



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Προσαρμοστικά κινητά ευρυζωνικά δίκτυα για την
αντιμετώπιση μεταβαλλόμενων κατανομών ζήτησης
πόρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΥΡΙΑΚΟΣ ΣΚΑΡΣΟΥΛΗΣ

Επιβλέπων: Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Προσαρμοστικά κινητά ευρυζωνικά δίκτυα για την
αντιμετώπιση μεταβαλλόμενων κατανομών ζήτησης
πόρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΥΡΙΑΚΟΣ ΣΚΑΡΣΟΥΛΗΣ

Επιβλέπων: Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 29η Οκτωβρίου 2018

.....
Π. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χ. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Φικιώρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

.....
Κυριακός Ε. Σκαρσουλής
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κυριακός Σκαρσουλής 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.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στη διατύπωση ενός αποδοτικού αλγόριθμου για τη χρονικά δυναμική κατανομή τηλεπικοινωνιακών πόρων από ένα κινητό ευρυζωνικό δίκτυο κατά την κάλυψη πολυπληθών ad-hoc γεγονότων (συναυλίες, αθλητικά γεγονότα) εστιάζοντας σε τρόπους βελτίωσης της απόκρισης σε μεταβαλλόμενες κατανομές ζήτησης πόρων. Για τη μελέτη της απόδοσης του αλγόριθμου προσομοιώνεται ένα κυβελωτό δίκτυο, το οποίο είναι υπεύθυνο για την κάλυψη του χώρου στον οποίο πραγματοποιείται το ad hoc γεγονός. Το δίκτυο διαθέτει ένα σταθμό βάσης με αυξημένες υπολογιστικές δυνατότητες (super base station), ο οποίος διαχειρίζεται τους διαθέσιμους πόρους κατανεμόντάς τους στους ισχυρούς κόμβους του δικτύου που λειτουργούν ως σημεία πρόσβασης (access points). Κάθε ισχυρός κόμβος είναι υπεύθυνος για την εξυπηρέτηση των χρηστών που εμφανίζονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή του χώρου κάλυψης. Η αρχική κατανομή πόρων στα σημεία πρόσβασης του συστήματος γίνεται με βάση την κατανομή ζήτησης πόρων που αναμένει το δίκτυο να προκύψει κατά την άφιξη των χρηστών. Στη συνέχεια, καθώς το σύστημα μπαίνει σε λειτουργία, σταδιακά δημιουργείται μια εικόνα της πραγματικής κατανομής ζήτησης. Θέτοντας συγκεκριμένες περιοχές τιμών για το περιθώριο σφάλματος και το επίπεδο αξιοπιστίας προκύπτει το μέγεθος του αντιπροσωπευτικού δείγματος χρηστών βάσει του οποίου μπορεί να γίνει εκτίμηση της πραγματικής κατανομής ζήτησης. Εάν η εμπειρική κατανομή, η οποία εξάγεται από το δείγμα, διαφέρει σημαντικά από την αναμενόμενη κατανομή, τότε γίνεται ανακατανομή των εναπομεινάντων πόρων στους επιμέρους ισχυρούς κόμβους με βάση την εμπειρική κατανομή ζήτησης πόρων. Στην περίπτωση που η κατανομή ζήτησης μεταβάλλεται με τον χρόνο η ανακατανομή πόρων επαναλαμβάνεται κάθε φορά που η εμπειρική κατανομή που εξάγεται από το πλέον πρόσφατο δείγμα διαφέρει σημαντικά από αυτήν που χρησιμοποιήθηκε κατά την τελευταία ανακατανομή πόρων. Με αυτόν τον τρόπο, το δίκτυο μπορεί να προσαρμοστεί σε κατανομές ζήτησης πόρων που μεταβάλλονται με τον χρόνο, διατηρώντας υψηλά επίπεδα απόδοσης, όσον αφορά τον χρόνο που χρειάζεται το σύστημα για να εξεύρει τους απαιτούμενους πόρους και τα ποσοστά εξυπηρετημένων χρηστών.

Λέξεις Κλειδιά

Κατανομή/ ανακατανομή πόρων, μεταβαλλόμενη κατανομή ζήτησης, κινητό ευρυζωνικό δίκτυο, αρχιτεκτονική C-RAN, πραγματική/ αναμενόμενη/ εμπειρική κατανομή ζήτησης, αντιπροσωπευτικό δείγμα

Abstract

The present Diploma Thesis aims at formulating an efficient algorithm for dynamic distribution of telecommunication resources from a mobile broadband network during the coverage of ad-hoc events, such as concerts and sports-events, focusing on ways to improve the network response to changing demand distribution. For the assessment of the proposed algorithm a cellular network responsible for the coverage of the space of the ad-hoc event is simulated. The network consists of a base station with advanced computational capabilities (super base station) that manages the available resources by allocating them to the relay stations (RS) of the network which in turn act as access points (APs). Each relay station is responsible for serving users appearing in a particular area. The initial resource allocation at the relay stations is based on the resource demand distribution that the network expects to occur upon the arrival of the users. As the network starts to provide services to the incoming users, a sample of the actual demand distribution is gradually formed. The size of the representative sample of users is defined by setting specific value ranges for the error margin and the confidence level, based on which the actual demand distribution can be estimated. If the empirical distribution, which derives from the sample, differs significantly from the expected distribution, the remaining resources are redistributed to the relay stations based on the empirical resource demand distribution. In case the demand distribution is time dependent, resource redistribution is repeated each time the empirical distribution derived from the most recent sample differs significantly from that used at the last resource reallocation. Through the proposed method, the network can adapt to time varying demand distributions while maintaining high levels of performance, in terms of the time needed to find the resources required and the percentage of users served.

Key Words

Resource allocation/ reallocation, changing demand distribution, mobile broadband network, C-RAN architecture, actual/ expected/ empirical distribution, representative sample

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων.....	13
Κατάλογος Πινάκων.....	21
Κατάλογος Συντμήσεων.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	28
1.1 Η καταγεγραμμένη και η αναμενόμενη αύξηση της χρήσης κινητών ευρυζωνικών συνδέσεων.....	28
1.2 Οι προκλήσεις της σημερινής τηλεπικοινωνιακής αγοράς και οι τεχνικές καλύτερης αξιοποίησης των διαθέσιμων τηλεπικοινωνιακών πόρων.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- Η ΑΡΧΙΚΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ.....	36
2.1 Εισαγωγή.....	36
2.2 Αρχιτεκτονική και λειτουργίες του κυβελωτού δικτύου.....	36
2.3 Η αρχιτεκτονική C-RAN.....	38
2.4 Ανακατανομή των πόρων.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ.....	47
3.1 Εισαγωγή.....	47
3.2 Επιλογή χωροχρονικού μοντέλου άφιξης χρηστών.....	47
3.3 Μέγεθος αντιπροσωπευτικού δείγματος πλήθους χρηστών και μέθοδος σύγκρισης δύο κατανομών..	50
3.3.1 Ανάγκη χρησιμοποίησης αντιπροσωπευτικού δείγματος.....	50
3.3.2 Προσδιορισμός μεγέθους δείγματος.....	50
3.3.3 Έλεγχος Kolmogorov- Smirnov.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	57
4.1 Επιλογή περιβάλλοντος προσομοίωσης.....	57
4.2 Παρουσίαση των λειτουργιών του αλγόριθμου.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΧΡΟΝΙΚΑ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΧΡΗΣΤΩΝ.....	68
5.1 Εισαγωγή.....	68
5.2 Πρώτο σενάριο προσομοίωσης: Αναμενόμενη συνάρτηση κατανομής ίση με την πραγματική.....	68
5.3 Δεύτερο σενάριο προσομοίωσης: Η πραγματική συνάρτηση κατανομής είναι διαφορετική από την αναμενόμενη και στατική με τον χρόνο.....	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6– ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΧΡΟΝΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΧΡΗΣΤΩΝ.....	97
6.1 Εισαγωγή.....	97
6.2 Τρίτο σενάριο προσομοίωσης: Η πραγματική συνάρτηση κατανομής είναι διαφορετική από την αναμενόμενη και μεταβαλλόμενη με τον χρόνο.....	97
6.3 Τέταρτο σενάριο προσομοίωσης: Η πραγματική συνάρτηση κατανομής είναι διαφορετική από την αναμενόμενη και είναι μεταβλητή με τον χρόνο, αλλά κατά μεγάλα χρονικά διαστήματα είναι στατική με τον χρόνο.....	113
6.3.1 Ανάγκη χρήσης μεταβλητού μεγέθους δείγματος στον αλγόριθμο κατανομής πόρων.....	113
6.3.2 Εκτέλεση του αλγόριθμου κατανομής πόρων με μεταβλητό μέγεθος δείγματος στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης.....	115
6.3.3 Εκτέλεση του αλγόριθμου κατανομής πόρων με μεταβλητό μέγεθος δείγματος στο τρίτο σενάριο προσομοίωσης.....	118
6.3.4- Εκτέλεση του αλγόριθμου κατανομής πόρων με μεταβλητό μέγεθος δείγματος στο τέταρτο σενάριο προσομοίωσης.....	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ (SERVICE DIFFERENTIATION).....	133
7.1 Εισαγωγή.....	133
7.2 Ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, διαφοροποίηση υπηρεσιών και αντιστοίχιση ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων στους προσφερόμενους πόρους.....	133
7.2.1 Διαφοροποίηση τύπου υπηρεσιών ανάλογα με την ταχύτητα μετάδοσης.....	133
7.2.2 Δομή πλαισίων μετάδοσης δεδομένων τεχνολογίας LTE.....	134
7.2.3 Υπολογισμός απαιτούμενων πόρων για συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης υπηρεσίας.....	137
7.3 Σχεδίαση και εκτέλεση του αλγόριθμου κατανομής πόρων με διαφοροποίηση υπηρεσιών.....	139
7.4 Σχεδίαση και εκτέλεση αλγόριθμου με δυνατότητα προσαρμογής στις αλλαγές προτίμησης υπηρεσιών από τους χρήστες.....	147
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΥΝΑΤΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ.....	155
8.1 Συμπεράσματα.....	155
8.2 Επεκτάσεις του αλγόριθμου δυναμικής κατανομής πόρων.....	156
Βιβλιογραφία.....	157

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Το καταγεγραμμένο και το προβλεπόμενο πλήθος των συνδεδεμένων συσκευών παγκοσμίως για τη δεκαετία 2011-2021, με βάση μελέτη της Ericsson.	28
Σχήμα 1.2 Η προβλεπόμενη αύξηση του ποσοστού των έξυπνων συσκευών ως προς το συνολικό πλήθος συσκευών σε σύγκριση με το αντίστοιχο ποσοστό των συμβατικών συσκευών κατά την πενταετία 2016-2021, με βάση την μελέτη της Cisco. Το CAGR (Compound annual growth rate) εκφράζει το μέσο ετήσιο ποσοστό αύξησης του συνόλου των έξυπνων συσκευών (έξυπνων και μη).	29
Σχήμα 1.3 Η παγκόσμια κίνηση στα κινητά δίκτυα κατά την πενταετία 2010-2015, όσον αφορά τις κλήσεις συνδρομητών (κίτρινες στήλες) και την χρήση Internet (κόκκινες στήλες), με βάση μελέτη της Ericsson που έγινε το 2015. Ένα petabyte (PB)ισοδυναμεί με ένα εκατομμύριο gigabytes (GBs).	30
Σχήμα 1.4 Ο προβλεπόμενος παγκόσμιος όγκος δεδομένων κινητής τηλεφωνίας ανά μήνα κατά την εξαετία 2016-2021, με βάση την μελέτη της Cisco.	31
Σχήμα 1.5 Ο προβλεπόμενος παγκόσμιος όγκος δεδομένων κινητής τηλεφωνίας ανά μήνα και ανά γεωγραφική περιοχή κατά την εξαετία 2016-2021, με βάση την μελέτη της Cisco. Το CAGR (Compound annual growth rate) είναι το μέσο ετήσιο ποσοστό αύξησης του συνολικού όγκου.	31
Σχήμα 1.6 Ο προβλεπόμενος παγκόσμιος όγκος δεδομένων κινητής τηλεφωνίας ανά μήνα και ανά είδος συσκευής κατά την εξαετία 2016-2021, με βάση την μελέτη της Cisco. Το CAGR (Compound annual growth rate) είναι το μέσο ετήσιο ποσοστό αύξησης του συνολικού όγκου.	31
Σχήμα 1.7 Χρήση φάσματος συχνοτήτων στις κυψέλες ενός κυψελωτού δικτύου. Κάθε νούμερο (1-7) αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη φασματική ζώνη.	34
Σχήμα 2.1 Αρχιτεκτονική κυψελωτού δικτύου, όπου σε κάθε κυψέλη υπάρχει ένας ισχυρός κόμβος που εξασφαλίζει τη συνδεσιμότητα του δικτύου με τους χρήστες που εμφανίζονται σε αυτήν.	36
Σχήμα 2.2 Αρχιτεκτονική του προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακού δικτύου.	37
Σχήμα 2.3 Αρχιτεκτονική δικτύου C-RAN.	39
Σχήμα 2.4 Επισκόπηση δικτύου LTE αρχιτεκτονικής C-RAN.	40
Σχήμα 2.5 Ημερήσιο φορτίο σταθμών βάσης σε περιοχές εργασίας (Office BS) και σε περιοχές κατοικίας (Residential BS).	41
Σχήμα 3.1 Παράδειγμα εφαρμογής K-S test στη σύγκριση δύο εμπειρικών κατανομών, όπου το μαύρο βέλος δείχνει την μέγιστη διαφορά D μεταξύ τους.	54
Σχήμα 4.1 Κατανομή 42 ισχυρών κόμβων με ακτίνα εμβέλειας 0.1 σε χώρο S διαστάσεων 1 x 1.	58
Σχήμα 4.2 Οι 4 βασικές περιπτώσεις υπέρβασης των ορίων του χωρίου $a \times b$ από κύκλο ακτίνας r .	58
Σχήμα 4.3 Υπέρβαση στην γωνία ($x > a-r$ και $y > b-r$).	59
Σχήμα 4.4 Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται μερικές περιοχές του χώρου S, οι οποίες δεν καλύπτονται από την εμβέλεια κανενός ισχυρού κόμβου.	63

Σχήμα 5.1 Απεικόνιση θέσεων των $N_{users}=10000$ χρηστών με βάση τη χωρική ένταση της διαδικασίας Poisson $\lambda_{real}(x,y)=100*(x+y)$	69
Σχήμα 5.2 Αρχική κατανομή των συνολικών πόρων στους ισχυρούς κόμβους με βάση την αναμενόμενη κίνηση. Με κόκκινο αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανέμονται σε κάθε ισχυρό κόμβο στην αρχή και με μπλε αναγράφεται το κλάσμα της περιοχής εμβέλειας του ισχυρού κόμβου που βρίσκεται μέσα στον χώρο S.	70
Σχήμα 5.3 Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του πρώτου σεναρίου με depthmax = 3. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).	71
Σχήμα 5.4 Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του πρώτου σεναρίου με depthmax = 5. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).	72
Σχήμα 5.5 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του πρώτου σεναρίου προσομοίωσης με depthmax=5. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.	74
Σχήμα 5.6 Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του πρώτου σεναρίου με depthmax = 0. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).	76
Σχήμα 5.7 Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του πρώτου σεναρίου με depthmax = 0	76
Σχήμα 5.8 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις του πρώτου σεναρίου προσομοίωσης με depthmax =1.	77
Σχήμα 5.9 Αριθμός εξυπηρετηθέντων χρηστών για την εξυπηρέτηση των οποίων έγινε αναζήτηση πόρων σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις του πρώτου σεναρίου προσομοίωσης με depthmax =1.	78
Σχήμα 5.10 Απεικόνιση θέσεων των $N_{users}=10000$ χρηστών με βάση τη χωρική ένταση της διαδικασίας Poisson $\lambda_{real}(x,y)=\sqrt{x}-\sqrt{y}$	79
Σχήμα 5.11 Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων με depthmax = 5. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).	81
Σχήμα 5.12 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.	82
Σχήμα 5.13 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.	83

Σχήμα 5.14 Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 0$. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).	86
Σχήμα 5.15 Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 0$.	87
Σχήμα 5.16 Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 0$. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).	88
Σχήμα 5.17 Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα νέων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 0$.	88
Σχήμα 5.18 Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με (οι μπλε στήλες) και χωρίς (οι κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 0$.	89
Σχήμα 5.19 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=55$) του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με (οι μπλε στήλες) και χωρίς (οι κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων και $depthmax = 0$.	90
Σχήμα 5.20 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων και δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης στατικής κατανομής. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.	91
Σχήμα 5.21 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με (πάνω διάγραμμα) και χωρίς (κάτω διάγραμμα) δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης στατικής κατανομής.	92
Σχήμα 5.22 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=55$) του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με (οι μπλε στήλες) και χωρίς (οι κόκκινες στήλες) δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης στατικής κατανομής και με $depthmax = 0$.	94
Σχήμα 5.23 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=55$) του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με (οι μπλε στήλες) και χωρίς (οι κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων και $depthmax = 1$.	95
Σχήμα 5.24 Αριθμός εξυπηρετηθέντων χρηστών για την εξυπηρέτηση των οποίων έγινε αναζήτηση πόρων σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με (μπλε στήλες) και χωρίς (κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων και με $depthmax = 1$.	95
Σχήμα 6.1 Μετακίνηση του κέντρου της κανονικής κατανομής χρηστών, $(x_0(t), y_0(t))$, κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της προσομοίωσης.	98
Σχήμα 6.2 Προσομοίωση θέσεων των $N_{users} = 10000$ χρηστών με βάση τη συνάρτηση	99

κανονικής κατανομής έντασης $\lambda_{real}(x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}} * e^{-\frac{((x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2)}{2\sigma^2}}$	
Σχήμα 6.3 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.	100
Σχήμα 6.4 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με μέγεθος αντιπροσωπευτικού δείγματος ίσο με 370 χρήστες. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.	101
Σχήμα 6.5 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με μέγεθος αντιπροσωπευτικού δείγματος ίσο με 170 χρήστες και $D_a=0.104$. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.	103
Σχήμα 6.6 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με μέγεθος αντιπροσωπευτικού δείγματος ίσο με 170 χρήστες και $D_a=0.071$. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.	104
Σχήμα 6.7 Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων με depthmax = 0. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).	106
Σχήμα 6.8 Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων με depthmax = 0.	106
Σχήμα 6.9 Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με depthmax = 0 και μέγεθος δείγματος ίσο με 170 χρήστες. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).	108
Σχήμα 6.10 Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με depthmax = 0.	108
Σχήμα 6.11 Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου με (οι μπλε στήλες) και χωρίς (οι κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων με depthmax = 0.	109
Σχήμα 6.12 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=35) του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης με (οι μπλε στήλες) και χωρίς (οι κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων και depthmax =0.	110
Σχήμα 6.13 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=35) του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα ανακατανομής	111

πόρων, με μέγεθος δείγματος 370 (μωβ στήλες) και 170 χρήστες (γαλάζιες στήλες) και depthmax =0.	
Σχήμα 6.14 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=35) του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης με (μπλε στήλες) και χωρίς (κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων και depthmax =1.	111
Σχήμα 6.15 Αριθμός εξυπηρετηθέντων χρηστών για την εξυπηρέτηση των οποίων έγινε αναζήτηση πόρων σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης με (μπλε στήλες) και χωρίς (κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων και με depthmax =1.	112
Σχήμα 6.16 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης (στατική κατανομή) με μέγεθος δείγματος 170 χρήστες (πάνω διάγραμμα) και με μέγεθος δείγματος 370 χρήστες (κάτω διάγραμμα).	114
Σχήμα 6.17 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=55) του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρήστες (μωβ στήλες) και depthmax =0.	114
Σχήμα 6.18 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης (στατική κατανομή) με μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πάνω διάγραμμα) και με σταθερό μέγεθος δείγματος 170 χρηστών (μεσαίο διάγραμμα) και 370 χρηστών (κάτω διάγραμμα).	116
Σχήμα 6.19 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=55) του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης (στατική κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και depthmax =0.	116
Σχήμα 6.20 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=55) του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης (στατική κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και depthmax =1.	117
Σχήμα 6.21 Εξυπηρετηθέντες χρήστες για την εξυπηρέτηση των οποίων έγινε αναζήτηση πόρων σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=55) του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης (στατική κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και depthmax =1.	118
Σχήμα 6.22 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη στο τρίτο σενάριο προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή) με μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πάνω διάγραμμα) και με σταθερό μέγεθος δείγματος 170 χρηστών (μεσαίο διάγραμμα) και 370 χρηστών (κάτω διάγραμμα).	119
Σχήμα 6.23 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=35) του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και depthmax =0.	120
Σχήμα 6.24 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις	121

(seednumber=35) του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και depthmax =1.	
Σχήμα 6.25 Εξυπηρετηθέντες χρήστες για την εξυπηρέτηση των οποίων έγινε αναζήτηση πόρων σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=35) του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και depthmax =1.	121
Σχήμα 6.26 Μετακίνηση του κέντρου της κανονικής κατανομής χρηστών, (x_0, y_0) , κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης.	123
Σχήμα 6.27 Προσομοίωση θέσεων των $N_{users}=10000$ χρηστών με βάση τη συνάρτηση κανονικής κατανομής έντασης $\lambda_{real}(x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}} * e^{-\frac{((x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2)}{2\sigma^2}}$	123
Σχήμα 6.28 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη στο τέταρτο σενάριο προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή με μεγάλα χρονικά διαστήματα που είναι στατική) με μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πάνω διάγραμμα) και με σταθερό μέγεθος δείγματος 170 χρηστών (μεσαίο διάγραμμα) και 370 χρηστών (κάτω διάγραμμα).	124
Σχήμα 6.29 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=50) του τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή με μεγάλα χρονικά διαστήματα που είναι στατική) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και depthmax =0.	127
Σχήμα 6.30 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=50) του τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και depthmax =1.	128
Σχήμα 6.31 Εξυπηρετηθέντες χρήστες για την εξυπηρέτηση των οποίων έγινε αναζήτηση πόρων σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=35) του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και depthmax =1.	128
Σχήμα 6.32 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=50) του τέταρτου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων.	130
Σχήμα 6.33 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=50) του τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες) ή μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και χωρίς δυνατότητα ανακατανομής (κίτρινες στήλες) και depthmax =0.	130
Σχήμα 6.34 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=50) του τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες) ή μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και χωρίς δυνατότητα ανακατανομής (κίτρινες στήλες) και depthmax =1.	131

Σχήμα 6.35 Εξυπηρετηθέντες χρήστες για την εξυπηρέτηση των οποίων έγινε αναζήτηση πόρων σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=50) του τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες) ή μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και χωρίς δυνατότητα ανακατανομής (κίτρινες στήλες) και depthmax =1.	131
Σχήμα 7.1 Δομή πλαισίου στο LTE (LTE frame structure)	136
Σχήμα 7.2 Πλέγμα ραδιοπόρων LTE (LTE resource grid).	136
Σχήμα 7.3 Υλοποίηση της τεχνικής πολυπλεξίας OFDM (αριστερά) και OFDMA (δεξιά).	138
Σχήμα 7.4 Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με διαφοροποίηση υπηρεσιών, με δυνατότητα ανακατανομής πόρων και με depthmax = 41. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).	141
Σχήμα 7.5 Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με διαφοροποίηση υπηρεσιών ανά χρήστη, με δυνατότητα ανακατανομής πόρων και με depthmax = 41.	142
Σχήμα 7.6 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων και με διαφοροποίηση υπηρεσιών. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.	143
Σχήμα 7.7 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης (στατική κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, με μεταβλητό μέγεθος δείγματος, με (πάνω διάγραμμα) και χωρίς (κάτω διάγραμμα) διαφοροποίηση υπηρεσιών.	143
Σχήμα 7.8 Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (seednumber=55) του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με (καφέ στήλες) και χωρίς (πράσινες στήλες) διαφοροποίηση υπηρεσιών ανά χρήστη και με depthmax = 0.	144
Σχήμα 7.9 Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με διαφοροποίηση υπηρεσιών, με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με λάθος αρχική εκτίμηση προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών και με depthmax = 41. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).	145
Σχήμα 7.10 Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με διαφοροποίηση υπηρεσιών ανά χρήστη, με λάθος αρχική εκτίμηση προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών και με depthmax = 41.	146
Σχήμα 7.11 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με διαφοροποίηση υπηρεσιών και με λάθος εκτίμηση προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.	147

<p>Σχήμα 7.12 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης (στατική κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, με μεταβλητό μέγεθος δείγματος, με διαφοροποίηση υπηρεσιών, με λάθος (πάνω διάγραμμα) και σωστή (κάτω διάγραμμα) εκτίμηση προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών.</p>	147
<p>Σχήμα 7.13 Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με διαφοροποίηση υπηρεσιών, με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών και με depthmax = 41. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).</p>	148
<p>Σχήμα 7.14 Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με σωστή αρχική εκτίμηση των ποσοστών επιλογής υπηρεσιών και χωρίς δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των υπηρεσιών (κόκκινες στήλες), με λανθασμένη αρχική εκτίμηση των ποσοστών επιλογής υπηρεσιών με (μπλε στήλες) και χωρίς (πορτοκαλί στήλες) δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των υπηρεσιών (μπλε στήλες), με depthmax=41.</p>	149
<p>Σχήμα 7.15 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με διαφοροποίηση υπηρεσιών και με δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.</p>	150
<p>Σχήμα 7.16 Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου με μεταβαλλόμενα ποσοστά προτίμησης υπηρεσιών με τον αλγόριθμο με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών και με depthmax = 41. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).</p>	151
<p>Σχήμα 7.17 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου με μεταβαλλόμενα ποσοστά προτίμησης υπηρεσιών με τον αλγόριθμο με δυνατότητα ανακατανομής πόρων και με δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.</p>	153
<p>Σχήμα 7.18 Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου με μεταβαλλόμενα ποσοστά προτίμησης υπηρεσιών με τον αλγόριθμο με (πάνω διάγραμμα) και χωρίς (κάτω διάγραμμα) δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών.</p>	153

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.1 Τιμές της μέγιστης διαφοράς μεταξύ των συναρτήσεων των δύο κατανομών πραγματικής και αναμενόμενης κίνησης για τις 10 υλοποιήσεις της προσομοίωσης άφιξης χρηστών.	73
Πίνακας 5.2 Τιμές της μέγιστης διαφοράς μεταξύ των συναρτήσεων των δύο κατανομών πραγματικής και αναμενόμενης κίνησης και συνολικές ανακατανομές για τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης άφιξης χρηστών.	84
Πίνακας 5.3 Τιμές της μέγιστης διαφοράς μεταξύ των συναρτήσεων των δύο κατανομών πραγματικής και αναμενόμενης κίνησης και συνολικές ανακατανομές για την πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης άφιξης χρηστών με τον αλγόριθμο με δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης στατικής κατανομής .	93
Πίνακας 6.1 Τιμές της μέγιστης διαφοράς μεταξύ των συναρτήσεων των δύο κατανομών πραγματικής και αναμενόμενης κίνησης και συνολικές ανακατανομές για την πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης άφιξης χρηστών με μέγεθος δείγματος ίσο με 370 χρήστες.	101
Πίνακας 6.2 Τιμές της μέγιστης διαφοράς μεταξύ των συναρτήσεων των δύο κατανομών πραγματικής και αναμενόμενης κίνησης και συνολικές ανακατανομές για την πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης άφιξης χρηστών με μέγεθος δείγματος ίσο με 170 χρήστες.	105
Πίνακας 6.3 Τιμές της μέγιστης διαφοράς μεταξύ των συναρτήσεων των δύο κατανομών πραγματικής και αναμενόμενης κίνησης και συνολικές ανακατανομές για την πρώτη υλοποίηση του τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης άφιξης χρηστών με μεταβλητό μέγεθος δείγματος.	126
Πίνακας 7.1 Ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που απαιτούνται για υπηρεσίες upstream-downstream.	133
Πίνακας 7.2 Τιμές της μέγιστης διαφοράς μεταξύ των συναρτήσεων των δύο κατανομών πραγματικής και αναμενόμενης κίνησης και συνολικές ανακατανομές για την πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης άφιξης χρηστών με μεταβαλλόμενες προτιμήσεις υπηρεσιών από τους χρήστες.	152

Κατάλογος Συντμήσεων

3G/4G/5G Third/Fourth/Fifth Generation (of wireless mobile telecommunications technology)

ABS Almost Blank Subframe

AP Access Point

AR Augmented Reality

ARPU Average Revenue Per User

BBU BaseBand Unit

CAGR Compound Annual Growth Rate

CAPEX Capital Expenditure

CBP Call Blocking Probability

Comp Coordinated multipoint

CPU Central Processing Unit

C-RAN Centralised Radio Access Network

eICIC enhanced Inter-Cell Interference Coordination

K-S Kolmogorov- Smirnov

LTE Long Term Evolution

M2M Machine to Machine

MCN Mobile Core Network

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access

OPEX Operating Expenditure

PC Personal Computer

QoS Quality of Service

RAM Random Access Memory

RAN Radio Access Network

RB Resource Block

RF Radio Frequency

RRH Remote Radio Head

RS Relay Station

RRU Remote Radio Unit

RU Radio Unit

sBs super Base Station

SDR Software Defined Radio

TDD Time Division Duplex

VR Virtual Reality

Ευχαριστίες

Κατ' αρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, καθηγητή κ. Παναγιώτη Γ. Κωττή, για την επιλογή του θέματος καθώς και για την πολύ καλή και παραγωγική συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ήταν οι παραδόσεις του κ. Κωττή στα προηγούμενα εξάμηνα που έστρεψαν το ενδιαφέρον μου στο επιστημονικό πεδίο των τηλεπικοινωνιών.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνο Πιτερό, Διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό, του οποίου η διπλωματική εργασία πάνω στην τηλεπικοινωνιακή κάλυψη πολυπληθών ad hoc γεγονότων αποτέλεσε έναυσμα και βάση για την παρούσα εργασία, για τη διάθεση που έδειξε στο να μου απαντήσει ό,τι ερωτήσεις είχα κατά τη διάρκεια της εργασίας.

Οφείλω να ευχαριστήσω επίσης τη συμφοιτήτριά μου κ. Σοφία Μαντέλλου για την εισαγωγική βοήθεια που μου παρείχε στα πρώτα στάδια διερεύνησης της θεματολογίας της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την πολυεπίπεδη στήριξη που μου παρείχε όλα τα χρόνια των σπουδών μου, καθώς και όλους όσους με στήριξαν κατά τη διάρκεια αυτών των χρόνων.

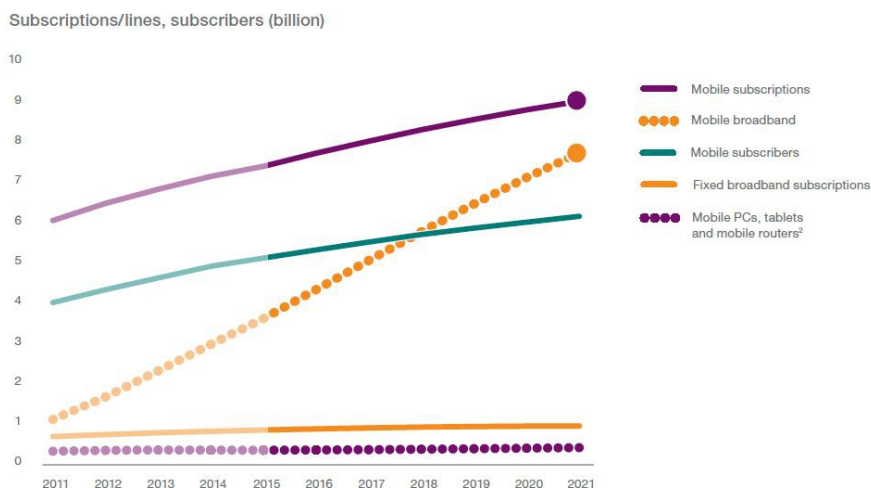
Στην οικογένειά μου

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Η καταγεγραμμένη και η αναμενόμενη αύξηση της χρήσης κινητών ευρυζωνικών συνδέσεων

Οι τηλεπικοινωνίες είναι ένας κλάδος ο οποίος κατ' εξοχήν επηρεάζεται άμεσα από τις προόδους της τεχνολογίας. Το 2007 παρουσιάστηκαν τα πρώτα έξυπνα κινητά τηλέφωνα (smartphones) στην αγορά. Οι συσκευές αυτές είχαν εκτεταμένες υπολογιστικές δυνατότητες σε σχέση με τα συμβατικά κινητά τηλέφωνα που χρησιμοποιούντουσαν έως τότε, συμπεριλαμβανομένης της υψηλής ταχύτητας πρόσβασης στο Διαδίκτυο (Internet), με χρήση Wi-Fi και κινητής ευρυζωνικής σύνδεσης (mobile broadband connection). Η ευρυζωνική τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας είναι μια τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας που επιτρέπει σε μια κινητή συσκευή να επιτύχει ασύρματα μια ευρυζωνική σύνδεση (broadband connection: σύνδεση στο Internet με πολύ υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων) μέσω ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας που μεσολάβησε, οι δυνατότητες των κινητών τηλεφωνικών συσκευών επεκτάθηκαν, ως αποτέλεσμα της βελτίωσης της τεχνολογίας επεξεργαστών (από επεξεργαστές των 412 MHz το 2007 σε επεξεργαστές των 2.39 GHz το 2017) και της αύξησης της χωρητικότητας μνήμης (από RAM των 128 MB το 2007 σε RAM των 3GB το 2017) των συσκευών. Η ραγδαία ανάπτυξη στην τεχνολογία των κινητών τηλεφωνικών συσκευών αποτυπώνεται καταρχάς στην έντονη αύξηση του συνολικού αριθμού κινητών συσκευών και συνδέσεων κινητής τηλεφωνίας. Συγκεκριμένα, με βάση μελέτη της εταιρείας Cisco [1], το 2016 προστέθηκε σχεδόν μισό δισεκατομμύριο (429 εκατομμύρια) νέων κινητών συσκευών και συνδέσεων παγκοσμίως. Οι νέες αυτές συνδέσεις αφορούσαν κυρίως smartphones, ακολουθούμενα από τις μονάδες για επικοινωνία machine to machine (M2M: απευθείας επικοινωνία μεταξύ δύο συσκευών χωρίς ανθρώπινη αλληλεπίδραση). Οι κινητές συσκευές και οι συνδέσεις κινητής τηλεφωνίας το 2016 σε παγκόσμιο επίπεδο αυξήθηκαν σε 8 δισεκατομμύρια, από 7,6 δισεκατομμύρια που ήτανε το 2015. Στο Σχ.1.1 φαίνεται η καταγεγραμμένη και η προβλεπόμενη αύξηση του συνολικού αριθμού κινητών συσκευών και συνδέσεων παγκοσμίως, με βάση μελέτη της εταιρείας Ericsson που έγινε το 2015 [2].

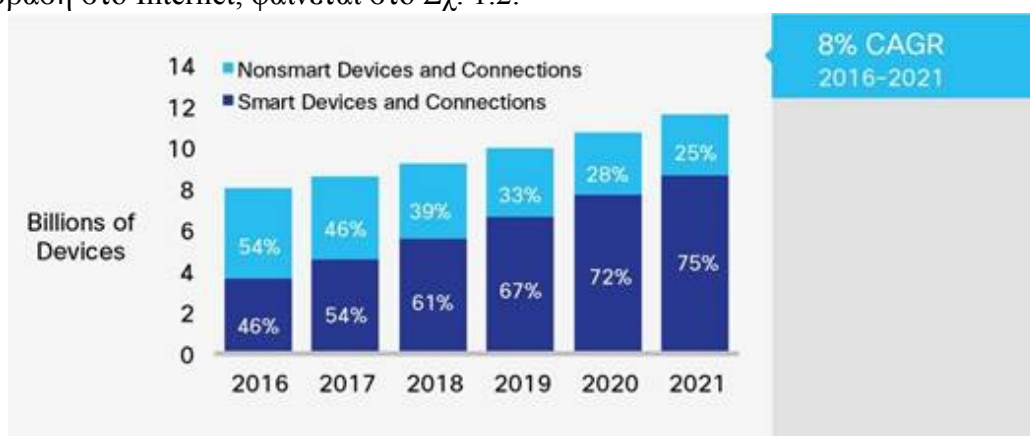


* The number of fixed broadband users is at least three times the number of fixed broadband connections, due to multiple usage in households, enterprises and public access spots. This is the opposite of the mobile phone situation, where subscription numbers exceed user numbers

* Fixed Wireless Access (FWA) subscription not included

Σχήμα 1.1: Το καταγεγραμμένο και το προβλεπόμενο πλήθος των συνδεδεμένων συσκευών παγκοσμίως για τη δεκαετία 2011-2021, με βάση μελέτη της Ericsson.

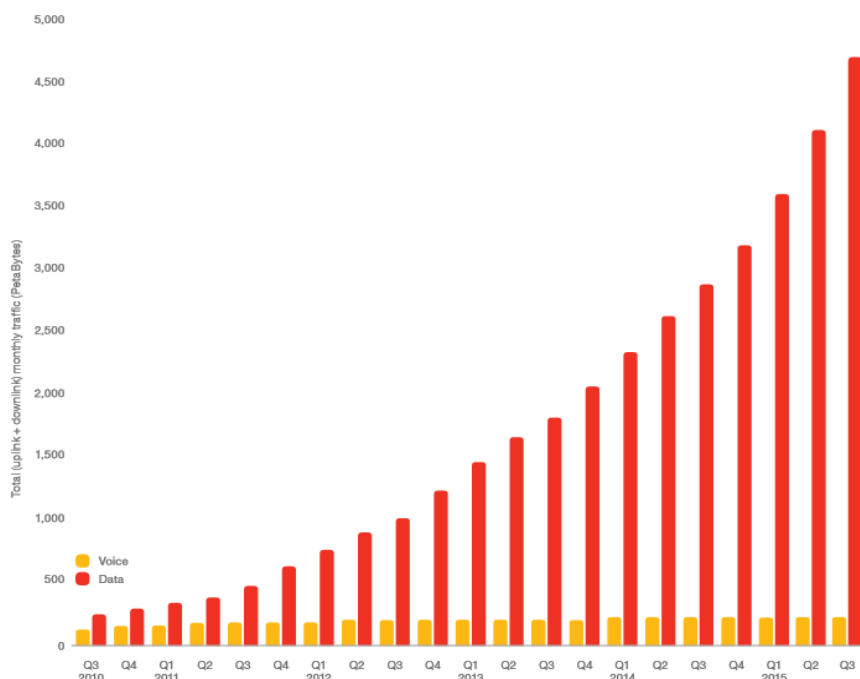
Το 2021 οι συνδέσεις κινητής τηλεφωνίας αναμένεται να φτάσουν τα 8.6 δισεκατομμύρια παγκοσμίως και οι συνδέσεις κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών αναμένεται να φτάσουν τα 7.7 δισεκατομμύρια, αποτελώντας το 90% περίπου των συνδέσεων κινητής τηλεφωνίας [2]. Η αύξηση των κινητών και έξυπνων συσκευών (ως έξυπνες χαρακτηρίζονται οι συσκευές που έχουν προηγμένες υπολογιστικές δυνατότητες και είναι συμβατές με την τεχνολογία κινητών επικοινωνιών 3G) τείνει να διαμορφώσει μια νέα κατάσταση, στην οποία οι έξυπνες συσκευές αντικαθιστούν σε μεγάλο βαθμό τις συμβατικές συσκευές (προσωπικός υπολογιστής- PC, σταθερό τηλέφωνο κτλ.). Σύμφωνα με την μελέτη της Cisco, τα smartphones θα αποτελούν περισσότερο από το 50% των συνδεδεμένων συσκευών παγκοσμίως το 2021. Ο αριθμός των smartphones παγκοσμίως προβλέπεται να φθάσει τα 6,2 δισεκατομμύρια μέχρι το 2021, σχεδόν διπλασιάζοντας τα 3,6 δισεκατομμύρια των smartphones που ήταν ενεργά το 2016 [1]. Η διαφαινόμενη μετάβαση στην αποκλειστική χρήση έξυπνων συσκευών που χρησιμοποιούν δεδομένα κινητής τηλεφωνίας για πρόσβαση στο Internet, φαίνεται στο Σχ. 1.2.



Σχήμα 1.2: Η προβλεπόμενη αύξηση του ποσοστού των έξυπνων συσκευών ως προς το συνολικό πλήθος συσκευών σε σύγκριση με το αντίστοιχο ποσοστό των συμβατικών συσκευών κατά την πενταετία 2016-2021, με βάση την μελέτη της Cisco. Το CAGR (Compound annual growth rate) εκφράζει το μέσο ετήσιο ποσοστό αύξησης του συνόλου των έξυπνων συσκευών (έξυπνων και μη).

Το Σχ. 1.2 δείχνει ότι το 2021 οι συνδέσεις έξυπνων συσκευών θα αποτελούν το 75% της συνολικής κίνησης στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως.

Επιπλέον, η ανάπτυξη της κινητής ευρυζωνικής πρόσβασης στο διαδίκτυο (mobile broadband), η οποία καθιστά δυνατή την πλοήγηση στο διαδίκτυο από κινητές συσκευές, σε συνδυασμό με τις αυξημένες υπολογιστικές ικανότητες των συσκευών αυτών, έχει συμβάλει στην ευκολία πρόσβασης των χρηστών σε μεγάλο όγκο πληροφορίας. Ως αποτέλεσμα αυτού, η χρήση των συσκευών κινητής τηλεφωνίας για πρόσβαση στο Internet έχει ενταθεί και έχει εισβάλει στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Αυτό γίνεται εμφανές και στο Σχ. 1.3 όπου παρουσιάζεται η αύξηση της κίνησης στο Internet μέσω ευρυζωνικής σύνδεσης κατά την πενταετία 2010-2015, με βάση μελέτη της Ericsson [2].



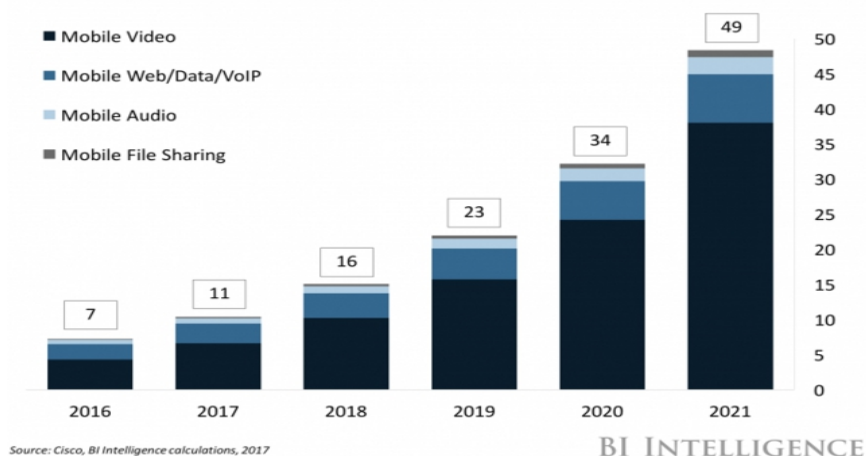
Σχήμα 1.3: Η παγκόσμια κίνηση στα κινητά δίκτυα κατά την πενταετία 2010-2015, όσον αφορά τις κλήσεις συνδρομητών (κίτρινες στήλες) και την χρήση Internet (κόκκινες στήλες), με βάση μελέτη της Ericsson που έγινε το 2015. Ένα petabyte (PB) ισοδυναμεί με ένα εκατομμύριο gigabytes (GBs).

Στο Σχ.1.3 φαίνεται ότι ο φόρτος του δικτύου για την πραγματοποίηση κλήσεων μεταξύ συνδρομητών δεν έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Αντίθετα, η αύξηση της κυκλοφορίας δεδομένων για πρόσβαση στο Internet είναι αισθητή, καθώς κατά τη συγκεκριμένη πενταετία είναι στα επίπεδα του 65% από χρονιά σε χρονιά [2].

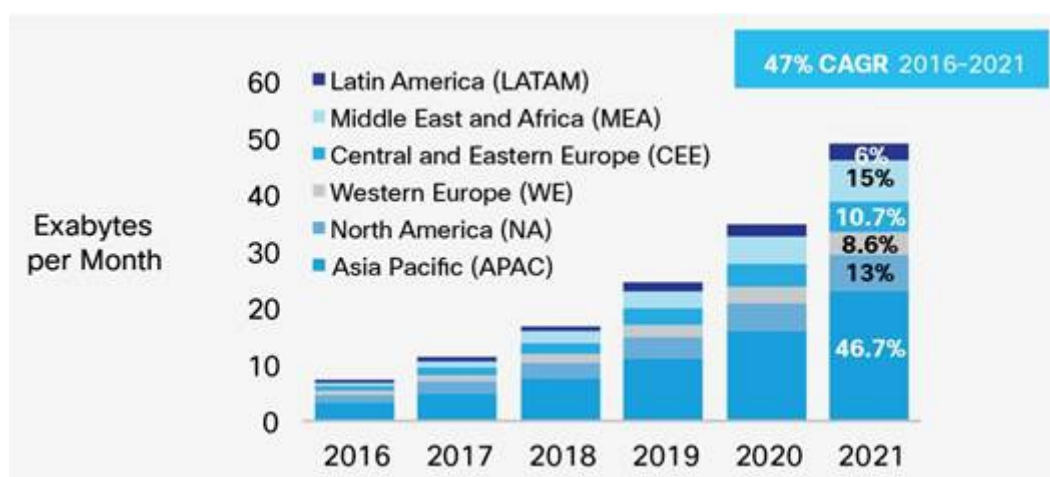
Ο όγκος λαμβανόμενης πληροφορίας στο Internet μέσω χρήσης δικτύων κινητής επικοινωνίας αναμένεται να συνεχίσει με αυξανόμενους ρυθμούς κατά τη διάρκεια της επόμενης πενταετίας. Ειδικότερα, η παγκόσμια κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας έφθασε τα 7,2 exabytes (ένα exabyte-EB ισοδυναμεί με ένα δισεκατομμύριο gigabytes-GBs) ανά μήνα στα τέλη του 2016, από 4,4 exabytes ανά μήνα που ήταν στο τέλος του 2015. Μάλιστα, η κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας στα τέλη του 2016 ήταν 18 φορές μεγαλύτερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη το 2011, καθώς το 2011 τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούσαν συνολικά 400 petabytes ανά μήνα (ένα petabyte-PB ισοδυναμεί με ένα εκατομμύριο gigabytes-GBs). Στα Σχ. 1.4, 1.5 και 1.6 παρουσιάζεται ο προβλεπόμενος όγκος δεδομένων κινητής τηλεφωνίας κατά την εξαετία 2016-2021, με βάση την μελέτη της Cisco.

Global Monthly Mobile Data Traffic, By Type

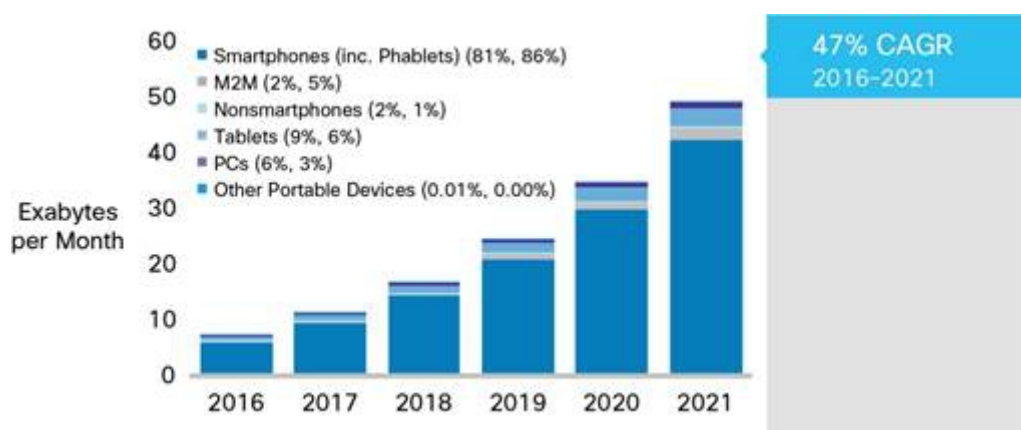
In exabytes



Σχήμα 1.4: Ο προβλεπόμενος παγκόσμιος όγκος δεδομένων κινητής τηλεφωνίας ανά μήνα κατά την εξαετία 2016-2021, με βάση την μελέτη της Cisco.



Σχήμα 1.5: Ο προβλεπόμενος παγκόσμιος όγκος δεδομένων κινητής τηλεφωνίας ανά μήνα και ανά γεωγραφική περιοχή κατά την εξαετία 2016-2021, με βάση την μελέτη της Cisco. Το CAGR (Compound annual growth rate) είναι το μέσο ετήσιο ποσοστό αύξησης του συνολικού όγκου.



Σχήμα 1.6: Ο προβλεπόμενος παγκόσμιος όγκος δεδομένων κινητής τηλεφωνίας ανά μήνα και ανά

είδος συσκευής κατά την εξαετία 2016-2021, με βάση την μελέτη της Cisco. Το CAGR (Compound annual growth rate) είναι το μέσο ετήσιο ποσοστό αύξησης του συνολικού όγκου.

Το Σχ. 1.4 δείχνει ότι τα δεδομένα κινητών βίντεο θα είναι το ταχύτερα αναπτυσσόμενο τμήμα της κινητής τηλεφωνίας. Η χρήση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας για υπηρεσίες με βίντεο αναμένεται να αυξηθεί κατά 870% από το 2016 στο 2021, φτάνοντας τα 38 exabytes τον μήνα, αντιπροσωπεύοντας τον υψηλότερο ρυθμό ανάπτυξης οποιασδήποτε κατηγορίας δεδομένων κινητής τηλεφωνίας και καλύπτοντας το 78% της συνολικής κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Η επιτάχυνση αυτής της ανάπτυξης θα ενθαρρυνθεί από την ευρεία υιοθέτηση του ζωντανού βίντεο (live video streaming), του AR (augmented reality: η θέαση ενός φυσικού, πραγματικού περιβάλλοντος, του οποίου τα στοιχεία επαυξάνονται από στοιχεία αναπαραγόμενα από συσκευές υπολογιστών, όπως ήχο, βίντεο, γραφικά ή δεδομένα τοποθεσίας) και του VR (virtual reality: η προσομοίωση ενός πραγματικού ή φανταστικού περιβάλλοντος από έναν υπολογιστή). Το Σχ. 1.5 δείχνει ότι η παγκόσμια κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας αναμένεται να επταπλασιαστεί μεταξύ του 2016 και του 2021. Η κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας υπολογίζεται ότι θα αυξηθεί με ετήσιο ρυθμό 47% από το 2016 έως το 2021, φθάνοντας τα 49 exabytes ανά μήνα το 2021. Επιπροσθέτως, η κίνηση που θα παράγεται από τα smartphones το 2021 αναμένεται να είναι μεγαλύτερη του επταπλασίου της αντίστοιχης κίνησης του 2016.

