parametra  $T$  za 3 događaja (skupa) koji se održavaju u košarkaškoj sali, kao i jedinstvena vrednost parametra  $T$  za ceo dan za košarkašku salu kao srednja vrednja vrednost vrednosti  $T$  parametara za svaki događaj pojedinačno.

Može se uočiti da je raspored događaja u toku dana dobar i da su izbegnuta značajnija preklapanja vremena održavanja sportskih događaja u Olimpijskom parku. Može se pretpostaviti da će zbog svoje blizine stadion za hokej na travi i rukometna sala

imati najveći uticaj na događaje koji se održavaju u košarkaškoj sali za izabrani dan. Uticaj Velodroma se pokazuje malim zbog više razloga. Prvo, događaji u Velodromu su retki i relativno mali broj posetilaca ulazi vrlo brzo u velodrom i BMX Arenu pa tako intenzitet prolaska ovih posetilaca pored košarkaške sale je mali. Drugo, vremena početaka događaja (skupova) u Velodromu i košarkaškoj sali su takva da postoji dovoljno veliki vremenski razmak kako bi se izbeglo okupljanje korisnika u istoj oblasti, bilo da se radi o prostoru ispred bilo kog od 2 pomenuta objekta, bilo na stazama između ovih objekata u Olimpijskom parku.

Događaji u rukometnoj sali pokazuju da imaju značajniji uticaj zbog činjenice da su vremena početaka događaja u rukometnoj sali i košarkaškoj sali tako izabrana da postoje određena preklapanja između njih. Ovo ne mora biti kritično (iako je značajno preklapanje) zbog međusobne udaljenosti objekata. Takođe, ovakvo preklapanje je teško izbeći jer je rukometna sala pozicionirana u središtu Olimpijskog parka i nalazi se praktično na jednakoj udaljenosti od svih ostalih objekata. Usvojena analiza pretpostavlja najnepovoljniji slučaj kretanja korisnika (svi združeno prolaze istovremeno pored posmatranog objekta) jer predloženi model pretpostavlja jednaku upotrebu svih prilaznih staza ka rukometnoj sali. Analiza kretanja posetilaca (tzv. *crowd movement*) tokom početnih takmičenja može pokazati manje opterećenje pojedinih staza i eventualno da manji procenat korisnika (npr. 10%) koristi stazu pored košarkaške sale za dolazak do rukometne sale. U praktičnim situacijama ovo znači da je moguće analizirati potencijalne rizike i kratkoročno, nekoliko dana unapred, pošto je takmičenje (Olimpijske igre) već počelo.

*Tabela 7.2.3 – Uticaj događaja u drugim objektima u Olimpijskom parku na događaj (skup) koji se održava u košarkaškoj sali.*

<i>Skup</i>	<i>Uticaj</i>	<i>Velodrom</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Stadion za hokej na travi</i>	<i>Centar za sportove na vodi</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>	<i>Ukupno</i>
Jutro	Od skupa koji se održava ranije	0	0	0	0	0	0
	Početak skupa	0.5	1.5	1	0	1	4
	Kraj skupa	0	2	1.5	0	1	4.5
	Od skupa koji se održava kasnije	0	0	1.5	0	0.75	2.25
	Međusuma	0.5	3.5	4	0	2.75	<b>10.75</b>
Podne i poslepodne	Od skupa koji se održava ranije	0	0	0	0	0	0
	Početak skupa	0	2	0.5	0	1	3.5
	Kraj skupa	1.5	1.5	1.5	1.5	0	6
	Od skupa koji se održava kasnije	0	0.75	2.5	1.5	0.5	5.25

<i>Skup</i>	<i>Uticaoj</i>	<i>Velodrom</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Stadion za hokej na travi</i>	<i>Centar za sportove na vodi</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>	<i>Ukupno</i>
	Međusuma	1.5	4.25	4.5	3	1.5	<b>14.75</b>
Kasno poslepodne i večer	Od skupa koji se održava ranije	0.5	0	0	0	0	0.5
	Početak skupa	0	1	0	0.5	0	1.5
	Kraj skupa	0	0.25	0.25	0	0	0.5
	Od skupa kojise održava kasnije	0	0	0	0	0	0
	Međusuma	0.5	1.25	0.25	0.5	0	<b>2.5</b>
Ukupno		2.5	9	8.75	3.5	4.25	<b>28</b>
Srednja vrednost <i>T</i> za dan		0.83	3	2.92	1.167	1.417	<b>9.33</b>
Srednja vrednost <i>T</i> po po danu, po objektu		0.83	3	2.92	1.167	1.417	<b>1.866</b>

Stadion za hokej na travi ima veliki uticaj na događaje u košarkaškoj sali iz više razloga. Oba objekta locirana su blizu jedna drugog na severnoj strani Olimpijskog parka. Oba objekta su približno iste veličine sa izraženo većim brojem sedišta u njima u poređenju sa objektima u njihovoj blizini (rukometnoj sali i Velodromu). Uticaj stadiona za hokej na travi je kontrolisan drvećem koje zaklanja liniju optičke vidljivosti i unosi dodatno slabljenje signala na prostoru između ova 2 objekta kao i rekom koja teče kroz Olimpijski park i koja dodatno razdvaja posetioce ova dva objekta. Treći element razdvajanja je konfiguracija distribuiranih antenskih sistema u objektima i ispred njih, sa antenama odgovorajućeg azimuta i tilta.

Centar za sportove na vodi ne utiče na skupove u košarkaškoj sali praktično ni malo, dok skupovi na bazenu za vaterpolo mogu imati uticaj na skupove u košarkaškoj sali zbog relativno malog rastojanja između objekata. Može se videti da rastojanje između ova dva objekta nije veliko i da su Stratford stanica i Olimpijsko selo (kao i drugi objekti za članove Olimpijskih tela) locirani na prostoru između njih. U slučaju da posetioci i članovi olimpijskih tela odaberu ovu stazu (putanju) za svoje kretanje do svojih prostorija i do stanice za voz i metro, tada ovaj uticaj postaje vidljiv. U slučaju kada posetioci koriste druge staze, više usmerene ka centralnom delu Olimpijskog parka, ova putanja nema značaj. Ponovo, u okviru primera, izabrano je da su sve staze jednako opterećene (kao najnepovoljniji slučaj za analizu) ali se može dalje analizirati uticaj korisnika detaljnijom analizom kretanja posetilaca po početku Olimpijskih igara i skalirati parametar  $T$  procentom posetilaca koji koriste ovu stazu za kretanje.

Očigledno je da će skup koji se održava u rano poslepodne biti najkritičniji jer je to upravo deo dana kada se održava najveći broj događaja i u drugim objektima u Olimpijskom parku. Takođe, ovo je deo dana kada broj posetilaca Olimpijskog parka dostiže svoj maksimum. Drugi kritičan događaj u toku dana je jutarnji skup (događaj) koji počinje u kasno jutro i traje do ranog popodneva. Događaj koji nije tako kritičan je događaj koji počinje u rano veče, kada je većina drugih događaja već završena ili pri kraju, i traje sve do ponoći kada su već ostali događaji u Olimpijskom parku završeni. Takođe, ovo je i vreme kada je u Olimpijskom parku manje posetilaca i relativno mali broj posetilaca je prisutan u otvorenim oblastima parka.

Dve vrednosti za parametar  $T$  su prikazane. Prva predstavlja parametar  $T$  za dan, normalizovan brojem skupova koji se u toku dana održavaju u objektu tj. u košarkaškoj sali (3 događaja u toku dana). Ova vrednost služi kao sveobuhvatna procena rizika preopterećenja radio-pristupne mreže u toku posmatranog dana. Druga vrednost je usrednjena vrednost po danu i po objektu koji utiče na događaje u košarkaškoj sali. Broj ovih objekata koji utiču na skupove u košarkaškoj sali je 5. Ova vrednost pokazuje srednju vrednost uticaja koji ostvaruje svaki objekat u toku događaja (skupa). Ova dvostruko usrednjena vrednost je uvrštena u konačnu analizu rizika i karakterizaciju događaja jer su i dinamika događaja i položaj objekta povezane sa istim (jednim) događajem.

Ukupna vrednost težinske funkcije za košarkašku salu, za 4. avgust jednaka je

$$\begin{aligned} W &= a \times D + b \times P + c \times T = \\ &= 0.4 \times 1 + 0.3 \times 0.50136 + 0.3 \times 1.866 = 1.11021. \end{aligned} \quad (7.2.1)$$

