



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## ΑΔ ΗΟΣ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΓΙΑ ΠΟΛΥΠΛΗΘΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΟΦΙΑ Θ. ΜΑΝΤΕΛΛΟΥ

**Επιβλέπων:** Παναγιώτης Γ. Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2018





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**AD HOC ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ  
ΓΙΑ ΠΟΛΥΠΛΗΘΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΟΦΙΑ Θ. ΜΑΝΤΕΛΛΟΥ**

**Επιβλέπων:** Παναγιώτης Γ. Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Π. Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Χ. Καψάλης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Γ. Φικιώρης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

**Αθήνα, Μάρτιος 2018**



.....  
Σοφία Θ. Μαντέλλου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Σοφία Θ. Μαντέλλου, 2018.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Παναγιώτη Γ. Κωττή για την πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Μέσα από τις επικοινωνιακές συζητήσεις μας, τις εύστοχες επισημάνσεις του και τις προσεκτικές διορθώσεις του, συνέβαλε έμπρακτα και καθοριστικά ώστε να προκύψει το τελικό αποτέλεσμα. Του οφείλω ένα ακόμη ευχαριστώ, γιατί με τις ενδιαφέρουσες και γεμάτες ουσία διαλέξεις των μαθημάτων του με ενέπνευσε να ακολουθήσω την κατεύθυνση των τηλεπικοινωνιών.

Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου Κωνσταντίνο Πιτερό και Αναστάσιο Μακρή για την ανιδιοτελή βοήθεια που μου παρείχαν με τις ιδέες και τις συμβουλές τους.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ θέλω να εκφράσω στους γονείς μου Θεόδωρο και Κωνσταντινιά και την αδερφή μου Δήμητρα, για την αδιάκοπη υλική, ηθική και ψυχολογική υποστήριξη τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου, καθώς επίσης και στο φίλο μου Βασίλη για τη συνεχή παρότρυνση και συμπαράστασή του.





*Στην οικογένειά μου,*



# Περιεχόμενα

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....   | <b>15</b> |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>Κατάλογος Σχημάτων</b> .....   | <b>19</b> |
| <b>Κατάλογος Πινάκων</b> .....  | <b>21</b> |
| <b>Κατάλογος Συντημήσεων</b> .....  | <b>22</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....  | <b>25</b> |
| 1.1 Η τηλεπικοινωνιακή αγορά και οι προκλήσεις της σήμερα .....                                       | 25        |
| 1.2 Τα πολυπληθή γεγονότα .....   | 27        |
| 1.2.1 Ad hoc δίκτυα για πολυπληθή γεγονότα.....   | 29        |
| 1.3 Υπάρχουσες λύσεις και προϊόντα για εξυπηρέτηση πολυπληθών γεγονότων .....                         | 30        |
| 1.3.1 Εμπορική λύση για τηλεπικοινωνίες εντός των πολυκαταστημάτων .....                              | 30        |
| 1.3.2 Λύσεις για την ανάπτυξη τηλεπικοινωνιακού δικτύου σε στάδια .....                               | 31        |
| 1.4 Σκοπός και διάρθρωση παρούσας εργασίας.....   | 32        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Ο ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗ ΧΡΗΣΤΩΝ</b> ..... | <b>35</b> |
| 2.1. Μαθηματικό μοντέλο περιγραφής της άφιξης των χρηστών.....  | 35        |
| 2.2 Περιγραφή προτεινόμενου αλγορίθμου .....  | 37        |
| 2.2.1 Τοποθέτηση κόμβων και κατανομή πόρων.....   | 37        |
| 2.2.2 Άφιξη και εξυπηρέτηση χρηστών.....  | 41        |
| 2.2.3 Μέτρα αξιολόγησης του προτεινόμενου αλγορίθμου .....  | 44        |
| 2.3 Προσομοίωση προτεινόμενου αλγορίθμου σε υπολογιστικό περιβάλλον .....                             | 45        |
| 2.3.1 Περιβάλλον προσομοίωσης .....   | 45        |
| 2.3.2 Σενάριο προσομοίωσης.....   | 46        |
| 2.3.2.1 Τοποθέτηση κόμβων .....   | 46        |
| 2.3.2.2 Διαστασιολόγηση του δικτύου και βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων.....                       | 47        |
| 2.3.2.3 Προσομοίωση της χρονικής και χωρικής εκδοχής κατανομής των χρηστών .....                      | 49        |
| 2.3.2.4 Προσομοίωση εξυπηρέτησης και υπολογισμός δεικτών αξιολόγησης .....                            | 52        |
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</b> .....  | <b>57</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-ΧΩΡΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΧΡΗΣΤΩΝ (SPATIAL DIFFERENTIATION FOR DISTRIBUTION OF USERS) .....</b> | <b>59</b> |
| 3.1 Χρήση χωρικά μεταβαλλόμενης συνάρτησης $\lambda^t(x,y)$ .....  | 59        |
| 3.2 Οριοθέτηση της περιοχής ενδιαφέροντος εντός του χώρου διεξαγωγής του πολυπληθούς γεγονότος .....               | 60        |
| 3.3 Πρώτο σενάριο αξιοποίησης της χωρικής διαφοροποίησης της έντασης κατανομής χρηστών .                           | 61        |
| 3.3.1 Παρουσίαση σεναρίου A .....  | 61        |
| 3.3.2 Προσομοίωση προτεινόμενου αλγορίθμου για το σενάριο A .....  | 63        |
| 3.3.2.1 Τοποθέτηση των κόμβων AP για κάλυψη του χώρου S και κατανομή των πόρων σε αυτούς .....                     | 63        |
| 3.3.2.2 Εμφάνιση χρηστών στο χώρο S σύμφωνα με την κατανομή Poisson .....  | 65        |
| 3.3.2.3 Εξυπηρέτηση των χρηστών σύμφωνα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο και αξιολόγηση μέσω διαγραμμάτων .....       | 67        |
| 3.4 Δεύτερο σενάριο υλοποίησης της χωρικής αξιοποίησης της χωρικής έντασης κατανομής .....                         | 71        |
| 3.4.1 Παρουσίαση σεναρίου B .....  | 71        |
| 3.4.2 Προσομοίωση προτεινόμενου αλγορίθμου για το σενάριο B .....  | 73        |
| 3.4.2.1 Τοποθέτηση των κόμβων AP για κάλυψη του χώρου S και κατανομή των πόρων σε αυτούς .....                     | 73        |
| 3.4.2.2 Εμφάνιση χρηστών στο χώρο S σύμφωνα με την κατανομή Poisson .....  | 75        |
| 3.4.2.3 Εξυπηρέτηση των χρηστών σύμφωνα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο και αξιολόγηση μέσω διαγραμμάτων .....       | 76        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΗΣΤΩΝ ΣΤΗ ΖΗΤΗΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ (SERVICE DIFFERENTIATION) .....</b>                       | <b>79</b> |
| 4.1 Εισαγωγή .....   | 79        |
| 4.2 Ρυθμοί μετάδοσης των ζητούμενων υπηρεσιών .....  | 79        |
| 4.3 Αντιστοίχιση ρυθμών μετάδοσης σε τηλεπικοινωνιακούς πόρους .....   | 80        |
| 4.3.1 Αρχιτεκτονική δομή πλαισίων μετάδοσης δεδομένων τεχνολογίας LTE (LTE data frame structure) .....             | 81        |
| 4.3.2 Υπολογισμός απαιτούμενων πόρων βάσει ρυθμού μετάδοσης υπηρεσίας .....  | 84        |
| 4.4 Διαστασιολόγηση δικτύου βάσει της διαφοροποιημένης ζήτησης υπηρεσιών .....                                     | 86        |
| 4.4.1 Κατηγοριοποίηση υπηρεσιών και αντιστοίχιση με συντελεστές βάρους .....                                       | 86        |
| 4.4.2 Σενάριο υπολογισμού του μέσου σταθμισμένου αριθμού ζητούμενων πόρων A και εξυπηρέτηση χρηστών .....          | 88        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ MEC ΣΤΑ AD HOC ΔΙΚΤΥΑ (MOBILE EDGE COMPUTING) .....</b>                                 | <b>93</b> |
| 5.1 Υπηρεσίες που παρέχονται σε ad hoc γεγονότα/εκδηλώσεις .....   | 93        |

|   |            |
|---|------------|
| 5.2 Αρχιτεκτονική παραδοσιακού δικτύου.....                   | 94         |
| 5.3 MEC Αρχιτεκτονική .....                                   | 95         |
| 5.3.1 Παρουσίαση χαρακτηριστικών Cloud Computing και MEC..... | 96         |
| 5.3.2 Πλεονεκτήματα χρήσης τεχνολογίας MEC.....               | 98         |
| 5.3.3 Πεδία εφαρμογής της τεχνολογίας MEC.....                | 100        |
| 5.3.3.1 Augmented Reality (AR) .....                          | 100        |
| 5.3.3.2 Video Analytics .....                                 | 101        |
| 5.3.3.3 Mobile Big Data Analytics.....                        | 102        |
| 5.3.3.4 Connected Vehicles.....                               | 102        |
| 5.3.3.5 Content Delivery and Caching .....                    | 104        |
| 5.3.3.6 IoT gateway.....                                      | 104        |
| 5.3.3.7 Άλλες εφαρμογές της τεχνολογίας MEC.....              | 105        |
| 5.3.4 Εφαρμογή MEC στα ad hoc δίκτυα .....                    | 105        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ.....</b>           | <b>109</b> |
| 6.1 Συμπεράσματα.....   | 109        |
| 6.2 Προεκτάσεις της παρούσας εργασίας .....                   | 110        |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>                                      | <b>111</b> |



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η διατύπωση αποδοτικού αλγορίθμου κατανομής πόρων και εξυπηρέτησης χρηστών σε ασύρματα δίκτυα σχεδιασμένα για την κάλυψη πολυπληθών ad hoc γεγονότων, όπως είναι οι αθλητικοί αγώνες, οι συναυλίες, τα συνέδρια ή οι εκθέσεις, στα οποία αναμένεται προσέλευση μεγάλου αριθμού χρηστών. Συγκεκριμένα, οριοθετείται ο προς κάλυψη χώρος στον οποίο πρόκειται να διεξαχθεί το πολυπληθές γεγονός και έπειτα, προσδιορίζεται η αναμενόμενη ένταση της χωροχρονικής κατανομής Poisson που ακολουθεί η εμφάνιση των χρηστών στο χώρο αυτό. Σε πρώτη φάση, στο χώρο ενδιαφέροντος τοποθετούνται σημεία πρόσβασης που έχουν την κατάλληλη εμβέλεια ώστε ο χώρος να καλύπτεται στο σύνολό του με το μικρότερο δυνατό πλήθος σημείων πρόσβασης. Η διαχείριση των σημείων πρόσβασης ανατίθεται σε κεντρικό κόμβο με αυξημένες υπολογιστικές ικανότητες, ο οποίος κατανέμει κατάλληλα στα σημεία πρόσβασης τους διαθέσιμους τηλεπικοινωνιακούς πόρους που προορίζονται για την εξυπηρέτηση των εμφανιζόμενων χρηστών. Ο υπολογισμός του αριθμού των απαραίτητων πόρων και η κατανομή τους στα σημεία πρόσβασης βασίζεται στην κατανομή Poisson της εκτιμώμενης/προβλεπόμενης εμφάνισης των χρηστών. Σε δεύτερη φάση, οι χρήστες εμφανίζονται στο χώρο ακολουθώντας την κατανομή Poisson και εξυπηρετούνται από το σημείο πρόσβασης στην εμβέλεια του οποίου βρίσκονται, αφού ο κεντρικός κόμβος έχει φροντίσει για τη διαθεσιμότητα πόρων σε αυτό το σημείο πρόσβασης. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποσκοπεί στα εξής: (i) οι διαθέσιμοι πόροι να κατανέμονται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στις περιοχές από όπου θα ζητηθούν και (ii) η εξυπηρέτηση των χρηστών να είναι η ταχύτερη δυνατή.

Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται εισαγωγή στο πρόβλημα τηλεπικοινωνιακής κάλυψης πολυπληθών γεγονότων, παρουσιάζοντας ορισμένες πρακτικές λύσεις διευκόλυνσης της δημιουργίας ad hoc δικτύων. Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζεται αναλυτικά ο προτεινόμενος αλγόριθμος και, προκειμένου να αξιολογηθεί, διατυπώνεται ένα σενάριο εφαρμογής του που προσομοιώνεται σε υπολογιστικό περιβάλλον. Στο Κεφάλαιο 3, εξετάζεται η χωρική διαφοροποίηση της κατανομής Poisson και προσομοιώνονται δύο σχετικά σενάρια υλοποίησης του αλγορίθμου. Στο Κεφάλαιο 4, ο προτεινόμενος αλγόριθμος επεκτείνεται για περιπτώσεις όπου κάθε χρήστης έχει διαφοροποιημένες τηλεπικοινωνιακές ανάγκες, σε αντίθεση με την απλουστευμένη αρχική εκδοχή του αλγορίθμου όπου υποτίθενται κοινές ανάγκες για όλους τους χρήστες. Το Κεφάλαιο 5 αφορά την αναδυόμενη τεχνολογία MEC (Mobile Edge Computing), που αναμένεται να χρησιμεύσει για την κάλυψη πολυπληθών γεγονότων. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι πιθανές προεκτάσεις της εργασίας.

### Λέξεις-Κλειδιά

Κατανομή πόρων, ad hoc πολυπληθή γεγονότα, χωροχρονική διαδικασία Poisson, χωρική διαφοροποίηση, Mobile Edge Computing





## **ABSTRACT**

The purpose of this diploma thesis is to formulate an efficient algorithm of resource allocation and user service in wireless networks, designed to cover ad hoc massive events, such as sports-events, concerts, conferences or exhibitions, which are expected to attract a large number of attendees. In particular, the area to be covered is demarcated and then, the expected intensity of the Poisson spatio-temporal distribution with which users appear in this area is determined. Firstly, Access Points with the appropriate range are placed so that the entire area is covered with the smallest possible number of Access Points. The Access Points management is assigned to a centralized node with increased computing capabilities, which appropriately allocates the available telecommunication resources aimed to serve the users that appear in the area. The calculation of the number of necessary resources and their allocation at the Access Points are based on the Poisson distribution of the estimated/forecasted number of users. Secondly, users appear in the area following the Poisson distribution and are served by the Access Point in their reach, after the central node has taken care of the availability of resources at this Access Point. The proposed algorithm aims to: (i) allocate the available resources as close as possible to the regions from which they will be requested; and (ii) to provide users with the fastest possible service.

In Chapter 1, the problem of telecommunication coverage of massive events is introduced, presenting some practical solutions to facilitate the creation of ad hoc networks. In Chapter 2, the proposed algorithm is presented in detail and, in order to evaluate it, a simulation scenario is simulated in a computing environment. In Chapter 3, the spatial differentiation of the Poisson distribution is examined and two related scenarios of the algorithm implementation are simulated. In Chapter 4, the proposed algorithm is expanded for cases where each user has diversified telecommunication needs, as opposed to the simplified initial version of the algorithm where common needs are assumed for all users. Chapter 5 covers emerging MEC technology (Mobile Edge Computing), which is expected to be used to cover massive events. Finally, Chapter 6 presents the conclusions and possible extensions of this diploma thesis.

### Key Words

Resource Allocation, ad hoc massive events, spatio-temporal Poisson Process, spatial differentiation, Mobile Edge Computing



## Κατάλογος Σχημάτων

|   |    |
|---|----|
| <b>Σχήμα 1.1</b> Διάγραμμα αριθμού συνδρομητών τηλεπικοινωνιών παγκοσμίως με προβλέψεις μέχρι το έτος 2021                      | 25 |
| <b>Σχήμα 1.2</b> Διαμοιρασμός συχνοτήτων σε ένα κυψελωτό δίκτυο (ίδια γράμματα αντιστοιχούν σε ίδια τμήματα φάσματος)           | 27 |
| <b>Σχήμα 1.3</b> Συνωστισμένο εμπορικό κέντρο   | 28 |
| <b>Σχήμα 1.4</b> Αθλητικό γεγονός με μεγάλη προσέλευση θεατών   | 28 |
| <b>Σχήμα 1.5</b> Πολυπληθής συναυλιακός χώρος   | 29 |
| <b>Σχήμα 1.6</b> Σύστημα DAS (Distributed Antenna System) της DeltaNode   | 31 |
| <b>Σχήμα 1.7</b> Στάδιο Ολυμπιακών αγώνων Ρίο 2016  | 32 |
| <b>Σχήμα 1.8</b> Πρόταση τοποθέτησης κόμβων AP στην οροφή γηπέδων από τον οδηγό της Ruckus Wireless                             | 32 |
| <b>Σχήμα 2.1</b> Δομή του προτεινόμενου ασύρματου τηλεπικοινωνιακού δικτύου με χρήση AP και sBS                                 | 38 |
| <b>Σχήμα 2.2</b> Ο αλγόριθμος εξυπηρέτησης χρηστών από τον sBS σε μορφή λογικού διαγράμματος                                    | 43 |
| <b>Σχήμα 2.3</b> Τοποθέτηση κόμβων δικτύου στο χώρο S   | 47 |
| <b>Σχήμα 2.4</b> Αρχική κατανομή των N πόρων στους M κόμβους για $\lambda^t(x,y)=1000(x+y)$                                     | 49 |
| <b>Σχήμα 2.5</b> Στιγμιότυπο θέσεων χρηστών για $\lambda^t(x,y)=1000*(x+y)$ και $Nusers'=1010$ χρήστες                          | 52 |
| <b>Σχήμα 2.6</b> Διάγραμμα μέγιστου βάθους αναζήτησης συναρτήσει του αριθμού των χρηστών  | 55 |
| <b>Σχήμα 2.7</b> Διάγραμμα μέσου βάθους αναζήτησης συναρτήσει του αριθμού των χρηστών   | 55 |
| <b>Σχήμα 2.8</b> Διάγραμμα ποσοστού χρηστών που εξυπηρετούνται μόνο από τον εκάστοτε l κόμβο συναρτήσει του αριθμού των χρηστών | 56 |
| <b>Σχήμα 2.9</b> Λογικό διάγραμμα του προτεινόμενου αλγορίθμου  | 57 |
| <b>Σχήμα 3.1</b> Με γκρι χρωματισμό απεικονίζεται η περιοχή ενδιαφέροντος για κάλυψη  | 60 |
| <b>Σχήμα 3.2</b> Με γκρι χρωματισμό απεικονίζεται η περιοχή ενδιαφέροντος για κάλυψη  | 60 |
| <b>Σχήμα 3.3</b> Διάκριση των 4 τμημάτων του χώρου S  | 62 |
| <b>Σχήμα 3.4</b> Τοποθέτηση κόμβων στο χώρο S 1x1   | 64 |
| <b>Σχήμα 3.5</b> Κατανομή πόρων στους M κόμβους για $\lambda^t(x,y)$ σύμφωνα με τις 3.1.1-3.1.4.                                | 65 |
| <b>Σχήμα 3.6</b> Προσομοίωση των θέσεων των $Nusers=510$ χρηστών  | 66 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Σχήμα 3.7</b> Διάγραμμα ποσοστού χρηστών που εξυπηρετούνται με 1 βήμα αναζήτησης, συναρτήσει του αριθμού των ήδη εμφανισθέντων χρηστών             | 68  |
| <b>Σχήμα 3.8</b> Διάγραμμα μέσου βάθους αναζήτησης, συναρτήσει του αριθμού των εμφανιζόμενων χρηστών, χωρίς τη χρήση ταξινομημένου διανύσματος        | 69  |
| <b>Σχήμα 3.9</b> Διάγραμμα μέσου βάθους αναζήτησης, συναρτήσει του αριθμού των εμφανιζόμενων χρηστών με χρήση ταξινομημένου διανύσματος               | 69  |
| <b>Σχήμα 3.10</b> Διάγραμμα μέγιστου βάθους αναζήτησης, συναρτήσει του αριθμού των εμφανιζόμενων χρηστών χωρίς τη χρήση του ταξινομημένου διανύσματος | 70  |
| <b>Σχήμα 3.11</b> Διάγραμμα μέγιστου βάθους αναζήτησης, συναρτήσει του αριθμού των εμφανιζόμενων χρηστών με χρήση του ταξινομημένου διανύσματος       | 70  |
| <b>Σχήμα 3.12</b> Ο χώρος $S$ χωρισμένος σε τμήματα με διαφορετικές εντάσεις $\lambda(x,y,t)$   | 72  |
| <b>Σχήμα 3.13</b> Τοποθέτηση κόμβων στο γήπεδο $S$  | 74  |
| <b>Σχήμα 3.14</b> Αρχική κατανομή των $N$ πόρων στους $M$ κόμβους $AP$  | 75  |
| <b>Σχήμα 3.15</b> Προσομοίωση των θέσεων των $N_{users}=5050$ χρηστών   | 75  |
| <b>Σχήμα 3.16</b> Διάγραμμα μέσου βάθους αναζήτησης, συναρτήσει του αριθμού των εμφανιζόμενων χρηστών   | 76  |
| <b>Σχήμα 3.17</b> Διάγραμμα μέγιστου βάθους αναζήτησης, συναρτήσει του αριθμού των εμφανιζόμενων χρηστών  | 77  |
| <b>Σχήμα 3.18</b> Διάγραμμα ποσοστού χρηστών που εξυπηρετούνται με 1 βήμα αναζήτησης, συναρτήσει του αριθμού των εμφανιζόμενων χρηστών                | 77  |
| <b>Σχήμα 4.1</b> Η δομή πλαισίου LTE, τύπου FDD   | 82  |
| <b>Σχήμα 4.2</b> Η τεχνική πολυπλεξίας OFDM(δεξιά) και η πολλαπλή πρόσβαση OFDMA(αριστερά)  | 84  |
| <b>Σχήμα 5.1</b> Συμμετρική και ασύμμετρη κίνηση στο δίκτυο πρόσβασης   | 93  |
| <b>Σχήμα 5.2</b> Αρχιτεκτονική παραδοσιακού δικτύου κινητής τηλεφωνίας  | 94  |
| <b>Σχήμα 5.3</b> Παράδειγμα αρχιτεκτονικής Cloud Computing  | 96  |
| <b>Σχήμα 5.4</b> Πλεονεκτήματα της χρήσης υπηρεσιών CC  | 97  |
| <b>Σχήμα 5.5</b> Δομή δικτύου για CC χωρίς τη χρήση MEC   | 98  |
| <b>Σχήμα 5.6</b> Δομή δικτύου για CC με τη χρήση MEC  | 98  |
| <b>Σχήμα 5.7</b> MEC τεχνολογία σε Augmented Reality (AR)   | 101 |
| <b>Σχήμα 5.8</b> Ανάλυση δεδομένων καμερών (video stream analysis) με τη MEC τεχνολογία   | 102 |
| <b>Σχήμα 5.9</b> Διασυνδεδεμένα οχήματα με την τεχνολογία MEC   | 103 |
| <b>Σχήμα 5.10</b> Η MEC τεχνολογία σε πύλη διασύνδεσης IoT  | 104 |

## Κατάλογος Πινάκων

|  |    |
|--|----|
| <b>Πίνακας 2.1</b> Υλοποίηση βελτιστοποίησης κατανομής πόρων στους $M$ κόμβους σε Matlab                                   | 48 |
| <b>Πίνακας 2.2</b> Κώδικας προσομοίωσης χρονικών αφίξεων Poisson έντασης $\lambda$ για χρονικό διάστημα $[0, T]$           | 50 |
| <b>Πίνακας 2.3</b> Κώδικας προσομοίωσης χωρικών αφίξεων Poisson έντασης $\lambda^t(x, y)$                                  | 51 |
| <b>Πίνακας 2.4</b> Προσομοίωση αναζήτησης πόρων από τον sBS για εξυπηρέτηση των χρηστών                                    | 53 |
| <b>Πίνακας 2.5</b> Προσομοίωση των δεικτών αξιολόγησης του αλγορίθμου  | 54 |
| <b>Πίνακας 4.1</b> Υπηρεσίες και αντίστοιχες ταχύτητες μετάδοσης   | 80 |
| <b>Πίνακας 4.2</b> Κανάλια μετάδοσης τεχνολογίας LTE και αντίστοιχοι ρυθμοί μετάδοσης                                      | 83 |
| <b>Πίνακας 4.3</b> Αριθμός RBS ανά πλαίσιο για κάθε διαθέσιμο κανάλι   | 85 |
| <b>Πίνακας 4.4</b> Οι κλάσεις υπηρεσιών με τους αντίστοιχους ρυθμούς μετάδοσης και τους τύπους                             | 87 |
| <b>Πίνακας 4.5</b> Στατιστικά δεδομένα προτιμήσεων χρηστών σε παρελθοντικά πολυπληθή γεγονότα                              | 88 |
| <b>Πίνακας 4.6</b> Προσομοίωση αναζήτησης πόρων από τον sBS για εξυπηρέτηση χρηστών με διαφορετικό αριθμό ζητούμενων πόρων | 90 |

## ***Κατάλογος Συντμήσεων***

AggP Aggregation Point

AP Access Point

AR Augmented Reality

ARPU Average Revenue Per User

BS Base Station

BSC Base Station Controller

BTS Base Transceiver Station

CAPEX Capital Expenditure

CBP Call Blocking Probability/Percentage

CC Cloud Computing

CCTV Closed-Circuit Television

CN Core Network

DAS Distributed Antenna System

FC Fog Computing

FDD Frequency Division Duplexing

GW Gateway

IoT Internet of Things

IT Information Technology

LTE Long Term Evolution

MEC Mobile (or Multi-Access) Edge Computing

MNO Mobile Network Operator

NSP Network Service Provider

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OPEX Operating Expenditure

RAN Radio Access Network

RB Resource Block

RS Relay Station

sBS super Base Station

SDN Software Defined Network

TDD Time Division Duplexing

QAM Quadrature Amplitude Modulation

QoE Quality of Experience

QoS Quality of Service

QPSK Quadrature Phase-Shift Keying

EETT Ελληνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων



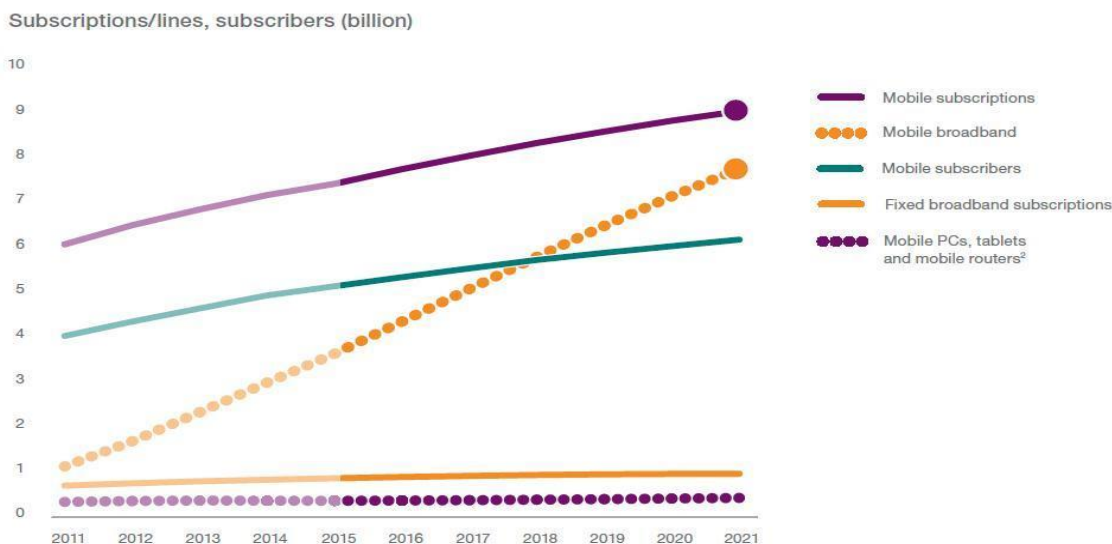


# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Η τηλεπικοινωνιακή αγορά και οι προκλήσεις της σήμερα

Η ραγδαία ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών είναι αποτέλεσμα των σύγχρονων τεχνολογικών επιτευγμάτων και, ειδικότερα, της εξέλιξης των ασύρματων δικτύων πρόσβασης και της αναβάθμισης των κινητών τηλεφωνικών συσκευών. Αυτά τα δύο μαζί έχουν συνθέσει τη σημερινή τηλεπικοινωνιακή αγορά με βασικό χαρακτηριστικό της την εύκολη και οικονομικά προσιτή πρόσβαση σε υψηλής ποιότητας υπηρεσίες, συντελώντας έτσι στη δημιουργία της Κοινωνίας της Πληροφορίας. Στην Κοινωνία της Πληροφορίας η ζωή των ανθρώπων κατακλύζεται από πληροφόρηση η πρόσβαση στην οποία είναι ευκολότερη από ποτέ. Καταλυτική συμβολή προς αυτήν την κατεύθυνση είχε η ανάπτυξη της ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης στο διαδίκτυο (mobile broadband), που κατέστησε δυνατή την πλοήγηση στο διαδίκτυο και από κινητές συσκευές. Άμεση συνέπεια αυτού ήταν η αύξηση του αριθμού των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας με γεωμετρική πρόοδο, όπως αποτυπώνεται και στο Σχ. 1.1, που προβλέπεται να συνεχίσει την ανοδική πορεία στα επόμενα χρόνια.



<sup>1</sup> The number of fixed broadband users is at least three times the number of fixed broadband connections, due to multiple usage in households, enterprises and public access spots. This is the opposite of the mobile phone situation, where subscription numbers exceed user numbers

<sup>2</sup> Fixed Wireless Access (FWA) subscription not included

**Σχήμα 1.1** Διάγραμμα αριθμού συνδρομητών τηλεπικοινωνιών παγκοσμίως με προβλέψεις μέχρι το έτος 2021

Για να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι βελτίωσαν και συνεχίζουν να αναβαθμίζουν τη δικτυακή υποδομή τους, με επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες που υποστηρίζουν μεγάλες χωρητικότητες και υψηλές ταχύτητες μετάδοσης (transmission rate).

Όμως, οι μεγάλες κεφαλαιουχικές επενδύσεις (CAPEX) και τα υψηλά λειτουργικά έξοδα (OPEX) των τηλεπικοινωνιακών παρόχων, σε συνδυασμό με την απροθυμία των συνδρομητών να πληρώσουν μεγάλα ποσά για τις τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες, συνθέτουν ένα οικονομικό περιβάλλον γεμάτο προκλήσεις για τις εταιρίες τηλεπικοινωνιών. Στις προκλήσεις αυτές προστίθεται και ο ανταγωνισμός που υφίσταται στην αγορά τηλεπικοινωνιών (competitive telecom market), ο οποίος αναγκάζει τους παρόχους να παραμένουν σε εγρήγορση και να αναζητούν καινοτομίες που θα τους φέρουν σε πλεονεκτικότερη θέση σε σχέση με τους «αντιπάλους» τους.

Προκειμένου, λοιπόν, να παραμείνουν βιώσιμες επιχειρήσεις, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι επιδιώκουν να αυξάνουν το κέρδος τους (margin), μειώνοντας τα έξοδά τους (CAPEX και OPEX) και αυξάνοντας τα έσοδά τους (revenue). Τα σημαντικότερα έξοδα, πέραν της μισθοδοσίας του προσωπικού, για έναν πάροχο τηλεπικοινωνιών είναι τα ακόλουθα:

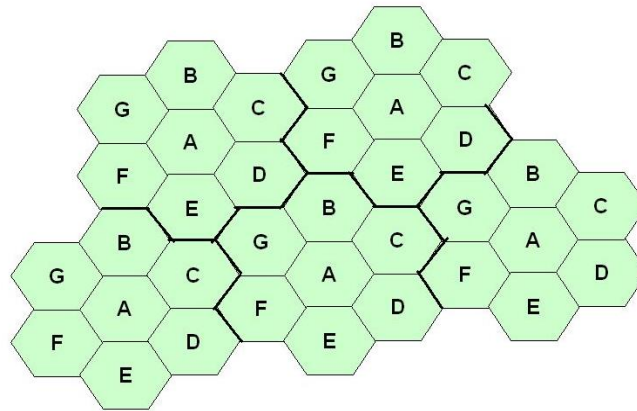
- Κόστος αδειών φάσματος συχνοτήτων
- Κόστος κατασκευής δικτύου και εγκατάστασης εξοπλισμού και λογισμικού
- Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία του δικτύου
- Κόστος συντήρησης δικτύου

Ειδικότερα, οι άδειες για το χρησιμοποιούμενο φάσμα συχνοτήτων που αποδίδονται από τη ρυθμιστική αρχή τηλεπικοινωνιών (για την Ελλάδα ΕΕΤΤ), είναι ένα μεγάλο ποσοστό των εξόδων του τηλεπικοινωνιακού παρόχου. Το φάσμα συχνοτήτων είναι συγκεκριμένο και περιορισμένο, χαρακτηριστικά που το κάνουν πολύτιμο, οπότε η χρήση του υπόκειται σε διαδικασίες δημοπράτησης και αδειοδότησης. Η εκμετάλλευσή του, κατά συνέπεια, είναι απαραίτητο να γίνεται με τον αποδοτικότερο τρόπο από τον πάροχο τηλεπικοινωνιών.

Από την άλλη πλευρά, τα έσοδα ενός παρόχου εξαρτώνται από τον αριθμό των συνδρομητών καθώς και από το μέσο έσοδο ανά χρήστη (Average Revenue Per User- ARPU). Οι πάροχοι επιδιώκουν συνεχώς να αυξάνουν τη βάση πελατών τους για να αυξήσουν τα έσοδά τους, κάτι που συνεπάγεται μεγαλύτερη τηλεπικοινωνιακή κίνηση στο δίκτυο πρόσβασης. Με δεδομένο το φάσμα συχνοτήτων που έχει εξασφαλίσει ο πάροχος, το δίκτυο καλείται να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της συνεχώς αυξανόμενης κίνησης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ορθή διαχείριση του διαθέσιμου φάσματος, ώστε να εξυπηρετούνται περισσότεροι χρήστες με τον καλύτερο δυνατό τρόπο και με το λιγότερο δυνατό φάσμα. Για το λόγο αυτό, έχουν επινοηθεί τεχνικές αναχρησιμοποίησης του φάσματος και έχουν δημιουργηθεί τα κυψελωτά συστήματα τηλεπικοινωνιών που χρησιμοποιούν το φάσμα συχνοτήτων αποδοτικά.

Σε γενικές γραμμές, τα κυψελωτά συστήματα αφορούν το δίκτυο πρόσβασης κινητών τηλεπικοινωνιών και σχετίζονται με τον τρόπο οργάνωσης και δομής του δικτύου, χωρίζοντας τον προς κάλυψη γεωγραφικό χώρο σε κυψέλες, κάθε μία από τις οποίες εξυπηρετείται από κάποιο σταθμό βάσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.2. Τα βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι η αύξηση του πλήθους χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει το δίκτυο και η

εκτεταμένη γεωγραφική κάλυψη. Αυτά επιτυγχάνονται με ορθή εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος, το οποίο αναχρησιμοποιείται, όπως αποτυπώνεται στο Σχ. 1.2.



**Σχήμα 1.2** Κατανομή συχνοτήτων σε κυψελωτό δίκτυο (ίδια γράμματα αντιστοιχούν σε ίδιες φασματικές ζώνες)

## 1.2 Τα πολυπληθή γεγονότα

Κατά το σχεδιασμό του ασύρματου δικτύου πρόσβασής τους, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι κατανέμουν στους σταθμούς βάσης κάθε κυψέλης τους διαθέσιμους τηλεπικοινωνιακούς πόρους, οι οποίοι αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τις ανάγκες της κυψέλης. Συνεπώς, η μέγιστη τηλεπικοινωνιακή κίνηση που μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε κυψέλη είναι συγκεκριμένη (traffic threshold) και εξαρτάται από το πλήθος των πόρων που έχει αποφασίσει ο σχεδιαστής του δικτύου να αποδώσει σε κάθε κυψέλη.

Η τηλεπικοινωνιακή κίνηση, όμως, δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του χρόνου στη γεωγραφική περιοχή μιας κυψέλης, καθώς υπάρχουν διακυμάνσεις τόσο στον αριθμό των χρηστών της κυψέλης όσο και στις απαιτήσεις κάθε χρήστη. Η μείωση της κίνησης μιας κυψέλης κάτω από το κατώφλι της κυψέλης, προφανώς, αν και δεν επηρεάζει την καλή εξυπηρέτηση των χρηστών, αφήνει αχρησιμοποίητο κάποιο τμήμα του φάσματος της κυψέλης. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση της κίνησης πάνω από το κατώφλι της κυψέλης έχει ως αποτέλεσμα τον αποκλεισμό χρηστών λόγω έλλειψης πόρων.

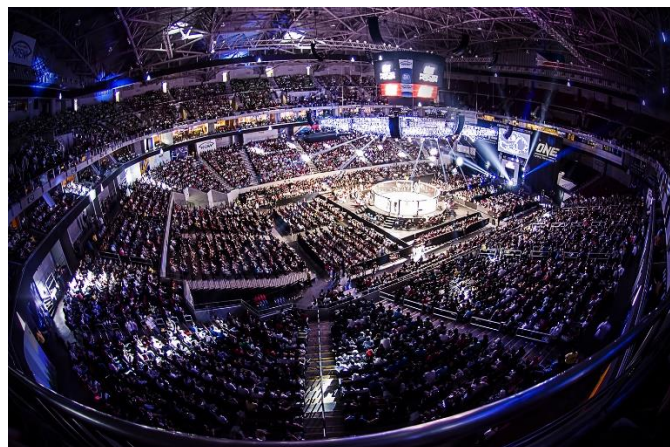
Χαρακτηριστική περίπτωση αύξησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε μια κυψέλη είναι οι πολυπληθείς εκδηλώσεις που λαμβάνουν χώρα στο γεωγραφικό χώρο της κυψέλης. Παραδείγματα εκδηλώσεων με μαζική προσέλευση κόσμου είναι οι συναυλίες-πολιτιστικές εκδηλώσεις, τα αθλητικά γεγονότα, οι εκθέσεις καθώς και τα εμπορικά κέντρα, όπως φαίνεται στα Σχ. 1.3, 1.4 και 1.5. Η στενή σχέση των ανθρώπων στη σημερινή εποχή με τα έξυπνα κινητά τερματικά τους (smartphones) και η επιθυμία τους για αδιάλειπτη πρόσβαση στο διαδίκτυο,

έχει ως αποτέλεσμα τα πολυπληθή γεγονότα να αποτελούν πρόκληση για τους παρόχους τηλεπικοινωνιών, καθώς η τηλεπικοινωνιακή κίνηση αυξάνεται απότομα κατά τη διάρκεια αυτών. Το δίκτυο πρόσβασης στη γεωγραφική περιοχή όπου λαμβάνει χώρα ένα πολυπληθές γεγονός είναι λογικό να μην έχει εφοδιαστεί με πόρους για να καλύψει αυτή την αυξημένη κίνηση, καθώς κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε σπατάλη φάσματος κατά τις περιόδους όπου δεν υπάρχει ο υψηλός αριθμός χρηστών. Επομένως, για την κάλυψη ενός πολυπληθούς γεγονότος, ο τηλεπικοινωνιακός πάροχος πρέπει να προσαρμόσει το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο της περιοχής στις ανάγκες του γεγονότος και να εξασφαλίσει τον αυξημένο αριθμό πόρων που εκτιμά ότι θα χρειαστεί κατά τη διάρκεια του γεγονότος.

Ο γεωγραφικός χώρος όπου διεξάγεται ένα πολυπληθές γεγονός ενδέχεται είτε να ανήκει στην περιοχή κάλυψης μιας κυψέλης είτε να μην καλύπτεται τηλεπικοινωνιακά από ασύρματο δίκτυο. Ο πάροχος πρέπει σε κάθε περίπτωση να αναλάβει τη δημιουργία ενός ad hoc δικτύου που θα εξυπηρετήσει την αυξημένη τηλεπικοινωνιακή κίνηση με το βέλτιστο τρόπο.



**Σχήμα 1.3** Συνωστισμένο εμπορικό κέντρο



**Σχήμα 1.4** Αθλητικό γεγονός με μεγάλη προσέλευση θεατών



**Σχήμα 1.5** Πολυπληθής συναυλιακός χώρος

### **1.2.1 Ad hoc δίκτυα για πολυπληθή γεγονότα**

Κρίνεται χρήσιμο να αποσαφηνιστεί ο χαρακτηρισμός ad hoc που αφορά το δίκτυο που καλείται να στήσει ο πάροχος στο πλαίσιο ενός πολυπληθούς γεγονότος. Στη γενική περίπτωση, ad hoc δίκτυο ονομάζεται ένα δίκτυο αυτοοργανούμενο και συνεκτικό το οποίο εξυπηρετεί μια συγκεκριμένη ανάγκη, έχοντας τη δυνατότητα να αναδιοργανώνεται όταν ένας νέος κόμβος προστίθεται στο υπάρχον δίκτυο. Στην περίπτωση των πολυπληθών γεγονότων, ως ad hoc δίκτυο ορίζεται το δίκτυο που δημιουργείται με μοναδικό σκοπό να καλύψει τις έκτακτες και ιδιαίτερες τηλεπικοινωνιακές ανάγκες κατά περίπτωση. Για καλύτερη κατανόηση της έννοιας του ad hoc δικτύου, δίνεται ακολούθως ένα κλασικό παράδειγμα ad hoc δικτύου και παραλληλίζεται με το ad hoc τηλεπικοινωνιακό δίκτυο μιας πολυπληθούς εκδήλωσης.

Έστω ότι υπάρχει ανάγκη προστασίας ενός δάσους από πυρκαγιά. Για το λόγο αυτό τοποθετούνται αισθητήρες με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει πλήρης κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος και το προκύπτον δίκτυο να είναι συνεκτικό. Κάποιος από όλους τους αισθητήρες αναλαμβάνει να συλλέγει την πληροφορία από τους υπόλοιπους κόμβους (aggregation) και να την προωθεί στο δίκτυο κορμού (backbone). Αν απαιτηθεί η επέκταση του δικτύου ώστε να καλυφθεί πρόσθετη περιοχή, αυτό θα επιτευχθεί με προσθήκη νέων αισθητήρων, οι οποίοι θα είναι τοποθετημένοι κατά τρόπον ώστε και το διευρυμένο δίκτυο να είναι συνεκτικό.