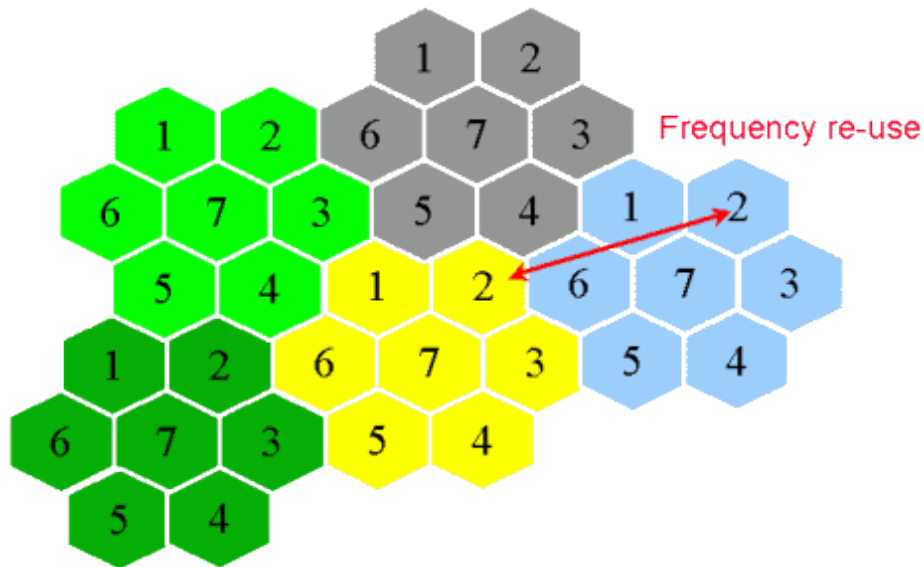
1.2 Οι προκλήσεις της σημερινής τηλεπικοινωνιακής αγοράς και οι τεχνικές καλύτερης αξιοποίησης των διαθέσιμων τηλεπικοινωνιακών πόρων

Με βάση τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, η διανύομενη δεκαετία παρουσιάζει μια πολύ μεγάλη ευκαιρία για τους παρόχους δικτύων κινητής επικοινωνίας να αυξήσουν σημαντικά το οικονομικό εκτόπισμά τους στην παγκόσμια αγορά, καθώς ο αριθμός των νέων συνδρομητών και η παγκόσμια κατανάλωση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας συνεχώς αυξάνονται με ραγδαίους ρυθμούς. Παράλληλα, όμως, παρουσιάζονται και πολλές προκλήσεις για τους παρόχους. Οι ζητούμενες υπηρεσίες απαιτούν όλο και περισσότερους τηλεπικοινωνιακούς πόρους (την ζώνη φάσματος συχνοτήτων που διατίθεται για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια), καθώς οι χρήστες του δικτύου επιθυμούν λήψη μεγάλου όγκου πληροφοριών χωρίς καθυστέρηση. Το διαρκώς αυξανόμενο φορτίο δικτύου οδηγεί στην ανάγκη βελτίωσης των υπάρχουσών υποδομών αλλά και ανάπτυξης νέων τεχνολογιών για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου (network throughput: ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας από το δίκτυο). Για παράδειγμα, η μετάβαση από την τρίτη (3G) στην τέταρτη γενιά (4G) ευρυζωνικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας, η οποία απαιτήσε αναβάθμιση του υπάρχοντος εξοπλισμού δικτύου, οδήγησε σε μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας (bits/sec) και σε καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους συχνοτήτων.

Οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι καλούνται να επενδύουν σημαντικά κεφάλαια για την αναβάθμιση και τη συντήρηση των υποδομών τους, προκειμένου να προσφέρουν υψηλή ποιότητα υπηρεσιών στους χρήστες. Το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (Total Cost Of Ownership-TCO) των δικτύων κινητών επικοινωνιών αποτελείται από το κεφαλαιουχικό κόστος (CAPital EXpenditure-CAPEX) και το λειτουργικό κόστος (Operating EXpenditure-OPEX). Το κεφαλαιουχικό κόστος περιλαμβάνει τα επιμέρους κόστη που αφορούν τη δημιουργία υποδομών για ένα δίκτυο. Κάποια εξ αυτών, είναι το κόστος απόκτησης θέσεων εγκατάστασης των σταθμών βάσης, το κόστος απόκτησης αδειών χρήσης φάσματος συχνοτήτων, καθώς και τα κόστη απόκτησης και εγκατάστασης του εξοπλισμού του δικτύου. Το λειτουργικό κόστος είναι το κόστος που απαιτεί η καθημερινή λειτουργία του δικτύου, όπως η ενοικίαση των θέσεων των σταθμών βάσης, ο ηλεκτρισμός για την παροχή ισχύος στον εξοπλισμό, καθώς επίσης και ενέργειες συντήρησης ή αναβάθμισης που ενδέχεται να χρειαστούν κατά τη λειτουργία του δικτύου. [3]

Πρέπει να σημειωθεί ότι η απόκτηση αδειών χρήσης φάσματος ραδιοσυχνοτήτων αποτελεί ένα πολύ μεγάλο μέρος των κεφαλαιουχικού κόστους των τηλεπικοινωνιακών παρόχων. Το χρησιμοποιούμενο φάσμα συχνοτήτων για τις κινητές ευρυζωνικές συνδέσεις στην Ελλάδα βρίσκεται στις ζώνες 800MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz και 2600 MHz, δηλαδή το διαθέσιμο φάσμα είναι πεπερασμένο και περιορισμένο. Αυτό κάνει το φάσμα έναν πολύτιμο πόρο και την απόκτηση άδειας φάσματος δαπανηρή. Οι άδειες αυτές αποδίδονται από μια ρυθμιστική αρχή (στην Ελλάδα η αρμόδια αρχή είναι η ΕΕΤΤ- Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων) μέσω δημοπρασίας [4]. Επιπλέον, οι νέες γενιές δικτύων (4G, 5G), προσφέροντας μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης πληροφορίας, προκαλούν την αύξηση της παγκόσμιας κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας, όπως φαίνεται στα Σχ. 1.4-1.6. Κατά συνέπεια, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι χρειάζονται μεγαλύτερο διαθέσιμο φάσμα για να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών. Για τον λόγο αυτόν, όταν περιστασιακά δημοπρατείται από την αρμόδια αρχή νέο διαθέσιμο φάσμα για χρήση στην κινητή τηλεφωνία, η ζήτηση από τις αντίστοιχες εταιρείες είναι μεγάλη.

Οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι, λοιπόν, έχουν να καλύψουν μεγάλο κεφαλαιουχικό και λειτουργικό κόστος προκειμένου να παραμείνουν ανταγωνιστικοί σε έναν διαρκώς μεταβαλλόμενο τομέα λόγω της τεχνολογικής προόδου, η οποία αυξάνει τις απαιτήσεις των χρηστών. Οι χρήστες, όμως, δεν είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν μεγάλα χρηματικά ποσά για τις βελτιούμενες υπηρεσίες που λαμβάνουν, καθώς ο συγκεκριμένος επιχειρηματικός τομέας είναι πολύ ανταγωνιστικός και το αποδεκτό κόστος των υπηρεσιών αυτών ορίζεται από την ελάχιστη τιμή που θα προσφέρει κάποια εταιρεία. Τα έσοδα ενός τηλεπικοινωνιακού παρόχου εξαρτώνται από τον αριθμό των συνδρομητών και από τα μέσα έσοδα ανά χρήστη (ARPU- Average Revenue Per User) [4]. Δεδομένου αυτού, βασικός στόχος των παρόχων είναι η αύξηση του συνολικού αριθμού των συνδρομητών τους. Η πραγματοποίηση αυτού του στόχου συνεπάγεται αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης- φορτίου δικτύου για τα δίκτυα των παρόχων. Εφόσον ο πάροχος έχει συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων να διαθέσει, οφείλει να το αξιοποιήσει βέλτιστα προκειμένου να εξυπηρετήσει την αυξανόμενη κίνηση χρηστών. Σε αυτήν την κατεύθυνση συμβάλλει η αρχιτεκτονική των κυψελωτών δικτύων κινητών τηλεπικοινωνιών, με την οποία γίνεται αναχρησιμοποίηση του φάσματος συχνοτήτων με χρήση χωρικού διαχωρισμού. Συγκεκριμένα, η περιοχή, την οποία καλύπτει τηλεπικοινωνιακά ο πάροχος, χωρίζεται σε κυψέλες (cells) και σε καθεμιά τοποθετείται ένας σταθμός βάσης, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την κάλυψή της. Όταν η απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο κυψελών είναι αρκετά μεγάλη, τότε οι δύο αυτές κυψέλες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις ίδιες συχνότητες για την εξυπηρέτηση των χρηστών που εισέρχονται σε αυτές. Η μικρότερη αποδεκτή απόσταση D ανάμεσα στα κέντρα δύο κυψελών που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες λέγεται απόσταση επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων (frequency reuse distance) και εξαρτάται από τον αριθμό των κυψελών που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα, από το σχήμα κάθε κυψέλης, από το ύψος της κεραίας και από την ισχύ εκπομπής. Με τον τρόπο αυτόν το δίκτυο βρίσκεται σε θέση να εξυπηρετήσει μεγαλύτερο αριθμό χρηστών σε μια γεωγραφική περιοχή, έχοντας συγκεκριμένο διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων.



Σχήμα 1.7: Χρήση φάσματος συχνοτήτων στις κυψέλες ενός κυψελωτού δικτύου. Κάθε νούμερο (1-7) αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη φασματική ζώνη.

Ο πάροχος κατανέμει τους διαθέσιμους πόρους στους σταθμούς βάσης κάθε κυψέλης για να μπορούν αυτοί στη συνέχεια να εξυπηρετήσουν τις απαιτήσεις των χρηστών που θα εμφανιστούν στην εμβέλειά τους. Ανάλογα με τους πόρους που έχουν διατεθεί σε κάθε κυψέλη, προκύπτει για κάθε κυψέλη η μέγιστη τηλεπικοινωνιακή κίνηση (traffic threshold) που αυτή μπορεί να εξυπηρετήσει [4]. Εάν σε μια κυψέλη η μέγιστη τιμή κίνησης ξεπεραστεί, τότε θα προκύψουν περιπτώσεις απόρριψης του δικτύου σε αιτήσεις σύνδεσης νέων χρηστών λόγω ανεπάρκειας πόρων. Η πιθανότητα αποκλεισμού χρηστών (CBP- Call Blocking Probability) διαμορφώνει τον βαθμό εξυπηρέτησης ενός δικτύου και κατά συνέπεια είναι βασική παράμετρος για την απόδοση του δικτύου.

Για να μείνει σε χαμηλά επίπεδα η πιθανότητα αποκλεισμού χρηστών, η κατανομή των πόρων θα πρέπει να γίνεται με βάση τις αναμενόμενες τηλεπικοινωνιακές ανάγκες της κάθε κυψέλης, έτσι ώστε οι πόροι να διατίθενται στις περιοχές με τη μεγαλύτερη τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Μάλιστα, η τηλεπικοινωνιακή κίνηση σε έναν ευρύτερο χώρο κάλυψης ενδέχεται να παρουσιάζει μεταβολές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό σημαίνει ότι μεγάλες τιμές τηλεπικοινωνιακής κίνησης θα προκύπτουν σε διαφορετικές κυψέλες του χώρου καθώς περνάει ο χρόνος. Το γεγονός αυτό δυσκολεύει πολύ τη διαδικασία πρόβλεψης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Συνεπώς, το δίκτυο θα πρέπει να κάνει δυναμική κατανομή πόρων (dynamic resource allocation) στους σταθμούς βάσης των κυψελών παρακολουθώντας την τηλεπικοινωνιακή κίνηση κατά τη διάρκεια της ημέρας και όταν διαπιστώσει σημαντική μεταβολή της να ανακατανέμει τους πόρους στις κυψέλες που τους έχουν περισσότερο ανάγκη με βάση την νέα κατανομή του φορτίου δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, το δίκτυο κάνει σωστή διαχείριση του διαθέσιμου εύρους συχνοτήτων, καθώς προσαρμόζεται στη μεταβαλλόμενη κατανομή φορτίου διαθέτοντας τους πόρους στις περιοχές όπου υπάρχει ζήτηση τη δεδομένη χρονική περίοδο. Αυτή είναι η κεντρική ιδέα της παρούσας εργασίας, της οποίας η εφαρμογή στη συνέχεια υλοποιείται αλγοριθμικά, εξετάζεται σε προσομοιώσεις άφιξης χρηστών σε ένα χώρο κάλυψης, όπου λαμβάνει χώρα ένα ad hoc γεγονός. Το ad hoc γεγονός είναι ένα γεγονός στο οποίο υπάρχει μαζική προσέλευση κόσμου για μια συγκεκριμένη εκδήλωση (συναυλία, αθλητικό γεγονός κτλ.). Ο λόγος που επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος τύπος γεγονότος είναι ότι σε τέτοια γεγονότα, υπάρχει μεγάλος ρυθμός εμφάνισης νέων χρηστών, καθώς και ότι η κατανομή απαιτήσεων τηλεπικοινωνιακών πόρων κατά τη διάρκεια ενός ad hoc γεγονότος μπορεί να είναι έντονα μεταβαλλόμενη και αρκετά απρόβλεπτη. Επομένως, εξετάζεται έτσι η συμπεριφορά του

δικτύου σε απαιτητικές συνθήκες και το κατά πόσο συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσής του η δυναμική κατανομή πόρων με τον χρόνο.

Κεφάλαιο 2

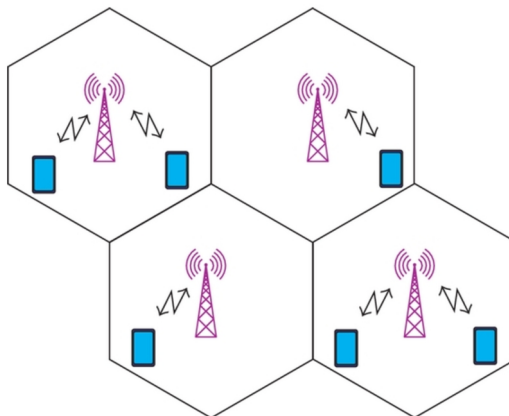
Η αρχιτεκτονική του δικτύου και η ανάγκη για δυναμική ανακατανομή πόρων

2.1 Εισαγωγή

Η περιοχή όπου συγκεντρώνονται οι χρήστες για ένα ad hoc γεγονός, ο χώρος S , καλύπτεται τηλεπικοινωνιακά από τον πάροχο δικτύου (Network Operator). Ο πάροχος πρέπει να εξασφαλίσει την κατανομή του απαραίτητου αριθμού τηλεπικοινωνιακών πόρων στον χώρο S , προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις πόρων που θα προκύψουν από τη μεγάλη συγκέντρωση εμφάνισης χρηστών κατά τη διάρκεια του ad hoc γεγονότος. Ως τηλεπικοινωνιακός πόρος ορίζεται η ζώνη φάσματος συχνοτήτων που διατίθεται για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν η αρχιτεκτονική του δικτύου που χρησιμοποιείται για την κάλυψη του χώρου S , καθώς και ο ρόλος της ανακατανομής των πόρων στην ομαλή λειτουργία του δικτύου.

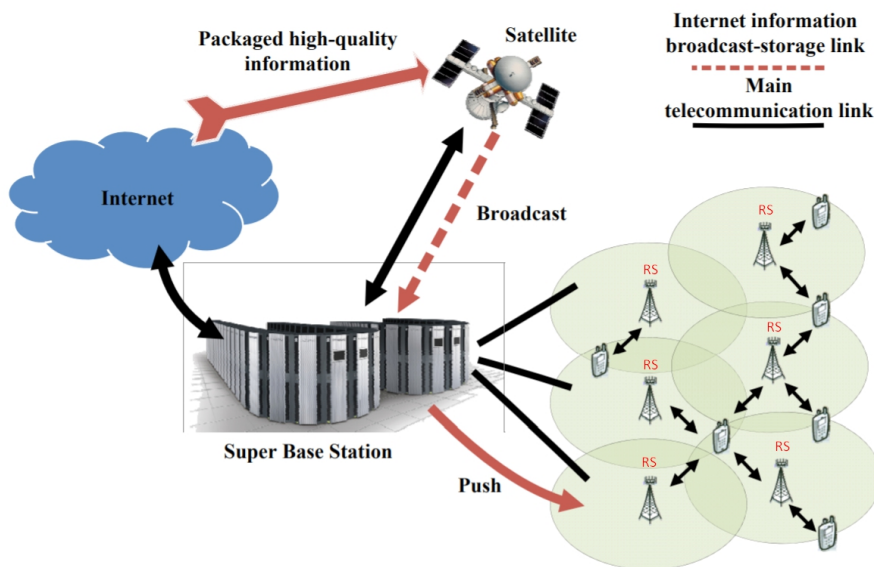
2.2 Αρχιτεκτονική και λειτουργίες του κυψελωτού δικτύου

Αρχικά, πρέπει να επισημανθεί ότι στην παρούσα εργασία δεν μελετάται η συμπεριφορά ενός ad hoc δικτύου (αποκεντρωμένος τύπος ασύρματου δικτύου χωρίς προϋπάρχουσες υποδομές) σε ένα ad hoc γεγονός, αλλά η συμπεριφορά ενός κυψελωτού δικτύου σε ένα ad hoc γεγονός. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να υπάρχουν υποδομές δικτύου στον χώρο S , προκειμένου να μπορέσει ο πάροχος να καλύψει επιτυχώς το ad hoc γεγονός. Για την υλοποίηση του κυψελωτού δικτύου, τοποθετούνται ισχυροί κόμβοι (σταθμοί βάσης) στον χώρο S , οι οποίοι λειτουργούν ως σημεία πρόσβασης για τους εισερχόμενους χρήστες (Access Points- APs). Κάθε ισχυρός κόμβος καλύπτει μια περιοχή του χώρου S και όλοι μαζί πρέπει να επιτυγχάνουν πλήρη κάλυψη του χώρου S και να έχουν χαμηλά επίπεδα παρεμβολών μεταξύ τους. Στους ισχυρούς κόμβους αποδίδονται τηλεπικοινωνιακοί πόροι για να τους διαθέσουν στους εμφανιζόμενους χρήστες που βρίσκονται εντός της εμβέλειάς τους. Δηλαδή, γίνεται τμηματοποίηση του χώρου ενδιαφέροντος σε κυψέλες και σε κάθε κυψέλη (cell) εγκαθίσταται ένας ισχυρός κόμβος για να αναλάβει το φορτίο κίνησης χρηστών που εμφανίζονται σε αυτήν. Ανάλογα με την εμβέλεια του σταθμού βάσης, οι κυψέλες χωρίζονται σε μικροκυψέλες (με ακτίνα κάλυψης μέχρι 2 km) και σε μακροκυψέλες (ακτίνα κάλυψης μέχρι 20 km) [5]. Για το προς σχεδίαση δίκτυο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιούνται μικροκυψέλες.



Σχήμα 2.1: Αρχιτεκτονική κυψελωτού δικτύου, όπου σε κάθε κυψέλη υπάρχει ένας ισχυρός κόμβος που εξασφαλίζει τη συνδεσιμότητα του δικτύου με τους χρήστες που εμφανίζονται σε αυτήν.

Οι ισχυροί κόμβοι ελέγχονται από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο μέσω ενός σταθμού βάσης με αυξημένες υπολογιστικές δυνατότητες (superBaseStation- sBS). Ο sBS μπορεί να βρίσκεται εντός ή εκτός του χώρου που καλύπτουν οι ισχυροί κόμβοι υπό την προϋπόθεση ότι εξασφαλίζεται η συνδεσιμότητα με όλους τους ισχυρούς κόμβους. Ουσιαστικά, οι ισχυροί κόμβοι λειτουργούν ως αναμεταδότες (Relay Station – RS) μεταξύ των χρηστών και του sBS. Μέσω των ισχυρών κόμβων επιτυγχάνεται η ραδιοεπικοινωνία με τους χρήστες του δικτύου. Οι ισχυροί κόμβοι αποτελούν την πρώτη μονάδα του δικτύου με την οποία έρχεται σε επικοινωνία το τερματικό προκειμένου να εξυπηρετηθεί. Βασική τους λειτουργία είναι λήψη και αποστολή δεδομένων από και προς τη ραδιοεπαφή, δηλαδή τον δίαυλο ασύρματης επικοινωνίας. Επιπλέον, μετρούν την ποιότητα της μετάδοσης δεδομένων (σηματοθορυβικός λόγος, ταχύτητα μετάδοσης κτλ.) και προωθούν τις μετρήσεις στον sBS. Στο Σχ. 2.2 παρουσιάζεται η προαναφερθείσα αρχιτεκτονική του δικτύου. [3]



Σχήμα 2.2: Αρχιτεκτονική του προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακού δικτύου.

Ο sBS εκτελεί δύο είδη λειτουργιών:

- λειτουργίες ελέγχου κυκλοφορίας που παράγεται από τους χρήστες
- λειτουργίες διαχείρισης που απαιτούνται από υψηλότερα επίπεδα διαχείρισης δικτύου

Οι λειτουργίες ελέγχου κυκλοφορίας χωρίζονται με τη σειρά τους σε λειτουργίες διαχείρισης σύνδεσης και σε λειτουργίες διαχείρισης κινητικότητας. Οι λειτουργίες διαχείρισης σύνδεσης αφορούν τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν για την αρχική εγκατάσταση σύνδεσης με τον χρήστη και τον έλεγχο της ποιότητάς της. Οι λειτουργίες διαχείρισης κινητικότητας αποσκοπούν στην εξασφάλιση διασύνδεσης του δικτύου με τον χρήστη, καθώς ο χρήστης μετακινείται σε διαφορετικές κυψέλες του δικτύου.

Κάποιες από τις σημαντικότερες λειτουργίες ελέγχου κυκλοφορίας παρουσιάζονται ακολούθως.

- Σηματοδότηση για την εγκατάσταση/απελευθέρωση της σύνδεσης: Με αυτήν τη λειτουργία καθιερώνεται ένας σύνδεσμος μέσω του οποίου μπορεί να επικοινωνήσει το τερματικό με τον sBS.
- Αλλαγή καναλιού: Οι πληροφορίες μεταφέρονται μέσω της ραδιοεπαφής με διάφορους τύπους τηλεπικοινωνιακών καναλιών. Μέσα σε φυσιολογικά πλαίσια κινητικότητας χρηστών, όταν δηλαδή παρατηρείται μέση κινητικότητα χωρίς έντονες διακυμάνσεις, προσφέρεται για τη σύνδεση με ένα τερματικό ένα αποκλειστικό κανάλι για υψηλότερο

ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας (bits/sec). Σε περίπτωση μη ομαλής κυκλοφορίας κίνησης, όταν δηλαδή υπάρχουν εκρήξεις κινητικότητας, ή σε περίπτωση απαίτησης μικρού ρυθμού μετάδοσης κυκλοφορίας, πολλαπλά τερματικά μπορούν να μοιράζονται ένα κοινό κανάλι.

- Ομαλή μεταβίβαση σύνδεσης/ Μεταπομπή (handover): Κατά τη διάρκεια εξυπηρέτησης τους από το δίκτυο, οι χρήστες συχνά μετακινούνται μεταξύ κυψελών που εξυπηρετούνται από διαφορετικούς ισχυρούς κόμβους. Με τη διαδικασία της μεταπομπής, το δίκτυο επιλέγει ένα διαφορετικό ισχυρό κόμβο για την κάλυψη ενός κινούμενου τερματικού, ο οποίος παρέχει καλύτερη συνδεσιμότητα στο τερματικό αυτό. Συγκεκριμένα, ο sBS τερματίζει τη σύνδεση του τερματικού μέσω του ισχυρού κόμβου της κυψέλης από την οποία έφυγε ο χρήστης και εγκαθιστά σύνδεση με το τερματικό μέσω του ισχυρού κόμβου της κυψέλης στην οποία μετακινήθηκε.
- Έλεγχος αποδοχής χρήστη: Αυτός ο έλεγχος γίνεται για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση του δίαυλου ασύρματης επικοινωνίας. Η διαδικασία εγκατάστασης νέας σύνδεσης, οι μεταβιβάσεις σύνδεσης και οι αλλαγές καναλιού υπόκεινται σε αυτόν τον έλεγχο.
- Έλεγχος ισχύος: Αυτή η λειτουργία ρυθμίζει την ισχύ μετάδοσης του σήματος πληροφορίας που μεταφέρεται ανάμεσα στους ισχυρούς κόμβους και το τερματικό. Πρέπει να επιτυγχάνεται ο καλύτερος συνδυασμός καλού σήματος επικοινωνίας και χαμηλής παρεμβολής μεταξύ των ισχυρών κόμβων.
- Έλεγχος συμφόρησης: Όταν ο ραδιοδίαυλος είναι υπερφορτωμένος με πολλές συνδέσεις χρηστών, αυτή η λειτουργία απελευθερώνει εύρος ζώνης μειώνοντας τον ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας ή αποσυνδέοντας υπάρχουσες συνδέσεις χρηστών

Όσον αφορά τις λειτουργίες διαχείρισης που απαιτούνται από υψηλότερα επίπεδα διαχείρισης δικτύου, αυτές αναφέρονται στη διαχείριση και κατανομή των πόρων, στην πρόβλεψη των τύπων υπηρεσιών που θα χρησιμοποιηθούν, στον έλεγχο και τη διόρθωση λαθών που έγιναν στη διαχείριση και κατανομή των πόρων.

[6]

2.3 Η αρχιτεκτονική C-RAN

Η τοπολογία του κυψελωτού δικτύου που περιγράφηκε προηγουμένως έχει ως βάση την αρχιτεκτονική C-RAN (Centralized Radio Access Network). Η αρχιτεκτονική του C-RAN αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία:

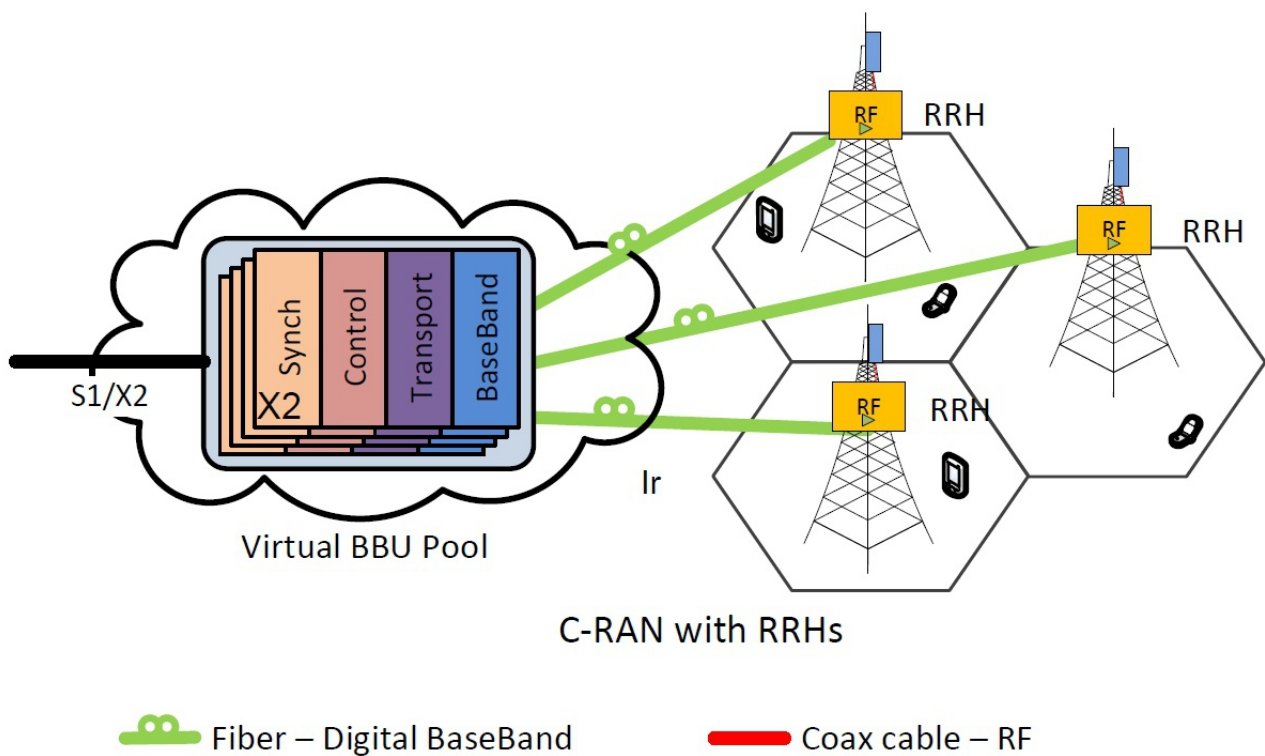
- Μονάδα ραδιοσυχνότητας (λέγεται RRH ή RRU- Remote Radio Unit): Είναι ένας πομποδέκτης μέσω του οποίου συνδέονται ασύρματες συσκευές σε κυψελωτά δίκτυα. Οι λειτουργίες του RRU έχουν να κάνουν με το φυσικό στρώμα μετάδοσης και περιλαμβάνουν τη ψηφιακή επεξεργασία σήματος, την ενίσχυση και το φιλτράρισμα RF του προς εκπομπή σήματος.
- Δεξαμενή Μονάδων επεξεργασίας βασικής ζώνης (BBU Pool- Base Band Unit Pool): Βρίσκεται σε κάποια κεντρική τοποθεσία, όπως σε ένα κέντρο δεδομένων και αποτελείται από πολλαπλές μονάδες επεξεργασίας σήματος, BBUs, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την επεξεργασία των πόρων και τη δυναμική κατανομή τους στα RRUs με βάση τις εκάστοτε ανάγκες του δικτύου. Κάποιες από τις λειτουργίες επεξεργασίας σήματος που κάνει κάθε BBU είναι η κωδικοποίηση, η δειγματοληψία και η διαμόρφωση του σήματος.
- Δίκτυο Μεταφοράς (Transport Network/ Fronthaul): Το δίκτυο μεταφοράς είναι το στρώμα σύνδεσης μεταξύ ενός BBU Pool και ενός συνόλου από RRUs. Το δίκτυο αυτό παρέχει ραδιοδίαυλους με μεγάλο εύρος ζώνης, προκειμένου κάθε BBU να μπορεί χειριστεί τις απαιτήσεις πολλών RRUs. Μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση διαφορετικών τεχνολογιών (οπτικές ίνες, ασύρματη σύνδεση με κυψελωτό δίκτυο κτλ.). Η επικοινωνία με οπτικές ίνες είναι ιδανική για την αρχιτεκτονική C-RAN, καθώς προσφέρει μεγάλο εύρος ζώνης.

Εντούτοις, έρχεται με υψηλό κόστος κατασκευής δικτύου. Από την άλλη πλευρά, η ασύρματη σύνδεση είναι φθηνότερη, αλλά προσφέρει μικρότερο εύρος ζώνης και μεγαλύτερη καθυστέρηση μετάδοσης σήματος σε σύγκριση με τις οπτικές ίνες.

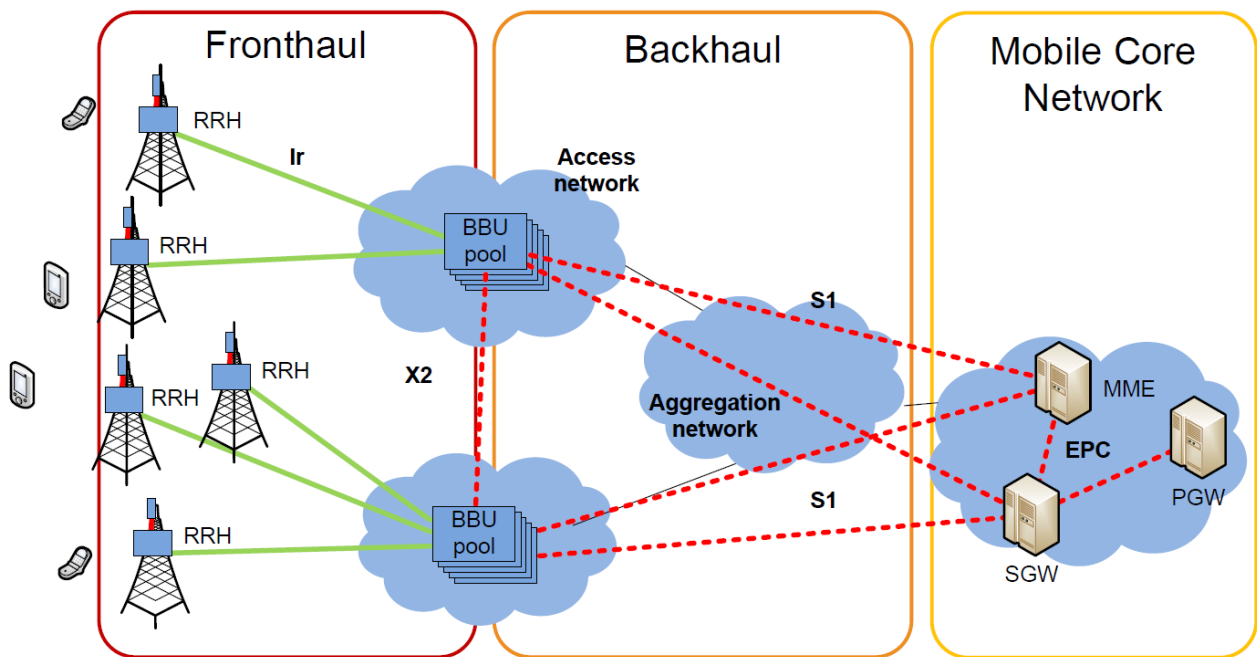
[3], [7]

Σε προηγούμενες αρχιτεκτονικές δικτύων, οι σταθμοί βάσης, οι οποίοι αναλαμβάνουν την εξυπηρέτηση των χρηστών σε καθεμιά από τις κυψέλες του δικτύου, έχουν μια μονάδα ραδιοσυχνότητας (Radio Unit-RU) και μια μονάδα επεξεργασίας σήματος βασικής ζώνης (BBU-Base Band Unit) έκαστος. Στην αρχιτεκτονική C-RAN οι μονάδες επεξεργασίας βασικής ζώνης, BBU, συγκεντρώνονται σε μια οντότητα, την BBU Pool, η οποία περιγράφηκε προηγουμένως. Δηλαδή, με την αρχιτεκτονική C-RAN οι σταθμοί βάσης απαλλάσσονται από τις λειτουργίες επεξεργασίας και κατανομής των πόρων, οι οποίες γίνονται πλέον κεντρικά στο BBU pool. Σύμφωνα με μελέτη του China Mobile Research Institute που έγινε το 2011 σε μια μεσαίου μεγέθους κάλυψη αστικού δικτύου (περίπου 25 km^2) με μεγάλη πυκνότητα κίνησης και στην οποία ορίστηκε η μέση απόσταση μεταξύ των σταθμών βάσης ίση με 500 m, προέκυψε ότι μια BBU pool που μπορεί να καλύψει ολόκληρη την περιοχή πρέπει να υποστηρίζει περίπου 100 σταθμούς βάσης [8].

[3], [9]



Σχήμα 2.3: Αρχιτεκτονική δικτύου C-RAN.



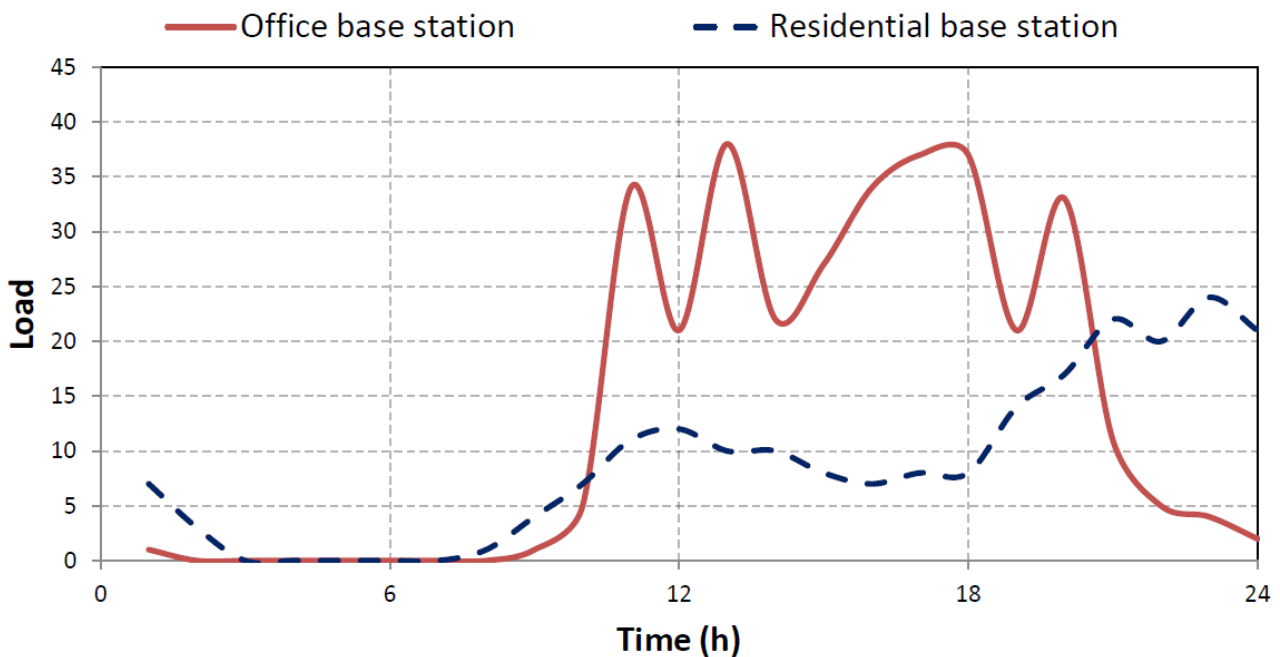
Σχήμα 2.4: Επισκόπηση δικτύου LTE αρχιτεκτονικής C-RAN.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 2.4, το fronthaul μέρος, το οποίο, όπως προαναφέρθηκε, συνδέει την πλευρά των RRUs των σταθμών βάσης με τους επεξεργαστές υψηλής απόδοσης της BBU pool, υλοποιείται με οπτικές ζεύξεις χαμηλής καθυστέρησης (low latency) και μεγάλου εύρους ζώνης. Με τον τρόπο αυτό, υπάρχει γρήγορη επικοινωνία των RRUs με τις αντίστοιχες BUs και έτσι επιτυγχάνεται γρήγορη απόκριση του δικτύου, αφού αυτές οι δύο μονάδες (RUs και Bus) είναι απαραίτητες για την εξυπηρέτηση του χρήστη. Το backhaul μέρος του δικτύου συνδέει την BBU pool με το δίκτυο κορμού (MCN- Mobile Core Network). Η σύνδεση μπορεί να υλοποιηθεί με καλώδιο Ethernet. Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως στο fronthaul μέρος του δικτύου η καθυστέρηση μετάδοσης είναι μεγαλύτερης σημασίας σε σχέση με το backhaul μέρος, αφού βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με την καθυστέρηση εξυπηρέτησης των χρηστών. Για τον λόγο αυτό, δεν είναι απαραίτητο να μπει δίκτυο οπτικών ζευξέων για την υλοποίηση του backhaul μέρους.

Τα πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής C-RAN σε σχέση με προηγούμενες αρχιτεκτονικές δικτύου είναι τα εξής:

1) Προσαρμοστικότητα σε μη ομοιόμορφη τηλεπικοινωνιακή κίνηση και επεκτασιμότητα

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι χρήστες των κυβελωτών δικτύων κινούνται μεταξύ διαφορετικών περιοχών, για παράδειγμα από τις περιοχές κατοικίας προς τις περιοχές εργασίας και αντίστροφα. Αυτή η συμπεριφορά των χρηστών ονομάζεται παλιρροϊκό φαινόμενο (tidal effect). Οι πόροι αποδίδονται στους σταθμούς βάσης συνήθως με βάση τον φόρτο κίνησης που προκύπτει κατά τις ώρες αιχμής των κυβελών που καλύπτουν. Ως εκ τούτου, όταν ο μεγάλος όγκος των χρηστών μετακινείται σε διαφορετικές περιοχές κατά τη διάρκεια της ημέρας προκύπτει ένα μεγάλο ποσοστό αχρησιμοποίητων πόρων στις περιοχές από τις οποίες έχουν απομακρυνθεί οι χρήστες. Στο Σχ. 2.5 παρουσιάζεται το πώς μεταβάλλεται το φορτίο του δικτύου κατά τη διάρκεια της ημέρας στις περιοχές εργασίας και στις περιοχές κατοικίας.



Σχήμα 2.5: Ημερήσιο φορτίο σταθμών βάσης σε περιοχές εργασίας (Office BS) και σε περιοχές κατοικίας (Residential BS).

Το τηλεπικοινωνιακό φορτίο των σταθμών βάσης σε ώρες αιχμής ενδέχεται να είναι και 10 φορές μεγαλύτερο σε σύγκριση με το αντίστοιχο φορτίο σε ώρες χαμηλής ζήτησης. Η κατανομή της ημερήσιας τηλεπικοινωνιακής κίνησης διαφέρει από κυψέλη σε κυψέλη και οι μέγιστες τιμές της κίνησης προκύπτουν σε διαφορετικές ώρες της ημέρας. Δεδομένου ότι στη C-RAN η επεξεργασία βασικής ζώνης για πολλαπλές κυψέλες γίνεται συγκεντρωτικά σε μια οντότητα, την BBU pool, το συνολικό ποσοστό χρησιμοποίησης των μονάδων επεξεργασίας βασικής ζώνης μπορεί να βελτιωθεί. Η απαιτούμενη χωρητικότητα του συνόλου των μονάδων επεξεργασίας βασικής ζώνης που είναι συγκεντρωμένες στη BBU pool πρόκειται να είναι μικρότερη σε σχέση με το άθροισμα των επιμέρους χωρητικότητων εκάστου των ενεργών σταθμών βάσης όταν δεν ακολουθείται η αρχιτεκτονική C-RAN. Ο λόγος του αθροίσματος των χωρητικότητων των ανεξαρτήτως λειτουργούντων σταθμών βάσης προς την απαιτούμενη χωρητικότητα της BBU pool ονομάζεται κέρδος στατιστικής πολυπλεξίας (statistical multiplexing gain). Μάλιστα μια ανάλυση που έγινε το 2012 για το στατιστικό κέρδος πολυπλεξίας έδειξε ότι ο συνολικός αριθμός των BBU's σε ένα δίκτυο που χρησιμοποιεί αρχιτεκτονική C-RAN και καλύπτει μια αστική περιοχή μπορεί να μειωθεί κατά 75% σε σχέση με τον αριθμό BBU's που θα χρησιμοποιούνταν σε ένα δίκτυο που χρησιμοποιούσε παλαιότερο μοντέλο σταθμού βάσης (όπου κάθε σταθμός βάσης είναι εφοδιασμένος με BBU και RRU) [10]. Το κέρδος στατιστικής πολυπλεξίας αυξάνεται γραμμικά με το μέγεθος του δικτύου και είναι υψηλότερο όταν οι σταθμοί βάσης αντιμετωπίζουν υψηλότερη ένταση κίνησης.

Παράλληλα, η αρχιτεκτονική C-RAN μπορεί να εφαρμοστεί με τρόπο που επιτρέπει στο δίκτυο να προσαρμοστεί καλύτερα σε περιπτώσεις μη ομοιόμορφης τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Το κέρδος στατιστικής πολυπλεξίας εξαρτάται από την κατανομή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και μπορεί να βελτιστοποιηθεί με την προσαρμογή της συνδεσμολογίας των RRUs με τα BBU's στην κατανομή που εμφανίζει η τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί συνδέοντας RRUs, στα οποία αναμένεται συγκεκριμένος τρόπος κίνησης χρηστών, σε αντίστοιχα BBU pools, τα οποία έχουν χωρητικότητα που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που αναμένονται.

Η αρχιτεκτονική C-RAN χαρακτηρίζεται από επεκτασιμότητα (scalability). Για παράδειγμα, για τη

βελτίωση κάλυψης του χώρου ενδιαφέροντος (χώρος S), απαιτείται απλά να συνδεθούν νέα RRUs (δηλαδή νέα APs) στην ήδη υπάρχουσα BBU pool. Στη συνέχεια, για την ενίσχυση της χωρητικότητας του δικτύου, οι ήδη ενεργές κυψέλες μπορούν να διαιρεθούν ή να προστεθούν νέα RRUs, αυξάνοντας έτσι την ευελιξία του δικτύου. Δηλαδή, η C-RAN αρχιτεκτονική καθιστά εύκολη την υλοποίηση νέων κυψελών, αφού απαιτείται να εγκατασταθεί μόνο μια συσκευή, το RRU, σε κάθε νέα κυψέλη και όχι ένα συμβατικός σταθμός βάσης, ο οποίος είναι πολύ μεγαλύτερη κατασκευή. Αν μετά την επέκταση του δικτύου απαιτείται αύξηση της συνολικής του χωρητικότητας, τότε αυτό επιτυγχάνεται με την αναβάθμιση της επεξεργαστικής ισχύος της BBU pool. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με την εισαγωγή επιπρόσθετων BBUs στη δεξαμενή είτε με την αντικατάσταση υπάρχοντων BBUs με ισχυρότερα.

2) Ενεργειακή αποδοτικότητα και μείωση κόστους

Με τη χρησιμοποίηση της αρχιτεκτονικής C-RAN, η ενεργειακή κατανάλωση και κατά συνέπεια το οικονομικό κόστος του δικτύου μπορούν να μειωθούν σημαντικά. Συγκεκριμένα, το 80% του κεφαλαιουχικού κόστους (CAPEX) ενός δικτύου κινητών επικοινωνιών δαπανάται στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN), το οποίο σημαίνει ότι τα κόστη του RAN είναι ο βασικός παράγοντας που πρέπει να μελετηθεί για την μείωση του συνολικού κόστους. Η ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται κυρίως από τους ενισχυτές ισχύος, με τους οποίους επιτυγχάνεται συνεχής παροχή ισχύος στα RRUs και στα BBUs και από το σύστημα κλιματισμού αυτών των μονάδων. Με βάση τη μελέτη που έγινε το 2011 από το China Mobile Research Institute, το 41% του λειτουργικού κόστους του δικτύου (OPEX) σε μια κυψέλη δαπανάται για ηλεκτρική ενέργεια [8]. Η χρήση της C-RAN οδηγεί σε μείωση του κόστους κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς, λόγω του κέρδους στατιστικής πολυπλεξίας, ο αριθμός των BBUs που χρησιμοποιούνται σε ένα δίκτυο με C-RAN αρχιτεκτονική είναι μειωμένος σε σχέση με τον αντίστοιχο αριθμό BBUs σε ένα δίκτυο με συμβατική RAN αρχιτεκτονική. Επιπλέον, σε χρονικές περιόδους χαμηλής τηλεπικοινωνιακής κίνησης, όπως κατά τις νυκτερινές ώρες, ορισμένες υπομονάδες BBUs της BBU pool μπορούν να παραμείνουν ανενεργές χωρίς να επηρεάζουν τη συνολική κάλυψη του δικτύου. Η ψύξη των μονάδων του δικτύου είναι υπεύθυνη για το 46% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε μια κυψέλη του δικτύου [8]. Στην αρχιτεκτονική C-RAN, σε κάθε AP υπάρχει μόνο ένα RRU, το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω στον ιστό της κεραίας, θέση που επιτρέπει τη φυσική ψύξη του. Επίσης, η συγκέντρωση όλων των BBUs σε μια κεντρική δεξαμενή μειώνει την ανάγκη για εγκατάσταση και λειτουργία μεγάλης μονάδας ψύξης σε κάθε AP κυψέλης, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας των APs του δικτύου. Συνολικά, η C-RAN συμβάλλει στην εξοικονόμηση του 15% του κεφαλαιουχικού (CAPEX) και του 50% του λειτουργικού (OPEX) κόστους του δικτύου σε σχέση με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική RAN. Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι η υλοποίηση της C-RAN έρχεται με το υψηλό κόστος μίσθωσης οπτικών ινών (fiber leasing) για τη σύνδεση μεταξύ των RRUs και των BBUs προκειμένου να υπάρχει πολύ μικρή καθυστέρηση (low latency).

3) Αύξηση της ρυθμαπόδοσης και μείωση της καθυστέρησης απόκρισης του δικτύου

Τα δίκτυα 4ης γενιάς LTE διαθέτουν εξελιγμένα σχήματα εξάλειψης της διακυβελικής παρεμβολής, όπως το eICIC (Enhanced Inter-cell Interference Coordination) και το Comp (Coordinated Multipoint). Το eICIC εισάγει την έννοια του σχεδόν κενού υποπλαίσιου (ABS- Almost Blank Subframe), τα οποία αποτρέπουν να υπάρξουν παρεμβολές στη σύνδεση ενός τερματικού σε μια μικροκυψέλη από τη γειτονική μακροκυψέλη. Συγκεκριμένα, οι δύο αυτές κυψέλες χρησιμοποιούν το ίδιο φάσμα συχνοτήτων αλλά σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (υποπλαίσια – subframes). Το Comp κάνει βέλτιστη χρησιμοποίηση του δικτύου με το να παρέχει σύνδεση σε πολλαπλούς σταθμούς βάσης ταυτόχρονα, περικλείοντας τις κυψέλες τους σε ένα Comp set. Με τον τρόπο αυτό,

εντός ενός Comp set παρέχεται η δυνατότητα μεταφοράς πόρων με σκοπό την αποδοτικότερη κατανομή πόρων στους σταθμούς βάσης. Εφαρμόζοντας την αρχιτεκτονική C-RAN με το να συνδεθούν όλες οι κυψέλες ενός Comp set με ένα BBU pool, μια ενιαία οντότητα γίνεται υπεύθυνη για την επεξεργασία σήματος εντός του Comp set και ως αποτέλεσμα μπορεί να επιτευχθεί αυστηρότερη αλληλεπίδραση μεταξύ των σταθμών βάσης. Επομένως, οι διακυβελικές παρεμβολές μπορούν να διατηρηθούν σε χαμηλά επίπεδα και κατά συνέπεια η ρυθμαπόδοση (throughput) μπορεί να αυξηθεί. Επιπλέον, με την αρχιτεκτονική C-RAN, ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση μιας μεταπομπής (handover) είναι μειωμένος, καθώς οι αναγκαίες διαδικασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν ταχέως από το BBU pool, χωρίς να χρειαστεί να μεσολαβήσει επικοινωνία μεταξύ των δύο σταθμών βάσης. Επίσης, ο συνολικός όγκος πληροφοριών σηματοδότησης που αποστέλλονται στο δίκτυο κορμού (MCN) είναι μειωμένος, αφού οι πληροφορίες συγκεντρώνονται πρώτα στο BBU pool.

4) Ευκολία αναβάθμισης και συντήρησης του δικτύου

Με τη συγκέντρωση πολλών μονάδων επεξεργασίας βασικής ζώνης σε μια ενιαία οντότητα, το BBU pool, διευκολύνεται σημαντικά η συντήρηση του δικτύου. Με αυτόματη ρύθμιση της BBU pool μπορούν να εξομαλυνθούν οι αιχμές χωρητικότητας, συμβάλλοντας στη δημιουργία ενός αυτόνομου δικτύου. Ακόμα και στις περιπτώσεις αστοχιών ή βλαβών του υλικού εξοπλισμού (hardware failure), η ανθρώπινη παρέμβαση περιορίζεται μόνο στις περιοχές όπου έχουν εγκατασταθεί BBU pools. Στα παραδοσιακά δίκτυα πρόσβασης (RAN), αντίθετα, ενδέχεται να προκύψει ανάγκη συντήρησης σε κάθε σταθμό βάσης. Συνεπώς, με την αρχιτεκτονική C-RAN εισάγεται η λογική τοποθέτησης του υλικού εξοπλισμού σε λίγες κεντρικές θέσεις, κάνοντας έτσι πολύ ευκολότερη τη διαχείρισή του. Με τη συγκέντρωση όλων των BBUs στην κοινή δεξαμενή γίνεται ευκολότερη και η ανανέωση της ανανέωσης της τεχνολογίας των επεξεργαστών (CPUs) των μονάδων αυτών σε σύγκριση με την περίπτωση όπου τα BBUs είναι διασκορπισμένα στους σταθμούς βάσης των διαφόρων κυψελών του δικτύου. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική C-RAN είναι συμβατή με την τεχνική Software Defined Radio (SDR), η οποία διευκολύνει την υλοποίηση σε κώδικα πολλών λειτουργιών ραδιοπρόσβασης, όπως διαμόρφωση/ αποδιαμόρφωση, παραγωγή σήματος, κωδικοποίηση και πρωτόκολλα διασύνδεσης στρωμάτων. Η BBU pool μπορεί να υποστηρίξει διαφορετικά πρότυπα ραδιοπρόσβασης (2G/ 3G/4G/4G+) υλοποιημένα και ρυθμιζόμενα από λογισμικό (software enabled multi-standard communications). Επομένως, η μετάβαση σε λειτουργία σε νέες ζώνες συχνοτήτων και σε νέα πρότυπα μπορεί να υλοποιηθεί ομαλά μέσω μιας αναβάθμισης λογισμικού, χωρίς να χρειαστεί αγορά και εγκατάσταση νέου υλικού εξοπλισμού, αποφεύγοντας έτσι πρόσθετα κόστη και χρονοβόρες διαδικασίες εγκατάστασης.