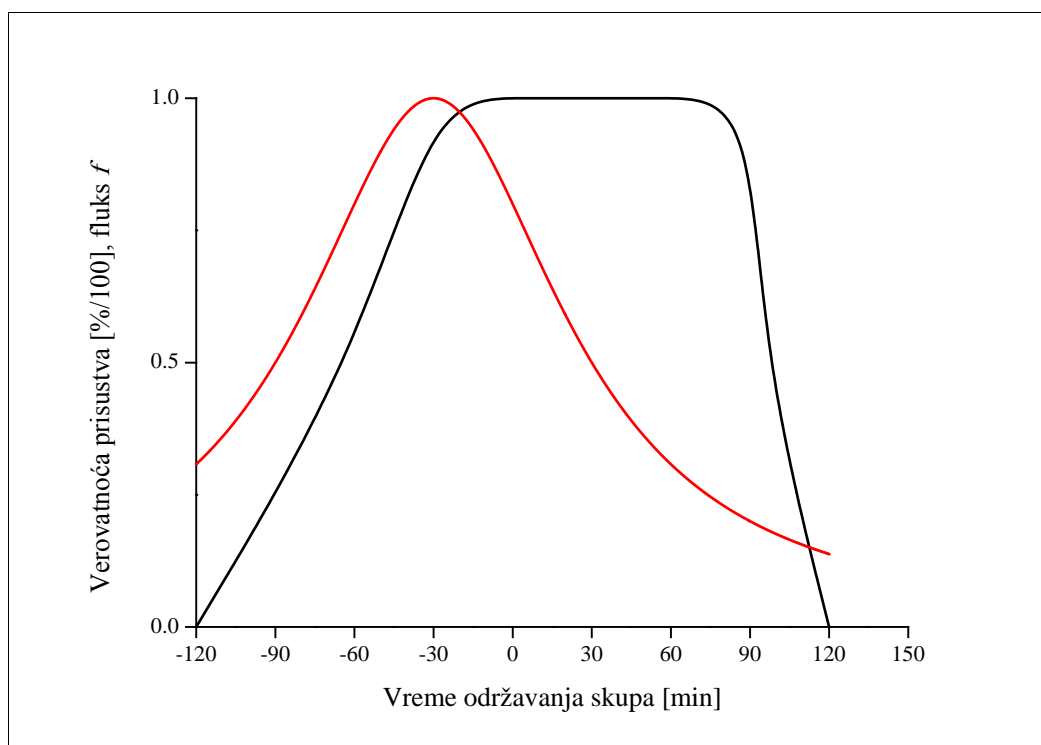
Za parametar  $P$  je usvojena vrednost koja uključuje isključivo uticaj sportskih objekata. Preostale vrednosti date u Tab.7.2.1 mogu se koristiti u slučaju da je potrebno utvrditi uticaj i skupova u objektima koji nisu sportske namene.

### **7.2.2 POREĐENJE SA IZABRANIM MODELOM IZ LITERATURE**

Na osnovu prethodno sprovedene analize, izvršeno je poređenje i sa slučajem ponašanja grupe na pojedinačnom skupu i to na osnovu zvonastog modela vremena do rasturanja grupe prikazanog u [48], Sl.7.2.2. Pretpostavljeno vreme od početka do kraja košarkaške utakmice je 90 minuta. Vreme potrebno za napuštanje sale, na osnovu postojeće literature i sprovedene analize, iznosi 30 minuta. Maksimalan broj posetilaca nastaje 30 minuta pre početka skupa, zbog potrebnih sigurnosnih kontrola, i nastavlja se do kraja sportskog događaja. Crnom bojom prikazana je kriva koja opisuje kreirani dijagram koji opisuje prethodno ponašanje korisnika. Crvenom bojom prikazana je kriva koja opisuje ponašanje posetilaca na osnovu podataka iz literature uz pretpostavku da se posetioci, takođe, pojavljuju 30 minuta pre početka skupa, uz varijansu njihovog ponašanja od 60 minuta.

Može se zaključiti da za specijalne skupove zvonasta kriva prikazuje manje

verovatnoće prisustva posetilaca tokom skupa od 1 što ima opravdanje imajući u vidu da će pojedini posetioци možda izaći ranije ili zakasniti na skup. Međutim, ponašanje korisnika je nepredvidivo jer su izlasci sa skupa generalno nepredvidivi i posledica značajnih spoljnih uticaja (hitan poziv, slučajna povreda i odlazak u Hitnu pomoć itd.). Samim tim, precizno i tačno modelovanje ovakvih događaja, na velikom skupu je praktično nemoguće. Istovremeno, analiza koja ne predviđa potpuno popunjenu salu ujedno i ne analizira najnepovoljniji slučaj sa stanovišta opterećenja radio-pristupne mreže.



*Slika 7.2.2 – Fundamentalni dijagram/verovatnoća prisustva posetioca.*

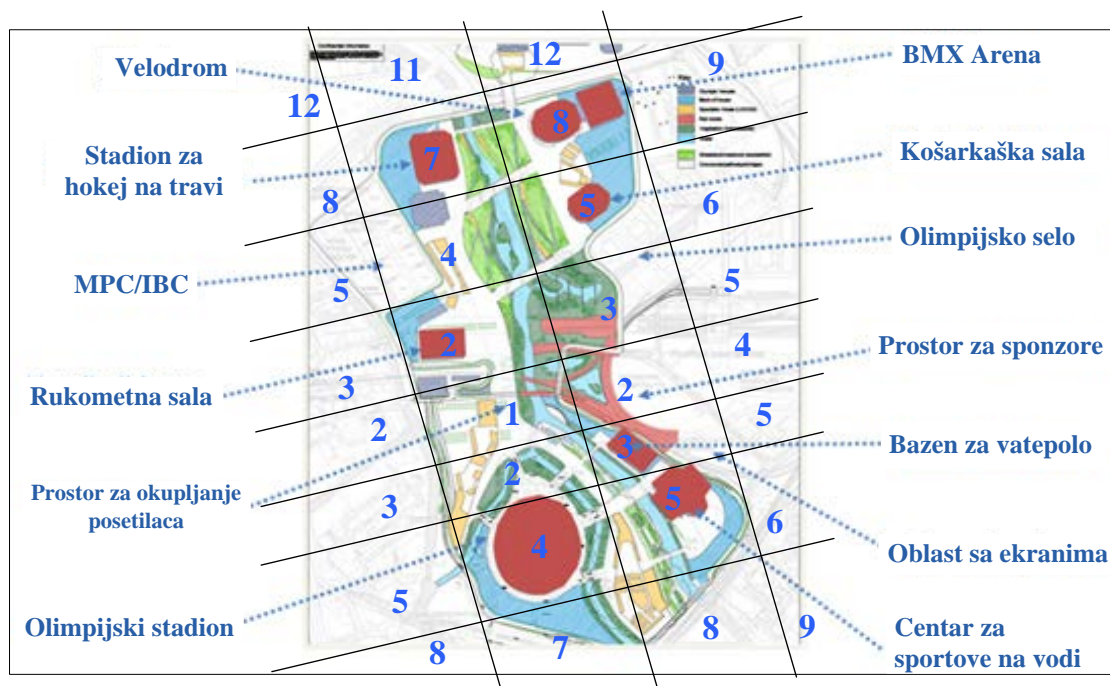
Stoga, može se zaključiti da je predloženi dijagram korisniji pri analizi ponašanja grupe na sportskom skupu kakav je košarkaška utakmica. Ovaj dijagram ujedno se može primeniti i kod više utakmica u istom objektu, u slučaju prve utakmice u toku dana.

### **7.2.3 KARAKTERIZACIJA OBLASTI NAMENJENE OKUPLJANJU KORISNIKA**

Oblast ili prostor namenjen okupljanju posetilaca u Olimpijskom parku nalazi se



u središnjem delu Olimpijskog parka. Oblast namenjena okupljanju posetilaca je pozicionirana između bloka stambenih zgrada na zapadnoj strani, rukometne sale na severu, rekom i sponzorskim prostorijama na istočnoj strani i Olimpijskim stadionom na jugu. Celokupna oblast koja okružuje prostor namenjen okupljanju korisnika podeljena je u više kvadranta i svaki kvadrant je umerisan u skladu sa usvojenim algoritmom, SI.7.2.3.



Slika 7.2.3 – Numeracija kvadranta u analizi aktivnosti unutar prostora za okupljanje korisnika u Olimpijskom parku.

Iako prostor namenjen okupljanju posetilaca u Olimpijskom parku nije kompaktna oblast sastavljena isključivo od otvorenog prostora ili jednog objekta, zbog činjenice da više malih objekata čine ovu oblast, sa nepoznatom aktivnošću korisnika unutar objekta, celokupna oblast je tretirana kao jedinstven entitet (prostor). Ovaj pristup je donekle optimističan jer višestruki objekti u istom kvadrantu stvaraju znatno veću vrednost parametra  $P$ . Međutim, kretanje korisnika u restoranima brze hrane, na otvorenom (u slučaju lepog vremena) i slične nepoznanice u ponašanju posetilaca su takve da je detaljnija mikro analiza ovakvih objekata i prostora neizvesna sa stanovišta tačnosti predviđanja ponašanja korisnika.

Nije planirano održavanje konvencionalnih ili sportskih skupova u prostoru

namenjenom za okupljanje posetilaca. Ovaj prostor je opisan konstantnim aktivnostima posetilaca koji provode vreme u ovoj oblasti između dva sportska događaja. Zbog toga su korisnici u prostoru za okupljanje posetilaca opisani modelom skupova koji nisu sportski, jednačina (7.1.2), zbog čega parametar  $D$  ima vrednost 2. Ponašanje ovih korisnika je karakterisano većim brojem govornih poziva u poređenju sa drugim modelima i manjom upotrebom servisa prenosa podataka zbog velikog broja zabavnih aktivnosti koje postoje u ovom prostoru, kao što su pomenuti restorani brze hrane, veliki ekrani sa prenosima sportskih dešavanja, informacioni štandovi sa promocijama i posebnim informacijama i drugim, sličnim aktivnostima.

Kao što je ranije pomenuto, prostor namenjen okupljanju korisnika se tretira kao jedinstvena oblast u kvadrantu označenim identifikacionim faktorom 1. Ostali kvadranti su numerisani u skladu sa SI.7.2.3 i predloženim algoritmom za njihovo numerisanje. Kako je prostor za okupljanje korisnika jedini u datom kvadrantu to je vrednost ovog kvadranta 1. Vrednosti parametra  $P$  koji potiče od drugih objekata prikazani su u Tab.7.2.4.