Στα πολυπληθή γεγονότα, η ανάγκη που είναι επιθυμητό να καλυφθεί είναι η παροχή πρόσβασης στο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο για τους χρήστες που θα βρεθούν στο χώρο διεξαγωγής της εκδήλωσης. Ο χώρος διεξαγωγής αντιστοιχεί στο δάσος του προηγούμενου παραδείγματος και τα σημεία πρόσβασης (Access Points-APs) αποτελούν τους αντίστοιχους αισθητήρες, καθώς η τοποθέτησή τους στο χώρο παρέχει την επιθυμητή τηλεπικοινωνιακή κάλυψη. Είναι απαραίτητο να υπάρχει διασύνδεση μεταξύ του ad hoc δικτύου και του δικτύου κορμού, μέσω κάποιου αναβαθμισμένου κόμβου ο οποίος θα είναι ο συλλέκτης της

πληροφορίας. Αν προκύψει ανάγκη επέκτασης του δικτύου, αυτό μπορεί να γίνει με πρόσθετα σημεία πρόσβασης που θα συναποτελούν το επεκτεταμένο ad hoc δίκτυο.

### **1.3 Υπάρχουσες λύσεις και προϊόντα για εξυπηρέτηση πολυπληθών γεγονότων**

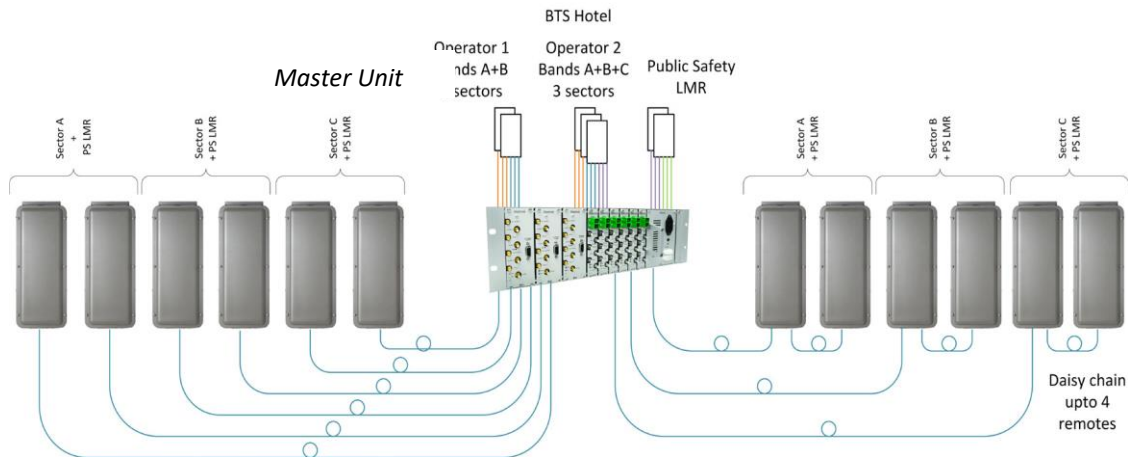
Στο χώρο των τηλεπικοινωνιών έχει ήδη αναγνωριστεί η δυσκολία αντιμετώπισης των ζητημάτων που προκύπτουν για ένα πάροχο δικτύου όταν συμβαίνουν πολυπληθή γεγονότα. Μέρος αυτής της δυσκολίας είναι οι αντικρουόμενες απαιτήσεις που προκύπτουν στα πολυπληθή γεγονότα, λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης χρηστών σε συγκεκριμένο χώρο. Συγκεκριμένα, από τη μία πλευρά, για να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη χωρητικότητα για όλους τους χρήστες απαιτείται μεγάλος αριθμός σημείων πρόσβασης (Access Points-APs). Από την άλλη πλευρά, η αύξηση του αριθμού των APs και των χρηστών σε περιορισμένο χώρο προκαλεί έντονες παρεμβολές. Επομένως, είναι επιθυμητό τα APs να είναι λιγότερα. Για να μετριαστεί το πρόβλημα της παρεμβολής χωρίς μείωση του αριθμού των APs, επιλέγεται ως λύση τα σημεία πρόσβασης να έχουν μικρή εμβέλεια κάλυψης. Επιπλέον, στα πολυπληθή γεγονότα ο πάροχος καλείται να διαθέσει ένα σημαντικό τμήμα φάσματος συχνοτήτων. Πολλές φορές, δεν επαρκεί το αδειοδοτημένο φάσμα που κατέχει ένας πάροχος για να καλυφθούν οι έκτακτες ανάγκες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο πάροχος είναι απαραίτητο να εξασφαλίσει το φάσμα από άλλες πηγές, όπως είναι ο δανεισμός ή η χρήση του ελεύθερου φάσματος. Το ελεύθερο φάσμα περιλαμβάνει τμήματα φάσματος που δεν υπόκεινται σε διαδικασίες αδειοδότησης (unlicensed frequency bands) και οι πάροχοι μπορούν να τα χρησιμοποιούν ελεύθερα, αρκεί να υπάρχει συμβατότητα με τις συσκευές των χρηστών που εμφανίζονται στα πολυπληθή γεγονότα.

Υπάρχουν διάφορες παράμετροι που πρέπει να εξετάζονται κατά τη σχεδίαση ενός ad hoc δικτύου πρόσβασης στα πολυπληθή γεγονότα. Για το λόγο αυτό, έχουν γίνει προσπάθειες συστηματοποίησης της λύσης για τις περιπτώσεις αυτές και έχουν σχεδιαστεί προϊόντα που διευκολύνουν το σχηματισμό του δικτύου. Ακολουθώντας, παρουσιάζονται κάποιες λύσεις που έχουν σχεδιαστεί για να εξυπηρετηθούν χώροι με μεγάλη προσέλευση χρηστών.

#### **1.3.1 Εμπορική λύση για τηλεπικοινωνίες εντός των πολυκαταστημάτων**

Η εταιρία DeltaNode ανέπτυξε μια ολοκληρωμένη λύση για την εξασφάλιση τηλεπικοινωνιακής κάλυψης εντός εμπορικών κέντρων χρησιμοποιώντας το σύστημα DAS (Distributed Antenna System). Κατά τα χρονικά διαστήματα αιχμής στα εμπορικά κέντρα, προκύπτει ανάγκη για εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού χρηστών σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου με αρκετά μεγάλη γεωγραφική έκταση. Στα διαστήματα αυτά, είναι χρήσιμο να υπάρχει η κατάλληλη τηλεπικοινωνιακή υποδομή, η οποία, αφού εφοδιαστεί με τον απαιτούμενο αριθμό πόρων, θα υποστηρίξει το ad hoc τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Στη προτεινόμενη λύση της DeltaNode περιλαμβάνεται η εγκατάσταση μιας κεντρικής μονάδας, Master Unit, καθώς και απομακρυσμένων μονάδων-σημείων πρόσβασης, Remote Units, στους διάφορους χώρους του εμπορικού κέντρου, με τη συνδεσμολογία που φαίνεται στο Σχ. 1.6. Οι συνδέσεις μεταξύ των μονάδων πραγματοποιούνται μέσω οπτικών ινών, οι οποίες μπορούν να υποστηρίξουν την

αυξημένη τηλεπικοινωνιακή κίνηση και επιπλέον, δεν έχουν τις απώλειες που θα είχε μια ασύρματη ζεύξη σε εσωτερικό χώρο.



**Σχήμα 1.6** Σύστημα DAS (Distributed Antenna System) της DeltaNode

Η κεντρική μονάδα Master Unit έχει την ευθύνη του συντονισμού των σημείων πρόσβασης και τη λειτουργία του συστήματος, δηλαδή αποτελεί το σταθμό βάσης του συστήματος. Βασικό χαρακτηριστικό της είναι ότι μπορεί να φιλοξενήσει διεπαφές από πολλούς παρόχους, κάτι το οποίο υποστηρίζεται και από τις απομακρυσμένες μονάδες του συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχ.1.6. Αυτή η δυνατότητα πολυπλεξίας των καναλιών των παρόχων στην ίδια υποδομή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τους παρόχους, καθώς τους απαλλάσσει από το πρόσθετο κόστος κατασκευής δικού τους δικτύου. Τα σημεία πρόσβασης μπορούν να τοποθετηθούν τόσο στους εσωτερικούς χώρους του εμπορικού κέντρου όσο και στους εξωτερικούς χώρους και στα υπόγεια πάρκινγκ, ώστε να επιτευχθεί πλήρης γεωγραφική κάλυψη.

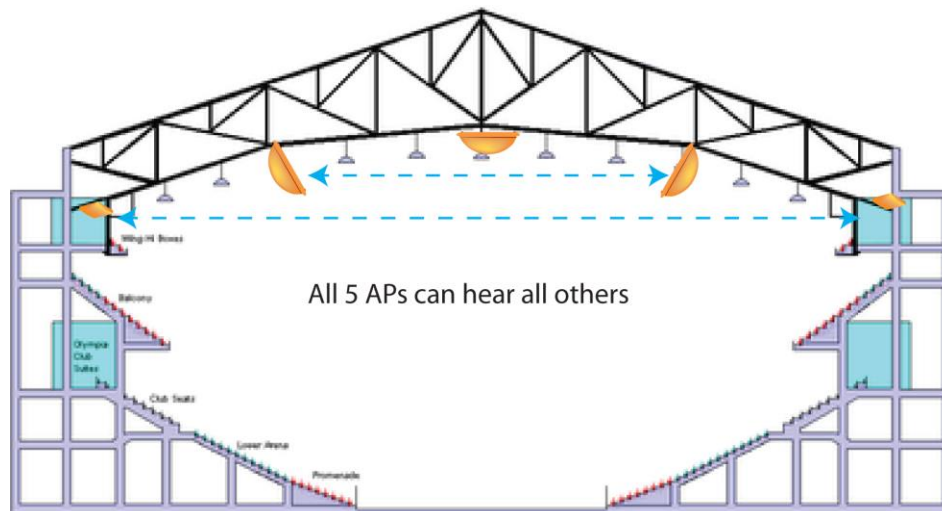
### 1.3.2 Λύσεις για την ανάπτυξη τηλεπικοινωνιακού δικτύου σε στάδια

Για τη δημιουργία δικτύου πρόσβασης σε χώρους όπως είναι τα στάδια, έχουν αναπτυχθεί διάφορες εμπορικές λύσεις και υπάρχουν οδηγοί που περιγράφουν αναλυτικά την ακολουθούμενη διαδικασία σχεδιασμού του δικτύου. Η περίπτωση των σταδίων είναι ειδική, λόγω της μεγάλης πυκνότητας χρηστών στο χώρο και της μεγάλης χωρητικότητας του δικτύου που απαιτείται για την εξυπηρέτηση του πλήθους των θεατών. Για το λόγο αυτό, τα στάδια είναι ένας τομέας όπου δραστηριοποιούνται αρκετές εταιρίες παραγωγής τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού. Για παράδειγμα, η εταιρία Comba Telecom έχει αναπτύξει προϊόντα που προορίζονται για χρήση από τηλεπικοινωνιακούς παρόχους για την κάλυψη των τηλεπικοινωνιακών αναγκών σε στάδια. Η εταιρία αυτή με εξειδικευμένες ομάδες της έχει ήδη υλοποιήσει λύσεις δημιουργίας δικτύου σε σημαντικά πολυπληθή γεγονότα, όπως είναι οι Ολυμπιακοί αγώνες του Ρίο το 2016 που φαίνονται στο Σχ. 1.7.



**Σχήμα 1.7** Στάδιο Ολυμπιακών αγώνων Ρίο 2016

Ένα άλλο παράδειγμα είναι η εταιρία εξοπλισμού Ruckus Wireless που παρέχει ολοκληρωμένες λύσεις για την εγκατάσταση του δικτύου σε στάδια, με οδηγίες προς τους παρόχους για τη διαδικασία σχεδιασμού του δικτύου. Βασική πρόταση της Ruckus Wireless είναι η τοποθέτηση των σημείων πρόσβασης με συνεκτικό τρόπο στην οροφή του κλειστού σταδίου όπως φαίνεται στο Σχ. 1.8.



**Σχήμα 1.8** Πρόταση τοποθέτησης κόμβων AP στην οροφή γηπέδων από τον οδηγό της Ruckus Wireless

#### **1.4 Σκοπός και διάρθρωση παρούσας εργασίας**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιχειρείται η συστηματική ανάλυση και παρουσίαση του τρόπου με τον οποίο ένας πάροχος πραγματοποιεί την ανάπτυξη του ad hoc δικτύου που προορίζεται να εξυπηρετήσει την αυξημένη τηλεπικοινωνιακή κίνηση που προκύπτει όταν υπάρχει ένα πολυπληθές γεγονός. Συγκεκριμένα, προτείνεται ένας αλγόριθμος, τόσο για τη δόμηση του δικτύου όσο και για την ορθή κατανομή των τηλεπικοινωνιακών πόρων αλλά και για τη διαχείρισή τους για την εξυπηρέτηση των χρηστών κατά τη διάρκεια του γεγονότος. Το κριτήριο βάσει του οποίου κατανέμονται οι διαθέσιμοι τηλεπικοινωνιακοί πόροι του παρόχου είναι η αναμενόμενη κίνηση για το εκάστοτε πολυπληθές γεγονός. Η αναμενόμενη κίνηση αποτελεί πρόβλεψη που έχει διαμορφωθεί συνδυάζοντας την εμπειρική γνώση μαζί με



στατιστικά δεδομένα που πιθανώς κατέχει ο διοργανωτής της εκάστοτε εκδήλωσης ως προς τον αριθμό των χρηστών που θα παρευρεθούν σε αυτή.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μαζί με τις απλουστευτικές παραδοχές που τον κάνουν περισσότερο κατανοητό, περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2. Για την καλύτερη κατανόηση του προτεινόμενου αλγορίθμου, παρουσιάζεται και ένα παράδειγμα εφαρμογής του, το οποίο προσομοιώνεται σε υπολογιστικό περιβάλλον για αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3 εξετάζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια ο τρόπος εμφάνισης των χρηστών στο χώρο και προσομοιώνονται σενάρια, στα οποία η κατανομή των χρηστών διαφοροποιείται χωρικά. Επιπλέον, το Κεφάλαιο 4 επεκτείνει τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε περιπτώσεις όπου οι χρήστες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις, σε αντίθεση με την απλή αρχική εκδοχή του αλγορίθμου όπου υποτίθεται ίδια τηλεπικοινωνιακή ζήτηση από όλους τους χρήστες. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά στην ανερχόμενη τεχνολογία MEC (Mobile Edge Computing), που αναμένεται να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των τηλεπικοινωνιακών παρόχων που αναλαμβάνουν την κάλυψη των πολυπληθών γεγονότων.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Ο ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗ ΧΡΗΣΤΩΝ

### 2.1. Μαθηματικό μοντέλο περιγραφής της άφιξης των χρηστών

Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτει το μαθηματικό μοντέλο που θα περιγράφει την άφιξη του κοινού, δηλαδή των χρηστών, στο χώρο και στο χρόνο, η χρήση της σημειακής διαδικασίας θεωρείται η καταλληλότερη λύση, για αυτό και επιλέγεται. Ως σημειακή διαδικασία ορίζεται, κατά όχι αυστηρό μαθηματικό τρόπο, μια τυχαία συλλογή από σημεία, τα οποία ανήκουν σε ένα σύνολο  $S$ . Το σύνολο  $S$  μπορεί να είναι μονοδιάστατο (όπως είναι ο χρόνος) ή να αποτελείται από περισσότερες διαστάσεις (όπως είναι ο χώρος). Στην περίπτωση που μελετάται στην παρούσα εργασία, επειδή για κάθε χρήστη χρειάζεται να είναι γνωστή τόσο η χρονική στιγμή άφιξης όσο και η θέση άφιξης, το σύνολο  $S$  είναι τριών διαστάσεων και καλείται χωροχρόνος. Επομένως, κάθε σημείο του χωροχρόνου, που αντιστοιχεί στην άφιξη ενός χρήστη, χαρακτηρίζεται από 3 διαστάσεις: τη διάσταση του χρόνου, και τις διαστάσεις του διδιάστατου χώρου. Προκειμένου να παρουσιαστεί σε συντομία η λειτουργία της σημειακής διαδικασίας, ακολούθως θα θεωρηθεί ότι αυτή περιγράφεται από μία μόνο διάσταση, η οποία θα είναι ο χρόνος. Όσα παρουσιάζονται, όμως, μπορούν να γενικευθούν σε περισσότερες διαστάσεις και στην προκειμένη περίπτωση στις δύο διαστάσεις του χώρου.

Κάθε μονοδιάστατη σημειακή διαδικασία χαρακτηρίζεται από τη μη αρνητική συνάρτηση  $\lambda(t; N_t, \mathbf{w}_t)$  που ονομάζεται ένταση της σημειακής διαδικασίας. Πρακτικά, το μέγεθος αυτό εκφράζει την πυκνότητα των σημείων στη μονάδα του χρόνου και εξαρτάται από τις μεταβλητές:

$t$ : χρονική στιγμή παρατήρησης (θεωρείται εκκίνηση παρατήρησης για  $t=0$ )

$N_t$ : πλήθος γεγονότων που συνέβησαν πριν από τη χρονική στιγμή  $t$

$\mathbf{w}_t$ : διάνυσμα χρονικών στιγμών παρατήρησης των  $N_t$  γεγονότων, δηλαδή το  $[w_1, w_2, \dots, w_{N_t}]$

Συνεπώς, η ένταση μιας σημειακής διαδικασίας εξαρτάται από το χρόνο όπου πραγματοποιείται η παρατήρηση, καθώς και από το ιστορικό της σημειακής διαδικασίας μέχρι τη χρονική στιγμή παρατήρησης.

Σε ό,τι αφορά την εμφάνιση των χρηστών στα πολυπληθή γεγονότα που μελετώνται από την παρούσα εργασία, είναι ανεπιθύμητη η εξάρτηση της κάθε νέας άφιξης από την προηγούμενη κατάσταση των αφίξεων των χρηστών, καθώς οι θεατές σε μια εκδήλωση εμφανίζονται με τυχαία χρονική σειρά. Ομοίως, αναφορικά με τη χωρική διάσταση των αφίξεων των χρηστών, αποτελεί πρωταρχική ανάγκη να είναι ασυσχέτιστη η θέση εμφάνισης ενός χρήστη από τις θέσεις των υπολοίπων χρηστών. Επομένως, για την περιγραφή της εμφάνισης των χρηστών,

κρίνεται αναγκαία η επιλογή μιας σημειακής διαδικασίας, η οποία θα χαρακτηρίζεται από την ιδιότητα της έλλειψης μνήμης, ώστε να διασφαλιστεί η χρονική και χωρική ανεξαρτησία μεταξύ των εμφανίσεων, κατά τη διεξαγωγή του προς τηλεπικοινωνιακή κάλυψη γεγονότος. Μια τέτοια σημειακή διαδικασία είναι η σημειακή διαδικασία Poisson, η οποία στη μονοδιάστατη εκδοχή της χαρακτηρίζεται από ένταση της μορφής  $\lambda(t; N_t, \mathbf{w}_t) = \lambda(t)$ . Όπως υποδεικνύεται και από τη μορφή της έντασης, δεν υπάρχει καμία συσχέτιση ενός γεγονότος από προγενέστερα γεγονότα, ενώ η ένταση  $\lambda(t)$  εξαρτάται από το χρόνο  $t$ .

Η συγκεκριμένη εργασία εστιάζει και εξετάζει 2 περιπτώσεις για τη χρησιμοποιούμενη διαδικασία Poisson, η οποία περιγράφει την άφιξη των χρηστών. Στη μία περίπτωση, η ένταση  $\lambda(t)$  είναι σταθερή στο χρόνο και κατά συνέπεια ανεξάρτητη από αυτόν και η διαδικασία Poisson ονομάζεται ομογενής. Αντίθετα στην άλλη περίπτωση, όπου υποτίθεται μεταβολή στην ποσότητα  $\lambda(t)$  συναρτήσει του χρόνου, η σημειακή διαδικασία Poisson ονομάζεται μη ομογενής. Η ίδια διάκριση υφίσταται και στην πολυδιάστατη εκδοχή της σημειακής διαδικασίας Poisson, άρα και στη δισδιάστατη που αφορά το χώρο.

Στα ad hoc δίκτυα που εξετάζονται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ο τρόπος προσέγγισης των εμφανίσεων των χρηστών προκειμένου να γίνει η βέλτιστη κατανομή των πόρων, δεν απαιτεί την ακριβή γνώση των χρονικών χαρακτηριστικών των αφίξεων, παρά μόνο την τελική χωρική διάταξη των χρηστών. Επιπλέον, επειδή η χρονική διάσταση στις αφίξεις των χρηστών δεν επηρεάζει την τελική κατανομή τους στο χώρο, καθώς και για λόγους αποφυγής της περιττής περιπλοκότητας, η χρονική κατανομή των χρηστών θεωρήθηκε ομογενής σημειακή διαδικασία Poisson. Αντίθετα, η ένταση της σημειακής διαδικασίας Poisson θεωρούμενη στο δισδιάστατο χώρο δεν μπορεί να είναι ομογενής, γιατί αυτό θα ισοδυναμούσε με ομοιομορφία των αφίξεων των χρηστών στο χώρο, κάτι που δεν συμβαίνει στα ad hoc πολυπληθή γεγονότα που μελετώνται. Επομένως, σε ό,τι αφορά αποκλειστικά τη χωρική διαδικασία Poisson και χωρίς να ληφθεί υπόψη ο χρόνος, η ένταση  $\lambda(x,y)$  είναι μεταβλητή και πλήρως εξαρτώμενη από τις διαστάσεις του χώρου.

Προκειμένου να διατυπωθεί η συνολική σημειακή διαδικασία Poisson που θα περιγράφει την εμφάνιση των χρηστών στο ad hoc γεγονός, απαιτείται ο συνδυασμός των χρονικών και των χωρικών χαρακτηριστικών, όπως αυτά παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Έτσι, επιλέγεται ως καταλληλότερο το τρισδιάστατο μαθηματικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια. Η ένταση της συνολικής χωροχρονικής διαδικασίας Poisson με διαστάσεις το χρόνο  $t$  και τις καρτεσιανές συντεταγμένες της θέσης εμφάνισης  $x, y$  είναι, κατ' επέκταση, η  $\lambda(t,x,y)$ . Επειδή δεν υπάρχει λόγος συσχέτισης της χρονικής με τη χωρική συμπεριφορά της εμφάνισης των χρηστών, κρίνεται σκόπιμο να απεμπλακεί η χρονική από τη χωρική ένταση της διαδικασίας Poisson των αφίξεων. Η απεμπλοκή αυτή επιτυγχάνεται εκφράζοντας την ένταση  $\lambda(t,x,y)$  ως εξής:

$$\lambda(t,x,y) = \lambda_t(t) * \lambda_{xy}(x,y) \quad (2.1)$$

όπου  $\lambda_t$  η χρονική συνιστώσα της έντασης και

$\lambda_{xy}$  η χωρική συνιστώσα της έντασης

Η  $\lambda(t,x,y)$  περιγράφει πλήρως το προφίλ εμφάνισης των χρηστών στο χώρο του ad hoc γεγονότος και η γνώση της παρέχει στον πάροχο (Network Operator) τη δυνατότητα να καταναείμει τους διαθέσιμους τηλεπικοινωνιακούς πόρους στο ad hoc δίκτυο κατά βέλτιστο τρόπο.

Προς διευκόλυνση της διακριτής μελέτης της χρονικής και χωρικής συμπεριφοράς των εμφανιζόμενων χρηστών, ορίζεται αντίστοιχα η χρονική και η χωρική εκδοχή της έντασης της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson. Συγκεκριμένα, στη χρονική εκδοχή της έντασης, η χωρική συνιστώσα υπολογίζεται συνολικά, ολοκληρώνοντας την  $\lambda(t,x,y)$  ως προς τις χωρικές διαστάσεις  $x, y$ , οπότε η ένταση είναι απαλλαγμένη από τις διαστάσεις αυτές. Η χρονική εκδοχή της έντασης συμβολίζεται  $\lambda^{xy}(t)$  και ο υπολογισμός της φαίνεται παρακάτω

$$\lambda^{xy}(t) = \int_0^a \int_0^b \lambda(t, x, y) dy dx = \int_0^a \int_0^b \lambda_t(t) * \lambda_{xy}(x, y) dy dx = \lambda_t(t) \int_0^a \int_0^b \lambda_{xy}(x, y) dy dx = \lambda_t(t) * E_{xy}$$

$$\text{όπου } E_{xy} = \int_0^a \int_0^b \lambda_{xy}(x, y) dy dx \text{ η συνολική χωρική συνιστώσα} \quad (2.2)$$

Κατά δυαδικό τρόπο, στη χωρική εκδοχή της έντασης η χρονική συνιστώσα λαμβάνεται υπόψη συνολικά, μέσω της ολοκλήρωσης της έντασης  $\lambda(t,x,y)$  ως προς τη χρονική διάσταση  $t$ . Έτσι, από τη χωρική εκδοχή  $\lambda^t(x,y)$  απουσιάζει η διάσταση του χρόνου  $t$  όπως φαίνεται και στον παρακάτω υπολογισμό της

$$\lambda^t(x,y) = \int_0^T \lambda(t, x, y) dt = \int_0^T \lambda_t(t) * \lambda_{xy}(x, y) dt = \lambda_{xy}(x, y) \int_0^T \lambda_t(t) dt = \lambda_{xy}(x, y) * E_t \quad (2.3)$$

$$\text{όπου } E_t = \int_0^T \lambda_t(t) dt \text{ η συνολική χρονική συνεισφορά.}$$

Με τους παραπάνω υπολογισμούς ολοκληρώνεται η επιλογή και παρουσίαση του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει τον τρόπο εμφάνισης των χρηστών στο ad hoc πολυπληθές γεγονός, του οποίου η τηλεπικοινωνιακή κάλυψη εξετάζεται.

## 2.2 Περιγραφή προτεινόμενου αλγορίθμου

Ο συνολικός προτεινόμενος αλγόριθμος, που περιγράφεται ακολούθως, παρουσιάζεται σε μορφή λογικού διαγράμματος στο Παράρτημα Α του κεφαλαίου.

### 2.2.1 Τοποθέτηση κόμβων και κατανομή πόρων

Αρχικά, κρίνεται σκόπιμο να διευκρινιστεί η έννοια του τηλεπικοινωνιακού πόρου, ως μέσου επικοινωνίας του πομπού με το δέκτη σε μια τηλεπικοινωνιακή σύνδεση. Ως πόρος νοείται η χρήση συγκεκριμένης ζώνης του φάσματος (spectral zone) για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια (timeslot). Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η σύνδεση ενός χρήστη με ένα σταθμό βάσης είναι ασύμμετρη. Σε μια ασύμμετρη σύνδεση ο όγκος πληροφορίας της άνω ζεύξης διαφέρει από αυτόν της κάτω και ο χρήστης έχει ρόλο πομπού ή και δέκτη. Στην υπό μελέτη περίπτωση, θεωρείται ένας συνολικός αριθμός πόρων που απαιτούνται για την επικοινωνία του χρήστη με τον σταθμό βάσης του δικτύου και δεν εξετάζεται το αν αυτοί οι πόροι προορίζονται για αποστολή (uploading) ή λήψη (downloading) δεδομένων από τον τελικό χρήστη.

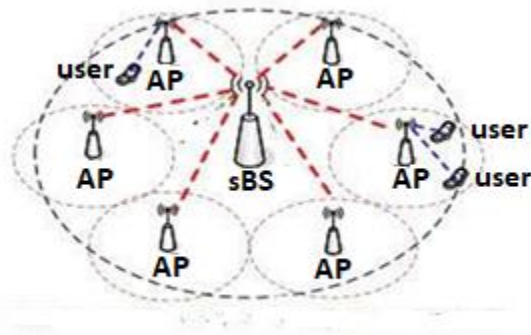
Έτσι, λοιπόν, η σταδιακή εμφάνιση των χρηστών στο χώρο διεξαγωγής του γεγονότος συνοδεύεται και με αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, λόγω της χρήσης των κινητών τους συσκευών. Αυτή η αυξημένη τηλεπικοινωνιακή κίνηση ισοδυναμεί με αύξηση της ζήτησης για τηλεπικοινωνιακούς πόρους. Συγκεκριμένα, στην παρούσα μελέτη, θεωρείται αυθαίρετα πως για κάθε νεοεισερχόμενο χρήστη απαιτείται αριθμός πόρων ίσος με  $A$ . Η υπόθεση ίδιου αριθμού ζητούμενων πόρων για όλους τους χρήστες, εξυπηρετεί την ανάγκη για απλούστευση της παρουσίασης του αλγορίθμου σε αυτή τη φάση. Στην πραγματικότητα υπάρχει διαφοροποίηση στον αριθμό των ζητούμενων πόρων ανά χρήστη, ανάλογα με τις απαιτήσεις της υπηρεσίας που χρησιμοποιεί κάθε χρήστης.

Γενικά, η περιοχή όπου λαμβάνει χώρα ένα ad hoc γεγονός ενδέχεται είτε να μη διαθέτει υποδομή τηλεπικοινωνιακού δικτύου είτε να μη μπορεί να υποστηρίξει την αυξημένη τηλεπικοινωνιακή ζήτηση, λόγω περιορισμένης χωρητικότητας στο υπάρχον δίκτυο. Την κάλυψη των αναγκών των χρηστών σε τηλεπικοινωνιακούς πόρους θα αναλάβει το ad hoc δίκτυο, που θα εγκατασταθεί και θα το διαχειρίζεται ο τηλεπικοινωνιακός πάροχος που έχει αναλάβει την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη του χώρου όπου θα λάβει χώρα το γεγονός. Το δίκτυο που πρόκειται να δημιουργηθεί θα αποτελείται από:

- τους κόμβους που θα τοποθετηθούν και θα λειτουργούν ως σημεία πρόσβασης (Access Points, APs) για τους χρήστες και στα οποία θα έχουν αποδοθεί τηλεπικοινωνιακοί πόροι για να τους διαθέσουν στους χρήστες και

- το σταθμό βάσης με αυξημένες υπολογιστικές δυνατότητες super Base Station (sBS) ο οποίος θα αναλάβει όλη τη διαχείριση του δικτύου και θα επικοινωνεί με τα APs σε όλη τη διάρκεια του γεγονότος

Η δομή του δικτύου που θα αναπτυχθεί φαίνεται στο Σχ. 2.1, όπου τα APs έχουν παρόμοιο ρόλο με αυτό των σταθμών βάσης στα κυψελωτά συστήματα που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα δίκτυα κινητής επικοινωνίας. Ο sBS μπορεί να βρίσκεται και εκτός του χώρου που καλύπτουν τα APs υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει συνδεσιμότητα -ασύρματη ή ενσύρματη- μεταξύ αυτού και των APs



**Σχήμα 2.1** Δομή του προτεινόμενου ασύρματου τηλεπικοινωνιακού δικτύου με χρήση AP και sBS

Με τη χρήση της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής επιτυγχάνεται η επιθυμητή συνεκτικότητα του ad hoc δικτύου, καθώς οι κόμβοι αναμετάδοσης RS επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω του ισχυρού κόμβου SBS.

Οι κόμβοι AP που θα τοποθετηθούν και θα εξυπηρετούν τους χρήστες επιλέγονται να έχουν ίδια ακτίνα εμβέλειας  $r$ , η οποία θεωρείται ίση με την εμβέλεια των κινητών συσκευών των χρηστών που θα εμφανιστούν στο χώρο. Επιπλέον, επισημαίνεται πως οι κεραίες των σημείων πρόσβασης θεωρούνται ισοτροπικές, δηλαδή έχουν ιδανικό εύρος ζώνης  $360^\circ$ . Η τοποθέτηση των κόμβων AP στο χώρο πραγματοποιείται με στόχο την ικανοποίηση των ακόλουθων προδιαγραφών:

- i. οποιοδήποτε σημείο του χώρου πρέπει να ανήκει στην εμβέλεια ενός ή περισσότερων κόμβων AP, με ανοχή για αστοχία σε ένα μικρό ποσοστό σημείων της τάξης του 0.1%,
- ii. η χωρική αλληλεπικάλυψη των κόμβων AP επιβάλλεται να είναι η μικρότερη δυνατή, όπως συμβαίνει και στα κυψελωτά δίκτυα για αποφυγή παρεμβολών,
- iii. ο αριθμός των κόμβων AP πρέπει να είναι ο ελάχιστος δυνατός, με στόχο τη μείωση του κόστους εγκατάστασης (CAPEX) και λειτουργίας (OPEX) του δικτύου.

Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω προδιαγραφές και με δεδομένη την ακτίνα εμβέλειας  $r$ , προκύπτει ο αριθμός των απαιτούμενων, για τη κάλυψη του χώρου, κόμβων  $M$  και το διάλυμα των θέσεων τους στο χώρο  $p_i$ , με  $1 \leq i \leq M$ . Έτσι, υπάρχει η πλήρης πληροφορία για την τοποθέτηση των κόμβων στον προς κάλυψη χώρο.

Αφού καθοριστούν οι θέσεις και τοποθετηθούν οι κόμβοι AP, ακολουθεί η κατανομή των διαθέσιμων πόρων σε αυτούς. Κάθε χρήστης που εμφανίζεται ζητεί πόρους από τον κόμβο AP στην εμβέλεια του οποίου βρίσκεται. Επειδή πρέπει οι διαθέσιμοι πόροι να επαρκούν για την εξυπηρέτηση όλων των χρηστών, απαιτείται εκτίμηση του συνολικού αριθμού των χρηστών που αναμένεται να εμφανιστούν στο χώρο. Ο συνολικός αριθμός των αναμενόμενων χρηστών,  $N_{users}$ , προκύπτει ολοκληρώνοντας την ένταση  $\lambda(t,x,y)$  ως προς το χρόνο και το χώρο, δηλαδή

$$N_{users} = \int_0^T \int_0^a \int_0^b \lambda(t,x,y) dy dx dt \quad (2.4)$$

Συνεπώς, επειδή οι συνολικά διαθέσιμοι πόροι  $N$  πρέπει να καλύπτουν τη ζήτηση  $A$  πόρων από κάθε χρήστη, ισχύει

$$N = N_{users} * A \quad (2.5)$$

Σε αυτόν τον αριθμό δεν έχουν συμπεριληφθεί οι επιπλέον πόροι που απαιτούνται για την επικοινωνία των κόμβων APs με τον ισχυρό κόμβο SBS, καθώς όλοι οι κόμβοι χρειάζονται τον ίδιο αριθμό επιπλέον πόρων και δεν απαιτείται κάποιος υπολογισμός, αλλά οι πόροι αυτοί απλά προστίθεται στους πόρους κάθε κόμβου AP.

Είναι επιθυμητό οι πόροι να αποδοθούν όσο το δυνατό πλησιέστερα στην περιοχή από όπου θα ζητηθούν, ώστε να μην υπάρχει καθυστέρηση στην εξυπηρέτηση των χρηστών. Εφόσον είναι

γνωστό ότι οι χρήστες που θα εμφανιστούν στο χώρο -και κατά συνέπεια οι πόροι που θα ζητηθούν- ακολουθούν τη σημειακή διαδικασία Poisson που χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη ένταση  $\lambda(t,x,y)$ , η κατανομή των πόρων μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση αυτό το μοντέλο κίνησης. Τη διαδικασία της κατανομής των διαθέσιμων πόρων στους κόμβους AP αναλαμβάνει να εκτελέσει ο ισχυρός κόμβος SBS, λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική εκδοχή της έντασης της κατανομής των χρηστών  $\lambda^t(x,y)$ . Η χρονική διάσταση της έντασης αγνοείται, καθώς δεν επηρεάζει τις θέσεις των χρηστών στο χώρο.

Βοηθητικό εργαλείο στη βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων στους κόμβους AP αποτελεί η καλά υποστηριζόμενη κατανομή Poisson  $\lambda'(x,y)$ , που προκύπτει αν ληφθούν υπόψη τα εξής:

- i. η χωρική εκδοχή της έντασης κατανομής των χρηστών  $\lambda^t(x,y)$  και ο ζητούμενος αριθμός πόρων κάθε χρήστη, στη συγκεκριμένη περίπτωση A για όλους
- ii. ο αριθμός των κόμβων M και το διάνυσμα των θέσεων των κόμβων  $\mathbf{p}_i$ , με  $1 \leq i \leq M$
- iii. ο αριθμός των διαθέσιμων πόρων σε κάθε κόμβο, που είναι το διάνυσμα  $\mathbf{m}_i$ , με  $1 \leq i \leq M$

Η  $\lambda'(x,y)$  ορίζεται χωριστά για κάθε υποπεριοχή  $Z_j$ ,  $1 \leq j \leq L$ , του προς κάλυψη χώρου, της οποίας τα εσωτερικά σημεία ανήκουν στην εμβέλεια των ίδιων ακριβώς κόμβων. Ο χώρος αποτελείται συνολικά από L τέτοιες υποπεριοχές. Κάθε τέτοια υποπεριοχή  $Z_j$  χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα  $\mathbf{s}_i$ ,  $1 \leq i \leq M$ , του οποίου τα στοιχεία έχουν τιμές

$$s_i = \begin{cases} 1, & \text{αν η περιοχή } S \text{ είναι εντός της εμβέλειας του } i - \text{ στού κόμβου AP} \\ 0, & \text{αν η περιοχή } S \text{ δεν είναι εντός της εμβέλειας του } i - \text{ στού κόμβου AP} \end{cases} \quad (2.6)$$

Επομένως, σε κάθε υποπεριοχή  $Z_j$  με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά ορίζεται η  $\lambda'(x,y)$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$\lambda'_{z_j}(x,y) = \sum_{i=1}^M s_i \frac{m_i * f(x,y)}{A * \int_S f(x,y)} , \text{ με } 1 \leq j \leq L \text{ όπου } f(x,y) = \lambda^t(x,y) \quad (2.7)$$

Το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων από τον SBS μετατρέπεται πλέον σε ελαχιστοποίηση της διαφοράς της καλά υποστηριζόμενης συνάρτησης  $\lambda'(x,y)$  από τη χωρική εκδοχή της έντασης κατανομής  $\lambda^t(x,y)$  και αποτελεί πρόβλημα κυρτής βελτιστοποίησης της μορφής:

$$U = \min_{\mathbf{m}_i} \sum_{j=1}^L \int_{Z_j} (\lambda'(x,y) - \lambda^t(x,y))^2 dx dy \quad (2.8)$$

s.t.  $\mathbf{m}_i > 0$ , με  $1 \leq i \leq M$

$$\sum_{i=1}^M m_i = N \quad (2.9)$$

Ο αριθμός των πόρων που θα αποδοθούν σε κάθε κόμβο καθορίζεται με στόχο την ικανοποίηση των ανωτέρω προϋποθέσεων και αποτελεί τη λύση του προβλήματος που διατυπώθηκε.



## 2.2.2 Άφιξη και εξυπηρέτηση χρηστών

Έχοντας πραγματοποιήσει την τοποθέτηση των κόμβων AP για την κάλυψη του χώρου όπου θα λάβει χώρα το πολυπληθές γεγονός, καθώς και την κατανομή των πόρων στους κόμβους αυτούς, και λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο εμφάνισης των χρηστών, το ad hoc δίκτυο είναι σε κατάσταση αναμονής των χρηστών που θα εξυπηρετήσει. Στο σταθμό βάσης sBS είναι γνωστοποιημένα ο αριθμός και οι θέσεις των κόμβων AP, δηλαδή το διάνυσμα  $\mathbf{p}_i$ ,  $i=1,2,\dots,M$ , καθώς και ο αριθμός των πόρων που έχουν αποδοθεί σε κάθε κόμβο, δηλαδή το διάνυσμα  $\mathbf{m}_i$ ,  $i=1,2,\dots,M$ . Με βάση τα δεδομένα αυτά ο σταθμός βάσης sBS αποφασίζει, για κάθε νεοεισερχόμενο στο δίκτυο χρήστη, τον κόμβο από τον οποίο θα εξυπηρετηθεί.

Κάθε νέος χρήστης που εμφανίζεται σε κάποια θέση στο χώρο του γεγονότος, βρίσκεται στην εμβέλεια ενός ή περισσότερων κόμβων του δικτύου, κάτι που έχει εξασφαλιστεί μέσω της κατάλληλης τοποθέτησης των APs. Ο χρήστης ζητεί να συνδεθεί στο δίκτυο μέσω κάποιου από αυτούς τους κόμβους, απαιτώντας  $A$  πόρους για τις υπηρεσίες που θα χρησιμοποιήσει. Όπως έχει προαναφερθεί, η ακτίνα εμβέλειας των κόμβων AP ταυτίζεται με αυτή των συσκευών των χρηστών. Επομένως, ο χρήστης είναι σε θέση να επικοινωνήσει με τους κόμβους AP από τους οποίους απέχει απόσταση μικρότερη από την ακτίνα εμβέλειας  $r$ . Ο κόμβος ή οι κόμβοι από τους οποίους απέχει το πολύ κατ' αυτή την απόσταση, δηλαδή βρίσκεται στην εμβέλειά τους, είναι αυτοί που θα εξυπηρετήσουν το χρήστη, όταν θα ζητήσει τις υπηρεσίες. Συγκεκριμένα, όταν ο χρήστης βρίσκεται στην εμβέλεια περισσότερων του ενός κόμβων, μπορεί, είτε με τυχαίο είτε με προκαθορισμένο τρόπο, να επιλέξει εκείνο τον κόμβο, στο εξής αναφερόμενο ως κόμβος  $l$ , που θα αναλάβει να τον εξυπηρετήσει, δηλαδή να του αποδώσει τους απαραίτητους πόρους. Ένα δίκαιο κριτήριο επιλογής του κόμβου  $l$  είναι ο αριθμός των διαθέσιμων πόρων που υπάρχουν σε κάθε κόμβο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, από τους επιλέξιμους κόμβους AP ο κόμβος AP με τους περισσότερους διαθέσιμους πόρους θα επιλεγεί ως κόμβος  $l$ .