Συνοψίζοντας από τα ανωτέρω, ο sBS που χρησιμοποιείται στο δίκτυο της προσομοίωσης αναλαμβάνει το ρόλο του BBU pool που χρησιμοποιείται στην αρχιτεκτονική C-RAN, κατανέμοντας τους πόρους στα RRUs ή APs που ελέγχει, λαμβάνοντας υπόψη την αναμενόμενη χωροχρονική συμπεριφορά των χρηστών.
[3], [9]

2.4 Ανακατανομή των πόρων

Ο sBS αναλαμβάνει την κατανομή πόρων στους σταθμούς βάσης, προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες των χρηστών που εμφανίζονται στις περιοχές των σταθμών βάσης που ελέγχει. Οι τηλεπικοινωνιακοί πόροι που αποδίδονται σε κάθε σταθμό βάσης του δικτύου μπορούν να διατεθούν μόνο στους χρήστες που είναι εντός της εμβέλειάς τους. Συνήθως, η κατανομή των χρηστών στον χώρο κάλυψης είναι ανομοιογενής, δηλαδή υπάρχουν περιοχές του χώρου S με μεγαλύτερη συγκέντρωση χρηστών σε σύγκριση με τις υπόλοιπες. Κατά συνέπεια, κάθε σταθμός

βάσης αναλαμβάνει διαφορετικό ποσοστό του φορτίου του δικτύου. Εάν, λοιπόν, αποδοθεί ο ίδιος αριθμός πόρων σε κάθε σταθμό βάσης, θα προκύψουν περιπτώσεις με υπερφορτωμένους σταθμούς βάσης, οι οποίοι δεν έχουν αρκετούς πόρους για να εξυπηρετήσουν τον μεγάλο αριθμό χρηστών που εμφανίζονται στην περιοχή τους και παράλληλα θα υπάρχουν υποχρησιμοποιούμενοι σταθμοί βάσης, στους οποίους περισσεύουν πόροι επειδή εμφανίζονται λίγοι χρήστες στην περιοχή τους. Συνεπώς, ο sBS πρέπει να προσαρμόζει την κατανομή πόρων στην κατανομή των χρηστών στον χώρο, αποδίδοντας περισσότερους πόρους σε ισχυρούς κόμβους στις περιοχές των οποίων αναμένεται μεγάλος αριθμός χρηστών κατά τη διάρκεια του ad hoc γεγονότος. Οι συναρτήσεις κατανομής με βάση τις οποίες γίνεται κατανομή πόρων από τον sBS στους σταθμούς βάσης στηρίζονται σε μοντέλα κίνησης χρηστών, τα οποία προβλέπουν σε ποιες περιοχές ενός χώρου ενδιαφέροντος συγκεντρώνονται οι περισσότεροι χρήστες. Αν οι προβλέψεις για την αναμενόμενη κίνηση των χρηστών σε ένα ad hoc γεγονός είναι λανθασμένες, τότε ενδέχεται να προκύψουν και πάλι περιπτώσεις υπερφορτωμένων σταθμών βάσης και υποχρησιμοποιούμενων σταθμών βάσης, καθώς οι πόροι δεν θα έχουν μοιραστεί στους σταθμούς βάσης με τρόπο που να συμβαδίζει με τις τηλεπικοινωνιακές ανάγκες που προκύπτουν κατά την άφιξη των χρηστών. Η πρόβλεψη της κατανομής των χρηστών σε μεγάλους χώρους, όπως για παράδειγμα σε ένα εμπορικό κέντρο ή σε ένα πάρκο μπορεί να γίνει μόνο προσεγγιστικά. Σε κάθε περίπτωση θα υπάρχουν μικρές ή μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ της αναμενόμενης κατανομής χρηστών στους σταθμούς βάσης και της πραγματικής. Επιπλέον, ακόμα και αν οι αρχικές προβλέψεις της κίνησης των χρηστών είναι σωστές, σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον δικτύου η συμπεριφορά των χρηστών σε ένα ad hoc γεγονός (δηλαδή σε ποια σημεία του χώρου ενδιαφέροντος συγκεντρώνονται και οι συνολικές απαιτήσεις πόρων που έχουν) μεταβάλλονται με τον χρόνο. Συνεπώς, το δίκτυο πρέπει να παρακολουθεί την κίνηση των χρηστών κατά τη διάρκεια της κάλυψης ενός ad hoc γεγονότος και στην περίπτωση όπου οι αποκλίσεις είναι σημαντικές, καλείται να το διαπιστώσει εγκαίρως και να κάνει ανακατανομή πόρων με βάση την πραγματική κίνηση χρηστών. Με αυτόν τον τρόπο, το δίκτυο καθίσταται ικανό να εξυπηρετήσει ικανοποιητικό ποσοστό χρηστών στις περιοχές με μεγάλη συγκέντρωση χρηστών και να αποφύγει την περίσσεια πόρων σε περιοχές με μικρότερη συγκέντρωση χρηστών. Συνεπώς, η ανακατανομή πόρων είναι μια σημαντική λειτουργία για την προσαρμογή του δικτύου στις τηλεπικοινωνιακές ανάγκες που προκύπτουν κατά τη διάρκεια άφιξης των χρηστών.

Από την άλλη πλευρά όμως η ανακατανομή πόρων είναι μια διαδικασία που προκαλεί και επιβάρυνση στην απόδοση του δικτύου. Ανακατανομή των πόρων του δικτύου συνεπάγεται μη διαθεσιμότητα του δικτύου κατά τη διάρκειά της. Επιπλέον, μόλις ολοκληρωθεί η ανακατανομή πόρων, οι συνδέσεις εκείνης της περιόδου χρειάζονται ορισμένο χρόνο προσαρμογής, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Όπως θα αναλυθεί στο 7ο κεφάλαιο, οι διάφορες υπηρεσίες που χρησιμοποιούνται από τους χρήστες διαφοροποιούνται ως προς τις απαιτήσεις που έχουν από το δίκτυο (ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, κτλ.). Αυτό σημαίνει ότι η σύνδεση κάθε χρήστη έχει διαφορετική ανοχή σε ενδεχόμενη ανακατανομή πόρων, ανάλογα με τον τύπο υπηρεσίας που χρησιμοποιείται. Οι τρεις βασικές παράμετροι που καθορίζουν τον βαθμό στον οποίο επηρεάζεται η σύνδεση του χρήστη από την ανακατανομή πόρων είναι οι εξής:

- Η ευελιξία της σύνδεσης σε ανακατανομές.
- Η ευαισθησία της σύνδεσης σε διακοπή της (drop penalty) σε σύγκριση με την ευαισθησία της σε μείωση του εύρους ζώνης.
- Η ευαισθησία της σύνδεσης στη συχνότητα των ανακατανομών πόρων.

Όσον αφορά την ευελιξία της σύνδεσης σε ανακατανομές, προκύπτουν οι εξής τρεις κατηγορίες συνδέσεων με χρήστες:

1η κλάση συνδέσεων: Αυτή η κλάση αντιπροσωπεύει τις μη ευέλικτες συνδέσεις. Οι συνδέσεις αυτές απαιτούν συνεχή παροχή συγκεκριμένου αριθμού πόρων για την επιτυχή ολοκλήρωσή τους. Αυτό σημαίνει ότι από τη στιγμή που οριστεί η απαιτούμενη ποσότητα πόρων, η σύνδεση δεν αποδέχεται λιγότερους πόρους σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Αν κατά τη διάρκεια της σύνδεσης το δίκτυο δεν μπορεί να εγγυηθεί την παροχή της αρχικής ποσότητας πόρων, τότε η σύνδεση διακόπτεται πρόωρα (connection drop) και όσοι πόροι διατέθηκαν σε αυτήν μέχρι εκείνη τη στιγμή πάνε χαμένοι. Δηλαδή, η αποδοχή σύνδεσης 1ης κλάσης με αρχική χρησιμοποίηση του δικτύου (το παρεχόμενο εύρος ζώνης από το δίκτυο) ίση με u_{init} σημαίνει ότι οποιαδήποτε μείωση εύρους ζώνης προκύψει κατά τη διάρκειά της προκαλεί τη διακοπή της. Εφόσον η σύνδεση δεν διακοπεί, η συνολική χρησιμοποίηση του δικτύου κατά τη διάρκεια της σύνδεσης, $u_{i_{ολισή}}$, ισούται με:

$$u_{i_{ολισή}} = u_{init} * duration \quad (2.1)$$

, όπου duration είναι η χρονική διάρκεια της σύνδεσης.

Παραδείγματα τέτοιου τύπου συνδέσεων είναι real time εφαρμογές, critical control data, real time data streams (εφαρμογές σε δίκτυα αισθητήρων).

2η κλάση συνδέσεων: Αυτή η κλάση αντιπροσωπεύει τις ημι-ευέλικτες συνδέσεις που αφορούν εφαρμογές στις οποίες η ποιότητα εξυπηρέτησης από το δίκτυο κρίνεται από τη χειρότερη στιγμή της σύνδεσης, δηλαδή από τη στιγμή με το μικρότερο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Με βάση τη χαμηλότερη χρησιμοποίηση του δικτύου, $u_{i_{min}}$, λοιπόν, υπολογίζεται η συνολική χρησιμοποίηση του δικτύου κατά τη διάρκεια της σύνδεσης:

$$u_{i_{ολισή}} = u_{i_{min}} * duration \quad (2.2)$$

Παραδείγματα τέτοιων συνδέσεων είναι το κατέβασμα video και το online gaming. Σε αντίθεση με τις συνδέσεις κλάσης 1, όταν μειωθεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης δεν διακόπτεται η σύνδεση. Αν, όμως, λόγω της μείωσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης, η ποιότητα της σύνδεσης χειροτερεύσει αισθητά, τα αποτελέσματα της ποιότητας σύνδεσης δεν μπορούν να καλυτερεύσουν στη συνέχεια, καθώς αυτά αντιπροσωπεύουν τη χειρότερη στιγμή κατά τη διάρκεια της σύνδεσης. Για παράδειγμα, οι χρήστες συχνά θυμούνται τη χειρότερη ποιότητα εικόνας κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης ενός video στο διαδίκτυο (video streaming).

3η κλάση συνδέσεων: Αυτή η κλάση αντιπροσωπεύει τις πλήρως ευέλικτες συνδέσεις, οι οποίες δεν απαιτούν συνεχή παροχή συγκεκριμένης ποσότητας πόρων και δεν επηρεάζονται από μειώσεις ή αυξήσεις του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Η συσσωρευμένη χρησιμοποίηση του δικτύου είναι το άθροισμα όλων των στιγμιαίων χρησιμοποιήσεων του δικτύου καθ' όλη τη διάρκεια της σύνδεσης, δηλαδή στις συνδέσεις 3ης κλάσης ισχύει ότι:

$$u_{i_{ολισή}} = \int_0^{duration} u_i(t) dt \quad (2.3)$$

Παραδείγματα τέτοιας κλάσης συνδέσεων είναι η αποστολή e-mail, η μεταφορά αρχείων και κάθε σύνδεση που ανήκει στην κατηγορία συνδέσεων best effort. Οι συνδέσεις best effort αφορούν υπηρεσίες του δικτύου στις οποίες το δίκτυο δεν εγγυάται ότι η σύνδεση διατηρεί συγκεκριμένα επίπεδα ποιότητας κατά τη διάρκειά της. Αυτό σημαίνει ότι ανάλογα με το φορτίο του ραδιοδιαύλου η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, η καθυστέρηση απόκρισης του δικτύου και η συχνότητα απώλειας πακέτων μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της σύνδεσης, χωρίς να προκαλούν τη διακοπή της.

[6]

Σε περίπτωση διακοπής της σύνδεσης πριν ολοκληρωθεί η εξυπηρέτηση του χρήστη (connection drop), η συνολική χρησιμοποίηση του δικτύου από τον χρήστη μηδενίζεται. Αυτό σημαίνει ότι όσοι πόροι δόθηκαν μέχρι εκείνη τη στιγμή από το δίκτυο για τη συγκεκριμένη σύνδεση πάνε χαμένοι, αφού δεν ολοκληρώνεται η εξυπηρέτηση του χρήστη. Η 1η κλάση συνδέσεων είναι η μόνη από τις

3 κλάσεις που είναι υποκείμενη στο ενδεχόμενο διακοπής σύνδεσης.

Όπως προαναφέρθηκε, οι ευέλικτες εφαρμογές υπηρεσιών (συνδέσεις 3ης κλάσης) μπορούν να προσαρμοστούν σε αυξομειώσεις του διατιθέμενου εύρου ζώνης. Το χαρακτηριστικό αυτό τις καθιστά κατάλληλες για περιπτώσεις δυναμικής συμπεριφοράς δικτύου όπου γίνονται πολύ συχνά ανακατανομές πόρων για να προσαρμοστεί το δίκτυο σε διαρκώς μεταβαλλόμενη συμπεριφορά χρηστών. Ακόμα, όμως, και στην περίπτωση αυτών των συνδέσεων απαιτείται ένα χρονικό διάστημα (χρόνος προσαρμογής- adaptation time) προκειμένου να προσαρμοστούν οι συνδέσεις στα νέα δεδομένα του δικτύου μετά από την ολοκλήρωση μιας ανακατανομής πόρων. Συγκεκριμένα, κάποιοι αλγόριθμοι για την κωδικοποίηση, την κρυπτογράφηση και τη συμπίεση της ανταλλασσόμενης πληροφορίας με το δίκτυο ενδέχεται να αλλάξουν και κάποιοι υπολογισμοί να πρέπει να επανεκκινηθούν.

Η εκτέλεση πολύ συχνών ανακατανομών ενδέχεται να οδηγήσει σε χειρότερη ποιότητα εξυπηρέτησης σε σύγκριση με το να διατηρηθεί η προηγούμενη κατανομή πόρων και να είναι λιγότερο αποδοτική η αξιοποίησή τους, αλλά να παρέχονται σταθερά από το δίκτυο. Συνεπώς, για να αποφευχθεί αυτό το σενάριο, πρέπει να οριστεί η ελάχιστη συχνότητα με την οποία το δίκτυο μπορεί να εκτελεί ανακατανομές πόρων. Εφαρμόζεται, λοιπόν, ένα κριτήριο που υπαγορεύει τα χρονικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών ανακατανομών πόρων να μην είναι μικρότερα από τον χρόνο προσαρμογής των συνδέσεων στις ανακατανομές. Διαφορετικά, θα προκύψουν περιπτώσεις όπου μέχρι να προσαρμοστεί το δίκτυο στη μια ανακατανομή θα μεσολαβεί κι άλλη.

Επιπλέον, έχοντας πλέον ορίσει την ελάχιστη αποδεκτή συχνότητα ανακατανομών, πρέπει να τεθεί και ένα κριτήριο με βάση το οποίο να απαιτείται η απόκλιση της πραγματικής κατανομής χρηστών στον χώρο από την αναμενόμενη να ξεπερνά κάποια επίπεδα, προκειμένου να εκτελεστεί ανακατανομή πόρων. Ο τρόπος με τον οποίον καθορίζονται αυτά τα επίπεδα θα αναλυθεί στο 3ο Κεφάλαιο. Με το κριτήριο αυτό αποφεύγονται περιττές ανακατανομές πόρων.

Κεφάλαιο 3

Μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος δυναμικής κατανομής πόρων

3.1 Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία ενός μοντέλου λειτουργίας δικτύου, στο οποίο ο sBS να κατανέμει δυναμικά τους πόρους στους ισχυρούς κόμβους που καλύπτουν τον χώρο ενδιαφέροντος, S , προσεγγίζοντας έτσι ικανοποιητικά την πραγματική ζήτηση πόρων κατά τη διάρκεια της κάλυψης ενός ad hoc γεγονότος. Για τον σκοπό αυτό, κατασκευάστηκε ένας αλγόριθμος, τα βήματα του οποίου θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο, για την προσομοίωση της άφιξης χρηστών και της λειτουργίας του δικτύου με δυναμική κατανομή πόρων. Προκειμένου, όμως, να επιτευχθεί αλγοριθμική προσέγγιση του προβλήματος κατανομής πόρων πρέπει να προηγηθεί η ανάλυση των μαθηματικών μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των εξής παραμέτρων:

- Ο τρόπος με τον οποίο οι χρήστες κατανέμονται στον χώρο S κατά τη διάρκεια του ad hoc γεγονότος.
- Το πόσο συχνά θα πρέπει να ελέγχει το δίκτυο την κατανομή των χρηστών στον χώρο για να λάβει αντιπροσωπευτική εικόνα σε ποιες περιοχές υπάρχει μεγαλύτερη ζήτηση πόρων.
- Ο τρόπος με τον οποίον να μπορεί να διακρίνει το δίκτυο αν υπάρχει ανάγκη ανακατανομής πόρων.

3.2 Επιλογή χωροχρονικού μοντέλου άφιξης χρηστών

Καταρχάς, για τη μαθηματική περιγραφή της άφιξης των χρηστών στο προς σχεδίαση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, θα χρησιμοποιηθεί η κανονική σημειακή διαδικασία Poisson. Ως σημειακή διαδικασία ορίζεται μια τυχαία συλλογή σημείων, τα οποία βρίσκονται σε ένα χώρο S . Καθένα από αυτά τα σημεία μπορεί να αντιπροσωπεύει τη χρονική στιγμή ή/ και τη θέση ενός γεγονότος. Σε περίπτωση που το κάθε σημείο αντιστοιχεί σε μια μόνο πληροφορία (στη χρονική στιγμή ή σε μια διάσταση από τις συντεταγμένες) ενός γεγονότος, τότε η σημειακή διαδικασία είναι μονοδιάστατη. Γίνεται η υπόθεση, λοιπόν, για μια χρονική σημειακή διαδικασία, η οποία είναι μονοδιάστατη, αφού αντιπροσωπεύει μόνο τη χρονική στιγμή πραγματοποίησης ενός γεγονότος. Η χρονική σημειακή διαδικασία είναι κανονική όταν ορίζεται κατά τρόπο ώστε η πιθανότητα πραγματοποίησης ενός γεγονότος μέσα στο χρονικό παράθυρο $[t, t+\Delta t)$ να περιγράφεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\Pr(\text{να συμβεί ένα γεγονός στο διάστημα } [t, t + \Delta t) \mid N_t, w_t) = \mu(t; N_t, w_t) \Delta t + o(t, \Delta t) \quad (3.1)$$

$$\Pr(\text{να συμβούν δύο ή περισσότερα γεγονότα στο διάστημα } [t, t + \Delta t) \mid N_t, w_t) = o(t, \Delta t) \quad (3.2)$$

, όπου

N_t : το πλήθος των γεγονότων που συνέβησαν πριν από τη χρονική στιγμή t (θεωρείται ότι η παρατήρηση των γεγονότων εκκίνησε την χρονική στιγμή $t = 0$)

w_t : το διάνυσμα των χρονικών στιγμών παρατήρησης των N_t αυτών γεγονότων, δηλαδή το διάνυσμα $[w_1, \dots, w_{N_t}]$

$\mu(t; N_t, w_t)$: η ένταση της σημειακής διαδικασίας (μη αρνητική συνάρτηση, μετράται σε γεγονότα/ sec)

$o(t, \Delta t)$: μία συνάρτηση για την οποία ισχύει $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{o(t + \Delta t)}{\Delta t} = 0$

Οι ανωτέρω εξισώσεις εκφράζουν τα εξής:

- Μόνο ένα γεγονός μπορεί να συμβεί σε ένα επαρκώς μικρό χρονικό διάστημα
- Η πιθανότητα ένα γεγονός να συμβεί σε ένα αρκετά μικρό διάστημα είναι ανάλογη της διάρκειας του διαστήματος αυτού

Από τον προηγούμενο ορισμό είναι φανερό ότι η υπό συνθήκη πιθανότητα ενός γεγονότος να πραγματοποιηθεί σε ένα αρκετά μικρό χρονικό διάστημα ισούται με το γινόμενο της διάρκειας του διαστήματος και της έντασης της σημειακής διαδικασίας. Όπως φαίνεται από τις παραμέτρους της συνάρτησής της, η ένταση της σημειακής διαδικασίας εξαρτάται από τον χρόνο και από το ιστορικό της σημειακής διαδικασίας. Η διαδικασία Poisson είναι η απλούστερη κανονική σημειακή διαδικασία, καθώς η έντασή της δεν εξαρτάται από το ιστορικό της διαδικασίας.

[3]

Στα πλαίσια της προσομοίωσης που θα γίνει σε αυτήν την εργασία, η διαδικασία πρέπει να περιγράφει την άφιξη των χρηστών σε χωρικό και χρονικό επίπεδο, καθώς το δίκτυο πρέπει να γνωρίζει τον χρόνο άφιξης του κάθε χρήστη και τη θέση του. Συνεπώς, εάν αρχικά ληφθεί ένα χωρικό μοντέλο Poisson που να περιγράφει τις θέσεις (x,y) των χρηστών, με την προσθήκη μιας τρίτης διάστασης που να περιγράφει τον χρόνο, επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός χωροχρονικού μοντέλου άφιξης χρηστών. Επομένως, η άφιξη χρηστών θα ακολουθεί μια χωροχρονική διαδικασία Poisson με διαστάσεις τον χρόνο t και τις καρτεσιανές συντεταγμένες x,y . Η ένταση της διαδικασίας Poisson εκφράζεται με τη συνάρτηση $\lambda(t,x,y)$, η οποία, στην συγκεκριμένη εφαρμογή, δηλώνει τον ρυθμό με τον οποίο καταφθάνουν νέοι χρήστες σε μια συγκεκριμένη θέση (x,y) του χώρου S σε μια χρονική στιγμή. Η συνάρτηση της έντασης μπορεί να είναι χρονικά σταθερή (στατική διαδικασία Poisson) ή να μεταβάλλεται με τον χρόνο (χρονικά μεταβαλλόμενη διαδικασία Poisson). Επιπροσθέτως, εάν η τιμή της συνάρτησης έντασης είναι ίδια για κάθε σημείο του χώρου, (x,y) , τότε αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των εισερχόμενων χρηστών στον χώρο S (ομογενής διαδικασία Poisson). Σε αντίθετη περίπτωση, υπάρχει διαφορετική συγκέντρωση χρηστών σε διαφορετικές περιοχές του χώρου S (μη ομογενής διαδικασία Poisson).

Ο λόγος που κάνει την Poisson κατάλληλη για το μοντέλο προσομοίωσης αυτής της διπλωματικής εργασίας, είναι ότι είναι διαδικασία μηδενικής μνήμης, δηλαδή χαρακτηρίζεται από την ανεξαρτησία μεταξύ των καταμετρούμενων γεγονότων. Συγκεκριμένα, όπως προαναφέρθηκε, η ένταση της διαδικασίας Poisson, $\lambda(t,x,y)$, δεν εξαρτάται από το ιστορικό της διαδικασίας. Δηλαδή, η πραγματοποίηση ενός γεγονότος δεν εξαρτάται στατιστικά από τις χρονικές στιγμές και τα σημεία του χώρου στις οποίες έγιναν τα προηγούμενα γεγονότα. Ως αποτέλεσμα, με την εφαρμογή της διαδικασίας Poisson στην προσομοίωση άφιξης των χρηστών στον χώρο S , η άφιξη κάθε νεοεισερχόμενου χρήστη, όσον αφορά τη χρονική στιγμή της και το σημείο του χώρου S στο οποίο γίνεται, δεν εξαρτάται από τις προηγούμενες αφίξεις χρηστών. Δύο παραδείγματα που περιγράφουν την ανεξαρτησία της θέσης, (x,y) , και του χρόνου άφιξης, t , του χρήστη από προηγούμενες αφίξεις χρηστών είναι τα εξής:

- Σε μια συναυλία, το γεγονός ότι ένας νέος χρήστης θα εμφανιστεί στη θέση (x_1,y_1) σε μια χρονική στιγμή δε θα επηρεάσει την τιμή της θέσης (x_2,y_2) ενός νέου χρήστη που θα εμφανιστεί σε μια μεταγενέστερη χρονική στιγμή.
- Σε ένα εμπορικό κέντρο, την ώρα αιχμής, ο χρόνος άφιξης των προηγούμενων χρηστών δεν επηρεάζει τον χρόνο άφιξης ενός νεοεισερχόμενου χρήστη, καθώς σε εκείνη τη χρονική περίοδο υπάρχει συνεχή ροή χρηστών.

Αντίθετα, άλλες κατηγορίες κανονικών διαδικασιών, οι διαδικασίες m - μνήμης, υπαγορεύουν ότι η ένταση με την οποία πραγματοποιείται ένα γεγονός εξαρτάται από τα m πλέον πρόσφατα γεγονότα. Αν εφαρμοζόταν μια τέτοια διαδικασία στην προσομοίωση άφιξης χρηστών, θα σήμαινε ότι ο

χρόνος και η θέση άφιξης ενός νέου χρήστη εξαρτάται από τους χρόνους και τις θέσεις άφιξης των προηγούμενων χρηστών. Με βάση τα ανωτέρω, η ιδιότητα της έλλειψης μνήμης που έχει η Poisson την κάνει κατάλληλη για την περιγραφή κίνησης μεγάλου αριθμού ανθρώπων, για μοντέλα τηλεφωνίας κτλ.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα μελετηθούν διαφορετικές συμπεριφορές χρηστών, όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο κατανομούνται στον χώρο S. Σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης οι χρήστες θα κατανεμηθούν ανομοιόμορφα στον χώρο, ακολουθώντας έτσι ρεαλιστικές συμπεριφορές κατανομής πληθυσμού που συναντώνται σε ad hoc γεγονότα. Για τον λόγο αυτό, όσον αφορά τη χωρική διάσταση της κατανομής χρηστών, όλες οι διαδικασίες Poisson που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι μη ομογενείς. Όσον αφορά τη χρονική διάσταση της κατανομής χρηστών, θα μελετηθούν αρχικά περιπτώσεις ad hoc γεγονότων, κατά τα οποία ο τρόπος εμφάνισης των νεοεισερχόμενων χρηστών παραμένει σταθερός με τον χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι οι περιοχές του χώρου S στις οποίες υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση χρηστών συνεχίζουν να προσελκύουν μεγάλους αριθμούς νέων χρηστών κατά τη διάρκεια του ad hoc γεγονότος. Στη συνέχεια, θα μελετηθούν περιπτώσεις ad hoc γεγονότων, κατά τα οποία ο τρόπος εμφάνισης των νεοεισερχόμενων χρηστών μεταβάλλεται με τον χρόνο, δηλαδή οι περιοχές μεγάλης συγκέντρωσης χρηστών είναι διαφορετικές, καθώς περνάει ο χρόνος. Για τον λόγο αυτόν, θα χρησιμοποιηθούν τα εξής δύο είδη χωροχρονικής διαδικασίας Poisson:

- Στατική μη ομογενής χωροχρονική διαδικασία Poisson
- Χρονικά μεταβαλλόμενη μη ομογενής χωροχρονική διαδικασία Poisson

Η χρήση της στατικής χωροχρονικής διαδικασίας Poisson συνεπάγεται τη διατήρηση της ίδιας συνάρτησης έντασης, $\lambda(t,x,y)$, καθ' όλη τη διάρκεια του ad hoc γεγονότος και αντιστοιχίζεται στην πρώτη περίπτωση ad hoc γεγονότος, στην οποία ο τρόπος εμφάνισης των νεοεισερχόμενων χρηστών παραμένει σταθερός με τον χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε σημείο του χώρου, (x,y), ο ρυθμός άφιξης νέων χρηστών είναι σταθερός και άρα ανεξάρτητος του χρόνου. Επομένως, η ένταση της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\lambda(t, x, y) = c * \lambda_{xy}(x, y) \quad (3.3)$$

,όπου $\lambda_{xy}(x, y)$ η χωρική συνιστώσα της έντασης της χωροχρονικής διαδικασίας Poisson και c μια χρονική σταθερά.

Η χρονικά μεταβαλλόμενη χωροχρονική διαδικασία Poisson έχει συνάρτηση έντασης, η οποία μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του ad hoc γεγονότος και εφαρμόζεται για την προσομοίωση ad hoc γεγονότων, στα οποία ο τρόπος εμφάνισης των νεοεισερχόμενων χρηστών μεταβάλλεται με τον χρόνο. Σε αυτήν την περίπτωση, η χρονική και η χωρική συνιστώσα της έντασης της διαδικασίας δεν είναι ανεξάρτητες. Συγκεκριμένα, όσο περνάει ο χρόνος η συνάρτηση που εκφράζει τη χωρική συνιστώσα θα μεταβάλλεται, καθώς οι νέοι χρήστες θα κατανομούνται με διαφορετικό τρόπο στον χώρο S. Δηλαδή, για την συνάρτηση έντασης κατανομής μιας χρονικά μεταβαλλόμενης διαδικασίας Poisson δεν ισχύει η σχέση (3.3). Για την προσομοίωση αυτών των περιπτώσεων ad hoc γεγονότων, θα χρησιμοποιηθεί η εξής συνάρτηση έντασης κανονικής διαδικασίας:

$$\lambda_{real}(x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}} * e^{-\frac{(x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2}{2\sigma^2}} \quad (3.4)$$

, όπου το $(x_0(t), y_0(t))$ είναι το κέντρο της κατανομής, το οποίο μεταβάλλεται με τον χρόνο σ είναι η διακύμανση της συνάρτησης έντασης.

Το κέντρο της κατανομής καθορίζει την περιοχή στην οποία συγκεντρώνονται οι περισσότεροι

χρήστες σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η διακύμανση περιγράφει το πόσο μεγάλη είναι αυτή η περιοχή, δηλαδή το πόσο απέχουν κατά μέσο όρο από το κέντρο κατανομής οι χρήστες που συγκεντρώνονται γύρω από αυτό. Συνεπώς, η μεταβολή του κέντρου κατανομής με τον χρόνο συνεπάγεται μεταβολή της κατανομής των χρηστών στον χώρο.

3.3 Μέγεθος αντιπροσωπευτικού δείγματος πλήθους χρηστών και μέθοδος σύγκρισης δύο κατανομών

3.3.1 Ανάγκη χρησιμοποίησης αντιπροσωπευτικού δείγματος

Για τις ανάγκες της σχεδίασης του μοντέλου δυναμικής κατανομής πόρων πρέπει να οριστεί ένας αριθμός χρηστών που απαιτείται για την αξιόπιστη εκτίμηση της πραγματικής κατανομής φορτίου στον χώρο S , και ειδικότερα στους ισχυρούς κόμβους. Κάθε φορά που ο αριθμός των νέων χρηστών φθάνει αυτήν την τιμή, το σύστημα εκτιμά την κατανομή πραγματικού φορτίου στους ισχυρούς κόμβους. Η εμπειρική αυτή κατανομή προσεγγίζει την πραγματική ζήτηση, σε αντιδιαστολή με την αναμενόμενη κατανομή φορτίου που χρησιμοποιήθηκε για την αρχική κατανομή πόρων στους ισχυρούς κόμβους, η οποία είναι υποθετική. Στη συνέχεια, θα γίνεται σύγκριση της εμπειρικής κατανομής με την αναμενόμενη κατανομή. Όταν η απόκλιση μεταξύ των δύο υπερβαίνει συγκεκριμένο κατώφλι, το οποίο θα οριστεί στη συνέχεια του κεφαλαίου, τότε θα γίνεται ανακατανομή των εναπομεινάντων πόρων στους ισχυρούς κόμβους με βάση την εμπειρική χωρική κατανομή. Με αυτόν τον τρόπο, οι εναπομεινάντες πόροι θα ανακατανομηθούν και θα δοθούν εκεί όπου έχει προκύψει ανάγκη πόρων με τη νέα κατανομή χρηστών. Συνεπώς, θα αποφευχθούν περιπτώσεις όπου το σύστημα θα πρέπει να αναζητήσει πόρους από άλλους ισχυρούς κόμβους, το οποίο αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία. Ο λόγος της ανακατανομής πόρων είναι ότι επιδιώκεται να δημιουργηθεί ένα σύστημα προσομοίωσης, το οποίο να μπορεί να προσαρμόζεται σε τυχόν αλλαγές σε σχέση με τις αρχικές εκτιμήσεις/υποθέσεις. Έτσι, υπάρχει μια ανάδραση στο σύστημα, η οποία θα συμβάλει σε ένα δυναμικό σύστημα κατανομής πόρων που θα παρακολουθεί ανά χρονικά διαστήματα την πραγματική κατανομή των χρηστών και θα κάνει ανακατανομή των πόρων, όταν βλέπει ότι υπάρχει απόκλιση από την αναμενόμενη κατανομή.

3.3.2 Προσδιορισμός μεγέθους δείγματος

Ο προσδιορισμός του μεγέθους δείγματος αφορά την επιλογή του αριθμού των παρατηρήσεων που θα συμπεριληφθούν σε ένα στατιστικό δείγμα, ώστε αυτό να είναι αντιπροσωπευτικό. Η χρησιμότητα του αντιπροσωπευτικού δείγματος έγκειται στο ότι δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων για τον πληθυσμό από ένα σχετικά μικρό υποσύνολο του πληθυσμού, χωρίς να χρειάζεται να μελετηθεί όλος ο πληθυσμός. Στη συνέχεια, ορίζονται βασικές παράμετροι για τον υπολογισμό του μεγέθους αντιπροσωπευτικού δείγματος ενός πληθυσμού.

Μέγεθος πληθυσμού (population size): Δηλώνει το πόσο μεγάλος είναι ο πληθυσμός που μελετάται.

Περιθώριο σφάλματος (margin error): Το περιθώριο σφάλματος είναι μια στατιστική παράμετρος που εκφράζει την αβεβαιότητα στην εκτίμηση της τιμής της μετρούμενης παραμέτρου. Όσο μεγαλύτερο είναι το περιθώριο σφάλματος, τόσο αυξάνει η ενδεχόμενη απόσταση μεταξύ των τιμών που προκύπτουν από τη δειγματοληψία και τη στατιστική ανάλυση και των πραγματικών τιμών, αυτών που αντιστοιχούν στο σύνολο του πληθυσμού. Για παράδειγμα, σε μια δημοσκόπηση, όπου ένα δείγμα πολιτών καλούνται να επιλέξουν μεταξύ ενός πολιτικού κόμματος Α και ενός πολιτικού κόμματος Β, προκύπτει ότι 40% των πολιτών επέλεξαν το κόμμα Α και 60% των πολιτών επέλεξαν το κόμμα Β. Αν στις μετρήσεις υπάρχει περιθώριο σφάλματος 5%, αυτό σημαίνει ότι εάν είχε ερωτηθεί όλος ο πληθυσμός των πολιτών, το ποσοστό πολιτών μεταξύ του 35% (40-5) και του

45% (40+5) θα είχε επιλέξει το κόμμα Α και αντίστοιχα το ποσοστό μεταξύ του 55% (60-5) και του 65% (60 +5) θα είχε επιλέξει το κόμμα Β.

Διάστημα εμπιστοσύνης (confidence interval): Είναι το διάστημα εκτίμησης μιας παραμέτρου του πληθυσμού και σχηματίζεται από το μετρούμενο μέγεθος της παραμέτρου και το περιθώριο σφάλματος που έχει. Με βάση το προηγούμενο παράδειγμα, το διάστημα εμπιστοσύνης για το ποσοστό των πολιτών που θα επέλεγαν το κόμμα Α είναι το [35%, 45%].

Επίπεδο εμπιστοσύνης (confidence level): Εκφράζει την πιθανότητα το διάστημα εμπιστοσύνης της μελετώμενης παραμέτρου να περιέχει την πραγματική τιμή που εμφανίζεται στον πληθυσμό. Δηλαδή, εάν από ένα δείγμα πληθυσμού προκύψει ένα διάστημα εμπιστοσύνης με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, αυτό συνεπάγεται ότι με πιθανότητα 0.95 το συγκεκριμένο διάστημα εμπιστοσύνης θα περιέχει την τιμή της παραμέτρου που θα εξέφραζε την επιλογή του συνολικού πληθυσμού.

Αναλογία (\hat{p} , proportion): Είναι το κλάσμα του καταμετρούμενου δείγματος του πληθυσμού, τα στοιχεία του οποίου διαθέτουν συγκεκριμένο χαρακτηριστικό. Ισούται με X/N , όπου X είναι ο αριθμός των στοιχείων του δείγματος που εμφανίζουν το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό και N είναι το μέγεθος του δείγματος.

Διακύμανση (variance) : Η διακύμανση μιας τυχαίας μεταβλητής είναι η αναμενόμενη τιμή του τετραγώνου της απόκλισης της τυχαίας μεταβλητής από τη μέση τιμή της.

Τυπική απόκλιση (σ , standard deviation): Η τυπική απόκλιση της καταμετρούμενης παραμέτρου είναι η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης της. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της τυπικής απόκλισης, τόσο περισσότερο συγκεντρωμένες είναι οι τιμές περί από τη μέση τιμή της κατανομής και, κατ' επέκταση, τόσο περισσότερο αντιπροσωπευτικά στατιστικά είναι ο μέσος όρος.

Τυπική τιμή (z-score): Είναι το ηλίκο της απόκλισης μιας τιμής από τον μέσο όρο προς την τυπική απόκλιση σ . Δηλαδή η τυπική τιμή εκφράζει το πόσο μεγάλη είναι η απόκλιση μιας τιμής από τον μέσο όρο σε σχέση με την τυπική απόκλιση. Το z-score μπορεί να προσδιοριστεί από το επίπεδο εμπιστοσύνης μέσω του πίνακα αντιστοίχισης z-Table. Να σημειωθεί ότι αυτός ο πίνακας τιμών αναφέρεται στην κανονική (γκουασιανή) κατανομή.

[11]

Η πραγματική τιμή της αναλογίας του συνολικού πληθυσμού μπορεί να εκτιμηθεί με τον εξής τύπο (παραπομπή σε βιβλιογραφία):

$$\hat{p} \pm z * \sqrt{\frac{\hat{p} * (1 - \hat{p})}{N}} \quad (3.5)$$

όπου \hat{p} είναι η αναλογία του δείγματος, z είναι η τυπική τιμή και N είναι το μέγεθος του δείγματος. [12]

Η ποσότητα $z * \sqrt{\frac{\hat{p} * (1 - \hat{p})}{N}}$ εκφράζει το περιθώριο σφάλματος της εκτίμησης. Συνεπώς, το σφάλμα εκτίμησης εξαρτάται από τις τιμές της αναλογίας του δείγματος, του μεγέθους του δείγματος καθώς και της τυπικής τιμής και κατ' επέκταση από το επίπεδο εμπιστοσύνης της καταμετρούμενης παραμέτρου. Αυτό σημαίνει ότι, εάν οριστεί το επιθυμητό περιθώριο σφάλματος (margin error) και οριστούν οι τιμές των \hat{p} , z , τότε μπορεί να προσδιοριστεί το κατάλληλο μέγεθος δείγματος, N , για το οποίο επιτυγχάνεται το συγκεκριμένο περιθώριο σφάλματος. Για παράδειγμα, αν σε μια δειγματοληψία το επιθυμητό περιθώριο σφάλματος είναι μικρότερο ή ίσο

του 3% με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, θα πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη:

$$z^* \sqrt{\frac{\hat{p}^*(1-\hat{p})}{N}} \leq 0.03$$

Με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, από τον πίνακα z-Table βρίσκεται ότι το z-score είναι 1.96. Στη συνέχεια, εφόσον δεν είναι γνωστή η τιμή \hat{p} , προκειμένου να βρεθεί το μέγεθος δείγματος για το οποίο το περιθώριο σφάλματος δεν θα υπερβεί το 2% για οποιαδήποτε τιμή του \hat{p} , υπολογίζεται η μέγιστη τιμή του $\hat{p}^*(1-\hat{p})$, η οποία είναι 0.25 για $\hat{p}=0.5$. Άρα, με βάση τα προηγούμενα, υπολογίζεται το N :

$$1.96 * \sqrt{\frac{0.25}{N}} \leq 0.03 \Leftrightarrow N \geq 1068$$

Η ανωτέρω μέθοδος αναφέρεται σε πληθυσμούς, οι οποίοι είναι πολύ μεγάλοι με αποτέλεσμα το μέγεθος τους να μην παίζει ρόλο στον προσδιορισμό του δείγματος. Δηλαδή, οι προηγούμενες σχέσεις ισχύουν ασυμπτωτικά για πολύ μεγάλο μέγεθος πληθυσμού. Στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας θα χρησιμοποιηθεί συνολικός πληθυσμός 10000 χρηστών. Το σύστημα προσομοίωσης επιθυμεί τα δείγματα χρηστών που μελετά να έχουν επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και περιθώριο σφάλματος 5%. Με βάση την ανωτέρω μέθοδο προκύπτει ότι αυτές οι δύο προϋποθέσεις αντιστοιχούν σε μέγεθος δείγματος ίσο με 385 χρήστες. Προκειμένου να υπολογιστεί πιο ακριβές μέγεθος δείγματος, το οποίο εξαρτάται και από το συνολικό πλήθος πρέπει να χρησιμοποιηθούν μη ασυμπτωτικές σχέσεις. Η ακόλουθη σχέση είναι μια μετατροπή του μεγέθους δείγματος από ποσότητα που ισχύει ασυμπτωτικά για μεγάλο πληθυσμό σε ποσότητα που αφορά πεπερασμένο συνολικό πληθυσμό, N .

$$N_{finite} = \frac{N_{infinite} * \Pi}{N_{infinite} + (\Pi - 1)} \quad (3.6)$$

όπου N_{finite} : το μέγεθος δείγματος για πεπερασμένο πληθυσμό, $N_{infinite}$: το μέγεθος δείγματος που προκύπτει ασυμπτωτικά, Π : το μέγεθος του πληθυσμού

Ισοδύναμα, για πεπερασμένους πληθυσμούς, το μέγεθος του δείγματος μπορεί να βρεθεί από την εξής σχέση:

$$N_{finite} = \frac{\frac{z^2 * p(1-p)}{e^2}}{1 + \frac{z^2 * p(1-p)}{e^2 * \Pi}} \quad (3.7)$$

όπου e : το περιθώριο σφάλματος
[13]

Με αυτό τον τρόπο, υπολογίζεται ότι το μέγεθος δείγματος που επιτυγχάνει 95% επίπεδο εμπιστοσύνης, 5% περιθώριο σφάλματος για συνολικό πληθυσμό 10000 χρηστών είναι 370 χρήστες.

Με τις ανωτέρω σχέσεις γίνεται εφικτό να επιλεγθεί ένα μέγεθος δείγματος ανάλογα με το πόσο πιθανό είναι να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Επομένως, εάν ζητηθεί υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης (90% και άνω) και χαμηλό περιθώριο σφάλματος (5% και κάτω) τότε το δείγμα έχει πολύ μεγάλη πιθανότητα να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και συνεπώς να είναι αντιπροσωπευτικό. Πέρα από αυτές τις σχέσεις, υπάρχουν και εμπειρικοί κανόνες περί αντιπροσωπευτικού δείγματος και αναφέρονται σε ασυμπτωτικά μεγάλους πληθυσμούς. Με βάση αυτούς, για να είναι ένα δείγμα αντιπροσωπευτικό πρέπει να ικανοποιεί τις εξής συνθήκες: (παραπομπή σε βιβλιογραφία)

- Το δείγμα πρέπει να είναι τυχαίο (random sample), δηλαδή τα στοιχεία του δείγματος πρέπει να έχουν επιλεγεί τυχαία. Για να γίνει αυτό, πρέπει η συνάρτηση που παράγει τις τιμές των στοιχείων να είναι τυχαία χωροχρονική διαδικασία. Πρέπει να είναι διαδικασία χωρίς ιστορικό, δηλαδή να υπάρχει ανεξαρτησία μεταξύ των καταμετρούμενων γεγονότων.
- Το δείγμα πρέπει να έχει τουλάχιστον 10 επιτυχίες και 10 αποτυχίες του καταμετρούμενου γεγονότος. Ως επιτυχίες και αποτυχίες ορίζεται η θετική ή αρνητική απάντηση του κάθε στοιχείου του δείγματος στο ερώτημα για το οποίο καταμετρούνται τα στοιχεία. Για παράδειγμα, αν γίνεται έρευνα για το αν οι πολίτες συμφωνούν με συγκεκριμένη άποψη ή όχι, για να είναι αντιπροσωπευτικό το δείγμα πληθυσμού που θα ερωτηθεί στο πλαίσιο της έρευνας, πρέπει να περιέχει τουλάχιστον 10 θετικές απαντήσεις και 10 αρνητικές. Πρέπει να σημειωθεί ότι το κριτήριο αυτό αναφέρεται σε πολύ μεγάλους πληθυσμούς, π.χ. $O(10^6-10^7)$ και αντίστοιχα μεγάλα δείγματα. Στην παρούσα περίπτωση όπου οι πληθυσμοί είναι σχετικά μικροί, $O(10^3-10^4)$, αυτό το κριτήριο δεν ελέγχεται.
- Τα στοιχεία του δείγματος πρέπει να είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Για να ικανοποιείται αυτή η συνθήκη πρέπει το καταμετρούμενο δείγμα να είναι μικρότερο ή ίσο σε σύγκριση με το 10% του συνολικού πληθυσμού.

[14]

Με βάση την τυχειότητα και ανεξαρτησία των θέσεων που έχουν οι χρήστες, το βασικό κριτήριο που ελέγχεται είναι αυτό του μεγέθους δείγματος, όπως προκύπτει από τις προαναφερθείσες σχέσεις.

3.3.3 Έλεγχος Kolmogorov- Smirnov

Όταν οι νεοεισερχόμενοι χρήστες στον χώρο S σχηματίσουν αντιπροσωπευτικό δείγμα, τότε ο αλγόριθμος υπολογίζει την κατανομή χρηστών του δείγματος στους M ισχυρούς κόμβους (εμπειρική κατανομή). Στη συνέχεια, τη συγκρίνει με την αναμενόμενη κατανομή για να διαπιστώσει αν υπάρχει σημαντική απόκλιση ή όχι μεταξύ των δύο. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιεί τον έλεγχο Kolmogorov- Smirnov (K-S test).

Ο έλεγχος Kolmogorov- Smirnov είναι ένας μη παραμετρικός έλεγχος της ισότητας δύο συνεχών μονοδιάστατων κατανομών. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη σύγκριση μεταξύ διακριτών κατανομών.

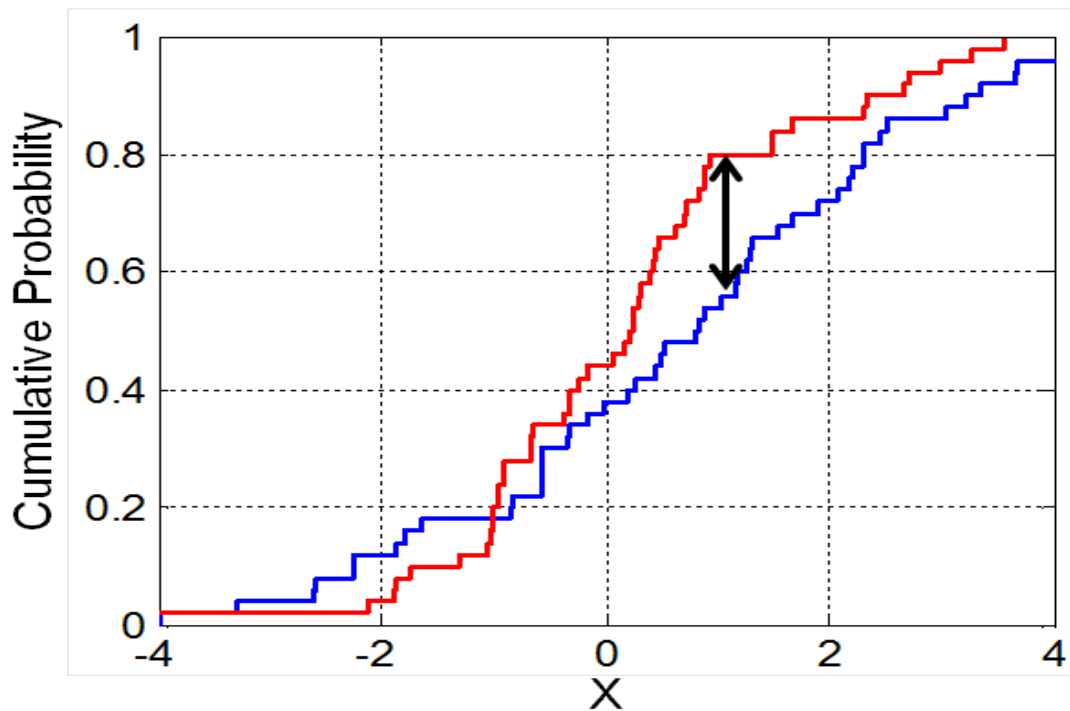
Η συνάρτηση της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής θα εξαχθεί από το αντιπροσωπευτικό δείγμα μεγέθους N και συγκεκριμένα από το σύνολο των N παρατηρήσεων X_i , όπου $1 \leq i \leq N$. Η συνάρτηση της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής θα είναι η εξής:

$$F_N(x) = \frac{1}{N} * \sum_1^N I(X_i, x) \quad (3.8)$$

όπου $I(X_i, x)$ η συνάρτηση που λαμβάνει τιμή 1 αν $X_i \leq x$ και τιμή 0 σε άλλη περίπτωση.

Στην εφαρμογή του ελέγχου Kolmogorov- Smirnov στην παρούσα εργασία το x δηλώνει έκαστο από τους συνολικούς M ισχυρούς κόμβους του δικτύου. Η συνάρτηση της αρχικής κατανομής, $F_{initial}(x)$ είναι και αυτή συνάρτηση διακριτής κατανομής καθώς δηλώνει το ποσοστό της συνολικής κίνησης που το σύστημα αναμένει να έχουν αθροιστικά οι ισχυροί κόμβοι από τον 1ο μέχρι και τον x ισχυρό κόμβο. Συνεπώς, για τον αλγόριθμο της προσομοίωσης, θα χρειαστεί ο έλεγχος Kolmogorov- Smirnov για τη σύγκριση δύο διακριτών κατανομών.

Η εμπειρική αθροιστική κατανομή συγκρίνεται με την αρχική αθροιστική κατανομή. Αρχικά, η μέθοδος Kolmogorov-Smirnov κάνει την υπόθεση ότι οι δύο αθροιστικές κατανομές είναι ίδιες. Στη συνέχεια, υπολογίζει την ποσότητα $D = \max(F_N(x) - F_{initial}(x))$ η οποία είναι η μέγιστη διαφορά μεταξύ των συναρτήσεων των δύο αθροιστικών κατανομών για μια συγκεκριμένη τιμή x . Τέλος, γίνεται έλεγχος αν αυτή η ποσότητα υπερβαίνει συγκεκριμένο όριο D_a και, στην περίπτωση όπου δεν το υπερβαίνει, η αρχική υπόθεση γίνεται αποδεκτή, διαφορετικά απορρίπτεται. [15]



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα εφαρμογής K-S test στη σύγκριση δύο εμπειρικών αθροιστικών κατανομών, όπου το μαύρο βέλος δείχνει την μέγιστη διαφορά D μεταξύ τους.

Το όριο D_a εξαρτάται από το μέγεθος δείγματος, N , και την παράμετρο α (level of significance). Ακολουθώς, εξηγούνται κάποιες έννοιες που είναι απαραίτητες για την κατανόηση της παραμέτρου α και της μεθόδου του K-S test γενικότερα.

Σε προβλήματα όπου πρέπει να απαντηθεί αν μια αρχική υπόθεση είναι σωστή ή λάθος, υπάρχουν δύο τύποι λαθών που μπορούν να γίνουν:

- Type I error: Η περίπτωση όπου η αρχική υπόθεση απορρίπτεται, ενώ είναι σωστή.
- Type II error: Η περίπτωση όπου η εναλλακτική υπόθεση απορρίπτεται, ενώ είναι σωστή.

Για παράδειγμα, ας υποθεθεί μια περίπτωση σε ένα δικαστήριο όπου πρέπει να ληφθεί η απόφαση αν ο κατηγορούμενος είναι αθώος ή ένοχος με την αρχική υπόθεση να είναι ότι ο κατηγορούμενος είναι αθώος. Τότε το type I error είναι η περίπτωση να κριθεί ο κατηγορούμενος ένοχος ενώ είναι αθώος και το type II error είναι η περίπτωση να κριθεί αθώος ενώ είναι ένοχος.