*Tabela 7.2.4 – Vrednost parametra  $P$  za druge objekte u Olimpijskom parku i u bliskoj okolini.*

<i>Objekat</i>	<i>Numeracija kvadranta</i> $[n_2]$	<i>Vrednost parametra <math>P</math></i> $[\frac{1}{n_2-n_1}]$	<i>Srednja vrednost <math>P</math></i>		
			<i>Samo za sportske objekte u Olimpijskom parku</i>	<i>Sportski objekti i IBC/MPC i oblast namenjena okupljanju korisnika</i>	<i>Objekti u Olimpijskom parku i objekti od interesa izvan parka</i>
Velodrom	8	1/7	0.43155	0.42063	0.464285
BMX Arena	8	1/7			

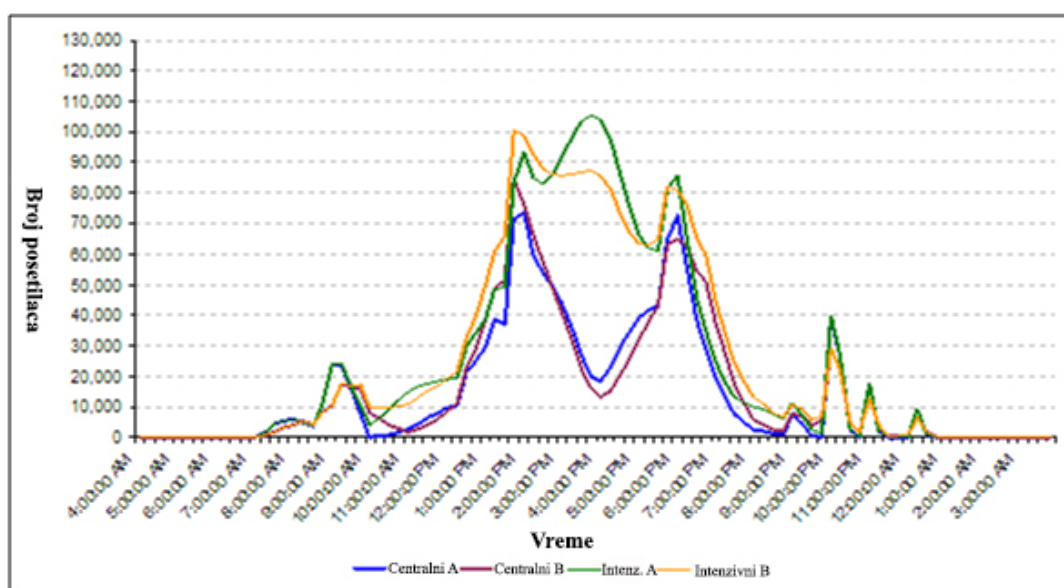
<i>Objekat</i>	<i>Numeracija kvadranta</i> $[n_2]$	<i>Vrednost parametra P</i> $[\frac{1}{n_2-n_1}]$	<i>Srednja vrednost P</i>		
			<i>Samo za sportske objekte u Olimpijskom parku</i>	<i>Sportski objekti i IBC/MPC i oblast namenjena okupljanju korisnika</i>	<i>Objekti u Olimpijskom parku i objekti od interesa izvan parka</i>
Stadion za hokej na travi	7	1/6			
Rukometna sala	2	1			
Bazen za vaterpolo	3	1/2			
Centar za sportove na vodi	5	1/4			
Olimpijski stadion	5	1/4			
IBC/MPC	2 and 4	1			
Oblast okupljanja posetilaca	4	1/3			
Sponsorski deo	2	1	N/A	N/A	
Olimpijsko selo	3	1/2			

<i>Objekat</i>	<i>Numeracija kvadranta</i> $[n_2]$	<i>Vrednost parametra P</i> $[\frac{1}{n_2-n_1}]$	<i>Srednja vrednost P</i>		
			<i>Samo za sportske objekte u Olimpijskom parku</i>	<i>Sportski objekti i IBC/MPC i oblast namenjena okupljanju korisnika</i>	<i>Objekti u Olimpijskom parku i objekti od interesa izvan parka</i>
Oblast sa veklikim ekranima	3	1/2			
Stratford stanica	5	1/4			

Može se videti da su vrednosti za parametar  $P$ , prikazane u Tab.7.2.4, manje nego u slučaju košarkaške sale, Tab.7.2.1. Razlika je mala ali je razlog za to činjenica da je prostor za okupljanje posetilaca tretiran kao jedinstven prostor, odnosno jedinstven objekat. Takođe, može se primetiti da je lokacija prostora za okupljanje posetilaca tako izabrana da je dovoljno udaljena od većine objekata u Olimpijskom parku. Čak i u slučaju rukometne sale i Olimpijskog stadiona, može se reći da će oko 20,000 posetilaca (od 80,000 koliko stadion prima) izabrati stazu koja prolazi pored prostora za okupljanje posetilaca dok rukometna sala prima relativno mali broj posetilaca u odnosu na ostale objekte u parku. Zbog toga, može se zaključiti da će kapacitet radio-pristupne mreže u oblasti namenjenoj okupljanju posetilaca biti određen ponašanjem korisnika koji provode vreme u oblasti a manje ponašanjem korisnika koji prolaze pored oblasti ili kroz oblast na svom putu ka objektima u Olimpijskom parku ili izlasku iz parka. Ovo je očekivani rezultat i važno je izvršiti dimenzionisanje mreže na osnovu ponašanja korisnika u oblasti tako da se obezbedi dovoljan kapacitet za korisnike koji provode vreme čekajući početak sledećeg sportskog događaja ili provodeći vreme u zabavljanju posle završetka dešavanja u Olimpijskom parku.

Vrednost parametra  $T$  određena je analizom rasporeda dešavanja (početka

dogadaja) u svim objektima u Olimpijskom parku. Za potrebe primera, prikazana je analiza za jedan dan, sa prikazanim srednjim i maksimalnim brojem posetilaca u izabranom danu u prostoru za okupljanje posetilaca. Realno je očekivati da tokom kvalifikacija bude održano više takmičenja u istom danu pa čak i istovremeno, zbog čega se veći broj posetilaca okuplja u prostoru za okupljanje posetilaca, te da su dani kvalifikacija zahtevniji za radio-pristupnu mrežu sa stanovišta ponude telekomunikacionih servisa. Prostor namenjen okupljanju posetilaca se može tretirati kao entitet (objekat) sa 2 stanja: srednjim brojem posetilaca (korisnika) i maksimalnim brojem posetilaca u oblasti, SI.7.2.4.



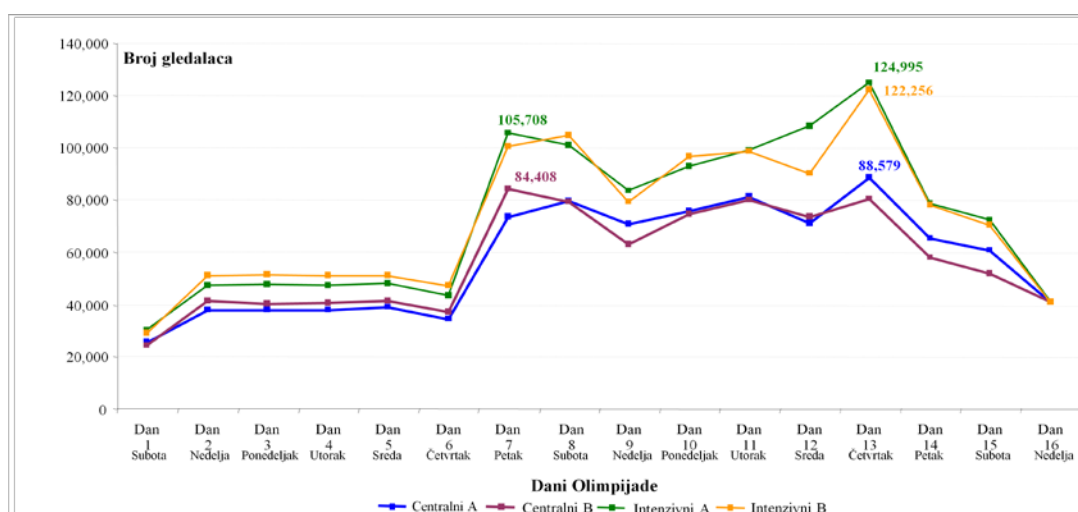
Slika 7.2.4 – Broj posetilaca tokom izabranog dana u prostoru namenjenom okupljanju posetilaca [53].

Pretpostavljeno je da će svi korisnici doći pre početka događaja u svom objektu, kao i da će ostati do kraja događaja a da će sva mesta biti popunjena u objektu. Ovaj scenario ponašanja posetilaca je označen kao intezivni A scenario (*High A*), [53], na SI.7.2.4. Može se videti da predikcija ponašanja korisnika predviđa veliki broj korisnika u prostoru namenjenom okupljanju posetilaca u dugom vremenskom intervalu, sredinom dana, koji iznosi skoro 7 sati. Ovo ne znači da se isti posetioci zadržavaju u prostoru svih 7 sati već da njihov broj ima približno konstantnu vrednost tj. da je uravnotežen broj odlazećih i dolazećih posetilaca. Konkretno, najnepovoljniji scenario predviđa da isti posetioci borave do 3 sata u prostoru za okupljanje posetilaca i da 80%

posetilaca Olimpijskog parka provede vreme i u ovom prostoru. Izuzetak predstavlja dan održavanja atletskog mitinga i dekatlona posebno, kada isti posetioci mogu boraviti duže u prostoru za okupljanje korisnika. U slučaju drugih scenarija, kada korisnici ne ostaju na svojim sedištima tokom celog trajanja događaja, dve vršne vrednosti u prostoru za okupljanje korisnika se sreću.