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να διευκρινιστεί ότι την πληροφορία για τον αριθμό των διαθέσιμων πόρων τη διατηρεί ο sBS, μέσω του διανύσματος  $\mathbf{m}_i$ . Καίτοι αυτό το διάνυσμα έχει ήδη δημιουργηθεί από την αρχική κατανομή του συνολικού αριθμού των πόρων στους κόμβους του δικτύου, η πληροφορία που παρέχει το διάνυσμα πρέπει να ανανεώνεται μετά την εμφάνιση και εξυπηρέτηση κάθε νέου χρήστη. Αυτό γίνεται κατανοητό αν ληφθεί υπόψη ότι με την εξυπηρέτηση ενός νέου χρήστη, οι διαθέσιμοι πόροι στον εκάστοτε κόμβο  $l$  μειώνονται κατά τον αριθμό των πόρων που αποδόθηκαν, δηλαδή κατά  $A$ . Συνεπώς, ο νέος αριθμός διαθέσιμων πόρων του κόμβου αυτού πρέπει να αντικαθιστά τον παλιό στο διάνυσμα  $\mathbf{m}_i$ . Αρχίζει να διαφαίνεται, λοιπόν, και η σημαντική λειτουργία του σταθμού sBS στο δίκτυο, καθώς, εκτός των άλλων λειτουργιών, αυτός αναλαμβάνει να ενημερώνει το διάνυσμα  $\mathbf{m}_i$  για τους διαθέσιμους πόρους κάθε κόμβου και με βάση αυτό το διάνυσμα να πραγματοποιείται κάθε νέα σύνδεση χρήστη με το ad hoc δίκτυο.

Εφόσον για το νέο χρήστη, έστω  $u_n$ , έχει καθοριστεί ο αντίστοιχος κόμβος  $l$ , ακολουθεί η εξασφάλιση των απαιτούμενων πόρων για την εξυπηρέτησή του. Τη διαδικασία αυτή

αναλαμβάνει ο sBS, ο οποίος γνωρίζει τους διαθέσιμους πόρους κάθε κόμβου μέσω του ενημερωμένου διανύσματος  $\mathbf{m}_i$ .

Έτσι, σε πρώτη φάση ο sBS ελέγχει αν ο ζητούμενος αριθμός πόρων από το νέο χρήστη μπορεί να καλυφθεί από τους πόρους του κόμβου  $I$ , δηλαδή αν το υπόλοιπο των πόρων στον κόμβο  $I$  επαρκεί για να ικανοποιήσει τις ανάγκες του νέου χρήστη. Στην περίπτωση όπου είναι διαθέσιμος αυτός ο αριθμός πόρων στον κόμβο  $I$ , ο sBS δεσμεύει από τον κόμβο  $I$  τον ζητούμενο αριθμό πόρων και του αναθέτει την εξυπηρέτηση του χρήστη. Επίσης ενημερώνει το διάνυσμα  $\mathbf{m}_i$  για τη δέσμευση των πόρων από το συγκεκριμένο κόμβο AP. Συνολικά, εκτελούνται οι ακόλουθες εντολές υπό μορφή ψευδογλώσσας με στόχο την ευκολότερη κατανόηση:

If  $m(I) > A$

then  $u(n) = A$

$$m(I) = m(I) - A$$

Όταν, όμως, οι υπολειπόμενοι διαθέσιμοι πόροι στον κόμβο  $I$  είναι λιγότεροι από τους ζητούμενους πόρους, ο sBS δεσμεύει αρχικά όσους πόρους διαθέτει ο κόμβος  $I$  μέσω των εντολών:

If  $m(I) < A$

then  $u(n) = m(I)$

$$A_1 = A - m(I)$$

$$m(I) = 0$$

Στη συνέχεια, οφείλει να αναζητήσει τους υπόλοιπους πόρους  $A_1$  που απαιτεί ο χρήστης στους άλλους κόμβους του δικτύου. Η αναζήτηση αυτή γίνεται με τη χρήση του διανύσματος  $\mathbf{m}_i$ , από το οποίο εντοπίζεται κάποιος άλλος κόμβος με διαθέσιμους πόρους, ο οποίος θα δανείσει στον κόμβο  $I$  τους πόρους που απαιτούνται για τη συμπλήρωση του αριθμού των ζητούμενων πόρων. Για ευνόητους λόγους, ο sBS επιλέγει να δεσμεύσει πόρους από τον κόμβο AP που την τρέχουσα στιγμή έχει τους περισσότερους διαθέσιμους πόρους. Συγκεκριμένα, από το διάνυσμα  $\mathbf{m}_i$  εντοπίζεται εκείνος ο κόμβος, έστω  $I_1$ , που έχει τον μεγαλύτερο αριθμό διαθέσιμων πόρων. Αν ο αριθμός αυτός επαρκεί για να συμπληρωθεί ο αριθμός των ζητούμενων πόρων, ο sBS δίνει εντολή μεταφοράς των πόρων αυτών από τον κόμβο  $I_1$  στον κόμβο  $I$ , ώστε αυτός να μπορέσει να εξυπηρετήσει το χρήστη και ενημερώνει και πάλι το διάνυσμα  $\mathbf{m}_i$  για τις ενέργειές του. Σε αυτή την περίπτωση, εκτελούνται οι ακόλουθες εντολές:

if  $m(I_1) > A_1$

then  $u(n) = u(n) + A_1$

$$m(I_1) = m(I_1) - A_1$$

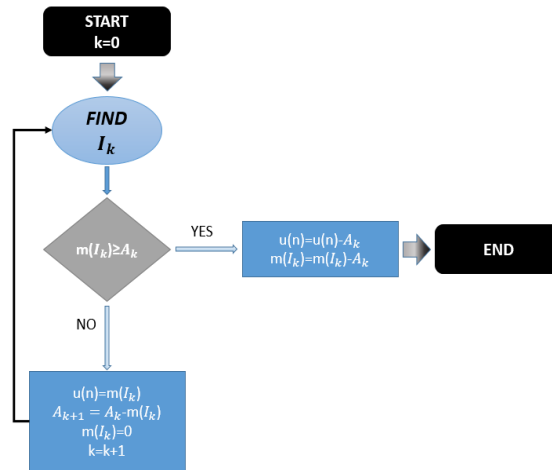
Ενδέχεται, όμως, και πάλι να μην επαρκούν οι διαθέσιμοι πόροι του  $I_1$  για την κάλυψη του υπολοίπου των ζητούμενων πόρων. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να επαναληφθεί η διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως και αφού δεσμευτούν όλοι οι πόροι του  $I_1$  που είναι διαθέσιμοι, να προσδιοριστεί ο νέος κόμβος με τους περισσότερους διαθέσιμους πόρους, δηλαδή ο  $I_2$ , και αυτό να συνεχιστεί έως ότου συμπληρωθεί ο απαιτούμενος αριθμός πόρων. Οι ενέργειες του sBS περιγράφονται σύντομα μέσω των εντολών υπό μορφή ψευδογλώσσας

```

if  $m(I_1) < A_1$ 
then  $u(n) = u(n) + m(I_1)$ 
       $A_2 = A_1 - m(I_1)$ 
       $m(I_1) = 0$ 

```

Συνεπώς, ο αλγόριθμος αναζήτησης των εκάστοτε απαιτούμενων  $A$  πόρων, όπως εκτελείται από τον sBS, εμφανίζει επαναληψιμότητα μέχρι να συμπληρωθεί ο απαιτούμενος αριθμός πόρων για την εξυπηρέτηση ενός νέου χρήστη του συστήματος. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη προκειμένου το σύστημα να διαθέσει σε κάθε νέο χρήστη όσους πόρους χρειάζεται η ζητούμενη υπηρεσία για να έχει την απαιτούμενη ποιότητα (QoS). Αν δεν είναι δυνατό να διατεθούν σε κάποιο νέο χρήστη οι ζητούμενοι πόροι, δεν θα ικανοποιούνται οι προδιαγραφές για την ποιότητα της υπηρεσίας που έχει ζητηθεί από το χρήστη, με αποτέλεσμα ο χρήστης να μη συνδέεται με το δίκτυο. Αυτό οδηγεί σε αύξηση του ποσοστού αποκλεισμού χρηστών (CBP-call blocking percentage/probability), ένα κρίσιμο μέτρο επίδοσης ενός δικτύου. Το Σχ. 2.2 συνοψίζει σε μορφή λογικού διαγράμματος τη διαδικασία εξυπηρέτησης κάθε χρήστη.



**Σχήμα 2.2** Ο αλγόριθμος εξυπηρέτησης χρηστών από τον sBS σε μορφή λογικού διαγράμματος

Επιπλέον, επισημαίνεται η επιλογή του sBS να αναζητεί κάθε φορά τον κόμβο με τους περισσότερους διαθέσιμους πόρους ως καθοριστική για την αποτελεσματική εξυπηρέτηση και την αποδοτικότητα του αλγορίθμου. Η εφαρμογή της τακτικής αυτής συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του βάθους αναζήτησης, δηλαδή του αριθμού των κόμβων που θα χρειαστεί

να συνεισφέρουν προκειμένου να εξυπηρετηθεί κάθε νεοεμφανιζόμενος χρήστης. Όπως θα φανεί στη συνέχεια από τα μετρούμενα μεγέθη για την αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου, αυτό επηρεάζει δραστικά την ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η πρόσβαση του νέου χρήστη στο δίκτυο.

Επισημαίνεται στο σημείο αυτό πως ο αριθμός των χρηστών, που τελικώς θα εμφανιστεί στο χώρο και θα επιθυμεί πρόσβαση στο ad hoc δίκτυο, ενδέχεται να διαφέρει από τον θεωρητικά αναμενόμενο, κάτι το οποίο αναπόφευκτα θα οδηγήσει σε μεγαλύτερα ποσοστά αποκλεισμού χρηστών.

### **2.2.3 Μέτρα αξιολόγησης του προτεινόμενου αλγορίθμου**

Πριν από τον καθορισμό των μεγεθών που θα αποτελούν μέτρα αξιολόγησης της απόδοσης του αλγορίθμου που έχει παρουσιαστεί στις προηγούμενες ενότητες, κρίνεται σκόπιμο να τονιστούν ορισμένα πλεονεκτήματα της συγκεντρωτικής δομής του ad hoc δικτύου που διαμορφώνεται. Σύμφωνα με τη δομή αυτή, ο sBS κατέχει τον αναβαθμισμένο ρόλο του διαχειριστή των πόρων ολόκληρου του δικτύου και οι υπόλοιποι κόμβοι έχουν περιορισμένες αρμοδιότητες αναφορικά με την προετοιμασία του δικτύου για εξυπηρέτηση ενός νέου χρήστη.

Αρχικά, η συγκεντρωτική αυτή προσέγγιση έχει θετικό αντίκτυπο στην αποτελεσματική διαχείριση των διαθέσιμων πόρων, οι οποίοι κατανέμονται με δυναμικό τρόπο κατά τη διάρκεια εμφάνισης χρηστών. Πέρα από την αρχική κατανομή πόρων, που βασίζεται στο θεωρητικά αναμενόμενο μοντέλο εμφάνισης χρηστών, ο sBS προσαρμόζει κάθε φορά τη χωρητικότητα κάθε κόμβου με βάση τις ανάγκες που προκύπτουν από τον τρόπο εμφάνισης των χρηστών στο χώρο. Έτσι, αποφεύγεται πιθανή σπατάλη των πόρων, που θα συνέβαινε αν όλοι οι κόμβοι έπρεπε να διαθέτουν σταθερό αριθμό πόρων, ο οποίος θα έπρεπε να καλύπτει το χειρότερο πιθανό σενάριο για τον αριθμό χρηστών που θα κληθεί να εξυπηρετήσει κάθε κόμβος. Το σενάριο αυτό απαιτεί περισσότερους πόρους. Στην περίπτωση αυτή, το άθροισμα όλων των πόρων του δικτύου θα κατέληγε να ήταν πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με το συνολικό αριθμό διαθέσιμων πόρων που απαιτείται ακολουθώντας τη συγκεντρωτική λειτουργία δικτύου.

Παράλληλα, μειώνεται σε μεγάλο βαθμό η καθυστέρηση στην εξυπηρέτηση, που θα προέκυπτε αν οι κόμβοι έπρεπε να επικοινωνούν μεταξύ τους για να δανειστούν τους απαραίτητους πόρους από κόμβους με περίσσεια διαθέσιμων πόρων. Αυτή η επικοινωνία αποφεύγεται, καθώς η διαχείριση του υπολοίπου των αδέσμευτων πόρων των κόμβων του δικτύου έχει ανατεθεί στον ισχυρό κόμβο sBS.

Επιπλέον, η συγκεντρωτική δομή του δικτύου συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση του πλεονασμού (overhead), που προστίθεται σε κάθε μήνυμα για τον έλεγχο της περιεχόμενης πληροφορίας, το οποίο θα προέκυπτε αν η επικοινωνία γινόταν απευθείας μεταξύ χρήστη και sBS. Ο sBS θα έπρεπε να διαχειριστεί πολλαπλάσια πληροφορία σε μια τέτοια περίπτωση, ενώ με τη μεσολάβηση των κόμβων που λειτουργούν και ως συλλέκτες της πληροφορίας (aggregation points) ο πλεονασμός αυτός περιορίζεται σημαντικά.

Τέλος, ένα σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεντρωτικής λειτουργίας του δικτύου αποτελεί το μειωμένο κόστος εξοπλισμού, λόγω της χρήσης μόνο ενός σταθμού βάσης, του sBS, με αυξημένες υπολογιστικές ικανότητες. Οι κόμβοι AP δεν απαιτείται να έχουν ιδιαίτερη ευφυΐα και υπολογιστική ικανότητα, επομένως, το κόστος τους είναι πολύ χαμηλότερο από αυτό του sBS. Έτσι, ο πάροχος έχει λιγότερα έξοδα σε σχέση με το να διαθέτετε πολλούς κόμβους με τις δυνατότητες του sBS.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου, κατά την εφαρμογή του σε υποθετικά ή υπαρκτά σενάρια, κρίνεται αναγκαίος ο ορισμός συγκεκριμένων και μετρήσιμων δεικτών που σχετίζονται με την ταχύτητα εξυπηρέτησης των εμφανιζόμενων χρηστών. Η ικανότητα ταχείας εξυπηρέτησης ενός χρήστη από το δίκτυο πρόσβασης, αντικατοπτρίζει την επιτυχημένη γεωγραφική κατανομή των διαθέσιμων πόρων στους κόμβους του δικτύου.

Ενδεικτικά μεγέθη εκτίμησης της ταχύτητας εξυπηρέτησης που υπολογίζονται κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου είναι τα ακόλουθα :

- i. το ποσοστό των χρηστών που εξυπηρετούνται από τον κόμβο I χωρίς να χρειαστεί δανεισμός πόρων από άλλους κόμβους,
- ii. το μέσο βάθος αναζήτησης πόρων στους κόμβους του δικτύου, που είναι ίσο με το μέσο αριθμό κόμβων που συμμετέχουν στην εξυπηρέτηση ενός χρήστη και
- iii. το μέγιστο βάθος αναζήτησης πόρων σε άλλους κόμβους του δικτύου πέραν του κόμβου I

Τα δύο τελευταία μεγέθη, μάλιστα, είναι δηλωτικά της επιτυχημένης χρήσης του διανύσματος ταξινόμησης των κόμβων, καθώς με αυτό το διάνυσμα είναι άμεση η εξεύρεση του κόμβου που έχει τους περισσότερους αδέσμευτους πόρους κάθε φορά.

## **2.3 Προσομοίωση προτεινόμενου αλγορίθμου σε υπολογιστικό περιβάλλον**

Μετά την παρουσίαση του προτεινόμενου αλγορίθμου για την ανάπτυξη ad hoc δικτύου στο χώρο διεξαγωγής ενός πολυπληθούς γεγονότος προς εξυπηρέτηση νέων χρηστών, η προσομοίωση ενός σεναρίου εφαρμογής του κρίνεται απαραίτητη για την καλύτερη κατανόησή του. Στο σενάριο αυτό, θα θεωρηθεί απλοποιημένη περίπτωση χώρου και κατανομής χρηστών, ώστε να αποδοθεί σε αδρές γραμμές η λειτουργία του προτεινόμενου αλγορίθμου.

### **2.3.1 Περιβάλλον προσομοίωσης**

Το εργαλείο που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του σεναρίου εφαρμογής του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι το προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, και συγκεκριμένα η έκδοση R2014a, χωρίς η επιλογή της συγκεκριμένης έκδοσης να έχει καθοριστικό ρόλο στην υλοποίηση του σεναρίου. Το περιβάλλον αυτό αποτελεί προτιμητέα λύση με βάση τα πλεονεκτήματα που προσφέρει, όπως είναι η απεικόνιση όλων των μεταβλητών σε μορφή πινάκων, η οποία διευκολύνει τη διαχείριση του μεγάλου όγκου δεδομένων που αφορούν τις

θέσεις των κόμβων και των χρηστών. Επιπλέον, όλα τα στάδια του προτεινόμενου αλγορίθμου μπορούν να υλοποιηθούν με απλές εντολές κώδικα, που καθιστούν τον αλγόριθμο ευανάγνωστο και τη λειτουργία του κατανοητή. Συμπληρωματικά, το Matlab διαθέτει τη δυνατότητα δημιουργίας όλων των απαραίτητων διαγραμμάτων, στα οποία αποτυπώνονται οι θέσεις των χρηστών στο χώρο και το χρόνο, καθώς και οι διάφοροι δείκτες αξιολόγησης του αλγορίθμου. Τέλος, η ύπαρξη του πρόσθετου εργαλείου CVX Toolbox (AddOn), το οποίο αποτελεί περιβάλλον βελτιστοποίησης της γλώσσας Matlab, καθιστά ιδανική την επιλογή αυτού του περιβάλλοντος προσομοίωσης. Το πρόσθετο εργαλείο CVX Toolbox αναλαμβάνει την πραγματοποίηση της βελτιστοποίησης της αρχικής κατανομής πόρων, όπως διατυπώνεται μέσω των (2.8) και (2.9), μειώνοντας έτσι τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο εκτέλεσης για την επίλυση αυτού του προβλήματος. Συγκεκριμένα, η βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων που εφαρμόζεται από τη βιβλιοθήκη CVX του Matlab.

### 2.3.2 Σενάριο προσομοίωσης

Έστω χώρος  $S$ , διαστάσεων  $a \times b$ , όπου  $a=b=1$ , στον οποίο πρόκειται να λάβει χώρα ένα πολυπληθές γεγονός, για παράδειγμα μια συναυλία. Οι θεατές που αναμένεται να εμφανιστούν στο χώρο, προβλέπεται να ζητήσουν υπηρεσίες τηλεφωνίας και διαδικτύου, για την παροχή των οποίων απαιτείται πρόσβαση σε τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Επομένως, ο χώρος  $S$  είναι απαραίτητο να καλυφθεί από κάποιον τηλεπικοινωνιακό πάροχο, ο οποίος θα αναλάβει την εξυπηρέτηση των χρηστών.

Ο τρόπος εμφάνισης των χρηστών στο χώρο και το χρόνο είναι γνωστός και περιγράφεται από την ένταση της σημειακής διαδικασίας Poisson που ακολουθούν οι αφίξεις, δηλαδή:

$$\lambda(t, x, y) = 100 (x+y) \quad (2.10)$$

$$\text{όπου: } \lambda_t(t) = 100 \text{ για διάστημα } 0 \leq t \leq 10 \quad (2.11)$$

$$\lambda_{xy}(x, y) = x + y \text{ για } 0 \leq x, y \leq 1 \quad (2.12)$$

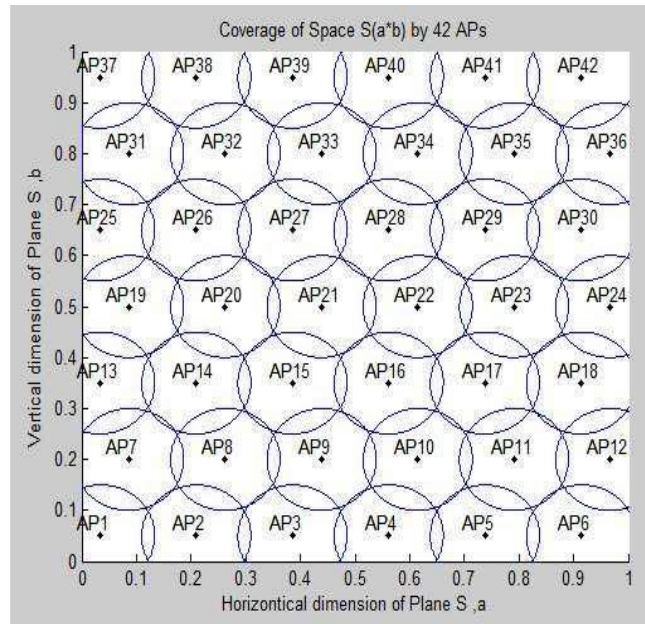
Όπως είναι φανερό, επιλέγεται ομογενής η χρονική εξάρτηση της έντασης κατανομής, για λόγους απλοποίησης του προβλήματος. Άλλωστε, το ζητούμενο είναι η βέλτιστη χωρική κατανομή των πόρων στο χώρο  $S$  και η χρονική διάσταση μπορεί να αγνοηθεί και να ληφθεί υπόψη μόνο ως σύνολο, με βάση την (2.3).

Επιπλέον, η εμβέλεια των συσκευών των χρηστών θεωρείται γνωστή και ίση με  $r=0.1$  ενώ γίνεται η παραδοχή ότι όλοι οι χρήστες απαιτούν τον ίδιο αριθμό πόρων για να εξυπηρετηθούν, ο οποίος στην προκειμένη περίπτωση είναι ίσος με  $A=5$ .

#### 2.3.2.1 Τοποθέτηση κόμβων

Από το χώρο διεξαγωγής του γεγονότος απουσιάζει το δίκτυο πρόσβασης με την απαιτούμενη γεωγραφική κάλυψη και χωρητικότητα που θα μπορέσει να εξυπηρετήσει τηλεπικοινωνιακά το κοινό της συναυλίας. Για το λόγο αυτό, ο πάροχος φροντίζει να δημιουργήσει ένα ad hoc δίκτυο

πρόσβασης με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, όπως αυτά έχουν περιγραφεί στην παράγραφο 2.2.1. Οι κόμβοι AP που θα τοποθετηθούν θα έχουν εμβέλεια ίδια με αυτή των συσκευών των χρηστών, άρα  $r=0.1$ . Με δεδομένη την εμβέλεια και συνυπολογίζοντας την επιθυμητή ελαχιστοποίηση του αριθμού των κόμβων AP, προκύπτει ο συνολικός απαιτούμενος αριθμός κόμβων  $M=42$  και οι θέσεις αυτών, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.3.



**Σχήμα 2.3** Τοποθέτηση κόμβων δικτύου στο χώρο  $S$

Στο Σχ. 2.3 δεν αποτυπώνεται η θέση του SBS, καθώς αυτός δεν αναλαμβάνει την κάλυψη κάποιου τμήματος του χώρου αλλά είναι επιφορτισμένος με το συντονισμό των εργασιών του δικτύου για την εξυπηρέτηση των χρηστών. Η θέση του SBS μπορεί να είναι είτε εντός του χώρου  $S$  είτε εκτός αυτού, αρκεί να εξασφαλίζεται η συνδεσιμότητά του με όλους τους κόμβους με ασύρματο (i.e. microwave link) ή ενσύρματο τρόπο (i.e. optic fiber).

### 2.3.2.2 Διαστασιολόγηση του δικτύου και βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων

Με δεδομένη την ένταση της κατανομής χρηστών, είναι εύκολο να υπολογιστεί ο συνολικός αναμενόμενος αριθμός των χρηστών μέσω της (2.4) και κατά συνέπεια, ο συνολικός απαιτούμενος αριθμός πόρων που πρέπει να διαθέτει το δίκτυο για την εξυπηρέτησή όλων των χρηστών μέσω της (2.5). Συγκεκριμένα, στο σενάριο αυτό οι χρήστες που αναμένονται στο χώρο  $S$  είναι

$$N_{users} = \int_0^{10} \int_0^1 \int_0^1 100(x + y) dy dx dt = 1000 \text{ χρήστες} \quad (2.13)$$

Κρίνεται σκόπιμο να διευκρινιστεί ότι ο αριθμός αυτός είναι ο στατιστικά αναμενόμενος και δεν ταυτίζεται αναγκαστικά με τον πραγματικό αριθμό χρηστών που θα προσέλθουν στην εκδήλωση. Εντούτοις, είναι κατάλληλο μέσο προσδιορισμού των τηλεπικοινωνιακών πόρων που

απαιτούνται για την κάλυψη του γεγονότος. Σε όρους τηλεπικοινωνιακών πόρων, το σενάριο που περιγράφεται σε αυτήν την ενότητα απαιτεί χωρητικότητα δικτύου, ίση με

$$N = N_{users} * A = 5000 \text{ πόρους} \quad (2.14)$$

Οι πόροι αυτοί που θα διατεθούν από τον πάροχο στους χρήστες του δικτύου, προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες χωρητικότητας του ad hoc δικτύου, προέρχονται είτε από το φάσμα που κατέχει ο ίδιος ο πάροχος είτε από δανεισμό τμήματος του φάσματος άλλου παρόχου.

Έχοντας, λοιπόν, εξασφαλίσει τον απαιτούμενο αριθμό πόρων που αναμένεται να ζητηθούν από το σύνολο το χρηστών, βασικό μέλημα του διαχειριστή του δικτύου είναι να φροντίσει να καταναμηθούν κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο στους κόμβους AP που έχουν τοποθετηθεί στο χώρο. Αυτή η βελτιστοποίηση στην κατανομή των πόρων έγκειται στην απόδοση των πόρων όσο το δυνατόν εγγύτερα στην περιοχή από όπου θα ζητηθούν, ώστε κάθε κόμβος να μπορέσει να εξυπηρετήσει τους χρήστες που θα εμφανιστούν στην εμβέλειά του με τη μικρότερη δυνατή καθυστέρηση.

Τη γνώση για το πού αναμένεται να εμφανιστούν χρήστες και, κατά συνέπεια, από ποιόν κόμβο θα εξυπηρετηθούν, προσφέρει η ένταση της χωρικής κατανομής Poisson  $\lambda^t(x,y)$ . Η συνάρτηση αυτή εισάγεται ως δεδομένο στο εργαλείο προσομοίωσης και με βάση τις εξισώσεις (2.7)-(2.9) και με τη βοήθεια του CVX Toolbox που προαναφέρθηκε, πραγματοποιείται η κατανομή των πόρων στους κόμβους.

Συγκεκριμένα, ακολούθως παρουσιάζεται το τμήμα κώδικα Matlab που υλοποιεί την κατανομή των πόρων στους κόμβους AP του δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη ως αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης αυτήν της (2.8).

**Πίνακας 2.1** Υλοποίηση βελτιστοποίησης κατανομής πόρων στους  $M$  κόμβους σε Matlab

|   |
|---|
| <p>Input: <math>\mathbf{Q}</math>, όπου <math>\lambda^t(x,y) = \mathbf{Q} * \mathbf{m}</math><br/> <math>\mathbf{b}</math>, όπου <math>\mathbf{b} = \lambda^t(x,y)</math><br/> <math>\mathbf{N}</math>, συνολικός αριθμός πόρων</p> |
| <pre> Main: cvx_begin %CVX tool setup       variable x(M,1); %x=m resource vector       minimize( norm(Q*x-b) ) %minimize utility function       subject to       sum(x) == N; %restrictions       x &gt; 1;       cvx_end </pre>   |
| <p>Output: <math>\mathbf{m}</math>, διάνυσμα αρχικής κατανομής πόρων στους κόμβους</p>  |

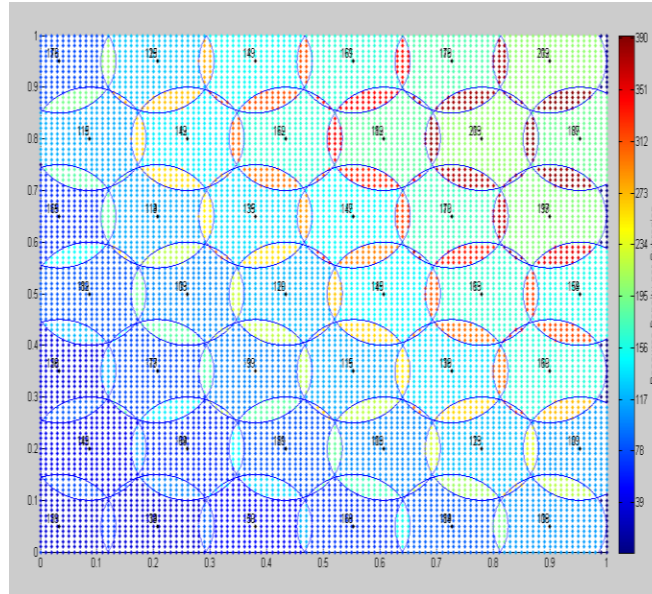
Με τα δεδομένα του τρέχοντος σεναρίου, δηλαδή τις εξισώσεις (2.10)-(2.14) και υπολογίζοντας ότι

$$\lambda^t(x,y) = \int_0^{10} \lambda(t,x,y) dt = \int_0^{10} 100 * (x + y) dt = 1000 * (x+y) \quad (2.15)$$



είναι γνωστές όλες οι απαραίτητες μεταβλητές για την ολοκλήρωση της βελτιστοποίησης της κατανομής.

Το αποτέλεσμα από την εκτέλεση του ανωτέρω τμήματος κώδικα αποτυπώνεται στο Σχ. 2.4, όπου οι περιοχές του χώρου  $S$  έχουν χρωματιστεί βάσει του αριθμού πόρων που αντιστοιχεί στον κόμβο AP (ή τους κόμβους AP) που καλύπτουν τη συγκεκριμένη περιοχή.



**Σχήμα 2.4** Αρχική κατανομή των  $N$  πόρων στους  $M$  κόμβους για  $\lambda^t(x,y)=1000(x+y)$

Από το Σχ. 2.4 προκύπτει ότι έχουν αποδοθεί περισσότεροι πόροι στους κόμβους που καλύπτουν το άνω δεξιό τμήμα του χώρου  $S$  και υπάρχει βαθμιαία μείωσή τους προς το κάτω αριστερά τμήμα. Αυτό οφείλεται στην αναμενόμενη εμφάνιση περισσότερων χρηστών στο άνω δεξιό τμήμα του απεικονιζόμενου χώρου. Καθώς έχει υποτεθεί ότι η εκδήλωση πραγματοποιείται σε συναυλιακό χώρο, μια τέτοια κατανομή χρηστών θα δικαιολογούνταν από το γεγονός ότι η θέση της σκηνής είναι στην πάνω δεξιά μεριά της κάτοψης του χώρου.

### 2.3.2.3 Προσομοίωση της χρονικής και χωρικής εκδοχής κατανομής των χρηστών

Ακολουθως, προσομοιώνεται η εμφάνιση των χρηστών στο χώρο  $S$ , τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Αρχικά, θα προσομοιωθεί η χρονική άφιξη των χρηστών, δηλαδή θα γίνει ο προσδιορισμός της χρονικής στιγμής εμφάνισης κάθε χρήστη, ενώ θα υπολογιστεί και ο συνολικός αριθμός χρηστών που θα εμφανιστούν, ο οποίος πιθανότατα διαφέρει από το θεωρητικά αναμενόμενο.

Όπως έχει αναλυθεί, οι αφίξεις των χρηστών ακολουθούν χρονικά τη σημειακή διαδικασία Poisson με ένταση  $\lambda^{xy}(t)$  που προκύπτει από τη (2.2). Αυτό συνεπάγεται ότι τα χρονικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών αφίξεων των χρηστών ακολουθούν την εκθετική κατανομή με μέση τιμή  $1/\lambda^{xy}(t)$ . Αξιοποιώντας τη χρονική διάρκεια εμφάνισης χρηστών στο χώρο ως

δεδομένη, πραγματοποιείται η χρονική προσομοίωση των αφίξεων των χρηστών, όπως φαίνεται στο τμήμα κώδικα του Πίν. 2.2

Κρίνεται απαραίτητο να επισημανθεί ότι στο σενάριο που εξετάζεται σε αυτή την ενότητα, η ένταση της χρονικής εκδοχής επιλέχθηκε ομογενής, δηλαδή  $\lambda^{xy}(t)=\lambda$ . Ο Πίν. 2.2 περιλαμβάνει το τμήμα κώδικα σε γλώσσα Matlab που προσομοιώνει τις χρονικές στιγμές εμφάνισης των χρηστών.

**Πίνακας 2.2** Κώδικας προσομοίωσης χρονικών αφίξεων Poisson έντασης  $\lambda$  για χρονικό διάστημα  $[0, T]$

|  |
|--|
| Input: $\lambda$ , όπου $\lambda = \lambda^{xy}(t)$<br>$T$ , η χρονική διάρκεια αφίξεων χρηστών  |
| <pre> Main Part: t=-1/lambda*log(rand); %simulate the first arrival while t&lt;T   N=N+1; %update N=Number of users   time(N)=t; %save the arrival time of N user   t=t-1/lambda*log(rand); %simulate the next arrival time end       </pre> |
| Output: $t$ , διάνυσμα χρονικών στιγμών αφίξεων<br>$N=Nusers'$ , αριθμός χρηστών (για τη συγκεκριμένη εκτέλεση κώδικα)   |

Στο συγκεκριμένο σενάριο, από τις (2.2) και (2.10) και δεδομένου ότι οι διαστάσεις είναι  $a=b=1$ , προκύπτει ότι  $\lambda=100$ . Επιπλέον, η χρονική διάρκεια προσομοίωσης των αφίξεων των χρηστών υποδεικνύεται από το  $T$  που με βάση τη (2.10) είναι ίσο με 10. Εισάγοντας στον κώδικα του Πίν. 2.2 τα δεδομένα του υλοποιούμενου σε αυτό το κεφάλαιο σεναρίου, λαμβάνεται τόσο το διάνυσμα  $t$ , στο οποίο εμπεριέχεται η πληροφορία της χρονικής στιγμής εμφάνισης κάθε χρήστη, όσο και ένας τυχαίος αριθμός χρηστών. Έτσι, για  $\lambda=100$  χρήστες/λεπτό και  $T=10$  χρονικές μονάδες, το αποτέλεσμα από την εκτέλεση του προαναφερθέντος κώδικα είναι  $Nusers'=1010$  χρήστες που διαφέρει από το πλήθος  $Nusers=1000$  χρήστες. Αυτή η διαφοροποίηση των θεωρητικών υπολογισμών από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, οφείλεται στο ρεαλιστικό χαρακτήρα της προσομοίωσης του σεναρίου, καθώς είναι πρακτικά αδύνατο να γίνει ακριβής πρόβλεψη του αριθμού των χρηστών που εμφανίζονται στο χώρο.

Σε δεύτερη φάση, προσομοιώνεται ο χωρικός τρόπος εμφάνισης των χρηστών στο χώρο  $S$ , δεδομένου, πλέον, του αριθμού των χρηστών που προέκυψε από την προηγούμενη διαδικασία. Όπως έχει εξηγηθεί προηγουμένως, η δισδιάστατη σημειακή διαδικασία Poisson αποτελεί επέκταση της μονοδιάστατης, όπως, ενδεικτικά, είναι η χρονική εκδοχή των αφίξεων των χρηστών που εξαρτάται μόνο από μία διάσταση, το χρόνο. Επομένως, η λογική με την οποία θα υλοποιηθεί η προσομοίωση είναι παρόμοια. Υπάρχει, όμως, μια ειδοποιός διαφορά της χωρικής από τη χρονική εκδοχή που σχετίζεται με την ομοιογένεια των συναρτήσεων. Αντίθετα από την ένταση της χρονικής εκδοχής, που για λόγους αποφυγής της περιττής πολυπλοκότητας

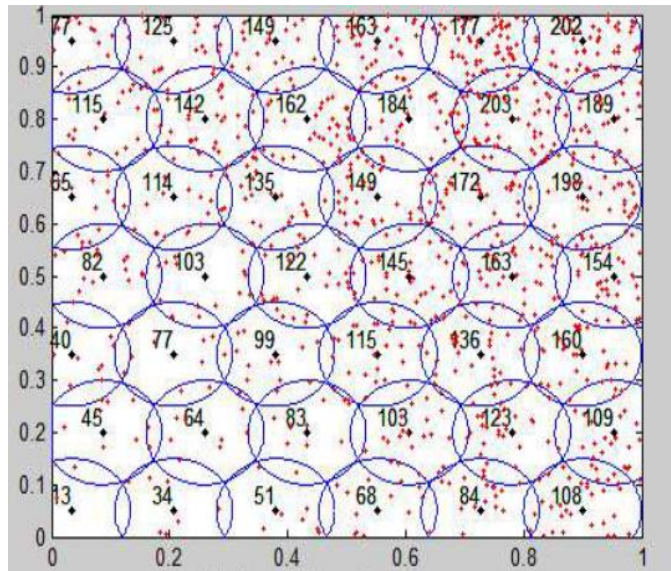
υποτέθηκε ομογενής, η ένταση της χωρικής εκδοχής είναι απαραίτητο να έχει έντονη εξάρτηση από τις χωρικές διαστάσεις, δηλαδή να είναι ανομοιογενής. Αυτό, άλλωστε, είναι το θεμελιώδες χαρακτηριστικό στο οποίο στηρίζεται ο αλγόριθμος για να καταναίμει κατάλληλα τους διαθέσιμους πόρους στους κόμβους του χώρου S.

Ο τρόπος προσομοίωσης της ανομοιογενούς χωρικής εμφάνισης των χρηστών απαιτεί ορισμένες προσθήκες στο βασικό κώδικα που παρουσιάστηκε στον Πίν. 2.2. Συγκεκριμένα, για ένταση χωρικής κατανομής  $\lambda^t(x,y)$  δημιουργείται ο αλγόριθμος αραίωσης παρόμοιος με τον Πίν.2.2 με  $\lambda = \max(\lambda^t(x,y))$ , με τη διαφορά ότι τα σημεία γίνονται δεκτά με πιθανότητα  $\lambda^t(x,y)/\lambda$ . Αναλυτικά ο κώδικας παρουσιάζεται στον Πίν. 2.3.

**Πίνακας 2.3** Κώδικας προσομοίωσης χωρικών αφίξεων Poisson έντασης  $\lambda^t(x,y)$

|   |
|---|
| Input: $\lambda(x,y) = \lambda^t(x,y)$<br>a,b , οι διαστάσεις του χώρου S<br>Nusers', προκύπτει από τον κώδικα 2.2  |
| <b>Main Part:</b> <code>NusersC=0; % counter of # of users</code><br><code>while NusersC &lt; Nusers'</code><br><code>  y=rand; x=rand;% generate random position</code><br><code>  if rand&lt;= lamda(x,y)/lamstar</code><br><code>    NusersC=NusersC+1; % Event accepted</code><br><code>    coords(NusersC,1)=x; coords(NusersC,2)=y; % save user's position</code><br><code>  end</code><br><code>end</code> |
| <b>Output:</b> <code>coords</code> , διάνυσμα θέσεων εκάστου των Nusers' χρηστών  |

Εκτελώντας το τμήμα κώδικα του Πίν. 2.3 για τα δεδομένα του τρέχοντος σεναρίου, δηλαδή για  $\lambda^t(x,y)=1000*(x+y)$  βάσει των (2.3) και (2.10) και για  $Nusers'=1010$  , προκύπτει το διάγραμμα του Σχ. 2.5, όπου απεικονίζονται οι θέσεις των χρηστών στο χώρο ως κόκκινες τελείες. Για λόγους σύγκρισης, στο ίδιο διάγραμμα αποτυπώνονται και οι κόμβοι AP με τους πόρους που έχουν αποδοθεί σε καθένα εξ αυτών κατά την αρχική κατανομή πόρων.



**Σχήμα 2.5** Στιγμιότυπο θέσεων χρηστών για  $\lambda^t(x,y)=1000*(x+y)$  και  $N_{users}=1010$  χρήστες

Διαπιστώνεται ότι πράγματι προκύπτει μεγαλύτερη συγκέντρωση χρηστών στο άνω δεξιό τμήμα του χώρου  $S$ , εκεί δηλαδή όπου έχουν αποδοθεί και οι περισσότεροι πόροι από τον ισχυρό κόμβο  $sBS$  κατά την αρχική κατανομή. Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία του αλγόριθμου βελτιστοποίησης της κατανομής των πόρων, όπως έχει περιγραφεί στην ενότητα 2.2.1. Επιπλέον, αναμένεται η εξυπηρέτηση των χρηστών να είναι ιδιαίτερα ταχεία, εφόσον δεν θα χρειαστεί η συμμετοχή πολλών APs για την εύρεση των απαιτούμενων κάθε φορά πόρων, καθώς οι πόροι έχουν κατανεμηθεί όσο το δυνατόν πλησιέστερα στις περιοχές όπου εμφανίζονται οι χρήστες.

### 2.3.2.4 Προσομοίωση εξυπηρέτησης και υπολογισμός δεικτών αξιολόγησης

Στην παράγραφο 2.2.2 παρουσιάστηκε αλγοριθμικά η διαδικασία της εξυπηρέτησης των χρηστών από τον ισχυρό κόμβο αναφορικά με την αναζήτηση και εύρεση των απαιτούμενων πόρων. Στον Πίν. 2.4, συντάσσεται ο ίδιος αλγόριθμος σε γλώσσα Matlab προκειμένου να γίνει η προσομοίωση της εξυπηρέτησης των χρηστών και να μπορέσουν να υπολογιστούν τα μεγέθη από τα οποία θα αξιολογηθεί ο συνολικός προτεινόμενος αλγόριθμος.