Το επίπεδο σημαντικότητας, α , (level of significance) εκφράζει την πιθανότητα να ληφθεί λάθος απόφαση, όταν η αρχική υπόθεση είναι σωστή. Στην ουσία, το α είναι συμπληρωματική έννοια του επιπέδου εμπιστοσύνης, δηλαδή το α μπορεί να βρεθεί αφαιρώντας το επίπεδο

εμπιστοσύνης από τη μονάδα. Στην προσπάθεια ορισμού τιμής στο a , πρέπει να ληφθούν υπόψη οι εξής περιορισμοί. Από τη μια πλευρά, το a δεν μπορεί να λάβει μεγάλες τιμές (10% και άνω), γιατί αυτό συνεπάγεται μεγάλη πιθανότητα να απορριφθεί η αρχική υπόθεση ενώ είναι σωστή, δηλαδή να προκύψει type I error. Από την άλλη πλευρά, όμως, όσο μικρότερο είναι το a , τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα να απορριφθεί η αρχική υπόθεση και, κατ' επέκταση, η πιθανότητα να γίνει δεκτή η εναλλακτική υπόθεση γίνεται πολύ μικρή. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να απορριφθεί η εναλλακτική υπόθεση, ενώ είναι σωστή, δηλαδή να προκύψει type II error. Για τους ανωτέρω λόγους, μια τιμή του a στο επίπεδο του 5%, δηλαδή ούτε αρκετά μεγάλη ούτε πολύ μικρή, εξισορροπεί τις πιθανότητες των type I error και type II error.

[16]

Στον πίνακα ορίου αποδοχής D_a για το K-S test ορίζεται ότι για μεγέθη δειγμάτων μεγαλύτερα από 35 στοιχεία (αυτή η κατηγορία δειγμάτων θα απασχολήσει αποκλειστικά την παρούσα εργασία):

$$D_a = \frac{\sqrt{-0.5 \cdot \ln(a/2)}}{\sqrt{N}} \quad (3.9)$$

όπου a : επίπεδο σημαντικότητας (για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, θα τίθεται ίσο με 0.05), N : μέγεθος δείγματος

Άρα για $\alpha = 0.05$ η σχέση (3.9) ισοδυναμεί με:

$$D_a = \frac{1.36}{\sqrt{N}} \quad (3.10)$$

[17]

Συνεπώς, αν $D \leq D_a$ για κάθε x , τότε με βάση το K-S test η αρχική υπόθεση, δηλαδή η υπόθεση ότι οι δύο αθροιστικές κατανομές είναι ίδιες, γίνεται αποδεκτή. Σε αντίθετη περίπτωση, η αρχική υπόθεση απορρίπτεται και συμπεραίνεται ότι οι δύο αθροιστικές κατανομές είναι διαφορετικές, το οποίο στην εφαρμογή του K-S test στην παρούσα εργασία σημαίνει ότι και οι δύο κατανομές ζήτησης (πραγματική και αναμενόμενη) είναι διαφορετικές. Σε περίπτωση, λοιπόν, όπου ισχύει $D > D_a$ για κάποια τιμή x , συνεπάγεται ότι στον x ισχυρό κόμβο παρατηρείται τηλεπικοινωνιακή κίνηση με σημαντικές διαφορές σε σχέση με αυτήν που αναμενόταν. Σε αυτήν την περίπτωση, ο αλγόριθμος της παρούσας εργασίας κρίνει ότι χρειάζεται να γίνει ανακατανομή των εναπομεινάντων πόρων στους ισχυρούς κόμβους, αφού υπάρχει απόκλιση μεταξύ της πραγματικής κατανομής ζήτησης πόρων από τους χρήστες και της αναμενόμενης κατανομής βάσει της οποίας έχουν δοθεί οι πόροι στους ισχυρούς κόμβους.

Δηλαδή, ο έλεγχος Kolmogorov Smirnov λαμβάνει υπόψη μόνο τη μέγιστη διαφορά μεταξύ των δύο αθροιστικών κατανομών για μια συγκεκριμένη τιμή x και όχι τη συνολική μορφολογία των δύο αθροιστικών κατανομών. Συγκεκριμένα, η μέγιστη διαφορά μεταξύ δύο αθροιστικών κατανομών εμφανίζεται κατά κανόνα στο σημείο στο οποίο και οι δύο ή μια εξ αυτών παρουσιάζουν μέγιστη κλίση, όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.1, δηλαδή στο σημείο όπου οι παράγωγοι των δύο αθροιστικών κατανομών προσεγγίζουν τα μέγιστά τους. Αυτό σημαίνει ότι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ της αναμενόμενης και πραγματικής κατανομής ζήτησης θα προκύψουν στους ισχυρούς κόμβους με μεγάλα ποσοστά κίνησης. Το K-S test, κατά συνέπεια, δίνει έμφαση στην περιοχή των μέγιστων των γραφικών παραστάσεων των παραγώγων και όχι στις περιοχές χαμηλών τιμών, στις ουρές, στις οποίες αντιστοιχούν μικρότερες διαφορές μεταξύ των δύο αθροιστικών κατανομών. Υπάρχουν διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα σύγκρισης κατανομών, όπως το Anderson-Darling Test, τα οποία λαμβάνουν υπόψη και τις ουρές των παραγώγων μεταξύ των δύο αθροιστικών κατανομών [15]. Παρ' όλα αυτά, το K-S test, δίνοντας έμφαση στα μέγιστα των παραγώγων των δύο

αθροιστικών κατανομών, εστιάζει στον ισχυρό κόμβο που είναι το επίκεντρο της απόκλισης μεταξύ της πραγματικής και της αναμενόμενης κατανομής του φορτίου δικτύου. Αυτό είναι επιθυμητό για τον αλγόριθμο της εργασίας, καθώς ακόμα και στην περίπτωση όπου στους υπόλοιπους ισχυρούς κόμβους δεν υπάρχουν τόσο έντονες αποκλίσεις μεταξύ των δύο κατανομών ζήτησης, η μεγάλη απόκλιση που παρουσιάζεται σε έναν ισχυρό κόμβο μειώνει την απόδοση του δικτύου και ορθώς αναγκάζει το σύστημα να κάνει ανακατανομή πόρων.

Κεφάλαιο 4

Διάρθρωση του Αλγόριθμου Κατανομής Πόρων και Προσομοίωση Λειτουργίας Δικτύου

4.1 Επιλογή περιβάλλοντος προσομοίωσης

Για την υλοποίηση του αλγόριθμου κατανομής πόρων και την προσομοίωση άφιξης των χρηστών του δικτύου χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η έκδοση R2014a, η οποία, βέβαια, δεν περιορίζει την εκτέλεση του ίδιου κώδικα σε άλλες εκδόσεις. Το συγκεκριμένο περιβάλλον επιλέχθηκε λόγω της μεγάλης ποικιλίας εντολών, η οποία το καθιστά ευέλικτο και εύκολο στη χρήση του όσον αφορά την επεξεργασία πινάκων. Επιπλέον, είναι ικανό για αποτελεσματική διαχείριση μεγάλων όγκων δεδομένων σε μικρό χρόνο, χαρακτηριστικό που διευκολύνει την εκτέλεση δοκιμών του αλγόριθμου.

4.2 Παρουσίαση των λειτουργιών του αλγόριθμου

Στη συγκεκριμένη ενότητα, παρουσιάζονται αναλυτικά και κατά βήμα οι λειτουργίες που εκτελεί ο αλγόριθμος κατανομής πόρων. Οι λειτουργίες είναι οι εξής:

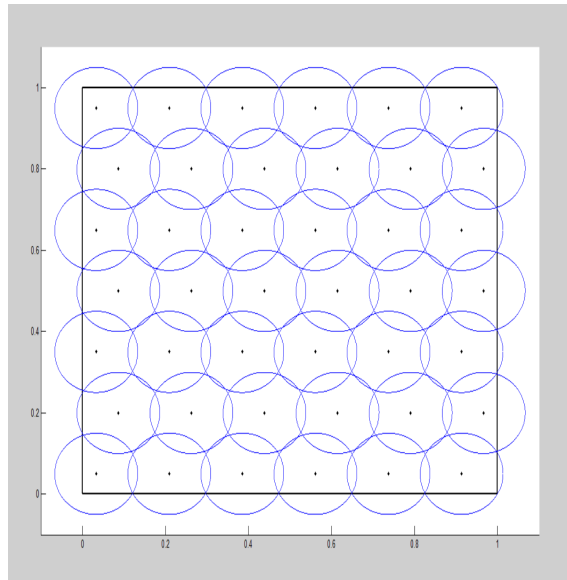
1. Στην αρχή του αλγόριθμου, ορίζονται οι διαστάσεις του χώρου S τον οποίο πρέπει να καλύψει το δίκτυο. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιείται ως χώρος S ένα ορθογωνικό χωρίο $a \times b$, όπου $a=1$, $b=1$. Επιπλέον, ορίζεται ο συνολικός αριθμός πόρων, N , που διαθέτει το σύστημα και οι πόροι που απαιτούνται ανά χρήστη. Σε πρώτη φάση, για την απλοποίηση του προβλήματος θεωρείται ότι οι πόροι είναι ίδιοι για όλους τους χρήστες ίσοι προς $A=5RBs$ (Resource Block -RB: η μικρότερη μονάδα τηλεπικοινωνιακού πόρου που μπορεί να αποδοθεί σε έναν χρήστη) και παραμένουν σταθεροί καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Συνεπώς, ο αριθμός χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει το σύστημα είναι N/A . Στο όγδοο κεφάλαιο, μελετάται η περίπτωση όπου υπάρχει διαφοροποίηση στους χρήστες, ως προς τους πόρους που ζητούν.

2. Στην πρώτη φάση του αλγορίθμου, εγκαθίστανται στον χώρο S οι ισχυροί κόμβοι. Για τον λόγο αυτόν, υπολογίζεται το πλήθος, M , και οι θέσεις των ισχυρών κόμβων που θα εξυπηρετήσουν τη ζήτηση, λαμβάνοντας υπόψη τη διάσταση του χώρου S και την ακτίνα εμβέλειας, R , κάθε ισχυρού κόμβου. Οι M ισχυροί κόμβοι που θα εγκατασταθούν στον χώρο S πρέπει να πληρούν τις εξής προϋποθέσεις :

- Πρέπει να επιτυγχάνουν πλήρη κάλυψη του χώρου, δηλαδή κάθε νεοεισερχόμενος χρήστης πρέπει να βρίσκεται στην εμβέλεια τουλάχιστον ενός από τους M ισχυρούς κόμβους.
- Η περιοχή εμβέλειας κάθε ισχυρού κόμβου πρέπει να έχει κάποια κοινή υποπεριοχή με την περιοχή εμβέλειας τουλάχιστον ενός άλλου ισχυρού κόμβου, έτσι ώστε οι M ισχυροί κόμβοι να συγκροτούν ένα συνεκτικό σύνολο.
- Το πλήθος των ισχυρών κόμβων πρέπει να είναι το ελάχιστο δυνατό, έτσι ώστε να αποφευχθούν επιπλέον κόστη κατασκευής και λειτουργίας.

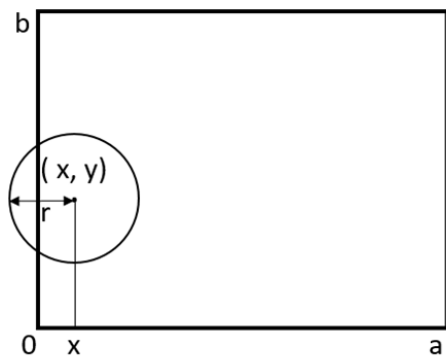
[3]

Για τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας, όπου ο χώρος S έχει διαστάσεις 1×1 , επιλέγεται ακτίνα εμβέλειας $R=0.1$ και, σε συνδυασμό με το ότι απαιτείται απόσταση τουλάχιστον ίση με $1.6 \cdot R$ μεταξύ των θέσεων των γειτονικών ισχυρών κόμβων, προκύπτει ότι η συγκεκριμένη ακτίνα οδηγεί σε πλήθος $M = 42$ ισχυρών κόμβων στον χώρο S .

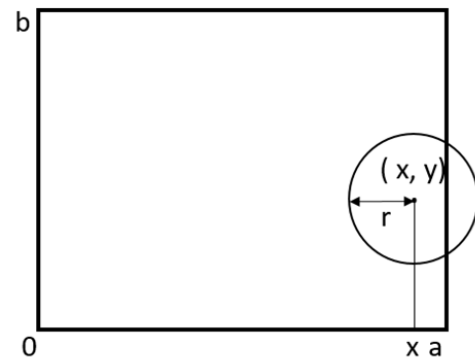


Σχήμα 4.1: Κατανομή 42 ισχυρών κόμβων με ακτίνα εμβέλειας 0.1 σε χώρο S διαστάσεων 1×1 .

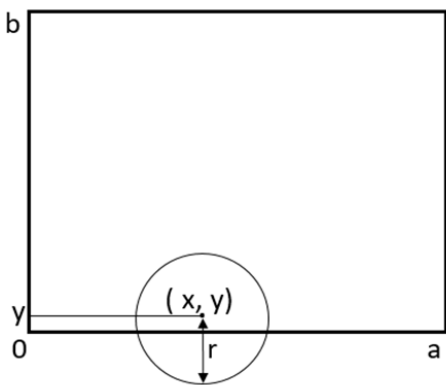
3. Στη συνέχεια, για κάθε ισχυρό κόμβο ελέγχεται αν η εμβέλεια του βρίσκεται ολόκληρη μέσα στον χώρο S ή μόνο ένα τμήμα της βρίσκεται μέσα σε αυτόν. Με βάση τις συντεταγμένες x, y του κέντρου του κύκλου εμβέλειας, ο αλγόριθμος μπορεί να βρει αν ο κύκλος έχει τμήματα που εξέρχονται των ορίων του χώρου S . Οι 4 περιπτώσεις στις οποίες η εμβέλεια ενός ισχυρού κόμβου εξέρχεται των ορίων του χώρου $a \times b$ εμφανίζονται στο Σχ. 4.2.



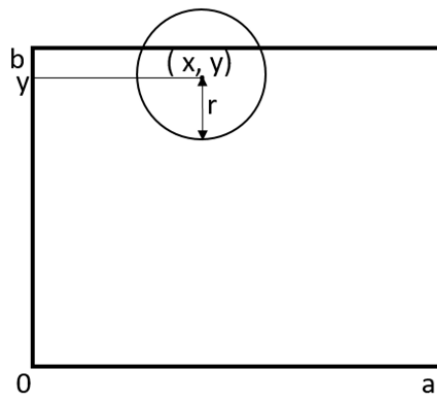
α) $x \leq r$



β) $x > a - r$



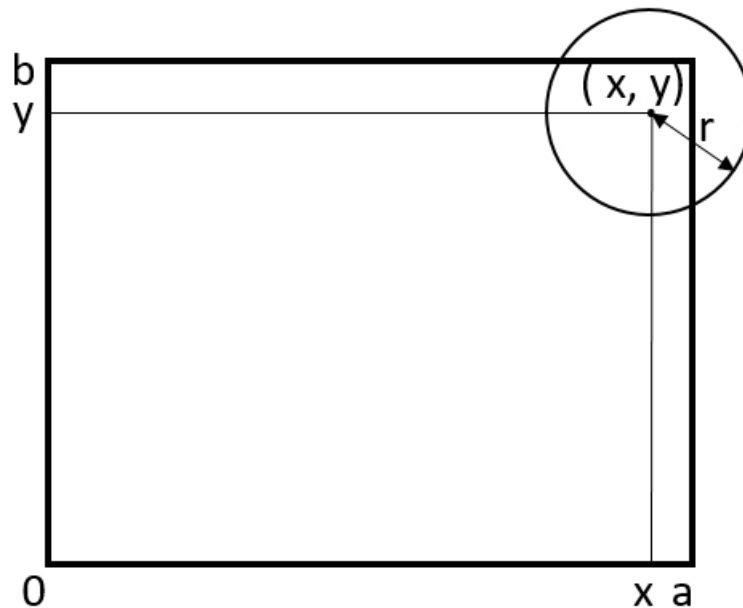
γ) $y < r$



δ) $y > b - r$

Σχήμα 4.2: Οι 4 βασικές περιπτώσεις υπέρβασης των ορίων του χωρίου $a \times b$ από κύκλο ακτίνας r .

Επιπλέον μπορεί να προκύψουν περιπτώσεις όπου ο κύκλος υπερβαίνει τα όρια και του άξονα a και του άξονα b , όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.3.



Σχήμα 4.3: Υπέρβαση στην γωνία ($x > a-r$ και $y > b-r$).

Για κάθε ισχυρό κόμβο, ο αλγόριθμος υπολογίζει το ποσοστό της επιφάνειας του κύκλου εμβέλειας του που βρίσκεται μέσα στον χώρο S , συνεπώς προκύπτει ένας συντελεστής βαρύτητας ανάμεσα στο 0 και στο 1, με τον οποίο πολλαπλασιάζεται η αναμενόμενη ένταση κίνησης χρηστών στην περιοχή του συγκεκριμένου ισχυρού κόμβου για να προκύψει ο αριθμός πόρων που αντιστοιχεί στον κόμβο. Αυτός ο έλεγχος γίνεται επειδή, στην εξεταζόμενη περίπτωση, η κάλυψη δικτύου εστιάζεται αποκλειστικά στον χώρο S και οι περιοχές εκτός του χώρου αυτού δεν λαμβάνονται υπόψη από το δίκτυο.

4. Με δεδομένη τη συνάρτηση αναμενόμενης κίνησης $\lambda(x,y)$ που έχει αρχικά επιλεγεί από το σύστημα για να προσεγγίσει την κίνηση των χρηστών που πρόκειται να έλθουν στον χώρο S , για κάθε ισχυρό κόμβο υπολογίζεται η τιμή της αναμενόμενης έντασης κίνησης, με είσοδο στη συνάρτηση $\lambda(x,y)$ τις συντεταγμένες x και y της θέσης του ισχυρού κόμβου. Για τους λόγους που έχουν εξηγηθεί στο κεφάλαιο 3, η συνάρτηση αναμενόμενης κατανομής που χρησιμοποιεί αρχικά το σύστημα είναι η συνάρτηση που περιγράφει ένταση τυχαίας χωροχρονικής διαδικασίας Poisson. Η ένταση κίνησης πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο βάρος που βρέθηκε στο βήμα 3, για να προσδιοριστεί η ένταση κίνησης που αναμένεται να εξυπηρετήσει ο ισχυρός κόμβος με βάση την αρχική κατανομή.

Επεξήγηση: Αν ο ισχυρός κόμβος j καλύπτει επιφάνεια A_j ($A_0/4 < A_j \leq A_0$, όπου A_0 η επιφάνεια του πλήρους κύκλου ακτίνας R), τότε η κίνηση που αναμένεται ότι πρέπει να καλύψει ο κόμβος αυτός είναι:

$$\lambda(x_i, y_i) * A_j = \lambda(x_i, y_i) * \frac{A_j}{A_0} * A_0 \quad (4.1)$$

Κατά συνέπεια, ο σχετικός αναμενόμενος φόρτος του ισχυρού κόμβου j είναι $\lambda(x_i, y_i) * \frac{A_j}{A_0}$ και αναλογικά πρέπει αρχικά να του αποδοθούν οι διαθέσιμοι πόροι. Άρα το ποσοστό w_j των πόρων που πρέπει αρχικά να αποδοθούν στον κόμβο j , ως μέρος του συνολικού διαθέσιμου αριθμού πόρων N είναι:

$$w_j = \frac{\lambda(x_j, y_j) * A_j}{\sum_{j=1}^M [\lambda(x_j, y_j) * A_j]} \quad (4.2)$$

όπου $1 \leq j \leq M$, w_j το ποσοστό της συνολικής κίνησης που έχει ο ισχυρός κόμβος j , (x_j, y_j) οι συντεταγμένες της θέσης του j κόμβου, A_j το ποσοστό της επιφάνειας του κύκλου εμβέλειας του ισχυρού κόμβου j που βρίσκεται στο εσωτερικό του χώρου S . Στο τμήμα αυτό του αλγορίθμου υπολογίζεται το ποσοστό w_j .

5. Με βάση το ποσοστό w_j , ο sBS κατανέμει αρχικά στους M ισχυρούς κόμβους τους N συνολικούς πόρους. Δηλαδή, ο αριθμός των πόρων που θα διατεθούν σε κάθε ισχυρό κόμβο είναι ανάλογος του ποσοστού της συνολικής αναμενόμενης κίνησης χρηστών που έχει. Για παράδειγμα, σε έναν ισχυρό κόμβο στην περιοχή του οποίου αναμένεται το 10% της συνολικής κίνησης, θα διατεθεί το 10% των συνολικών N πόρων. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι N πόροι πρέπει να κατανεμηθούν με τρόπο ώστε να καλύπτουν τις ανάγκες οι οποίες αναμένεται να εμφανιστούν στις διάφορες περιοχές. Συνεπώς, ανάλογα με τις προβλεπόμενες ανάγκες πόρων που έχει κάθε ισχυρός κόμβος, θα διατεθεί ο αριθμός πόρων από τον sBS. Επειδή το επιμέρους ποσοστό w_j μπορεί να οδηγήσει σε μη ακέραιο αποτέλεσμα $N * w_j$ όσον αφορά τους πόρους που αντιστοιχούν στον ισχυρό κόμβο j , ο αλγόριθμος στρογγυλοποιεί το αποτέλεσμα στον πλησιέστερο ακέραιο και μετά διαθέτει τους πόρους.

6. Ο μέγιστος αριθμός χρηστών, N_{users} , που μπορεί να δεχθεί το σύστημα προσδιορίζεται από τον λόγο N/A . Ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών που αναμένει το δίκτυο ορίζεται η τιμή των συνολικών πόρων, N , που θα πρέπει να έχει το δίκτυο για να εξυπηρετήσει τους χρήστες που θα εμφανιστούν. Στις προσομοιώσεις αφίξεως χρηστών που θα μελετηθούν στη παρούσα εργασία, το δίκτυο καλείται να εξυπηρετήσει $N_{users} = 10000$ χρήστες. Συνεπώς, αφού οι απαιτούμενοι πόροι ανά χρήστη είναι $A = 5RBs$, οι συνολικοί πόροι του δικτύου ορίζονται ίσοι με $N = N_{users} * A = 10000 users * 5RBs/user = 50000 RBs$

Για να μπορεί να ελεγχθεί η μέση απόδοση του δικτύου κατά την προσομοίωση της άφιξης των χρηστών, ο αλγόριθμος εκτελεί πολλαπλές υλοποιήσεις της προσομοίωσης της άφιξης χρηστών, όπου ο αριθμός υλοποιήσεων, $N_{implentation}$, ορίζεται ίσος με 10. Δηλαδή, σε κάθε σενάριο προσομοίωσης άφιξης χρηστών, ο αλγόριθμος κατανομής πόρων δίνει αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε 10 ξεχωριστές υλοποιήσεις, όπου σε καθεμιά εξ αυτών εμφανίζονται 10000 χρήστες στον χώρο S . Παρότι η συνάρτηση κατανομής που χρησιμοποιεί το σύστημα προσομοίωσης για την άφιξη χρηστών στον χώρο είναι ίδια σε κάθε υλοποίηση του σεναρίου, η εφαρμογή της και, κατ' επέκταση, ο τρόπος εμφάνισης των χρηστών στον χώρο S δεν είναι πανομοιότυπος σε κάθε υλοποίηση. Με τον τρόπο αυτό, εξετάζεται η συμπεριφορά του αλγορίθμου κατανομής πόρων σε 10 παραλλαγές του σεναρίου προσομοίωσης και δημιουργείται σαφέστερη εικόνα για την απόδοση που έχει το δίκτυο με τη χρήση του αλγορίθμου αυτού.

Για τον λόγο αυτό, τα ακόλουθα βήματα εκτελούνται σε έναν βρόχο που επαναλαμβάνεται τόσες φορές, όσες είναι οι διαφορετικές υλοποιήσεις της προσομοίωσης, $N_{implementation}$.

7. Στη συνέχεια, γίνεται η προσομοίωση της άφιξης για καθένα από τους N/A χρήστες. Πρέπει να επισημανθεί ότι στόχος της προσομοίωσης είναι να αναπαραστήσει ένα ρεαλιστικό σενάριο, όπου αναμένεται μια απόκλιση της πραγματικής κατανομής των χρηστών σε σχέση με την αναμενόμενη κατανομή Poisson, με βάση την οποία ο sBS είχε καταναίμει αρχικά τους πόρους. Αν οι δύο αυτές κατανομές ταυτίζονταν, τότε η προσομοίωση του συστήματος θα είχε βέλτιστη συμπεριφορά και απόδοση, καθώς οι πόροι θα είχαν κατανεμηθεί στους ισχυρούς κόμβους με τον ίδιο τρόπο που οι χρήστες θα εμφανίζονταν στον χώρο S. Στην παρούσα εργασία, θα χρησιμοποιηθούν δύο εκδοχές της κατανομής εμφάνισης χρηστών, λ_{real} , που αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικές εκδοχές της προσομοίωσης. Στην πρώτη εκδοχή της προσομοίωσης, θεωρείται ότι οι χρήστες ακολουθούν στατική κατανομή εμφάνισης, η οποία δηλαδή δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο, και η οποία είναι διαφορετική από την αρχικά προβλεπόμενη κατανομή. Ο αλγόριθμος MATLAB για την ρουτίνα παραγωγής μιας στατικής συνάρτησης έντασης κατανομής χρηστών είναι ο εξής:

```
function la=lambda_1(x,y)
```

```
la = (sqrt(x)-sqrt(y));
```

Όπως φαίνεται από το παράδειγμα, η συνάρτηση στατικής κατανομής εξαρτάται μόνο από τις συντεταγμένες x,y του χρήστη και δεν εξαρτάται από τον χρόνο.

Στην δεύτερη εκδοχή, η εμφάνιση των χρηστών ακολουθεί κατανομή που μεταβάλλεται με τον χρόνο, καθώς φθάνουν νέοι χρήστες στον χώρο. Συγκεκριμένα, πρόκειται για μια κανονική κατανομή της οποίας το κέντρο, (x_0, y_0) , μεταβάλλεται με τον χρόνο. Για να υλοποιηθεί η συγκεκριμένη συνάρτηση λοιπόν το πρώτο βήμα είναι να γραφτεί ένα αρχείο της MATLAB, dat, με τις διακριτές τιμές του (x_0, y_0) για τις διάφορες τιμές του χρόνου, t . Στη συνέχεια, το κύριο πρόγραμμα φορτώνει αυτό το αρχείο, το center.dat, για να θέσει τις τιμές του αρχείου σε μεταβλητές με τις ακόλουθες εντολές:

```
load node2.dat % load the center of movement in case the d_lambda3_t is called
```

```
t=node2(:,1);  
x0=node2(:,2);  
y0=node2(:,3);
```

Η ρουτίνα που παράγει τη συνάρτηση έντασης των χρηστών δέχεται ως ορίσματα τις συντεταγμένες x, y του κάθε χρήστη καθώς και τις τιμές των μεταβλητών t, x0,y0 για να βρει το κέντρο που έχει η κατανομή των νέων χρηστών κατά τη χρονική στιγμή άφιξης του χρήστη. Το πλήθος των τιμών του κέντρου της κατανομής χρηστών είναι 10 στο αρχείο dat, δηλαδή υπάρχει αντιστοίχιση 10 κέντρων κατανομής σε 10 χρονικές στιγμές. Προκειμένου να υπάρξει πλήρης αντιστοίχιση των τιμών του κέντρου σε κάθε χρονική στιγμή άφιξης όλων των N/A χρηστών, χρησιμοποιείται η συνάρτηση interp. Η συνάρτηση interp είναι μια συνάρτηση από τη βιβλιοθήκη

του MATLAB, η οποία εφαρμόζει τη μέθοδο γραμμικής παρεμβολής και στην συγκεκριμένη περίπτωση αντιστοιχεί την χρονική στιγμή άφιξης κάθε χρήστη, t_i , στην τιμή (x_{0i}, y_{0i}) που παίρνει το κέντρο κατά τη χρονική στιγμή αυτή. Η ρουτίνα που καλεί το κύριο πρόγραμμα για την παραγωγή της συγκεκριμένης συνάρτησης έντασης κατανομής χρηστών είναι η εξής:

```
function la=lambda_2(t,x0,y0,x,y,n,Nusers)
```

```
ti=n/Nusers;
```

```
x0i=interp1(t,x0,ti);
```

```
y0i=interp1(t,y0,ti);
```

```
sd=0.1;
```

```
la = exp(-((x-x0i).^2+(y-y0i).^2)/sd^2/2);
```

Συνεπώς, καθώς εισέρχονται νέοι χρήστες η τιμή του κέντρου κατανομής αλλάζει και επομένως η κατανομή με την οποία εμφανίζονται οι χρήστες στους ισχυρούς κόμβους είναι μεταβλητή με τον χρόνο. Στο πλαίσιο αυτό, θα γίνει εφικτός ο έλεγχος προσαρμοστικότητας του συστήματος σε χρονικές αλλαγές, ιδιότητα απαραίτητη για τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Μέσω της συνάρτησης `rand` επιλέγονται τυχαία από το διάστημα $(0,1)$ με βάση την ομοιόμορφη κατανομή τιμές για τις συντεταγμένες x_1, y_1 κάθε νέου χρήστη. Το αν θα γίνουν δεκτές οι τιμές αυτές εξαρτάται από τη συνάρτηση έντασης λ_{real} της διαδικασίας άφιξης των χρηστών που ακολουθεί η προσομοίωση. Συγκεκριμένα, οι τιμές γίνονται αποδεκτές με πιθανότητα

$\lambda_{real}(x_1, y_1) / \max(\lambda_{real})$. Αυτό υλοποιείται με την επιλογή μέσω της συνάρτησης `rand` μιας τιμής από το διάστημα $(0,1)$ με βάση την ομοιόμορφη κατανομή και εάν αυτή η τιμή είναι μικρότερη ή ίση από το $\lambda_{real}(x_1, y_1) / \max(\lambda_{real})$, τότε το γεγονός της άφιξης του χρήστη στη θέση (x_1, y_1) γίνεται αποδεκτό, αλλιώς γίνεται νέα τυχαία επιλογή τιμών για τα x_1, y_1 , κλπ.

Ο αλγόριθμος MATLAB για την προσομοίωση άφιξης των χρηστών με σταθερή κατανομή στον χρόνο είναι ο εξής:

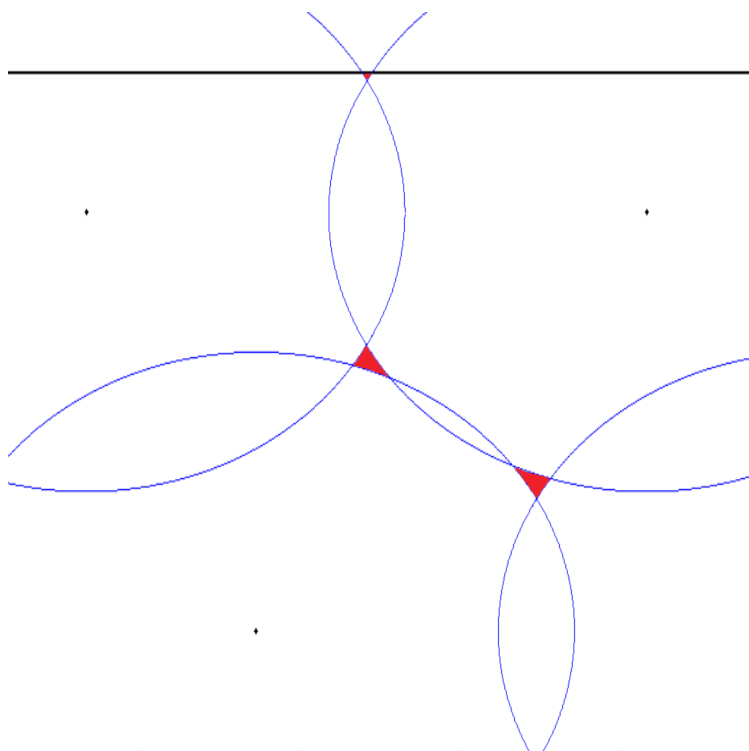
```
for i=1:Nusers
    x1=rand; % generate random x-position
    y1=rand; % generate random y-position
    flag=false;
    while ~flag
        la=lambda(x1,y1);
        if rand <= la/max_la
            coords = [coords ; x1 y1];
            flag=true; % Event accepted
        else
            x1=rand; % Regenerate random position
            y1=rand; % Regenerate random position
        end
    end
end
```

end

Ο αλγόριθμος MATLAB για την προσομοίωση άφιξης των χρηστών με μεταβλητή κατανομή στον χρόνο είναι παρόμοιος.

Κάθε φορά που επιλέγονται τυχαία οι συντεταγμένες ενός υποψήφιου νέου χρήστη περνάει χρόνος, ανεξαρτήτως αν τελικά οι συντεταγμένες αυτές γίνονται αποδεκτές ή όχι, το οποίο αποτυπώνεται στην αύξηση μιας χρονικής μεταβλητής κατά μια χρονική μονάδα (1 sec). Αυτό σημαίνει ότι μεταξύ των διαδοχικών αφίξεων νέων χρηστών μεσολαβούν κάποια μικρά χρονικά διαστήματα, στα οποία υπάρχει διακύμανση όσον αφορά τη διάρκεια τους (κυμαίνονται από 1 sec έως 4 λεπτά). Η διαδικασία άφιξης χρηστών γίνεται με αυτόν τον τρόπο στην προσομοίωση για να επιτευχθεί μια ρεαλιστική προσέγγιση της άφιξης χρηστών σε πραγματικά γεγονότα, όπου οι νέοι χρήστες δεν εισέρχονται στον χώρο ανά ίσα χρονικά διαστήματα. Οι διάρκειες άφιξης κάθε χιλιάδας χρηστών στα σενάρια προσομοίωσης που θα μελετηθούν στα επόμενα κεφάλαια είναι σε ίδια επίπεδα μεταξύ τους, έχοντας τυπική απόκλιση της τάξεως του 5% της μέσης τιμής της χρονικής διάρκειας κάθε χιλιάδας.

8. Για κάθε νεοεισερχόμενο χρήστη (δηλαδή για κόμβο με αποδεκτές συντεταγμένες $x1, y1$), ο αλγόριθμος βρίσκει σε ποιον ισχυρό κόμβο βρίσκεται πλησιέστερα, δηλαδή βρίσκει για ποιον ισχυρό κόμβο η απόσταση από τον χρήστη γίνεται ελάχιστη. Έστω I_0 ο εγγύτερος ισχυρός κόμβος και d η αντίστοιχη απόσταση. Στη συνέχεια, ελέγχεται αν η απόστασή του νέου χρήστη από τον συγκεκριμένο κόμβο είναι μικρότερη από $R + \text{tolerance}$, εμπίπτει δηλαδή στην εμβέλεια του κόμβου με μια ανοχή (tolerance) της τάξης του 0.05. Η ανοχή αυτή χρησιμοποιείται καθώς υπάρχουν μικρές περιοχές στον χώρο S , οι οποίες δεν εμπίπτουν σε κανέναν από τους κύκλους εμβέλειας των M ισχυρών κόμβων. Στο Σχ. 4.4 παρουσιάζεται μια τέτοια περίπτωση με περιοχές που δεν βρίσκονται στην εμβέλεια κανενός ισχυρού κόμβου.



Σχήμα 4.4: Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται μερικές περιοχές του χώρου S , οι οποίες δεν καλύπτονται από την εμβέλεια κανενός ισχυρού κόμβου.

Επομένως, πρέπει να υπάρχει ένα μικρό περιθώριο ως προς τον έλεγχο της απόστασης ώστε να καλυφθούν και αυτές οι περιοχές. Συνεπώς, για τον νέο χρήστη ελέγχεται η εξής συνθήκη:

$$d < R + \textit{tolerance} \quad (4.3)$$

Στην περίπτωση όπου η ανωτέρω συνθήκη ισχύει, τότε ο χρήστης συμπεριλαμβάνεται στους χρήστες που εξυπηρετεί ο ισχυρός κόμβος I_0 .

9. Μοίρασμα των πόρων στους χρήστες

Πλέον, έχοντας συνδεθεί ο χρήστης στον ισχυρό κόμβο I_0 , γίνεται ο έλεγχος αν ο ισχυρός κόμβος διαθέτει τους A πόρους που ζητεί ο νεοεισερχόμενος χρήστης. Στην περίπτωση όπου ο I_0 διαθέτει πόρους περισσότερους ή ίσους με A , τότε ο sBS δεσμεύει A πόρους από τον I_0 , αφαιρώντας τους από το σύνολο των διαθέσιμων πόρων του ισχυρού κόμβου I_0 , προκειμένου να εξυπηρετηθεί ο χρήστης. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή εάν οι διαθέσιμοι πόροι του I_0 είναι λιγότεροι από A , τότε σε πρώτη φάση οι εναπομείναντες πόροι του I_0 δεσμεύονται για την εξυπηρέτηση του χρήστη και στη συνέχεια ο sBS αναζητεί το υπόλοιπο των απαιτούμενων πόρων, \textit{restA} ($\textit{restA} = A - \text{πόροι που δόθηκαν από } I_0$), στους υπόλοιπους ισχυρούς κόμβους. Σημειώνεται ότι στη φάση αυτή η δέσμευση των πόρων δεν σημαίνει ακόμη αφαίρεση τους από τον ισχυρό κόμβο, καθώς αυτό θα γίνει μόνο στην περίπτωση όπου εξυπηρετηθεί τελικά ο χρήστης (βλ. παρακάτω). Για να είναι ταχεία η διαδικασία της αναζήτησης και να αποφευχθεί το σενάριο αναζήτησης πόρων από ισχυρούς κόμβους που δεν έχουν καθόλου διαθέσιμους πόρους να δώσουν, γίνεται πρώτα ταξινόμηση των M κόμβων. Η ταξινόμηση των ισχυρών κόμβων γίνεται με βάση τους διαθέσιμους πόρους κανονικοποιημένους με την αντίστοιχη αναμενόμενη ένταση, δηλαδή με βάση τον λόγο :

$$\textit{κριτήριο ταξινόμησης} = \frac{\textit{διαθέσιμοι πόροι του ισχυρού κόμβου}}{\textit{αναμενόμενη ένταση κίνησης στον ισχυρό κόμβο}} \quad (4.4)$$

Με την κανονικοποίηση των διαθέσιμων πόρων με βάση την αναμενόμενη ένταση εμφάνισης χρηστών, επιλέγονται στην κορυφή της ταξινόμησης οι ισχυροί κόμβοι που έχουν τον καλύτερο συνδυασμό διαθέσιμων πόρων και αναμενόμενου φόρτου κίνησης. Συνεπώς, στην περίπτωση που τους αφαιρεθούν πόροι, αυτοί οι ισχυροί κόμβοι έχουν την μικρότερη πιθανότητα να αναγκαστούν και αυτοί να ψάξουν για πόρους μετά. Αν το κριτήριο ταξινόμησης ήταν μόνο οι διαθέσιμοι πόροι, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ένταση κίνησης, τότε η ταξινόμηση δεν λειτουργεί καλά στις περιπτώσεις όπου ο ισχυρός κόμβος με τους περισσότερους διαθέσιμους πόρους έχει μεγάλη αναμενόμενη κίνηση, αφού αυτό σημαίνει ότι θα χρειαστεί τους πόρους που διαθέτει. Η αφαίρεση πόρων από αυτόν για να αποδοθούν σε άλλη περιοχή κάλυψης συνεπάγεται ότι ο συγκεκριμένος ισχυρός κόμβος θα οδηγηθεί σύντομα σε ανάγκη αναζήτησης πόρων.

Με βάση την ταξινόμηση που βασίζεται στη σχέση (4.4), ο sBS αναζητεί καταρχάς πόρους από τον ισχυρό κόμβο I_1 , ο οποίος ταξινομήθηκε πρώτος. Αν ο ισχυρός κόμβος αυτός έχει διαθέσιμους τους πόρους \textit{restA} , τότε ο sBS τους δεσμεύει και τους δίνει στον χρήστη μαζί με τους πόρους που είχε και έδωσε ο I_0 . Η τελική τιμή του βάθους αναζήτησης προκύπτει 1, αφού χρειάστηκε αναζήτηση του sBS σε έναν ακόμα ισχυρό κόμβο για την εύρεση των πόρων που ζήτησε ο νέος χρήστης. Στην αντίθετη περίπτωση όπου ο I_1 δεν διαθέτει τους \textit{restA} πόρους, τότε δεσμεύονται οι εναπομείναντες πόροι του I_1 και ο sBS συνεχίζει την αναζήτηση προς ανεύρεση των υπολοίπων πόρων \textit{restA}' ($\textit{restA}' = \textit{restA} - \text{πόροι που δόθηκαν από } I_1$) στον ισχυρό κόμβο I_2 που ήλθε δεύτερος στην ταξινόμηση και η τιμή του βάθους αναζήτησης γίνεται 2. Συνολικά, ο αλγόριθμος επιτρέπει βάθος αναζήτησης μέχρι και $\textit{depthmax}$, δηλαδή επιτρέπει στον sBS να ψάξει για πόρους σε $\textit{depthmax}$ το πολύ άλλους ισχυρούς κόμβους. Εφόσον ο sBS βρει

σε έως και depthmax βήματα αναζήτησης τους απαιτούμενους πόρους, όσοι πόροι έχουν δεσμευτεί καθ' όλη τη διαδικασία αναζήτησης αποδίδονται στον χρήστη για την εξυπηρέτησή του, αφού αφαιρεθούν από τους αντίστοιχους ισχυρούς κόμβους. Αν, όμως, ο sBS δεν βρει τους απαιτούμενους πόρους για την εξυπηρέτηση του χρήστη ύστερα από αναζήτηση σε depthmax ισχυρούς κόμβους, αυτό συνεπάγεται ότι ο χρήστης δεν πρόκειται να εξυπηρετηθεί καθώς δεν ανευρέθησαν οι A πόροι. Οι πόροι που δεσμεύτηκαν από τον I_0 μέχρι τον τελευταίο ισχυρό κόμβο στον οποίο έγινε αναζήτηση, παραμένουν στους διαθέσιμους πόρους των αντίστοιχων ισχυρών κόμβων, καθώς θα ήταν ασύμφορο να αφαιρεθούν για να δοθούν στον χρήστη, αφού ούτως ή άλλως δεν πρόκειται να εξυπηρετηθεί. Τέλος, διευκρινίζεται ότι το προτεινόμενο δίκτυο της παρούσας εργασίας μπορεί να ανταποκριθεί στην μετακίνηση ενός ενεργού χρήστη σε γειτονικό ισχυρό κόμβο, καθώς στην περίπτωση αυτή θα γίνει μεταπομπή της σύνδεσης και οι δεσμευμένοι πόροι θα δοθούν στον ισχυρό κόμβο στον οποίο μετακινήθηκε ο χρήστης για τη συνέχιση της εξυπηρέτησης της σύνδεσης.

10. Ανακατανομή σε περίπτωση που υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ της τρέχουσας κατανομής πόρων στους M ισχυρούς κόμβους και της κατανομής των χρηστών στον χώρο S

Όπως αναφέρθηκε, σε ad hoc γεγονότα είναι συχνό να προκύπτουν αποκλίσεις μεταξύ της προβλεπόμενης κατανομής χρηστών και της πραγματικής κατανομής με την οποία οι χρήστες εμφανίζονται στον χώρο S. Συνεπώς, είναι επιτακτικό το σύστημα να ελέγχει σε τακτά χρονικά διαστήματα το αν η κατανομή που χρησιμοποιεί προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική κατανομή ή όχι. Στην περίπτωση όπου δεν την προσεγγίζει καλά, το δίκτυο πρέπει να προχωρήσει σε ανακατανομή των συνολικών πόρων που έχουν απομείνει για να αποφευχθούν συνεχόμενες αναζητήσεις πόρων για τους νέους χρήστες, οι οποίες μειώνουν την επίδοση του συστήματος. Συγκεκριμένα, για να μπορεί να σχηματιστεί καθαρή εικόνα για το πώς κατανέμονται οι νέοι χρήστες στον χώρο, χρειάζεται να διαμορφωθεί πρώτα ένα δείγμα που να είναι αντιπροσωπευτικό.

Με βάση τη σχέση (3.7), προκύπτει ότι για $N/A=10000$ χρήστες, επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και επιθυμητό περιθώριο σφάλματος 5% το κατάλληλο μέγεθος δείγματος είναι 370 χρήστες. Το συγκεκριμένο μέγεθος δείγματος ικανοποιεί τις δύο πρώτες συνθήκες του εμπειρικού κανόνα των αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, καθώς η λ_{real} συνάρτηση κατανομής είναι συνάρτηση τυχαίας χωροχρονικής διαδικασίας και είναι μικρότερο του 10% των συνολικών $N/A=10000$ χρηστών. Όσον αφορά την τρίτη συνθήκη που απαιτεί την ύπαρξη ενός ελάχιστου πλήθους χρηστών (συνήθως 10) αντιστοιχισμένο σε κάθε ισχυρό κόμβο, στη συγκεκριμένη προσομοίωση δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου κάποιοι ισχυροί κόμβοι έχουν μειωμένη εμφάνιση χρηστών και επομένως θα χρειαστεί μεγάλο χρονικό διάστημα για να ικανοποιήσουν και αυτοί οι κόμβοι τη συγκεκριμένη συνθήκη. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος είναι πιθανό το σύστημα να υπολειτουργεί, αφού ενδέχεται να υπάρχει απόκλιση της πραγματικής κατανομής έντασης από την αναμενόμενη. Μάλιστα, όπως θα φανεί κατά την υλοποίηση των προσομοιώσεων στο επόμενο κεφάλαιο, υπάρχουν κόμβοι οι οποίοι δεν συγκεντρώνουν δέκα χρήστες καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η τρίτη συνθήκη αναφέρεται σε πληθυσμό ο οποίος είναι παγιωμένος χρονικά, δηλαδή η καταμέτρηση των στοιχείων του δείγματος γίνεται επί της ουσίας ταυτόχρονα, αφού οι μικρές χρονικές διαφορές μεταξύ της καταγραφής των δειγμάτων δεν αλλάζουν τις τιμές τους. Αντίθετα, στην προσομοίωση, καθώς παρέρχεται ο χρόνος, φθάνουν συνεχώς νέοι χρήστες στον χώρο S και, συνεπώς, ο αριθμός των χρηστών στον χώρο αλλάζει. Επιπλέον, η κατανομή τους στον χώρο ενδέχεται να μεταβάλλεται με τον χρόνο, καθώς εισέρχονται νέοι χρήστες. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, ο αλγόριθμος μπορεί να είναι ελαστικός, όσον αφορά την τρίτη συνθήκη, χρησιμοποιώντας αντιπροσωπευτικό δείγμα 370 χρηστών.

Επιπλέον, τόσο για το δείγμα των 370 χρηστών όσο και για το δείγμα των 170 χρηστών που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια της εργασίας, θεωρείται ότι το χρονικό τους διάστημα σε όλα τα σενάρια προσομοίωσης που θα μελετηθούν είναι μεγαλύτερο του χρόνου προσαρμογής των συνδέσεων. Συνεπώς, ικανοποιείται το σχετικό κριτήριο που ορίστηκε στην ενότητα 2.4.

Όταν λοιπόν σχηματιστεί αντιπροσωπευτικό δείγμα, ο αλγόριθμος ελέγχει εάν οι δύο κατανομές έχουν μεγάλη απόκλιση, δηλαδή εάν οι ισχυροί κόμβοι έχουν διαφορετικό ποσοστό της συνολικής κίνησης σε σχέση με αυτό που είχε προβλεφθεί αρχικά. Αρχικά, ο αλγόριθμος εξάγει την κατανομή της έντασης κίνησης στους ισχυρούς κόμβους κατά τη διάρκεια των αφίξεων των χρηστών του εξεταζόμενου δείγματος. Έτσι, καταλήγει με ένα διάνυσμα uln με M στοιχεία, όπου το στοιχείο I δείχνει το πόσοι χρήστες από το δείγμα έχουν έρθει στον ισχυρό κόμβο I . Τα στοιχεία του πίνακα κανονικοποιούνται, ώστε να εμφανίζεται πλέον το ποσοστό της συνολικής κίνησης σε κάθε ισχυρό κόμβο. Στη συνέχεια, συγκρίνεται αυτό το διάνυσμα με το επίσης κανονικοποιημένο διάνυσμα, uln_pren , το οποίο δείχνει το ποσοστό της συνολικής κίνησης που αντιστοιχεί σε κάθε ισχυρό κόμβο με βάση την αρχική/αναμενόμενη κατανομή. Για τη σύγκριση των δύο κατανομών, χρησιμοποιείται ο έλεγχος Kolmogorov-Smirnov, που έχει αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Όταν η μέγιστη διαφορά μεταξύ των δύο κατανομών υπερβαίνει ένα κατώφλι, D_a , που στην προσομοίωση έχει τεθεί ίσο με 7%, τότε το σύστημα συμπεραίνει ότι υπάρχει μεταβολή και άρα ανάγκη για ανακατανομή των εναπομεινάντων πόρων στους M ισχυρούς κόμβους. Ως νέα κατανομή της κίνησης στους M ισχυρούς κόμβους χρησιμοποιείται η εμπειρική κατανομή κίνησης που εμφάνισαν οι ισχυροί κόμβοι κατά το χρονικό διάστημα της άφιξης του αντιπροσωπευτικού δείγματος. Συνεπώς, με βάση αυτή τη νέα κατανομή, κατανέμονται οι εναπομείναντες πόροι από τον sBS και ταυτόχρονα το διάνυσμα uln μηδενίζεται, ώστε να καταγράψει την κίνηση των χρηστών από το σημείο αυτό και μετά, δηλαδή κατά τη διάρκεια του επόμενου αντιπροσωπευτικού δείγματος. Το διάνυσμα uln_pren λαμβάνει τις τιμές του uln αφού αυτό αποτελεί την κατανομή για την επόμενη σύγκριση. Έτσι, όταν διαμορφωθεί νέο δείγμα, θα προσδιοριστεί η κατανομή χρηστών την οποία ακολούθησαν οι χρήστες του δείγματος και θα συγκριθεί με την κατανομή που αντιστοιχεί στο διάνυσμα uln_pren και την οποία ακολούθησε το δίκτυο κατά την τελευταία κατανομή πόρων στους ισχυρούς κόμβους και, αν χρειαστεί, θα γίνει εκ νέου ανακατανομή και ούτω καθεξής. Σε περίπτωση που η μέγιστη διαφορά των δύο κατανομών δεν ξεπερνά το D_a , τότε το σύστημα συνεχίζει να λειτουργεί με την κατανομή πόρων που έχει γίνει προηγουμένως και για τον λόγο αυτό το uln_pren δεν αλλάζει. Το uln μηδενίζεται, ώστε να μετρήσει την κατανομή που θα εμφανίσουν οι χρήστες του επόμενου δείγματος. Αυτή η κατανομή θα συγκριθεί με την κατανομή που αντιστοιχεί στο διάνυσμα uln_pren . Δηλαδή, η εμπειρική κατανομή εξάγεται από ένα δείγμα κάθε φορά. Έτσι, σε κάθε περίπτωση, συγκρίνεται η κατανομή που παρουσιάζει ένα δείγμα μεμονωμένα με την αναμενόμενη κατανομή. Με το συγκεκριμένο σχήμα ανακατανομής, ο αλγόριθμος μπορεί να γίνεται αρκετά ευαίσθητος σε διακυμάνσεις της κατανομής από δείγμα σε δείγμα, αλλά αυτή η ευαισθησία κρατά σε υψηλά επίπεδα την απόδοση του δικτύου σε περιπτώσεις μεταβαλλόμενων κατανομών εμφάνισης νέων χρηστών (βλ. Παλιρροϊκό φαινόμενο), οι οποίες απαιτούν γρήγορη απόκριση από το σύστημα. Συνεπώς, το δίκτυο μπορεί να ελέγχει αν η πραγματική κατανομή αλλάζει με τον χρόνο πραγματοποιώντας ανακατανομή όταν αυτό συμβαίνει, ώστε να προσαρμόζεται στις αλλαγές.