Na osnovu analize ponašanja (kretanja) posetilaca u toku Olimpijskih igara može se zaključiti da maksimalni broj korisnika u prostoru za okupljanje korisnika dostiže 106,000 posetilaca 7. dana dok 13. dana taj broj iznosi 125,000 posetilaca istovremeno prisutnih u pomenutom prostoru, Sl.7.2.5. Takođe, sa Sl.7.2.4 se može videti da broj posetilaca (korisnika) vrlo brzo menja vrednost od malog broja do maksimuma i ponovo od maksimuma do vrlo malog broja posetilaca u oblasti. Promena od maksimalne do minimalne vrednosti dešava se u okviru istog sata i vreme se može meriti u minutama. Zbog toga se sve promene mogu tretirati gotovo trenutne i kao vrlo brze.

Model koji pretpostavlja vršni broj korisnika od 106,000 je usvojen kao model za analizu jer je to približan broj korisnika tokom 4. avgusta, dana za koji je izvršena i analiza za košarkašku salu. Primetno je da ostali modeli predviđaju znatno manje posetilaca u pomenutoj oblasti jer ne predviđaju potpuno zauzeta sedišta na skupovima. Raspored sportskih događaja tokom 4. avgusta je prikazan u Tab.7.2.5.



Slika 7.2.5 – Vršni broj posetilaca u prostoru za okupljanje posetilaca [53].

Tabela 7.2.5 – Raspored događaja u Olimpijskom parku 4. avgusta 2012. godine.

Vreme	Oblast namenjena okupljanju korisnika	Košarkaška sala	Velodrom	Rukometna sala	Stadion za hokej na travi	Centar za sportove na vodi	Bazen za vaterpolo		
08:00	Manje od 20,000 posetilaca								
08:15					16+270=286				
08:30					Kvalifikacije 2 utakmice				
08:45		15+240=255							
09:00		Kvalifikacije 2 utakmice							
09:15						5+210=215			
09:30							Kvalifikacije 2 utakmice		
09:45						20+180=200			10+180=190
10:00						Omnium			Kvalifikacije 2 utakmice
10:15						Leteći krug			

Vreme	Oblast namenjena okupljanju korisnika	Košarkaška sala	Velodrom	Rukometna sala	Stadion za hokej na travi	Centar za sportove na vodi	Bazen za vaterpolo
10:30			Sprint Kvalifikacije 1/16 finala				
10:45							
11:00							
11:15							
11:30							
11:45			$30+(-65)=-35$				
12:00							
12:15							
12:30					$31+(-30)=1$		
12:45							
13:00	od 60,000 do	$30+(-15)=15$		$15+0=15$			
13:15	106,000 i						



<i>Vreme</i>	<i>Oblast namenjena okupljanju korisnika</i>	<i>Košarkaška sala</i>	<i>Velodrom</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Stadion za hokej na travi</i>	<i>Centar za sportove na vodi</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>
13:30	125,000 posetilaca (u danu najveće posete)				16+(-45)=-29		
13:45					Kvalifikacije 2 utakmice		
14:00							10+(-75)=-65
14:15		15+(-75)=-60		5+(-90)=-85			Kvalifikacije 2 utakmice
14:30		Kvalifikacije 2 utakmice		Kvalifikacije 2 utakmice			
14:45							
15:00							
15:15							
15:30							
15:45						5+240=245 5+(-180)=-175	
16:00						Omnium	

<i>Vreme</i>	<i>Oblast namenjena okupljanju korisnika</i>	<i>Košarkaška sala</i>	<i>Velodrom</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Stadion za hokej na travi</i>	<i>Centar za sportove na vodi</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>			
16:15			30km trka							
16:30			Eliminaciona trka							
16:45										
17:00			Sprint							
17:15			1/16 repasaž 1/8 finala i						20+(-180)=- 160	
17:30			repasaži							
17:45			Trka za plasman od 9-12 mesta							
18:00							15+(-120)=- 105	31+(-120)=- 109	10+120=130	
18:15			Timska nadmetanja							Kvalifikacije
18:30										2 utakmice

<i>Vreme</i>	<i>Oblast namenjena okupljanju korisnika</i>	<i>Košarkaška sala</i>	<i>Velodrom</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Stadion za hokej na travi</i>	<i>Centar za sportove na vodi</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>	
18:45		$30+(-75)=-45$	1. runda i finala Proглаšenje pobednika		$16+60=76$			
19:00			$30+(-60)=-30$		Kvalifikacije 2 utakmice			
19:15				$5+30=35$		$13+30=43$		
19:30				Kvalifikacije 2 utakmice		Kvalifikacije 2 utakmice		1500m slobodnim stilom Finale, proглаšenje pobednika
19:45		$15+0=15$						
20:00	Manje od 20,000 posetilaca	Kvalifikacije 2 utakmice		Kvalifikacije 2 utakmice	Kvalifikacije 2 utakmice	1500m slobodnim stilom Finale, proглаšenje pobednika		
20:15								
20:30								
20:45								

<i>Vreme</i>	<i>Oblast namenjena okupljanju korisnika</i>	<i>Košarkaška sala</i>	<i>Velodrom</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Stadion za hokej na travi</i>	<i>Centar za sportove na vodi</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>
21:00						4×100m štafeta Finale, proglašenje pobednika  50m slobodnim stilom Finale, proglašenje pobednika	
21:15						28+75=103 28+(-45)=-17	20+(75)=95 20+(-45)=-25
21:30							

<i>Vreme</i>	<i>Oblast namenjena okupljanju korisnika</i>	<i>Košarkaška sala</i>	<i>Velodrom</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Stadion za hokej na travi</i>	<i>Centar za sportove na vodi</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>	
21:45								
22:00	približno 40,000 posetilaca							
22:15								
22:30								
22:45								
23:00	Manje od 20,000 posetilaca			15+0=15	31+0=31			
23:15								
23:30								
23:45								
00:00								
00:15		30+(60)=90						

Brojevi prikazani u Tab.7.2.5 predstavljaju kombinovana vremena (iskazana u minutima) koja se koriste da bi se odredila vrednost parametra  $T$  iz Tab.7.1.6. U slučaju oblasti namenjene okupljanju korisnika svi brojevi su prikazani crnom bojom jer se ne mogu izdvojiti kritični skupovi po pitanju uticaja na oblast niti ima smisla posebno posmatrati početke i krajeve događaja u smislu pojedinačne kritičnosti vremenskog trenutka. Zbog toga je prikazano vreme za događaj za koji se smatra da više utiče na broj korisnika u oblasti namenjenoj okupljanju korisnika, umesto razmatranja početaka i završetaka skupova u odnosu na oblast od interesa, kao što je to rađeno pri analizi rizika kod košarkaške sale (jer u oblasti ne postoji trenutak početka i kraja okupljanja).

Može se videti da je u izabranom danu aktivnost posetilaca u prostoru namenjenom okupljanju posetilaca opisan sa 2 perioda kada je broj korisnika veći od 20,000. Parametar  $T$  za period aktivnosti je izračunat kao suma vrednosti parametra  $T$  koji je posledica uticaja svih objekata u Olimpijskom parku, u kojima se održavaju takmičenja.

Tokom analize uticaja događaja u objektima na broj posetilaca u prostoru namenjenom njihovom okupljanju, za događaje od interesa su analizirani i trenuci početka i kraja događaja. Ovo je učinjeno zbog toga što su tako analizirani i posetioci koji dolaze na izabrani događaj i oni koji odlaze tako da su svi slučajevi uticaja na broj korisnika u prostoru za okupljanje korisnika analizirani.

Može se videti da drugi objekti, u zavisnosti od perioda dana, imaju manji ili veći uticaj na okupljanje korisnika u oblasti namenjenoj tome. Može se videti da za izabrani dan (4. avgust) i izabrani model ponašanja korisnika (model A visokog intenziteta), skupovi koji se održavaju u Olimpijskom parku neće svojim počecima ili svojim završecima uticati, u istom kritičnom periodu dana, na oblast namenjenu okupljanju posetilaca. Zbog toga, 2 perioda potencijalno velikog broja posetilaca u oblasti okupljanja posetilaca (i veće aktivnosti unutar oblasti) mogu se analizirati kao nezavisni događaji.

Na osnovu prethodno definisanog algoritma, za aktivnosti u oblasti namenjenoj okupljanju posetilaca, pojedinačne vrednosti parametra  $T$  su izračunate i ukupna

vrednost parametra  $T$  za ceo dan za oblast je izračunata kao srednja vrednost vrednosti parametara  $T$  svih objekata koji utiču na oblast namenjenu okupljanju posetilaca Olimpijskog parka, Tab.7.2.6.