**Πίνακας 2.4 Προσομοίωση αναζήτησης πόρων από τον SBS για εξυπηρέτηση των χρηστών**

|  |
|--|
| <p>Input: <b>m</b>, διάνυσμα με τους διαθέσιμους πόρους κάθε κόμβου<br/> <b>Nusers</b>, αριθμός χρηστών <b>Nusers'</b><br/> <b>A</b>, αριθμός απαιτούμενων πόρων κάθε χρήστη<br/> <b>M</b>, αριθμός κόμβων που καλύπτουν το χώρο<br/> <b>coords</b>, διάνυσμα με τις θέσεις των χρηστών<br/> <b>p</b>, διάνυσμα με τις θέσεις των κόμβων</p>   |
| <p>Main Part: <code>Io=zeros(Nusers,1); %vector for I node of each user</code><br/> <code>C=zeros(Nusers,2); %vector for users' resources</code><br/> <code>counter=0; %counter of users served with more than one step</code><br/> <code>for i=1:1:Nusers</code><br/> <code>    m(:,2)=[1:1:M]; %sorting of nodes</code><br/> <code>    m1=sortrows(m,1); %sortrows:a function that sorts nodes</code><br/> <code>    msorted=m1(:,2); %sorted vector</code><br/> <code>    m=m(:,1);</code><br/> <code>    [Io]=findIo(p,coords,M,i,Io); %findIo:a function that finds</code><br/> <code>  %Io=I node</code><br/> <code>    if Io(i,1)==0 %out of coverage</code><br/> <code>        i</code><br/> <code>    else</code><br/> <code>    step=0; %depth of resource search</code><br/> <code>    if m(Io(i,1),1)&gt;=A %%SUCCESFUL SERVICE OF Ith Node</code><br/> <code>        C(i,1)=A;</code><br/> <code>        C(i,2)=step;</code><br/> <code>        m(Io(i,1),1)=m(Io(i,1),1)-A; %sorted nodes vector update</code><br/> <code>    else</code><br/> <code>        counter=counter+1;</code><br/> <code>    %iterative Resource Discovery</code><br/> <code>        C(i,1)=m(Io(i,1),1);</code><br/> <code>        m(Io(i,1),1)=0;</code><br/> <code>        Rest= A - C(i,1);</code><br/> <code>    while Rest&gt;0 &amp;&amp; step&lt;M</code><br/> <code>        step=step+1;</code><br/> <code>        Cavail=m(msorted(M+1-step,1),1);</code><br/> <code>        if Cavail&gt;=Rest</code><br/> <code>            C(i,1)=A;</code><br/> <code>            C(i,2)=step;</code><br/> <code>            m(msorted(M+1-step,1),1)=m(msorted(M+1-step,1),1)-Rest;</code><br/> <code>            Rest=0;</code><br/> <code>        else</code><br/> <code>            C(i,1)=C(i,1)+ Cavail;</code><br/> <code>            Rest=Rest-Cavail;</code><br/> <code>            m(msorted(M+1-step,1),1)=0;</code><br/> <code>        end</code><br/> <code>    end</code><br/> <code>end</code><br/> <code>end</code></p> |
| <p>Output: <b>C</b>, πίνακας με τον αριθμό κόμβων που ενεργοποιήθηκαν για την εξυπηρέτηση κάθε χρήστη<br/> <b>counter</b>, αριθμός χρηστών που δεν εξυπηρετήθηκαν με την πρώτη αναζήτηση</p>   |

Γίνεται αντιληπτό ότι μετά την εξυπηρέτηση όλων των χρηστών είναι γνωστός ο αριθμός αυτών που δεν εξυπηρετήθηκαν πλήρως από τον εκάστοτε  $I$  κόμβο, αλλά χρειάστηκε ο SBS να αναζητήσει πόρους και από άλλους κόμβους του δικτύου για να συμπληρωθεί ο ζητούμενος αριθμός. Επιπλέον, για κάθε χρήστη καταγράφεται η πληροφορία σχετικά με τον αριθμό των κόμβων από τους οποίους χρειάστηκε να δανειστεί πόρους ο εκάστοτε  $I$  κόμβος, ώστε να συμπληρωθεί ο απαιτούμενος αριθμός πόρων κάθε νέου χρήστη. Με βάση αυτά τα δεδομένα, στη συνέχεια εξάγονται όλοι οι δείκτες που είναι αναγκαίοι για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου.

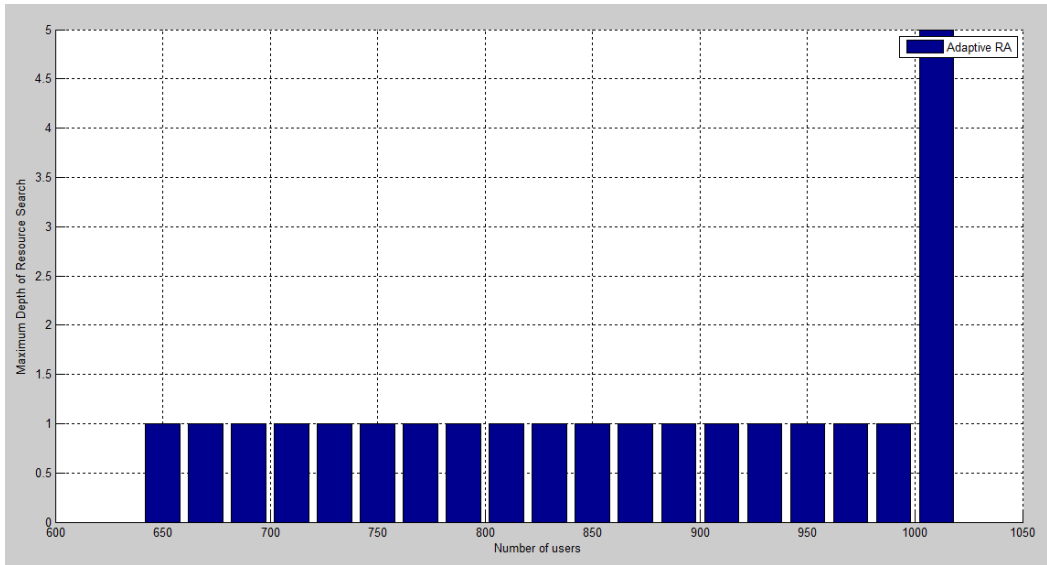
Τα μεγέθη, που προτάθηκαν στην παράγραφο 2.2.3 για να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες αξιολόγησης, προσομοιώνονται στο τμήμα κώδικα του Πίν. 2.5 σε γλώσσα Matlab. Με βάση τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς αυτούς, προκύπτουν τα διαγράμματα των Σχ. 2.6, 2.7, 2.8.

**Πίνακας 2.5** Προσομοίωση των δεικτών αξιολόγησης του αλγορίθμου

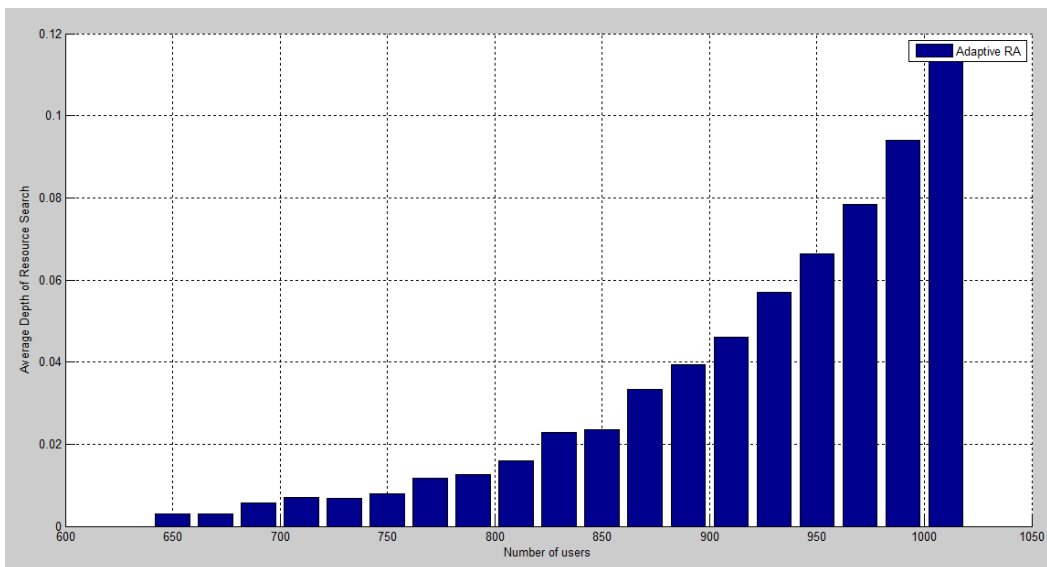
|  |
|--|
| <p>Input: <math>c</math>, πίνακας με τον αριθμό κόμβων που ενεργοποιήθηκαν για την εξυπηρέτηση κάθε χρήστη<br/> counter, αριθμός χρηστών που δεν εξυπηρετήθηκαν με την πρώτη αναζήτηση<br/> Nusers, αριθμός χρηστών <math>Nusers'</math></p> |
| <p>Main Part: <code>maxDepth=max(C(:,2)); % max depth of search</code><br/> <code>avrgDepth=mean(C(:,2)); % average depth of search</code><br/> <code>NFS=(Nusers-counter)/Nusers; %# of nodes not immediately served</code></p>             |
| <p>Output: maxDepth, αριθμός μέγιστου βάθους αναζήτησης πόρων<br/> avrgDepth, αριθμός μέσου αριθμού βάθους αναζήτησης πόρων<br/> NFS, αριθμός χρηστών για τους οποίους απαιτείται δανεισμός πόρων</p>  |

Προκειμένου να αποτυπωθεί εναργής η διαδικασία της εξυπηρέτησης χρηστών, καθώς αυτοί εμφανίζονται στο χώρο, κρίθηκε σκόπιμο η προσομοίωση να πραγματοποιηθεί σε διάφορες φάσεις κατά τη διάρκεια της εμφάνισης των χρηστών όπως φαίνεται στα διαγράμματα των Σχ. 2.6, 2.7, 2.8. Οι φάσεις αυτές αποτελούν διαδοχικά στιγμιότυπα όπου το πλήθος των χρηστών βαθμιαία αυξάνεται μέχρι την ολοκλήρωση της προσέλευσής τους, ώστε να αποτυπωθεί όλη η εξέλιξη της λειτουργίας του δικτύου.

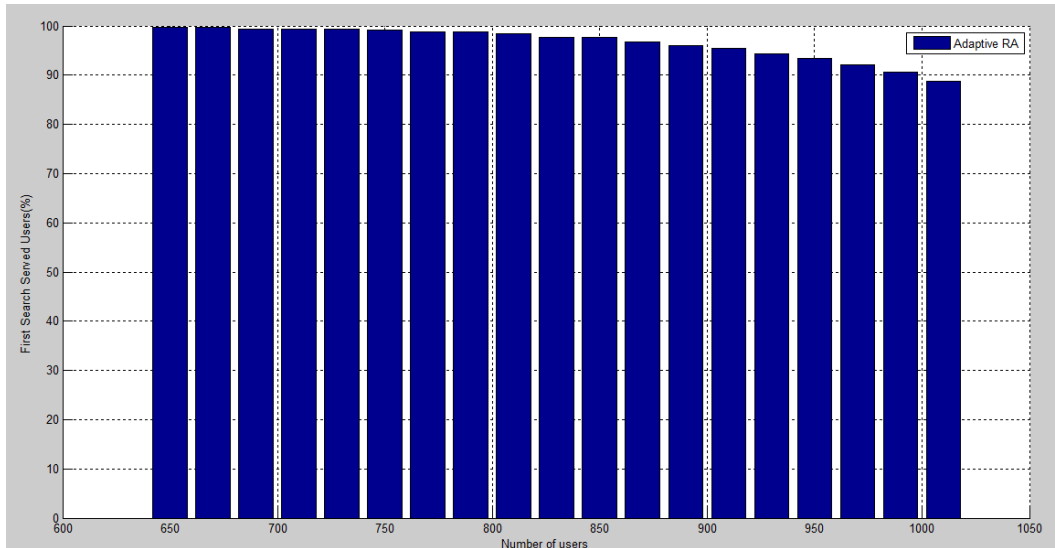
Διευκρινίζεται ότι στα ακόλουθα διαγράμματα ο οριζόντιος άξονας, που αντιστοιχεί στο πλήθος των χρηστών, έχει βαθμονομηθεί αρχίζοντας από τον αριθμό 600, καθώς η εξυπηρέτηση λιγότερων χρηστών δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαιτερότητα, ώστε να κριθεί απαραίτητη η αποτύπωσή της.



*Σχήμα 2.6* Διάγραμμα μέγιστου βάθους αναζήτησης συναρτήσει του αριθμού των χρηστών



*Σχήμα 2.7* Διάγραμμα μέσου βάθους αναζήτησης συναρτήσει του αριθμού των χρηστών



**Σχήμα 2.8** Διάγραμμα ποσοστού χρηστών που εξυπηρετούνται μόνο από τον εκάστοτε I κόμβο συναρτήσει του αριθμού των χρηστών

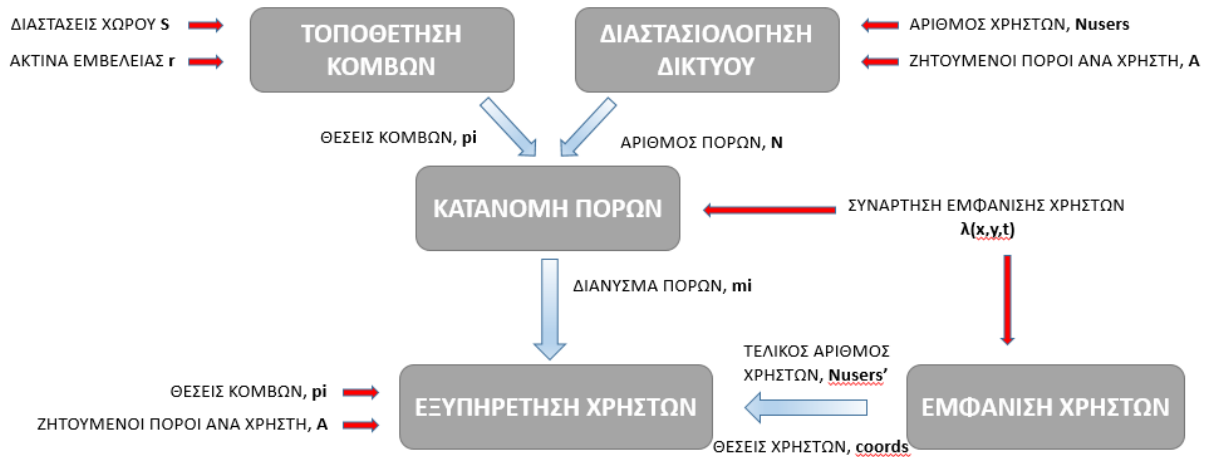
Τα συμπεράσματα που συνάγονται άμεσα από τα ανωτέρω διαγράμματα, σχετίζονται με την αυξημένη ταχύτητα στην απόδοση των ζητούμενων πόρων στον εκάστοτε νεοεισερχόμενο χρήστη. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι η εξυπηρέτηση γίνεται άμεσα από τον κόμβο I στη πλειονότητα των περιπτώσεων, ενώ το τελικό ποσοστό των χρηστών για τους οποίους χρειάστηκε να συμπληρωθεί ο αριθμός των πόρων από άλλους κόμβους είναι μικρό και μόλις 11%. Αυτό αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της σωστής αρχικής κατανομής πόρων και της χρήσης του ταξινομημένου διανύσματος.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι οι επιπλέον χρήστες από τους θεωρητικά αναμενόμενους, δηλαδή οι 10 επιπλέον χρήστες ( $N_{users} = 1010$  και  $N_{users} = 1000$ ), δεν εξυπηρετούνται λόγω έλλειψης πόρων στο δίκτυο. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα ανάλογα αποτελέσματα στα προηγούμενα διαγράμματα για πλήθος χρηστών 1010. Το μέγιστο βάθος αναζήτησης σε αυτή την περίπτωση είναι θεωρητικά ίσο με M, όμως για λόγους καλύτερης απεικόνισης στα διαγράμματα ορίστηκε ως μέγιστο επιτρεπτό βάθος αναζήτησης η αναζήτηση σε 5 κόμβους AP.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος που περιγράφηκε στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζεται σε μορφή λογικού διαγράμματος στο Σχ. 2.9, με διατύπωση των παραμέτρων εισόδου κάθε διαδικασίας, καθώς και των αποτελεσμάτων κάθε μιας.



Σχήμα 2.9 Λογικό διάγραμμα του προτεινόμενου αλγορίθμου



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## ΧΩΡΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΧΡΗΣΤΩΝ (SPATIAL DIFFERENTIATION FOR DISTRIBUTION OF USERS)

Στο εδάφιο αυτό θα μελετηθεί μόνο η χωρική εκδοχή της συνάρτησης που περιγράφει την ένταση χωροχρονικής κατανομής των χρηστών που θα εμφανιστούν στο χώρο ακολουθώντας τη σημειακή διαδικασία Poisson.

### 3.1 Χρήση χωρικά μεταβαλλόμενης συνάρτησης $\lambda^t(x,y)$

Μέχρι το σημείο αυτό χρησιμοποιήθηκε μια και μοναδική συνάρτηση για την ένταση της χωρικής σημειακής διαδικασίας Poisson  $\lambda^t(x,y)$ , δηλαδή για την περιγραφή της κατανομής των χρηστών στο χώρο που εξετάζεται και τον προσδιορισμό των θέσεων τους, αγνοώντας τη χρονική διάσταση. Η χρήση μοναδικής συνάρτησης πρακτικά μπορεί να εφαρμοστεί σε γεγονότα στα οποία υπάρχει βαθμιαία συγκέντρωση των χρηστών σε περιοχή του χώρου που πρόκειται να καλυφθεί τηλεπικοινωνιακά. Για παράδειγμα, σε μια συναυλία υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση χρηστών μπροστά από τη σκηνή, ενώ η συγκέντρωση χρηστών μειώνεται σταδιακά σε απόσταση από αυτήν. Σε γεγονότα όπου η εμφάνιση χρηστών στο χώρο είναι αυτής της μορφής, μία ενιαία συνάρτηση  $\lambda^t(x,y)$  είναι ικανή να περιγράψει την χωρική ένταση κατανομής χρηστών σε όλο το χώρο που μελετάται. Στο παράδειγμα της παραγράφου 2.3 μια συνάρτηση της μορφής  $\lambda^t(x,y)=a*x+b*y$ , με  $a,b>0$  είναι ικανή να περιγράψει ικανοποιητικά τη μορφή που θα έχει η κατανομή των χρηστών στο χώρο της συναυλίας.

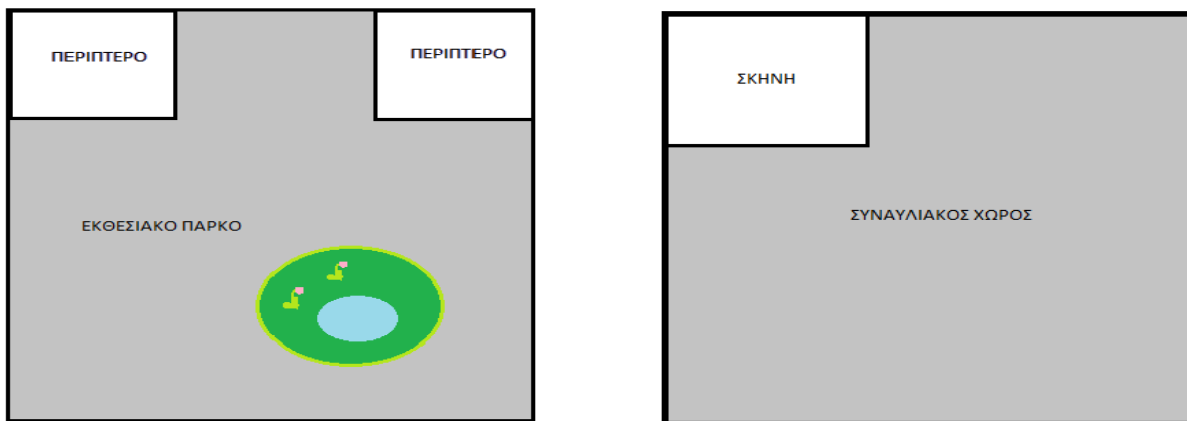
Το μοντέλο αυτό με τη μία συνάρτηση, όμως, βρίσκει εφαρμογή σε μερικά μόνο πολυπληθή γεγονότα. Υπάρχουν πολλά άλλα πολυπληθή γεγονότα στα οποία η χωρική εμφάνιση των χρηστών δεν είναι δυνατό να χαρακτηριστεί από ενιαία ένταση χωρικής κατανομής χρηστών  $\lambda^t(x,y)$  σε όλο το χώρο, αλλά χρειάζονται περισσότερες συναρτήσεις για να περιγράψουν την εμφάνιση χρηστών στα διάφορα τμήματα του χώρου. Σε αυτά τα γεγονότα, διαφορετικά τμήματα του χώρου χαρακτηρίζονται από διαφορετική χωρική κατανομή χρηστών. Για παράδειγμα, σε εκθεσιακούς χώρους όπου έχουν στηθεί περίπτερα με τα διάφορα εκθέματα, οι χρήστες συγκεντρώνονται γύρω από τα εκθεσιακά περίπτερα και όχι σε μια μόνο περιοχή. Κατά συνέπεια, σε ένα τέτοιο γεγονός, όπως και σε άλλα με παρόμοια χαρακτηριστικά, χρειάζονται περισσότερες από μία συναρτήσεις για να περιγράψουν τη χωρική ένταση της σημειακής διαδικασίας Poisson για τις θέσεις των χρηστών. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο χώρος διαμερίζεται σε περισσότερα του ενός τμήματα και έκαστο εξ αυτών χαρακτηρίζεται από διαφορετική ένταση  $\lambda^t(x,y)$ .

Η χωρική διαφοροποίηση στην κατανομή των χρηστών αντίστοιχα με το εκάστοτε γεγονός, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη κατά την εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου, καθώς αποτελεί πρωταρχικό στόχο η κατανομή των τηλεπικοινωνιακών πόρων να γίνει κατά βέλτιστο

τρόπο και, κατ' επέκταση, να επιτευχθεί η αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων. Αυτό σημαίνει ότι περισσότεροι πόροι πρέπει να αποδοθούν εκεί όπου αναμένεται μεγαλύτερη πυκνότητα χρηστών. Στην περίπτωση μιας έκθεσης, η κίνηση αναμένεται κοντά στα περίπτερα με τα εκθέματα. Επομένως, οι κόμβοι AP που καλύπτουν τις συγκεκριμένες περιοχές με τα περίπτερα είναι επιθυμητό να διαθέτουν περισσότερους πόρους για να εξυπηρετήσουν τον αυξημένο αριθμό χρηστών που αναμένονται στην εμβέλειά τους, σε σχέση με τους κόμβους AP των περιοχών όπου αναμένεται περιορισμένη εμφάνιση χρηστών. Επομένως, σε τέτοιας φύσης γεγονότα, η διαμέριση του χώρου σε τμήματα που εμφανίζουν διαφορετική κατανομή χρηστών και η αντιστοίχιση κάθε τμήματος με διαφορετική συνάρτηση έντασης  $l^t(x,y)$  είναι αναγκαία για τη βέλτιστη κατανομή των πόρων.

### 3.2 Οριοθέτηση της περιοχής ενδιαφέροντος εντός του χώρου διεξαγωγής του πολυπληθούς γεγονότος

Επιπλέον της προηγηθείσας ανάλυσης, θα γίνει αναφορά και ανάλυση ενός ακόμη παράγοντα που δεν έχει ληφθεί υπόψη κατά τη διαδικασία τηλεπικοινωνιακής κάλυψης του χώρου – μέσω της τοποθέτησης των κόμβων AP - με εφαρμογή του αλγορίθμου κατανομής πόρων. Ο παράγοντας αυτός είναι η ύπαρξη περιοχών στο χώρο διεξαγωγής του γεγονότος που είναι απρόσιτα από το κοινό που θα συμμετάσχει στο γεγονός, οπότε δεν υπάρχει ανάγκη για την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη. Περιπτώσεις τέτοιων τμημάτων είναι, οι χώροι στους οποίους οι διοργανωτές του γεγονότος έχουν τοποθετήσει τον εξοπλισμό τους ή οι περιφραγμένοι για το κοινό χώροι εντός ενός πάρκου όπου διεξάγεται μια έκθεση, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.1. Όμοια περίπτωση αποτελούν και οι χώροι που καταλαμβάνουν οι σκηνές που προορίζονται για την παρουσίαση των διαφόρων καλλιτεχνικών δρωμένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.2. Υπάρχουν και πολλές άλλες περιπτώσεις, στις οποίες ο χώρος όπου θα διεξαχθεί ένα πολυπληθές γεγονός, περιλαμβάνει και τμήματα όπου δε θα εμφανιστούν χρήστες.



**Σχήματα 3.1(αριστερά)-3.2(δεξιά):** Με γκρι χρωματισμό απεικονίζεται η περιοχή ενδιαφέροντος για κάλυψη

Είναι φανερό ότι σε τέτοιες περιοχές του προς κάλυψη χώρου δεν απαιτείται τοποθέτηση κόμβων AP, καθώς εκεί δεν θα ζητηθούν τηλεπικοινωνιακοί πόροι. Η αφαίρεση αυτών των τμημάτων από την περιοχή ενδιαφέροντος όπου θα γίνει η τοποθέτηση των κόμβων AP, συμβάλλει δραστικά στην αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων τηλεπικοινωνιακών πόρων. Οι διαθέσιμοι πόροι κατανέμονται μόνο σε όσες περιοχές του χώρου πρόκειται να ζητηθούν από τους χρήστες και αποκλείονται από την κάλυψη οι περιοχές όπου δεν προβλέπεται παρουσία χρηστών.

Συμπερασματικά, για την πραγματοποίηση της αρχικής τοποθέτησης κόμβων AP στο χώρο ενός πολυπληθούς γεγονότος, κρίνεται σκόπιμο να προηγηθεί κατάλληλη οριοθέτηση της περιοχής ενδιαφέροντος. Αυτή απαιτεί τον καθορισμό των τμημάτων του χώρου που πρέπει να συμπεριληφθούν στην προς κάλυψη περιοχή και αυτών που πρέπει να εξαιρεθούν από τη διαδικασία της τηλεπικοινωνιακής κάλυψης. Εκτός από την αφαίρεση των τελευταίων από την περιοχή ενδιαφέροντος, ο καθορισμός της περιοχής ενδιαφέροντος για την εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης είναι δυνατό να επιτευχθεί και με τη χρήση μηδενικής συνάρτησης έντασης χωρικής κατανομής,  $\lambda^i(x,y)$ , στα τμήματα αυτά. Με τον τρόπο αυτό, δηλώνεται η απουσία χρηστών προς εξυπηρέτηση στις περιοχές αυτές και, συνεπακόλουθα, δεν αποδίδονται πόροι στους κόμβους AP που επρόκειτο να τοποθετηθούν για την κάλυψη αυτών. Στο τέλος της αρχικής κατανομής πόρων, οι κόμβοι που καταλήγουν με μηδενικούς πόρους αφαιρούνται από το χώρο, αν έχουν εγκατασταθεί ήδη, ή απενεργοποιούνται. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί εναλλακτική της χωρικής διαφοροποίησης της έντασης κατανομής των χρηστών που περιεγράφηκε νωρίτερα. Ακολουθείται, δηλαδή, η προαναφερθείσα διαδικασία για τη διαμέριση του χώρου και το χαρακτηρισμό κάθε περιοχής με συγκεκριμένη συνάρτηση  $\lambda^i(x,y)$  και στις περιοχές που θα απουσιάζουν χρήστες θεωρείται  $\lambda^i(x,y)=0$ .

### **3.3 Πρώτο σενάριο αξιοποίησης της χωρικής διαφοροποίησης της έντασης κατανομής χρηστών**

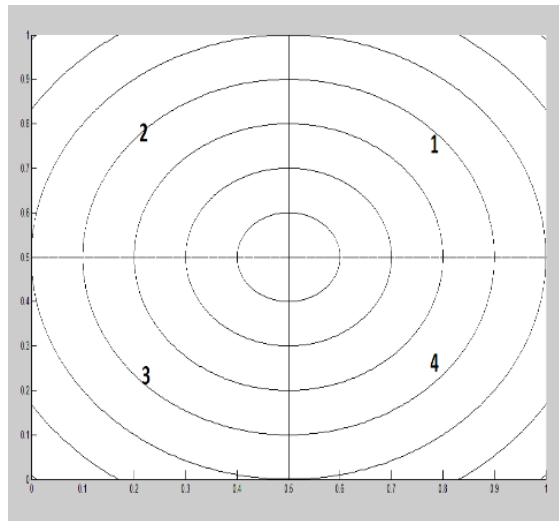
Προκειμένου να διαπιστωθεί η σημασία της προηγούμενης ανάλυσης - αναφορικά με τη διαφοροποίηση της έντασης κατανομής χρηστών στο χώρο - θα εφαρμοστεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος σε κάποια νέα σενάρια. Στα σενάρια αυτά θα προσδοθούν όλα τα επιθυμητά χωρικά χαρακτηριστικά, που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, ώστε να εξεταστεί η επίπτωσή τους στην αποδοτικότητα του αλγορίθμου.

#### **3.3.1 Παρουσίαση σεναρίου A**

Αρχικά, θα θεωρηθεί η απλή περίπτωση όπου πραγματοποιείται η τηλεπικοινωνιακή κάλυψη χώρου  $S$  διαστάσεων  $1 \times 1$ . Γίνεται η υπόθεση ότι οι χρήστες αναμένεται να εμφανιστούν με μεγαλύτερη ένταση στις γωνίες του χώρου. Αυτό, για παράδειγμα, θα μπορούσε να σημαίνει ότι σε ένα εκθεσιακό χώρο  $1 \times 1$  έχουν στηθεί περίπτερα στις γωνίες, οπότε το κοινό που θα επισκεφθεί το χώρο πρόκειται να συγκεντρωθεί εκεί. Η κατανομή των πόρων στους κόμβους που θα χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη του χώρου, πρέπει να γίνει έτσι ώστε οι περισσότεροι πόροι να αποδοθούν στις περιοχές των 4 γωνιών. Όπως γίνεται φανερό από το σενάριο, θα

χρειαστούν περισσότερες από μία συναρτήσεις  $\lambda^t(x,y)$  για να περιγραφεί η κατανομή των χρηστών στο χώρο. Με στόχο να εξεταστεί μια απλοποιημένη περίπτωση και να μην εισαχθεί περιττή πολυπλοκότητα, ο χώρος θα χωριστεί σε 4 ίδια τμήματα (4 τετράγωνα) και σε κάθε τμήμα θα αντιστοιχιστεί μια συνάρτηση  $\lambda^t(x,y)$ . Επομένως, συνολικά θα χρειαστούν 4 συναρτήσεις. Επιπλέον, σε αυτό το σενάριο, θα θεωρηθεί ότι όλος ο χώρος  $S$  είναι πιθανό να φιλοξενήσει χρήστες, δηλαδή, δεν θα υπάρξουν τμήματα με μηδενική ένταση χωρικής κατανομής.

Για την απόδοση της μορφής κατανομής χρηστών στο χώρο για το προαναφερθέν σενάριο, επιλέγεται για ένα από τα 4 τμήματα μια εκθετική συνάρτηση, που έχει μέγιστη τιμή στη γωνία του τμήματος όπου αναμένεται μέγιστη συγκέντρωση χρηστών. Στο συγκεκριμένο σενάριο το συνολικό πλήθος χρηστών που θα εμφανιστεί στο χώρο  $S$  τίθεται ίσο με 500, που συνεπάγεται ότι σε ένα από τα 4 τμήματα του χώρου αντιστοιχούν 125 χρήστες, υπό την απλουστευτική θεώρηση ότι οι χρήστες κατανέμονται εξίσου στα 4 τμήματα του χώρου. Με βάση τα ανωτέρω, καθώς και την εκθετική μορφή που είναι επιθυμητή για την εμφάνιση των χρηστών στο χώρο, μπορούν να καθοριστούν οι συναρτήσεις  $\lambda^t(x,y)$ . Με βάση το Σχ. 3.3 η χωρική κατανομή χρηστών σε ένα από των τεσσάρων τμημάτων προκύπτει στις (3.1.1)-(3.1.4), όπου ο συντελεστής 0.17 υπολογίστηκε βάσει της (2.4), για  $Nusers=125$ .



**Σχήμα 3.3** Διάκριση των 4 τμημάτων του χώρου  $S$

$$\text{Περιοχή 1: } 0.5 < x < 1, 0.5 < y < 1 \quad \lambda^t(x,y) = 0,17 * e^{(5x+5y)} \quad (3.1.1)$$

$$\text{Περιοχή 2: } 0 < x < 0.5, 0.5 < y < 1 \quad \lambda^t(x,y) = 0,17 * e^{(5-5x+5y)} \quad (3.1.2)$$

$$\text{Περιοχή 3: } 0 < x < 0.5, 0 < y < 0.5 \quad \lambda^t(x,y) = 0,17 * e^{(10-5x-5y)} \quad (3.1.3)$$

$$\text{Περιοχή 4: } 0.5 < x < 1, 0 < y < 0.5 \quad \lambda^t(x,y) = 0,17 * e^{(5+5x-5y)} \quad (3.1.4)$$

Η επαλήθευση της καταλληλότητας της επιλογής των συναρτήσεων χωρικής κατανομής χρηστών γίνεται με υπολογισμό του συνολικού αριθμού εμφανιζόμενων χρηστών που προκύπτει από τις (3.1.1) έως (3.1.4). Είναι επιθυμητό αυτός ο αριθμός να είναι ίσος με 500, με βάση την αρχική υπόθεση του σεναρίου. Η ολοκλήρωση των ανωτέρω συναρτήσεων στη δισδιάστατη περιοχή όπου έκαστη αντιστοιχεί, αποδίδει τα επιθυμητά αποτελέσματα, δηλαδή συνολικό αριθμό χρηστών ίσο με 500 και ισοκατανομή χρηστών στα 4 τμήματα, όπως δείχνουν οι εξισώσεις 3.2.1 έως 3.2.4.

$$\int_{\text{περιοχή 1}} 0,17 * e^{(5x+5y)}=125 \quad (3.2.1)$$

$$\int_{\text{περιοχή 2}} 0,17 * e^{(5-5x+5y)}=125 \quad (3.2.2)$$

$$\int_{\text{περιοχή 3}} 0,17 * e^{(10-5x-5y)}=125 \quad (3.2.3)$$

$$\int_{\text{περιοχή 4}} 0,17 * e^{(5+5x-5y)}=125 \quad (3.2.4)$$

Αξίζει να επισημανθεί ότι η χρονική εξάρτηση της έντασης κατανομής χρηστών στη διαδικασία Poisson δεν λαμβάνεται υπόψη στο εδάφιο αυτό. Συγκεκριμένα, η συνάρτηση  $\lambda^i(x,y)$  περιλαμβάνει μόνο τη συνολική χρονική συνεισφορά, όπως έχει εξηγηθεί στο Κεφ. 2.

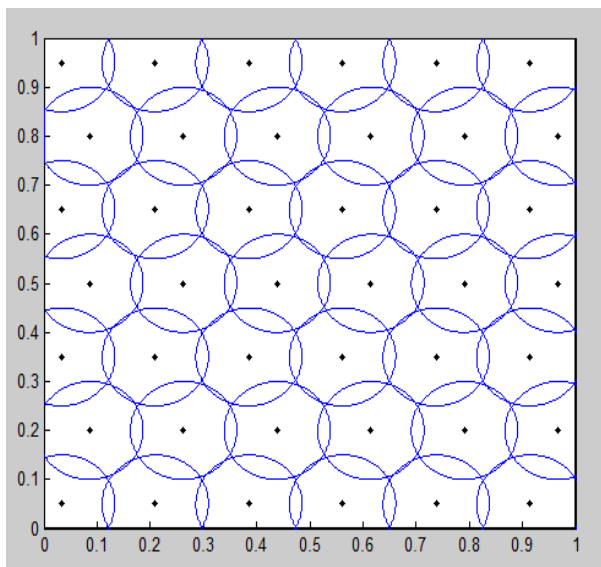
### 3.3.2 Προσομοίωση προτεινόμενου αλγορίθμου για το σενάριο A

Έχοντας ορίσει τη συνάρτηση  $\lambda^i(x,y)$  που περιγράφει τον τρόπο εμφάνισης των χρηστών σε όλο το χώρο S, θα ακολουθήσουν τα στάδια προσομοίωσης του προτεινόμενου αλγορίθμου, όπως αυτά έχουν παρουσιαστεί στο Κεφ. 2.

#### 3.3.2.1 Τοποθέτηση των κόμβων AP για κάλυψη του χώρου S και κατανομή των πόρων σε αυτούς

Σε πρώτη φάση, πραγματοποιείται η τοποθέτηση των κόμβων στο χώρο S κατά τρόπο ώστε να καλύπτεται όλος ο χώρος με το μικρότερο δυνατό αριθμό κόμβων AP. Για τον καθορισμό του αριθμού των κόμβων AP, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η εμβέλεια τηλεπικοινωνιακής κάλυψης των κόμβων AP που θα χρησιμοποιηθούν, δεδομένου ότι έχει γίνει η απλουστευτική υπόθεση ότι όλοι οι κόμβοι AP διαθέτουν ίδια χαρακτηριστικά και έχουν την ίδια εμβέλεια. Όπως και στα προηγούμενα σενάρια που έχουν παρουσιαστεί, υποτίθενται κόμβοι με ακτίνα κάλυψης  $r=0.1$ . Έτσι για να επιτευχθεί σχεδόν πλήρης κάλυψη, ο  $1x1$  χώρος χρειάζεται 42 APs τοποθετημένα όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.4. Φυσικά, η επιλογή διαφορετικής εμβέλειας δεν επηρεάζει τα συμπεράσματα που θα προκύψουν από την προσομοίωση του αλγορίθμου.

Ελάχιστα σημεία του χώρου S είναι εκτός της εμβέλειας των κόμβων AP, χωρίς να επηρεάζουν την απόδοση του αλγορίθμου όσον αφορά την εξυπηρέτηση των εμφανιζόμενων χρηστών. Υπενθυμίζεται ότι η συνοχή του δημιουργούμενου δικτύου επιτυγχάνεται με την ύπαρξη του ισχυρού σταθμού βάσης sBS ο οποίος επικοινωνεί με όλους τους κόμβους AP.



**Σχήμα 3.4** Τοποθέτηση κόμβων στο χώρο  $S$   $1 \times 1$

Δεδομένης της τοποθέτησης των κόμβων AP στο χώρο, ζητούμενο είναι να πραγματοποιηθεί η κατανομή των τηλεπικοινωνιακών πόρων που είναι διαθέσιμοι για την κάλυψη της εκδήλωσης, κατά βέλτιστο τρόπο, ώστε οι χρήστες που εμφανίζονται να εξυπηρετούνται άμεσα από τον κόμβο AP, στην εμβέλεια του οποίου βρίσκονται. Για να γίνει αυτό, πρέπει να προηγηθεί ο καθορισμός του αριθμού των πόρων που θα απαιτήσει κάθε χρήστης. Για λόγους απλοστευσης και αποφυγής περιττών υπολογισμών υποτίθεται ομοιομορφία στην απαίτηση πόρων από τους χρήστες και ορίζεται ο απαιτούμενος αριθμός πόρων ίσος με 5 ( $A=5$ ). Κατόπιν τούτου, προκύπτει ότι ο συνολικός αριθμός διαθέσιμων πόρων για την εξυπηρέτηση των χρηστών είναι ίσος προς:

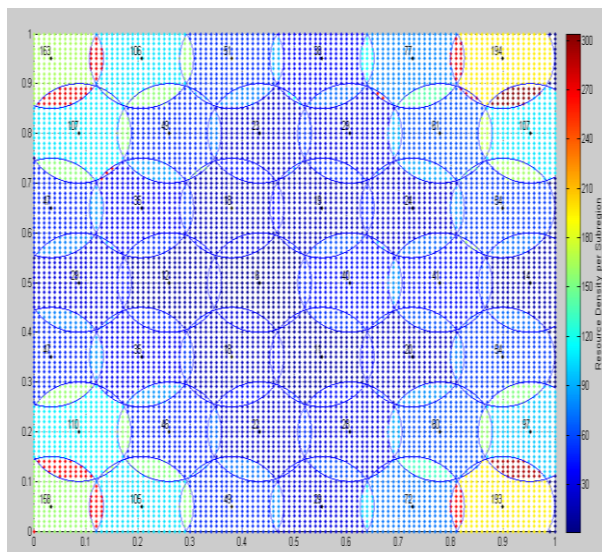
$$N=A*Nusers=5*500=2500 \quad (3.3)$$

Στον αριθμό αυτό δεν έχουν συμπεριληφθεί οι πόροι που απαιτούνται για την επικοινωνία των κόμβων AP με τον ισχυρό κόμβο SBS. Οι πόροι αυτοί υποτίθενται ίσοι με  $K$  και κατανέμονται εξ ίσου στους  $M$  κόμβους AP, δηλαδή

$$K=M*B \quad (3.4)$$

Οι  $N$  συνολικά πόροι, λοιπόν, θα κατανεμηθούν στους 42 κόμβους ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη εξυπηρέτηση χρηστών. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται η συνάρτηση  $\lambda^i(x,y)$  που περιγράφει την ένταση της χωρικής κατανομής Poisson των χρηστών, όπως υποδεικνύει ο προτεινόμενος αλγόριθμος. Σύμφωνα με αυτή, οι πόροι κατανέμονται όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.5 που ακολουθεί.