Στο τέλος, αφού ολοκληρωθούν τα προαναφερθέντα βήματα, ο αλγόριθμος συνδυάζει τα αποτελέσματα από τις επιμέρους υλοποιήσεις και εκτιμά τη μέση τιμή του βάθους αναζήτησης καθώς οι χρήστες αυξάνουν από 0 έως N/A, λαμβάνοντας τον μέσο όρο μεταξύ των αντίστοιχων τιμών στις διαφορετικές υλοποιήσεις. Στη συνέχεια, εμφανίζει διάγραμμα του βάθους αναζήτησης σε συνάρτηση με το πλήθος των εμφανιζόμενων χρηστών από 0 έως N/A. Το διάγραμμα αυτό απεικονίζει ουσιαστικά την απόδοση του συστήματος με τον χρόνο, δηλαδή καθώς εισέρχονται νέοι χρήστες στον χώρο του ad hoc γεγονότος. Στο σχετικό σχήμα εμφανίζονται αποτελέσματα ανά

χρήστη, αλλά και για ομάδες χρηστών (5 ή 10 χρηστών- στην περίπτωση ομαδοποιήσεων τα αποτελέσματα είναι περισσότερο εξομαλυμένα). Με αυτά τα διαγράμματα καθίσταται εφικτό να ελεγχθεί η απόδοση του συστήματος καθώς και να συγκριθεί με την απόδοση συστημάτων που κάνουν στατική κατανομή πόρων ή συστημάτων που δεν κάνουν ανακατανομή πόρων.

Κεφάλαιο 5

Προσομοίωση λειτουργίας αλγόριθμου κατανομής πόρων σε χρονικά στατικές κατανομές εμφάνισης χρηστών

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι υλοποιήσεις της προσομοίωσης λειτουργίας του αλγόριθμου κατανομής πόρων για διαφορετικά σενάρια ως προς τον τρόπο εμφάνισης των N/A χρηστών στον χώρο S. Αυτές οι υλοποιήσεις πραγματοποιούνται στο υπολογιστικό περιβάλλον του MATLAB σε συνολικό πληθυσμό 10000 χρηστών κάθε φορά. Οι κατανομές των εισερχόμενων χρηστών στα σενάρια προσομοίωσης που μελετώνται σε αυτό το κεφάλαιο είναι στατικές, δηλαδή δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο. Για τα ακόλουθα σενάρια προσομοίωσης γίνεται η παραδοχή ότι οι πόροι A που απαιτούνται ανά χρήστη, είναι ίδιοι για όλους τους χρήστες. Το πλήθος των ζητούμενων ανά χρήστη πόρων τίθεται ίσο με $A=5 RBs$. Κατά συνέπεια, το σύστημα εφοδιάζεται με συνολικούς πόρους $N = N_{users} * A = 50000 RBs$ για να καταναείμει αρχικά στους $M=42$ ισχυρούς κόμβους. Επιπλέον, η συνάρτηση της αναμενόμενης κατανομής των εισερχόμενων χρηστών, με βάση την οποία ο sBS κατανέμει αρχικά τους συνολικούς πόρους στους ισχυρούς κόμβους, είναι η συνάρτηση έντασης τυχαίας χωρικής διαδικασίας Poisson και είναι η εξής:

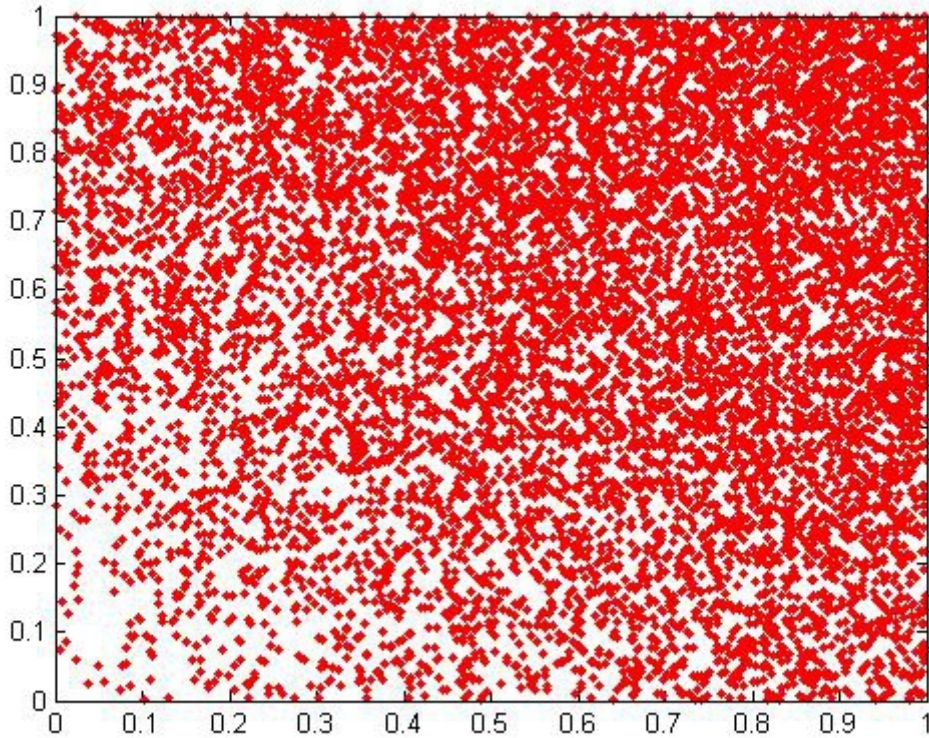
$$\lambda(x, y) = 100 * (x + y)$$

Για τα σενάρια προσομοίωσης που θα γίνουν στο 5ο και στο 6ο κεφάλαιο θεωρείται ότι οι χρήστες χρησιμοποιούν συνδέσεις 3ης κλάσης που παρέχονται από ένα best effort δίκτυο, οι οποίες, όπως αναφέρθηκε στο 2ο κεφάλαιο, είναι πολύ ευέλικτες σε ενδεχόμενες ανακατανομές. Συνεπώς, δεν τίθεται ενδεχόμενο πρόωρης διακοπής μιας σύνδεσης (connection drop) λόγω ανακατανομής. Σε κάθε σενάριο προσομοίωσης, γίνεται εκτέλεση $IE=10$ υλοποιήσεων του σεναρίου, έτσι ώστε να μπορεί να προσδιορισθεί η μέση απόδοση του συστήματος.

5.2 Πρώτο σενάριο προσομοίωσης: Αναμενόμενη συνάρτηση κατανομής ίση με την πραγματική

Στην πρώτη προσομοίωση λειτουργίας του αλγόριθμου θεωρείται το σενάριο κατά το οποίο η εμφάνιση νέων χρηστών στον χώρο S ακολουθεί την ίδια συνάρτηση κατανομής έντασης με την προσδοκώμενη. Δηλαδή, η συνάρτηση έντασης κατανομής κίνησης των χρηστών, λ_{real} , είναι η εξής: $\lambda_{real}(x, y) = 100 * (x + y)$

Με βάση αυτήν τη συνάρτηση κατανομής, οι χρήστες κατανέμονται στον χώρο S όπως φαίνεται στο Σχ. 5.1.



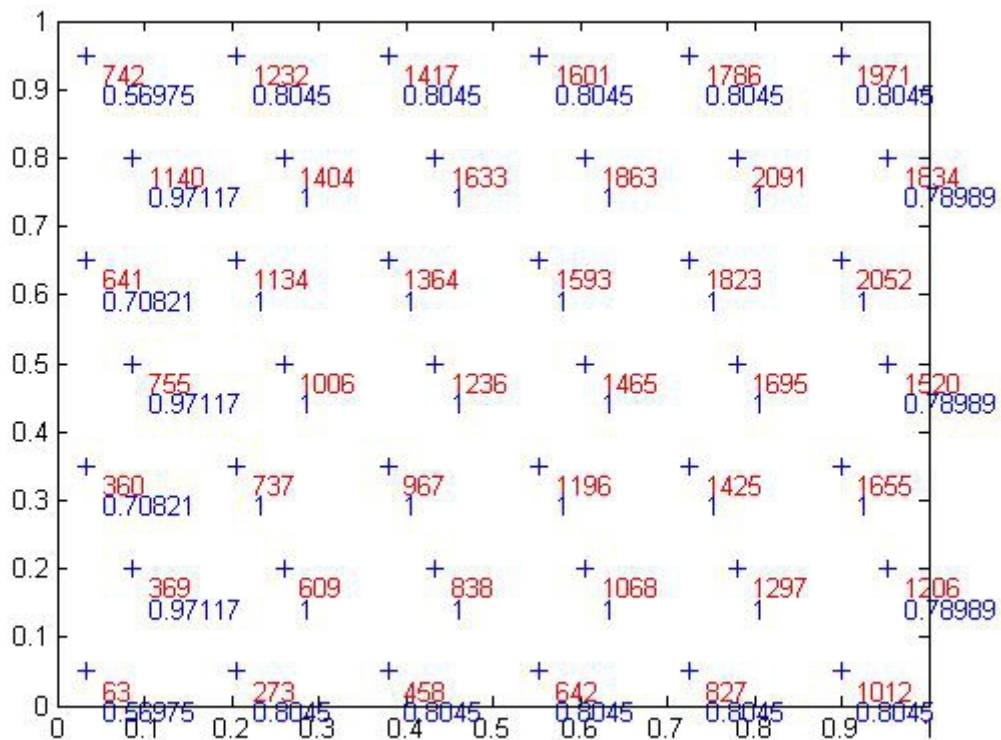
Σχήμα 5.1: Απεικόνιση θέσεων των $N_{users}=10000$ χρηστών με βάση τη χωρική ένταση της διαδικασίας Poisson $\lambda_{real}(x,y)=100*(x+y)$

Όταν σχηματιστεί ένα ικανοποιητικό δείγμα εμφανισθέντων χρηστών, το σύστημα ελέγχει εάν η κατανομή του δείγματος χρηστών στον χώρο είναι ίδια με την προσδοκώμενη κατανομή με βάση την οποία κατανεμήθηκαν οι πόροι στους ισχυρούς κόμβους. Όπως έχει εξηγηθεί στην ενότητα 4.2, το μέγεθος του δείγματος καθορίζεται ανάλογα με το επίπεδο εμπιστοσύνης και το περιθώριο σφάλματος που επιθυμεί το δίκτυο για το δείγμα. Για επιθυμητό περιθώριο σφάλματος ίσο με 5% και επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης 95% σε δείγμα που λαμβάνεται από συνολικό πληθυσμό 10000 χρηστών, προκύπτει ότι το κατάλληλο μέγεθος δείγματος είναι 370 χρήστες. Συνεπώς, το δίκτυο ελέγχει ανά 370 χρήστες αν υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ της αναμενόμενης κατανομής κίνησης και της πραγματικής κατανομής κίνησης.

Στη συνέχεια, πρέπει να οριστεί η οριακή τιμή, D_a με βάση την οποία γίνεται ο έλεγχος Kolmogorov- Smirnov μεταξύ της αναμενόμενης και της εμπειρικής κατανομής των χρηστών στους ισχυρούς κόμβους. Εφόσον το μέγεθος δείγματος, N , είναι 370 και το επιθυμητό επίπεδο σημαντικότητας, α , είναι 5%, από τη σχέση (3.9) προκύπτει ότι το D_a σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης είναι ίσο με 0.071.

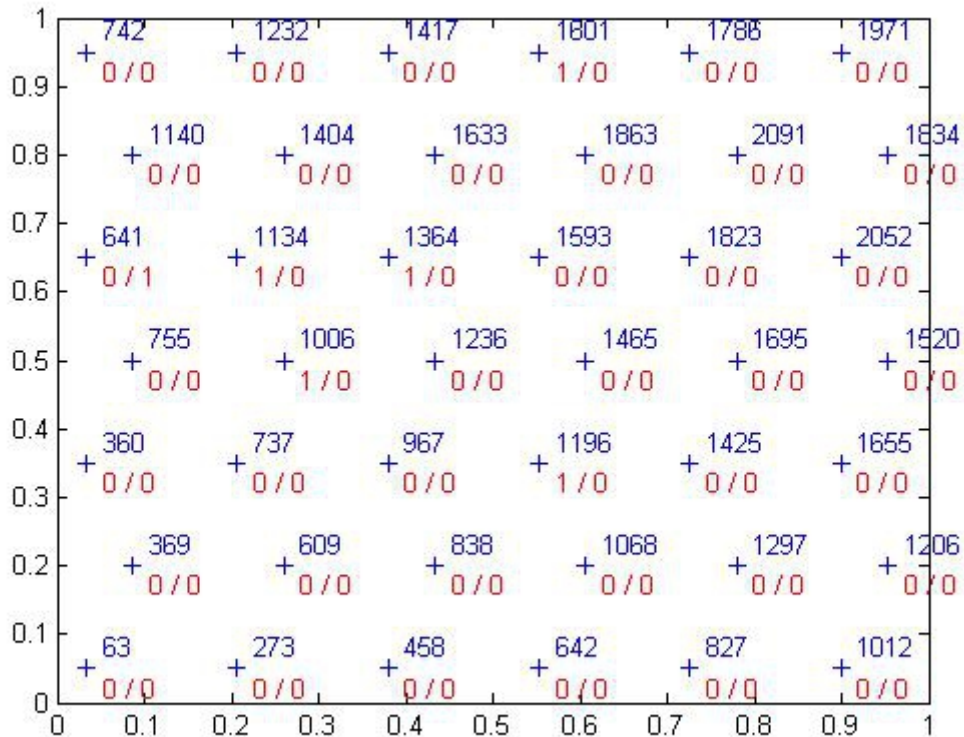
Αρχικά, το μέγιστο βάθος αναζήτησης, $depthmax$, τίθεται ίσο με 3.

Με βάση την αρχικά αναμενόμενη κατανομή κίνησης, ο sBS κατανέμει τους πόρους στους ισχυρούς κόμβους ως εξής:



Σχήμα 5.2: Αρχική κατανομή των συνολικών πόρων στους ισχυρούς κόμβους με βάση την αναμενόμενη κίνηση. Με κόκκινο αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανέμονται σε κάθε ισχυρό κόμβο στην αρχή και με μπλε αναγράφεται το κλάσμα της περιοχής εμβέλειας του ισχυρού κόμβου που βρίσκεται μέσα στον χώρο S .

Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.2, η κατανομή των πόρων στους ισχυρούς κόμβους είναι ανισομερής, καθώς αποδίδονται περισσότεροι πόροι στους ισχυρούς κόμβους στους οποίους αναμένεται μεγαλύτερη κίνηση χρηστών σύμφωνα με τη συνάρτηση αναμενόμενης κίνησης $\lambda(x, y)$. Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της πρώτης από τις ΙΕ υλοποιήσεις του πρώτου σεναρίου, φαίνονται στο Σχ. 5.3, όπου παρουσιάζονται οι εναπομείναντες πόροι καθώς και οι μη εξυπηρετηθέντες χρήστες ανά ισχυρό κόμβο:



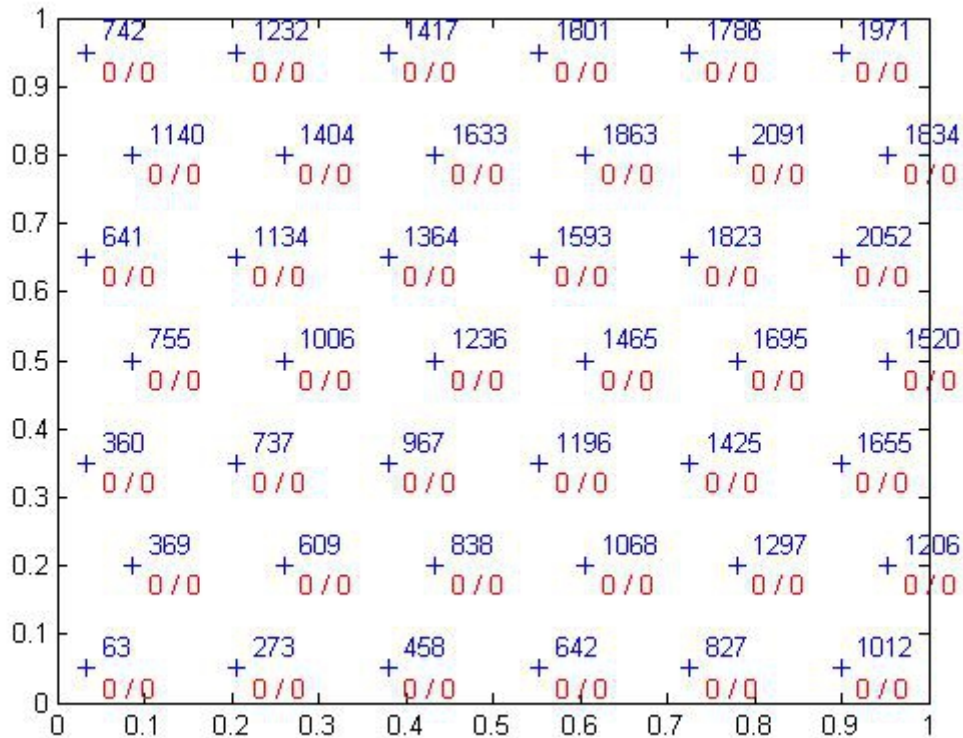
Σχήμα 5.3: Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του πρώτου σεναρίου με $depthmax = 3$. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανομήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).

Παρατηρείται ότι υπάρχει συνολικά ένας μη εξυπηρετημένος χρήστης και ότι οι συνολικοί εναπομείναντες πόροι είναι $A=5 RBs$. Επειδή στον αλγόριθμο υπάρχει εντολή να εμφανιστεί ο αριθμός σειράς άφιξης του χρήστη σε περίπτωση που δεν εξυπηρετηθεί, βρίσκεται ότι είναι ο 10000ος χρήστης που δεν εξυπηρετείται. Πράγματι, ο 10000ος χρήστης βρισκόταν στην εμβέλεια του 25ου ισχυρού κόμβου που είχε 0 πόρους τη χρονική στιγμή της άφιξής του, συνεπώς ο sBS ξεκίνησε διαδικασία αναζήτησης πόρων από τους υπόλοιπους ισχυρούς κόμβους. Οι επόμενοι τρεις ισχυροί κόμβοι στους οποίους έναξε, είχαν 1 RB έκαστος, που συνολικά δεν έφθαναν τους 5 RBs που ζητούσε ο χρήστης. Συνεπώς, εφόσον δεν βρέθηκαν οι απαιτούμενοι πόροι σε 3 βήματα αναζήτησης ($depthmax=3$), ο χρήστης δεν εξυπηρετήθηκε.

Στις υπόλοιπες 9 υλοποιήσεις του πρώτου σεναρίου, προέκυψαν 7 φορές ένας μη εξυπηρετημένος χρήστης και 2 φορές 0 μη εξυπηρετημένοι χρήστες. Στις 7 φορές που προκύπτει ένας μη εξυπηρετημένος χρήστης, οι 6 περιπτώσεις αφορούν τον 10000ο χρήστη και η μία τον 9999ο χρήστη. Αυτό οφείλεται στο ότι τη χρονική στιγμή που εισέρχεται στον χώρο ο 9999ος και ο 10000ος χρήστης, οι πόροι που έχουν απομείνει σε κάθε ισχυρό κόμβο είναι πολύ λίγοι, καθώς στην περίπτωση που έχουν εξυπηρετηθεί όλοι οι προηγούμενοι χρήστες, θα υπάρχουν συνολικά 5 πόροι στους 42 ισχυρούς κόμβους όταν φθάσει ο 10000ος χρήστης. Συνεπώς, είναι πολύ πιθανή η περίπτωση να βρει ο χρήστης αυτός 0 πόρους στον ισχυρό κόμβο στον οποίο εισήλθε αρχικά και κατά την αναζήτηση πόρων σε 3 ισχυρούς κόμβους να μη μπορούν να βρεθούν $A=5 RBs$ πόροι. Επιπλέον, υπάρχει και η περίπτωση ο 10000ος χρήστης να βρει 0 πόρους στον ισχυρό κόμβο στον οποίο προσήλθε και, στη συνέχεια, οι ισχυροί κόμβοι, στους οποίους γίνεται αναζήτηση, να διαθέτουν 1 RB έκαστος. Άρα θα υπάρχουν περιπτώσεις όπου ακόμα και με βάθος αναζήτησης 4 το

σύστημα δεν θα μπορεί να συλλέξει τους απαιτούμενους πόρους για τους τελευταίους χρήστες. Προκειμένου λοιπόν να εξυπηρετηθούν όλοι οι χρήστες της προσομοίωσης από το σύστημα, το depthmax πρέπει να είναι ίσο με 5. Διαφορετικά, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα οι τελευταίοι χρήστες να μην εξυπηρετηθούν. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, αυτή η τιμή του μέγιστου βάθους αναζήτησης δεν επηρεάζει την απόδοση του συστήματος.

Θέτοντας το depthmax ίσο με 5, από την εκτέλεση της πρώτης υλοποίησης του σεναρίου προκύπτει το αποτέλεσμα του Σχ. 5.4:



Σχήμα 5.4: Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του πρώτου σεναρίου με depthmax = 5. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).

Πλέον όλοι οι χρήστες εξυπηρετήθηκαν και το σύστημα έχει μοιράσει όλους τους N διαθέσιμους πόρους. Το ίδιο ισχύει και στις επόμενες 9 υλοποιήσεις του σεναρίου. Επιπλέον, επειδή η αναμενόμενη κατανομή είναι ίδια με την πραγματική κατανομή, το όριο $D_a=0.071$ δεν υπερβαίνεται σε κανένα από τα αντιπροσωπευτικά δείγματα που σχηματίζονται κατά τις 10 υλοποιήσεις και συνεπώς δεν υπάρχει ανάγκη ανακατανομής των πόρων στους ισχυρούς κόμβους, όπως φαίνεται και στον πίνακα 5.1.

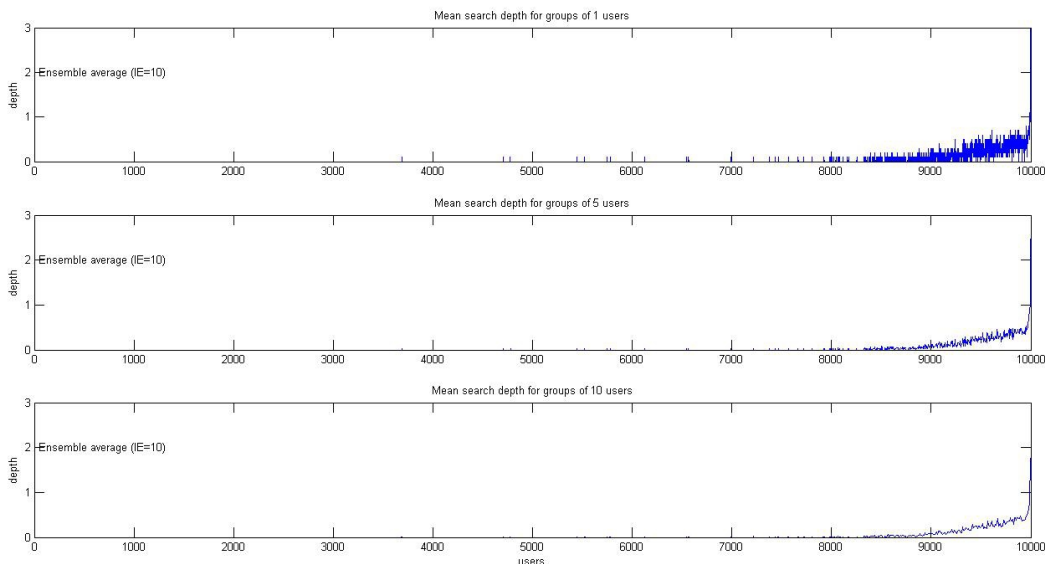
Πίνακας 5.1: Τιμές της μέγιστης διαφοράς μεταξύ της αναμενόμενης και της εμπειρικής κατανομής κίνησης για τις 10 υλοποιήσεις της προσομοίωσης άφιξης χρηστών.

iensemble=1	iensemble=2	iensemble=3	iensemble=4	iensemble=5
i=370 / D=0.016716	i=370 / D=0.024097	i=370 / D=0.017446	i=370 / D=0.023654	i=370 / D=0.024097
i=740 / D=0.012662	i=740 / D=0.011492	i=740 / D=0.01013	i=740 / D=0.015092	i=740 / D=0.015058
i=1110 / D=0.012211	i=1110 / D=0.0075303	i=1110 / D=0.010238	i=1110 / D=0.01284	i=1110 / D=0.013257
i=1480 / D=0.012064	i=1480 / D=0.0085205	i=1480 / D=0.0094541	i=1480 / D=0.0090481	i=1480 / D=0.0076259
i=1850 / D=0.0092265	i=1850 / D=0.0068989	i=1850 / D=0.0087784	i=1850 / D=0.0077951	i=1850 / D=0.0076784
i=2220 / D=0.0086859	i=2220 / D=0.0062856	i=2220 / D=0.0092288	i=2220 / D=0.0087861	i=2220 / D=0.0067948
i=2590 / D=0.0074405	i=2590 / D=0.0058934	i=2590 / D=0.0083923	i=2590 / D=0.0075635	i=2590 / D=0.0061781
i=2960 / D=0.0076984	i=2960 / D=0.0062973	i=2960 / D=0.0081027	i=2960 / D=0.0063443	i=2960 / D=0.0066832
i=3330 / D=0.0083414	i=3330 / D=0.0054339	i=3330 / D=0.0078775	i=3330 / D=0.0062835	i=3330 / D=0.0067775
i=3700 / D=0.0077108	i=3700 / D=0.005107	i=3700 / D=0.0082378	i=3700 / D=0.0059832	i=3700 / D=0.0076784
i=4070 / D=0.007013	i=4070 / D=0.0042471	i=4070 / D=0.0065671	i=4070 / D=0.0057375	i=4070 / D=0.0074327
i=4440 / D=0.0060092	i=4440 / D=0.0047681	i=4440 / D=0.0060757	i=4440 / D=0.0053076	i=4440 / D=0.006327
i=4810 / D=0.0060612	i=4810 / D=0.0037388	i=4810 / D=0.005452	i=4810 / D=0.0046921	i=4810 / D=0.0060152
i=5180 / D=0.0053335	i=5180 / D=0.0042734	i=5180 / D=0.0054965	i=5180 / D=0.0048249	i=5180 / D=0.0044415
i=5550 / D=0.0047128	i=5550 / D=0.0038359	i=5550 / D=0.0048144	i=5550 / D=0.004722	i=5550 / D=0.0039267
i=5920 / D=0.0044889	i=5920 / D=0.003453	i=5920 / D=0.0037108	i=5920 / D=0.0044314	i=5920 / D=0.003983
i=6290 / D=0.0046182	i=6290 / D=0.0040924	i=6290 / D=0.0048038	i=6290 / D=0.0042326	i=6290 / D=0.0032377
i=6660 / D=0.0043295	i=6660 / D=0.0040924	i=6660 / D=0.005177	i=6660 / D=0.0048067	i=6660 / D=0.0036264
i=7030 / D=0.0037615	i=7030 / D=0.0040141	i=7030 / D=0.0046532	i=7030 / D=0.0046092	i=7030 / D=0.0035338
i=7400 / D=0.0039822	i=7400 / D=0.0046373	i=7400 / D=0.0045892	i=7400 / D=0.0044314	i=7400 / D=0.0029486
i=7770 / D=0.0037248	i=7770 / D=0.0042769	i=7770 / D=0.0047694	i=7770 / D=0.0039556	i=7770 / D=0.0030452
i=8140 / D=0.0038593	i=8140 / D=0.0038448	i=8140 / D=0.0039872	i=8140 / D=0.0038386	i=8140 / D=0.0030101
i=8510 / D=0.0041758	i=8510 / D=0.0040027	i=8510 / D=0.004361	i=8510 / D=0.0042018	i=8510 / D=0.0027541
i=8880 / D=0.0048368	i=8880 / D=0.0036941	i=8880 / D=0.0051395	i=8880 / D=0.0039717	i=8880 / D=0.0026905
i=9250 / D=0.0047962	i=9250 / D=0.0039914	i=9250 / D=0.0053151	i=9250 / D=0.0041924	i=9250 / D=0.00274
i=9620 / D=0.0051746	i=9620 / D=0.0039539	i=9620 / D=0.0055812	i=9620 / D=0.0042922	i=9620 / D=0.0027857
i=9990 / D=0.0049243	i=9990 / D=0.0041195	i=9990 / D=0.0050268	i=9990 / D=0.0040843	i=9990 / D=0.0023551
iensemble=6	iensemble=7	iensemble=8	iensemble=9	iensemble=10
i=370 / D=0.022779	i=370 / D=0.015058	i=370 / D=0.024097	i=370 / D=0.021037	i=370 / D=0.019491
i=740 / D=0.011864	i=740 / D=0.015786	i=740 / D=0.021369	i=740 / D=0.014838	i=740 / D=0.016794
i=1110 / D=0.012828	i=1110 / D=0.0097025	i=1110 / D=0.016864	i=1110 / D=0.012136	i=1110 / D=0.016794
i=1480 / D=0.0092243	i=1480 / D=0.0094676	i=1480 / D=0.013261	i=1480 / D=0.011517	i=1480 / D=0.011389
i=1850 / D=0.0086838	i=1850 / D=0.0085216	i=1850 / D=0.010558	i=1850 / D=0.011055	i=1850 / D=0.00834
i=2220 / D=0.010125	i=2220 / D=0.0083414	i=2220 / D=0.008756	i=2220 / D=0.0094897	i=2220 / D=0.0071688
i=2590 / D=0.0084521	i=2590 / D=0.0071731	i=2590 / D=0.007469	i=2590 / D=0.0094897	i=2590 / D=0.0058628
i=2960 / D=0.0078773	i=2960 / D=0.0057735	i=2960 / D=0.0068416	i=2960 / D=0.0080816	i=2960 / D=0.0049827
i=3330 / D=0.0077271	i=3330 / D=0.0055858	i=3330 / D=0.0064205	i=3330 / D=0.0076879	i=3330 / D=0.0060757
i=3700 / D=0.0073368	i=3700 / D=0.0052784	i=3700 / D=0.0051524	i=3700 / D=0.0070573	i=3700 / D=0.0055351
i=4070 / D=0.0052974	i=4070 / D=0.0050671	i=4070 / D=0.0048866	i=4070 / D=0.0070327	i=4070 / D=0.0060757
i=4440 / D=0.0058068	i=4440 / D=0.00476	i=4440 / D=0.005625	i=4440 / D=0.006787	i=4440 / D=0.0063009
i=4810 / D=0.0055296	i=4810 / D=0.0042922	i=4810 / D=0.0059022	i=4810 / D=0.0071007	i=4810 / D=0.0053053
i=5180 / D=0.005292	i=5180 / D=0.0044704	i=5180 / D=0.0055607	i=5180 / D=0.0074571	i=5180 / D=0.0056896
i=5550 / D=0.0054465	i=5550 / D=0.0044447	i=5550 / D=0.0065259	i=5550 / D=0.0079461	i=5550 / D=0.0055351
i=5920 / D=0.0055816	i=5920 / D=0.0037465	i=5920 / D=0.0061881	i=5920 / D=0.0073605	i=5920 / D=0.0054
i=6290 / D=0.0052239	i=6290 / D=0.0034484	i=6290 / D=0.006208	i=6290 / D=0.0060489	i=6290 / D=0.0055987
i=6660 / D=0.0050332	i=6660 / D=0.0030333	i=6660 / D=0.0062256	i=6660 / D=0.0062344	i=6660 / D=0.0047243
i=7030 / D=0.0054046	i=7030 / D=0.0026618	i=7030 / D=0.0055302	i=7030 / D=0.0052624	i=7030 / D=0.0043687
i=7400 / D=0.0049281	i=7400 / D=0.0027438	i=7400 / D=0.0053097	i=7400 / D=0.004433	i=7400 / D=0.0040486
i=7770 / D=0.0050118	i=7770 / D=0.0024271	i=7770 / D=0.0047614	i=7770 / D=0.0047544	i=7770 / D=0.0034705
i=8140 / D=0.0052107	i=8140 / D=0.003024	i=8140 / D=0.0049504	i=8140 / D=0.0053335	i=8140 / D=0.0038644
i=8510 / D=0.0059798	i=8510 / D=0.0025334	i=8510 / D=0.0054151	i=8510 / D=0.0056273	i=8510 / D=0.0036133
i=8880 / D=0.0054461	i=8880 / D=0.0027476	i=8880 / D=0.0048276	i=8880 / D=0.005784	i=8880 / D=0.0042303
i=9250 / D=0.0053876	i=9250 / D=0.0025486	i=9250 / D=0.0043951	i=9250 / D=0.0051714	i=9250 / D=0.0057708
i=9620 / D=0.0050217	i=9620 / D=0.0022328	i=9620 / D=0.0040999	i=9620 / D=0.0051256	i=9620 / D=0.0056336
i=9990 / D=0.0048851	i=9990 / D=0.002175	i=9990 / D=0.0042236	i=9990 / D=0.0049243	i=9990 / D=0.0052062

Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχει περίπτωση να υπάρξει ανάγκη ανακατανομής ακόμα και σε αυτό το σενάριο. Εφόσον το επίπεδο εμπιστοσύνης στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 95%, υπάρχει 5% πιθανότητα το δείγμα να μην είναι αντιπροσωπευτικό και η κατανομή των χρηστών του δείγματος να εμφανίζει σημαντική απόκλιση από την αναμενόμενη κατανομή και να προκύψει ανάγκη ανακατανομής των πόρων. Επιπλέον, πάντα υπάρχουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ της κατανομής πόρων στους ισχυρούς κόμβους και της κατανομής χρηστών στους ισχυρούς κόμβους. Αυτό οφείλεται στο ότι η υλοποίηση της προσομοίωσης άφιξης χρηστών προσεγγίζει την κατανομή που περιγράφει η συνάρτηση $\lambda(x, y)$, αλλά δεν ταυτίζεται με αυτήν. Πάντως, η πιθανότητα να προκύψει ανάγκη ανακατανομής στο πρώτο σενάριο είναι σχετικά μικρή.

Μια παράμετρος που μετράται κατά τη διάρκεια των 10 υλοποιήσεων της προσομοίωσης για να διαπιστωθεί το επίπεδο απόδοσης της λειτουργίας του δικτύου είναι το μέσο βάθος αναζήτησης για κάθε χρήστη. Το μέσο βάθος αναζήτησης είναι ο μέσος όρος του πλήθους των ισχυρών κόμβων, στους οποίους ο sBS αναγκάστηκε να εξεύρει πόρους για να εξυπηρετήσει κάποιο χρήστη, ο οποίος είχε απαιτήσεις που δεν καλύπτονταν από τον ισχυρό κόμβο στην εμβέλεια του οποίου βρισκόταν. Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος αναζήτησης τόσο πιο πολύ καθυστερεί το σύστημα να εξυπηρετήσει τον χρήστη, καθώς η αναζήτηση πόρων σε άλλους ισχυρούς κόμβους απαιτεί χρόνο. Συνεπώς, το βάθος αναζήτησης δείχνει το πόσο γρήγορη απόκριση έχει το δίκτυο στην εξυπηρέτηση κάθε χρήστη. Δηλαδή, εάν κατά τις 10 εκτελέσεις μιας εκδοχής του αλγόριθμου προκύψει ότι το μέσο βάθος αναζήτησης για ένα χρήστη είναι 0.5, ενώ το αντίστοιχο μέσο βάθος μιας άλλης εκδοχής είναι 0.9, τότε αυτό σημαίνει ότι στην πρώτη εκδοχή το δίκτυο ανταποκρίνεται λίγο πιο γρήγορα στις ανάγκες του συγκεκριμένου χρήστη, καθώς χρειάζεται να αναζητήσει πόρους σε συνολικά μικρότερο αριθμό ισχυρών κόμβων για να εξεύρει τους ζητούμενους πόρους.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το μέσο βάθος αναζήτησης πόρων ανά χρήστη, το οποίο προκύπτει από τον μέσο όρο των βαθών αναζήτησης των 10 υλοποιήσεων για κάθε χρήστη.



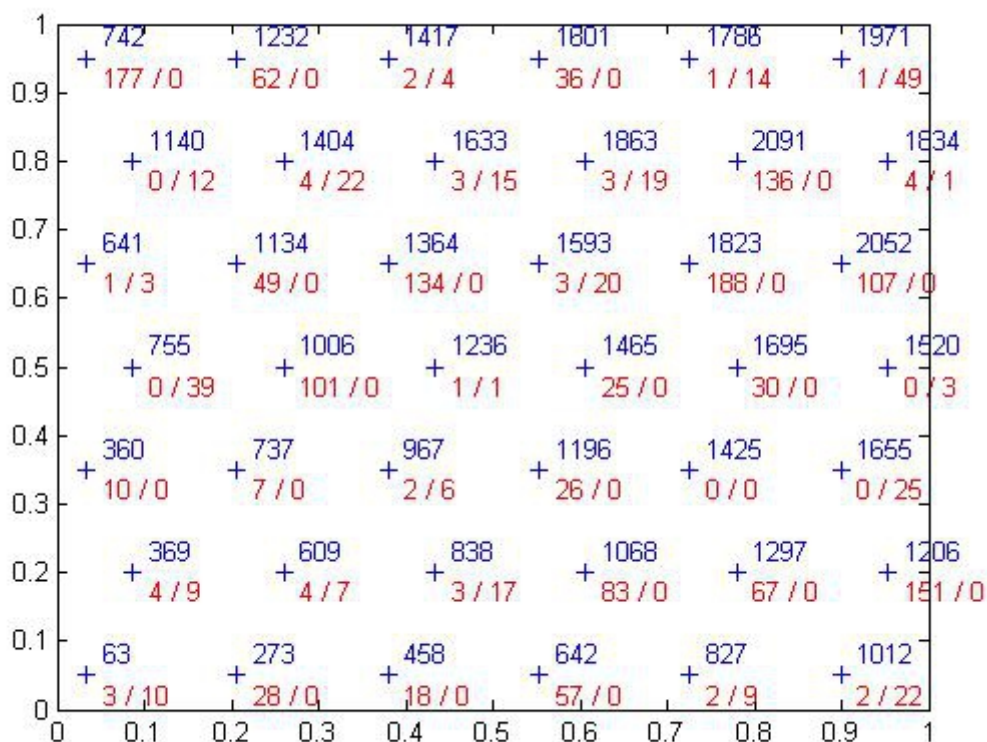
Σχήμα 5.5: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του πρώτου σεναρίου προσομοίωσης με $depth_{max}=5$. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.5, το μέσο βάθος αναζήτησης είναι πολύ μικρό, όπως είναι αναμενόμενο, αφού η κατανομή πόρων στους ισχυρούς κόμβους γίνεται με βάση συνάρτηση κατανομής, η οποία σύμφωνα με αυτό το σενάριο προσομοίωσης είναι ίδια με τη συνάρτηση με βάση την οποία θα αφιχθούν στον χώρο οι χρήστες της προσομοίωσης. Ως εκ τούτου, οι ισχυροί κόμβοι έχουν τόσους πόρους όσους πρόκειται να χρειαστούν όταν φθάσουν σε αυτούς οι χρήστες και ο sBS δεν χρειάζεται να κάνει συχνά αναζήτηση πόρων. Το βάθος αναζήτησης δεν θα είναι μηδενικό για όλους τους χρήστες, καθώς, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, η υλοποίηση της αρχικής διάθεσης πόρων στους ισχυρούς κόμβους από τον sBS δεν ταυτίζεται με την υλοποίηση της εμφάνισης χρηστών στους ισχυρούς κόμβους, καίτοι ακολουθούν την ίδια συνάρτηση κατανομής. Για αυτόν τον λόγο, καθώς μεγαλώνει ο αριθμός χρηστών και μειώνονται οι διαθέσιμοι πόροι ανά ισχυρό κόμβο, οι μικρές αποκλίσεις που προκύπτουν από τις υλοποιήσεις των δύο κατανομών γίνονται περισσότερο εμφανείς. Στις συγκεκριμένες 10 υλοποιήσεις, το μέσο βάθος αναζήτησης είναι 0 μέχρι τους 3685 χρήστες. Στη συνέχεια, από τους 3686 έως τους 8000 χρήστες, γίνονται περιστασιακά κάποιες αναζητήσεις πόρων και το μέσο βάθος αναζήτησης παραμένει πολύ κοντά στο 0. Μετά τους 8000 χρήστες το σύστημα αρχίζει να κάνει συχνότερα αναζητήσεις και μέχρι και τους 9000 χρήστες το μέσο βάθος αναζήτησης μένει κάτω από 0.5. Στην τελευταία χιλιάδα χρηστών η αύξηση του μέσου βάθους αναζήτησης γίνεται εντονότερη, λόγω των λίγων εναπομεινάντων πόρων σε σύγκριση με τις προηγούμενες χιλιάδες χρηστών. Όμως το μέσο βάθος αναζήτησης παραμένει μικρότερο του 1 μέχρι το 9988ο χρήστη στον οποίο υπερβαίνει τη μονάδα έχοντας τιμή 1.1, ενώ υπερβαίνει την τιμή 2 μόνο στους τελευταίους τρεις χρήστες (στον 9998ο, στον 9999ο και στον 10000ο) και μόνο στον τελευταίο χρήστη φθάνει την τιμή 4.

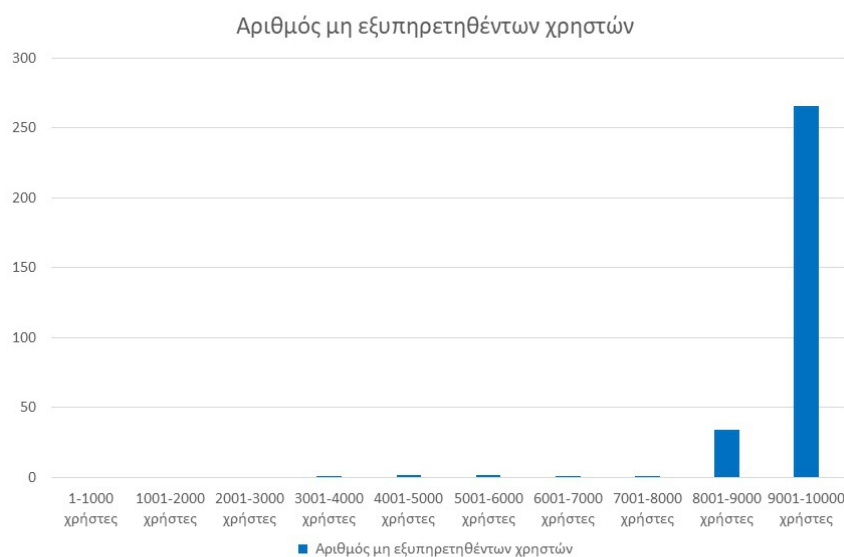
Από τα προηγούμενα, προκύπτει ότι η μεγάλη τιμή του μέγιστου βάθους αναζήτησης, $depthmax=5$, δεν προκαλεί χειροτέρευση της απόδοσης του συστήματος, καθώς στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης οι χρήστες, με εξαίρεση την τελευταία δεκατριάδα χρηστών, έχουν μέσο βάθος αναζήτησης κάτω από 1. Συνολικά, το δίκτυο πραγματοποιεί αναζήτηση πόρων μόνο στο 2.824% των περιπτώσεων των εξυπηρετηθέντων χρηστών. Συνεπώς, θέτοντας το μέγιστο αποδεκτό βάθος αναζήτησης ίσο με 5, επιτυγχάνεται η εξυπηρέτηση όλων των N/A χρηστών χωρίς ουσιαστικά να μειώνεται η απόδοση του συστήματος, όσον αφορά την χρονική απόκριση του δικτύου, απλώς καθυστερεί η εξυπηρέτηση κάποιων χρηστών της τελευταίας χιλιάδας.

Στη συνέχεια μελετάται η απόδοση του δικτύου όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα αναζήτησης πόρων ($depthmax=0$). Ο λόγος που μελετάται αυτή η περίπτωση είναι ότι αντιπροσωπεύει τη λειτουργία ενός δικτύου κατά την χρονική περίοδο αιχμής, δηλαδή όταν ο ρυθμός των νεοεισερχόμενων χρηστών είναι πολύ μεγάλος. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο ρυθμός εξυπηρέτησης χρηστών θα πρέπει να είναι στα ίδια επίπεδα με τον ρυθμό εμφάνισης χρηστών. Δηλαδή, το δίκτυο δεν έχει περιθώρια να καθυστερήσει στην εξυπηρέτηση των χρηστών λόγω αναζήτησης πόρων, διαφορετικά στους υπερφορτωμένους ισχυρούς κόμβους θα δημιουργηθούν μεγάλες ουρές αναμονής χρηστών που περιμένουν να εξυπηρετηθούν από το δίκτυο. Μεγάλη ουρά αναμονής συνεπάγεται καθυστερημένη απόκριση του δικτύου και κατ' επέκταση μειωμένη απόδοση του δικτύου για τους χρήστες που επισκέπτονται αυτούς τους ισχυρούς κόμβους κατά τη διάρκεια της ώρας αιχμής.

Σε περίπτωση που δεν επιτραπεί αναζήτηση πόρων για την εξυπηρέτηση χρηστών, τότε προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:



Σχήμα 5.6: Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του πρώτου σεναρίου με $depth_{max} = 0$. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).

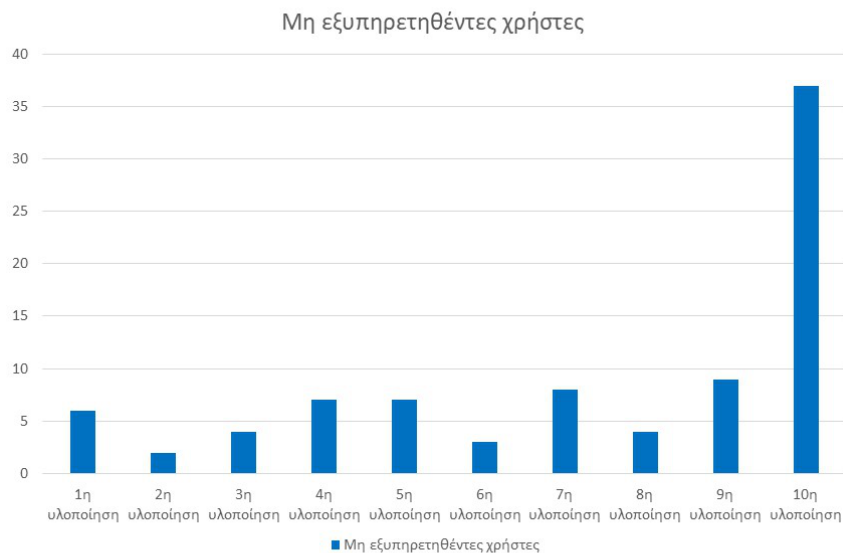


Σχήμα 5.7: Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην

πρώτη υλοποίηση του πρώτου σεναρίου με $depthmax = 0$

Στην πρώτη υλοποίηση του πρώτου σεναρίου, μένουν χωρίς εξυπηρέτηση συνολικά 307 χρήστες, δηλαδή το 3.07% του πληθυσμού των χρηστών. Με άλλα λόγια, το σύστημα επιτυγχάνει βαθμό εξυπηρέτησης ίσο με 96.93%. Στις περιπτώσεις αυτών των 307 χρηστών, οι αντίστοιχοι ισχυροί κόμβοι στους οποίους εμφανίζονται οι χρήστες δεν έχουν τους απαιτούμενους πόρους και χρειάζεται να γίνει αναζήτηση πόρων σε άλλους ισχυρούς κόμβους για να βρεθούν οι πόροι και να εξυπηρετηθούν. Εφόσον, λοιπόν, στην συγκεκριμένη προσομοίωση δεν επιτρέπεται η αναζήτηση πόρων, οι χρήστες αυτοί μένουν χωρίς εξυπηρέτηση. Όπως φαίνεται στο Σχ. 5.7, οι περισσότεροι μη εξυπηρετημένοι χρήστες εντοπίζονται στις δύο τελευταίες χιλιάδες χρηστών, καθώς στην ένατη χιλιάδα μένουν χωρίς εξυπηρέτηση 34 χρήστες και στη δέκατη χιλιάδα μένουν χωρίς εξυπηρέτηση 266 χρήστες. Αυτό οφείλεται στο ότι οι προαναφερθείσες μικρές αποκλίσεις μεταξύ της κατανομής πόρων στους ισχυρούς κόμβους και της κατανομής χρηστών στους ισχυρούς κόμβους γίνονται πιο έντονες στις τελευταίες χιλιάδες χρηστών λόγω των λίγων εναπομεινάντων πόρων του συστήματος. Ο υψηλός βαθμός εξυπηρέτησης του συστήματος είναι αναμενόμενος, καθώς η ταύτιση της αναμενόμενης και της πραγματικής κατανομής χρηστών μειώνει την ανάγκη αναζήτησης πόρων (όπως φαίνεται στον πίνακα 5.1) και κατ' επέκταση αυξάνει τον βαθμό εξυπηρέτησης του συστήματος όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα αναζήτησης πόρων. Στις 10 συνολικά εκτελέσεις του πρώτου σεναρίου προσομοίωσης χωρίς δυνατότητα αναζήτησης, ο μέσος βαθμός εξυπηρέτησης του δικτύου είναι ίσος με 97.286%.

Η εξυπηρετικότητα ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου (network serviceability) πρέπει να είναι στα επίπεδα του 99%. Για αυτόν τον λόγο δίνεται στο δίκτυο το περιθώριο να κάνει αναζήτηση πόρων σε έναν το πολύ ισχυρό κόμβο. Θέτοντας το $depthmax$ ίσο με 1 προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα κατά τις 10 εκτελέσεις του πρώτου σεναρίου προσομοίωσης:

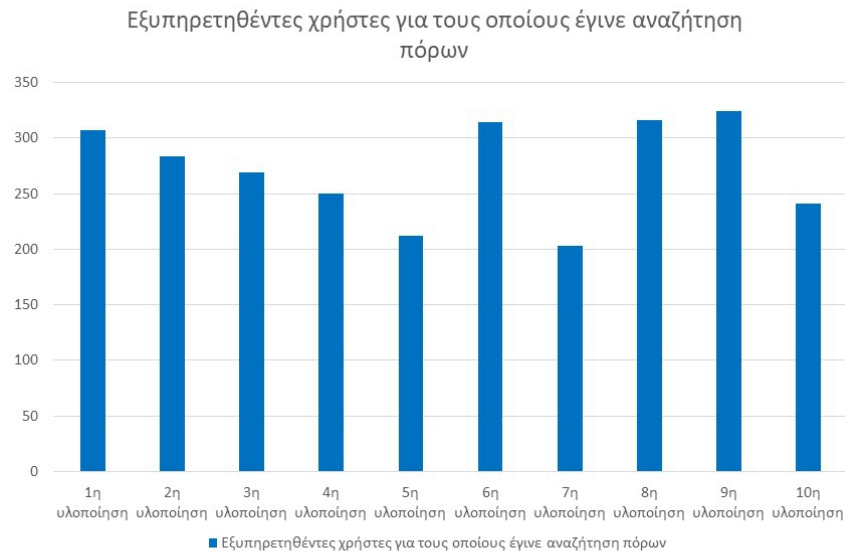


Σχήμα 5.8: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις του πρώτου σεναρίου προσομοίωσης με $depthmax = 1$.

Δίνοντας στο δίκτυο τη δυνατότητα ενός βήματος αναζήτησης, ο μέσος βαθμός εξυπηρέτησης κατά τις 10 υλοποιήσεις ανεβαίνει στο 99.913% που είναι πολύ ικανοποιητικό ποσοστό. Αυτό σημαίνει ότι το $100\% - 99.913\% = 0.087\%$ του συνολικού πληθυσμού χρηστών δεν εξυπηρετείται και αυτό

το ποσοστό αφορά τις περιπτώσεις που απαιτούν πολλαπλά (πάνω από 1) βήματα αναζήτησης για την εξεύρεση των απαιτούμενων πόρων.

Στο Σχ. 5.9 παρουσιάζεται ο αριθμός των εξυπηρετηθέντων χρηστών για την εξυπηρέτηση των οποίων το σύστημα αναγκάστηκε να κάνει αναζήτηση πόρων σε άλλους ισχυρούς κόμβους σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις του πρώτου σεναρίου προσομοίωσης με $depthmax=1$.