*Tabela 7.2.6 – Uticaj događaja u objektima u Olimpijskom parku na aktivnosti u prostoru namenjenom okupljanju posetilaca, za 4. avgust 2012. godine.*

<i>Skup</i>	<i>Uticaj</i>	<i>Košarkaška sala</i>	<i>Velodrom</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Stadio za hokej na travi</i>	<i>Centar za sportove na vodi</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>	<i>Ukupno</i>
Podne i poslepodne	Od skupa koji se održava ranije	0	0	0	0	0	0	0
	Početak skupa	0	0	0	0	0	0	0
	Kraj skupa	2	1.5	2	2	0	1	8.5
	Od skupa koji se održava kasnije	0.5+2	0+0	0+1	1.5+0	0+1	0+0	6
	Međusuma	4.5	1.5	3	3.5	1	1	<b>14.5</b>
Veče	Od skupa koji se održava ranije	0	0	0	0	0	0	0
	Početak skupa	0	0	0	0	1.5	1.5	3
	Kraj skupa	0.75	1.5	0	0	0	0	2.25



<i>Skup</i>	<i>Uticaoj</i>	<i>Košarkaška sala</i>	<i>Velodrom</i>	<i>Rukometna sala</i>	<i>Stadio za hokej na travi</i>	<i>Centar za sportove na vodi</i>	<i>Bazen za vaterpolo</i>	<i>Ukupno</i>
	Od skupa koji se održava kasnije	0	0	2	1	0	0	3
	Međusuma	0.75	1.5	2	1	1.5	1.5	<b>8.25</b>
Ukupno		5.25	3	5	4.5	2.5	2.5	<b>22.75</b>
Srednje <i>T</i> po danu		1.75	1.5	1.667	1.5	2.5	0.83	<b>11.375</b>
Srednje <i>T</i> po danu i po događaju		1.75	1.5	1.667	1.5	2.5	0.83	<b>1.896</b>

Može se uočiti da je dnevni raspored događaja (skupova) dobar i značajnijih preklapanja događaja tokom dana nema. Očekivano je da košarkaška i rukometna sala imaju najveći uticaj na aktivnosti u oblasti namenjenoj okupljanju posetilaca za izabrani dan. Stadion za hokej na travi ima, takođe, značajan uticaj ali je pretpostavljeno u analizi da će posetioci koristiti sve staze (putanje) jednakim intenzitetom. Centar za sportove na vodi i bazen za vaterpolo imaju relativno mali uticaj iz više razloga. Jedan od razloga je broj posetilaca Centra za sportove na vodi i bazena za vaterpolo koji je manji u odnosu na broj posetilaca u košarkaškoj sali ili na stadionu za hokej na travi. Drugo, skupovi u ova dva objekta u kojima se održavaju sportovi na vodi su relativno retki a broj sedišta oko bazena za vaterpolo je i mali pa taj mali broj korisnika relativno brzo ulazi u objekat. Takođe, posetioci ova dva objekta na dolasku i na odlasku, zbog položaja ovih objekata u parku, ne prolaze u većem broju pored oblasti namenjene za okupljanje posetilaca u Olimpijskom parku.

Važno je primetiti da veliki broj posetilaca ostaje u prostoru za okupljanje posetilaca čak do 7 sati. Ovi posetioci, kao što je već pomenuto, nisu isti što znači da su staze u okolini oblasti popunjene posetiocima koji dolaze u oblast i odlaze iz nje tokom sredine dana i večeri. Takođe je značajno primetiti da više događaja u različitim objektima može uticati na aktivnosti u oblasti namenjenoj okupljanju posetilaca tokom sredine dana. Očigledno, sva aktivnost tokom sredine dana ili uveče može se smatrati kritičnom jer se u tim periodima dana održava i najveći broj skupova (događaja) u Olimpijskom parku. To je takođe i vreme kada broj posetilaca u Olimpijskom parku dostiže svoj maksimum.

Rukometna sala ostvaruje veliki uticaj zbog toga što se periodi održavanja događaja u rukometnoj sali i aktivnosti u prostoru namenjenom okupljanju korisnika preklapaju. Slično preklapanje se uočava i sa događajima u košarkaškoj sali ali zbog međusobne udaljenosti ovo preklapanje nije kritično. Položaj oblasti namenjene okupljanju posetilaca parka je takav da se nalazi na približno istoj udaljenosti od svih objekata. Dodatna kontrola uticaja događaja u košarkaškoj sali na oblast namenjenoj okupljanju posetilaca može se postići kao i u prethodnim analizama, uzimajući u obzir broj posetilaca koji prolaze pored oblasti namenjene okupljanja posetilaca na putu ka košarkaškoj sali. Usvojeni model podrazumeva da su sve staze za prilaz košarkaškoj sali

koriste jednakim intenzitetom ali ako se primeni analiza kontrole kretanja pešaka i kretanja grupe tada je moguće da samo 15% posetilaca na putu ka košarkaškoj sali prođe pored oblasti najenjenjene okupljanju posetilaca.

Stadion za hokej na travi takođe ima veliki uticaj na dešavanja u oblasti namenjenoj okupljanju posetilaca. Uticaj se, kao i u slučaju drugih objekata, može dodatno skalirati procentom posetilaca stadiona koji prolaze stazama pored oblasti gde se posetioci parka okupljaju. Stadion za hokej na travi i oblast namenjena okupljanju posetilaca su međusobno razdvojeni rukometnom salom i IBC/MPC-om.

Centar za sportove na vodi nema uticaja na dešavanja u oblasti namenjenoj okupljanju posetilaca pratično uopšte, dok bazen za vaterpolo može ostvariti mali uticaj zbog broja događaja i vremena njihovog održavanja u ovom objektu. Može se videti da rastojanje između ovih objekata i pomenute oblasti nije velika ali posetioci ova 2 objekta prolaze pored oblasti namenjene okupljanju posetilaca samo u slučaju kada planiraju da posete događaj u rukometnoj sali, na stadionu za hokej na travi ili samu oblast. U svim drugim slučajevima, posetioci ova dva objekta neće koristiti staze pored oblasti za okupljanje posetilaca. Ponovo, kao i u slučaju prethodnog primera, pretpostavljeno je da su sve staze jednako opterećene ali se procentom korisnika koji prolaze pojedinačnim stazama može dodatno skalirati parametar  $T$ . Posetioci bazena za vaterpolo i Centra za sportove na vodi mogu imati uticaj na Stratford stanicu, više nego na oblast za okupljanje posetilaca u Olimpijskom parku.

Ponovo su prikazane 2 vrednosti za parametar  $T$ . Prva vrednost predstavlja srednju vrednost parametra  $T$  po danu, normalizovana brojem dešavanja u oblasti namenjenoj okupljanju korisnika (konkretno sa 2 perioda aktivnosti posetilaca u oblasti u toku dana). Ova vrednost služi kao sveukupna procena rizika preopterećenja radio-pristupne mreže u oblasti u danu od interesa. Druga vrednost je usrednjena vrednost parametra po danu i po objektu koji ostvaruje uticaj na dešavanja u oblasti namenjenoj okupljanju posetilaca. U slučaju ove oblasti radi se o 6 objekata. Ova vrednost pokazuje prosečan uticaj koji ima pojedinačni objekat na svako pojedinačno dešavanje u oblasti od interesa. Ova, dvostruko usrednjena vrednost, uzeta je kao konačna vrednost u analizi rizika i karakterizaciji događaja jer su i dinamika događaja i položaj objekta u kom se događaj održava povezani sa istim događajem.

Ukupna težinska vrednost za oblast namenjenu okupljanju posetilaca Olimpijskog parka na dan 4. avgusta jednaka je,

$$\begin{aligned} W &= a \times D + b \times P + c \times T = \\ &= 0.4 \times 2 + 0.3 \times 0.43155 + 0.3 \times 1.896 = 1.4983 \end{aligned} \quad (7.2.2)$$

Vrednost parametra  $P$  usvojena je tako da uključuje isključivo uticaj sportskih objekata. Druge vrednosti date u Tab.7.2.4 mogu se koristiti u slučaju da je potrebno utvrditi uticaj i objekata čija namena nije sportska. Iako je vrednost parametra  $W$  veća u slučaju oblasti namenjene okupljanju posetilaca u odnosu na košarkašku salu, razlika je mogla biti i veća u slučaju da su objekti u pomenutoj oblasti posmatrani kao nezavisni, odnosno da su razmatrani pojedinačno. Čak i u ovom slučaju, položaj oblasti namenjene okupljanju posetila u Olimpijskom parku pokazuje se, prema broju posetilaca, srednjem broju posetilaca koji se zadržavaju u oblasti i rasporedu događaja u objektima u Olimpijskom parku, kao kritičnija u odnosu na košarkašku salu.

Za punu analizu kritičnosti pojedinih događaja u Olimpijskom parku i celokupnu sliku stanja, svaki događaj tokom svakog dana Olimpijskih igara je potrebno da se analizira i odredi vrednost parametra  $W$ . Na osnovu vrednosti parametara  $D$ ,  $P$ ,  $T$  i  $W$ , spisak u opadajućem poretku po vrednosti parametra  $W$  treba da se kreira tako da se istaknu najkritičniji događaji u toku Olimpijskih igara. Pored toga, vrednosti parametara  $D$ ,  $P$  i  $T$  će pokazati razlog zbog čega se pojedini događaj smatra kritičnim.

### **7.3 PRIMER KARAKTERIZACIJE SKUPA KOJI NIJE SPORTSKI**

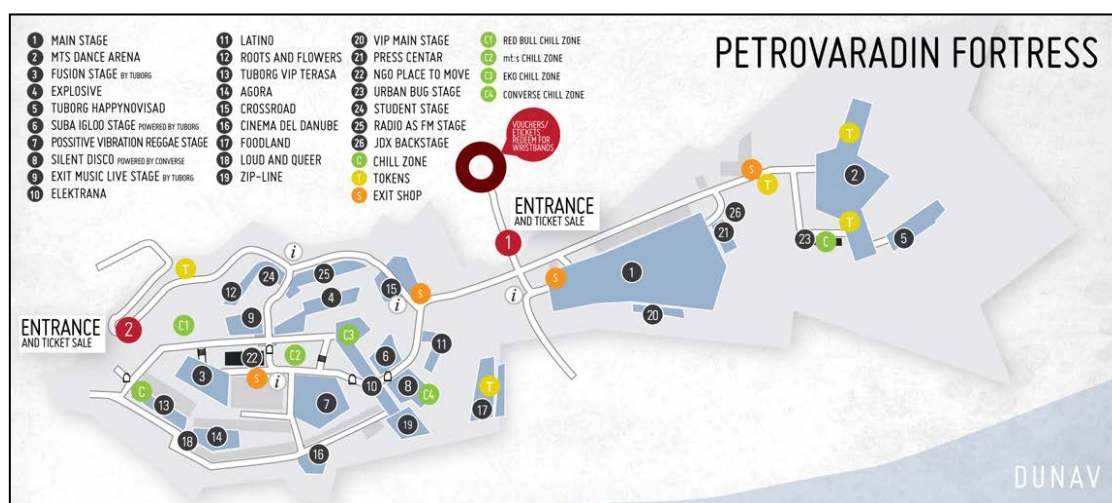
Događaji koji nisu sportski mogu se takođe analizirati sa stanovišta kategorizacije (karakterizacije) skupa. Ovi skupovi koji su obično periodični te podaci o skupovima iz više prethodnih godina mogu iskoristiti i kao podaci za „treniranje“ funkcije rizika. Kao primer skupa koji nije sportski, na Sl.7.3.1 prikazane su bine na muzičkom festivalu *Exit* u Novom Sadu.