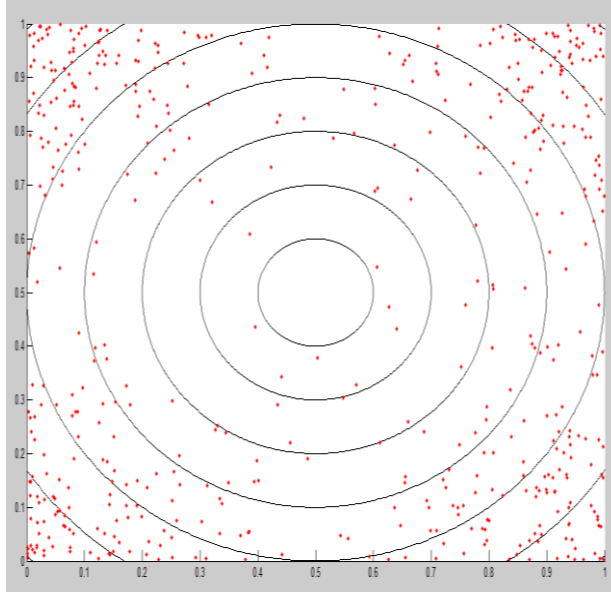


**Σχήμα 3.5** Κατανομή πόρων στους  $M$  κόμβους για  $\lambda^i(x,y)$  σύμφωνα με τις 3.1.1-3.1.4.

Η κατανομή των πόρων επιβεβαιώνει την υπόθεσή συγκέντρωσης των χρηστών στις γωνίες του χώρου, καθώς εκεί έχουν αποδοθεί περισσότεροι πόροι συγκριτικά με τον υπόλοιπο χώρο. Αναμένεται, λοιπόν, ότι η υλοποίηση της εξυπηρέτησης των χρηστών με τον τρόπο που έχει περιγραφεί σε προηγούμενες ενότητες θα επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα όσον αφορά την ταχύτητα εξυπηρέτησης των χρηστών.

### 3.3.2.2 Εμφάνιση χρηστών στο χώρο $S$ σύμφωνα με την κατανομή Poisson

Για να προσομοιωθεί η εξυπηρέτηση των χρηστών, ώστε να αξιολογηθούν ο προτεινόμενος αλγόριθμος και η ανάλυση της χωρικής διαφοροποίησης που πραγματοποιείται στο συγκεκριμένο εδάφιο, είναι απαραίτητο να προηγηθεί η προσομοίωση της εμφάνισής τους στο χώρο. Έχει ήδη παρουσιαστεί το τμήμα του κώδικα που χρησιμοποιείται τόσο για τη χρονική εμφάνιση χρηστών όσο και για τη χωρική διασπορά τους. Εισάγοντας στον κώδικα αυτό τα δεδομένα του σεναρίου που υλοποιείται στη συγκεκριμένη περίπτωση, για τις θέσεις των χρηστών στο χώρο  $S$  προκύπτει η κατανομή του Σχ. 3.6 που ακολουθεί



**Σχήμα 3.6** Προσομοίωση των θέσεων των  $Nusers=510$  χρηστών

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, προκύπτει η πλήρης επαλήθευση των υποθέσεων που έχουν γίνει στο συγκεκριμένο σενάριο, ως προς τον τρόπο εμφάνισης των χρηστών στο χώρο. Επιπλέον, κρίνεται σκόπιμο να επισημανθούν ορισμένα ουσιώδη σημεία. Ένα από αυτά είναι ότι η κατανομή των χρηστών στο χώρο χαρακτηρίζεται από τυχαιότητα, που ακολουθεί τη διαδικασία Poisson. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι σε άλλη εκτέλεση του αλγορίθμου θα προέκυπτε διαφορετική κατανομή, από αυτή του Σχ. 3.6, που, πάντως, θα ακολουθούσε τη διαδικασία Poisson. Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο είναι ότι ο αριθμός των εμφανιζόμενων χρηστών δεν ταυτίζεται με την αρχική υπόθεση  $Nusers=500$ , όντας μεγαλύτερος και ίσος με  $Nusers'=510$ . Ο αριθμός αυτός προέκυψε από την προσομοίωση της χρονικής άφιξης χρηστών, η οποία στο συγκεκριμένο εδάφιο δεν έχει αναλυθεί. Καίτοι η διαφορά αυτή μεταξύ της αρχικής υπόθεσης και της τελικής τιμής φαίνεται ανεπιθύμητη, στην πραγματικότητα αποτελεί επιβεβαίωση της ρεαλιστικής υλοποίησης του προτεινόμενου αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, σε ένα πραγματικό σύστημα ή γεγονός δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια ο αριθμός των χρηστών που θα προσέλθουν στο χώρο. Επομένως, κατά τη διαστασιολόγηση του δικτύου πραγματοποιούνται υποθέσεις που μπορεί να μην επιβεβαιωθούν πλήρως από την τελική κατάσταση, όπως συμβαίνει με τον αριθμό των χρηστών στη συγκεκριμένη περίπτωση, από τον οποίο καθορίζεται η χωρητικότητα που απαιτείται. Αυτό αποτελεί αστοχία της διαστασιολόγησης και υλοποίησης του ad hoc δικτύου, η οποία πάντως είναι ανεκτή, όταν δεν υπερβαίνει κάποιο προκαθορισμένο βαθμό ανοχής. Συγκεκριμένα, η απόκλιση της υπόθεσης από τον τελικό αριθμό χρηστών δεν επηρεάζει την προσομοίωση εφόσον ικανοποιείται ο περιορισμός

$$Pr\{\text{χρήστες που θα εμφανιστούν στο χώρο } S > Nusers\} < P_0 \quad (3.5)$$

όπου  $P_0$  η μέγιστη αποδεκτή τιμή πιθανότητας αποκλεισμού χρηστών

Στη συγκεκριμένη υλοποίηση, αν θεωρηθεί  $P_0=0.05$ , η διαφορά που προέκυψε και είναι της τάξης του  $2\%[(10/500)*100\%]$  θεωρείται ανεκτή.

Στην περίπτωση βέβαια όπου ο διαχειριστής του δικτύου επιθυμεί πολύ μικρή τιμή για το  $P_0$ , θα οδηγηθεί σε υπερδιαστασιολόγηση του δικτύου χρησιμοποιώντας κατά τον υπολογισμό των πόρων μεγαλύτερη τιμή του  $N_{users}$  από αυτή που προκύπτει από την (2.4). Η απόφαση αυτή ενέχει το ρίσκο να μείνουν αδέσμευτοι τελικά τηλεπικοινωνιακοί πόροι, αν ο αριθμός των εμφανιζόμενων χρηστών είναι μικρότερος από τον αναμενόμενο.

### **3.3.2.3 Εξυπηρέτηση των χρηστών σύμφωνα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο και αξιολόγηση μέσω διαγραμμάτων**

Στη συνέχεια, ακολουθεί η εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου για την εξυπηρέτηση των χρηστών που εμφανίστηκαν στο χώρο. Η εξυπηρέτηση πραγματοποιείται με τη χρονική σειρά που εμφανίζονται οι χρήστες, για έκαστο των οποίων ακολουθείται η σειρά βημάτων του προτεινόμενου αλγορίθμου, όπως παρουσιάστηκε στο Σχ. 2.2.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την πραγματοποίηση της εξυπηρέτησης των εμφανιζόμενων χρηστών, κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη μιας βάσης σύγκρισης. Για το λόγο αυτό, υλοποιείται η εξυπηρέτηση για το ίδιο σενάριο ad hoc γεγονός υποθέτοντας ομοιόμορφη κατανομή πόρων σε όλο το χώρο, δηλαδή ισοκατανομή πόρων σε όλους τους κόμβους AP που καλύπτουν το χώρο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, προκύπτουν οι δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για την κατανομή των πόρων:

1. η προτεινόμενη προσαρμοσμένη κατανομή πόρων σύμφωνα με την αναμενόμενη ένταση χωρικής κατανομής των χρηστών και
2. η ομοιόμορφη κατανομή πόρων, στην οποία δεν λαμβάνεται υπόψη η χωρική κατανομή των χρηστών και αποτελεί τη βάση αξιολόγησης της προτεινόμενης μεθόδου

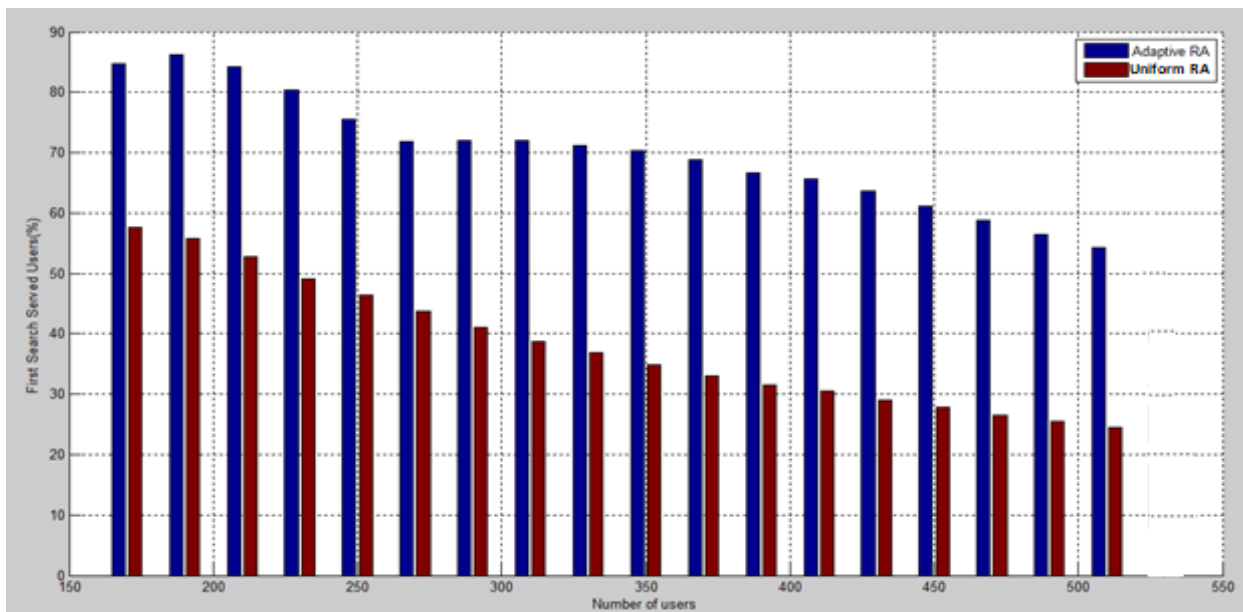
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα δύο σημεία διαφοροποίησης του προτεινόμενου αλγορίθμου από άλλους, είναι (i) η προσαρμογή της αρχικής κατανομής πόρων στη θεωρητικά αναμενόμενη κίνηση  $\lambda^i(x,y)$  και (ii) η χρήση του διανύσματος ταξινόμησης των κόμβων AP, το οποίο διαμορφώνεται μετά την εξυπηρέτηση κάθε χρήστη. Κατά την αξιολόγηση, λοιπόν, του αλγορίθμου, είναι επιθυμητό να εξεταστεί η επίδραση των δύο αυτών δυνατοτήτων ξεχωριστά, προκειμένου να εκτιμηθεί η συνεισφορά τους στην αποτελεσματικότερη εξυπηρέτηση των χρηστών. Για το λόγο αυτό, για το τρέχον σενάριο πραγματοποιείται αρχικά η εξυπηρέτηση των χρηστών χωρίς τον υπολογισμό του ταξινομημένου διανύσματος σε κάθε νέα εμφάνιση χρήστη. Η εξυπηρέτηση χρηστών ακολουθώντας τις δύο προσεγγίσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως (προσαρμοσμένη και ομοιόμορφη) γίνεται με τον ίδιο τρόπο από τον sBS ώστε να δοθεί η δυνατότητα σύγκρισής τους με κριτήριο την αποδοτικότητα του δικτύου. Στη συνέχεια, σε δεύτερη εκτέλεση της προσομοίωσης, το διάνυσμα με τους ταξινομημένους κόμβους AP προστίθεται στη διαδικασία εξυπηρέτησης χρηστών, έτσι όπως έχει παρουσιαστεί στο Κεφ. 2, για να αξιολογηθεί η συμβολή του στην αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου. Η ομοιόμορφη

κατανομή πόρων δεν εκμεταλλεύεται το ταξινομημένο διάνυσμα σε καμία εκτέλεση από τις δύο προηγούμενες.

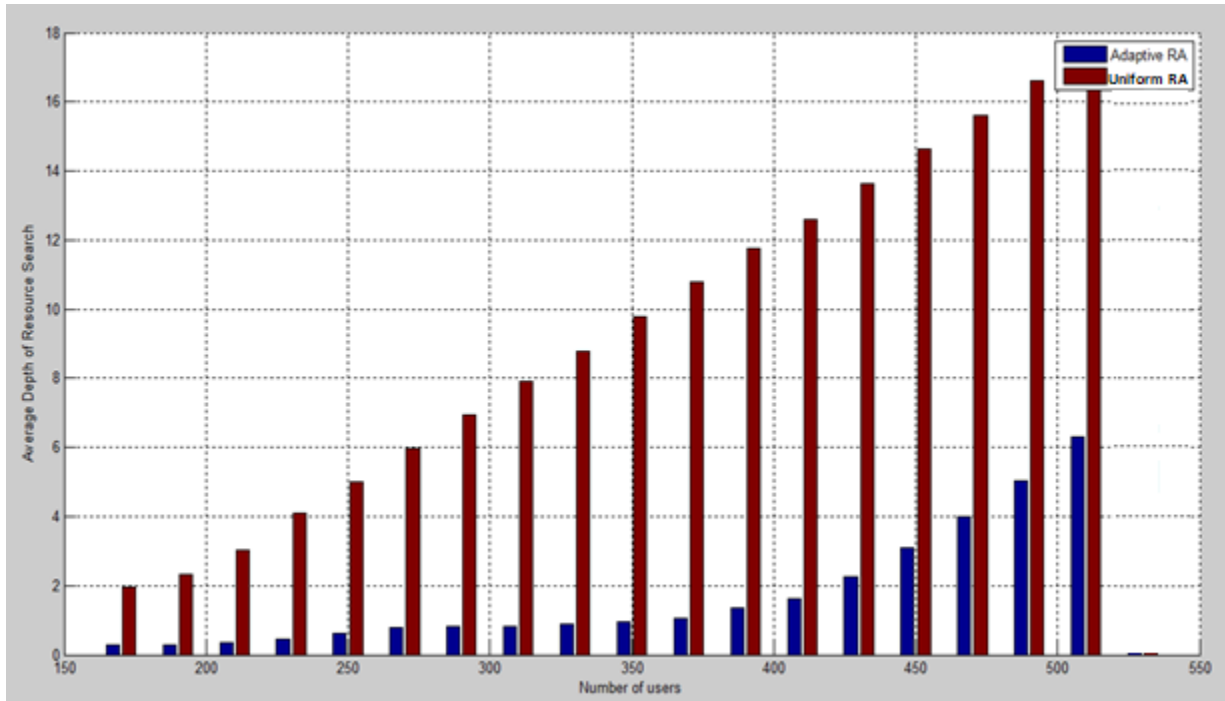
Στα διαγράμματα των Σχ. 3.7 μέχρι 3.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της εξυπηρέτησης ακολουθώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο κατανομής πόρων στους κόμβους AP ή την ομοιόμορφη κατανομή πόρων. Προκειμένου να αναδειχθεί η σημασία και η αποτελεσματικότητα της προσαρμοσμένης κατανομής πόρων, τα αποτελέσματα που προκύπτουν ακολουθώντας τις δύο προς σύγκριση προσεγγίσεις εμφανίζονται σε κοινά διαγράμματα. Αρχικά, αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της εξυπηρέτησης χωρίς να αξιοποιηθεί το ταξινομημένο διάνυσμα, τα οποία φαίνονται στα Σχ. 3.8 και 3.10 και, στη συνέχεια, με χρήση του διανύσματος αυτού, στα Σχ. 3.9 και 3.11. Τα μεγέθη που απεικονίζονται στα διαγράμματα αυτά και θα βοηθήσουν στην αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι:

- i. το ποσοστό των χρηστών που εξυπηρετήθηκαν σε ένα βήμα αναζήτησης,
- ii. το μέγιστο βάθος αναζήτησης και
- iii. το μέσο βάθος αναζήτησης.

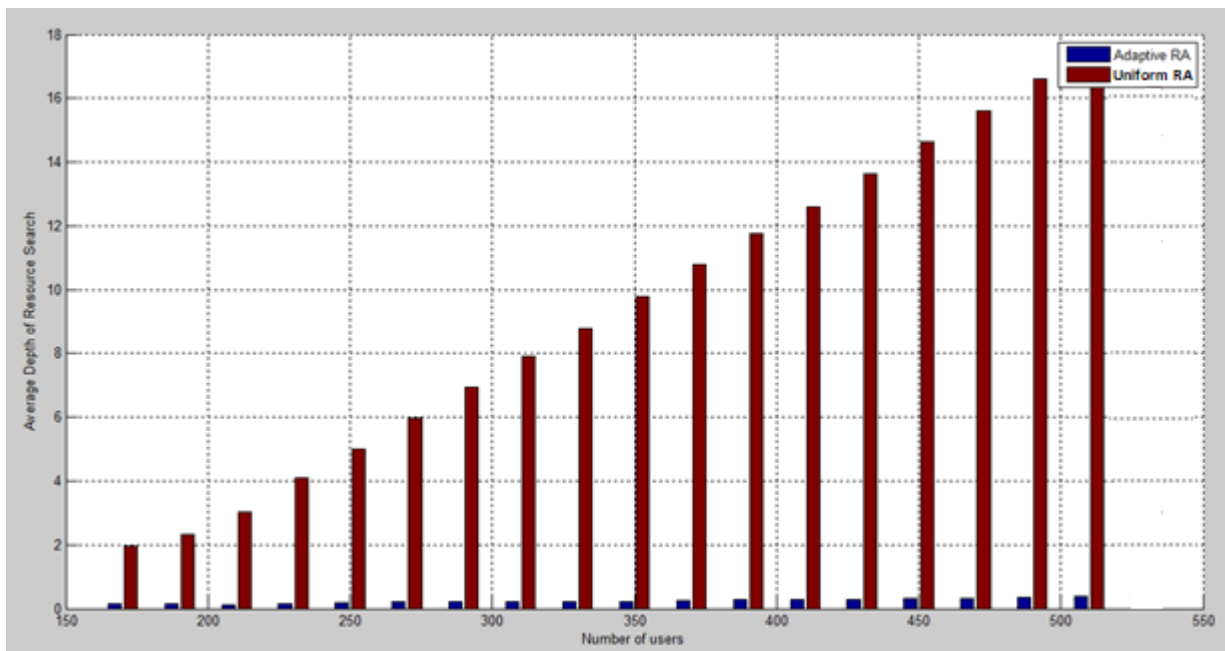
Τα μεγέθη αυτά μεταβάλλονται καθώς αυξάνεται ο αριθμός χρηστών στο δίκτυο, όπως φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα όπου υπολογίζονται καθόλη τη διάρκεια προσέλευσης χρηστών στο χώρο. Το ποσοστό των χρηστών που εξυπηρετούνται σε ένα βήμα είναι προφανώς το ίδιο και για τις δύο περιπτώσεις και αποτυπώνεται στο διάγραμμα του Σχ. 3.7. Σημειώνεται, πως όταν ο αριθμός των χρηστών ξεπεράσει την αρχική υπόθεση για 500 χρήστες και οι δύο προσεγγίσεις αδυνατούν να εξυπηρετήσουν τους νεοεμφανιζόμενους χρήστες, καθώς το δίκτυο διαθέτει συγκεκριμένη χωρητικότητα.



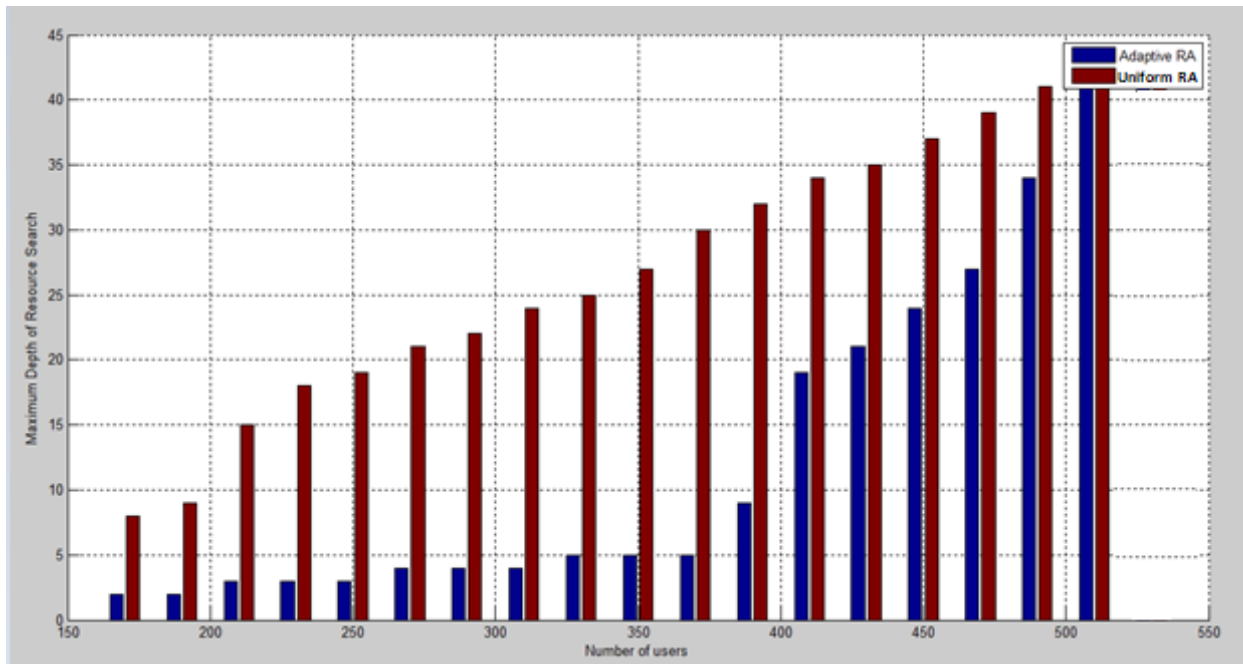
**Σχήμα 3.7** Διάγραμμα ποσοστού χρηστών που εξυπηρετούνται με 1 βήμα αναζήτησης, συναρτήσει του αριθμού των ήδη εμφανισθέντων χρηστών



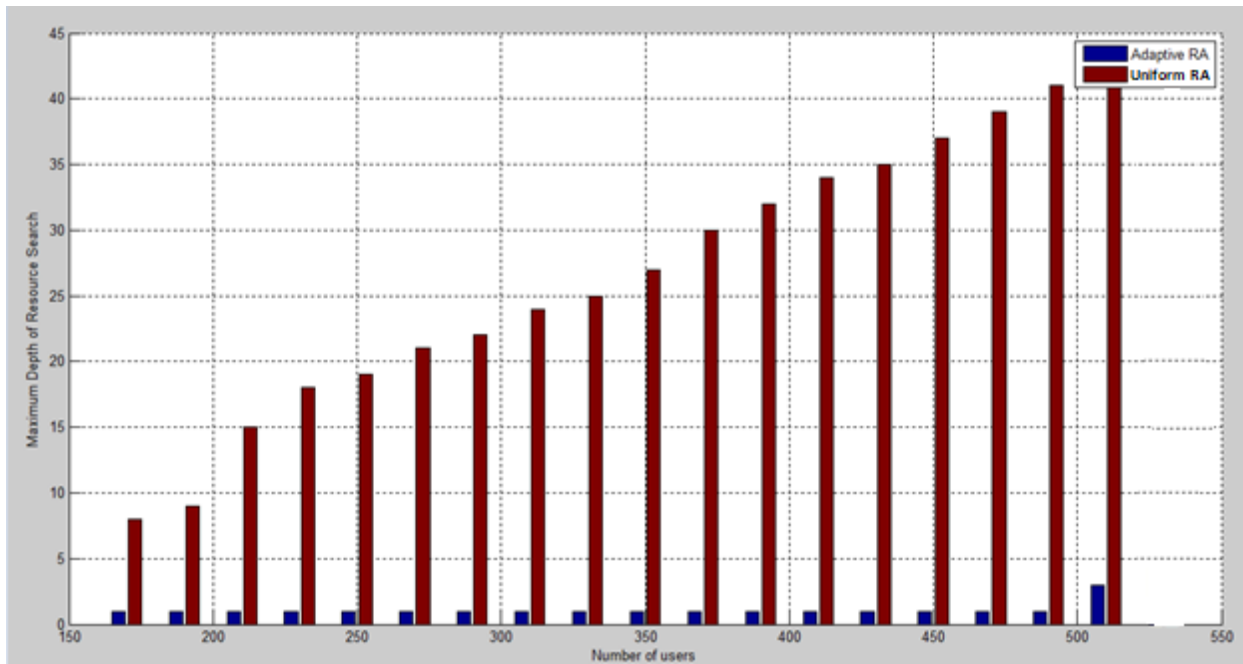
**Σχήμα 3.8** Διάγραμμα μέσου βάθους αναζήτησης, συναρτήσεϊ του αριθμού των εμφανιζόμενων χρηστών, χωρίς τη χρήση ταξινομημένου διανύσματος



**Σχήμα 3.9** Διάγραμμα μέσου βάθους αναζήτησης, συναρτήσεϊ του αριθμού των εμφανιζόμενων χρηστών με χρήση ταξινομημένου διανύσματος



**Σχήμα 3.10** Διάγραμμα μέγιστου βάθους αναζήτησης, συναρτήσει του αριθμού των εμφανιζόμενων χρηστών χωρίς τη χρήση του ταξινομημένου διανύσματος



**Σχήμα 3.11** Διάγραμμα μέγιστου βάθους αναζήτησης, συναρτήσει του αριθμού των εμφανιζόμενων χρηστών με χρήση του ταξινομημένου διανύσματος

Η γενική εικόνα από την πρώτη εκτέλεση χωρίς το διάνυσμα ταξινόμησης, που εξάγεται από την παρατήρηση και αξιολόγηση των παραπάνω διαγραμμάτων στα Σχ. 3.7 έως 3.11, είναι ότι η προσαρμοσμένη κατανομή πόρων υπερτερεί σημαντικά της ομοιόμορφης κατανομής ως προς την ταχύτητα εξυπηρέτησης των χρηστών. Υιοθετώντας την ομοιόμορφη κατανομή πόρων απαιτούνται πολύ περισσότερα βήματα αναζήτησης κόμβου, που σημαίνει ότι η καθυστέρηση της εξυπηρέτησης είναι μεγάλη, ιδιαίτερα καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών που εμφανίζονται στο χώρο S. Αντίθετα, στην περίπτωση της προτεινόμενης προσαρμοστικής κατανομής πόρων, ο απαιτούμενος αριθμός πόρων εξασφαλίζεται σε ένα βήμα στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Μόνο όταν αυξάνεται σημαντικά ο αριθμός των ήδη εμφανισθέντων χρηστών παρατηρείται αύξηση στο μέσο βάθος αναζήτησης. Ακόμη και με την αύξηση του βάθους αναζήτησης, όμως, η προτεινόμενη μέθοδος προσαρμοστικής κατανομής πόρων είναι πάντα πολύ ταχύτερη της ομοιόμορφης.

Επιπλέον, από την εκτέλεση της προσομοίωσης με χρήση του ταξινομημένου διανύσματος, είναι εμφανής η αύξηση στην ταχύτητα εξυπηρέτησης των χρηστών που επιφέρει η αξιοποίηση του διανύσματος στο οποίο οι κόμβοι είναι ταξινομημένοι με βάση τον αριθμό των υπολειπόμενων αδέσμευτων πόρων τους. Το μέσο και μέγιστο βάθος αναζήτησης μειώνονται δραστικά, καθώς μέσω αυτού του διανύσματος, είναι άμεση η εξεύρεση του κόμβου με τους περισσότερους κάθε φορά αδέσμευτους πόρους.

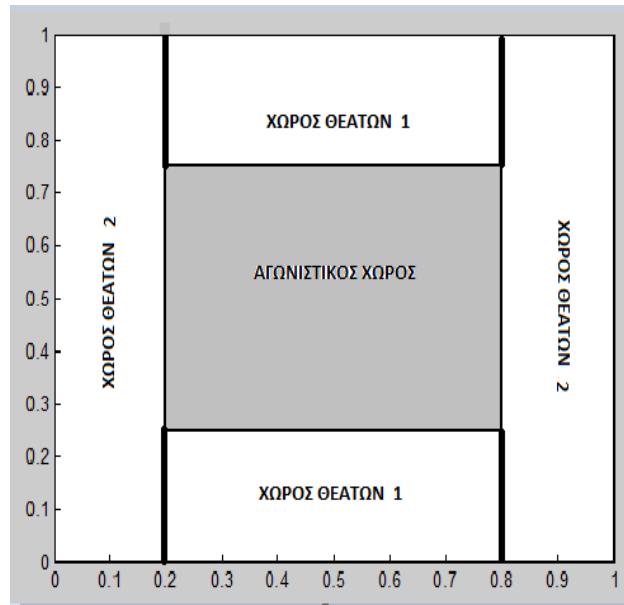
### **3.4 Δεύτερο σενάριο υλοποίησης της χωρικής αξιοποίησης της χωρικής έντασης κατανομής**

Στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, εξετάζεται η περίπτωση όπου υπάρχουν περιοχές του χώρου S όπου δεν αναμένονται χρήστες. Ένα γεγονός όπου βρίσκει εφαρμογή αυτή η περίπτωση είναι, για παράδειγμα, ένα κλειστό γήπεδο μπάσκετ στο οποίο θα λάβει χώρα ένα πολυπληθές αθλητικό γεγονός. Σε ένα τέτοιο γεγονός οι τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις είναι ιδιαίτερα αυξημένες λόγω της μεγάλης πυκνότητας των χρηστών σε περιορισμένο χώρο. Πιθανότατα η υπάρχουσα τηλεπικοινωνιακή υποδομή του χώρου δεν έχει τη δυνατότητα να εξυπηρετήσει το μεγάλο πλήθος χρηστών ή ακόμη μπορεί το γήπεδο αυτό να μη διαθέτει τηλεπικοινωνιακή κάλυψη από το κυψελωτό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Για τους λόγους αυτούς, απαιτείται η διαμόρφωση ενός ad hoc δικτύου πρόσβασης στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, το οποίο να διαθέτει την απαιτούμενη χωρητικότητα.

#### **3.4.1 Παρουσίαση σεναρίου Β**

Ως χώρος S, διαστάσεων 1x1 θεωρείται ένα κλειστό γήπεδο μπάσκετ όπου πρόκειται να διεξαχθεί ένα αθλητικό γεγονός, για το οποίο αναμένεται μεγάλη προσέλευση θεατών. Το κλειστό γήπεδο περιλαμβάνει τις κερκίδες και τον αγωνιστικό χώρο. Δεδομένου ότι οι χρήστες εμφανίζονται στο χώρο των θεατών και όχι στον αγωνιστικό χώρο, ο αγωνιστικός χώρος εξαιρείται από την ανάγκη τηλεπικοινωνιακής κάλυψης. Υιοθετώντας μηδενική ένταση της χωρικής διαδικασίας Poisson για τον αγωνιστικό χώρο, επιτυγχάνεται η εκεί μηδενική κατανομή πόρων. Ο προς κάλυψη χώρος περιγράφεται σχηματικά στο Σχ. 3.12, όπου ο εξαιρούμενος από

την ανάγκη τηλεπικοινωνιακής κάλυψης αγωνιστικός χώρος διαστάσεων 0,6x0,5 απεικονίζεται με σκούρο χρωματισμό.



**Σχήμα 3.12** Ο χώρος  $S$  χωρισμένος σε τμήματα με διαφορετικές εντάσεις  $\lambda(x,y,t)$

Όπως φαίνεται και από το Σχ. 3.12 και ο χώρος των θεατών έχει χωριστεί σε επιμέρους τμήματα. Αυτό οφείλεται στις διαφορετικές εντάσεις  $\lambda^i(x,y)$  που ενδεχομένως χαρακτηρίζουν κάθε τμήμα του χώρου αυτού. Συγκεκριμένα, οι θέσεις πίσω από τις μπασκέτες (οι χώροι θεατών 2 σύμφωνα με το Σχ. 3.12) είναι φθηνότερες και, για το λόγο αυτό, η συγκέντρωση θεατών σε αυτές είναι μεγαλύτερη. Αντίθετα, οι χώροι θεατών 1 αφορούν καλύτερες για την παρακολούθηση ενός αγώνα, και άρα ακριβότερες, θέσεις που είναι και ανετότερες, δηλαδή πιο αραιά τοποθετημένες σε σχέση με τους χώρους 2. Για το λόγο αυτό η συγκέντρωση θεατών σε αυτό το χώρο είναι μικρότερη.

Με βάση τα προαναφερθέντα η συνάρτηση της έντασης της κατανομής Poisson των αφίξεων για τα διάφορα τμήματα του χώρου ορίζεται μέσω των σχέσεων

$$\text{Αγωνιστικός χώρος: } \lambda(t,x,y)=0 \quad \text{για } 0.2 \leq x \leq 0.8 \text{ και } 0.25 < y < 0.75, 0 \leq t \leq 10 \quad (3.6.1)$$

$$\text{Χώρος θεατών 1: } \lambda(t,x,y)=500 \quad \text{για } 0.2 \leq x \leq 0.8 \text{ και } 0 \leq y \leq 0.25, 0 \leq t \leq 10 \quad (3.6.2)$$

$$\text{ή } 0.75 \leq y \leq 1$$

$$\text{Χώρος θεατών 2: } \lambda(t,x,y)=1000 \quad \text{για } 0 \leq y \leq 1 \text{ και } 0 \leq x < 0.2, 0 \leq t \leq 10 \quad (3.6.3)$$

$$\text{ή } 0.8 < x \leq 1$$



Για την προσομοίωση του σεναρίου χρειάζεται μόνο η χωρική εκδοχή της κατανομής των χρηστών. Αυτή εξάγεται χρησιμοποιώντας τη (2.3) από την οποία προκύπτουν τα ακόλουθα:

$$\text{Αγωνιστικός χώρος: } \lambda^t(x,y)=0 \text{ για } 0.2 \leq x \leq 0.8 \text{ και } 0.25 < y < 0.75 \quad (3.7.1)$$

$$\text{Χώρος θεατών 1: } \lambda^t(x,y)=5000 \text{ για } 0.2 \leq x \leq 0.8 \text{ και } 0 \leq y \leq 0.25 \quad (3.7.2)$$

$$\text{ή } 0.75 \leq y \leq 1$$

$$\text{Χώρος θεατών 2: } \lambda^t(x,y)=10000 \text{ για } 0 \leq y \leq 1 \text{ και } 0 \leq x < 0.2 \quad (3.7.3)$$

$$\text{ή } 0.8 < x \leq 1$$

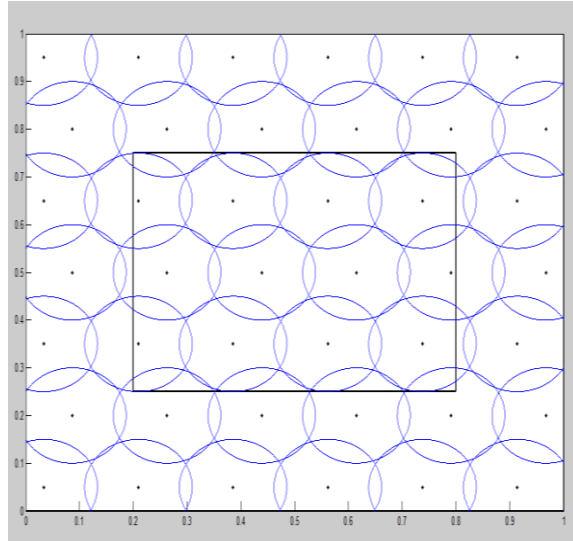
Όπως και σε όλα τα υπόλοιπα της παρούσας εργασίας, και στο σενάριο αυτό θα υποτεθεί ομοιομορφία ως προς το ζητούμενο αριθμό πόρων από τους χρήστες, ο οποίος σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται ίσος με  $A=10$ . Η εμπέλεια παραμένει σταθερή ίση προς  $r=0.1$ .

### **3.4.2 Προσομοίωση προτεινόμενου αλγορίθμου για το σενάριο B**

Έχοντας ορίσει το χώρο διεξαγωγής του αθλητικού γεγονότος και αφού ορίστηκαν οι συναρτήσεις κατανομής των χρηστών στο χώρο, προσομοιώνεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος για την κατανομή των πόρων και την εξυπηρέτηση των χρηστών από το δίκτυο που θα σχεδιαστεί δυναμικά μέσω του Matlab.

#### **3.4.2.1 Τοποθέτηση των κόμβων AP για κάλυψη του χώρου S και κατανομή των πόρων σε αυτούς**

Εξαιρουμένου του αγωνιστικού χώρου, όλος ο υπόλοιπος χώρος του γηπέδου πρέπει να καλυφθεί τηλεπικοινωνιακά με την τοποθέτηση κόμβων AP που θα σχηματίζουν το δίκτυο πρόσβασης, όπως έχει παρουσιαστεί προηγουμένως. Βάσει της αρχικής ανάλυσης, μπορεί να γίνει θεωρητικά η τοποθέτηση των κόμβων AP σε όλο το χώρο, συμπεριλαμβανομένων και των περιοχών μηδενικής έντασης, και να γίνει η βέλτιστη κατανομή πόρων λαμβάνοντας υπόψη τις επιμέρους συναρτήσεις  $\lambda^t(x,y)$ . Μετά την αρχική κατανομή πόρων, όσοι κόμβοι AP καταλήξουν με μηδενικούς πόρους είτε θα τοποθετηθούν αλλά θα παραμείνουν απενεργοποιημένοι είτε δεν θα τοποθετηθούν καθόλου στο χώρο. Έτσι, η τοποθέτηση των κόμβων AP στο χώρο γίνεται όπως στο προηγούμενο σενάριο, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.13



**Σχήμα 3.13** Τοποθέτηση κόμβων στο γήπεδο  $S$

Οι κόμβοι έχουν ακτίνα εμβέλειας  $r=0.1$  για να είναι συμβατοί με τις συσκευές των χρηστών ενώ δεν αποτυπώνεται η θέση του sBS που μπορεί να βρίσκεται είτε εντός του χώρου  $S$  είτε εκτός αυτού σε κάποιο απομακρυσμένο σημείο.

Στη συνέχεια, ο πάροχος του ad hoc δικτύου θα καταναίμει τους πόρους σύμφωνα με τον τρόπο εμφάνισης των χρηστών. Αρχικά, πρέπει να υπολογιστεί ο αριθμός των πόρων που αναμένεται να ζητηθούν από το σύνολο των χρηστών, για να εξασφαλιστούν από τον πάροχο του δικτύου.

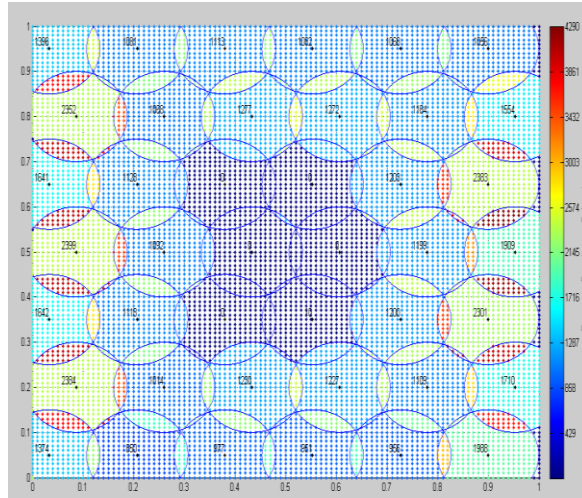
Στο παρόν σενάριο ο συνολικός αριθμός χρηστών που προβλέπεται να εμφανιστούν στο χώρο υπολογίζεται σύμφωνα με τη (2.4) και είναι

$$N_{users} = \int_0^{10} \int_0^{0.2} \int_0^1 1000 dy dx dt + \int_0^{10} \int_{0.8}^1 \int_0^1 1000 dy dx dt + \int_0^{10} \int_{0.2}^{0.8} \int_0^{0.25} 500 dy dx dt + \int_0^{10} \int_{0.2}^{0.8} \int_{0.75}^1 \lambda(t, x, y) dy dx dt = 2000 + 2000 + 750 + 750 = 5.500 \text{ χρήστες} \quad (3.8)$$

Επομένως ο αριθμός πόρων που απαιτείται σύμφωνα με τη (2.5) είναι

$$N = 5.500 * 10 = 55.000 \text{ τηλεπικοινωνιακοί πόροι} \quad (3.9)$$

Εισάγοντας στον αλγόριθμο κατανομής πόρων τα δεδομένα του σεναρίου αυτού προκύπτει η κατανομή πόρων του Σχ. 3.14.

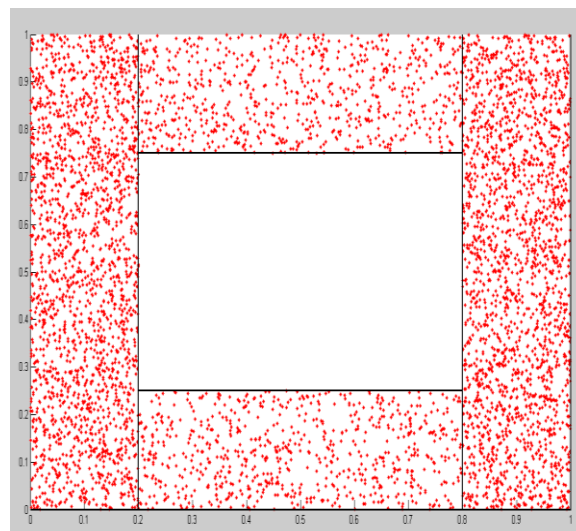


**Σχήμα 3.14** Αρχική κατανομή των  $N$  πόρων στους  $M$  κόμβους AP

Παρατηρείται ότι σε κάποιους κόμβους δεν αποδίδονται καθόλου πόροι, όπως είναι αναμενόμενο, αφού σύμφωνα με τη (3.7.1) αυτοί οι κόμβοι καλύπτουν περιοχές με μηδενική αναμενόμενη κίνηση. Επιπλέον, παρατηρείται ότι ο χώρος θεατών 2 με τη μεγαλύτερη αναμενόμενη προσέλευση έχει λάβει περισσότερους πόρους από το χώρο θεατών 1.