Σχήμα 5.9: Αριθμός εξυπηρετηθέντων χρηστών για την εξυπηρέτηση των οποίων έγινε αναζήτηση πόρων σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις του πρώτου σεναρίου προσομοίωσης με $depthmax = 1$.

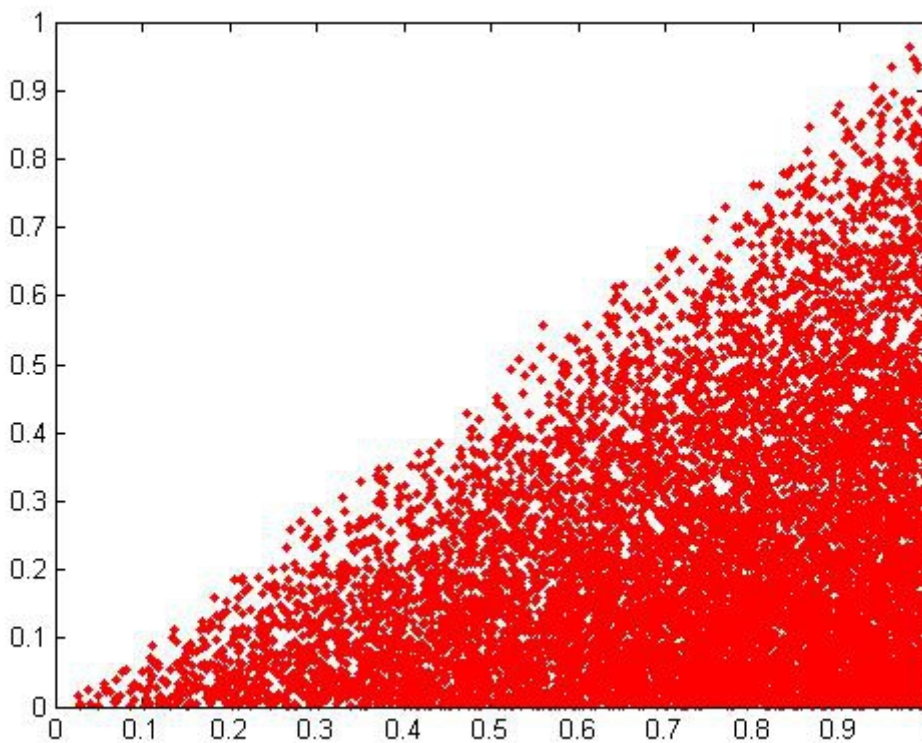
Σε 10 υλοποιήσεις του σεναρίου προκύπτει ότι το σύστημα έκανε αναζήτηση πόρων ενός βήματος για το 2.72% των χρηστών, το οποίο είναι πολύ χαμηλό ποσοστό. Αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο κατάφερε να καλύψει τις διεθνείς προδιαγραφές εξυπηρετικότητας, χωρίς να επιβαρυνθεί σημαντικά η απόδοσή του, αφού μόνο στο 2.72% των συνολικών χρηστών έχει μια μικρή καθυστέρηση στην απόκριση προκειμένου να αναζητήσει τους απαιτούμενους πόρους.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το 2.72% των περιπτώσεων των χρηστών απαιτεί ένα βήμα αναζήτησης πόρων και ότι το 0.087% απαιτεί πολλαπλά βήματα αναζήτησης, προκύπτει ότι όταν δίνεται στο δίκτυο η δυνατότητα ενός βήματος αναζήτησης, τότε στο $2.72\% + 0.087\% = 2.807\%$ των συνδέσεων των χρηστών το δίκτυο πρέπει να κάνει αναζήτηση πόρων για να εξυπηρετήσει τους χρήστες. Σε αυτό το σημείο πρέπει να διευκρινιστεί ότι αυτό το ποσοστό δεν αντιστοιχεί στο ποσοστό μη εξυπηρετηθέντων χρηστών που προέκυψε στις ίδιες υλοποιήσεις της προσομοίωσης με $depthmax=0$. Αυτό οφείλεται στο ότι όταν επιτραπεί αναζήτηση πόρων, το δίκτυο μπορεί να αφαιρέσει πόρους από έναν ισχυρό κόμβο για να τους δώσει σε έναν άλλον που τους έχει άμεσα ανάγκη. Ως αποτέλεσμα αυτού, ο ισχυρός κόμβος, στον οποίο αφαιρέθηκαν πόροι, θα έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να αναγκάσει στη συνέχεια το δίκτυο σε αναζήτηση πόρων λόγω δικής του ανεπάρκειας πόρων. Επομένως, στις υλοποιήσεις της προσομοίωσης με $depthmax=1$ θα προκύψουν κατά κανόνα περισσότερες συνδέσεις χρηστών που απαιτούν αναζήτηση πόρων σε σύγκριση με την περίπτωση που γινόταν η εκτέλεση των υλοποιήσεων με $depthmax=0$.

5.3 Δεύτερο σενάριο προσομοίωσης: Η πραγματική συνάρτηση κατανομής είναι διαφορετική από την αναμενόμενη και στατική με τον χρόνο

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης, η πραγματική συνάρτηση κατανομής της κίνησης των χρηστών είναι διαφορετική από την αναμενόμενη συνάρτηση κατανομής κίνησης και δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο. Η στατική συνάρτηση κατανομής της πραγματικής κίνησης που επιλέγεται για το συγκεκριμένο σενάριο της προσομοίωσης είναι η εξής:

$\lambda_{real}(x, y) = \sqrt{x} - \sqrt{y}$. Με βάση αυτήν τη συνάρτηση κατανομής, οι χρήστες κατανέμονται στον χώρο S όπως φαίνεται στο Σχ. 5.10.



Σχήμα 5.10: Απεικόνιση θέσεων των $N_{users} = 10000$ χρηστών με βάση τη χωρική ένταση της διαδικασίας Poisson $\lambda_{real}(x, y) = \sqrt{x} - \sqrt{y}$

Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.10, σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης οι χρήστες εμφανίζονται σχεδόν αποκλειστικά στην περιοχή κάτω της μιας κύριας διαγώνιου.

Σε αυτό το σενάριο θα γίνει εκτέλεση δύο εκδοχών του αλγόριθμου κατανομής πόρων. Αρχικά, γίνεται εκτέλεση της εκδοχής του αλγόριθμου όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα ανακατανομής πόρων. Σε αυτήν την περίπτωση, το σύστημα δεν ελέγχει εάν η πραγματική κατανομή των χρηστών στους ισχυρούς κόμβους διαφέρει από την αναμενόμενη που χρησιμοποιείται αρχικά για την κατανομή πόρων. Συνεπώς, εάν προκύψει σημαντική απόκλιση στη ζήτηση πόρων ανά ισχυρό κόμβο, το σύστημα δεν το αντιλαμβάνεται και δεν κάνει ανακατανομή πόρων για να προσαρμοστεί στις νέες συνθήκες. Το σύστημα αυτό στηρίζεται αποκλειστικά στην αναμενόμενη κατανομή κίνησης και μοιράζει τους πόρους στους ισχυρούς κόμβους με βάση αυτήν. Η κατανομή πόρων στους ισχυρούς κόμβους παραμένει αμετάβλητη καθ' όλη τη διάρκεια του ad hoc γεγονότος.

Στη συνέχεια, εκτελείται η δεύτερη εκδοχή του αλγόριθμου, κατά την οποία, κάθε φορά που σχηματίζεται αντιπροσωπευτικό δείγμα χρηστών, γίνεται εκτίμηση της πραγματικής κατανομής ζήτησης και ακολούθως το δίκτυο ελέγχει αν υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ της αναμενόμενης και της εμπειρικής κατανομής χρηστών στους ισχυρούς κόμβους. Όταν η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των δύο κατανομών, D , υπερβαίνει το όριο D_a , τότε ανακατανέμει τους πόρους στους ισχυρούς κόμβους σύμφωνα με την εμπειρική κατανομή. Όπως και στο πρώτο σενάριο, το όριο D_a τίθεται ίσο με 0.071.

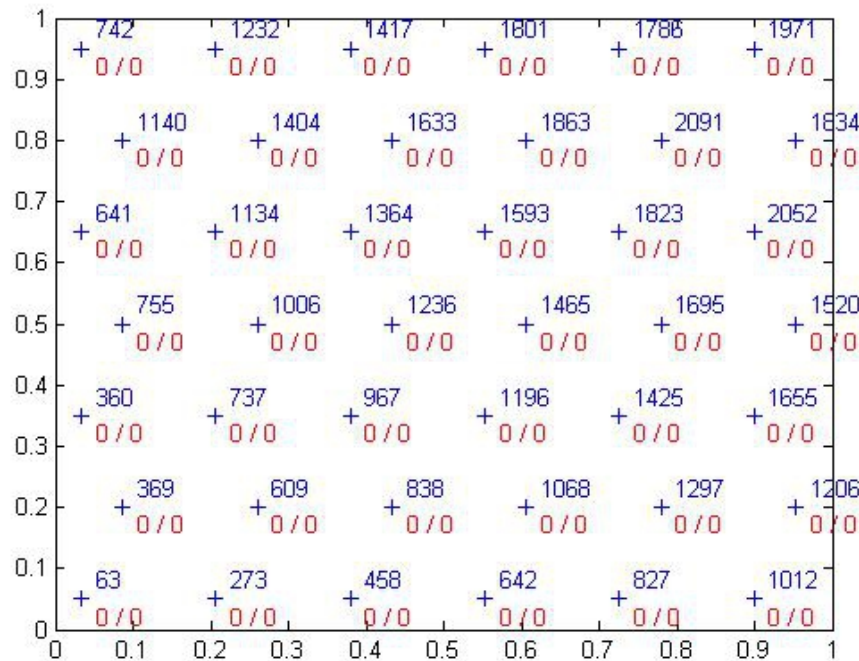
Στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης, όπου οι δύο κατανομές χρηστών (η πραγματική και η αναμενόμενη) είναι ίδιες, οι αποδόσεις του συστήματος που έχει τη δυνατότητα ανακατανομής πόρων και του συστήματος που δεν έχει δεν διαφέρουν πολύ, αφού σπάνια προκύπτει η ανάγκη ανακατανομής, όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Στο δεύτερο σενάριο, αντίθετα, το ότι η πραγματική κατανομή διαφέρει σημαντικά από την αναμενόμενη σημαίνει ότι αναμένονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των αποδόσεων των δύο εκδοχών.

Στην αρχική διερεύνηση του δεύτερου σεναρίου, το depthmax τίθεται ίσο με 5 και για τις δύο εκδοχές. Εφόσον οι απαιτούμενοι πόροι ανά χρήστη είναι $A=5 RBS$, αυτό συνεπάγεται ότι θα εξυπηρετηθούν όλοι οι χρήστες. Δηλαδή, στην αρχική υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου το σύστημα είναι ελαστικό και ανεκτικό σε ενδεχόμενες αποκλίσεις μεταξύ της πραγματικής και της αναμενόμενης κατανομής των χρηστών στους ισχυρούς κόμβους. Ο λόγος που επιλέγεται αρχικά μεγάλη τιμή για το επιτρεπτό βάθος αναζήτησης είναι για να μελετηθεί η συμπεριφορά του μέσου βάθους αναζήτησης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Προκειμένου να μπορούν να συγκριθούν οι δύο αλγόριθμοι ως προς την απόδοσή τους στην υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου, πρέπει να δοκιμαστούν στην ίδια ακριβώς εκτέλεση της προσομοίωσης της άφιξης των χρηστών. Δηλαδή, ο τρόπος με τον οποίο κατανέμεται ο πληθυσμός στον χώρο S σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις της προσομοίωσης πρέπει να είναι ίδιος για τις δύο εκδοχές του αλγόριθμου. Διαφορετικά, θα συγκριθούν οι αποκρίσεις του συστήματος σε δύο διαφορετικές καταστάσεις άφιξης χρηστών, το οποίο σημαίνει ότι οι αποκλίσεις που θα έχουν μεταξύ τους θα οφείλονται και σε ένα βαθμό στην τυχαιότητα με την οποία φθάνουν οι χρήστες στον χώρο. Για να γίνει η σύγκριση πάνω σε κοινή βάση, το σύστημα προσομοίωσης κλειδώνει την αλληλουχία τιμών που λαμβάνει η συνάρτηση rand την οποία χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος και εφαρμόζει την ίδια αλληλουχία τιμών και στις δύο εκδοχές του αλγόριθμου. Το MATLAB έχει αποθηκευμένες στη βάση δεδομένων του τέτοιες αλληλουχίες τιμών (ψευδοτυχαίες ακολουθίες), οι οποίες αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές της μεταβλητής seed της συνάρτησης rand. Επομένως, επιλέγοντας ίδια τιμή (seednumber) της μεταβλητής seed για τις δύο εκδοχές, επιτυγχάνεται ίδιος τρόπος άφιξης χρηστών, επιτρέποντας έτσι την άμεση σύγκριση της απόδοσης των δύο εκδοχών του αλγόριθμου.

Όπως και στο πρώτο σενάριο της προσομοίωσης, ο sBS μοιράζει αρχικά τους συνολικούς πόρους στους ισχυρούς κόμβους με βάση την συνάρτηση έντασης $\lambda(x, y)=100*(x+y)$. Συνεπώς η αρχική κατανομή πόρων στους ισχυρούς κόμβους είναι η ίδια με την κατανομή που φαίνεται στο Σχ. 5.2.

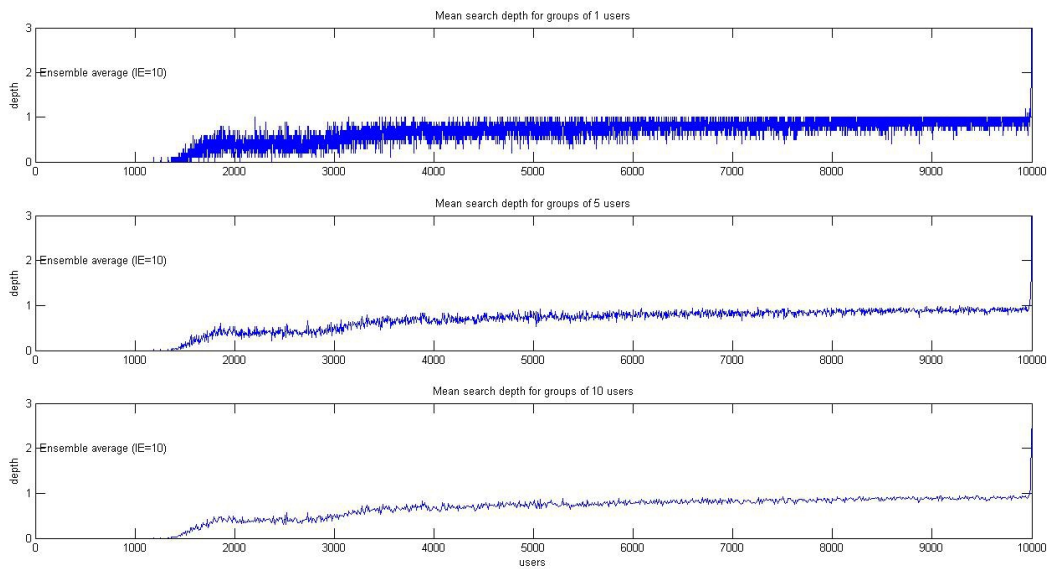
Το αποτέλεσμα της πρώτης εκτέλεσης (IE=1) της εκδοχής του αλγόριθμου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής εμφανίζεται στο Σχ. 5.11 που δείχνει τους εναπομείναντες πόρους και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες ανά ισχυρό κόμβο.



Σχήμα 5.11: Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 5$. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).

Όπως είναι αναμενόμενο, δεν υπάρχουν χρήστες που μένουν χωρίς εξυπηρέτηση, αφού η μεγάλη τιμή του μέγιστου επιτρεπτού βάθους συμβάλλει στην εύρεση των πόρων και στην εξυπηρέτηση των χρηστών, ακόμα και στην περίπτωση όπου η απόδοση πόρων στους ισχυρούς κόμβους δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική ζήτηση των χρηστών.

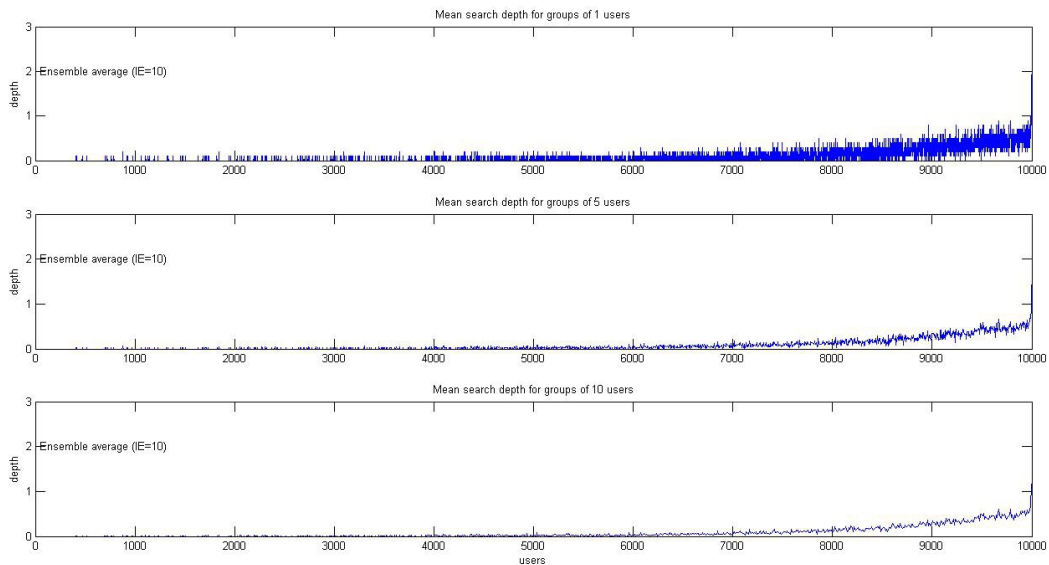
Στο Σχ. 5.12 απεικονίζεται το μέσο βάθος αναζήτησης πόρων ανά χρήστη, το οποίο προκύπτει από τον μέσο όρο του βάθους αναζήτησης των 10 υλοποιήσεων για κάθε χρήστη.



Σχήμα 5.12: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.

Με τη σύγκριση του διαγράμματος του Σχ. 5.12 με το διάγραμμα του Σχ. 5.5, παρατηρείται ότι η απόδοση του συστήματος χωρίς δυνατότητα ανακατανομής χειροτερεύει αισθητά. Ήδη από τη δεύτερη χιλιάδα εισερχόμενων χρηστών, το σύστημα κάνει συνεχώς αναζήτηση για να εξεύρει τους απαιτούμενους πόρους, ενώ, στο πρώτο σενάριο, η μέση αναζήτηση ήταν σχεδόν 0 στους πρώτους 8000 χρήστες. Το ότι το σύστημα σε αυτό το σενάριο αναγκάζεται να κάνει αναζήτηση πριν καν φθάσουν 1200 χρήστες στον χώρο S σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ της αναμενόμενης και της πραγματικής κατανομής. Δηλαδή, οι πόροι των ισχυρών κόμβων που καλύπτουν περιοχές με μεγάλη κίνηση εξαντλούνται μέσα στην πρώτη χιλιάδα χρηστών, καθώς το σύστημα δεν προέβλεψε σωστά την κίνηση που καλούνται να καλύψουν αυτοί οι ισχυροί κόμβοι. Το μέσο βάθος αναζήτησης συνεχίζει να αυξάνεται από αυτό το σημείο και μετά, καθώς το σύστημα δεν προσαρμόζεται στη πραγματική κατανομή που είναι διαφορετική και, αντίθετα, στηρίζεται αποκλειστικά στην αναζήτηση πόρων για να μπορέσει να εξυπηρετήσει τους χρήστες. Ως εκ τούτου, η τιμή του μέσου βάθους αναζήτησης μένει κοντά στο 1 στο μεγαλύτερο μέρος της χρονικής διάρκειας της εκτέλεσης και στους 6 από τους 8 τελευταίους χρήστες έχει τιμή μεγαλύτερη ή ίση του 2, ενώ στον 9999ο χρήστη υπερβαίνει την τιμή 3 και στον 10000ο χρήστη λαμβάνει την τιμή 5.

Εκτελώντας τη δεύτερη εκδοχή, στην οποία γίνεται έλεγχος αν οι δύο κατανομές συμφωνούν και παρέχεται δυνατότητα ανακατανομής, όπως και στην πρώτη εκδοχή, προκύπτει ότι δεν υπάρχουν μη εξυπηρετηθέντες χρήστες. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο εκδοχών έχει να κάνει με το μέσο βάθος αναζήτησης. Το μέσο βάθος αναζήτησης στην εκτέλεση της δεύτερης εκδοχής του αλγορίθμου φαίνεται στο Σχ. 5.13.



Σχήμα 5.13: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.

Στη δεύτερη εκδοχή του αλγορίθμου, διαπιστώνεται σημαντικά βελτιωμένη απόδοση του συστήματος. Μόλις σχηματιστεί το πρώτο αντιπροσωπευτικό δείγμα των 370 χρηστών, μέσω του ελέγχου Kolmogorov-Smirnov το δίκτυο βρίσκει ότι υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των δύο κατανομών και δίνει εντολή για ανακατανομή των πόρων με βάση την κατανομή κίνησης που παρουσίασε το δείγμα. Δηλαδή, το σύστημα διαπιστώνει εγκαίρως ότι η αρχικά αναμενόμενη κατανομή χρηστών δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και ανακατανέμει τους εναπομείναντες πόρους προτού να εξαντληθούν στους ισχυρούς κόμβους με μεγάλη κίνηση και υπάρξει συνεχής ανάγκη αναζήτησης για την εξυπηρέτηση των χρηστών. Το μέσο βάθος αναζήτησης είναι πολύ κοντά στο 0 στους πρώτους 6000 χρήστες, έχοντας μέγιστη τιμή το 0.2. Στη συνέχεια, από τους 6000 χρήστες και μετά, αυξάνεται, φθάνει την τιμή 0.8 και δεν την ξεπερνά έως τον 9985ο χρήστη στον οποίο λαμβάνει τιμή 1. Στους τελευταίους 16 χρήστες, το μέσο βάθος αναζήτησης έχει τιμή ίση ή μεγαλύτερη του 1 σε 7 μόνο περιπτώσεις και μόνο στον 10000 χρήστη έχει τιμή μεγαλύτερη του 2 (2.4). Δηλαδή, το μέσο βάθος αναζήτησης κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της δεύτερης εκδοχής με δυνατότητα ανακατανομής είναι σημαντικά χαμηλότερο από το αντίστοιχο μέσο βάθος αναζήτησης που προκύπτει από την εκτέλεση της πρώτης εκδοχής. Συμπερασματικά, καθίσταται σαφές ότι με τη δυνατότητα ανακατανομής, το σύστημα αποδίδει καλύτερα, καθώς αποφεύγει τον υπολογιστικό φόρτο των συνεχόμενων αναζητήσεων πόρων σε περιπτώσεις όπου υπάρχει σημαντική απόκλιση της πραγματικής από την αναμενόμενη κατανομή χρηστών.

Στην εφαρμογή της δεύτερης εκδοχής του αλγόριθμου στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, γίνεται πάντα ανακατανομή μόλις σχηματιστεί το πρώτο αντιπροσωπευτικό δείγμα, αφού η πραγματική και η αναμενόμενη κατανομή κίνησης διαφέρουν σημαντικά. Όταν η πραγματική κατανομή λ_{real} είναι στατική με τον χρόνο, είναι πολύ πιθανό να μην προκύψει νέα ανάγκη ανακατανομής πόρων όταν σχηματιστούν τα επόμενα αντιπροσωπευτικά δείγματα σε κάθε υλοποίηση. Ο μόνος λόγος για να προκύψει ανάγκη νέας ανακατανομής είναι οι αποκλίσεις λόγω της μη ταύτισης της υλοποίησης της προσομοίωσης άφιξης χρηστών με την κατανομή που περιγράφει η συνάρτηση $\lambda_{real}(x, y)$. Στον πίνακα 5.2 εμφανίζονται οι ανακατανομές που προέκυψαν στις 10 υλοποιήσεις της εκδοχής του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής.

Πίνακας 5.2: Τιμές της μέγιστης διαφοράς μεταξύ της αναμενόμενης και της εμπειρικής κατανομής κίνησης και συνολικές ανακατανομές για τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης άφιξης χρηστών.

iensemble=1	iensemble=2	iensemble=3	iensemble=4
i=370 / D=0.10408 / Resource reallocation	i=370 / D=0.1149 / Resource reallocation	i=370 / D=0.10408 / Resource reallocation	i=370 / D=0.1149 / Resource reallocation
i=740 / D=0.027027	i=740 / D=0.032432	i=740 / D=0.027027	i=740 / D=0.035135
i=1110 / D=0.035135	i=1110 / D=0.02973	i=1110 / D=0.043243	i=1110 / D=0.032432
i=1480 / D=0.024324	i=1480 / D=0.027027	i=1480 / D=0.037838	i=1480 / D=0.027027
i=1850 / D=0.037838	i=1850 / D=0.040541	i=1850 / D=0.024324	i=1850 / D=0.035135
i=2220 / D=0.043243	i=2220 / D=0.02973	i=2220 / D=0.02973	i=2220 / D=0.035135
i=2590 / D=0.02973	i=2590 / D=0.024324	i=2590 / D=0.02973	i=2590 / D=0.040541
i=2960 / D=0.040541	i=2960 / D=0.043243	i=2960 / D=0.02973	i=2960 / D=0.02973
i=3330 / D=0.035135	i=3330 / D=0.02973	i=3330 / D=0.035135	i=3330 / D=0.024324
i=3700 / D=0.040541	i=3700 / D=0.037838	i=3700 / D=0.021622	i=3700 / D=0.035135
i=4070 / D=0.040541	i=4070 / D=0.035135	i=4070 / D=0.021622	i=4070 / D=0.027027
i=4440 / D=0.035135	i=4440 / D=0.02973	i=4440 / D=0.021622	i=4440 / D=0.02973
i=4810 / D=0.035135	i=4810 / D=0.027027	i=4810 / D=0.043243	i=4810 / D=0.051351
i=5180 / D=0.035135	i=5180 / D=0.035135	i=5180 / D=0.037838	i=5180 / D=0.037838
i=5550 / D=0.02973	i=5550 / D=0.02973	i=5550 / D=0.02973	i=5550 / D=0.032432
i=5920 / D=0.027027	i=5920 / D=0.021622	i=5920 / D=0.021622	i=5920 / D=0.021622
i=6290 / D=0.02973	i=6290 / D=0.054054	i=6290 / D=0.035135	i=6290 / D=0.040541
i=6660 / D=0.02973	i=6660 / D=0.045946	i=6660 / D=0.02973	i=6660 / D=0.035135
i=7030 / D=0.037838	i=7030 / D=0.045946	i=7030 / D=0.02973	i=7030 / D=0.037838
i=7400 / D=0.032432	i=7400 / D=0.032432	i=7400 / D=0.043243	i=7400 / D=0.035135
i=7770 / D=0.045946	i=7770 / D=0.035135	i=7770 / D=0.02973	i=7770 / D=0.032432
i=8140 / D=0.024324	i=8140 / D=0.027027	i=8140 / D=0.021622	i=8140 / D=0.040541
i=8510 / D=0.024324	i=8510 / D=0.032432	i=8510 / D=0.032432	i=8510 / D=0.032432
i=8880 / D=0.037838	i=8880 / D=0.035135	i=8880 / D=0.02973	i=8880 / D=0.040541
i=9250 / D=0.02973	i=9250 / D=0.048649	i=9250 / D=0.043243	i=9250 / D=0.024324
i=9620 / D=0.02973	i=9620 / D=0.045946	i=9620 / D=0.035135	i=9620 / D=0.02973
i=9990 / D=0.040541	i=9990 / D=0.045946	i=9990 / D=0.024324	i=9990 / D=0.045946

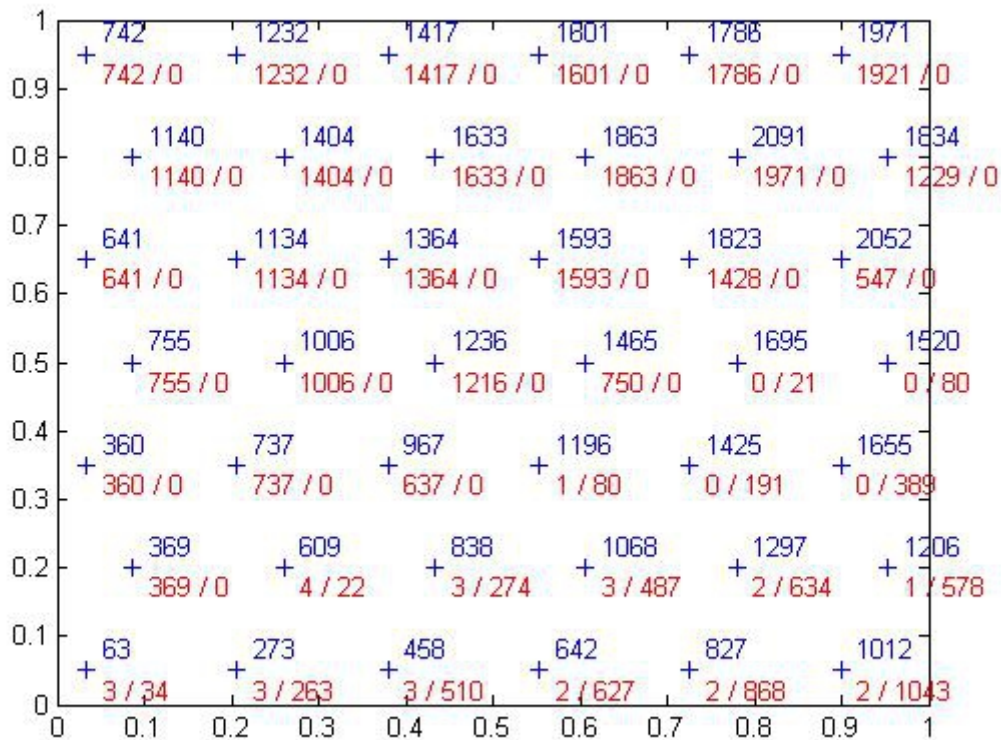
iensemble=5	iensemble=6	iensemble=7	iensemble=8
i=370 / D=0.095268 / Resource reallocation	i=370 / D=0.090571 / Resource reallocation	i=370 / D=0.123 / Resource reallocation	i=370 / D=0.094271 / Resource reallocation
i=740 / D=0.048649	i=740 / D=0.040541	i=740 / D=0.035135	i=740 / D=0.035135
i=1110 / D=0.056757	i=1110 / D=0.027027	i=1110 / D=0.045946	i=1110 / D=0.02973
i=1480 / D=0.048649	i=1480 / D=0.021622	i=1480 / D=0.02973	i=1480 / D=0.045946
i=1850 / D=0.048649	i=1850 / D=0.02973	i=1850 / D=0.037838	i=1850 / D=0.024324
i=2220 / D=0.056757	i=2220 / D=0.035135	i=2220 / D=0.040541	i=2220 / D=0.032432
i=2590 / D=0.048649	i=2590 / D=0.032432	i=2590 / D=0.032432	i=2590 / D=0.045946
i=2960 / D=0.037838	i=2960 / D=0.027027	i=2960 / D=0.02973	i=2960 / D=0.035135
i=3330 / D=0.054054	i=3330 / D=0.027027	i=3330 / D=0.040541	i=3330 / D=0.051351
i=3700 / D=0.081081 / Resource reallocation	i=3700 / D=0.027027	i=3700 / D=0.045946	i=3700 / D=0.051351
i=4070 / D=0.083784 / Resource reallocation	i=4070 / D=0.037838	i=4070 / D=0.02973	i=4070 / D=0.027027
i=4440 / D=0.035135	i=4440 / D=0.02973	i=4440 / D=0.021622	i=4440 / D=0.02973
i=4810 / D=0.037838	i=4810 / D=0.02973	i=4810 / D=0.032432	i=4810 / D=0.037838
i=5180 / D=0.032432	i=5180 / D=0.027027	i=5180 / D=0.040541	i=5180 / D=0.02973
i=5550 / D=0.032432	i=5550 / D=0.043243	i=5550 / D=0.040541	i=5550 / D=0.051351
i=5920 / D=0.024324	i=5920 / D=0.035135	i=5920 / D=0.024324	i=5920 / D=0.021622
i=6290 / D=0.045946	i=6290 / D=0.024324	i=6290 / D=0.040541	i=6290 / D=0.032432
i=6660 / D=0.043243	i=6660 / D=0.040541	i=6660 / D=0.037838	i=6660 / D=0.027027
i=7030 / D=0.037838	i=7030 / D=0.037838	i=7030 / D=0.037838	i=7030 / D=0.032432
i=7400 / D=0.032432	i=7400 / D=0.043243	i=7400 / D=0.024324	i=7400 / D=0.056757
i=7770 / D=0.02973	i=7770 / D=0.043243	i=7770 / D=0.032432	i=7770 / D=0.032432
i=8140 / D=0.035135	i=8140 / D=0.027027	i=8140 / D=0.059459	i=8140 / D=0.032432
i=8510 / D=0.024324	i=8510 / D=0.037838	i=8510 / D=0.02973	i=8510 / D=0.02973
i=8880 / D=0.02973	i=8880 / D=0.027027	i=8880 / D=0.02973	i=8880 / D=0.035135
i=9250 / D=0.018919	i=9250 / D=0.035135	i=9250 / D=0.032432	i=9250 / D=0.024324
i=9620 / D=0.054054	i=9620 / D=0.035135	i=9620 / D=0.027027	i=9620 / D=0.027027
i=9990 / D=0.032432	i=9990 / D=0.040541	i=9990 / D=0.027027	i=9990 / D=0.040541
iensemble=9	iensemble=10		
i=370 / D=0.10138 / Resource reallocation	i=370 / D=0.11219 / Resource reallocation		
i=740 / D=0.027027	i=740 / D=0.024324		
i=1110 / D=0.027027	i=1110 / D=0.048649		
i=1480 / D=0.024324	i=1480 / D=0.043243		
i=1850 / D=0.02973	i=1850 / D=0.02973		
i=2220 / D=0.037838	i=2220 / D=0.032432		
i=2590 / D=0.02973	i=2590 / D=0.032432		
i=2960 / D=0.02973	i=2960 / D=0.062162		
i=3330 / D=0.035135	i=3330 / D=0.02973		
i=3700 / D=0.024324	i=3700 / D=0.037838		
i=4070 / D=0.02973	i=4070 / D=0.040541		
i=4440 / D=0.024324	i=4440 / D=0.040541		
i=4810 / D=0.037838	i=4810 / D=0.032432		
i=5180 / D=0.027027	i=5180 / D=0.027027		
i=5550 / D=0.027027	i=5550 / D=0.037838		
i=5920 / D=0.035135	i=5920 / D=0.032432		
i=6290 / D=0.024324	i=6290 / D=0.032432		
i=6660 / D=0.032432	i=6660 / D=0.035135		
i=7030 / D=0.024324	i=7030 / D=0.035135		
i=7400 / D=0.035135	i=7400 / D=0.037838		
i=7770 / D=0.02973	i=7770 / D=0.02973		
i=8140 / D=0.024324	i=8140 / D=0.037838		
i=8510 / D=0.027027	i=8510 / D=0.054054		
i=8880 / D=0.032432	i=8880 / D=0.040541		
i=9250 / D=0.043243	i=9250 / D=0.062162		
i=9620 / D=0.045946	i=9620 / D=0.045946		
i=9990 / D=0.035135	i=9990 / D=0.035135		

Με βάση τον πίνακα 5.2, σε όλες τις υλοποιήσεις γίνεται ανακατανομή με τη συμπλήρωση του πρώτου δείγματος και μόνο στην πέμπτη από τις 10 συνολικά υλοποιήσεις λαμβάνουν χώρα περισσότερες από μια ανακατανομές πόρων. Συγκεκριμένα, η δεύτερη ανακατανομή πόρων στην 5η υλοποίηση οφείλεται στην απόκλιση της κατανομής άφιξης των χρηστών του δείγματος από την κατανομή που περιγράφει γενικά την άφιξη των χρηστών. Στην περίπτωση αυτή, η κατανομή που ακολούθησαν οι χρήστες του δείγματος ήταν αποτέλεσμα μεμονωμένης συμπεριφοράς και κατά συνέπεια το δίκτυο ξανακάνει ανακατανομή πόρων μόλις σχηματιστεί το επόμενο δείγμα χρηστών.

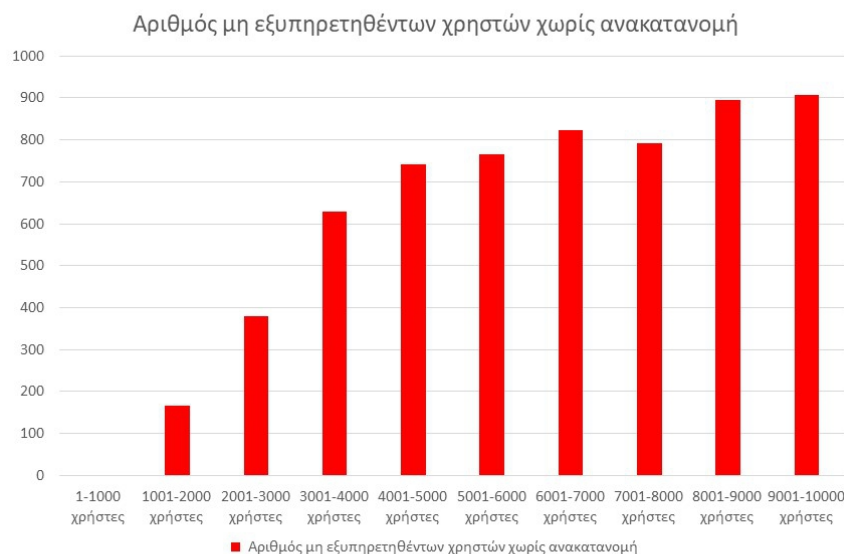
Η δυνατότητα ανακατανομής πόρων προσφέρει επιπλέον ευελιξία σε περιπτώσεις δικτύων σε περίοδο αιχμής, τα οποία δεν μπορούν να αφιερώσουν μεγάλο χρόνο στην εξεύρεση πόρων για κάθε χρήστη από άλλους ισχυρούς κόμβους πέρα του αρχικού. Αυτό σημαίνει ότι σε αυτά τα

συστήματα το βάθος αναζήτησης πόρων πρέπει να είναι μικρό, ακόμα και μηδενικό. Στη συνέχεια, θα εξεταστεί, πάλι για το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, η δυνατότητα εξυπηρέτησης χρηστών για τις δύο εκδοχές του αλγόριθμου για σύστημα που δεν κάνει αναζήτηση πόρων. Αυτό σημαίνει πως το σύστημα πρέπει να βασιστεί αποκλειστικά στη σωστή κατανομή πόρων στους ισχυρούς κόμβους για να εξυπηρετήσει τους χρήστες. Όταν ένας ισχυρός κόμβος δεν διαθέτει τους απαιτούμενους πόρους για κάποιον χρήστη που εισέρχεται στην εμβέλεια του, τότε ο χρήστης αυτός δεν εξυπηρετείται από το δίκτυο.

Το αποτέλεσμα της πρώτης εκτέλεσης (IE=1) της εκδοχής του αλγόριθμου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής με $depthmax=0$ εμφανίζεται στο Σχ. 5.14 και στο Σχ. 5.15.



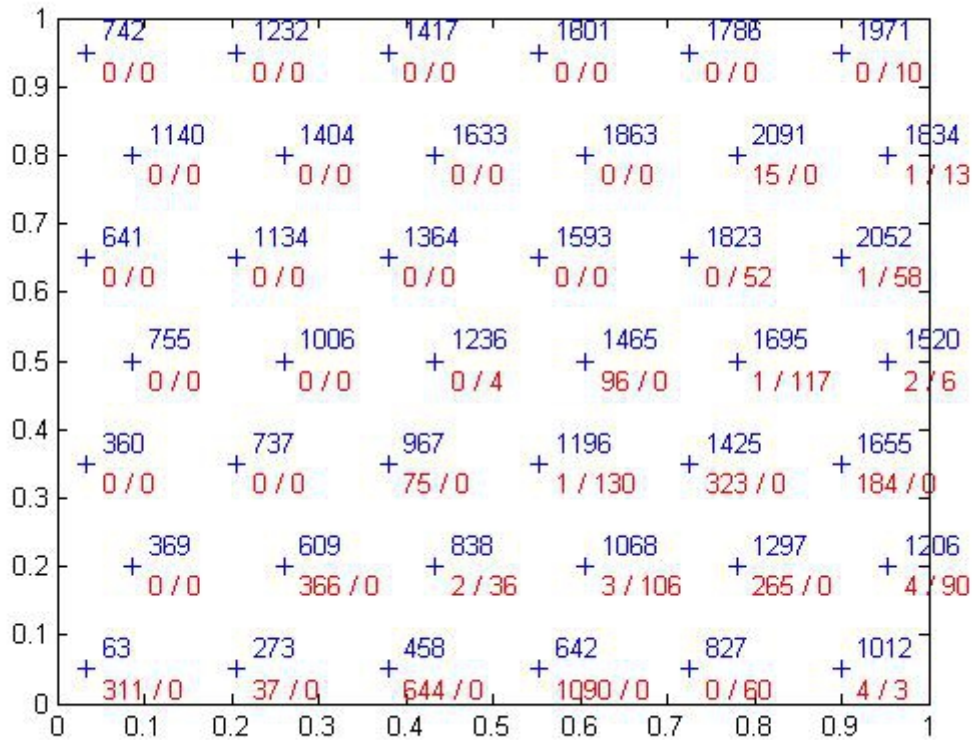
Σχήμα 5.14: Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 0$. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).



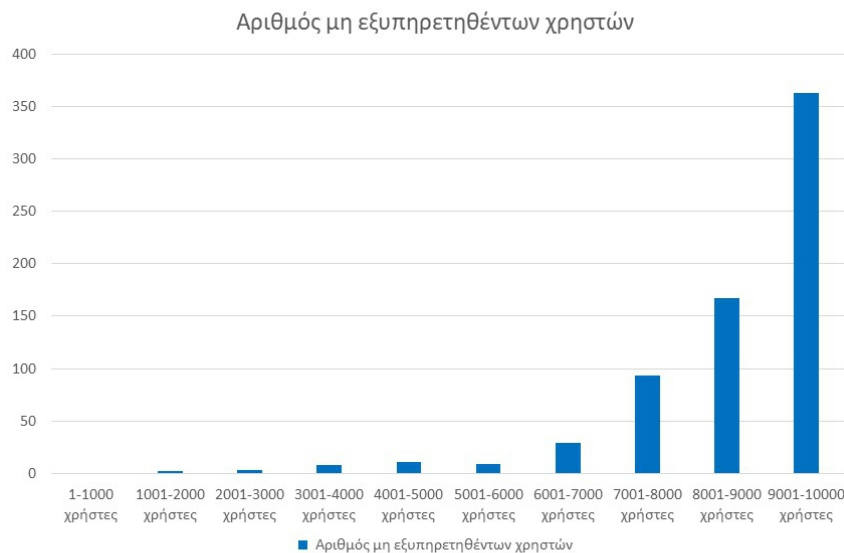
Σχήμα 5.15: Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 0$.

Παρατηρείται ότι στην συγκεκριμένη υλοποίηση της προσομοίωσης άφιξης χρηστών το δίκτυο αφήνει 6101 χρήστες χωρίς εξυπηρέτηση, δηλαδή συνολικά μένει χωρίς εξυπηρέτηση πάνω από το 60% του πλήθους των χρηστών. Όπως φαίνεται και από το Σχ. 5.14, στους ισχυρούς κόμβους που βρίσκονται πάνω από την κύρια διαγώνιο έχουν απομείνει μεγάλοι αριθμοί πόρων αχρησιμοποίητοι. Αυτό οφείλεται στο ότι το σύστημα αρχικά ανέμενε μεγαλύτερη κίνηση χρηστών στις περιοχές άνω της κύριας διαγώνιου και απέδωσε πολλούς πόρους στους αντίστοιχους ισχυρούς κόμβους. Βέβαια, όπως φαίνεται από το Σχ. 5.10, προσήλθαν ελάχιστοι χρήστες σε εκείνη την περιοχή, ενώ αντίθετα η κίνηση των χρηστών επικεντρώθηκε στην περιοχή κάτω της μιας κύριας διαγώνιου, όπου οι ισχυροί κόμβοι των περιοχών αυτών δεν είχαν επαρκείς πόρους για να ικανοποιήσουν τη ζήτηση πόρων. Συνεπώς, εφόσον δεν υπήρχε η δυνατότητα μεταφοράς πόρων στους ισχυρούς κόμβους που εμφάνισαν μεγάλο φόρτο κίνησης χρηστών, από τη στιγμή όπου εξαντλήθηκαν οι πόροι αυτών των ισχυρών κόμβων, δεν υπήρχε η δυνατότητα εξυπηρέτησης των χρηστών που εμφανίστηκαν στη συνέχεια. Για τον λόγο αυτό, το πλήθος των μη εξυπηρετηθέντων χρηστών είναι πολύ μεγάλο στην περιοχή κάτω της κύριας διαγώνιου, όπου στην πράξη εμφανίστηκαν οι χρήστες. Μάλιστα, από το Σχ. 5.15 παρατηρείται ότι μετά την άφιξη των 4000 πρώτων χρηστών το ποσοστό μη εξυπηρετηθέντων χρηστών για κάθε χιλιάδα είναι σταθερά μεγαλύτερο του 70% και στις τελευταίες δύο χιλιάδες χρηστών πλησιάζει και υπερβαίνει το 90%.

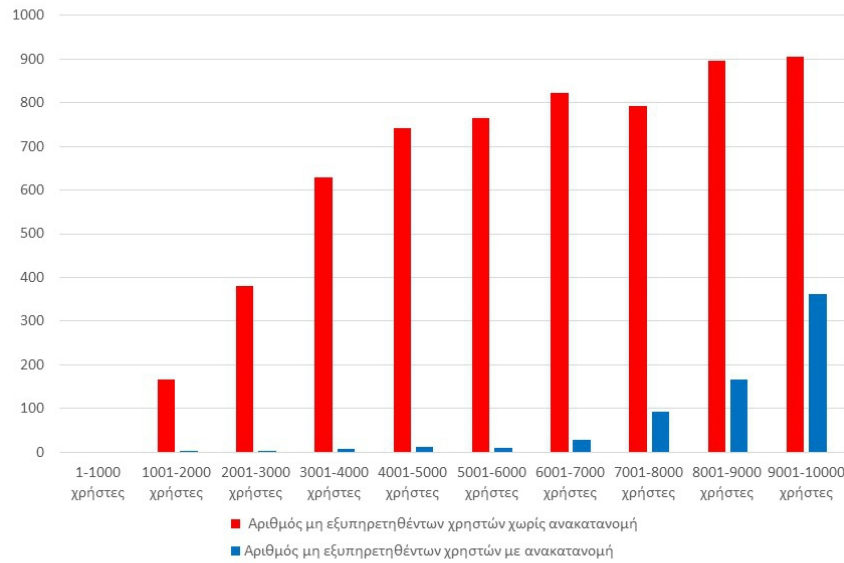
Το αποτέλεσμα της πρώτης εκτέλεσης ($IE=1$) της εκδοχής του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής με $depthmax=0$ εμφανίζεται στα Σχ. 5.16 και 5.17, ενώ στο Σχ. 5.18 γίνεται σύγκριση των δύο εκδοχών (χωρίς/με δυνατότητα ανακατανομής πόρων).



Σχήμα 5.16: Εναπομεινάντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 0$. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).



Σχήμα 5.17: Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα νέων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 0$.

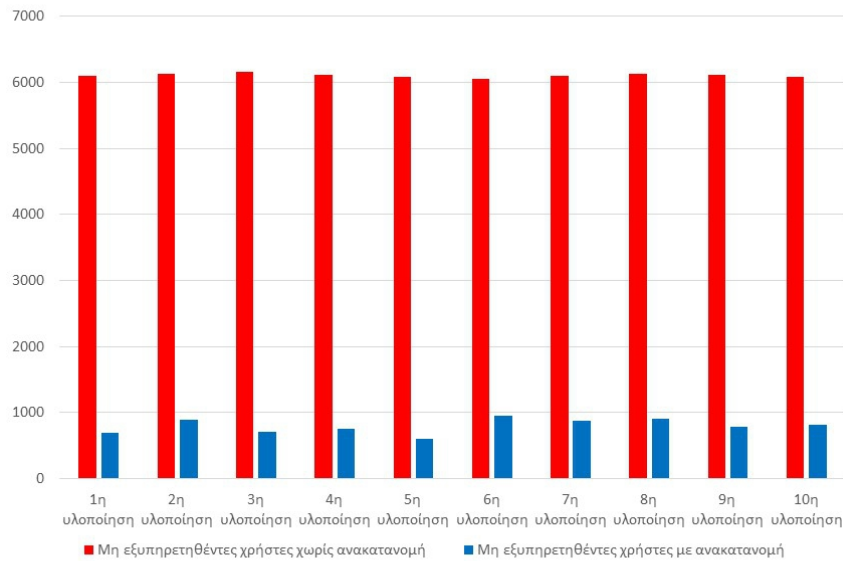


Σχήμα 5.18: Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με (οι μπλε στήλες) και χωρίς (οι κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 0$.

Παρατηρείται ότι στην ίδια υλοποίηση άφιξης χρηστών στην οποία εκτελέστηκε η εκδοχή του αλγόριθμου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής, το δίκτυο αφήνει χωρίς εξυπηρέτηση 685 χρήστες που αποτελεί το 6.85% του συνολικού πλήθους των χρηστών. Ο λόγος της μεγάλης βελτίωσης στην εξυπηρέτηση των χρηστών οφείλεται στο ότι το σύστημα αυτή τη φορά διαπιστώνει ότι η πραγματική κατανομή είναι διαφορετική από αυτήν που υπέθεσε αρχικά και ανακατανέμει τους πόρους. Με την ανακατανομή των πόρων, η ανάγκη αναζήτησης πόρων σε άλλους ισχυρούς κόμβους περιορίζεται σημαντικά σε όλη τη διάρκεια του ad hoc γεγονότος. Κατ' επέκταση, όταν υπάρχει χαμηλό όριο μέγιστου βάθους αναζήτησης ή καθόλου αναζήτησης, το σύστημα επιτυγχάνει να εξυπηρετεί μεγαλύτερο αριθμό χρηστών μέσω της μεταφοράς πόρων στις περιοχές που υπάρχει πραγματική ανάγκη. Συμπερασματικά, ως αποτέλεσμα του χαμηλού μέσου βάθους αναζήτησης, η ανακατανομή πόρων βελτιώνει το ποσοστό εξυπηρέτησης του συστήματος.

Στο Σχ. 5.17 φαίνεται ότι καθώς αυξάνεται το πλήθος των νέων χρηστών, εμφανίζονται περισσότερες περιπτώσεις μη εξυπηρετηθέντων χρηστών. Αυτό οφείλεται στο ότι ο όλο και μειούμενος αριθμός συνολικών διαθέσιμων πόρων καθιστά αισθητές τις αποκλίσεις που υπάρχουν μεταξύ της υλοποίησης της κατανομής για το μοίρασμα των πόρων στους ισχυρούς κόμβους και της επακόλουθης υλοποίησης της κατανομής εμφάνισης των χρηστών στον χώρο. Στο Σχ. 5.18 φαίνεται η μεγάλη βελτίωση στον βαθμό εξυπηρέτησης του συστήματος σε κάθε χιλιάδα εισερχόμενων χρηστών, η οποία οφείλεται στη δυνατότητα ανακατανομής των διαθέσιμων πόρων. Συμπερασματικά, το χαμηλό μέσο βάθος αναζήτησης στο οποίο συμβάλλει η ανακατανομή πόρων συνεπάγεται μεγαλύτερο ποσοστό εξυπηρέτησης του δικτύου για περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα αναζήτησης πόρων από γειτονικούς ισχυρούς κόμβους. Μάλιστα, στην περίπτωση που μελετήθηκε, η απόκλιση στο ποσοστό εξυπηρέτησης μεταξύ του αλγόριθμου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων και του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής ήταν τεράστια, καθώς στον ένα (χωρίς ανακατανομή) ο βαθμός εξυπηρέτησης ήταν 38.99% ενώ στον άλλο (με ανακατανομή) ήταν 93.15%. Η απόκλιση του βαθμού εξυπηρέτησης μεταξύ των δύο αλγορίθμων παραμένει στα ίδια επίπεδα και στις υπόλοιπες 9 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου

προσομοίωσης, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.19.