Muzički festivali odlikuju se sa nekoliko elemenata koji se mogu analizirati na isti ili vrlo sličan način kao i u slučaju sportskih događaja:

- Svi događaji se dešavaju skoro u isto vreme;

- Model ponašanja korisnika na skupovima male dinamike je primenljiv i na muzičkim skupovima uz intenzivniju upotrebu servisa prenosa podataka;
- Prosečno vreme zadržavanja na muzičkom festivalu u toku dana je između 5 i 10 sati, u zavisnosti od broja bina, organizacije festivala itd.

U konkretnom slučaju, može se videti da se na Petrovaradinskoj tvrđavi, na relativno malom prostoru, nalazi veliki broj bina. Zbog toga je određivanje kvadranta sa pojedinačnim objektima (binama) praktično nemoguće. Ovo pokazuje da su centralne bine osjetljivije na interferenciju koja dolazi od susjednih bina i da organizacija bina može imati uticaj na interferenciju i potreban kapacitet u radio-pristupnoj mreži.



Slika 7.3.1 – Petrovaradinska tvrđava u Novom Sadu sa binama muzičkog festivala Exit [54].

Na SI.7.3.2 prikazan je raspored stalnih lokacija baznih stanica operatora kojim se vrši pokrivanje Petrovaradinske tvrđave. Žutom bojom označene su lokacije koje sadrže po 6 sektora GSM900, GSM1800 i UMTS2100 dok su braon bojom prikazane lokacije koje sadrže samo GSM1800. Trajanje festivala je 4 dana a tokom 2012. festival je posetilo 150,000 a 2013. godine 200,000 posetilaca. Očito da postojeća infrastruktura na Petrovaradinskoj tvrđavi nije dovoljna da zadovolji navedeni broj korisnika te je pred svako održavanje festivala potrebno instalirati privremene lokacije kako bi se povećao kapacitet radio-pristupne mreže. Takođe, promena broja korisnika (posetilaca festivala) varira od 150,000 do 200,000 posetilaca u različitim godinama održavanja festivala. Stoga, analiza njihovog ponašanja, kretanja tokom festivalskih večeri i prosečnog

vremena zadržavanja na tvrđavi mogu poslužiti optimizaciji radio-pokrivanja i kapaciteta radio-pristupne mreže u cilju minimizacije angažovanih resursa.



*Slika 7.3.2 – Raspored stalnih lokacija baznih stanica na Petrovaradinskoj tvrđavi.*

## **8. ZAKLJUČAK**

Veliki skupovi postaju vrlo česti ali, generalno, projektovanje radio-pristupne mreže za ovakve skupove nije dovoljno analizirano, posebno kada se posmatraju očekivanja krajnjih korisnika i njihovo zadovoljstvo pruženim servisom. Jasno je da se saobraćajni profili korisnika iz makro mreža ne mogu direktno primeniti na korisnike u mrežama koje su namenjene specijalnim slučajevima. Profil korisnika u makro mreži određen usrednjenim ponašanjem korisnika, koji se odlikuju svojim specifičnostima, uz veliku prostornu dostupnost servisa ali i mogućnost da korisnici promene svoju poziciju (veliku mobilnost). Korisnici na velikim skupovima imaju jasan zahtev o praktično stalnoj dostupnosti servisa na istoj (mikro) lokaciji. Takođe, kretanje korisnika je manje i znatno sporije (praktično su statični većinu vremena), trajanje skupova kojem prisustvuju je kraće od vremena analize makro mreže (što je svakodnevni posao) i ponašanje korisnika je uniformnije jer je određeno dinamikom događaja kom prisustvuju. Ove razlike su takve da se saobraćajni profili korisnika iz makro mreža ne mogu primeniti niti se saobraćaj može posmatrati na dnevnom nivou preko srednjih vrednosti parametara jer u slučaju velikih skupova srednje vrednosti su često i maksimalne. Zbog toga je projektovanje mreže zahtevnije, kako u tehničkom tako i finansijskom smislu, i zasniva se na proceni maksimalnih (i trenutnih) potrebnih resursa mreže.

Projektovanje radio-pristupne mreže za velike skupove specifično je i zbog velike cene loše procene potrebnih resursa. U slučaju da se potrebni resursi potcene, krajnji korisnici će imati percepciju loše radio-pristupne mreže i loših servisa što će za posledicu imati loš utisak o operatoru i gubitak saobraćaja. Sa druge strane, precenjena investicija u potrebne resurse predstavlja izuzetno finansijsko opterećenje za operatora ali i složenije projektovanje mreže.

Predloženi, novi, pristup procene iskorišćenja resursa razvijen je na osnovu kategorizacije velikih skupova na one velike i one male dinamike dešavanja. Za svaku vrstu skupa kreiran je odgovarajući saobraćajni profil i opisano ponašanje korisnika. Razvijen je simulacioni model kako bi se procenili potreban broj sektora, kapacitet radio-pristupne mreže i RNC-a za različite vrste skupova. Na osnovu rezultata simulacije i prikazanih scenarija primene na velikom skupu poput Olimpijskih igara, može se videti da za mali broj korisnika, ponašanje korisnika ne utiče značajnije na potreban kapacitet mreže. U slučaju velikog broja korisnika, broj potrebnih sektora i kapacitet pokazuju značajnu osetljivost i velike promene.

Na osnovu prikazanih rezultata se može zaključiti da promena u obimu saobraćaja može biti desetostruka poredeći maksimalne i minimalne zahteve. Zbog toga je razvijena funkcija troška kako bi se ocenila složenost i uticaj na kvalitet ponuđenog servisa na velikim skupovima. Na osnovu predložene funkcije i rezultata simulacije, može se zaključiti da je trošak obezbeđivanja neophodnih resursa stepenasta funkcija sa različitom cenom po Mb/s i broju angažovanih sektora, zbog diskretne prirode resursa i hardverskih ograničenja za ponuđeni kapacitet. Može se zaključiti da dok god nije potrebno povećanje količine opreme (*upgrade*), troškovi po Mb/s se vrlo sporo menjaju sa stepeničastim promenama na kapacitetima kada je potrebno povećati (*upgrade*-ovati) opremu. Čak i u situacijama kada je potrebno dodati novu opremu, ukupni troškovi po Mb/s rastu vrlo sporo. Primetno je da i u situaciji kada nije potrebno dodati novu opremu, ukupni troškovi za kapacitet vrlo malo rastu zbog povećanja ukupno prenetog saobraćaja sa povećanjem broja korisnika. U isto vreme, troškovi po Mb/s se smanjuju po pojedinačnom korisniku zbog boljeg iskorišćenja resursa i raspodele osnovnih troškova na veću grupu korisnika. Može se zaključiti da, za usvojene saobraćajne profile korisnika i funkciju troška, troškovi implementacije dodatne opreme rastu za 20,000 a zatim ponovo za 80,000 korisnika. Za brojeve korisnika između ove dve kritične vrednosti, zahtevani kapacitet za različite predložene scenarije će zahtevati sličnu hardversku konfiguraciju odnosno sličnu opremu. Može se zaključiti da RNC ima značajan uticaj na funkciju troška zbog svoje vrednosti i zbog značajnog povećanja broja podržanih korisnika posle *upgrade*-a. Promena broja ploča sa CE-ovima manje utiče na funkciju troška zbog niske cene pojedinačne ploče u odnosu na cenu RNC-a i kompletne mreže.



Pokazano je da se ušteda može ostvariti ako se odredi kritičan broj istovremenih korisnika koji se mogu podržati u mreži uz minimizaciju troška. Primenom predložene funkcije troška utvrđeno je da je uz nedostatak potrebnog kapaciteta u manje od 1% slučajeva moguće smanjiti količinu potrebne opreme za 10% stvarajući tako značane uštede.

Rezultati simulacije radio-intefejsa pokazuju da su radio-mreže u slučaju velikih skupova dominantno ograničene po kapacitetu. U većini slučajeva postoji linija optičke vidljivosti između antene NodeB-a i kranjeg korisnika, bilo da se radi o mreži unutar objekta ili u spoljnoj mreži između grupe objekata. Zbog toga je preporučeno da se koriste antene užeg glavnog snopa zračenja u dijagramu zračenja antene nego što je nominalna širina sektora kako bi se smanjila intraćelijska i interćelijska interferencija. Radio-kanal se može definisati kao *Rice*-ov i samo u nekim slučajevima kao *Rayleigh*-jev (kao u makro mrežama). Prethodno navedene razlike u odnosu na makro mrežu čine da je određivanje analitičkog modela složeno zbog čega je predložena primena specifičnih modela i funkcije rizika procene kritičnosti događaja i preopterećenja radio-pristupne mreže.