### 3.4.2.2 Εμφάνιση χρηστών στο χώρο $S$ σύμφωνα με την κατανομή Poisson

Με βάση τους αλγορίθμους σε γλώσσα Matlab που έχουν δημιουργηθεί για την προσομοίωση των αφίξεων των χρηστών στο χώρο και στο χρόνο στο Κεφ. 2 και εισάγοντας τα δεδομένα του συγκεκριμένου σεναρίου που εξετάζεται στο εδάφιο αυτό, εξάγεται η εικόνα της χωρικής κατανομής του Σχ. 3.15. Παρατηρείται πλήρης επαλήθευση των υποθέσεων που έχουν γίνει σχετικά με την πυκνότητα εμφάνισης χρηστών στις διάφορες περιοχές του χώρου  $S$ , αφού στο χώρο θεατών 2 έχουν συγκεντρωθεί περισσότεροι χρήστες σε σχέση με το χώρο θεατών 1.

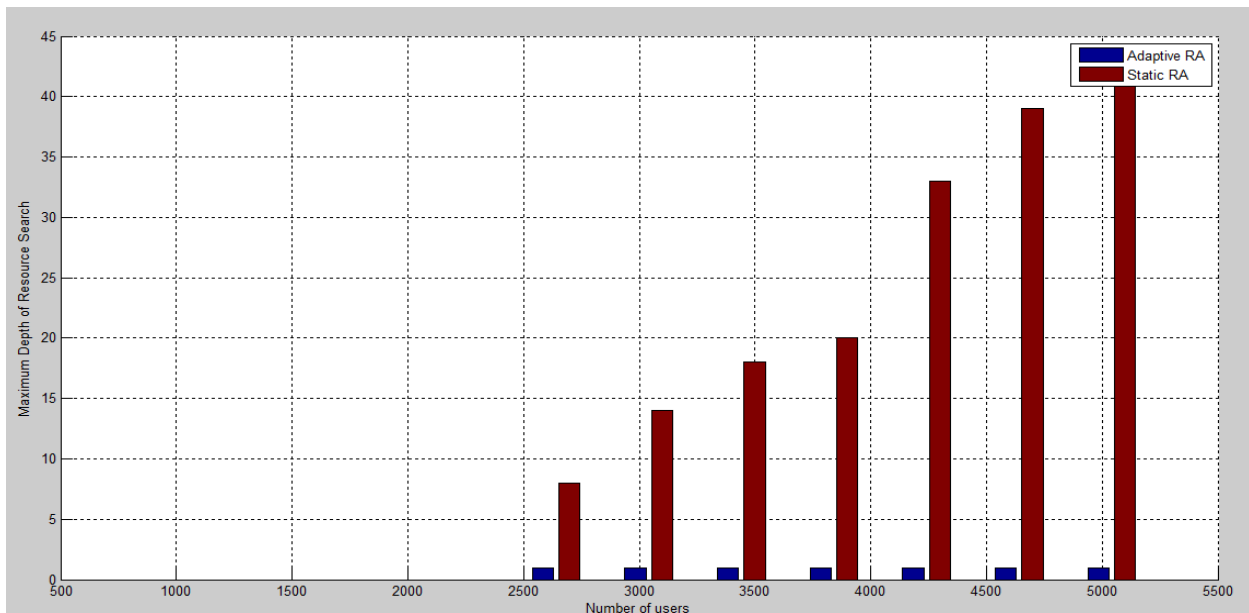


**Σχήμα 3.15** Προσομοίωση των θέσεων των  $N_{users}=5050$  χρηστών

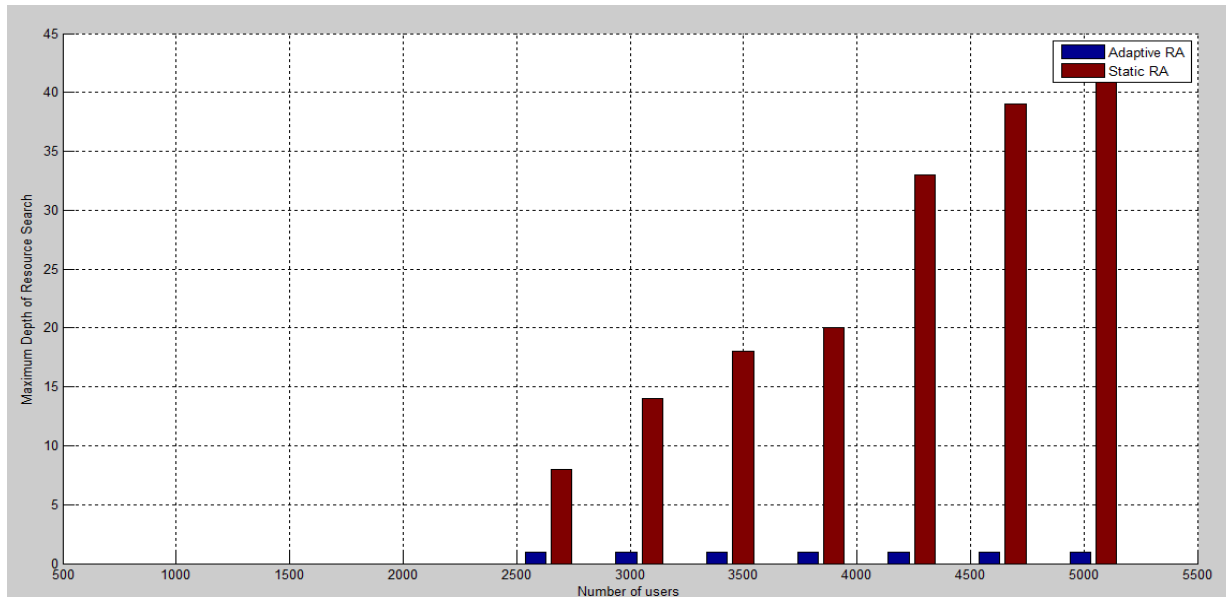
Τέλος, και πάλι επισημαίνεται ότι ο συνολικός αριθμός των χρηστών που εμφανίστηκαν στο χώρο S είναι διαφορετικός από το θεωρητικό, συγκεκριμένα αρκετά μικρότερος του. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς ο θεωρητικός αριθμός αποτελεί απλά μια στατιστική πρόβλεψη, χωρίς να πρέπει οπωσδήποτε να επιβεβαιωθεί.

### 3.4.2.3 Εξυπηρέτηση των χρηστών σύμφωνα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο και αξιολόγηση μέσω διαγραμμάτων

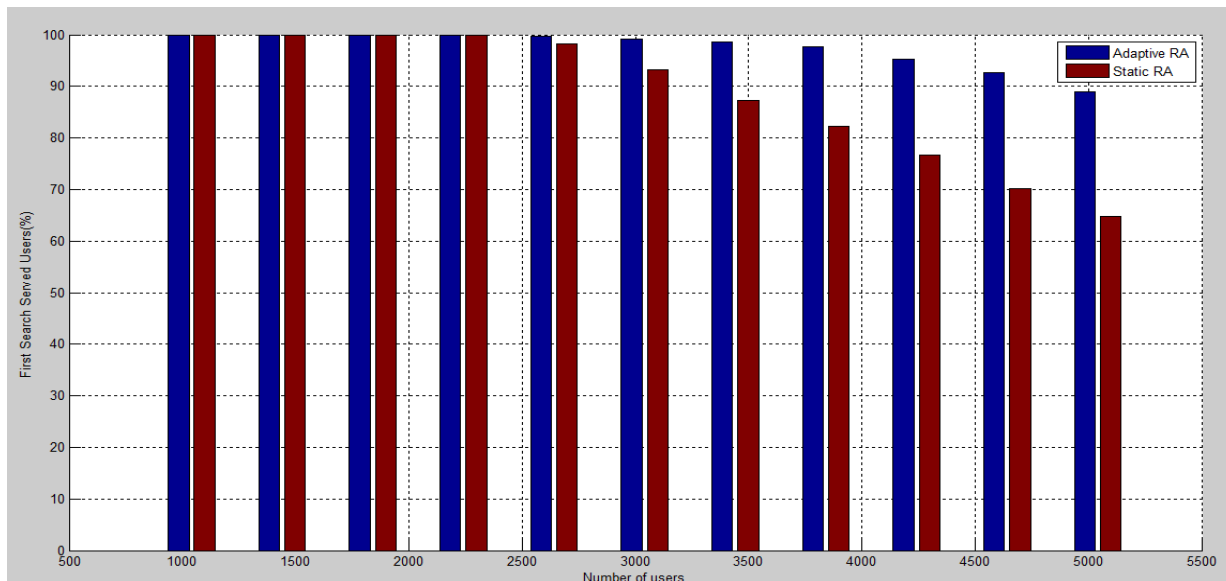
Ακολουθώντας τη γνωστή σειρά των φάσεων του προτεινόμενου αλγορίθμου όπως παρουσιάστηκε στο Κεφ. 2, στην παράγραφο αυτή προσομοιώνεται η εξυπηρέτηση των χρηστών που έχουν εμφανιστεί στο χώρο S. Για την αξιολόγηση της μεθόδου εξυπηρέτησης χαράσσονται τα διαγράμματα των Σχ. 3.16 έως 3.18, στα οποία για λόγους σύγκρισης αποτυπώνονται τα αποτελέσματα και της ομοιόμορφης κατανομής πόρων, αντίστοιχα με το σενάριο της παραγράφου 3.3.



**Σχήμα 3.16** Διάγραμμα μέσου βάθους αναζήτησης, συναρτήσει του αριθμού των εμφανιζόμενων χρηστών



**Σχήμα 3.17** Διάγραμμα μέγιστου βάθους αναζήτησης, συναρτήσει του αριθμού των εμφανιζόμενων χρηστών



**Σχήμα 3.18** Διάγραμμα ποσοστού χρηστών που εξυπηρετούνται με 1 βήμα αναζήτησης, συναρτήσει του αριθμού των εμφανιζόμενων χρηστών

Είναι εμφανής η αποδοτικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου συγκριτικά με την ομοιόμορφη κατανομή πόρων. Συγκεκριμένα, η αποτελεσματική αρχική κατανομή των πόρων στους κόμβους AP επιβεβαιώνεται από το μεγάλο ποσοστό των χρηστών που δεν χρειάστηκε να απασχολήσουν άλλο κόμβο AP προκειμένου να συμπληρωθεί ο ζητούμενος αριθμός πόρων για να εξυπηρετηθούν. Επιπλέον, η συμβολή του ταξινομημένου διανύσματος στην ταχύτητα εξυπηρέτησης των χρηστών είναι δραστική, καθώς το μέσο βάθος αναζήτησης είναι πολύ μικρό και δεν υπερβαίνει την τιμή 2 ακόμη και όταν εμφανίζονται πολλοί χρήστες.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΗΣΤΩΝ ΣΤΗ ΖΗΤΗΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ (SERVICE DIFFERENTIATION)

### 4.1 Εισαγωγή

Στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια και στα σενάρια που έχουν προσομοιωθεί, έχει γίνει η απλουστευτική υπόθεση ότι όλοι οι χρήστες ζητούν τον ίδιο αριθμό τηλεπικοινωνιακών πόρων, ο οποίος επιλέχθηκε με τυχαίο τρόπο στα διάφορα σενάρια. Στην πραγματικότητα, στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις σε πόρους από κάθε χρήστη, οι οποίες εξαρτώνται άμεσα από τις εκάστοτε ζητούμενες υπηρεσίες και τα χαρακτηριστικά τους. Εντούτοις, στα προηγούμενα εδάφια της παρούσας εργασίας, όπου παρουσιάστηκαν οι γενικές αρχές του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής πόρων και εξυπηρέτησης χρηστών, δεν κρίθηκε απαραίτητη αυτή η διάκριση των διαφορετικών αναγκών σε πόρους κάθε εμφανιζόμενου χρήστη. Στο παρόν κεφάλαιο, εξετάζεται η διαφοροποίηση που υφίσταται στη ζήτηση για τηλεπικοινωνιακούς πόρους μεταξύ των χρηστών στα πραγματικά συστήματα τηλεπικοινωνιών ασύρματης πρόσβασης. Επιπλέον, προτείνεται συμπληρωματική διαδικασία για τον υπολογισμό του αριθμού Α των ζητούμενων πόρων κάθε χρήστη αφού ληφθούν υπόψη κατ' εκτίμηση οι διαφορετικές ανάγκες των χρηστών.

### 4.2 Ρυθμοί μετάδοσης των ζητούμενων υπηρεσιών

Οι σύγχρονες κινητές συσκευές τηλεπικοινωνίας (smartphones), έχουν πλέον αναβαθμισμένα χαρακτηριστικά και παρέχουν στους χρήστες τη δυνατότητα να πραγματοποιούν μέσω αυτών ποικίλες και απαιτητικές εργασίες. Ταυτόχρονα, η ανάπτυξη υπηρεσιών και εφαρμογών (service development) εκμεταλλεύεται αυτές τις ενισχυμένες δυνατότητες των κινητών συσκευών, παρέχοντας εξελιγμένες εφαρμογές και υπηρεσίες με προδιαγραφές υψηλής ποιότητας. Υπάρχουν πολλά είδη υπηρεσιών και πολυάριθμες εφαρμογές, καθεμιά από τις οποίες έχει διαφορετικές απαιτήσεις. Ένα από τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που διαφοροποιεί τις υπηρεσίες, είναι η απαίτηση ελάχιστης ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, προκειμένου να παρέχεται η απαραίτητη ποιότητα (Quality of Service-QoS). Η ταχύτητα αυτή «μεταφράζεται» σε τηλεπικοινωνιακούς πόρους με τρόπο που θα παρουσιαστεί στην παράγραφο 4.3. Γενικά, οι απαιτητικότερες υπηρεσίες ως προς την ταχύτητα μετάδοσης χρειάζονται περισσότερους τηλεπικοινωνιακούς πόρους ανά χρήστη.

Στον Πίν. 4.1 αναφέρονται ενδεικτικά ορισμένες δημοφιλείς στους χρήστες υπηρεσίες που παρέχονται μέσω του τηλεπικοινωνιακού δικτύου και η αντίστοιχη απαιτούμενη ταχύτητα για κάθε μία από αυτές. Κρίθηκε σκόπιμο να συμπεριληφθούν στον πίνακα αυτό υπηρεσίες που

έχει παρατηρηθεί ότι ζητούνται από τους χρήστες στα πολυπληθή γεγονότα, όπως αυτά που μελετώνται στη συγκεκριμένη εργασία.

**Πίνακας 4.1** Υπηρεσίες και αντίστοιχες ταχύτητες μετάδοσης

| A/A | ΤΥΠΟΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ  | ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ (R) |
|-----|--|------------------------|
| 1.  | ΚΛΗΣΗ ΦΩΝΗΣ (VOICE CALL)   | 100kbps                |
| 2.  | ΒΙΝΤΕΟΚΛΗΣΗ (VIDEO CALL)   | 500kbps                |
| 3.  | ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΣΤΟΝ ΙΣΤΟ (WEB BROWSING)                                      | 1Mbps                  |
| 4.  | ΜΕΣΑ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗΣ ΔΙΚΤΥΩΣΗΣ (SOCIAL MEDIA: FACEBOOK, INSTAGRAM, TWITTER) | 1.5Mbps                |
| 5.  | ΜΟΥΣΙΚΗ (MUSIC STREAMING)  | 200kbps                |
| 6.  | ΒΙΝΤΕΟ (STANDARD VIDEO STREAMING)                                      | 1.5Mbps                |
| 7.  | ΒΙΝΤΕΟ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ (HD VIDEO STREAMING)                            | 5Mbps                  |
| 8.  | ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ (AUGMENTED REALITY)                          | 5-10Mbps               |

Από τον Πίν. 4.1 προκύπτει ότι υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των ταχυτήτων που απαιτούνται από τις διαφορετικές υπηρεσίες που παρέχονται στους χρήστες. Συγκεκριμένα, η απλή τηλεφωνική κλήση είναι η υπηρεσία με τις λιγότερες απαιτήσεις σε πόρους, ενώ ένα βίντεο υψηλής ανάλυσης ή μια εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας έχουν αυξημένες ανάγκες σε πόρους. Επομένως, σε ένα περισσότερο ρεαλιστικό σενάριο σε σχέση με αυτά που μέχρι τώρα έχουν προσομοιωθεί στο πλαίσιο του προτεινόμενου αλγορίθμου στα Κεφ. 2 και 3, πρέπει να υπάρχουν διαφορετικές τιμές στον αριθμό πόρων που ζητά κάθε εμφανιζόμενος χρήστης.

Σημειώνεται ότι οι ταχύτητες μετάδοσης που αναφέρονται στον Πίν. 4.1 είναι προσεγγιστικές και όχι απόλυτες, καθώς στην πραγματικότητα αυτές κυμαίνονται σε ένα ευρύτερο διάστημα τιμών και εξαρτώνται από ποικίλους παράγοντες. Κάποιοι από αυτούς είναι οι ακόλουθοι:

- η εφαρμογή που υλοποιεί την εκάστοτε υπηρεσία
- οι προτυποποιήσεις που ακολουθούνται
- η εκάστοτε χρήση που γίνεται στην υπηρεσία

Τέλος, επισημαίνεται ότι στις ταχύτητες του Πίν. 4.1 δεν γίνεται διάκριση μεταξύ καθοδικής και ανοδικής ζεύξης, καθώς θεωρείται ότι μπορεί να αφορούν αμφίδρομη μετάδοση, μια παραδοχή που υιοθετείται σε όλη την παρούσα εργασία.

### **4.3 Αντιστοίχιση ρυθμών μετάδοσης σε τηλεπικοινωνιακούς πόρους**

Για να παρασχεθεί μια υπηρεσία με την απαιτούμενη ταχύτητα και κατά συνέπεια ποιότητα, χρησιμοποιούνται ασύρματοι τηλεπικοινωνιακοί πόροι, δηλαδή χρησιμοποιείται συγκεκριμένο τμήμα φάσματος για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα πάνω από μια ασύρματη ζεύξη μεταξύ τερματικού και σταθμού βάσης. Ο τρόπος διαχείρισης του φάσματος και του χρόνου εξαρτάται



κατά κύριο λόγο από την επιλεγμένη τεχνολογία ραδιοπρόσβασης του εκάστοτε τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Τα σύγχρονα ασύρματα συστήματα τηλεπικοινωνιών χρησιμοποιούν κυρίως την τεχνολογία 4G/LTE που αποτελεί τη σημερινή αιχμή σε ό,τι αφορά τη ραδιοπρόσβαση. Καίτοι η επικρατούσα τεχνολογία είναι η 4G/LTE, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι χρησιμοποιούν συμπληρωματικά και τις προγενέστερες αυτής τεχνολογίες στα ασύρματα συστήματα, δηλαδή τις 3G και 2G, που, πάντως, τείνουν να εκλείψουν.

### **4.3.1 Αρχιτεκτονική δομή πλαισίων μετάδοσης δεδομένων τεχνολογίας LTE (LTE data frame structure)**

Με βάση τα προαναφερθέντα και για λόγους συμβατότητας με το υπόλοιπο δίκτυο του τηλεπικοινωνιακού παρόχου, τα ad hoc δίκτυα πρόσβασης που διαμορφώνονται για πολυπληθή γεγονότα επιλέγεται να χρησιμοποιούν την τεχνολογία 4G/LTE, η οποία βασίζεται σε συγκεκριμένα πρότυπα. Στα πρότυπα αυτά, καθορίζεται και η αρχιτεκτονική δομή των πλαισίων δεδομένων (data frame structure) που ανταλλάσσονται μεταξύ πομπού και δέκτη. Κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση της δομής αυτής, καθώς βάσει αυτής ποσοτικοποιείται με ακρίβεια η έννοια του πόρου στα ad hoc δίκτυα και καθίσταται δυνατή η αντιστοίχιση αριθμού πόρων με συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης.

Στο Σχ. 4.1 αποτυπώνεται με λεπτομέρεια η δομή των πλαισίων 4G/LTE που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα συστήματα. Διευκρινίζεται ότι υπάρχουν δύο διακριτοί τύποι πλαισίων που διαφέρουν ως προς τον τρόπο διαχωρισμού της άνω από την κάτω ζεύξη (downlink, uplink). Οι δύο τύποι είναι γνωστοί με τους ακόλουθους χαρακτηρισμούς:

- FDD (Frequency Division Duplexing), κατά τον οποίο η αμφιδρόμηση πραγματοποιείται με διαχωρισμό των ζεύξεων στο πεδίο των συχνοτήτων.
- TDD (Time Division Duplexing), στον οποίο η αμφιδρόμηση πραγματοποιείται με διαχωρισμό των ζεύξεων στο πεδίο του χρόνου

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής έχει επιλεγθεί η αρχιτεκτονική FDD, στην οποία τα πλαίσια μετάδοσης δεδομένων δομούνται όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 4.1, απ' όπου φαίνεται ότι κάθε πλαίσιο αποτελείται από 20 χρονοσχισμές (slots) -ή εναλλακτικά από 10 υποπλαίσια (subframes) των 2 χρονοσχισμών- και έχει συνολική διάρκεια 10ms. Σε αυτή την αρχιτεκτονική, η μικρότερη μονάδα πόρου που μπορεί να αποδοθεί σε κάποιο χρήστη είναι το Resource Block (RB). Επομένως, σε όρους της παρούσας διπλωματικής, το Resource Block είναι ένας τηλεπικοινωνιακός πόρος και αποδίδεται εξ ολοκλήρου σε κάποιο χρήστη κάθε φορά. Δηλαδή, όταν ένας χρήστης ζητεί 5 πόρους εννοείται ότι ζητεί 5 RBs.

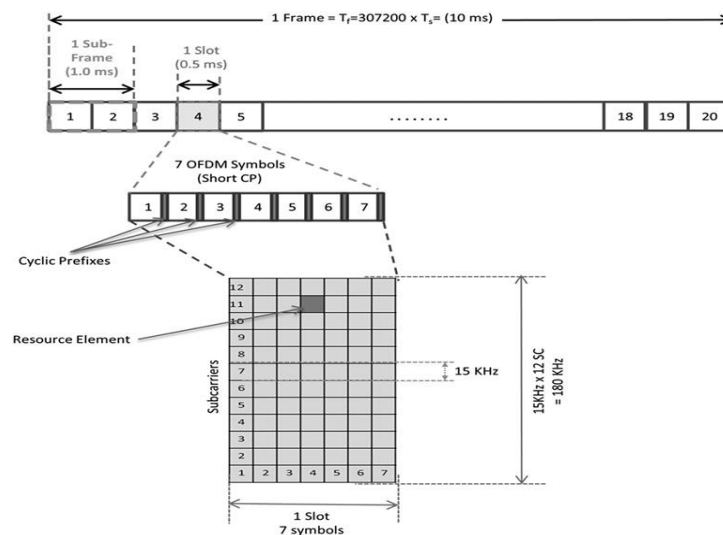
Το Resource Block καταλαμβάνει μια χρονοσχισμή (slot), δηλαδή ένα πλαίσιο LTE αποτελείται από 20 RBs διάρκειας 0.5ms, ενώ στο πεδίο της συχνότητας αποτελείται από 12 υποφέροντα (subcarriers). Το κάθε υποφέρον είναι εύρους 15kHz, οπότε ένα Resource Block καταλαμβάνει συνολικό εύρος ζώνης:

$$B_{RB} = 12(\text{subcarriers}) \times 15(\text{kHz/subcarrier}) = 180 \text{ kHz} \quad (4.1)$$

Τα σύμβολα που αποστέλλονται κατά τη διάρκεια μιας χρονοσχισμής έχουν υποστεί ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM). Με την OFDM πολυπλεξία, το φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα (subcarriers), ώστε κάθε ένα από αυτά να μεταφέρει διαφορετικό τμήμα της πληροφορίας ενός χρήστη, δηλαδή διαφορετικό σύμβολο, αντί να χρησιμοποιηθεί όλο το φάσμα για ένα σύμβολο. Ο αριθμός των OFDM συμβόλων που αποστέλλονται σε μία χρονοσχισμή είναι 7 σύμβολα, όταν χρησιμοποιείται κανονικό κυκλικό πρόθεμα (Normal Cyclic Prefix), ή 6 OFDM σύμβολα, όταν χρησιμοποιείται εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα (Extended Cyclic Prefix). Στην παρούσα ανάλυση, επιλέγεται κανονικό κυκλικό πρόθεμα, επομένως ο αριθμός των OFDM συμβόλων σε ένα RB είναι:

$$7 \text{ (symbols/subcarrier)} \times 12 \text{ (subcarriers/RB)} = 84 \text{ symbols/RB} \quad (4.2)$$

Τα σύμβολα αυτά μπορούν να χαρακτηριστούν και ως Resource Elements, όπως στο Σχ. 4.1, αφού αποτελούν τη μικρότερη διαχειρίσιμη μονάδα στο LTE πλαίσιο.



**Σχήμα 4.1** Η δομή πλαισίου LTE, τύπου FDD

Ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης που έχει επιλεγεί κατά την επεξεργασία του σήματος προς εκπομπή στους σταθμούς βάσης, καθορίζεται και ο αριθμός των ψηφίων (bits) που αποτελούν ένα σύμβολο. Τα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στη τεχνολογία 4G/LTE είναι:

$$\text{QPSK/ 4QAM: } 2 \text{ bits/symbol} \quad (4.3.\alpha)$$

$$16\text{QAM: } 4 \text{ bits/symbol} \quad (4.3.\beta)$$

$$64\text{QAM: } 6 \text{ bits/symbol} \quad (4.3.\gamma)$$

Άρα με βάση την εξίσωση (4.2) προκύπτει ο αριθμός ψηφίων ανά RB:

$$\text{QPSK/ 4QAM: } 2 \text{ (bits/symbol)} \times 84 \text{ (symbols/RB)} = 168 \text{ bits/RB} \quad (4.4.\alpha)$$

$$16\text{QAM: } 4 \text{ (bits/symbol)} \times 84 \text{ (symbols/RB)} = 336 \text{ bits/RB} \quad (4.4.\beta)$$

$$64\text{QAM: } 6 \text{ (bits/symbol)} \times 84 \text{ (symbols/RB)} = 504 \text{ bits/RB} \quad (4.4.\gamma)$$

Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης των ψηφίων για το συγκεκριμένο τύπο πλαισίου της τεχνολογίας 4G/LTE για κάθε σχήμα διαμόρφωσης ξεχωριστά, δεδομένου του αριθμού των RBs σε ένα πλαίσιο και της διάρκειας πλαισίου, προκύπτει:

$$\text{QPSK/ 4QAM: } R = 168 \text{ (bits/RB)} \times 20 \text{ (RBs/frame)} : 10 \text{ (ms/frame)} = 336 \text{ kbps} \quad (4.5.\alpha)$$

$$\text{16QAM: } R = 336 \text{ (bits/RB)} \times 20 \text{ (RBs/frame)} : 10 \text{ (ms/frame)} = 672 \text{ kbps} \quad (4.5.\beta)$$

$$\text{64QAM: } R = 504 \text{ (bits/RB)} \times 20 \text{ (RBs/frame)} : 10 \text{ (ms/frame)} = 1.008 \text{ Mbps} \quad (4.5.\gamma)$$

Οι ρυθμοί μετάδοσης που προέκυψαν στις (4.5.α) έως (4.5.γ) είναι οι μέγιστοι που μπορούν να αποδοθούν από ένα σύστημα τεχνολογίας LTE στο δεδομένο εύρος ζώνης, των 180 kHz, σύμφωνα με την (4.1), και χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο σχήμα διαμόρφωσης. Για την LTE τεχνολογία, τα προτυποποιημένα διαθέσιμα κανάλια έχουν εύρος ζώνης που φαίνεται στη δεύτερη στήλη του Πίν. 4.2 και καθένα από αυτά αποτελείται από τον αριθμό των RBs που φαίνεται στη τρίτη στήλη. Στις υπόλοιπες στήλες υπολογίζεται ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης κάθε καναλιού για κάθε δυνατό σχήμα διαμόρφωσης, σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.5.α) έως (4.5.γ) και με τον αριθμό των RBs που μπορεί να εξυπηρετήσει το εύρος ζώνης κάθε καναλιού.

**Πίνακας 4.2** Κανάλια μετάδοσης τεχνολογίας LTE και αντίστοιχοι ρυθμοί μετάδοσης

| A/A | Bandwidth (MHz) | Number of Resource Blocks | Transmission Rate QPSK/ 4QAM (Mbps) | Transmission Rate 16QAM (Mbps) | Transmission Rate 64QAM (Mbps) |
|-----|-----------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1.  | 1.4             | 6                         | 2.016                               | 4.032                          | 6.048                          |
| 2.  | 3               | 15                        | 5.04                                | 10.08                          | 15.12                          |
| 3.  | 5               | 25                        | 8.4                                 | 16.8                           | 25.2                           |
| 4.  | 10              | 50                        | 16.8                                | 33.6                           | 50.4                           |
| 5.  | 15              | 75                        | 25.2                                | 50.4                           | 75.6                           |
| 6.  | 20              | 100                       | 33.6                                | 67.2                           | 100.8                          |

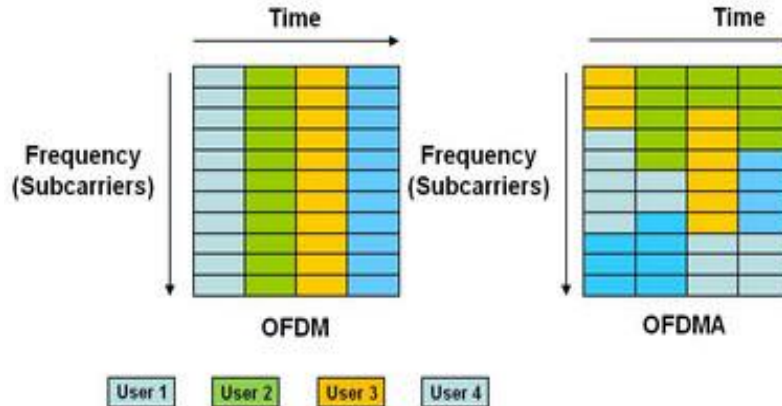
Η πρώτη παρατήρηση για τα δεδομένα του Πίν. 4.2 είναι ότι το διαθέσιμο εύρος ζώνης κάθε καναλιού δεν αξιοποιείται πλήρως από τα πλαίσια μετάδοσης δεδομένων της τεχνολογίας LTE. Για παράδειγμα στο πρώτο είδος καναλιού, του οποίου το εύρος ζώνης είναι 1.4MHz, το συνολικό εύρος ζώνης που καλύπτουν τα 6 RBs είναι:

$$6 \text{ RBs} \times 180 \text{ (kHz/RB)} = 1.008 \text{ MHz} \quad (4.6)$$

Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει τμήμα του εύρους ζώνης που παραμένει αδιάθετο ή αξιοποιείται για άλλες λειτουργίες. Επιπλέον, από τον Πίν. 4.2 διακρίνεται η ποικιλία που μπορεί να προσφέρει σε ρυθμούς μετάδοσης η τεχνολογία LTE, ικανοποιώντας με αυτόν τον τρόπο τις διαφορετικές ανάγκες που υπάρχουν.

### 4.3.2 Υπολογισμός απαιτούμενων πόρων βάσει ρυθμού μετάδοσης υπηρεσίας

Έχοντας αναλύσει τον τρόπο οργάνωσης και δόμησης των πλαισίων μετάδοσης τύπου FDD της τεχνολογίας 4G/LTE, κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά στον τρόπο πρόσβασης των χρηστών στο μέσο μετάδοσης, δηλαδή των ραδιοπόρων, σε ένα σύστημα LTE. Ο επιλεγμένος τρόπος πρόσβασης των χρηστών είναι η πολλαπλή πρόσβαση με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access-OFDMA), ο οποίος αποτελεί επέκταση της πολύπλεξης OFDM για την εξυπηρέτηση πολλών χρηστών. Η πολύπλεξη OFDM για την οποία έγινε σύντομη αναφορά στην προηγούμενη παράγραφο παρέχει τη δυνατότητα σε ένα χρήστη να στείλει ταυτόχρονα πολλά σύμβολα χρησιμοποιώντας για το κάθε ένα διαφορετικά τμήματα του φάσματος, τα υποφέροντα (subcarriers). Στην περίπτωση πολλών χρηστών, η λογική της OFDM πολύπλεξης εξελίσσεται και προκύπτει η τεχνική OFDMA, στην οποία τα διαφορετικά υποφέροντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από διαφορετικούς χρήστες, όπως δείχνει και το Σχ. 4.2 ακολούθως.



**Σχήμα 4.2** Η τεχνική πολύπλεξης OFDM(δεξιά) και η πολλαπλή πρόσβαση OFDMA(αριστερά)

Σε ό,τι αφορά την τεχνολογία LTE και σύμφωνα με τη δομή πλαισίου που φαίνεται στο Σχ. 4.1, το αντίστοιχο ελάχιστο τμήμα φάσματος που μπορεί να αποδοθεί σε ένα χρήστη είναι τα 180kHz, που είναι το εύρος ζώνης ενός Resource Block. Συνεπώς, διαφορετικά RBs σε ένα κανάλι πρόσβασης, από τα κανάλια που παρουσιάστηκαν στον Πίν. 4.2, μπορούν να δοθούν σε διαφορετικούς χρήστες. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα πλαίσιο αποτελείται από 20 χρονοσχισμές (slots), ο συνολικός αριθμός διαθέσιμων RBs που μπορούν να δοθούν σε διαφορετικούς χρήστες φαίνεται στον παρακάτω Πίν. 4.3 για κάθε κανάλι ξεχωριστά.

**Πίνακας 4.3** Αριθμός RBS ανά πλαίσιο για κάθε διαθέσιμο κανάλι

| A/A | Bandwidth<br>(MHz) | No Resource Blocks /slot | No Resource Blocks /frame |
|-----|--------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1.  | 1.4                | 6                        | 120                       |
| 2.  | 3                  | 15                       | 300                       |
| 3.  | 5                  | 25                       | 500                       |
| 4.  | 10                 | 50                       | 1000                      |
| 5.  | 15                 | 75                       | 1500                      |
| 6.  | 20                 | 100                      | 2000                      |

Όταν αποδίδεται ένα RB από το συνολικό πλαίσιο μετάδοσης σε κάποιο χρήστη, αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί το ίδιο RB κάθε φορά που μεταδίδεται το πλαίσιο, δηλαδή κάθε 10ms. Συνεπώς, ο ρυθμός μετάδοσης για χρήστη με ένα RB είναι ένα ποσοστό του συνολικού ρυθμού μετάδοσης που υπολογίστηκε προηγουμένως στον Πίν. 4.2. Συγκεκριμένα, ο ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης ανά RB μπορεί να υπολογιστεί αν διαιρεθεί ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης με τον αριθμό των RBs. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις εξισώσεις (4.7.α) έως (4.7.γ) ακολούθως.

QPSK/ 4QAM: Transmission Rate/RB = 16.8 kbps (4.7.α)

16QAM: Transmission Rate/RB = 33.6 kbps (4.7.β)

64QAM: Transmission Rate/RB = 50.4 kbps (4.7.γ)

Οι ρυθμοί μετάδοσης των (4.7.α) έως (4.7.γ) αποτελούν την ελάχιστη ταχύτητα που μπορεί να έχει ένας χρήστης, αν έχει στη διάθεσή του μόνο ένα RB για χρήση. Συνεπώς, για να επιτύχει μεγαλύτερες ταχύτητες πρέπει να ζητήσει περισσότερα RBs. Η σχέση της ταχύτητας μετάδοσης με τον αριθμό των RBs είναι γραμμική, καθώς ισχύει:

$$\text{Transmission Rate/user} = G \times (\text{RBs/user}) \quad (4.8)$$

όπου  $G = \text{Transmission Rate/RB}$  των εξισώσεων (4.7) αντίστοιχα με το σχήμα διαμόρφωσης

Συμπερασματικά, ο υπολογισμός των απαιτούμενων πόρων, δηλαδή του αριθμού των RBs, προς εξασφάλιση του ρυθμού μετάδοσης της υπηρεσίας που ζητεί ο χρήστης, γίνεται σύμφωνα με τη σχέση

$$\text{RB}_u = \text{RBs/user} = (\text{Transmission Rate/user}) : G \quad (4.9)$$

Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί ότι στις (4.8) και (4.9) θεωρήθηκε ότι κάθε RB αξιοποιείται πλήρως για τις ανάγκες της υπηρεσίας του χρήστη, ενώ κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα. Εκτός από τη μέθοδο κωδικοποίησης που πρέπει να ληφθεί υπόψη, καθώς επηρεάζει τον ωφέλιμο ρυθμό μετάδοσης  $R_u$ , υπάρχουν και άλλες λειτουργίες που πραγματοποιούνται κατά τη μετάδοση δεδομένων και καταλαμβάνουν τμήμα των διαθέσιμων πόρων. Επομένως, ο αριθμός των πόρων που χρειάζεται ένας χρήστης είναι

μεγαλύτερος από αυτόν που προκύπτει στην (4.9). Για τον υπολογισμό του, απαιτείται η συνεκτίμηση των περιοριστικών παραγόντων που οδηγούν σε μείωση του ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης. Ο ακριβής προσδιορισμός του συντελεστή μείωσης του ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης είναι δύσκολος και εκφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Μπορεί, όμως, να ληφθεί υπόψη κατά προσέγγιση ότι στην τεχνολογία LTE εισάγεται πλεονασμός σε ποσοστό της τάξης του 25%. Με αυτό ως δεδομένο, προκύπτει ότι ο ωφέλιμος ρυθμός μετάδοσης είναι το 75% του συνολικού ρυθμού μετάδοσης, οπότε ο τελικός ρυθμός μετάδοσης είναι:

$$\text{Transmission Rate/user} = R_u : 0.75 \quad (4.10)$$

Κατ' επέκταση, ο ωφέλιμος ρυθμός μετάδοσης  $R_u$  είναι και ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης της υπηρεσίας που χρησιμοποιεί ο χρήστης.

#### **4.4 Διαστασιολόγηση δικτύου βάσει της διαφοροποιημένης ζήτησης υπηρεσιών**

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος για την πραγματοποίηση της τηλεπικοινωνιακής κάλυψης στα πολυπληθή γεγονότα, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφ. 2, δεν λαμβάνει υπόψη τις διαφορετικές ανάγκες των υπηρεσιών που ζητούνται από τους χρήστες και ο ορισμός του αριθμού ζητούμενων πόρων  $A$  είναι αυθαίρετος. Στη συγκεκριμένη παράγραφο, εισάγεται η προτεινόμενη διαδικασία διαστασιολόγησης του δικτύου χρησιμοποιώντας το σταθμισμένο μέσο αριθμό ζητούμενων πόρων  $A$ , βάσει των διαφορετικών αναμενόμενων ζητούμενων υπηρεσιών.

##### **4.4.1 Κατηγοριοποίηση υπηρεσιών και αντιστοίχιση με συντελεστές βάρους**

Βάσει του Πίν. 4.1 και των εξισώσεων (4.9) και (4.10), είναι δυνατός ο υπολογισμός του αριθμού των RBs που χρειάζεται κάθε πιθανή υπηρεσία για να παρέχεται με την επιθυμητή ποιότητα (QoS). Για λόγους απλοποίησης κρίνεται σκόπιμο να ομαδοποιηθούν οι υπηρεσίες που παρουσιάζονται στον Πίν. 4.1 σε ευρύτερες κατηγορίες που θα ονομάζονται κλάσεις υπηρεσίας. Διακρίνονται τέσσερις κλάσεις υπηρεσιών που παρουσιάζονται στον Πίν. 4.4 με τις αντίστοιχες απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης. Οι ζητούμενες υπηρεσίες από το κοινό ενός πολυπληθούς γεγονότος, που έχουν καταγραφεί στον Πίν. 4.1, εντάσσονται σε κάποια από τις κλάσεις του Πίν. 4.4. Έτσι, η 3<sup>η</sup> στήλη του Πίν. 4.4 περιλαμβάνει τους τύπους υπηρεσιών που ανήκουν σε κάθε κλάση. Στις τρεις τελευταίες στήλες του Πίν. 4.4 αντιστοιχίζεται καθεμιά από τις τέσσερις κλάσεις με τους απαιτούμενους πόρους, δηλαδή με τον αριθμό των RBs/user, για κάθε σχήμα διαμόρφωσης και βάσει των εξισώσεων 4.7, 4.9 και 4.10.

**Πίνακας 4.4** Οι κλάσεις υπηρεσιών με τους αντίστοιχους ρυθμούς μετάδοσης και τους τύπους

| ΚΛΑΣΗ | ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ (R) (Mbps) | ΤΥΠΟΙ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ | RBs/user QPSK/ 4QAM | RBs/user 16QAM | RBs/user 64QAM |
|-------|-----------------------------|-----------------|---------------------|----------------|----------------|
| A     | 0.1                         | 1               | 8                   | 4              | 3              |
| B     | 0.5                         | 2, 5            | 40                  | 20             | 13             |
| Γ     | 1.5                         | 3,4,6           | 119                 | 59             | 40             |
| Δ     | 5                           | 7,8             | 397                 | 198            | 132            |

Η κλάση υπηρεσιών A είναι η λιγότερο απαιτητική σε ρυθμούς μετάδοσης και αφορά πολύ απλές υπηρεσίες, όπως η κλασική τηλεφωνία. Οι κλάσεις B και Γ περιλαμβάνουν υπηρεσίες που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερες ταχύτητες και είναι περισσότερο δημοφιλείς στους χρήστες από τις υπόλοιπες υπηρεσίες. Τέλος, στην κλάση Δ εντάσσονται υπηρεσίες με απαιτήσεις ιδιαίτερα υψηλών ρυθμών μετάδοσης και, κατά συνέπεια, μεγαλύτερες ανάγκες σε πόρους.