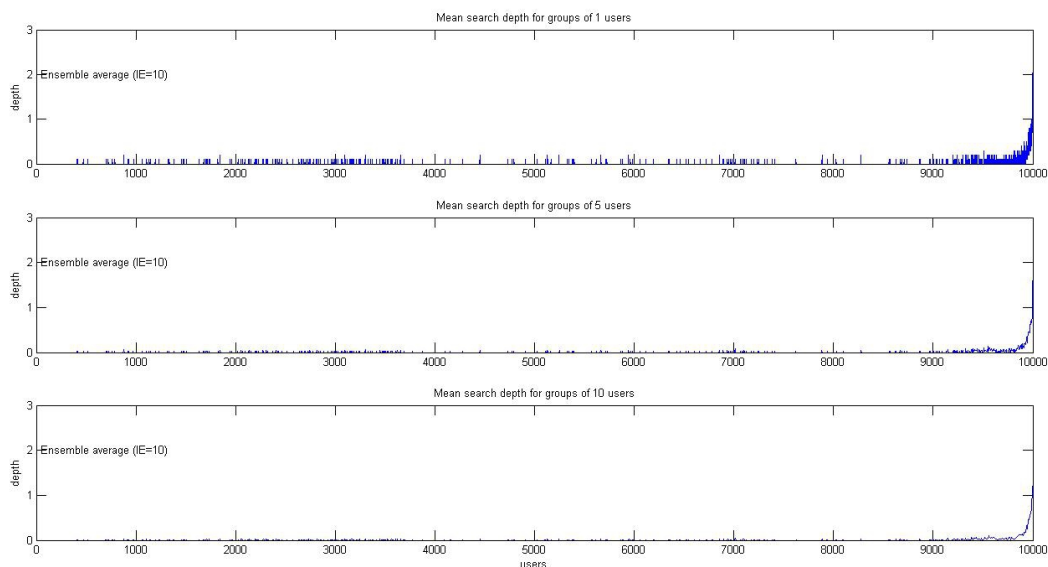
Σχήμα 5.19: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=55$) του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με (οι μπλε στήλες) και χωρίς (οι κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων και $depthmax = 0$.

Συνολικά, ο μέσος βαθμός εξυπηρέτησης χρηστών στις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης για το σύστημα με δυνατότητα ανακατανομής είναι 92.032%. Ο μέσος βαθμός εξυπηρέτησης για το σύστημα χωρίς δυνατότητα ανακατανομής είναι 38.914%. Δηλαδή, όταν δεν υπάρχει δυνατότητα αναζήτησης, η διαφορά στον βαθμό εξυπηρέτησης κατά την εφαρμογή των δύο αλγορίθμων είναι πάνω από 50%.

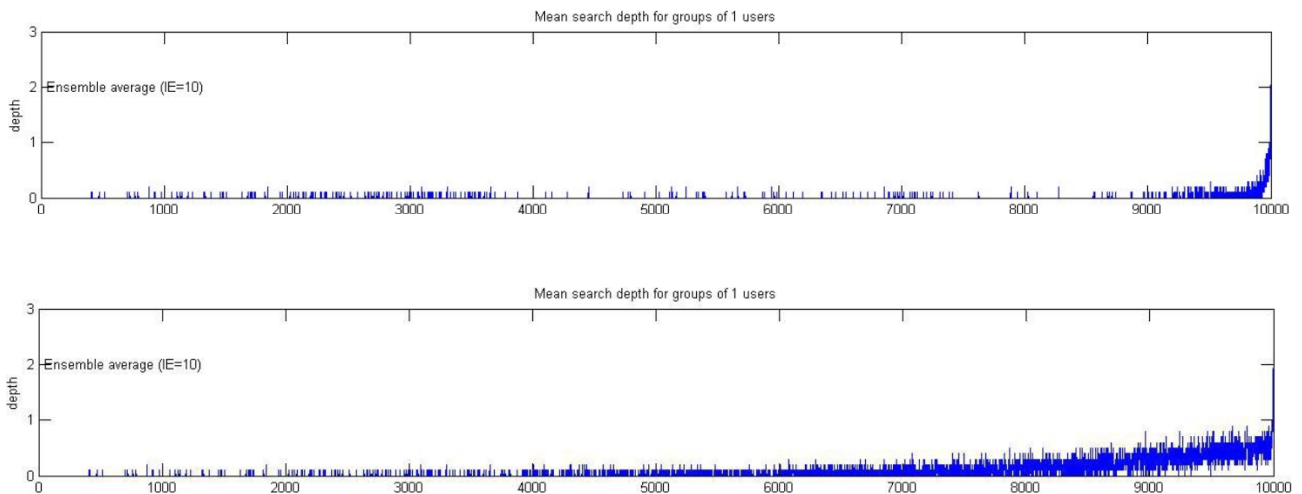
Η εξυπηρετικότητα και γενικότερα η απόδοση του δικτύου μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο κάνοντας κάποιες αλλαγές στον αλγόριθμο. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.2, στα δείγματα χρηστών που ακολουθούν το πρώτο, οι αποκλίσεις δεν είναι αρκετά μεγάλες για να προκαλέσουν ανάγκη ανακατανομής πόρων, αλλά σε μερικές περιπτώσεις φθάνουν σχετικά μεγάλες τιμές, καθώς το D είναι μεγαλύτερο του 0.4 σε διαδοχικά δείγματα. Αυτό οφείλεται στο ότι το πρώτο δείγμα, με βάση το οποίο γίνεται η μοναδική κατανομή πόρων καθ' όλη τη διάρκεια της υλοποίησης της προσομοίωσης, μπορεί να προσεγγίσει έως ένα βαθμό μόνο την κατανομή με την οποία πρόκειται να κατανομηθούν οι συνολικοί χρήστες στον χώρο S . Ως αποτέλεσμα αυτού, υπάρχουν αποκλίσεις στα επόμενα δείγματα οι οποίες αναγκάζουν το δίκτυο σε αναζήτηση πόρων. Συνεπώς, προκύπτει η ανάγκη καλύτερης προσέγγισης της πραγματικής κατανομής χρηστών κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Όταν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης σχηματιστεί ικανοποιητικός αριθμός συνεχόμενων δειγμάτων χρηστών, στα οποία δεν προκύπτει ανάγκη ανακατανομής πόρων, το δίκτυο πρέπει να ανακαταναείμει τους πόρους με βάση την εμπειρική κατανομή που προκύπτει από την εμφάνιση των χρηστών κατά τη διάρκεια του συνόλου αυτών των δειγμάτων. Με αυτόν τον τρόπο, το δίκτυο ανακατανέμει τους πόρους με βάση ένα μεγαλύτερο δείγμα χρηστών, το οποίο έχει μικρότερο περιθώριο σφάλματος και προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα. Αυτή η διαδικασία μειώνει σημαντικά τις αποκλίσεις μεταξύ πραγματικής και αναμενόμενης κατανομής χρηστών, συμβάλλοντας στην αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου. Για τις προσομοιώσεις της συγκεκριμένης εργασίας, οι οποίες γίνονται για πλήθος 10000 χρηστών, ορίζεται ότι πρέπει να έχουν σχηματιστεί συνεχόμενα δείγματα με συνολικό μέγεθος που να είναι

πολλαπλάσιο των 3000 χρηστών, προκειμένου να γίνει ο έλεγχος για το αν χρειάζεται ανακατανομή πόρων για την καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής κατανομής. Το μέγεθος δείγματος επιλέγεται ίσο με 3000 χρήστες, επειδή αντιστοιχεί σε περιθώριο σφάλματος ίσο με 1.497%, το οποίο είναι πολύ χαμηλό. Πρέπει να επισημανθεί ότι η συγκεκριμένη διαδικασία γίνεται παράλληλα με τον έλεγχο της πραγματικής κατανομής με δείγμα 370 χρηστών. Εάν χρησιμοποιούταν αποκλειστικά δείγμα 3000 χρηστών στον αλγόριθμο για τον έλεγχο της πραγματικής κατανομής των χρηστών, το δίκτυο θα λάμβανε αρκετά αντιπροσωπευτική εικόνα σε κάθε σχηματιζόμενο δείγμα λόγω του χαμηλού περιθωρίου σφάλματος. Θα είχε, όμως, πολύ χαμηλή απόκριση σε τυχόν μεταβολές της πραγματικής κατανομής καθώς ο έλεγχος θα ήταν πολύ αραιός και δεν θα επέτρεπε στο δίκτυο να προσαρμοστεί στις μεταβολές. Το όριο D_a για τον έλεγχο Kolmogorov-Smirnov σε δείγμα 3000 χρηστών είναι ίσο με 0.248. Οι αποκλίσεις, όμως, που εμφανίζονται στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης είναι συχνά μικρότερες αυτού του ορίου, με αποτέλεσμα να μην πραγματοποιούνται ανακατανομές και να μην γίνεται καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής στατικής κατανομής χρηστών. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ένα πιο αυστηρό όριο (0.15). Τέλος, να σημειωθεί ότι ο έλεγχος για την καλύτερη προσέγγιση στατικής κατανομής γίνεται στον ίδιο χρήστη στον οποίον γίνεται και ο έλεγχος απόκλισης από την εμπειρική κατανομή ανά 370 χρήστες, έτσι ώστε το δίκτυο να μην χρειαστεί να ελέγχει παραπάνω φορές για τυχόν ανάγκη ανακατανομής πόρων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Εκτελώντας τον βελτιωμένο αυτό αλγόριθμο με δυνατότητα ανακατανομής στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης με $depthmax=5$ προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχ. 5.20, ενώ στο Σχ. 5.21 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων ανακατανομής.



Σχήμα 5.20: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων και δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης στατικής κατανομής. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.



Σχήμα 5.21: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με (πάνω διάγραμμα) και χωρίς (κάτω διάγραμμα) δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης στατικής κατανομής.

Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των διαγραμμάτων του Σχ. 5.21, το δίκτυο με τον αλγόριθμο με δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης στατικής κατανομής επιτυγχάνει χαμηλότερο μέσο βάθος και λιγότερες περιπτώσεις αναζήτησης πόρων. Συγκεκριμένα, μετά τους 3700 χρήστες το δίκτυο κάνει ανακατανομή πόρων για να προσεγγίσει ακόμα καλύτερα την πραγματική κατανομή χρηστών. Αυτό οδηγεί σε μείωση της πυκνότητας των περιπτώσεων αναζήτησης πόρων. Το μέσο βάθος αναζήτησης δεν ξεπερνά την τιμή 0.2 στους πρώτους 9000 χρήστες και ξεπερνά τη μονάδα μόνο στον 9988ο και στους τελευταίους τέσσερις χρήστες, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή (2.7) στον 10000ο χρήστη.

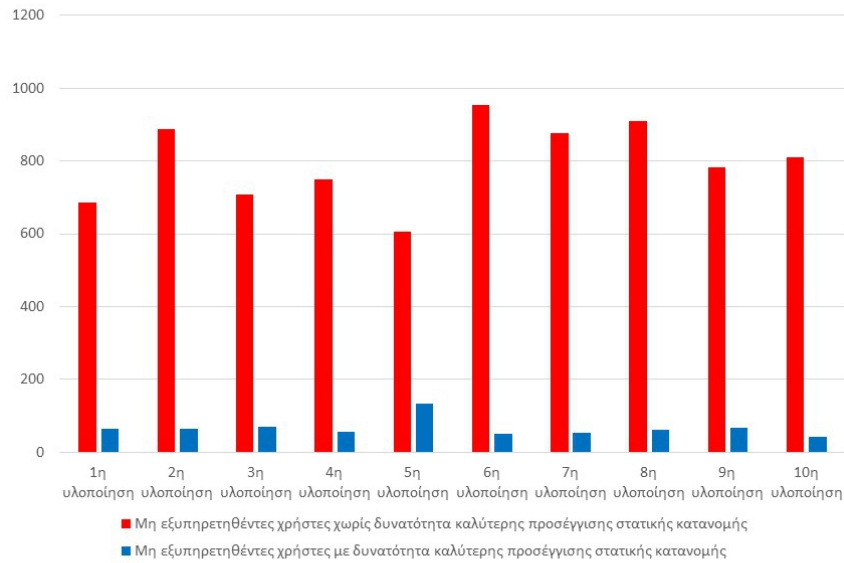
Στον πίνακα 5.3 εμφανίζονται οι ανακατανομές που προέκυψαν στην πρώτη υλοποίηση του αλγόριθμου με δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης στατικής κατανομής στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης. Οι υπόλοιπες 9 υλοποιήσεις ακολουθούν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά το πλήθος και τις χρονικές στιγμές των ανακατανομών.

Πίνακας 5.3: Τιμές της μέγιστης διαφοράς μεταξύ της αναμενόμενης και της εμπειρικής κατανομής κίνησης και συνολικές ανακατανομές για την πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης άφιξης χρηστών με τον αλγόριθμο με δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης στατικής κατανομής.

```
iensemble=1
i=370 / D=0.10408 / Resource reallocation
i=740 / D=0.027027
i=1110 / D=0.035135
i=1480 / D=0.024324
i=1850 / D=0.037838
i=2220 / D=0.043243
i=2590 / D=0.02973
i=2960 / D=0.040541
i=3330 / D=0.035135
i=3700 / D=0.040541
i=3700/ D_static=0.025225 / Resource reallocation for better approximation of real distribution
i=4070 / D=0.040541
i=4440 / D=0.035135
i=4810 / D=0.035135
i=5180 / D=0.035135
i=5550 / D=0.02973
i=5920 / D=0.027027
i=6290 / D=0.02973
i=6660 / D=0.02973
i=6660/ D_static=0.021781 / Resource reallocation for better approximation of real distribution
i=7030 / D=0.037838
i=7400 / D=0.032432
i=7770 / D=0.045946
i=8140 / D=0.024324
i=8510 / D=0.024324
i=8880 / D=0.037838
i=9250 / D=0.02973
i=9620 / D=0.02973
i=9620/ D_static=0.023135 / Resource reallocation for better approximation of real distribution
i=9990 / D=0.040541
```

Όπως φαίνεται στον πίνακα 5.3, γίνονται συνολικά 4 ανακατανομές πόρων στην υλοποίηση του αλγόριθμου. Η πρώτη ανακατανομή γίνεται λόγω της σημαντικής απόκλισης μεταξύ της εμπειρικής και της αναμενόμενης κατανομής χρηστών. Οι υπόλοιπες τρεις ανακατανομές γίνονται επειδή έχουν σχηματιστεί συνεχόμενα δείγματα που παρουσιάζουν στατική κατανομή και έχουν μέγεθος 3000, 6000 και 9000 χρηστών, οδηγώντας στην δεύτερη, τρίτη και τέταρτη ανακατανομή πόρων αντίστοιχα.

Απόρροια του χαμηλότερου μέσου βάθους αναζήτησης είναι και ο μεγαλύτερος βαθμός εξυπηρέτησης του δικτύου με τον αλγόριθμο με δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης στατικής κατανομής όπως φαίνεται στο Σχ. 5.22, σε σύγκριση με το προηγούμενο μοντέλο ανακατανομής.

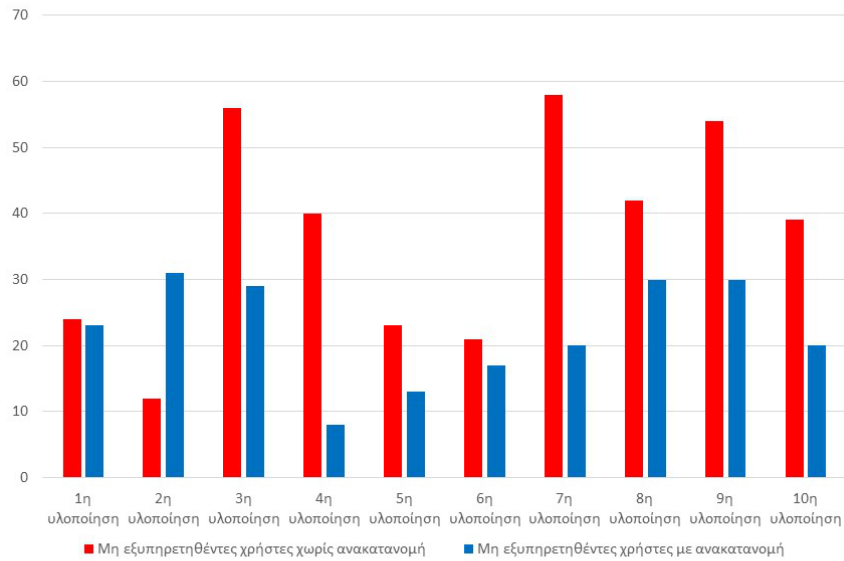


Σχήμα 5.22: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=55$) του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με (οι μπλε στήλες) και χωρίς (οι κόκκινες στήλες) δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης στατικής κατανομής και με $depthmax=0$.

Συνολικά, ο μέσος βαθμός εξυπηρέτησης χρηστών στις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης για το σύστημα με δυνατότητα ανακατανομής πόρων και δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης στατικής κατανομής είναι 99.339%. Ο μέσος βαθμός εξυπηρέτησης για το σύστημα με δυνατότητα ανακατανομής, χωρίς δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης είναι 92.032%. Δηλαδή, με τον νέο αλγόριθμο το δίκτυο επιτυγχάνει πάνω από 99% εξυπηρέτηση χρηστών χωρίς να χρειαστεί καθόλου αναζήτηση πόρων.

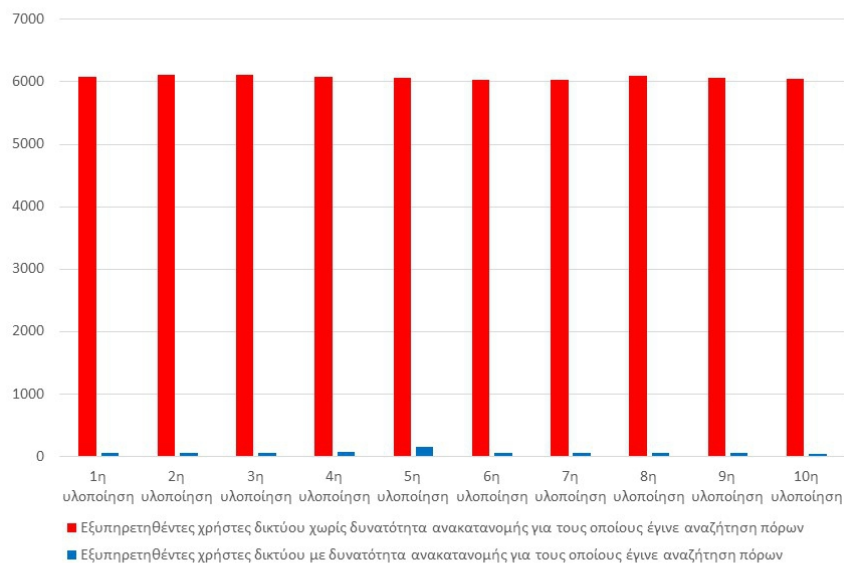
Για τις υπόλοιπες προσομοιώσεις, όταν θα γίνεται αναφορά στον αλγόριθμο με δυνατότητα ανακατανομής θα εννοείται ο αλγόριθμος που έχει και τη δυνατότητα καλύτερης προσέγγισης στατικής κατανομής χρηστών.

Εκτελώντας τις δύο εκδοχές του αλγόριθμου (με και χωρίς δυνατότητα ανακατανομής) στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, δίνοντας στο δίκτυο τη δυνατότητα ενός βήματος αναζήτησης πόρων ($depthmax=1$), προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχ. 5.23.



Σχήμα 5.23: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=55$) του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με (οι μπλε στήλες) και χωρίς (οι κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων και $depthmax = 1$.

Με δυνατότητα ενός βήματος αναζήτησης αυτή τη φορά, ο μέσος βαθμός εξυπηρέτησης χρηστών προκύπτει ίσος με 99.779% για δίκτυο με δυνατότητα ανακατανομής πόρων και 99.631% για δίκτυο χωρίς δυνατότητα ανακατανομής. Δηλαδή και οι δύο εκδοχές του αλγόριθμου επιτυγχάνουν αποδεκτά επίπεδα (99% και άνω) εξυπηρέτησης χρηστών με ένα βήμα αναζήτησης. Η σημαντική διαφορά μεταξύ της απόδοσης των δύο εκδοχών, όμως, έγκειται στο ποσοστό των χρηστών για τους οποίους το δίκτυο αναγκάζεται να κάνει αναζήτηση για να τους εξυπηρετήσει.



Σχήμα 5.24: Αριθμός εξυπηρετηθέντων χρηστών για την εξυπηρέτηση των οποίων έγινε αναζήτηση

πόρων σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με (μπλε στήλες) και χωρίς (κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων και με $depthmax = 1$.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 5.24, όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα ανακατανομής πόρων, το δίκτυο αναγκάζεται να κάνει αναζήτηση πόρων για να εξυπηρετήσει το 60.731% των χρηστών. Αντίθετα, όταν μπορεί να ανακατανείμει τους πόρους στους ισχυρούς κόμβους, κάνει αναζήτηση μόλις στο 0.588% των περιπτώσεων των εξυπηρετηθέντων χρηστών. Αυτή η διαφορά του επιπέδου του 60% συνεπάγεται ότι η δυνατότητα ανακατανομής πόρων βοηθά το δίκτυο να εξυπηρετήσει με σημαντικά λιγότερες καθυστερήσεις το πλήθος των χρηστών, καθώς δεν αναγκάζεται να κάνει τόσο συχνά αναζήτηση πόρων. Επομένως, δημιουργείται ένα δίκτυο με υψηλό βαθμό εξυπηρέτησης χρηστών και γρήγορη απόκριση στις ανάγκες των νεοεισερχόμενων χρηστών.

Κεφάλαιο 6

Προσομοίωση λειτουργίας αλγόριθμου κατανομής πόρων σε χρονικά μεταβαλλόμενες κατανομές εμφάνισης χρηστών

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα υλοποιηθούν προσομοιώσεις αφίξεων χρηστών, οι κατανομές των οποίων μεταβάλλονται με τον χρόνο. Ισχύουν οι ίδιες παραδοχές που έγιναν για τις προσομοιώσεις του 5ου κεφαλαίου, δηλαδή οι υλοποιήσεις των προσομοιώσεων γίνονται σε πληθυσμό 10000 χρηστών κάθε φορά, με απαίτηση πόρων ανά χρήστη ίδια για όλους τους χρήστες και ίση με $A=5 RBs$. Επιπλέον, το δίκτυο είναι αρχικά εφοδιασμένο με συνολικούς πόρους $N=50000 RBs$, τους οποίους καταναίμει αρχικά ο sBS στους 42 ισχυρούς κόμβους με βάση τη συνάρτηση $\lambda(x, y)=100*(x+y)$. Τέλος, η οριακή τιμή, D_a με βάση την οποία γίνεται ο έλεγχος Kolmogorov- Smirnov μεταξύ της αναμενόμενης και της εμπειρικής κατανομής των χρηστών στους ισχυρούς κόμβους τίθεται αρχικά ίση με 0.071.

6.2 Τρίτο σενάριο προσομοίωσης: Η πραγματική συνάρτηση κατανομής είναι διαφορετική από την αναμενόμενη και μεταβαλλόμενη με τον χρόνο

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης, η πραγματική συνάρτηση κατανομής της κίνησης των χρηστών είναι διαφορετική από την αναμενόμενη συνάρτηση κατανομής κίνησης και μεταβάλλεται με τον χρόνο. Αυτό το σενάριο αναφέρεται σε περιπτώσεις όπου ο τρόπος εμφάνισης των χρηστών στον χώρο S μεταβάλλεται με τον χρόνο (παλιρροϊκό φαινόμενο). Συνεπώς, στο συγκεκριμένο σενάριο, η πραγματική συνάρτηση κατανομής των χρηστών πρέπει να περιγράφει έναν πληθυσμό του οποίου οι νεοεμφανιζόμενοι χρήστες εμφανίζονται σε διαφορετικές περιοχές του χώρου S, καθώς παρέρχεται ο χρόνος. Δηλαδή, με την πάροδο του χρόνου εμφανίζονται νέοι χρήστες, η συγκέντρωση των οποίων μετακινείται σε διάφορες περιοχές του χώρου S. Για να υλοποιηθεί το συγκεκριμένο σενάριο για διςδιάστατο χώρο S χρησιμοποιείται η εξής συνάρτηση έντασης κανονικής χωρικής κατανομής έντασης:

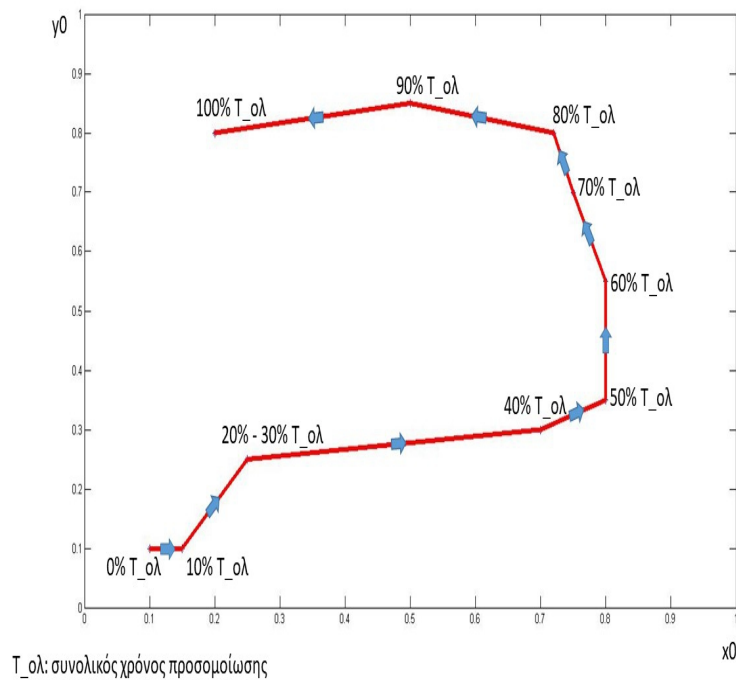
$$\lambda(x, y) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}} * e^{-\frac{((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2)}{2\sigma^2}} \quad (6.1)$$

, όπου το (x_0, y_0) είναι το κέντρο της κατανομής και το σ είναι η διακύμανση της συνάρτησης κατανομής. Εφόσον με την πάροδο του χρόνου η εμφάνιση των χρηστών γίνεται εντονότερη σε συγκεκριμένες περιοχές, το κέντρο της κατανομής, (x_0, y_0) , πρέπει να εντοπίζεται σε αυτές τις περιοχές. Συνεπώς, χρησιμοποιείται μια συνάρτηση κανονικής κατανομής, της οποίας το κέντρο μεταβάλλεται καθώς έρχονται νέοι χρήστες. Για τη συγκεκριμένη προσομοίωση η διακύμανση, σ , θεωρείται σταθερή και τίθεται ίση με 0.1. Στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης, θεωρείται ότι οι νέοι χρήστες εμφανίζονται αρχικά στο κάτω αριστερό τεταρτημόριο του χώρου S. Στη συνέχεια, η εμφάνιση νέων χρηστών αρχίζει να μετακινείται προς τα δεξιά και οι νέοι χρήστες εμφανίζονται πλέον στο κάτω δεξιό τεταρτημόριο. Έπειτα, οι επόμενοι νέοι χρήστες αρχίζουν να εμφανίζονται στο πάνω δεξιό τεταρτημόριο και στα τελευταία 2/10 του χρόνου προσομοίωσης οι χρήστες αρχίζουν να εμφανίζονται στο πάνω αριστερό τεταρτημόριο. Αυτή η μετακίνηση των αφίξεων των νέων χρηστών σε διαφορετικές περιοχές του χώρου S αντανακλά μια πραγματική συμπεριφορά πλήθους σε ένα εμπορικό κέντρο, σύμφωνα με την οποία η κύρια συγκέντρωση χρηστών εμφανίζεται σε διαφορετικούς χώρους του εμπορικού κέντρου (καταστήματα, καφετέριες, εστιατόρια) κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για τη σχεδίαση λοιπόν αυτού του σεναρίου πρέπει αρχικά να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο μετακινείται το κέντρο της κανονικής κατανομής,

(x_0, y_0) , ώστε στη συνέχεια να γίνει η προσομοίωση της άφιξης χρηστών με βάση αυτόν τον τρόπο. Συνεπώς, η μορφή της μεταβαλλόμενης χωροχρονικής συνάρτησης έντασης κατανομής της πραγματικής κίνησης, λ_{real} , που επιλέγεται για το συγκεκριμένο σενάριο της προσομοίωσης είναι η εξής:

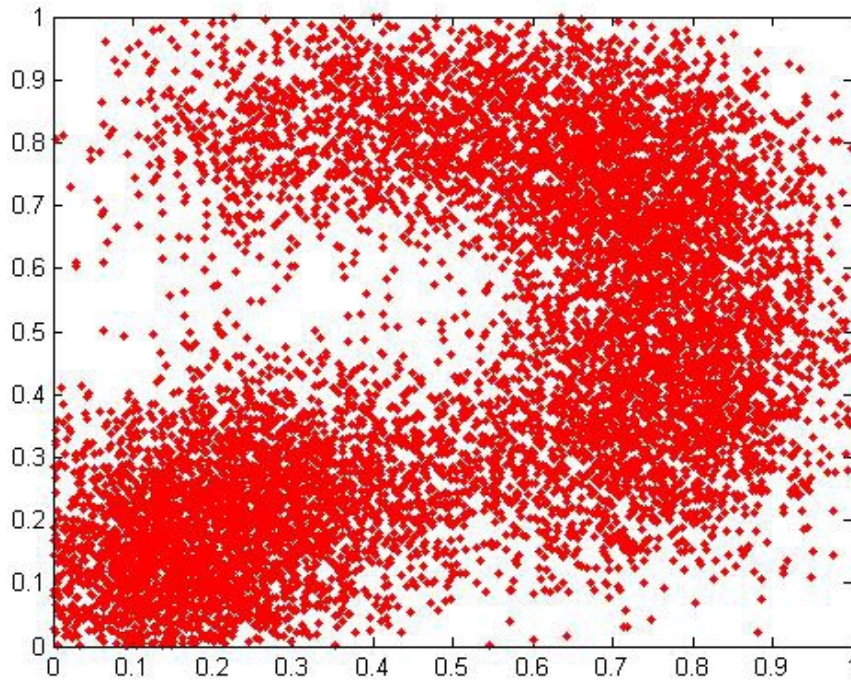
$$\lambda_{real}(x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}} * e^{-\frac{(x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2}{2\sigma^2}} \quad (6.2)$$

, όπου το $(x_0(t), y_0(t))$ είναι το κέντρο της κατανομής, το οποίο μεταβάλλεται με τον χρόνο. Στο Σχ. 6.1 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μετακινείται το $(x_0(t), y_0(t))$ κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της προσομοίωσης.



Σχήμα 6.1: Μετακίνηση του κέντρου της κανονικής κατανομής χρηστών, $(x_0(t), y_0(t))$, κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της προσομοίωσης.

Τα βέλη στο Σχ. 6.1 δείχνουν την κατεύθυνση προς την οποία κινείται το κέντρο της κατανομής των χρηστών με την πάροδο του χρόνου. Με βάση τα προηγούμενα, οι χρήστες του τρίτου σεναρίου της προσομοίωσης κατανέμονται στον χώρο S με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχ. 6.2.

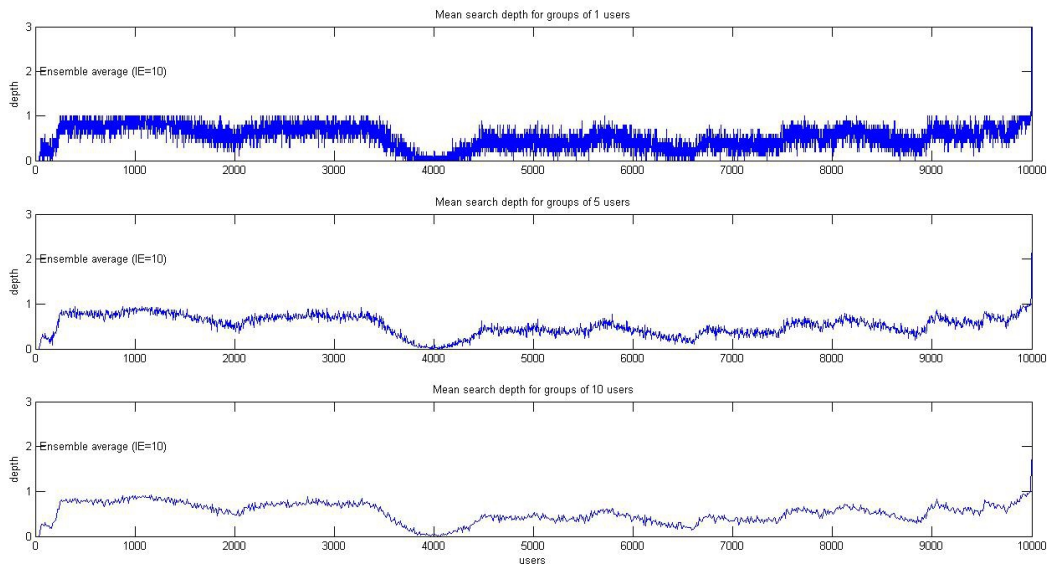


Σχήμα 6.2: Προσομοίωση θέσεων των $N_{users} = 10000$ χρηστών με βάση τη συνάρτηση κανονικής κατανομής έντασης $\lambda_{real}(x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}} * e^{-\frac{((x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2)}{2\sigma^2}}$.

Στο Σχ. 6.2 απεικονίζεται η τελική κατανομή των χρηστών στον χώρο S, ενώ στο Σχ. 6.1 απεικονίζεται η χρονική μεταβολή της κατανομής των χρηστών. Όπως και στο πρώτο, έτσι και στο δεύτερο σενάριο της προσομοίωσης, ο sBS μοιράζει αρχικά τους συνολικούς πόρους στους ισχυρούς κόμβους με βάση τη συνάρτηση χωρικής έντασης $\lambda(x, y) = 100 * (x + y)$. Συνεπώς η αρχική κατανομή πόρων στους ισχυρούς κόμβους προκύπτει ίδια ακριβώς με την κατανομή που φαίνεται στο Σχ. 5.2.

Αρχικά θα γίνει εκτέλεση των δύο αλγόριθμων, με και χωρίς δυνατότητα ανακατανομής, με μέγιστο αποδεκτό βάθος αναζήτησης $depthmax = 5$, για να μελετηθούν τα επίπεδα του μέσου βάθους αναζήτησης. Αφού το $depthmax$ τίθεται ίσο με 5, στην εκτέλεση του αλγόριθμου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής και στην εκτέλεση του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής εξυπηρετούνται όλοι οι χρήστες και μετά το τέλος της προσομοίωσης μένουν 0 πόροι στο σύστημα.

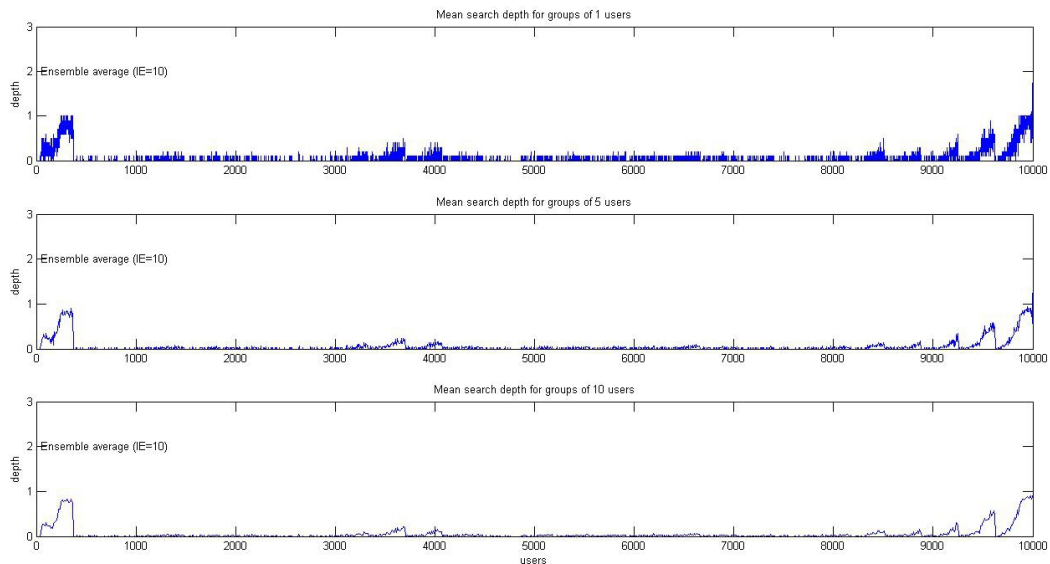
Το μέσο βάθος αναζήτησης που προκύπτει από την εκτέλεση του αλγόριθμου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής παρουσιάζεται στο Σχ. 6.3.



Σχήμα 6.3: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.

Όπως και στο δεύτερο σενάριο, το βάθος αναζήτησης είναι αρκετά κοντά στη μονάδα κατά το μεγαλύτερο μέρος της διάρκειας της προσομοίωσης. Ως αποτέλεσμα της λανθασμένης αρχικής κατανομής των πόρων, το τηλεπικοινωνιακό σύστημα στηρίζεται αποκλειστικά στην αναζήτηση πόρων από άλλους ισχυρούς κόμβους για να μπορέσει να εξυπηρετήσει τους χρήστες. Μάλιστα, οι αναζητήσεις αρχίζουν να γίνονται ήδη από την πρώτη εκατοντάδα χρηστών. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν έχουν κατανεμηθεί πολλοί πόροι στους ισχυρούς κόμβους του κάτω αριστερού τεταρτημρίου του χώρου S . Στην αρχή της προσομοίωσης, το κέντρο της εμφάνισης των χρηστών βρίσκεται σε εκείνη την περιοχή και έτσι οι διαθέσιμοι πόροι της περιοχής εξαντλούνται ταχέως. Η πτώση της τιμής του μέσου βάθους αναζήτησης στη χρονική περίοδο μεταξύ της άφιξης 3500ου χρήστη και της άφιξης του 4000ου χρήστη οφείλεται στο ότι εκείνη η περίοδος συμπίπτει με την περίοδο κατά την οποία οι νέοι χρήστες αρχίζουν να εμφανίζονται δεξιότερα στην περιοχή, ώστε, στη συνέχεια, να εμφανίζονται κυρίως στο κάτω δεξιό τεταρτημριο. Η κατανομή που ακολουθούν εκείνο το χρονικό διάστημα έχει λιγότερες αποκλίσεις σε σχέση με την αναμενόμενη κατανομή και για αυτό το μέσο βάθος αναζήτησης είναι χαμηλότερο εκεί. Στη συνέχεια, οι χρήστες αρχίζουν να εμφανίζονται με μεγάλη πυκνότητα στο κάτω δεξιό τεταρτημριο, κάτι το οποίο το σύστημα δεν έχει προβλέψει αρχικά. Κατά συνέπεια γίνονται συχνότερα αναζητήσεις και το μέσο βάθος αναζήτησης αυξάνεται. Όπως είναι αναμενόμενο, το μέσο βάθος αναζήτησης αυξάνεται κατά την τελευταία χιλιάδα νεοεισερχόμενων χρηστών και υπερβαίνει την τιμή 2 στους δύο τελευταίους χρήστες και στον τελευταίο χρήστη παίρνει την τιμή 3.9.

Το μέσο βάθος αναζήτησης που προκύπτει από την εκτέλεση του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων παρουσιάζεται στο Σχ. 6.4.



Σχήμα 6.4: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με μέγεθος αντιπροσωπευτικού δείγματος ίσο με 370 χρήστες. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.

Πίνακας 6.1: Τιμές της μέγιστης διαφοράς μεταξύ της αναμενόμενης και της εμπειρικής κατανομής κίνησης και συνολικές ανακατανομές για την πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης άφιξης χρηστών με μέγεθος δείγματος ίσο με 370 χρήστες.

```

ensemble=1
i=370 / D=0.32505 / Resource reallocation
i=740 / D=0.059459
i=1110 / D=0.056757
i=1480 / D=0.13784 / Resource reallocation
i=1850 / D=0.14054 / Resource reallocation
i=2220 / D=0.086486 / Resource reallocation
i=2590 / D=0.048649
i=2960 / D=0.086486 / Resource reallocation
i=3330 / D=0.11081 / Resource reallocation
i=3700 / D=0.21351 / Resource reallocation
i=4070 / D=0.20541 / Resource reallocation
i=4440 / D=0.11622 / Resource reallocation
i=4810 / D=0.064865
i=5180 / D=0.10811 / Resource reallocation
i=5550 / D=0.086486 / Resource reallocation
i=5920 / D=0.10541 / Resource reallocation
i=6290 / D=0.062162
i=6660 / D=0.16216 / Resource reallocation
i=7030 / D=0.12703 / Resource reallocation
i=7400 / D=0.097297 / Resource reallocation
i=7770 / D=0.083784 / Resource reallocation
i=8140 / D=0.062162
i=8510 / D=0.15676 / Resource reallocation
i=8880 / D=0.10811 / Resource reallocation
i=9250 / D=0.18649 / Resource reallocation
i=9620 / D=0.16757 / Resource reallocation
i=9990 / D=0.2027 / Resource reallocation

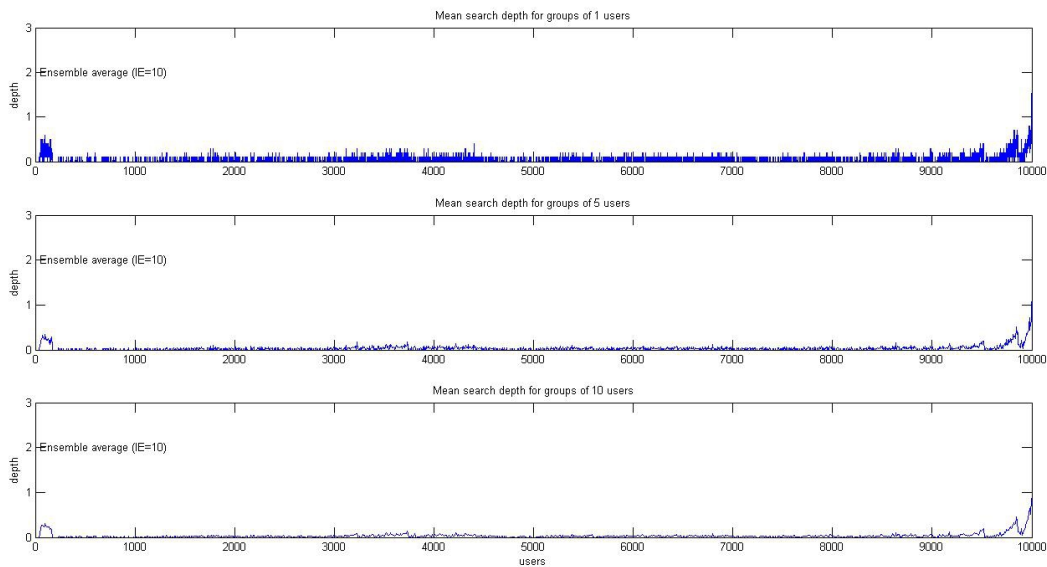
```

Το μέσο βάθος αναζήτησης είναι πολύ χαμηλότερο στην εκτέλεση του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής, καθώς για το μεγαλύτερο μέρος της προσομοίωσης παραμένει κοντά στο 0. Όπως και στην εκδοχή του αλγόριθμου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής, επειδή η πραγματική κατανομή διαφέρει σημαντικά από την αναμενόμενη, το σύστημα αναγκάζεται να κάνει αναζήτηση πόρων πριν καν φθάσουν συνολικά 100 χρήστες στον χώρο S και η τιμή του μέσου βάθους αναζήτησης φθάνει τη μονάδα. Όταν, όμως, σχηματίζεται το πρώτο αντιπροσωπευτικό δείγμα, το οποίο στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 370 χρήστες, το σύστημα βρίσκει μέσω του ελέγχου Kolmogorov-Smirnov ότι υπάρχει μεγάλη απόκλιση των δύο κατανομών και δίνει εντολή για ανακατανομή των πόρων με βάση την κατανομή κίνησης που παρουσίασε το δείγμα, όπως φαίνεται στον πίνακα 6.1. Για τον λόγο αυτό, μετά το 370ο χρήστη, όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.4, το μέσο βάθος αναζήτησης μειώνεται δραστικά και παραμένει κοντά στο 0 μέχρι να φθάσουν 3000 χρήστες συνολικά στον χώρο. Μέχρι τους 3000 χρήστες το σύστημα κάνει ακόμα μερικές ανακατανομές για να εξισορροπήσει τις αποκλίσεις μεταξύ των δύο κατανομών, αλλά αυτές οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με την τιμή της μέγιστης απόκλισης, D , του πρώτου αντιπροσωπευτικού δείγματος, όπως φαίνεται στον πίνακα 6.1. Στη συνέχεια, μετά την άφιξη των 3000 πρώτων χρηστών, η κατανομή των χρηστών αρχίζει να μεταβάλλεται έντονα, καθώς υπάρχει μετακίνηση του πλήθους των νέων χρηστών προς το κάτω δεξιό τεταρτημόριο. Το σύστημα αντιλαμβάνεται αυτή τη μεταβολή μετά το πρώτο αντιπροσωπευτικό δείγμα που σχηματίζεται μετά τους 3000 χρήστες και γίνεται ανακατανομή των πόρων. Η μετατόπιση όμως στην κατανομή των νέων χρηστών συνεχίζεται και οι αποκλίσεις λαμβάνουν ακόμα μεγαλύτερες τιμές, αναγκάζοντας το σύστημα να πραγματοποιεί ανακατανομή κάθε φορά που σχηματίζεται αντιπροσωπευτικό δείγμα κατά τη διάρκεια της μετακίνησης. Κατά τη διάρκεια αυτής της μεταβολής, το μέσο βάθος αναζήτησης είναι αυξημένο και φθάνει την τιμή 0.5 στον 3682ο χρήστη, καθώς το σύστημα προσπαθεί συνεχώς να προσαρμοστεί στη μεταβολή του πληθυσμού, αλλά η μετατόπιση συνεχίζεται και αυτή. Όταν, μετά την άφιξη 4000 συνολικών χρηστών, η κύρια ένταση των χρηστών έχει συγκεντρωθεί πλέον στο κάτω δεξιό τεταρτημόριο, η μεταβολή του πληθυσμού παύει να είναι τόσο έντονη με αποτέλεσμα το μέσο βάθος αναζήτησης να κινείται πολύ κοντά στο 0. Μετά την άφιξη των 5000 χρηστών, αρχίζει ξανά κίνηση του νεοεισερχόμενου πληθυσμού προς το άνω δεξιό τεταρτημόριο. Η διαφορά αυτής της μεταβολής, όμως, σε σχέση με την προηγούμενη είναι ότι γίνεται σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα να είναι λιγότερο έντονη και το σύστημα να μπορεί με συνεχόμενες ανακατανομές να προσαρμόζεται επιτυχώς στη νέα κατάσταση. Για τον λόγο αυτό, το μέσο βάθος αναζήτησης παραμένει κοντά στο 0 καθ' όλη τη διάρκεια της συγκεκριμένης μεταβολής. Μετά τους 8000 χρήστες αρχίζει μετακίνηση του πληθυσμού των νέων χρηστών προς το άνω αριστερό τεταρτημόριο. Αυτή η μεταβολή είναι εντονότερη από τη δεύτερη και σε συνδυασμό με το ότι οι συνολικοί εναπομείναντες πόροι είναι λιγότεροι σε σχέση με τις προηγούμενες χιλιάδες εμφανιζόμενων χρηστών, οδηγεί σε σταδιακή αύξηση του μέσου βάθους αναζήτησης. Τέλος, στην τελευταία χιλιάδα, το μέσο βάθος αναζήτησης αυξάνεται έντονα, λαμβάνοντας για πρώτη φορά μετά την πρώτη χιλιάδα χρηστών την τιμή 1 στον 9862ο χρήστη. Κατά την άφιξη της τελευταίας χιλιάδας χρηστών, το μέσο βάθος αναζήτησης υπερβαίνει τη μονάδα σε τέσσερις μόνο περιπτώσεις (στον 9984ο χρήστη με τιμή 1.1, στον 9987ο χρήστη με τιμή 1.1, στον 9997ο χρήστη με τιμή 1.2 και στον 10000ο χρήστη με τιμή 2.6).

Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημανθεί ότι εφόσον η πραγματική κατανομή των χρηστών είναι μια κατανομή που μεταβάλλεται με τον χρόνο καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, τότε δεν χρειάζεται να εφαρμοστεί αυστηρά ο ορισμός του αντιπροσωπευτικού δείγματος για τον προσδιορισμό του κατάλληλου μεγέθους του δείγματος των χρηστών που θα ελέγχεται. Το αντιπροσωπευτικό δείγμα, όπως ορίστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, αναφέρεται σε στατικές καταστάσεις, για τις οποίες είναι επιθυμητό να προσεγγιστεί ικανοποιητικά μια παράμετρος. Αντίθετα, στο τρίτο σενάριο της προσομοίωσης, η κατανομή των χρηστών στους ισχυρούς κόμβους χαρακτηρίζεται από διαρκή μεταβολή, το οποίο σημαίνει ότι, καίτοι το σύστημα προσαρμόζεται

στη μεταβολή που εκτιμάται με βάση το δείγμα, η μετατόπιση συνεχίζεται με αποτέλεσμα να δημιουργείται εκ νέου ανάγκη ανακατανομής πόρων. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι ο συχνότερος έλεγχος της απόκλισης μεταξύ εμπειρικής και αναμενόμενης κατανομής χρηστών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό σημαίνει μικρότερο μέγεθος δείγματος. Βέβαια, στην περίπτωση του τρίτου σεναρίου θα προκύψει κατά συνέπεια μεγαλύτερος αριθμός ανακατανομών κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Επειδή, όμως, οι μονάδες επεξεργασίας σήματος βασικής ζώνης, BBUs, του sBS έχει μεγάλη υπολογιστική ισχύ και η σύνδεση μεταξύ του sBS και των ισχυρών κόμβων υλοποιείται με οπτικές ίνες που παρέχουν γρήγορη μετάδοση, η ανακατανομή πόρων στους ισχυρούς κόμβους μπορεί να γίνει σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Με βάση τα προηγούμενα, ορίζεται νέα τιμή μεγέθους του αντιπροσωπευτικού δείγματος ίση με 170 χρήστες, δηλαδή λίγο μικρότερη από το μισό της αρχικής τιμής (370), η οποία αντιστοιχεί σε περιθώριο σφάλματος ίσο με 7.47% για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και για συνολικό πληθυσμό 10000 χρηστών. Το συγκεκριμένο επίπεδο περιθωρίου σφάλματος είναι αποδεκτό, καθώς παραμένει κάτω από 10%.