Imajući u vidu specifičnost velikih skupova, problem njihove kategorizacije i određivanja ponašanja radio-pristupne mreže u slučaju velikih skupova, razvijena je i funkcija rizika koja određuje relativni koeficijent složenosti skupa sa stanovišta potencijalnog preopterećenja radio-pristupne mreže. Ova funkcija zasniva se na 3 parametra: vrsti dinamike skupa, prostornom položaju i relativnom vremenskom trenutku kada se skup održava. Pokazano je da se u slučaju većeg broja skupova na malom prostoru, kakav je slučaj sa Olimpijskim igrama, može utvrditi relativan odnos između skupova i izvršiti njihovo rangiranje po uticaju na mrežu. Ovo rangiranje je prevashodno vezano za kretanje korisnika i procenu njihove pozicije na osnovu ponašanja diktiranog skupovima koji se održavaju. Smatrano je da je neočekivano povećani broj korisnika, na malom prostoru koji se pokriva jednim IBS-om, rizik da dodje do preopterećenja radio-pristupne mreže. Ponašanje korisnika i potencijalni rizik određeni su vremenom odlaska i povratka sa skupa, položajem skupa koji određuje pravce kretanja korisnika i vrstom skupa koja određuje ponašanje već postojećih korisnika koji prisustvuju skupu.

Relativan odnos kritičnih parametara može se odrediti na osnovu fiksnih vrednosti koeficijena ali se može vršiti i njihovo „treniranje“, odnosno podešavanje, na osnovu iskustava sa sličnih skupova ili sa istih skupova održanih prethodnih godina. Vidljivo je u datoj analizi da je kritičan element kvaliteta ocene tačnost početnih pretpostavki, odnosno početnih rezultata. Jedan od načina prikupljanja tačnih podataka može biti primena virtuelnih drive test (*Virtual Drive Test*, VDT) alata ili mrežne statistike. U slučaju VDT alata posebno je pogodno što su sportski ili muzički objekti, u suštini, jednospratni, odnosno i kada postoji više nivoa – svi su namenjeni posetiocima koji su najbrojnija grupa korisnika. Zbog toga se ne javljaju problemi sa neodređenošću pozicije korisnika po visini i ostvaruje se maksimalna korist koje ovakvi alati mogu da pruže.

Rezultati prikazani u radu mogu se koristiti za različite vrste skupova kao i za različite tehnologije a ne samo za UMTS, kao što je prikazano. Na primer, imajući u vidu da se i u slučaju eNodeB-a mogu utvrditi veze između hardverskih resursa (ploča), kontrolnog signaliziranja i podržanog saobraćaja to se može odrediti i broj podržanih LTE korisnika, slično slučaju kada se primenjuje UMTS. Šire posmatrano, poslednji trendovi izgradnje radio-pristupnih mreža unutar objekata, upućuju na trend konsolidacije opreme i obrade saobraćaja u osnovnom opsegu učestanosti. Tako se kod javnih zgrada često primenjuje distribuirani antenski sistem sa konsolidovanom opremom na jednom mestu. Sa druge strane, kod rezidencijalnih korisnika se instaliraju male bazne stanice, *access point*-i, koji se, zbog svoje masovnosti, projektuju da imaju što manje složenih funkcija a složene obrade i funkcije upravljanja se vrše sa udaljene lokacije na kojoj su konsolidovane glavne funkcije mreže. Zato je važno da se dalje istraživanje usmeri na konsolidaciju opreme, kreiranje oblaka servisa za krajnje korisnike i istraži ponašanje korisnika na velikim skupovima kako bi se krajnjim korisnicima pružio potreban skup servisa uz optimalan odnos njihovog zadovoljstva i troška izgradnje, kako u slučaju specijalnih skupova, tako i u slučaju makro mreža. Maksimalan kapacitet može se ostvariti kombinovanjem tehnologija pametnih antena (npr. primenom MIMO nizova i usmerenih snopova zračenja) što u slučaju velikih skupova nije primenjivano do sada na dovoljno efikasan način, sa rezultatima istraživanja efikasnijeg korišćenja radio-interfejsa i brzog i efikasnog procesiranja poziva i servisa.

## 9. LITERATURA

- [1] Rosenberg A., Kemp S. (2003). *CDMA Capacity and Quality Optimization*. ISBN: 9780071399197, New York: McGraw-Hill.
- [2] Kim K., Koo I. (2005). *CDMA Systems Capacity Engineering*. ISBN: 978-1580538121, Norwood MA: Artech House.
- [3] Rümmler R., Ashraf I., Aghvami A.H. (2004). Impact of code orthogonality, power control error and source activity on the capacity of multicast transmissions in WCDMA. In *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, (No. 1, pp. 1695-1699).
- [4] Dharmaja S., Jindal V., Varshney U. (2008). Reliability and Survivability Analysis for UMTS networks: An Analytical Approach, *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 5 (3) 132–142.
- [5] Vujic D.S., Certic J.D (2014). UMTS RAN Capacity for Special Events, *Wireless Personal Communications*, DOI: 10.1007/s11277-014-1617-2.
- [6] Vujic D. S., (2011). Big Events Capacity Analysis of UMTS RAN. In *10<sup>th</sup> IEEE International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services, TELSIKS*, (Vol.2, pp.681-685).
- [7] Isotalo T., Lempiainen J., Niemela J. (2010). Indoor Planning for High Speed Downlink Packet Access in WCDMA Cellular Network, *Wireless Personal Communications*, 52 (1) 89-104.
- [8] Ata O.W., Shahateet A.M, Jawadeh M.I., Amro, A.I. (2013). An Indoor Propagation Model Based on A Novel Multi Wall Attenuation Loss Formula at Frequencies 900MHz and 2.4GHz, *Wireless Personal Communications*, 69 (1) 23-36.
- [9] Tan W.L., Lam F., Lau W.C. (2007). An Empirical Study on 3G Network Capacity and Performance. In *IEEE International Conference on Computer Communications, INFOCOM*, (No.1, pp.1513-1521).
- [10] Akl R., Nguyen S. (2006). Capacity Allocation in Multi-Cell UMTS Networks for Different Spreading Factors with Perfect and Imperfect Power Control. In *IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC*, (No. 1, pp. 928-932).
- [11] Hedge N., Altman E. (2006). Capacity of Multiservice WCDMA Networks with Variable GoS, *Wireless Networks*, 12 (2) 241-253.

- [12] Lee C.Y., Shin H.M. (2012). Cell Planning in WCDMA Networks for Service Specific Coverage and Load Balancing, *Wireless Personal Communications*, 67 (3) 721-739.
- [13] Saraydar C., Abraham S., Chuah M. C. (2003). Impact of Rate Control on the Capacity of an Iub Link: Multiple Service Case. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, (No. 1, pp. 1418-1423).
- [14] Al-Kanj L., Dawy Z., Turkiyyah G. (2012). A Mathematical Optimization Approach for Cellular Radio Network Planning with Co-Siting, *Wireless Networks*, 18 (5) 507-521.
- [15] Amaldi E., Capone A., Malucelli F. (2008). Radio Planning and Coverage Optimization of 3G Cellular Networks, *Wireless Networks*, 14 (4) 435-447.
- [16] Leu J.S., Lin C.K. (2011). On utilization Efficiency of Backbone Bandwidth for a Heterogeneous Wireless Network Operator, *Wireless Networks*, 17 (7) 1595-1604.
- [17] Giacomazzi P., Musumeci L., Verticale G. (2006). An Analytical Model Based on the ETSI Criteria for the Evaluation of User Satisfaction in UMTS, *Wireless Networks*, 12 (6) 789-796.
- [18] Wang J.B, Wang J.Y., Chen M. (2012). Downlink System Capacity Analysis in Distributed Antenna Systems, *Wireless Personal Communications*, 67 (3) 631-635.
- [19] Wang J.Y, Wang J.B., Chen M. (2013). System Capacity Analysis and Antenna Placement Optimisation for Downlink Transmission in Distributed Antenna Systems, *Wireless Personal Communications*, 71 (1) 531-554.
- [20] Ericsson AB (2007). Channel Element Dimensioning Guideline. 62/100 56-HSD 101 02/05 Rev A.
- [21] Yang S.C. (1998). *CDMA RF System Engineering*. ISBN: 0-89006-991-3 Norwood MA: Artech House.
- [22] Kim K.I. Editor (2000). *Handbook on CDMA System Design, Engineering and Optimization*. ISBN: 978-0130175724, New Jersey: Prentice Hall PTR.
- [23] Smith C., Collins D. (2007). *3G Wireless Networks*. 2<sup>nd</sup> Ed., New York: McGraw-Hill.
- [24] Koo I., Yang J., Kim K. (2002). Two Traffic Parameters Efficiently to Approximate the Call Blocking probability in CDMA Systems with 3 Sectors, *IEICE Transactions on Communications*., 85-B (4) 849-853.
- [25] Lee W.C.Y. (2005). *Wireless and Cellular Telecommunications*. 3<sup>rd</sup> Ed., ISBN: 978-0071436861 New York: McGraw-Hill.
- [26] Dukic M. L. (2001). WLL as Interferer. In P. Stavroulakis (Ed.). *Wireless Local Loops: Theory and Applications* (pp.191-228). ISBN: 978-0471498469, Chichester: John Wiley & Sons.
- [27] Vujic D.S. (2000). Analiza interferencije unutar SS DS-CDMA WLL sistema. Na 8. Telekomunikacionom Forumu, TELFOR, (Vol.1, pp. 481-484).