Η σκοπιμότητα ορισμού της ανωτέρω κατηγοριοποίησης αφορά την ευκολότερη διαχείριση των υπηρεσιών για τον υπολογισμό των συνολικά απαραίτητων τηλεπικοινωνιακών πόρων του δημιουργούμενου δικτύου. Προς αυτήν την κατεύθυνση, εισάγεται ένα νέο μέγεθος που ονομάζεται συντελεστής βάρους κλάσης και συμβολίζεται με  $W$ . Το μέγεθος αυτό αντανακλά τη δημοτικότητα μιας κλάσης υπηρεσιών και ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των χρηστών που κάνουν χρήση υπηρεσιών συγκεκριμένης κλάσης προς το σύνολο των χρηστών του δικτύου, δηλαδή

$$W_x = \frac{\text{No users of service class } x}{\text{Total No users}} \quad x = A, B, \Gamma, \Delta \quad (4.11)$$

Για παράδειγμα, αν από ένα σύνολο 100 χρηστών οι 65 χρησιμοποιούν το δίκτυο για υπηρεσίες της A κλάσης, όπως είναι η απλή φωνητική κλήση, τότε ο συντελεστής βάρους της κλάσης αυτής είναι  $W_A = 0.65$ .

Διαπιστώνεται εύκολα, ότι οι συντελεστές βάρους, όπως ορίστηκαν προηγουμένως, προκύπτουν από μετρήσεις που αφορούν τις προτιμώμενες από τους χρήστες υπηρεσίες, δηλαδή αποτελούν *a posteriori* μέγεθος που εκτιμάται κατόπιν χρήσης των υπηρεσιών. Για το σχεδιαστή του ad hoc τηλεπικοινωνιακού δικτύου ενός πολυπληθούς γεγονότος, όμως, είναι επιθυμητό να μπορεί να προβλέψει την κίνηση που θα κληθεί να εξυπηρετήσει το δίκτυο, δηλαδή να έχει στη διάθεσή του *a priori* μεγέθη, όπως είναι και ο αναμενόμενος αριθμός χρηστών  $N_{users}$  της εξίσωσης 2.4. Για το λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να εκτιμώνται κατά προσέγγιση οι συντελεστές βάρους των κλάσεων υπηρεσιών που θα ζητηθούν από τους χρήστες του ad hoc δικτύου, βάσει των στατιστικών δεδομένων που έχει στη διάθεσή του ο πάροχος από προηγούμενες παρόμοιες εκδηλώσεις. Με αυτόν τον τρόπο, ο σχεδιαστής του δικτύου διαθέτει μια καλή πρόβλεψη της αναμενόμενης ζήτησης πόρων και μπορεί να πραγματοποιήσει αποτελεσματικά τη διαστασιολόγηση του δικτύου και την κατανομή πόρων.

Συγκεκριμένα, αφού αντιστοιχισθεί κάθε κλάση υπηρεσιών με συγκεκριμένο συντελεστή βάρους  $W_x$ , υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος ρυθμός μετάδοσης, σύμφωνα με την (4.12) και τον Πίν. 4.4.

$$\text{Adapted Average Rate (AAR)} = \sum_{x=A,B,\Gamma,\Delta} (R_x * W_x) \quad (4.12)$$

Με τον ίδιο τρόπο, υπολογίζεται και ο σταθμευμένος μέσος αριθμός πόρων για κάθε σχήμα διαμόρφωσης σύμφωνα με την (4.13) και τον Πίν. 4.4.

$$\text{Adapted Average RBs/user (AARBs/user)} = \sum_{x=A,B,\Gamma,\Delta} (\text{RBs/user}_x * W_x) \quad (4.13)$$

Ο σταθμευμένος μέσος αριθμός πόρων ανά χρήστη αποτελεί ουσιαστικά και τον αριθμό πόρων A, όπως συμβολίζεται στον προτεινόμενο αλγόριθμο, εφόσον αφορά το μέσο αριθμό ζητούμενων πόρων ανά χρήστη. Η διαδικασία που περιγράφηκε για τον υπολογισμό του A προηγείται της διαστασιολόγησης του δικτύου, ώστε από τον αριθμό A που θα προκύψει και από τον αναμενόμενο αριθμό χρηστών Nusers να προσδιοριστεί ο συνολικός αριθμός πόρων N, σύμφωνα με την (2.5). Έπειτα, ο πάροχος-σχεδιαστής δικτύου ακολουθεί τα στάδια του προτεινόμενου αλγορίθμου, όπως έχουν παρουσιαστεί στο Κεφ. 2, για την κατανομή των πόρων. Στην επόμενη παράγραφο, δίνεται ένα παράδειγμα υπολογισμού του αριθμού A κατά την προσομοίωση σεναρίων εφαρμογής του προτεινόμενου αλγορίθμου.

#### 4.4.2 Σενάριο υπολογισμού του μέσου σταθμισμένου αριθμού ζητούμενων πόρων A και εξυπηρέτηση χρηστών

Ας θεωρηθεί πολυπληθές γεγονός που απαιτεί τηλεπικοινωνιακή κάλυψη, όπως αυτό του σεναρίου προσομοίωσης της παραγράφου 2.3. Η συνάρτηση της εμφάνισης των χρηστών είναι ίδια, δηλαδή είναι η εξίσωση 2.10. Όμως, ο αριθμός των ζητούμενων πόρων δεν είναι  $A=5$ , όπως είχε υποτεθεί, γιατί κάθε χρήστης πλέον ζητεί διαφορετικό αριθμό πόρων ανάλογα με την επιθυμητή υπηρεσία, όπως αναλύθηκε στο παρόν κεφάλαιο. Έστω ότι ο σχεδιαστής του δικτύου διαθέτει τις στατιστικές πληροφορίες του Πίν. 4.5 ως προς τις προτιμήσεις των χρηστών σε κλάσεις υπηρεσιών, που έχουν προκύψει με βάση εκδηλώσεις παρόμοιου περιεχομένου που έλαβαν χώρα στο παρελθόν. Από το ποσοστό χρηστών που ζήτησαν υπηρεσίες κάθε κλάσης προκύπτει ο συντελεστής βάρους  $W$  κάθε κλάσης που αποτυπώνεται στην 3<sup>η</sup> στήλη του Πίν. 4.5.

**Πίνακας 4.5** Στατιστικά δεδομένα προτιμήσεων χρηστών σε παρελθοντικά πολυπληθή γεγονότα

| ΚΛΑΣΗ | ΠΟΣΟΣΤΟ ΧΡΗΣΤΩΝ (%) | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΒΑΡΟΥΣ, W |
|-------|---------------------|-----------------------|
| A     | 25                  | 0.25                  |
| B     | 5                   | 0.05                  |
| Γ     | 55                  | 0.55                  |
| Δ     | 15                  | 0.15                  |

Χρησιμοποιώντας τη στατιστική πληροφορία του Πίν. 4.5, προκύπτουν οι εκτιμώμενοι συντελεστές βάρους των κλάσεων για ένα μελλοντικό γεγονός, όπως συμβαίνει και στο



εξεταζόμενο σενάριο αυτής της παραγράφου για το γεγονός που πρόκειται να διεξαχθεί. Βάσει των δεδομένων του Πίν. 4.5, του Πίν. 4.4 και της (4.12) προκύπτει ο σταθμισμένος μέσος ρυθμός μετάδοσης, δηλαδή

$$AAR = 0.15 \cdot 0.1 + 0.05 \cdot 0.5 + 0.55 \cdot 1.5 + 0.25 \cdot 5 = 2.115 \text{ Mbps} \quad (4.14)$$

Επιπλέον σύμφωνα με την (4.13) και τους Πίν. 4.4 και 4.5 προκύπτει ο σταθμισμένος μέσος αριθμός RBs ανά χρήστη των (4.15.α) έως (4.15.γ), για κάθε σχήμα διαμόρφωσης

$$QPSK/4QAM: AARBs/user = 0.25 \cdot 8 + 0.05 \cdot 40 + 0.55 \cdot 119 + 0.15 \cdot 397 \approx 129 \quad (4.15.α)$$

$$16QAM: AARBs/user = 0.25 \cdot 4 + 0.05 \cdot 20 + 0.55 \cdot 59 + 0.15 \cdot 198 \approx 64 \quad (4.15.β)$$

$$64QAM: AARBs/user = 0.25 \cdot 3 + 0.05 \cdot 13 + 0.55 \cdot 40 + 0.15 \cdot 132 \approx 43 \quad (4.15.γ)$$

Ο σχεδιαστής-πάροχος του δικτύου επιλέγει το σχήμα διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιήσει για το συγκεκριμένο γεγονός, έτσι ώστε να εξισώσει τον αριθμό A με τον αντίστοιχο αριθμό πόρων από τις (4.15.α) έως (4.15.γ). Έστω ότι σε αυτό το σενάριο επιλέγεται το σχήμα διαμόρφωσης 64QAM. Με δεδομένο τον αριθμό A πλέον, ο πάροχος μπορεί να προχωρήσει στη διαστασιολόγηση του δικτύου, σύμφωνα με την (2.5), καθώς και να πραγματοποιήσει την κατανομή των πόρων, όπως έχει παρουσιαστεί στην παράγραφο 2.2.1. Επομένως, ο αριθμός των συνολικών πόρων που πρέπει να εξασφαλίσει είναι:

$$N = 43 \cdot 1000 = 43.000 \text{ πόροι} \quad (4.16)$$

Οι πόροι αυτοί κατανέμονται με βέλτιστο τρόπο στους κόμβους, όπως περιγράφεται στο Κεφ. 2, και, στη συνέχεια, προσομοιώνεται η άφιξη των χρηστών όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.3.2.3, με τα αποτελέσματα του Σχ. 2.4. Όπως διαφέρει ο τελικός αριθμός χρηστών,  $N_{users}' = 1010$ , από τον θεωρητικά αναμενόμενο,  $N_{users} = 1000$ , λόγω της τυχαιότητας στην εμφάνισή τους, έτσι αναμένεται να διαφέρει και ο μέσος αριθμός ζητούμενων πόρων. Αν ο μέσος αριθμός ζητούμενων πόρων προκύψει μικρότερος από το θεωρητικά εκτιμηθέντα, τότε υπάρχει η δυνατότητα εξυπηρέτησης ενός ποσοστού των επιπλέον χρηστών μειώνοντας έτσι το ποσοστό αποκλεισμένων χρηστών που θα ήταν:

$$P_{out} = \frac{N_{users}' - N_{users}}{N_{users}} = 1\% \quad (4.17)$$

Αντίθετα, αν ο μέσος αριθμός ζητούμενων πόρων είναι μεγαλύτερος, η πιθανότητα αποκλεισμού χρηστών θα είναι μεγαλύτερη από την  $P_{out}$  της (4.17).

Προχωρώντας, λοιπόν, στην προσομοίωση της εξυπηρέτησης των εμφανιζόμενων χρηστών, που παρουσιάστηκε στον Πίν. 2.4, η αλλαγή που πραγματοποιείται στο αντίστοιχο τμήμα κώδικα είναι ότι για κάθε χρήστη προκύπτει διαφορετικός αριθμός ζητούμενων πόρων κατά τυχαίο τρόπο, με βάση τους συντελεστές βάρους του Πίν. 4.5. Στον Πίν. 4.6, παρουσιάζεται το τμήμα κώδικα που υλοποιεί την εξυπηρέτηση με διαφοροποιημένη ζήτηση πόρων από τους χρήστες.

**Πίνακας 4.6** Προσομοίωση αναζήτησης πόρων από τον SBS για εξυπηρέτηση χρηστών με διαφορετικό αριθμό ζητούμενων πόρων

|  |
|--|
| <p>Input: <b>m</b>, διάνυσμα με τους διαθέσιμους πόρους κάθε κόμβου<br/> <b>Nusers</b>, αριθμός χρηστών <b>Nusers'</b><br/> <b>M</b>, αριθμός κόμβων που καλύπτουν το χώρο<br/> <b>coords</b>, διάνυσμα με τις θέσεις των χρηστών<br/> <b>p</b>, διάνυσμα με τις θέσεις των κόμβων</p>   |
| <p>Main Part: <code>Io=zeros(Nusers,1); %vector for I node of each user</code><br/> <code>C=zeros(Nusers,2); %vector for users' resources</code><br/> <code>counter=0; %counter of users served with more than one step</code><br/> <code>for i=1:1:Nusers</code><br/> <code>    sum=0;</code><br/> <code>    m(:,2)=[1:1:M]; %sorting of nodes</code><br/> <code>    m1=sortrows(m,1); %sortrows:a function that sorts nodes</code><br/> <code>    msorted=m1(:,2); %sorted vector</code><br/> <code>    m=m(:,1);</code><br/> <code>    [Io]=findIo(p,coords,M,i,Io); %findIo:a function that finds</code><br/> <code>  %Io=I node</code><br/> <code>    if Io(i,1)==0 %out of coverage</code><br/> <code>        i</code><br/> <code>    else</code><br/> <code>        step=0; %depth of resource search</code><br/> <code>    % -----</code><br/> <code>        %selection of number of resources</code><br/> <code>        choice=rand;</code><br/> <code>        if choice&lt;=0.25</code><br/> <code>            A=3;</code><br/> <code>        else if choice&lt;=0.30</code><br/> <code>            A=13;</code><br/> <code>        else if choice&lt;=0.85</code><br/> <code>            A=40;</code><br/> <code>            else A=132;</code><br/> <code>            end</code><br/> <code>        end</code><br/> <code>        sum=sum+A;</code><br/> <code>    % -----</code><br/> <code>        if m(Io(i,1),1)&gt;=A %%SUCCESFUL SERVICE OF Ith Node</code><br/> <code>            C(i,1)=A;</code><br/> <br/> <code>        ..ίδιο με τον Πίνακα 2.4..</code><br/> <br/> <code>        end</code><br/> <code>    %calculation of Average Number of Resources per user</code><br/> <code>        Average=sum/Nusers</code></p> |
| <p>Output: <b>C</b>, πίνακας με τον αριθμό κόμβων που ενεργοποιήθηκαν για την εξυπηρέτηση κάθε χρήστη<br/> <b>counter</b>, αριθμός χρηστών που δεν εξυπηρετήθηκαν με την πρώτη αναζήτηση</p>   |

Με την αλλαγή αυτή στον αριθμό ζητούμενων πόρων κάθε χρήστη δεν επηρεάζεται η διαδικασία εξυπηρέτησης για τον ισχυρό κόμβο sBS, όπως αποδείχτηκε και στον Πίν. 4.6. Όμως, λόγω της τυχαιότητας στη ζήτηση πόρων από κάθε χρήστη προκύπτει διαφορετικός αριθμός των συνολικά ζητούμενων πόρων σε σχέση με το θεωρητικά αναμενόμενο. Στην εκτέλεση της εξυπηρέτησης με τα δεδομένα του παρόντος σεναρίου προέκυψε μέσος αριθμός ζητούμενων πόρων

$$\text{AverageA} = \text{sum}/\text{Nusers}' = 42 \text{ πόροι/χρήστη} \quad (4.18)$$

Εφόσον ο αριθμός πόρων είναι μικρότερος από το θεωρητικό, εξυπηρετούνται περισσότεροι από 1000 χρήστες, οπότε προκύπτει μικρότερο ποσοστό αποκλεισμού από 1%. Σε άλλη εκτέλεση, μπορεί να συνέβαινε το αντίθετο, οπότε θα προέκυπτε μεγαλύτερο ποσοστό αποκλεισμού

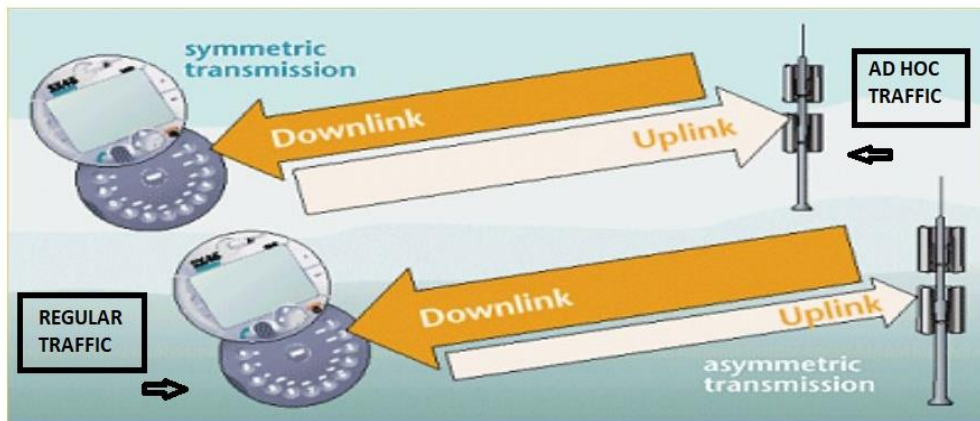


# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΕΣ ΣΤΑ AD HOC ΔΙΚΤΥΑ (MOBILE EDGE COMPUTING)

### 5.1 Υπηρεσίες που παρέχονται σε ad hoc γεγονότα/εκδηλώσεις

Γενικά, σε ένα ad hoc δίκτυο που δημιουργείται για την τηλεπικοινωνιακή εξυπηρέτηση σε ένα πολυπληθές γεγονός/εκδήλωση (mass event), έχει παρατηρηθεί από στατιστικές μετρήσεις ότι οι χρήστες κάνουν εξίσου χρήση της άνω και της κάτω ζεύξης του δικτύου (uplink-downlink). Αντίθετα, η καθημερινή κίνηση σε ένα κλασικό δίκτυο τηλεπικοινωνιών εντοπίζεται κυρίως στην κάτω ζεύξη, καθώς οι περισσότερες λειτουργίες που επιτελούνται μέσω του δικτύου είναι η χρήση δεδομένων για πλοήγηση στο Διαδίκτυο και το κατέβασμα αρχείων (download). Αυτή η αντίθεση στα μοντέλα κίνησης, που αποτυπώνεται και στο Σχ. 5.1, είναι δικαιολογημένη, αν ληφθούν υπόψη τα είδη των υπηρεσιών που ζητούνται από τους χρήστες σε τέτοια πολυπληθή γεγονότα/εκδηλώσεις. Συγκεκριμένα, η τάση των χρηστών όταν παρακολουθούν ένα ιδιαίτερο γεγονός/εκδήλωση είναι να ανεβάζουν (upload) υλικό, όπως φωτογραφίες και βίντεο, από το γεγονός/εκδήλωση αυτό στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης (facebook, twitter, instagram, etc). Σε μικρότερο βαθμό, κατεβάζουν αρχεία ή σερφάρουν στο Διαδίκτυο, ενώ η πραγματοποίηση κλήσεων κινείται σε φυσιολογικά επίπεδα. Κατά συνέπεια, προκύπτει συνήθως συμμετρική κίνηση και στις δύο ζεύξεις (uplink-downlink) του δικτύου.



**Σχήμα 5.1** Συμμετρική και ασύμμετρη κίνηση στο δίκτυο πρόσβασης

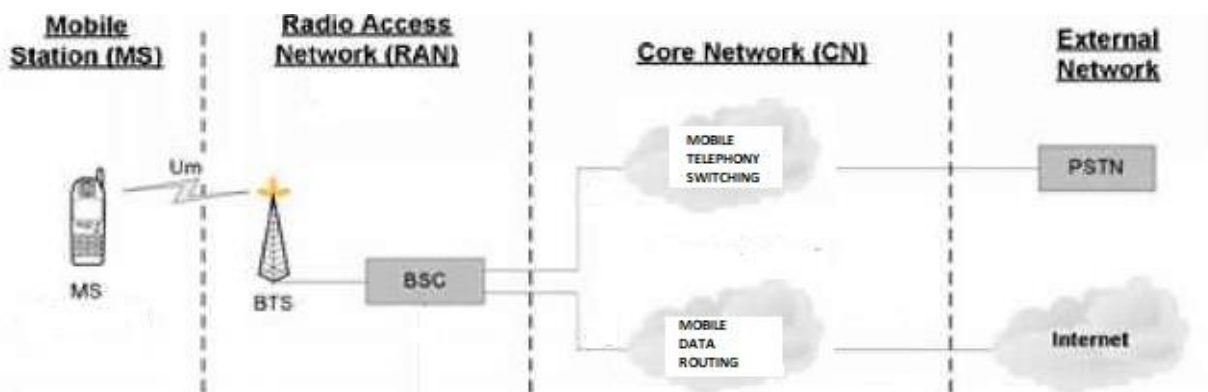
Παράλληλα, με το διαχείρισιμο ad hoc δίκτυο πρόσβασης που δημιουργείται, παρέχεται η δυνατότητα στο διοργανωτή του πολυπληθούς γεγονότος/εκδήλωσης για παροχή υπηρεσιών στο παρευρισκόμενο κοινό, οι οποίες αφορούν ειδικά το συγκεκριμένο γεγονός/εκδήλωση. Ειδικότερα, σε ένα πολυπληθές γεγονός/εκδήλωση, όπως για παράδειγμα ένα αθλητικό γεγονός ή μια πολιτιστική εκδήλωση, μπορεί μέσω του τηλεπικοινωνιακού δικτύου και κάποιας εφαρμογής για κινητές συσκευές, ο διοργανωτής να επιθυμεί είτε να παρέχει στο κοινό

πληροφορίες για την εκδήλωση, είτε να προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης σημαντικών στιγμιότυπων της εκδήλωσης. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές που μπορεί να αναπτυχθούν και να αφορούν το κάθε είδους γεγονός/εκδήλωση και να βελτιώσουν την εμπειρία που έχει το κοινό κατά τη διάρκεια της παρακολούθησής του. Οι υπηρεσίες αυτές προορίζονται για το σύνολο των χρηστών (καθολικές υπηρεσίες-universal services) και παρέχονται σε μορφή ευρυεκπομπής (broadcast) από τα σημεία πρόσβασης-κόμβους, δηλαδή η πληροφορία εκπέμπεται ταυτόχρονα προς πολλούς δέκτες. Είναι σημαντικό, λοιπόν, κατά το σχεδιασμό του δικτύου από τον πάροχο να συνυπολογίζονται ως επιπλέον υπηρεσίες αυτών που θα ζητηθούν από τους χρήστες, με συγκεκριμένες απαιτήσεις για τηλεπικοινωνιακούς πόρους. Με τον τρόπο αυτό, θα εξασφαλίζεται ο αναγκαίος αριθμός πόρων, προκειμένου οι υπηρεσίες αυτές να παρέχονται στο κοινό με την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας QoS (Quality of Service).

Επομένως, κατά τη διαστασιολόγηση του δικτύου για την εξασφάλιση του απαιτούμενου αριθμού τηλεπικοινωνιακών πόρων, ο σχεδιαστής του ad hoc δικτύου πρέπει να λαμβάνει υπόψη αν για το συγκεκριμένο γεγονός/εκδήλωση που πραγματοποιείται, υπάρχουν διαθέσιμες καθολικές υπηρεσίες που θα παρασχεθούν από το διοργανωτή. Στην περίπτωση όπου τέτοιες υπηρεσίες είναι διαθέσιμες, αφού υπολογιστεί ο αριθμός των πόρων Γ που αυτές απαιτούν, κάθε κόμβος AP του δικτύου εφοδιάζεται με Γ πόρους επιπλέον αυτών που προκύπτουν από την αρχική κατανομή, με βάση τον αλγόριθμο του Κεφ. 2. Οι πόροι αυτοί είναι ισάριθμοι για όλους τους κόμβους AP, ανεξαρτήτως του αριθμού των χρηστών που θα εξυπηρετήσει κάθε κόμβος, καθώς, όπως προαναφέρθηκε, πρόκειται για ευρυεκπομπή.

## 5.2 Αρχιτεκτονική παραδοσιακού δικτύου

Στα προηγούμενα κεφάλαια, περιγράφηκε η δομή ενός ad hoc δικτύου πρόσβασης, προς εξυπηρέτηση μεγάλου πλήθους χρηστών που αναμένονται σε συγκεκριμένο χώρο, λόγω της διεξαγωγής κάποιου σημαντικού γεγονότος/εκδήλωσης. Το δίκτυο πρόσβασης αποτελεί τμήμα του συνολικού δικτύου κινητών επικοινωνιών, το οποίο παραδοσιακά έχει την απλοποιημένη δομή του Σχ. 5.2.



Σχήμα 5.2 Αρχιτεκτονική παραδοσιακού δικτύου κινητής τηλεφωνίας

Διευκρινίζεται ότι η ονοματολογία BTS (Base Transceiver Station) και BSC (Base Station Controller), που έχει χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο σχήμα για να προσδιοριστούν κάποια συστατικά μέρη του δικτύου πρόσβασης, προέρχεται από συγκεκριμένες τεχνολογίες των κυψελωτών συστημάτων τηλεπικοινωνιών, 2G και 3G. Η τεχνολογία αυτή δεν ταυτίζεται με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται από το δίκτυο που δημιουργείται για την εξυπηρέτηση των πολυπληθών γεγονότων/εκδηλώσεων που μελετάται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, καθώς αυτοί οι όροι έχουν χρησιμοποιηθεί καθαρά συμβολικά και για λόγους κατανόησης της δομής του δικτύου πρόσβασης.

Στην περίπτωση του ad hoc δικτύου που περιγράφεται στις προηγούμενες ενότητες, το ρόλο των BTS και BSC τον παίζουν οι κόμβοι APs μαζί με τον κόμβο SBS που δημιουργούν το δίκτυο πρόσβασης RAN (Radio Access Network) για την πρόσβαση στο δίκτυο κορμού CN (Core Network) του παρόχου NSP (Network Service Provider). Στο δίκτυο κορμού, η κίνηση δρομολογείται κατάλληλα. Συγκεκριμένα, αν αφορά την τηλεφωνία στο τηλεφωνικό δίκτυο, αν αφορά δεδομένα στο Διαδίκτυο (Internet) για να καταλήξει στους κατάλληλους διακομιστές (servers). Επαναλαμβάνεται ότι η περιγραφή αυτή αποτελεί απλοποίηση της πραγματικής περιπλοκότερης δομής δικτύου, με παράθεση μόνο των βασικών συστατικών μερών ενός δικτύου κινητών τηλεπικοινωνιών.

Γίνεται εύκολα κατανοητό, ότι ο ρόλος του SBS στον προτεινόμενο αλγόριθμο περιορίζεται στη διαχείριση της πρόσβασης στο δίκτυο τηλεπικοινωνιών, ελέγχοντας τους κόμβους AP και συγκεντρώνοντας την κίνηση, τα οποία ακολούθως δρομολογεί στο δίκτυο κορμού. Με διαφορετική διατύπωση, αποτελεί ένα σημείο συγκέντρωσης της κίνησης AggP (Aggregation Point) από την περιοχή κάλυψης του ad hoc δικτύου.

Για οποιαδήποτε υπηρεσία ζητηθεί από κάποιο χρήστη, ο SBS θα δρομολογήσει το αίτημά του στο δίκτυο κορμού για να καταλήξει στον αρμόδιο εξυπηρετητή. Στη συνέχεια, και πάλι ο SBS θα πραγματοποιήσει την αντίστροφη δρομολόγηση, ώστε οι ζητηθείσες υπηρεσίες να παραδοθούν στο χρήστη. Επομένως, ανεξαρτήτως της ταχύτητας με την οποία εξυπηρετεί το δίκτυο πρόσβασης κάθε χρήστη, η τελική ταχύτητα και η ποιότητα υπηρεσίας που λαμβάνει ο χρήστης εξαρτώνται δραστικά από την αποδοτικότητα του δικτύου κορμού και των εξυπηρετητών. Αν και λόγω της αποτελεσματικής σχεδίασης και λειτουργίας του δικτύου πρόσβασης, μπορεί η πρόσβαση να γίνει με την ελάχιστη δυνατή καθυστέρηση (latency), η ύπαρξη και των υπόλοιπων τμημάτων του δικτύου θέτει περιορισμούς στην καθυστέρηση και την ταχύτητα μετάδοσης που αντιστοιχεί σε κάθε τελικό χρήστη.

### **5.3 MEC Αρχιτεκτονική**

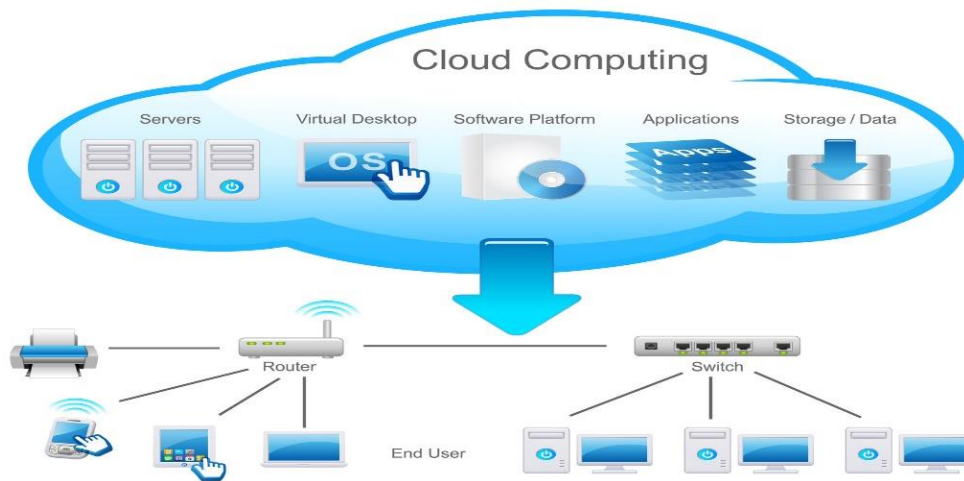
Στο συγκεκριμένο εδάφιο, παρουσιάζεται μια νέα τεχνολογία δικτύου, που διαφοροποιείται από τη δόμηση των παραδοσιακών τηλεπικοινωνιακών δικτύων και μπορεί να φανεί χρήσιμη στο σχεδιαστή του δικτύου που ακολουθεί τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Η τεχνολογία αυτή, που ονομάζεται MEC (Mobile Edge Computing ή εναλλακτικά Multi-access Edge Computing), έχει σε γενικές γραμμές στόχο να φέρει τους εξυπηρετητές του δικτύου που συνήθως εντοπίζονται

στα κέντρα του παρόχου (data center), όσο το δυνατό πλησιέστερα στον τελικό χρήστη. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να μειωθεί η καθυστέρηση στην παροχή των επιθυμητών υπηρεσιών, που οφείλεται στη μεγάλη διαδρομή που ακολουθεί η πληροφορία από τους τελικούς χρήστες έως τους αρμόδιους εξυπηρετητές και αντιστρόφως. Παράλληλα, η αναδυόμενη αυτή τεχνολογία ανοίγει το δρόμο για νέες υπηρεσίες και δυνατότητες, καθώς εξαλείφει πολλά εμπόδια που τίθενται από την κλασική αρχιτεκτονική των δικτύων που χρησιμοποιείται έως σήμερα.

### 5.3.1 Παρουσίαση χαρακτηριστικών Cloud Computing και MEC

Η τεχνολογία MEC αφορά ένα περιβάλλον υπηρεσιών λογισμικού-πληροφορικής (IT service), που αναπτύσσεται για να ενισχύσει το ρόλο και τις δυνατότητες του cloud computing (CC). Για διευκρινιστικούς λόγους, ακολουθεί σύντομη παρουσίαση της τεχνολογίας CC.

Πρακτικά, ο όρος cloud computing αναφέρεται στη δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων και προγραμμάτων σε κάποια απομακρυσμένη τοποθεσία, όπως είναι το Διαδίκτυο (Internet), αντί σε κάποιο τοπικό μέσο αποθήκευσης, όπως γίνεται έως σήμερα. Πρόκειται για εικονική επέκταση των δυνατοτήτων και των πόρων ενός υπολογιστή χωρίς την απόκτηση νέου υλικού (hardware), με μοναδική προϋπόθεση την πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Στο Σχ. 5.3 φαίνονται κάποιες δυνατότητες που δίνει η τεχνολογία cloud computing.



**Σχήμα 5.3** Παράδειγμα αρχιτεκτονικής Cloud Computing

Όπως υποδεικνύει και το Σχ. 5.4, τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η τεχνολογία cloud computing είναι ποικίλα, με σημαντικότερα από αυτά τον πρακτικά απεριόριστο αποθηκευτικό χώρο, που εύκολα αναβαθμίζεται (storage easily upgraded) και τη δυνατότητα πρόσβασης του χρήστη σε αυτόν από διαφορετικά σημεία (productivity anywhere).



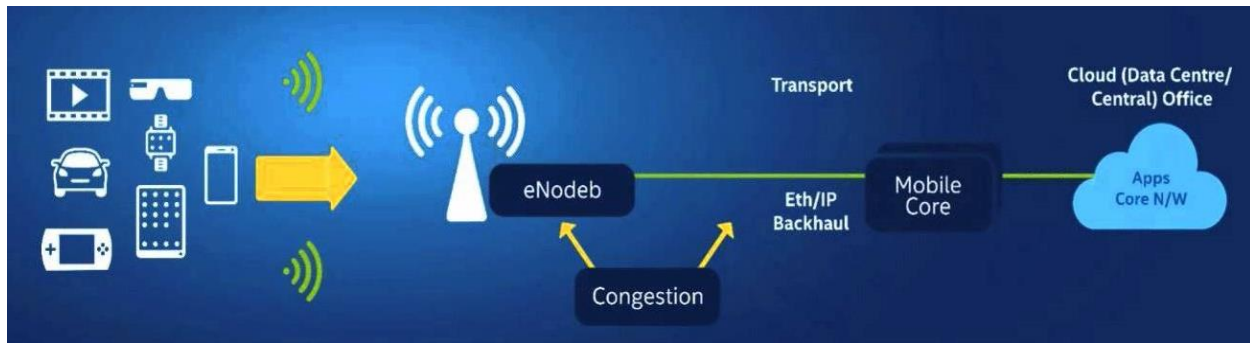


**Σχήμα 5.4** Πλεονεκτήματα της χρήσης υπηρεσιών CC

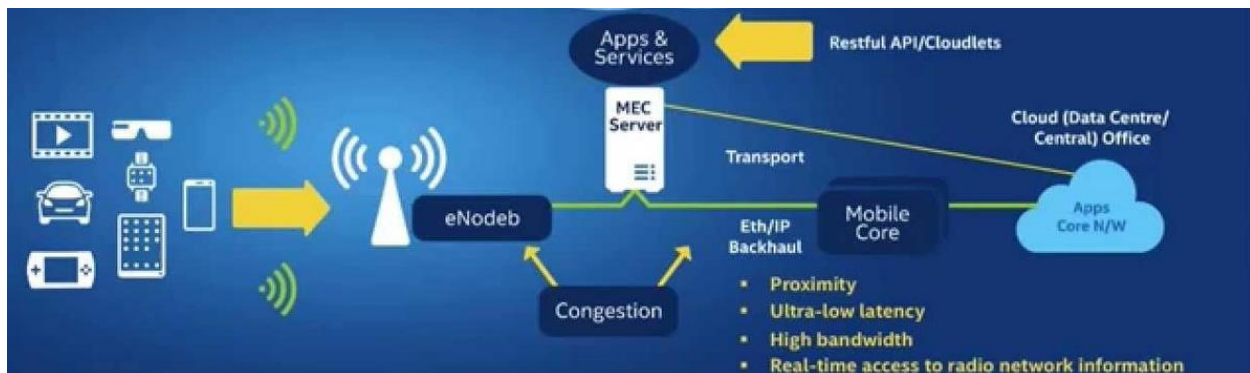
Καίτοι οι δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα από τη χρήση του CC είναι πολυάριθμα, υπάρχουν επίσης αρκετά μειονεκτήματα που τη συνοδεύουν. Ένα βασικό μειονέκτημα είναι το ότι εισάγεται αρκετή καθυστέρηση (latency) στη μετάδοση δεδομένων από το cloud, λόγω της μεσολάβησης όλου του δικτύου κορμού για την εξυπηρέτηση ενός χρήστη, καθώς το CC βρίσκεται στη πλευρά του Διαδικτύου. Επιπλέον, η συνεχής ροή πληροφορίας από τους πολυάριθμους χρήστες που εκμεταλλεύονται το CC, δημιουργεί συνωστισμό (congestion) στο δίκτυο, μειώνοντας ως εκ τούτου την ταχύτητα εξυπηρέτησης.

Για τους προαναφερθέντες και αρκετούς ακόμη λόγους, συμπληρωματικά του CC αναπτύχθηκε η νέα τεχνολογία MEC, με την οποία επιδιώκεται η άρση των περιορισμών που υφίστανται στο CC. Με τη τεχνολογία MEC οι διαθέσιμες υπηρεσίες και οι πόροι που προσφέρει το CC έρχονται εγγύτερα στον τελικό χρήστη. Συγκεκριμένα, όπως υποδηλώνει και ο όρος MEC, οι δυνατότητες του CC ενσωματώνονται πλέον στο ακραίο σημείο του δικτύου που είναι κοντά στο χρήστη (mobile edge), δηλαδή στους σταθμούς βάσεις BS (ή εναλλακτικά eNodeb στα δίκτυα LTE) του δικτύου πρόσβασης RAN. Στα Σχ. 5.5 και 5.6 φαίνεται η αλλαγή στη δομή του δικτύου που επιφέρει η υιοθέτηση της τεχνολογίας MEC, με τους εξυπηρετητές να παρεμβάλλονται μεταξύ του δικτύου πρόσβασης (eNodeb) και του δικτύου κορμού (mobile core).

Επομένως, οι εξυπηρετητές MEC (MEC servers) παρέχουν τους υπολογιστικούς πόρους, τις υπηρεσίες δικτύου και τη χωρητικότητα αποθήκευσης που παρέχει η τεχνολογία CC, με τη διαφορά ότι εντοπίζονται εγγύτερα στο χρήστη σε σχέση με το άλλο άκρο του δικτύου όπου είναι εγκατεστημένοι οι CC εξυπηρετητές.



**Σχήμα 5.5** Δομή δικτύου για CC χωρίς τη χρήση MEC



**Σχήμα 5.6** Δομή δικτύου για CC με τη χρήση MEC

Στο σημείο αυτό, αξίζει να γίνει αναφορά σε μια ακόμη τεχνολογία που ομοιάζει σε πολλά σημεία με τη MEC και ονομάζεται fog computing (FC). Μάλιστα, για πολλούς ερευνητές οι δύο τεχνολογίες αποτελούν διαφορετικές όψεις του ίδιου νομίσματος, καθώς η τεχνολογία FC έχει επίσης στόχο να μεταφέρει τις δυνατότητες του CC στο άκρο ενός τοπικού δικτύου, δηλαδή να μειώσει την απόσταση του τελικού χρήστη από τον εξυπηρετητή. Καίτοι ο προφανής αντικειμενικός στόχος, τόσο της FC όσο και της MEC, είναι η συνεπακόλουθη μείωση της καθυστέρησης που εισάγεται από το δίκτυο κορμού, υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στις δύο τεχνολογίες. Μία από αυτές αφορά το σημείο, όπου εγκαθίσταται η ευφυία καθενός από τα δύο αυτά υπολογιστικά περιβάλλοντα. Συγκεκριμένα, η FC αποτελεί, κατά κύριο λόγο, μέρος ενός τοπικού δικτύου και εγκαθίσταται στον κόμβο επικοινωνίας του τοπικού δικτύου με το δίκτυο κορμού. Από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία MEC εγκαθίσταται το δίκτυο πρόσβασης, στο οποίο προσδίδονται τα χαρακτηριστικά του CC.

### 5.3.2 Πλεονεκτήματα χρήσης τεχνολογίας MEC

Τα οφέλη από τη χρήση της νέας τεχνολογίας MEC από τους παρόχους δικτύου, συνδυαστικά με την τεχνολογία CC, είναι ευρέως αναγνωρισμένα. Ακολουθώς, επιχειρείται η ανάλυση μερικών από αυτά.

1. Μικρή καθυστέρηση στην εξυπηρέτηση (low latency): Η μείωση της απόστασης που απαιτείται να διανύσει η πληροφορία ακολουθώντας την παραδοσιακή αρχιτεκτονική και

οδεύοντας από το ένα άκρο του δικτύου (data center) στο άλλο (end user), επιφέρει δραστική μείωση της καθυστέρησης στην εξυπηρέτηση του χρήστη. Πλέον, η πληροφορία εντοπίζεται πολύ κοντά στο χρήστη και η εξυπηρέτηση του γίνεται με ελάχιστη καθυστέρηση, βελτιώνοντας έτσι την εμπειρία του χρήστη QoE (Quality of Experience). Το χαρακτηριστικό αυτό είναι χρήσιμο για την εξυπηρέτηση εφαρμογών που έχουν ελάχιστη ανοχή στην καθυστέρηση (latency sensitive) ή αφορούν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (real-time services).

2. Μείωση συμφόρησης στο δίκτυο (congestion): Η χρήση του CC παρέχει στους χρήστες τη δυνατότητα να μεταφέρουν αρχεία και προγράμματα τους στο Διαδίκτυο, κάτι που αναπόφευκτα οδηγεί σε προβλήματα συμφόρησης στο δίκτυο κορμού. Όπως φαίνεται και από τα Σχ. 5.5 και 5.6, η συσσώρευση μεγάλου όγκου δεδομένων στο δίκτυο που προορίζονται για τους cloud εξυπηρετητές μειώνεται δραστικά με την εισαγωγή των ενδιάμεσων MEC εξυπηρετητών. Αυτοί λειτουργούν όπως οι cloud εξυπηρετητές και έτσι τα δεδομένα κατανέμονται σε περισσότερα μέρη του δικτύου και μειώνεται σε σημαντικό βαθμό η συμφόρηση.
3. Αύξηση ταχύτητας και ποιότητας υπηρεσίας (high bandwidth): Η MEC τεχνολογία υπόσχεται υψηλές ταχύτητες εξυπηρέτησης, λόγω των ενισχυμένων δυνατοτήτων και των αυξημένων αποθεμάτων τηλεπικοινωνιακών πόρων των εξυπηρετητών που θα εγκαθίστανται στο δίκτυο πρόσβασης, δηλαδή σε πολύ μικρή απόσταση από το χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, οι υπηρεσίες μπορεί να είναι περισσότερο ποιοτικές QoS (Quality of Service), καθώς οι αυξημένες απαιτήσεις τους σε πόρους θα ικανοποιούνται.
4. Εξοικονόμηση ενέργειας (energy efficiency): Μια ακόμη δυνατότητα που παρέχει στους χρήστες η τεχνολογία MEC είναι η μεταφορά των απαιτητικών υπολογιστικά εργασιών των τερματικών συσκευών τους στους MEC εξυπηρετητές, όπου οι υπολογιστικοί πόροι είναι πολλαπλάσιοι. Έτσι οι ενεργοβόρες - λόγω υπολογιστικών απαιτήσεων - εργασίες μπορούν να ανατεθούν στους MEC εξυπηρετητές και ο χρήστης να εξοικονομήσει ενέργεια στη συσκευή του.
5. Επίγνωση των θέσεων των χρηστών (location awareness): Οι θέσεις των τερματικών των χρηστών μπορούν να καθοριστούν από τους MEC εξυπηρετητές στο δίκτυο πρόσβασης. Η λειτουργία αυτή μπορεί να φανεί χρήσιμη για συναφείς εφαρμογές και υπηρεσίες μέσω του δικτύου.
6. Πρόσβαση χωρίς σύνδεση στο Διαδίκτυο: Η θέση των MEC εξυπηρετητών στο άκρο του δικτύου επιτρέπει την απομόνωσή τους από το υπόλοιπο δίκτυο. Έτσι, η πρόσβαση των χρηστών στους πόρους τους μπορεί να επιτευχθεί χωρίς να απαιτείται σύνδεση με το Διαδίκτυο παρά μόνο με τα σημεία του δικτύου πρόσβασης RAN όπου εντοπίζονται οι διακομιστές (servers) της τεχνολογίας MEC.

Όλα τα ανωτέρω πλεονεκτήματα, μαζί με άλλα που δεν έχουν αναφερθεί, καθιστούν την τεχνολογία MEC ιδανική για πολλές εφαρμογές και συνθέτουν ένα πρόσφορο περιβάλλον για την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών με ενισχυμένες δυνατότητες.

### **5.3.3 Πεδία εφαρμογής της τεχνολογίας MEC**

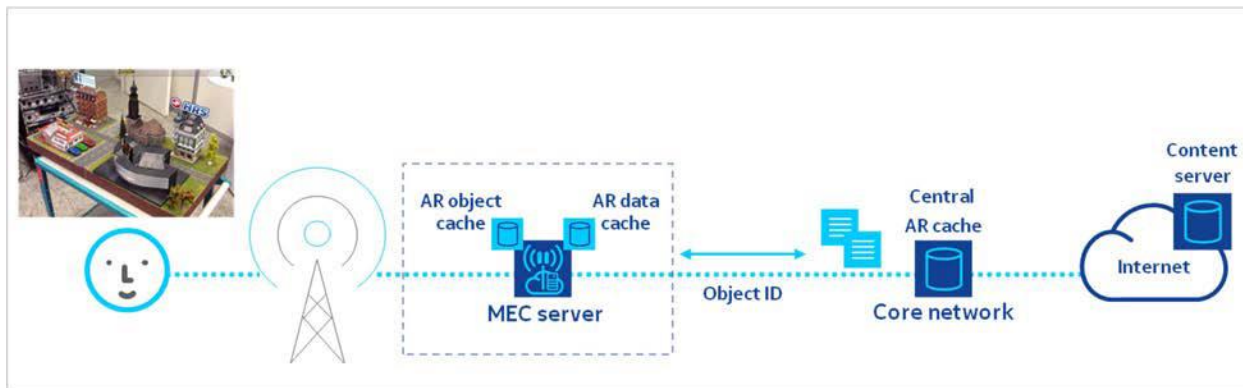
Καίτοι η ανάπτυξη της MEC τεχνολογίας είναι αρκετά πρόσφατη, η υιοθέτησή της σε αρκετούς τομείς από τους παρόχους τηλεπικοινωνιών βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο. Επιπλέον, έχουν διερευνηθεί και άλλα πιθανά σενάρια εκμετάλλευσής της. Ακολούθως, παρουσιάζονται υπάρχουσες και ορισμένες αναδυόμενες υπηρεσίες για τις οποίες η MEC τεχνολογία θα αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο ή κίνητρο.

#### **5.3.3.1 Augmented Reality (AR)**

Από τα πλέον αναγνωρισμένα πεδία εκμετάλλευσης της πολλά υποσχόμενης τεχνολογίας MEC είναι οι εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (Augmented Reality-AR). Με τις AR εφαρμογές, ο χρήστης μπορεί μέσα από μια κάμερα να βλέπει υπαρκτά και εικονικά αντικείμενα, τα οποία συνυπάρχουν στο πραγματικό φυσικό περιβάλλον του. Εκτός από τα εικονικά αντικείμενα, μπορεί να εμφανίζονται πληροφορίες για τα υπαρκτά αντικείμενα ή να αλλάζει η διαμόρφωση του χώρου. Οι εφαρμογές αυτές βρίσκουν ήδη χρήση σε διάφορους τομείς, όπως η επίσκεψη πολιτιστικών χώρων (μουσεία, γκαλερί, αρχαιολογικοί χώροι), η παρακολούθηση ψυχαγωγικών και αθλητικών εκδηλώσεων και άλλοι. Με την εκμετάλλευσή τους ο χρήστης-επισκέπτης-θεατής μπορεί να βιώσει μια βελτιωμένη εμπειρία, καθώς εμπλουτίζεται η επίσκεψη ενός χώρου ή η παρακολούθηση ενός γεγονότος/εκδήλωσης με συναφές οπτικοακουστικό υλικό και χρήσιμες πληροφορίες για όσα βλέπει στο πραγματικό περιβάλλον.

Όπως είναι λογικό, αυτές οι πληροφορίες θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο να είναι αποθηκευμένες σε μικρή απόσταση από τους τελικούς χρήστες. Σε αυτό συμβάλλει η τεχνολογία MEC, σύμφωνα με την οποία οι εξυπηρετητές των σταθμών βάσης φιλοξενούν την απαιτούμενη πληροφορία και αναλαμβάνουν την επεξεργασία των μηνυμάτων που ανταλλάσσει η συσκευή του χρήστη με το δίκτυο. Συγκεκριμένα, για την υλοποίηση των εφαρμογών AR απαιτείται ο προσδιορισμός της θέσης του χρήστη και του οπτικού πεδίου της κάμεράς του, ώστε λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα δεδομένα η εφαρμογή να του παρέχει τις σχετικές πληροφορίες. Τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά αυτής της εφαρμογής είναι η εξυπηρέτηση σε πραγματικό χρόνο, η άμεση ανταπόκριση και η προσαρμοστικότητα σε ενδεχόμενης κίνηση του χρήστη. Σε τηλεπικοινωνιακούς όρους, αυτά μεταφράζονται σε ελάχιστη καθυστέρηση (low latency), μεγάλο εύρος ζώνης (high bandwidth) και σε αυξημένη υπολογιστική ικανότητα (data processing), χαρακτηριστικά που προσφέρονται από την τεχνολογία MEC. Όπως φαίνεται στο Σχ. 5.7, η συμβολή των MEC εξυπηρετητών αφορά τόσο την αποθήκευση των δεδομένων, που θα κατεβάσει ο χρήστης όταν χρησιμοποιήσει την εφαρμογή (AR Object Cache), όσο και στην επεξεργασία των πληροφοριών χρήστη σχετικά με τη θέση και την κίνησή του στο χώρο (AR Data Cache).

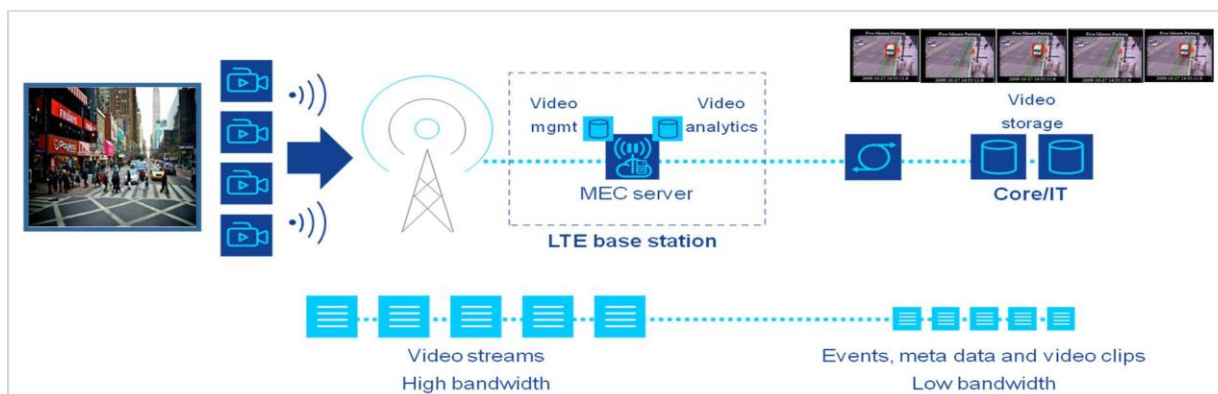
Επομένως, με χρήση της τεχνολογίας MEC εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ταχύτητα στην εξυπηρέτηση των αιτημάτων των χρηστών, καθώς οι απαραίτητοι υπολογιστικοί πόροι και τα δεδομένα της AR εφαρμογής βρίσκονται κοντά στο χρήστη και όχι σε κάποιο απομακρυσμένο εξυπηρετητή. Έτσι, έχουμε βελτιωμένη εμπειρία χρήστη, ενώ το δίκτυο κορμού προστατεύεται από ενδεχόμενη συμφόρηση, που θα επέφερε η κίνηση από τις εφαρμογές αυτές προς το cloud.



**Σχήμα 5.7** MEC τεχνολογία σε Augmented Reality (AR)

### 5.3.3.2 Video Analytics

Οι κάμερες επιτήρησης που χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις για τον έλεγχο και την ασφάλεια ενός χώρου, παραδοσιακά λειτουργούν με δύο τρόπους. Είτε οι ίδιες οι κάμερες επεξεργάζονται τα δεδομένα που προκύπτουν από την επιτήρηση του χώρου είτε συλλέγουν όλα αυτά τα δεδομένα και τα αποστέλλουν προς επεξεργασία σε εξυπηρετητή που βρίσκεται στο άλλο άκρο του δικτύου. Με τον πρώτο τρόπο λειτουργίας απαιτούνται τεχνολογικά εξελιγμένες συσκευές των οποίων το κόστος είναι ιδιαίτερα υψηλό, ενώ ο δεύτερος τρόπος, εκτός από καθυστέρηση, προκαλεί μεγάλη κυκλοφοριακή επιβάρυνση στο δίκτυο κορμού λόγω του όγκου των δεδομένων που απαιτείται να μεταφερθεί στους εξυπηρετητές. Αυτά τα μειονεκτήματα πολλαπλασιάζονται όταν ληφθεί υπόψη η αύξηση του αριθμού των καμερών που αναμένεται να είναι ραγδαία στα επόμενα χρόνια με την ανάπτυξη των συστημάτων παρακολούθησης. Διαφαινόμενη μέση λύση στο προκύπτον πρόβλημα είναι η υιοθέτηση της τεχνολογίας MEC με στόχο την προσωρινή αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων που παράγουν με μεγάλο ρυθμό οι κάμερες. Στη συνέχεια, οι χρήσιμες πληροφορίες που προκύπτουν από την επεξεργασία των δεδομένων αποστέλλονται με χαμηλό ρυθμό στον κεντρικό εξυπηρετητή στο δίκτυο κορμού, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.8, εξαλείφοντας με τον τρόπο αυτό τα προβλήματα των παλιών μεθόδων.



**Σχήμα 5.8** Ανάλυση δεδομένων καμερών (video stream analysis) με τη MEC τεχνολογία

### 5.3.3.3 Mobile Big Data Analytics

Η εξάπλωση των κινητών συσκευών είναι δεδομένη στην εποχή μας με παράλληλη αύξηση της πληθώρας πληροφοριών που προέρχονται από τα ενσωματωμένα σε αυτές αισθητήρια όργανα (GPS, accelerometer), εργαλεία (microphone, camera), δραστηριότητα των χρηστών (apps, web browsing, voice calls) και διάφορες άλλες δραστηριότητες. Οι πληροφορίες αυτές αναφέρονται πλέον με τον όρο Big Data, εννοώντας μεγάλο όγκο δεδομένων, που είναι είτε δομημένα (structured) είτε αδόμητα (non-structured) και, αν και είναι δύσκολα στην επεξεργασία, μπορούν να οδηγήσουν σε χρήσιμα συμπεράσματα. Ειδικότερα για τις επιχειρήσεις, η επεξεργασία των δεδομένων αυτών έχει εξέχουσα σημασία, γιατί από αυτήν προκύπτει η ανάλυση της καταναλωτικής και όχι μόνο συμπεριφοράς των χρηστών προσφέροντας τη δυνατότητα λήψης επιχειρηματικών αποφάσεων.

Όμως, όπως προαναφέρθηκε, ο όγκος των δεδομένων αυτών ανά χρήστη είναι μεγάλος και πολλαπλασιάζεται αν ληφθεί υπόψη ο μεγάλος συνολικός αριθμός χρηστών. Έτσι, η μεταφορά των Big Data προς επεξεργασία στους εξυπηρετητές του δικτύου προκαλεί προβλήματα συμφόρησης σε αυτό. Αυτό μπορεί να αποτραπεί με τη χρησιμοποίηση των εξυπηρετητών MEC, οι οποίοι εγκαθίσταται κοντά στους χρήστες και διαθέτουν μεγάλη χωρητικότητα και υπολογιστική ικανότητα. Στους κοντινούς αυτούς εξυπηρετητές μπορεί να γίνει η επεξεργασία των Big Data και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να μεταφερθούν μέσω του δικτύου κορμού για περαιτέρω ανάλυση και χρήση. Τα οφέλη αυτής της διαδικασίας για βελτιωμένη απόδοση του δικτύου είναι φανερά. Μάλιστα, η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί για την ανάλυση δεδομένων που προέρχονται από το αναπτυσσόμενο δίκτυο πραγμάτων (IoT).

### 5.3.3.4 Connected Vehicles

Ακόμη ένα αναπτυσσόμενο πεδίο των τηλεπικοινωνιών στο οποίο η MEC τεχνολογία μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη, είναι τα συνδεδεμένα οχήματα (connected vehicles), δηλαδή οχήματα που συνδέονται στο Διαδίκτυο, ώστε να επικοινωνούν με άλλα οχήματα. Η διασύνδεση αυτή γίνεται με στόχο την ενίσχυση της οδικής ασφάλειας, τη βελτίωση της κυκλοφορίας των οχημάτων, την ανάλυση της οδικής συμπεριφοράς και ό,τι άλλο συναφές. Οι ειδικοί

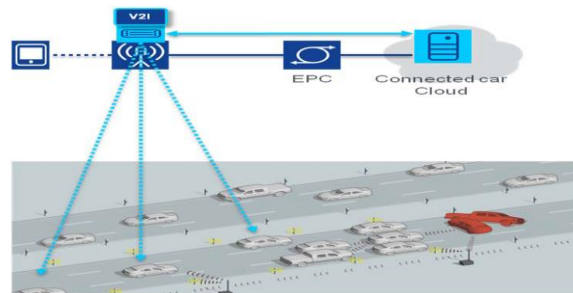
διασυνδεδεμένοι με το δίκτυο αισθητήρες που βρίσκονται τοποθετημένοι στους δρόμους, σε συνδυασμό με τα διασυνδεδεμένα οχήματα, συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο οδικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο ικανό να επιτηρεί την κυκλοφορία στους δρόμους μέσω της ανταλλαγής δεδομένων.

Υπάρχουν πολλές εφαρμογές που σχεδιάζονται ώστε να λειτουργήσουν με βάση αυτό το σχηματιζόμενο δίκτυο. Κάθε μία από αυτές έχει διαφορετικές απαιτήσεις στα χαρακτηριστικά της συνδεσιμότητας, όπως: διαφορετική καθυστέρηση (latency), μεταβλητό εύρος ζώνης (bandwidth), διαφοροποίηση στην υπολογιστική πολυπλοκότητα (computation complexity). Καίτοι η σύνδεση των οχημάτων και των αισθητήρων με το κεντρικό εξυπηρετητή στο cloud μπορεί να εξασφαλίζει την απαραίτητη χωρητικότητα και υπολογιστική δυνατότητα για τα δεδομένα που παράγονται, δεν συμβαίνει το ίδιο με τη συχνά απαιτούμενη μικρή καθυστέρηση και την απαραίτητη υψηλή ταχύτητα μετάδοσης. Αντιθέτως, η τεχνολογία MEC με τους εξυπηρετητές στους σταθμούς βάσης μπορεί να προσφέρει λύση στις διαφορετικές ανάγκες των υπηρεσιών που βασίζονται στα διασυνδεδεμένα οχήματα, προσφέροντάς τους έτσι την αξιοπιστία και την ποιότητα που απαιτείται.

Οι MEC εξυπηρετητές μαζί με τους cloud εξυπηρετητές λειτουργούν συμπληρωματικά για το οδικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 5.9, με τους πρώτους να είναι υπεύθυνοι για τη λειτουργικότητα των οδικών τμημάτων σε πρώτο χρόνο. Συγκεκριμένα, η ευθύνη ενός MEC εξυπηρετητή περιλαμβάνει μεταξύ άλλων και ενέργειες προκειμένου να:

- αποφευχθούν ατυχήματα μέσω της έγκαιρης ειδοποίησης των οχημάτων
- πληροφορηθούν τα διερχόμενα οχήματα για ατυχήματα που έχουν συμβεί σε άλλα σημεία του δρόμου
- ρυθμιστεί η κυκλοφορία για να αποφευχθεί η συμφόρηση (traffic congestion)
- ρυθμιστεί το πρόβλημα στάθμευσης, μέσω της ενημέρωσης των οδηγών περί της διαθεσιμότητας θέσεων

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες και τα οχήματα και δεν χρησιμοποιούνται από υπηρεσίες ευαίσθητες σε καθυστέρηση, δηλαδή δεν τα επεξεργάζονται οι MEC εξυπηρετητές, μεταφέρονται κεντρικά, στο cloud, όπου άλλες υπηρεσίες τα επεξεργάζονται. Επομένως, τα συνδεδεμένα οχήματα μαζί με τους MEC και cloud εξυπηρετητές συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα ικανό να φιλοξενήσει οποιαδήποτε σχετική υπηρεσία και εφαρμογή.



**Σχήμα 5.9** Διασυνδεδεμένα οχήματα με την τεχνολογία MEC

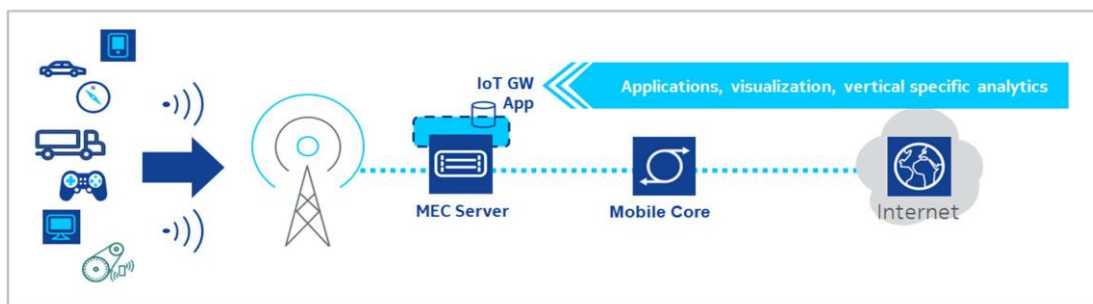
### 5.3.3.5 Content Delivery and Caching

Ακόμη ένα πεδίο όπου η τεχνολογία MEC βρίσκει εφαρμογή είναι στη βελτιστοποίηση της απόδοσης των ιστοσελίδων (web sites) κατά την πλοήγηση ενός χρήστη σε αυτές μέσω του Διαδικτύου. Οι MEC εξυπηρετητές αποθηκεύουν στη μνήμη τους το περιεχόμενο των σελίδων html (caching html content) και το αναπαράγουν για οποιοδήποτε χρήστη το ζητήσει εκ νέου με ένα αίτημα html (html request). Αυτό καθίσταται εφικτό, εφόσον τα αιτήματα των χρηστών δρομολογούνται μέσω του δικτύου πρόσβασης και συγκεκριμένα, μέσω των MEC εξυπηρετητών που εγκαθίστανται σε αυτό. Με αυτή τη λειτουργία των MEC εξυπηρετητών, η καθυστέρηση στην εξυπηρέτηση των αιτημάτων των χρηστών είναι πολύ μικρότερη (low latency) συγκριτικά με την παραδοσιακή λειτουργία του δικτύου ενώ το δίκτυο κορμού απαλλάσσεται από σημαντικό όγκο δεδομένων και αποφεύγεται ο συνωστισμός (congestion).

Επιπλέον, η ικανότητα των MEC εξυπηρετητών να γνωρίζουν σε πραγματικό χρόνο την κίνηση του δικτύου πρόσβασης, τους παρέχει τη δυνατότητα να παρεμβαίνουν στις περιόδους αιχμής για να βελτιώνουν την απόδοσή του. Αναλυτικότερα, υπό συνθήκες μεγάλης ροής φορτίου στο δίκτυο πρόσβασης λόγω παρακολούθησης βίντεο από κάποιους χρήστες, ο MEC εξυπηρετητής μπορεί να επιλέξει να μειώσει την ποιότητα των γραφικών, προκειμένου να εξυπηρετηθούν όλοι οι χρήστες και να υπάρξει ένα ανεκτό επίπεδο στην ποιότητα υπηρεσίας όλων.

### 5.3.3.6 IoT gateway

Η ανάπτυξη του νέου ανερχόμενου δικτύου των πραγμάτων (Internet of Things-IoT) δημιουργεί την ανάγκη συγκέντρωσης (aggregation) και διαχείρισης των πολυάριθμων παραγόμενων -από τα διασυνδεδεμένα αντικείμενα- μηνυμάτων σε ειδικές πύλες (IoT gateways-GW). Οι απαιτήσεις αυτών των πυλών είναι αυξημένες, καθώς τα μηνύματα αυτά είναι διατυπωμένα (και κρυπτογραφημένα) σε διάφορα πρωτόκολλα, αντιστοίχως της σύνδεσης από την οποία προήλθαν ( 3G, LTE, WiFi, etc). Συνεπώς, μια πύλη διασύνδεσης χρειάζεται πληθώρα υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων, τους οποίους μπορεί να παρέχει ο MEC εξυπηρετητής του δικτύου πρόσβασης, όπως δείχνει το Σχ.5.10. Έτσι, οι πύλες IoT που διαθέτουν MEC εξυπηρετητές πραγματοποιούν τους αναγκαίους υπολογισμούς με μεγάλη ταχύτητα και επικοινωνούν με τα συνδεδεμένα αντικείμενα με πολύ μικρή καθυστέρηση, λόγω της μικρής απόστασης που τα χωρίζει.



**Σχήμα 5.10** Η MEC τεχνολογία σε πύλη διασύνδεσης IoT



### 5.3.3.7 Άλλες εφαρμογές της τεχνολογίας MEC

Όπως είναι ήδη φανερό, οι εφαρμογές της νέας τεχνολογίας MEC αλλάζουν το σκηνικό του παραδοσιακού τηλεπικοινωνιακού δικτύου, είναι πολυάριθμες και ποικίλες. Υπάρχουν πολύ περισσότερες από τις προαναφερθείσες εφαρμογές, που δεν γίνεται να αναλυθούν στο στενό πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, καθώς κάτι τέτοιο εκφεύγει του σκοπού της. Εντούτοις, αξίζει σύντομη αναφορά σε ορισμένες ακόμη σημαντικές υπηρεσίες που αναμένεται να αξιοποιήσουν τις δυνατότητες της εξελισσόμενης MEC τεχνολογίας, όπως οι παρακάτω.

- Έξυπνο δίκτυο (Smart Grid): Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να εμπλουτιστούν με έξυπνες συσκευές, μετρητές και αισθητήρες που θα βελτιώσουν την απόδοσή τους με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού. Οι MEC εξυπηρετητές αναμένεται να αποτελούν πολύτιμο εργαλείο για την υλοποίηση των έξυπνων ηλεκτρικών δικτύων
- Software-Defined Networks (SDN): Η νέα καινοτομία στη δικτύωση υπολογιστών είναι τα δίκτυα που διαχωρίζουν το επίπεδο ελέγχου (control layer) από το επίπεδο δεδομένων (data layer), πραγματοποιώντας τον έλεγχο του δικτύου σε κεντρικά εντοπισμένες μονάδες. Σε αυτή τη νέα προσέγγιση των δικτύων, η MEC τεχνολογία μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη ως βοηθητικό εργαλείο.
- Παρακολούθηση ωκεανών (Ocean Monitoring): Η παρακολούθηση των συνθηκών στους ωκεανούς και των μεταβολών σε αυτές είναι μια ανάγκη των επιστημόνων που αποσκοπεί τόσο στην προστασία από κατακλυσμικά επεισόδια όσο και στην πρόβλεψη των κλιματικών αλλαγών του πλανήτη. Ένα σύστημα από MEC εξυπηρετητές πληροί τις προϋποθέσεις για να αναπτυχθεί το κατάλληλο δίκτυο παρακολούθησης των ωκεανών
- Υγεία (Healthcare): Ο τομέας της υγείας είναι ένα πεδίο με ιδιαίτερες απαιτήσεις και περιορισμούς, που ταυτόχρονα απαιτεί προωθημένες τηλεπικοινωνιακές λύσεις προς βελτίωση των ιατρικών υπηρεσιών που παρέχονται. Αναμφισβήτητα, τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας MEC μπορούν να αποτελέσουν εφιαλτήριο για την ανάπτυξη της νέας εποχής στην υγεία.
- Εκπαίδευση (Education): Ακόμη και στην εκπαίδευση μπορεί η MEC τεχνολογία να χρησιμοποιηθεί με επωφέλη τρόπο, φέρνοντας τα πλεονεκτήματα του cloud πιο κοντά στους διδάσκοντες και τους διδασκόμενους. Με τον τρόπο αυτό, εμπλουτίζονται τα σημερινά εκπαιδευτικά μέσα και εισάγονται νέες διδακτικές μεθόδους.

### 5.3.4 Εφαρμογή MEC στα ad hoc δίκτυα

Η προηγηθείσα ανάλυση περί της τεχνολογίας MEC, τα πλεονεκτήματά της και τις εφαρμογές της αποδεικνύει την αξία της ως σημαντικής καινοτομίας στη δομή και λειτουργία των νέων τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας αυτής στο υπάρχον δίκτυο περιλαμβάνει την τοποθέτηση των εξυπηρετητών MEC στους σταθμούς βάσης και είναι μια διαδικασία που θα γίνει σταδιακά στις περιοχές όπου θα υπάρξουν οι ανάγκες υλοποίησής της.

Γίνεται αντιληπτό ότι δεν υπάρχει κάποιο προαπαιτούμενο για την εγκατάσταση και τη λειτουργία των MEC εξυπηρετητών στους σταθμούς βάσης του δικτύου πρόσβασης, οπότε μπορούν να κατασκευαστούν και να τεθούν σε λειτουργία οποιαδήποτε στιγμή από τον πάροχο του δικτύου (MNO-Mobile Network Operator).

Όπως παρουσιάστηκε και στην αρχή του τρέχοντος κεφαλαίου, σε ένα πολυπληθές γεγονός/εκδήλωση ο διοργανωτής έχει τη δυνατότητα να παρέχει τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες στο κοινό που βρίσκεται στο χώρο διεξαγωγής, μέσω του ad hoc δικτύου που έχει διαμορφώσει ο τηλεπικοινωνιακός πάροχος για λογαριασμό του. Αυτές οι υπηρεσίες είναι σχετικές με το γεγονός/εκδήλωση που λαμβάνει χώρα και βελτιώνουν την εμπειρία του θεατή. Για το λόγο αυτό, έχουν σημαντική αξία για το διοργανωτή, ο οποίος θέλει να προσφέρει τις υπηρεσίες αυτές με εξασφαλισμένη ποιότητα. Σε αυτές τις υπηρεσίες μπορεί να περιλαμβάνονται τα παρακάτω:

- εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (AR) με εικονικά αντικείμενα και πληροφορίες για τα εκθέματα σε ένα εκθεσιακό χώρο
- προβολή σε επανάληψη σημαντικών φάσεων ενός αθλητικού αγώνα με πρόσθετα αναλυτικά και στατιστικά στοιχεία
- διαδραστικά παιχνίδια που σχετίζονται με το περιεχόμενο της εκδήλωσης
- ενημερωτικά αρχεία, όπως είναι το πρόγραμμα της εκδήλωσης που λαμβάνει χώρα

Υπό τη σημερινή μορφή του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.2 και στο Σχ. 5.2, αυτές οι υπηρεσίες παρέχονται στους χρήστες ακολουθώντας την ίδια πορεία, όπως κάθε άλλη υπηρεσία. Συγκεκριμένα, για να λάβουν μια τέτοια υπηρεσία οι χρήστες συνδέονται μέσω του δικτύου πρόσβασης και του δικτύου κορμού με τον εξυπηρετητή της συγκεκριμένης υπηρεσίας, ο οποίος βρίσκεται σε κάποιο κέντρο δεδομένων (data center) του παρόχου. Σε αυτήν την περίπτωση, η ποιότητα της υπηρεσίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατάσταση και τα χαρακτηριστικά του δικτύου (χωρητικότητα, καθυστέρηση, υπολογιστική δυνατότητα) ενώ υπάρχουν πολλοί αστάθμητοι παράγοντες που μπορεί να την επηρεάσουν (βλάβες, διακοπές). Η χρήση, όμως, των MEC εξυπηρετητών για παροχή των καθολικών υπηρεσιών του διοργανωτή θα υπερέβαινε τους περιορισμούς της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής δικτύου και θα προσέφερε πολλές δυνατότητες στο διοργανωτή και τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο.

Σε ένα πολυπληθές γεγονός/εκδήλωση, όσον αφορά το δίκτυο πρόσβασης που έχει δομηθεί βάσει της προτεινόμενης συγκεντρωτικής δομής και του προτεινόμενου αλγορίθμου που έχει παρουσιαστεί στο Κεφ.2, ο MEC εξυπηρετητής μπορεί να εγκατασταθεί στον ισχυρό κόμβο SBS, που έχει το ρόλο της κεντρικής μονάδας διαχείρισης. Αρχικά, σε αυτόν τον εξυπηρετητή θα υπάρχουν όλες οι υπηρεσίες και οι εφαρμογές που επιλέγει ο διοργανωτής να διαθέσει στο κοινό και που αφορούν το γεγονός/εκδήλωση. Με τη λύση αυτή, οι υπηρεσίες που επιθυμεί ο διοργανωτής διαχωρίζονται από τις υπόλοιπες που ενδέχεται να ζητήσει ένας χρήστης, και μπορούν να παρασχεθούν με εγγυημένη ποιότητα στον τελικό χρήστη, δηλαδή με τον

απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης και καθυστέρηση (bandwidth and latency). Επιπλέον, ο MEC εξυπηρετητής μπορεί να φανεί χρήσιμος και σε άλλες υπηρεσίες και εφαρμογές, όπως κάποιες από αυτές που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.3.3. Για παράδειγμα, μπορεί να γίνει επιτήρηση του χώρου διεξαγωγής του γεγονότος/εκδήλωσης με τοποθέτηση καμερών σε διάφορα σημεία του χώρου, οι οποίες θα συνδέονται στον MEC εξυπηρετητή, αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο την εγκατάσταση καλωδίωσης για ένα κλειστό κύκλωμα επιτήρησης (CCTV).

Οι καθολικές υπηρεσίες παρέχονται στους χρήστες με διαφορετικούς τρόπους αντιστοίχως της λειτουργίας που επιτελούν. Έτσι, μια υπηρεσία μπορεί να είναι ευρυεκπομπής (broadcast) και να παρέχεται την ίδια στιγμή και με τους ίδιους πόρους για όλους τους χρήστες. Σε άλλη περίπτωση, μπορεί να ομαδοποιούνται οι χρήστες σε ομάδες παραληπτών με κριτήριο τη ζητούμενη υπηρεσία και σε καθεμία από τις ομάδες αυτές να παρέχεται η ζητούμενη υπηρεσία με τους ίδιους πόρους για όλους τους παραλήπτες (multicast). Πάντως, οι περισσότερες υπηρεσίες παρέχονται κατά κανόνα με απλή μετάδοση προς ένα χρήστη (unicast), όπου κάθε χρήστης χρειάζεται δικούς του αποκλειστικούς πόρους για να λάβει την επιθυμητή υπηρεσία. Τέλος, μπορεί να γίνει συνδυασμός των προαναφερθέντων τρόπων μετάδοσης της υπηρεσίας, όπως, για παράδειγμα να συνυπάρχει η ευρυεκπομπή με την απλή μετάδοση. Σε αυτήν την περίπτωση, παρέχεται μια κοινή υπηρεσία στο κοινό της εκδήλωσης, ενώ υπάρχει παράλληλα η δυνατότητα για εξατομίκευση της υπηρεσίας ή κάποιων άλλων υπηρεσιών βάσει των επιλογών του χρήστη. Αναλόγως, λοιπόν, με ποιον από τους προηγούμενους τρόπους παρέχονται οι καθολικές υπηρεσίες, καθορίζεται και η απαίτηση σε πόρους και συνυπολογίζεται κατά την αρχική διαστασιολόγηση του συστήματος.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

### 6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, αφού παρουσιάστηκε ο προτεινόμενος αλγόριθμος βέλτιστης κατανομής πόρων και εξυπηρέτησης χρηστών για απλοποιημένες περιπτώσεις πολυπληθών γεγονότων στο Κεφ.2, προστέθηκε περισσότερη πολυπλοκότητα στον αλγόριθμο στα Κεφ.3 και 4. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αξιοποιεί την αναμενόμενη χωροχρονική εμφάνιση των χρηστών που ακολουθεί την κατανομή Poisson, για να πραγματοποιήσει προσαρμοσμένη κατανομή των πόρων στους κόμβους AP. Η προσαρμοσμένη κατανομή εξασφαλίζει την απόδοση των πόρων στους κόμβους AP από όπου προβλέπεται να ζητηθούν, με στόχο την αποδοτική λειτουργία του δικτύου, δηλαδή την αυξημένη ταχύτητα στην εξυπηρέτηση των χρηστών και την αποφυγή σπατάλης πόρων. Τα διαγράμματα των μέτρων αξιολόγησης στα ενδεικτικά σενάρια που προσομοιώθηκαν αναδεικνύουν τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της προσαρμοστικής κατανομής έναντι της στατικής, ενώ αναδεικνύεται και η χρησιμότητα του διανύσματος ταξινόμησης πόρων με στόχο την ταχύτερη εξυπηρέτηση των χρηστών. Η οριοθέτηση της περιοχής κάλυψης, όπως επιχειρήθηκε στο Κεφ.3, έχει ιδιαίτερη σημασία για τη μείωση του κόστους δημιουργίας και λειτουργίας του δικτύου και την εξοικονόμηση πόρων. Επιπλέον, μπορεί να πραγματοποιηθεί ο ακριβέστερος δυνατός υπολογισμός των απαραίτητων πόρων για την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη ενός πολυπληθούς γεγονότος βάσει της προβλεπόμενης ζήτησης υπηρεσιών που παρουσιάστηκε στο Κεφ.4. Για τον πάροχο είναι σημαντικό να γνωρίζει πόσους πόρους, και κατ' επέκταση πόσο φάσμα, πρέπει να διαθέσει για την εξυπηρέτηση όλων των χρηστών, γιατί αυτό συμβάλλει καθοριστικά στην εξοικονόμηση πόρων και στη σωστή διαχείριση του φάσματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η χωροχρονική κατανομή των χρηστών σε ένα ad hoc γεγονός μπορεί να εκφραστεί είτε υπό αναλυτική μορφή, όπως είναι η χωροχρονική κατανομή Poisson που ενδεικτικά και ως μάλλον καταλληλότερη υιοθετήθηκε στην παρούσα εργασία, είτε υπό σημειακή χωροχρονική μορφή που μπορεί να προσδιοριστεί με προσαρμογή (fitting) πραγματικών δεδομένων από παρεμφερή ad hoc γεγονότα. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι γενικός και μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε μορφή κατανομής. Επιπλέον, η νέα τεχνολογία MEC μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο βελτίωσης της απόδοσης του δικτύου κατά την εξυπηρέτηση των χρηστών και παροχής υπηρεσιών που θα αναβαθμίσουν την εμπειρία χρήστη όταν παρακολουθεί πολυπληθείς εκδηλώσεις.

Συνοψίζοντας, κατά το σχεδιασμό ενός ad hoc τηλεπικοινωνιακού δικτύου για την κάλυψη πολυπληθών γεγονότων κάθε είδους, υπάρχουν πολλές παράμετροι που πρέπει να εξεταστούν και να συνυπολογιστούν. Οι σωστές προβλέψεις για την εμφάνιση των χρηστών και τις προτιμώμενες υπηρεσίες είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία στο σχεδιασμό του

δικτύου, καθώς ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρησιμοποιεί αυτά τα δεδομένα για τη διαστασιολόγηση και την κατανομή πόρων. Τέλος, η εκμετάλλευση των σύγχρονων τεχνολογιών, όπως είναι η τεχνολογία MEC, στα ad hoc δίκτυα αναμένεται να έχει ποικίλα οφέλη τόσο για τον πάροχο του δικτύου όσο και για τους χρήστες.

## **6.2 Προεκτάσεις της παρούσας εργασίας**

Στην παρούσα εργασία, όπου προτείνεται ο τρόπος που μπορεί να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός του δικτύου για την κάλυψη ενός πολυπληθούς γεγονότος, λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή των εμφανιζόμενων χρηστών στο χώρο, η χρονική κατανομή χρηστών θεωρήθηκε ομογενής και δεν επηρέασε την κατανομή των τηλεπικοινωνιακών πόρων. Σε μία πληρέστερη ανάλυση που είναι πλησιέστερη στην πράξη, η χρονική διάσταση πρέπει να έχει χαρακτηριστικά ανομοιογένειας και να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό του δικτύου. Κατά συνέπεια, ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να επεκταθεί για περιπτώσεις χρονικής μεταβλητότητας της κατανομής των χρηστών. Στην περίπτωση αυτή, οι θέσεις και ο αριθμός των χρηστών στο χώρο ενδέχεται να μην παραμένουν σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής του γεγονότος, οπότε το δίκτυο πρέπει να προσαρμόζεται στις αλλαγές που συμβαίνουν και να ανακατανέμει τους πόρους στους κόμβους AP με επαναληπτικό τρόπο κατά τη διάρκεια του γεγονότος. Προς αυτή την κατεύθυνση, είναι χρήσιμο να συστηματοποιηθεί η χρήση της τεχνολογίας MEC στο δημιουργούμενο δίκτυο που προτάθηκε στο Κεφ. 5. Οι MEC εξυπηρετητές που θα τοποθετηθούν στους σταθμούς βάσης του δικτύου πρόσβασης μπορούν να επιφορτιστούν με λειτουργίες που θα βελτιστοποιήσουν γενικότερα την απόδοση του δικτύου. Για παράδειγμα, μια τέτοια λειτουργία είναι ο έλεγχος της κινητικότητας των χρηστών στο χώρο και η τακτική ενημέρωση του δικτύου για τις θέσεις τους ώστε να πραγματοποιείται η αντίστοιχη ανακατανομή των διαθέσιμων πόρων. Σε μια τέτοια περίπτωση, ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να επεκταθεί ώστε να αποκτήσει την επιθυμητή επαναληψιμότητα. Μια ακόμη προέκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η υιοθέτηση του προτεινόμενου μοντέλου κατανομής πόρων και εξυπηρέτησης χρηστών για ευρύτερες εφαρμογές, όπως είναι η τηλεπικοινωνιακή κάλυψη μιας αστικής περιοχής. Εξετάζοντας την τηλεπικοινωνιακή κίνηση μιας πόλης με τον ίδιο τρόπο που μελετάται ένα πολυπληθές γεγονός, δηλαδή μελετώντας τη χωροχρονική κατανομή των χρηστών σε ευρύτερη έκταση και μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, διαπιστώνονται πολλές ομοιότητες. Επομένως, η τηλεπικοινωνιακή κάλυψη σε μια πόλη μπορεί να βελτιστοποιηθεί με αντίστοιχες μεθόδους όπως αυτές που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία για πολυπληθείς εφαρμογές.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Διπλωματική Εργασία, Πιτερός Κωνσταντίνος, «Τηλεπικοινωνιακή κάλυψη πολυπληθών ad hoc γεγονότων», Οκτώβριος 2016
2. Διπλωματική Εργασία, Μιχαήλ Μυλωνάκη, «Κατανομή Πόρων σε Ad-Hoc Ασύρματα Δίκτυα, Απρίλιος 2014
3. Krzysztof Burnecki, «Simulation of counting processes», Hugo Steinhaus Center Wroclaw University of Technology
4. Deploying Very High Density Wi-Fi, DESIGN AND CONFIGURATION GUIDE FOR STADIUMS, Ruckus Wireless, Inc, (2012)
5. Mall Communication Solutions from RF experts, Delta Node- A Bird Technologies Company
6. MulteFire Technology Progress and Benefits, and How It Enables A New Breed of Neutral Hosts, Qualcomm Technologies, May 24, 2016
7. What speeds do I need for Skype, Netflix, video games, etc.?, Ookla Speedtest, (2012)
8. Challenges and Strategies for Mobile Network Operators in Handling Voice and Data Traffic during Mass Events, 3db Consult White Paper (2017)
9. Internet Speed Requirements for Video Streaming, [www.lifewire.com](http://www.lifewire.com)
10. LTE Frame and Subframe Structure, Radio-Electronics.com
11. «Frame Structures in LTE-TDD and LTE-FDD», LTE University, (2012)
12. LTE Physical Layer Overview, Keysight RFMW Sitemap
13. Nasir Abbas, Yan Zhang, Amir Taherkordi and Tor Skeie, «Mobile Edge Computing: A Survey», IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL, VOL. AA, NO. BB, (2017)
14. Bhaskar Prasad Rimal, Dung Pham Van and Martin Maier, «Mobile-Edge Computing Versus Centralized Cloud Computing Over a Converged FiWi Access Network», IEEE TRANSACTIONS ON NETWORK AND SERVICE MANAGEMENT, VOL. 14, NO. 3, (SEPTEMBER 2017)
15. Mobile-Edge Computing (MEC); Service Scenarios, ETSI GS MEC-IEG 004 V1.1.1 (2015-11)