- [28] Schwartz M. (2005). *Mobile Wireless Communications*. ISBN: 978-0521843478, Cambridge: Cambridge University Press
- [29] Siomina I., Värbrand P., Yuan D. (2006). Automated Optimization of Service Coverage and Base Station Antenna Configuration in UMTS Networks, *IEEE Wireless Communications* 13 (6) 16-25
- [30] Fagen D., Vicharelli P.A., Weitzen J.A. (2008). Automated Wireless Coverage Optimization with Controlled Overlap, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57 (4) 2395-2403
- [31] Li Y., Feng Z., Xu D., Zhang Q., Tian H. (2011). Femtocell Base Stations' Parameters in Enterprise Femtocell Network, *In IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM*, (No.1, pp.1-5)
- [32] Shankar P. M. (2002). *Introduction to Wireless Systems*. ISBN: 978-0471321675 Chichester: John Wiley & Sons
- [33] Li X., Zaki Y. et al. (2008). HSUPA Backhaul Network Dimensioning. *In IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, (No.1, pp.528-533).
- [34] Svoboda P., Karner W., Rupp M. (2007). Modeling E-Mail Traffic for 3G Mobile Networks. *In IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, (No.1, pp.1190-1194).
- [35] Nokia Siemens Networks (2010). WCDMA RAN Rel. RU20 Operating Documentation.
- [36] Garcia A.E., Rodriguez L., Hackbarth K.D. (2012). Cost models for QoS-differentiated interconnecting and wholesale access services in future generation networks, *Telecommunication Systems*, 51 221-231.
- [37] Jarray A., Jaumard B., Houle A.C. (2012). CAPEX/OPEX effective optical wide area network design, *Telecommunication Systems*, 49 (4) 329-344.
- [38] Velez F.J., Cabral O., Merca F., Vassiliou V. (2012). Service characterization for cost/benefit optimization of enhanced UMTS, *Telecommunication Systems*, 50 (1) 31-45.
- [39] Timmermans H. (2009). *Pedestrian Behavior Models, Data Collection and Applications*. ISBN: 978-1-84855-750-5, Bingley: Emerald Group Publishing Limited.
- [40] Borgers A., Timmermans H. (1986). A Model of Pedestrian Route Choice and Demand for Retail Facilities Within Inner-city Shopping Areas. *Geographical Analysis*, 18 (2) 115–128.
- [41] Helbing D., Molnar P. (1995). Social Force Model for Pedestrian Dynamics. *Physical Review E*, 51(5), 4282–4286.
- [42] Kachroo P. (2009). *Pedestrian Dynamics : Mathematical Theory and Evacuation Control*. ISBN 978-1-4398-0519-0, Boca Raton: CRC Press.

- [43] Kachroo P., Al-Nasur S.J., Wadoo S.A., Shende A. (2008). *Pedestrian Dynamics: Feedback Control and Crowd Evacuation*. ISBN 978-3-540-75559-3, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- [44] Lighthill M.J., Whitham G.B. (1955). On Kinematic Waves – I: Flow Movement in Long Rivers, II: A Theory on Long Crowded Roads. *In Proceedings of Royal Society*, (No.A229, pp.281-335).
- [45] Richards P.I. (1956). Shockwaves on Highway, *Operations Research*, 4 42-51.
- [46] Greenshields D.B. (1935). A Study in Highway Capacity, *Highway Research Board*, 14 458.
- [47] Greenberg H. (1959). An Analysis of Traffic Flow. *Operation Research*, 7 78-85.
- [48] Bandini S. et al. (2011). A Knowledge-based Approach to Crowd Classification. In R.D. Peacock, E D. Kuligowski, J.D. Averill (Ed.). *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (pp.515-228). ISBN: 978-1-4419-9724-1, New York: Springer.
- [49] Moldovan H., et al. (2005). Football Stadium Simulation – A microscopic simulation of the pedestrian access (335-340). In N. Waldau, P. Gattermann, H. Knoflacher, M. Schreckenberg (Ed.). *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. ISBN 978-3-540-47062-5, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- [50] Schomborg A. Et al. (2011). Evacuation Assistance for a Sports Arena Using a Macroscopic Network Model (pp.389-398). In R.D. Peacock, E D. Kuligowski, J.D. Averill (Ed.). *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (pp.515-228). ISBN: 978-1-4419-9724-1, New York: Springer.
- [51] Chraibi M., Seyfried A. (2010). Pedestrian Dynamics with Event-Driven Simulation (pp.713-718). In W.W.Klingsch\_et al. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. ISBN: 978-3-642-04504-2.69, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- [52] Vujic D.S. (2013). On Indoor to Outdoor Radio Access Network Planning in Mobile Systems. *In IEEE International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services, TELSIKS*, (Vol.2, pp.623-626).
- [53] Ancliffe S. (2011). Olympic Park – Crowd Movement Update. Movement Strategies. London.
- [54] <http://www.exitfest.org>

## 10. SPISAK SKRAĆENICA

<i>Skraćenica</i>	<i>Značenje</i>
ANN	Artificial Neural Networks
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BH	Busy Hour
BHCA	Busy Hour Call Attempts
BHSA	Busy Hour Session Attempts
BSC	Base Station Controller
BTS	Base Transceiver Station
CAPEX	Capital Expenditures
CE	Channel Element
CoW	Cells on Wheels
CPICH	Common Pilot CHannel
CS	Circuit Switched
CW	Continuous Wave
DAS	Distributed Antenna System
DTM	Digital Terrain Model
EDGE	Enhanced Data rates for GPRS Evolution
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GERAN	GPRS/EDGE Radio Access Network
GIS	Geographical Information System
GoS	Grade of Service
GPRS	General Packet Radio Services
GSM	Global System for Mobile
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
HSxPA	High Speed Packet Access
IBC	International Broadcasting Centre
IBS	In-Building System

<i>Skraćenica</i>	<i>Značenje</i>
IP	Internet Protocol
KPI	Key Parameters Indicator
LAC	Location Area Code
LoS	Line of Site
LTE	Long Term Evolution
LWR	Lighthill-Whitham-Richards
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MPC	Media Press Centre
OPEX	Operational Expenditures
OTA	Over-The-Air
pdf	probability density function
PS	Packet Switched
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RAB	Radio Access Bearer
RAN	Radio Access Network
RANAP	Radio Network Application Part
RAT	Radio Access Technology
RF	Radio Frequency
RNC	Radio Network Controller
RSCP	Received Signal Code Power
RSSI	Received Signal Strength indicator
SGSS	Spektralna gustina srednje snage
SMS	Short Message Service
SNR	Signal to Noise Ratio
TDMA	Time Division Multiple Access
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telephone System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VDT	Virtual Drive Test
W-CDMA	Wide Band CDMA
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access



## **11. BIOGRAFIJA AUTORA**

Dejan S. Vujić rođen je 1975. godine u Beogradu. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu novembra 2000. godine na Odseku za elektroniku, telekomunikacije i automatiku, smer Telekomunikacije. Magistrirao je maja 2006. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, smer Telekomunikacije.

Od završetka osnovnih studija pa do danas zaposlen je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, pri Katedri za telekomunikacije, angažovan u više saradničkih zvanja.

U toku svog dosadašnjeg naučno-istraživačkog rada autor/koautor je 2 rada u časopisu sa SCI liste, 4 rada na konferencijama od međunarodnog značaja, 3 rada u časopisima od nacionalnog značaja, 1 rada po pozivu na konferenciji od nacionalnog značaja i 8 radova na konferencijama od nacionalnog značaja. Koautor je 6 pomoćnih udžbenika i drugih publikacija od kojih su 4 sa ISBN a 2 bez, kao i većeg broja praktikuma za potrebe izvođenja nastave u Laboratoriji za telekomunikacije Elektrotehničkog fakulteta.

Kao istraživač učestvovao u realizaciji 4 projekata tehnološkog razvoja finansiranih od strane Ministarstva Republike Srbije nadležnog za oblast nauke i tehnološkog razvoja u periodu 2002 - 2013 godine. Osim toga učestvovao je kao projektant saradnik ili odgovorni projektant u realizaciji većeg broja (više od 100) stručnih i naučnih projekata, studija, konsultantskih i drugih stručnih poslova izvedenih od strane Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu i drugih domaćih i inostranih kompanija, kako u zemlji tako i u inostranstvu (Crna Gora, Velika Britanija, Poljska, Katar, Meksiko).

Poseduje licence odgovornog projektanta za oblast telekomunikacionih sistema i mreža, i ovlašćenog izvođača radova za za oblast telekomunikacionih sistema i mreža pri Inženjerskoj komori Srbije. Član je međunarodnog udruženja IET.

## PRILOG 1 – IZJAVA O AUTORSTVU

Потписани Дејан Вујић  
број индекса \_\_\_\_\_

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Модел радио-мреже за приступ у случају великих скупова

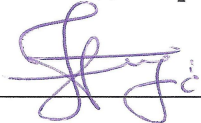
---

---

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

У Београду, 19.06.2014.

Потпис докторанда



---

## **PRILOG 2 – IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKOG RADA**

Име и презиме аутора Дејан Вујић  
Број индекса \_\_\_\_\_  
Студијски програм \_\_\_\_\_  
Наслов рада Модел радио-мреже за приступ у случају великих скупова  
Ментор проф. др Мирослав Л. Дукић

Потписани Дејан Вујић

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.

**Потпис докторанда**

У Београду, 19.06.2014.



## PRILOG 3 – IZJAVA O KORIŠĆENJU

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

Модел радио-мреже за приступ у случају великих скупова

---

која је моје ауторско дело.

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

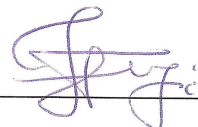
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

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).

Потпис докторанда

У Београду, 19.06.2014.



---

1. Ауторство - Дозвољавате 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. Дозвољавате 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. Дозвољавате 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. Дозвољавате 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. Дозвољавате 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. Дозвољавате 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.