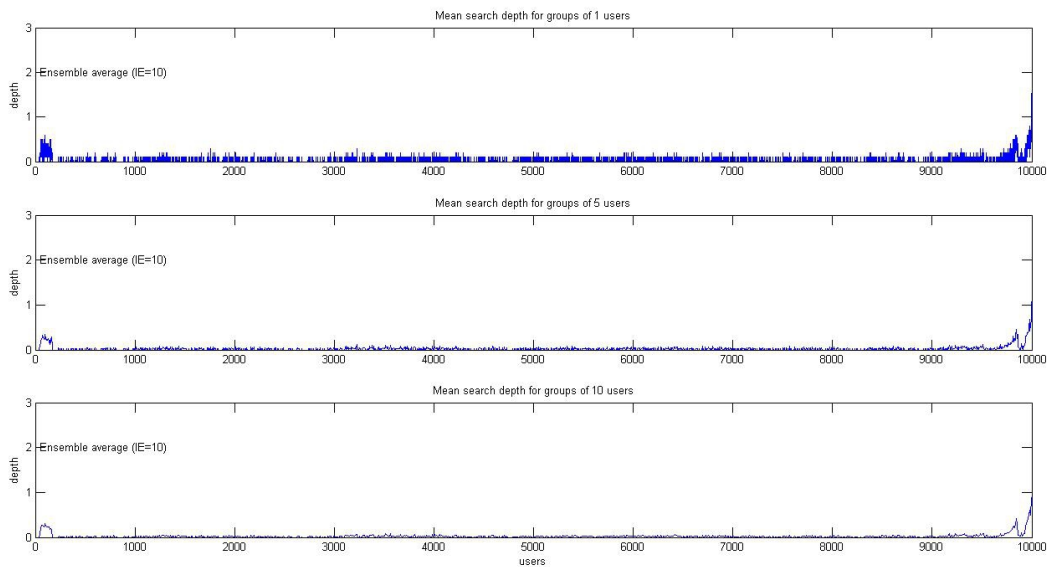
Σύμφωνα με τη σχέση (3.9), το όριο D_a ισούται με 0.104 για μέγεθος δείγματος ίσο με 170 χρήστες. Δηλαδή, ο έλεγχος Kolmogorov- Smirnov είναι ελαστικότερος για μικρότερα μεγέθη δειγμάτων, καθώς τα σφάλματα είναι μεγαλύτερα. Εντούτοις, η συγκεκριμένη τιμή του D_a είναι πολύ υψηλή με αποτέλεσμα το σύστημα να είναι πολύ ανεκτικό στις μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ της εμπειρικής και χρησιμοποιούμενης κατανομής, οι οποίες προκαλούνται από τη μεταβολή της πραγματικής κατανομής με τον χρόνο. Το μέσο βάθος αναζήτησης, που προκύπτει από τις δέκα υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου με μέγεθος δείγματος ίσο με 170 χρήστες και με $D_a=0.104$, παρουσιάζεται στο Σχ. 6.5.



Σχήμα 6.5: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με μέγεθος αντιπροσωπευτικού δείγματος ίσο με 170 χρήστες και $D_a=0.104$. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.

Το μέσο βάθος αναζήτησης του Σχ. 6.5 παρουσιάζει βελτίωση σε σχέση με το αντίστοιχο με μέγεθος δείγματος ίσο με 370 χρήστες, αλλά δεν καταφέρνει να προσαρμοστεί πλήρως στις μεγάλες μεταβολές. Καίτοι το δίκτυο παρακολουθεί συχνότερα την κίνηση των χρηστών, η μεγάλη τιμή του D_a το εμποδίζει να προσαρμοστεί πλήρως στις έντονες μεταβολές της πραγματικής κατανομής. Για τον λόγο αυτό, το D_a επαναφέρεται στην αρχική του τιμή, 0.071. Το μέσο βάθος αναζήτησης

που προκύπτει από την εκτέλεση του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με μέγεθος αντιπροσωπευτικού δείγματος ίσο με 170 χρήστες και με $D_a=0.071$ παρουσιάζεται στο Σχ. 6.6.



Σχήμα 6.6: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με μέγεθος αντιπροσωπευτικού δείγματος ίσο με 170 χρήστες και $D_a=0.071$. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.

Πράγματι, επαναφέροντας την αρχική τιμή του D_a το σύστημα αποδίδει καλύτερα, καθώς μπορεί να κάνει περισσότερες ανακατανομές προκειμένου να προσαρμοστεί στις μετατοπίσεις της ζήτησης πόρων. Συγκρίνοντας το Σχ. 6.6 με το Σχ. 6.4 παρατηρείται σημαντική βελτίωση της συμπεριφοράς του μέσου βάθους αναζήτησης. Στους πρώτους 170 χρήστες, το βάθος αναζήτησης είναι αυξημένο και φθάνει την τιμή 0.6. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού δεν έχει σχηματιστεί ακόμα το πρώτο δείγμα χρηστών για να αντιληφθεί το σύστημα την απόκλιση της αναμενόμενης από την πραγματική κατανομή χρηστών. Όταν σχηματιστεί το πρώτο δείγμα των 170 χρηστών, το σύστημα αντιλαμβάνεται την απόκλιση, ανακατανέμει τους πόρους με αποτέλεσμα το μέσο βάθος αναζήτησης να μειωθεί ταχέως και να κινείται πλέον κοντά στο 0. Το μέσο βάθος αναζήτησης παραμένει κοντά στο 0 για το μεγαλύτερο χρονικό μέρος της προσομοίωσης. Η αναζήτηση πόρων γίνεται συχνότερη κατά την άφιξη της τέταρτης χιλιάδας χρηστών λόγω της έντονης μεταβολής που παρατηρείται σε εκείνο το χρονικό διάστημα, αλλά το μέσο βάθος αναζήτησης είναι πολύ μικρό ακόμα και σε εκείνη τη χρονική περίοδο και δεν ξεπερνά την τιμή 0.3, τιμή που δεν υπερβαίνεται για τους πρώτους 9000 χρήστες. Επιπλέον, ακόμα και στην τελευταία εκατοντάδα, όπου αναμένεται το μέσο βάθος αναζήτησης να είναι αρκετά μεγαλύτερο, τιμές μεγαλύτερες ή ίσες του 1 εμφανίζονται μόνο στον 9999ο χρήστη (1.1) και στον 10000ο χρήστη (2). Συνοψίζοντας, σε περιπτώσεις όπου υπάρχει μεταβολή της κατανομής των χρηστών με τον χρόνο, το μικρό μέγεθος αντιπροσωπευτικού δείγματος επιτυγχάνει βελτίωση της ανταπόκρισης του συστήματος στις αλλαγές χωρίς να μειώνεται η απόδοση του δικτύου και του αλγόριθμου.

Στον πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι ανακατανομές των πόρων στους ισχυρούς κόμβους, οι οποίες έγιναν κατά τη διάρκεια της πρώτης υλοποίησης του τρίτου σεναρίου με μέγεθος δείγματος ίσο με 170 χρήστες. Οι υπόλοιπες 9 υλοποιήσεις ακολουθούν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά τον αριθμό και τις χρονικές στιγμές των ανακατανομών.

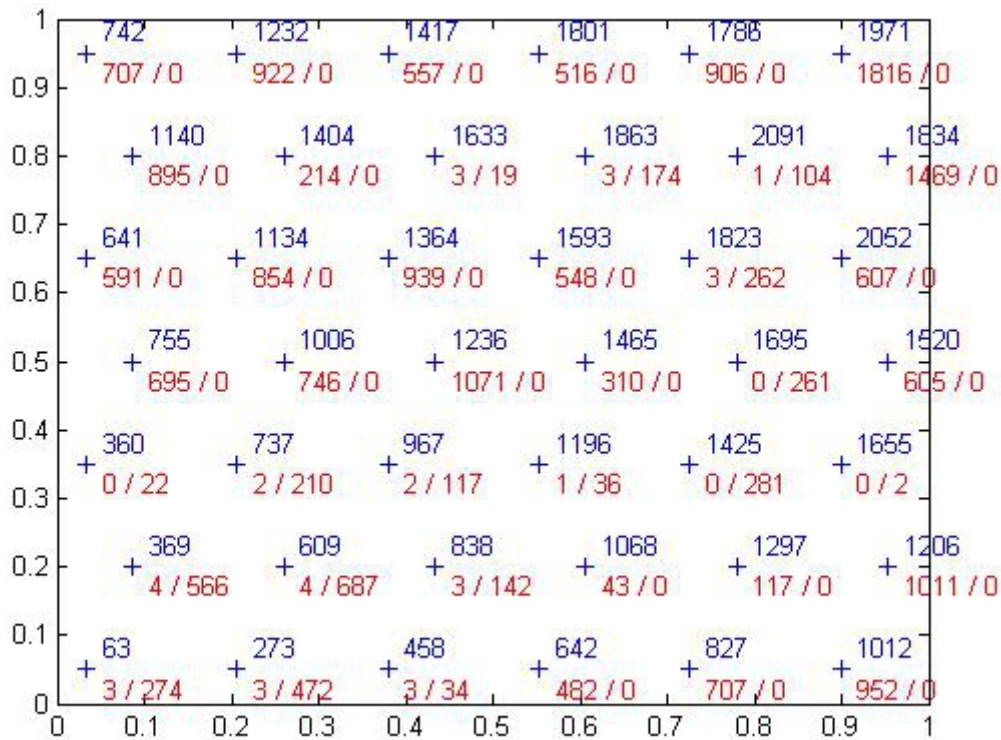
Πίνακας 6.2: Τιμές της μέγιστης διαφοράς μεταξύ της αναμενόμενης και της εμπειρικής κατανομής κίνησης και συνολικές ανακατανομές για την πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης άφιξης χρηστών με μέγεθος δείγματος ίσο με 170 χρήστες.

iensemble=1	i=4930 / D=0.070588
i=170 / D=0.35733 / Resource reallocation	i=5100 / D=0.10588 / Resource reallocation
i=340 / D=0.058824	i=5270 / D=0.076471 / Resource reallocation
i=510 / D=0.12353 / Resource reallocation	i=5440 / D=0.082353 / Resource reallocation
i=680 / D=0.058824	i=5610 / D=0.076471 / Resource reallocation
i=850 / D=0.058824	i=5780 / D=0.12353 / Resource reallocation
i=1020 / D=0.052941	i=5950 / D=0.088235 / Resource reallocation
i=1190 / D=0.15882 / Resource reallocation	i=6120 / D=0.10588 / Resource reallocation
i=1360 / D=0.094118 / Resource reallocation	i=6290 / D=0.082353 / Resource reallocation
i=1530 / D=0.070588	i=6460 / D=0.094118 / Resource reallocation
i=1700 / D=0.16471 / Resource reallocation	i=6630 / D=0.047059
i=1870 / D=0.041176	i=6800 / D=0.076471 / Resource reallocation
i=2040 / D=0.076471 / Resource reallocation	i=6970 / D=0.094118 / Resource reallocation
i=2210 / D=0.035294	i=7140 / D=0.052941
i=2380 / D=0.047059	i=7310 / D=0.094118 / Resource reallocation
i=2550 / D=0.029412	i=7480 / D=0.041176
i=2720 / D=0.052941	i=7650 / D=0.064706
i=2890 / D=0.15294 / Resource reallocation	i=7820 / D=0.058824
i=3060 / D=0.088235 / Resource reallocation	i=7990 / D=0.094118 / Resource reallocation
i=3230 / D=0.082353 / Resource reallocation	i=8160 / D=0.070588
i=3400 / D=0.22941 / Resource reallocation	i=8330 / D=0.11765 / Resource reallocation
i=3570 / D=0.16471 / Resource reallocation	i=8500 / D=0.14706 / Resource reallocation
i=3740 / D=0.088235 / Resource reallocation	i=8670 / D=0.064706
i=3910 / D=0.15294 / Resource reallocation	i=8840 / D=0.11176 / Resource reallocation
i=4080 / D=0.070588	i=9010 / D=0.12941 / Resource reallocation
i=4250 / D=0.13529 / Resource reallocation	i=9180 / D=0.058824
i=4420 / D=0.082353 / Resource reallocation	i=9350 / D=0.12941 / Resource reallocation
i=4590 / D=0.035294	i=9520 / D=0.12941 / Resource reallocation
i=4760 / D=0.064706	i=9690 / D=0.094118 / Resource reallocation
	i=9860 / D=0.1 / Resource reallocation

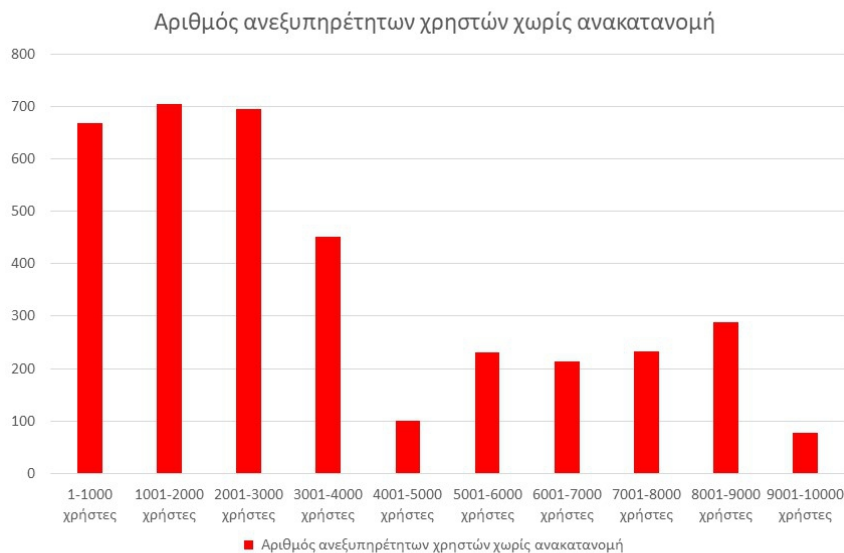
Σε κάθε υλοποίηση του τρίτου σεναρίου, γίνεται πάντα ανακατανομή μόλις σχηματιστεί το πρώτο δείγμα λόγω της μεγάλης απόκλισης μεταξύ της αρχικά αναμενόμενης και της εμπειρικής κίνησης. Επίσης, στην έντονη μεταβολή της πραγματικής κατανομής κατά τη διάρκεια της άφιξης της τέταρτης χιλιάδας χρηστών, οι αποκλίσεις μεταξύ της εμπειρικής και της αναμενόμενης κατανομής χρηστών είναι πολύ μεγάλες ($D > 0.1$). Συνεπώς, όπως φαίνεται από τις τιμές του πίνακα 6.2, γίνεται ανακατανομή μετά από κάθε αντιπροσωπευτικό δείγμα που σχηματίζεται κατά το χρονικό διάστημα αυτό. Συνεπώς, επαληθεύεται η ανάγκη για συχνότερο έλεγχο του τρόπου εμφάνισης των χρηστών όταν το σύστημα καλείται να προσαρμοστεί σε τόσο έντονες αλλαγές. Επιπλέον, συνεχόμενες ανακατανομές παρατηρούνται και σε άλλα χρονικά διαστήματα όπου η κατανομή των εμφανιζόμενων χρηστών μεταβάλλεται ταχέως, όπως κατά τη διάρκεια άφιξης της 6ης, της 7ης, της 9ης και της 10ης χιλιάδας χρηστών.

Στη συνέχεια, συγκρίνονται ο αλγόριθμος με ανακατανομή και ο αλγόριθμος χωρίς ανακατανομή ως προς την ικανότητα εξυπηρέτησης των χρηστών που ακολουθούν την κατανομή του τρίτου σεναρίου. Για τον λόγο αυτόν, το μέγιστο επιτρεπτό βάθος αναζήτησης, $depthmax$, τίθεται ίσο με το 0, ώστε να προσομοιωθεί η λειτουργία ενός συστήματος που βασίζεται αποκλειστικά στη σωστή κατανομή των πόρων στους ισχυρούς κόμβους και δεν εκτελεί αναζήτηση πόρων στην περίπτωση όπου υπάρχει ανεπάρκεια πόρων σε κάποιον ισχυρό κόμβο.

Το αποτέλεσμα της πρώτης εκτέλεσης ($IE=1$) της εκδοχής του αλγορίθμου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής με $depthmax=0$ εμφανίζεται στα Σχ. 6.7 και 6.8.



Σχήμα 6.7: Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 0$. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).

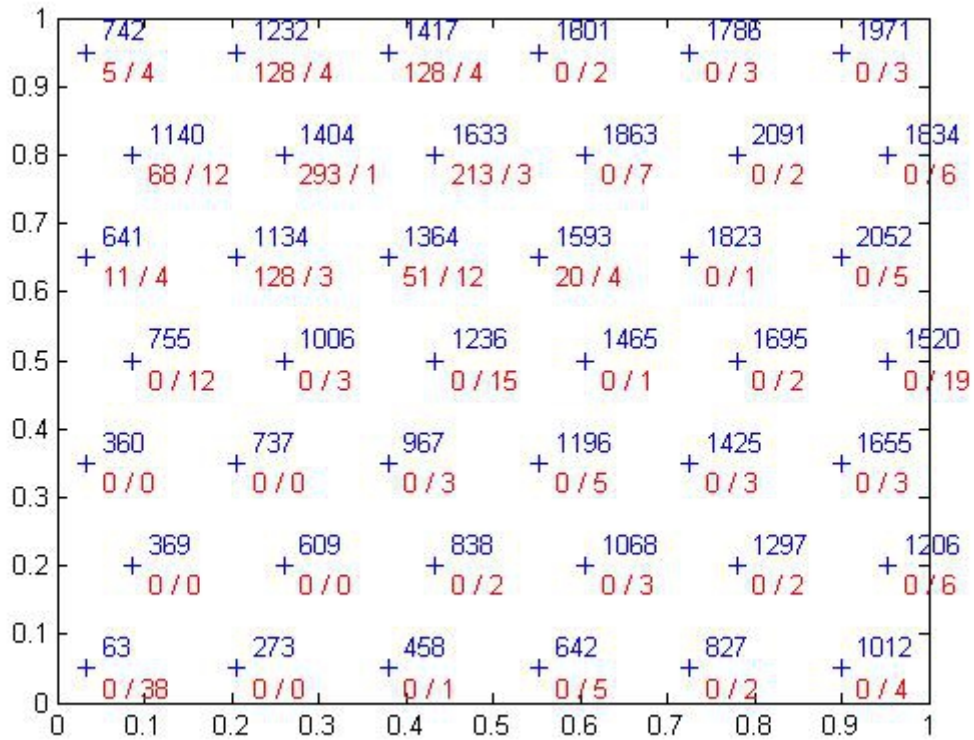


Σχήμα 6.8: Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 0$.

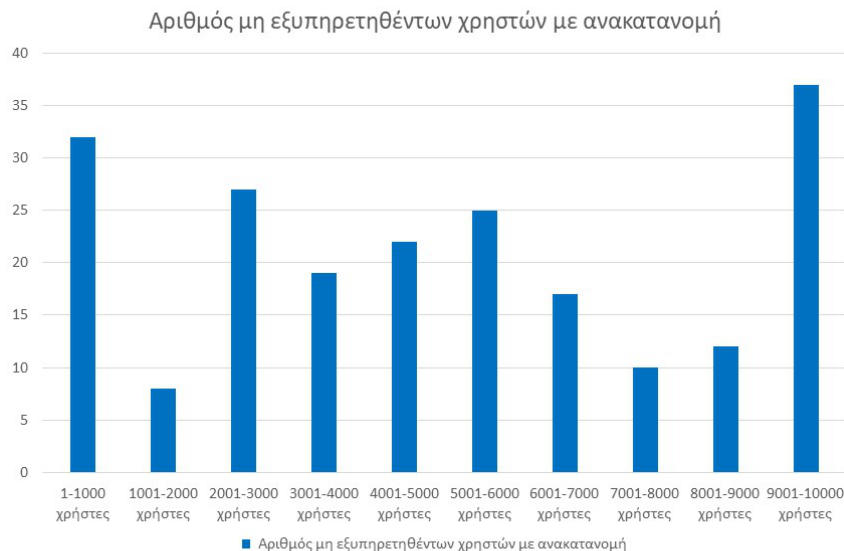
Στη συγκεκριμένη υλοποίηση της προσομοίωσης άφιξης χρηστών το σύστημα δεν εξυπηρετεί 3663 χρήστες, δηλαδή συνολικά μένει χωρίς εξυπηρέτηση το 36,63% του πλήθους των χρηστών. Στο δεύτερο σενάριο, κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου χωρίς ανακατανομή, είχε μείνει χωρίς εξυπηρέτηση το 61,01% των χρηστών. Η βελτίωση εξυπηρέτησης σε σχέση με το δεύτερο σενάριο οφείλεται μόνο στην μορφή της μεταβαλλόμενης κατανομής. Όμως το ποσοστό των μη εξυπηρετηθέντων χρηστών παραμένει πολύ υψηλό. Στο Σχ. 6.7 παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση μη εξυπηρετηθέντων χρηστών στο κάτω αριστερό τεταρτημόριο, στους ισχυρούς κόμβους του οποίου, με βάση την αρχικά αναμενόμενη συνάρτηση κατανομής $\lambda(x, y) = 100 * (x + y)$, δεν είχαν δοθεί πολλοί πόροι. Ως αποτέλεσμα της μεγάλης κίνησης στην περιοχή εκείνη στην αρχή της προσομοίωσης εκμηδενίστηκαν γρήγορα οι διαθέσιμοι πόροι καθιστώντας ανήμπορο το σύστημα να μπορεί στη συνέχεια να εξυπηρετήσει τους υπόλοιπους χρήστες της περιοχής. Αυτό επαληθεύεται και στο Σχ. 6.8, το οποίο δείχνει μεγάλο αριθμό μη εξυπηρετηθέντων χρηστών στις πρώτες τρεις χιλιάδες χρηστών. Μάλιστα, στις τρεις πρώτες χιλιάδες χρηστών οι μη εξυπηρετηθέντες χρήστες πλησιάζουν ή και ξεπερνάνε τους 700 σε κάθε χιλιάδα, το οποίο συνεπάγεται βαθμό εξυπηρέτησης περίπου ίσο με 30% για τους πρώτους 3000 χρήστες που είναι πάρα πολύ χαμηλός για ένα δίκτυο. Επιπλέον, όπως και στο δεύτερο σενάριο, υπάρχουν πολλοί ισχυροί κόμβοι με μεγάλο αριθμό μη χρησιμοποιημένων πόρων, καθώς υπήρξε πολύ χαμηλότερη κίνηση από την αναμενόμενη στις περιοχές που κάλυπταν. Συνεπώς, από τα δύο σενάρια συνάγεται το συμπέρασμα ότι ο μόνος τρόπος για να έχει ικανοποιητικό βαθμό εξυπηρέτησης χρηστών το σύστημα, το οποίο κατανέμει τους πόρους του μόνο στην αρχή, είναι η αρχικά αναμενόμενη κατανομή χρηστών να προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική κατανομή. Εάν αυτό δεν ισχύει, τότε η όποια σημαντική απόκλιση προκαλεί πλεόνασμα πόρων σε κάποιους ισχυρούς κόμβους και παράλληλα ανεπάρκεια πόρων σε άλλους, με αποτέλεσμα την μη εξυπηρέτηση χρηστών.

Για την εκτέλεση του αλγορίθμου με δυνατότητα ανακατανομής επιλέγεται μέγεθος δείγματος ίσο με 170, αφού συμβάλλει σε χαμηλότερο μέσο βάθος αναζήτησης, το οποίο συνεπάγεται μεγαλύτερο βαθμό εξυπηρέτησης χρηστών στη συγκεκριμένη περίπτωση.

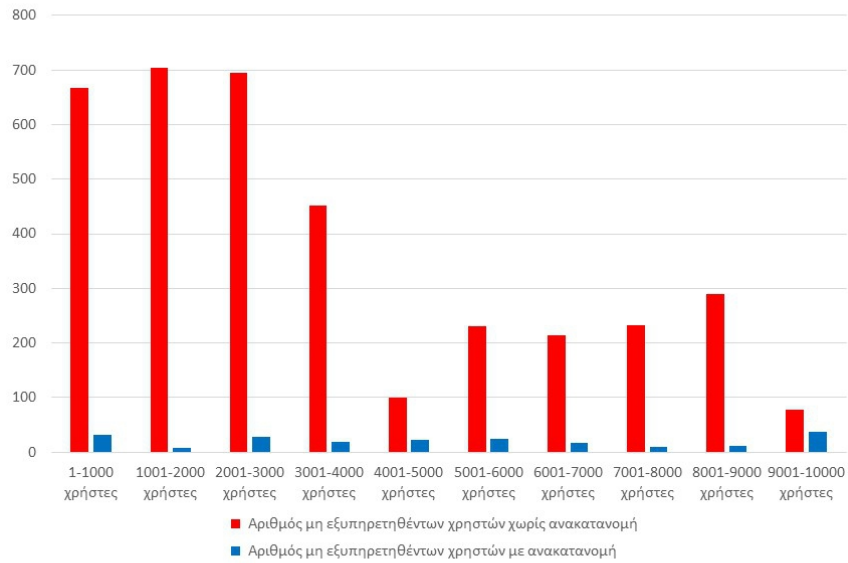
Τα αποτελέσματα της πρώτης εκτέλεσης (IE=1) της εκδοχής του αλγορίθμου με δυνατότητα ανακατανομής με $depthmax=0$ εμφανίζονται στα Σχ. 6.9, 6.10 και 6.11:



Σχήμα 6.9: Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 0$ και μέγεθος δείγματος ίσο με 170 χρήστες. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).



Σχήμα 6.10: Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depthmax = 0$.

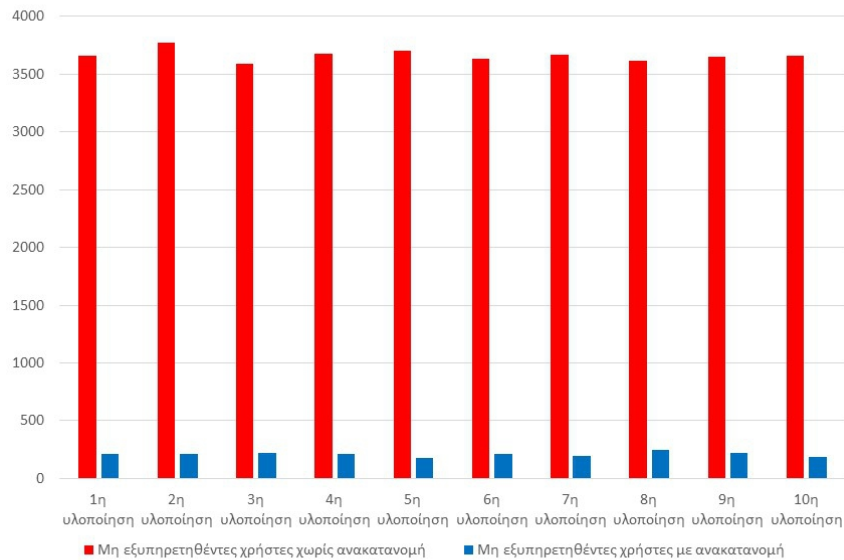


Σχήμα 6.11: Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου με (οι μπλε στήλες) και χωρίς (οι κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων με $depth_{max} = 0$.

Στην ίδια υλοποίηση άφιξης χρηστών με την προηγούμενη περίπτωση, το σύστημα αφήνει χωρίς εξυπηρέτηση 209 χρήστες αυτήν τη φορά, δηλαδή το 2.09% του συνολικού πληθυσμού. Με βάση το Σχ. 6.9, εμφανίζονται πολλοί μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στο κάτω αριστερό τεταρτημόριο. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού στην αρχή της προσομοίωσης υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση χρηστών σε εκείνη την περιοχή, η οποία δεν αναμενόταν από το δίκτυο. Ως αποτέλεσμα, εξαντλούνται γρήγορα οι διαθέσιμοι πόροι των ισχυρών κόμβων της περιοχής και κάποιοι χρήστες μένουν χωρίς εξυπηρέτηση, καθώς δεν έχει σχηματιστεί ακόμα το πρώτο δείγμα 170 χρηστών προκειμένου να καταναείμει το δίκτυο περισσότερους πόρους σε εκείνη την περιοχή. Αυτό επαληθεύεται και στο Σχ. 6.10, όπου στην πρώτη χιλιάδα χρηστών προκύπτει ο δεύτερος μεγαλύτερος αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε σύγκριση με τις υπόλοιπες χιλιάδες χρηστών. Επιπλέον, μη εξυπηρετηθέντες χρήστες εμφανίζονται στις περιοχές όπου λαμβάνει χώρα έντονη μετακίνηση του νεοεμφανιζόμενου πληθυσμού, δηλαδή μεταξύ του κάτω αριστερού και κάτω δεξιού τεταρτημόριου, μεταξύ του κάτω δεξιού και του άνω δεξιού τεταρτημόριου και μεταξύ του άνω δεξιού και του άνω αριστερού τεταρτημόριου. Ο λόγος είναι ότι οι μεταβολές είναι πολύ έντονες και παρά το γεγονός ότι το μέγεθος δείγματος είναι μικρό (170 χρήστες), υπάρχει και πάλι απόκλιση του τρόπου εμφάνισης χρηστών μεταξύ των διαδοχικών δειγμάτων κατά τη διάρκεια των μεταβολών αυτών. Παρ' όλα αυτά, το σύστημα καταφέρνει να παρακολουθήσει τις απότομες μεταβολές και να συμβαδίσει με αυτές σε ικανοποιητικό βαθμό, καθώς σε κανέναν ισχυρό κόμβο του χώρου S δεν υπάρχουν πάνω από 38 μη εξυπηρετηθέντες χρήστες και σε καμιά χιλιάδα χρηστών δεν υπάρχουν πάνω από 37 μη εξυπηρετηθέντες χρήστες. Στο συγκριτικό Σχ. 6.11 φαίνεται η σαφής βελτίωση στην εξυπηρετικότητα του συστήματος μέσω της ανακατανομής. Επομένως, με τη βοήθεια της ανακατανομής πόρων, το σύστημα καταφέρνει να εξυπηρετήσει πάνω από το 97% των χρηστών χωρίς αναζήτηση πόρων, παρά το γεγονός ότι οι χρήστες εμφανίζονται στον χώρο S με μια κατανομή που μετατοπίζεται συνεχώς.

Δηλαδή, ακόμα και στην μεταβαλλόμενη κατανομή χρηστών, το σύστημα επιτυγχάνει πολύ μεγαλύτερο βαθμό εξυπηρέτησης όταν έχει τη δυνατότητα να ανακατανέμει τους πόρους με βάση

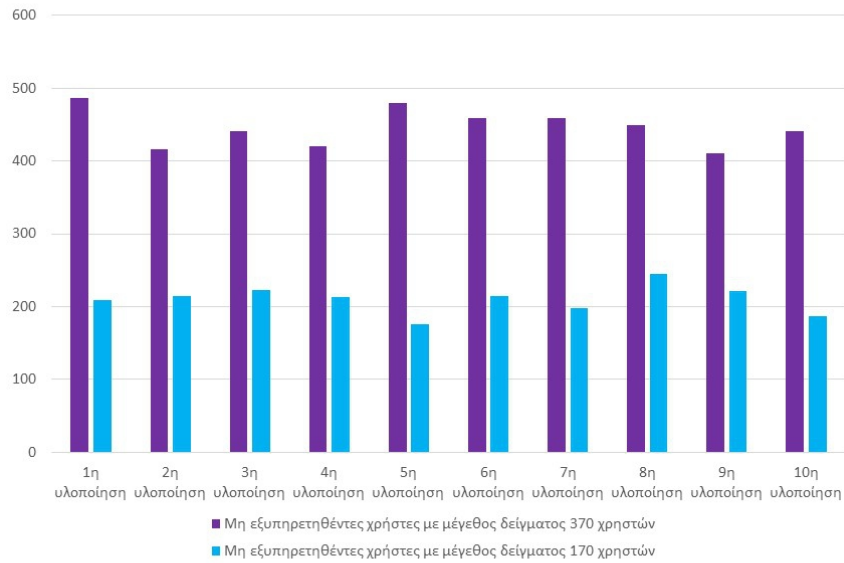
τις ανάγκες που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της κάλυψης του ad hoc γεγονότος. Η απόκλιση του βαθμού εξυπηρέτησης μεταξύ των δύο εκδοχών του αλγόριθμου κατανομής πόρων (με και χωρίς ανακατανομή) παραμένει στα ίδια επίπεδα και στις υπόλοιπες 9 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης, όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.12.



Σχήμα 6.12: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=35$) του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης με (οι μπλε στήλες) και χωρίς (οι κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων και $depthmax = 0$.

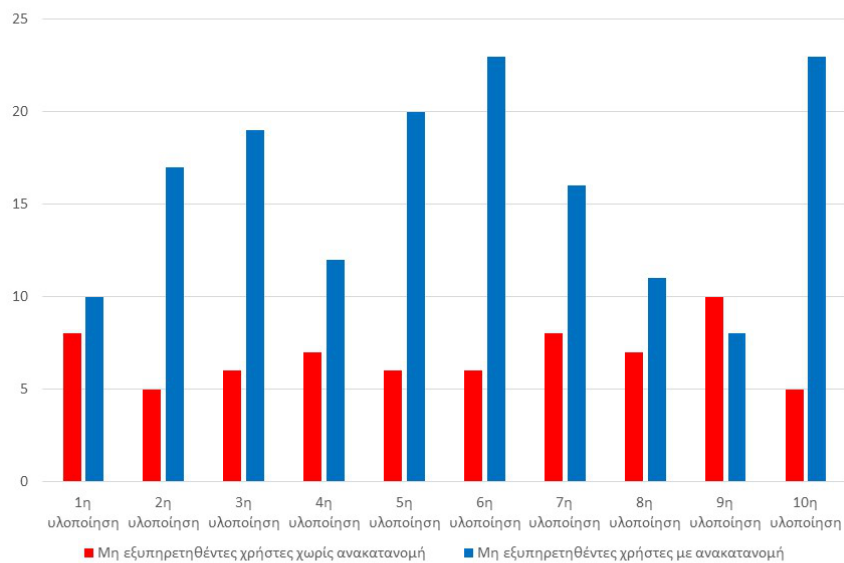
Συνολικά, ο μέσος βαθμός εξυπηρέτησης χρηστών στις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης για το σύστημα με δυνατότητα ανακατανομής είναι 97.901%. Ο μέσος βαθμός εξυπηρέτησης για το σύστημα χωρίς δυνατότητα ανακατανομής είναι 63.363%.

Ως αποτέλεσμα του χαμηλότερου μέσου βάθους αναζήτησης, η χρήση δείγματος 170 χρηστών επιτυγχάνει μεγαλύτερο βαθμό εξυπηρέτησης σε σχέση με τη χρήση δείγματος 370 χρηστών στο τρίτο σενάριο προσομοίωσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.13.



Σχήμα 6.13: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=35$) του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με μέγεθος δείγματος 370 (μωβ στήλες) και 170 χρήστες (γαλάζιες στήλες) και $depthmax=0$.

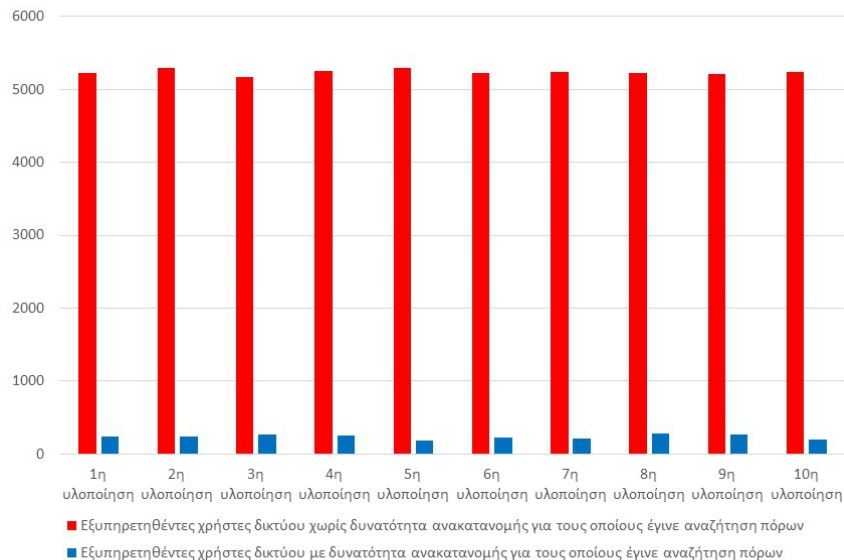
Συγκεκριμένα, η χρήση μεγέθους δείγματος 370 χρηστών οδηγεί σε βαθμό εξυπηρέτησης ίσο με 95.538% στο τρίτο σενάριο προσομοίωσης, έναντι του 97.901% που επιτυγχάνει η χρήση μεγέθους δείγματος 170 χρηστών. Εκτελώντας την εκδοχή του αλγόριθμου χωρίς ανακατανομή πόρων και την εκδοχή του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων και μέγεθος δείγματος 170 χρηστών στο τρίτο σενάριο προσομοίωσης, δίνοντας στο δίκτυο τη δυνατότητα ενός βήματος αναζήτησης πόρων, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχ. 6.14.



Σχήμα 6.14: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=35$) του

τρίτου σεναρίου προσομοίωσης με (μπλε στήλες) και χωρίς (κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων και $depthmax = 1$.

Με δυνατότητα ενός βήματος αναζήτησης, ο μέσος βαθμός εξυπηρέτησης χρηστών προκύπτει ίσος με 99.841% για δίκτυο με δυνατότητα ανακατανομής πόρων και 99.932% για δίκτυο χωρίς δυνατότητα ανακατανομής. Συνεπώς και οι δύο εκδοχές του αλγόριθμου επιτυγχάνουν ικανοποιητικά επίπεδα εξυπηρέτησης.



Σχήμα 6.15: Αριθμός εξυπηρετηθέντων χρηστών για την εξυπηρέτηση των οποίων έγινε αναζήτηση πόρων σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης με (μπλε στήλες) και χωρίς (κόκκινες στήλες) δυνατότητα ανακατανομής πόρων και με $depthmax = 1$.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 6.15, όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα ανακατανομής πόρων, το δίκτυο αναγκάζεται να κάνει αναζήτηση πόρων για να εξυπηρετήσει το 52.39% των χρηστών. Αντίθετα, όταν μπορεί να ανακατανομή τους πόρους στους ισχυρούς κόμβους, κάνει αναζήτηση μόλις στο 2.349% των περιπτώσεων των εξυπηρετηθέντων χρηστών. Δηλαδή, όπως και στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, έτσι και στο τρίτο σενάριο το δίκτυο επιτυγχάνει με τη δυνατότητα ανακατανομής πόρων πολύ γρηγορότερη απόκριση στις απαιτήσεις των χρηστών, καθώς κάνει αναζήτηση πόρων σε πολύ μικρό αριθμό χρηστών. Συνεπώς, ακόμα και στην περίπτωση μεταβαλλόμενης κατανομής χρηστών με τον χρόνο, το δίκτυο μπορεί να επιτύχει υψηλό βαθμό εξυπηρέτησης (πάνω από 99%) και παράλληλα να παρέχει γρήγορη εξυπηρέτηση στους χρήστες.

Από τα δύο προηγούμενα σενάρια της προσομοίωσης άφιξης χρηστών εξάγεται το συμπέρασμα ότι η δυνατότητα περιοδικού ελέγχου της εμφάνισης των χρηστών και της ανακατανομής των εναπομεινάντων πόρων, εάν χρειάζεται, επιτρέπει στο τηλεπικοινωνιακό σύστημα να είναι πιο αποδοτικό κατά την εξυπηρέτηση των χρηστών, καθώς επιτυγχάνεται σημαντικά χαμηλότερο μέσο βάθος αναζήτησης πόρων. Επέκταση αυτής της υψηλής απόδοσης μέσω ανακατανομής πόρων είναι ότι σε συστήματα που δεν επιτρέπουν καθόλου χρόνο αναζήτησης πόρων, το ποσοστό των εξυπηρετούμενων χρηστών του δικτύου μπορεί να φθάσει στα επίπεδα 97%-99% ανεξαρτήτως της κατανομής που ακολουθούν και χωρίς να είναι αναγκαίο η αρχική πρόβλεψη για τον τρόπο εμφάνισης των χρηστών να είναι σωστή. Με άλλα λόγια, με τον συγκεκριμένο αλγόριθμο ο sBS βρίσκεται σε θέση να εξυπηρετήσει το 97-99% των χρηστών χωρίς

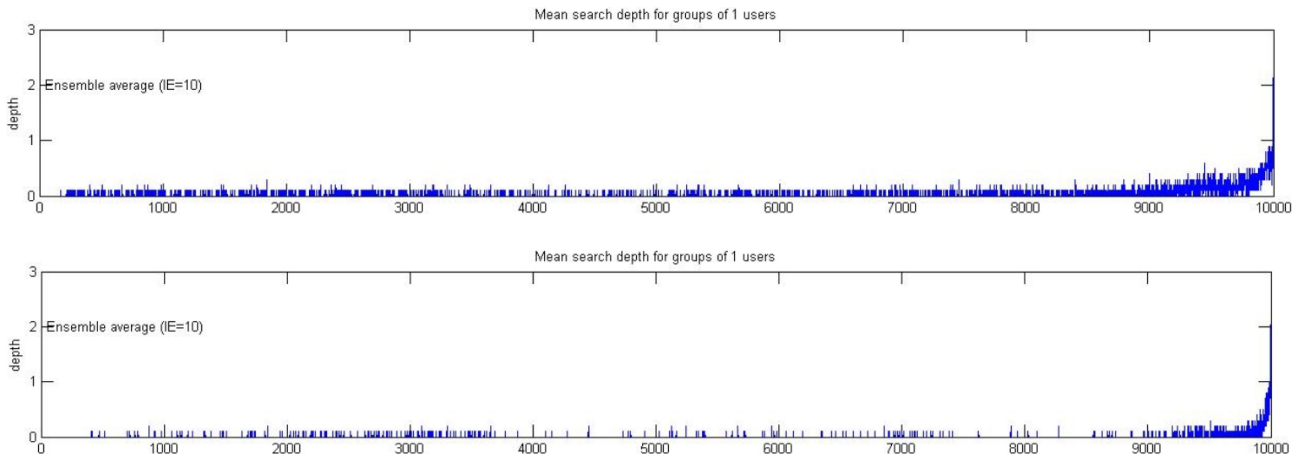
αναζήτηση πόρων, χωρίς να υπάρχει ανάγκη να ξέρει την κατανομή τους, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου η κατανομή μεταβάλλεται με τον χρόνο. Επιπλέον, εάν επιτραπεί στο δίκτυο ένα βήμα αναζήτησης πόρων για την εξυπηρέτηση των χρηστών, το δίκτυο εγγυάται βαθμό εξυπηρέτησης πάνω από 99% χωρίς να υπάρξει μεγάλη καθυστέρηση στην εξυπηρέτηση των χρηστών, καθώς οι περιπτώσεις στις οποίες γίνεται αναζήτηση πόρων είναι κάτω του 3% του συνολικού πληθυσμού των χρηστών.

6.3 Τέταρτο σενάριο προσομοίωσης: Η πραγματική συνάρτηση κατανομής είναι διαφορετική από την αναμενόμενη και είναι μεταβλητή με τον χρόνο, αλλά κατά μεγάλα χρονικά διαστήματα είναι στατική με τον χρόνο

6.3.1 Ανάγκη χρήσης μεταβλητού μεγέθους δείγματος στον αλγόριθμο κατανομής πόρων

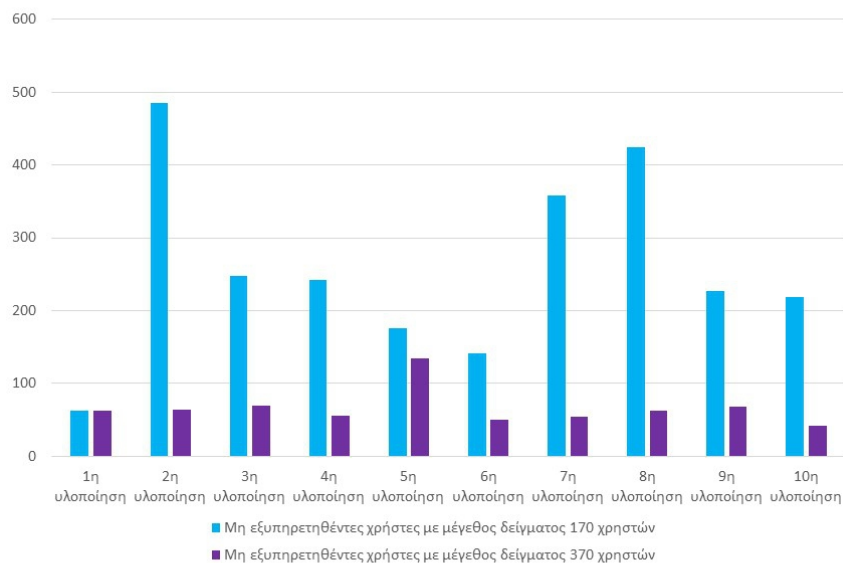
Αυτό το σενάριο προσομοίωσης αποτελεί τον συνδυασμό του δεύτερου και του τρίτου σεναρίου, καθώς η κατανομή χρηστών είναι μεταβλητή με τον χρόνο, όπως στο τρίτο σενάριο, με τη διαφορά ότι για μεγάλα χρονικά διαστήματα είναι στατική (δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο), όπως στο δεύτερο σενάριο. Ο λόγος που μελετάται το συγκεκριμένο σενάριο οφείλεται στην ανάγκη δημιουργίας ενός αλγορίθμου που είναι αυτόνομος και μπορεί να ρυθμίσει ο ίδιος τη συχνότητα με την οποία ελέγχει εάν υπάρχει απόκλιση από την πραγματική κατανομή. Συγκεκριμένα, στο τρίτο σενάριο η επιλογή να αλλάξει το μέγεθος δείγματος από 370 σε 170 χρήστες έγινε εξωτερικά, καθώς διαπιστώθηκε ότι η κατανομή είναι μεταβαλλόμενη με τον χρόνο και κατά συνέπεια το σύστημα έπρεπε να ελέγχει πιο συχνά την πραγματική κατανομή για να προσαρμόζεται ομαλά στην μεταβολή. Εάν δεν γίνει αυτή η αλλαγή του μεγέθους δείγματος, το σύστημα έχει ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση, καθώς το μέσο βάθος αναζήτησης είναι αυξημένο κατά τα χρονικά διαστήματα των μεταβολών. Αυτή η αλλαγή της απόδοσης του συστήματος φαίνεται στη σύγκριση μεταξύ των Σχ. 6.4 και 6.6 που έγινε στην προηγούμενη ενότητα. Αυτή η διαφορά στα επίπεδα του μέσου βάθους αναζήτησης οδηγεί σε διαφορετικό βαθμό εξυπηρέτησης χρηστών σε περίπτωση που δεν επιτραπεί αναζήτηση πόρων ($depthmax=0$), όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.13.

Ο στόχος είναι να γραφτεί ένας αλγόριθμος που να τρέχει ο sBS καθ' όλη τη διάρκεια του ad hoc γεγονότος και να συντελεί στην βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου χωρίς να χρειάζεται εξωτερική παρέμβαση. Μια λύση θα ήταν να τεθεί εξαρχής το μέγεθος του δείγματος χρηστών ίσο με 170 χρήστες, ώστε το σύστημα να μπορεί να ανταποκριθεί σε τυχόν έντονες μεταβολές στην εμφάνιση χρηστών κατά τη διάρκεια της κάλυψης του γεγονότος. Το πρόβλημα με τη συγκεκριμένη λύση, όμως, είναι ότι το δείγμα 170 χρηστών για πληθυσμό 10000 με επίπεδο εμπιστοσύνης ίσο με 95% αντιστοιχεί σε περιθώριο σφάλματος ίσο με 7.47%, το οποίο είναι μεγαλύτερο από το 5% που αντιστοιχεί σε μέγεθος δείγματος ίσο με 370 χρήστες. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα η κατανομή των χρηστών του δείγματος να μην ανταποκρίνεται στην πραγματική με αποτέλεσμα να προκύψουν ανακατανομές πόρων που δεν χρειάζονται. Μια αχρεία ανακατανομή πόρων με βάση ένα δείγμα που δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα αναγκάζει το σύστημα σε επιπλέον ανακατανομή όταν σχηματιστεί το επόμενο δείγμα, προκειμένου να διορθώσει την λανθασμένη κατανομή πόρων. Το δείγμα των 170 χρηστών βελτιώνει την απόδοση του συστήματος σε περιπτώσεις συνεχώς μεταβαλλόμενων κατανομών, αλλά χειροτερεύει την απόδοση του αλγορίθμου σε περιπτώσεις που η κατανομή των χρηστών είναι στατική με τον χρόνο. Όπως φαίνεται στο Σχ. 6.16, το μέσο βάθος αναζήτησης είναι μεγαλύτερο στην εκτέλεση του δεύτερου σεναρίου στατικής κατανομής με δείγμα 170 χρηστών σε σχέση με την εκτέλεση με δείγμα 370 χρηστών.



Σχήμα 6.16: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης (στατική κατανομή) με μέγεθος δείγματος 170 χρήστες (πάνω διάγραμμα) και με μέγεθος δείγματος 370 χρήστες (κάτω διάγραμμα).

Παρατηρείται ότι όταν το μέγεθος δείγματος είναι 170 χρήστες, τότε πραγματοποιούνται συχνότερα αναζητήσεις πόρων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ως αποτέλεσμα των συχνότερων αναζητήσεων και του μεγαλύτερου βάθους αναζήτησης, ο αλγόριθμος με μέγεθος δείγματος ίσο με 170 χρήστες εξυπηρετεί μικρότερο αριθμό χρηστών στο συγκεκριμένο σενάριο σε περίπτωση που το $depthmax$ τίθεται ίσο με 0, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.17.



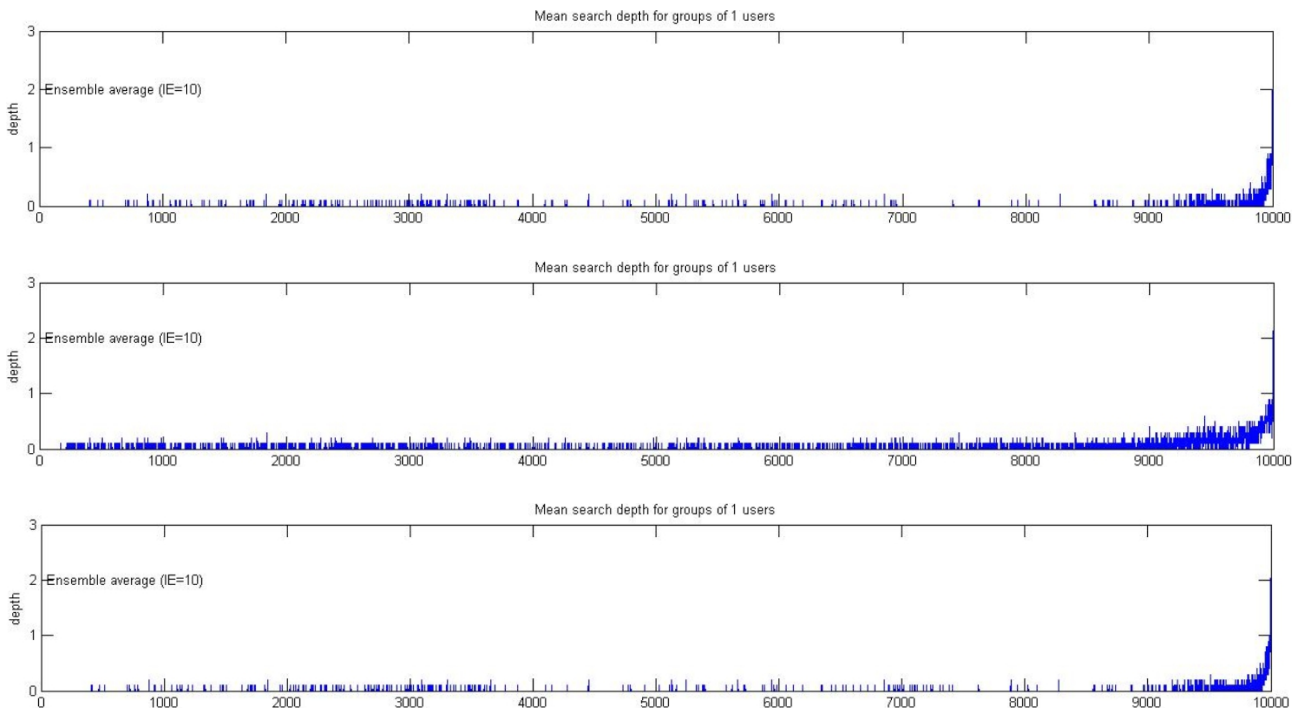
Σχήμα 6.17: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=55$) του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρήστες (μωβ στήλες) και $depthmax = 0$.

Συνολικά, ο μέσος βαθμός εξυπηρέτησης χρηστών στις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης για το σύστημα με μέγεθος δείγματος 370 χρήστες είναι 99.339%. Ο μέσος βαθμός εξυπηρέτησης για το σύστημα με μέγεθος δείγματος 170 χρήστες είναι 97.419%.

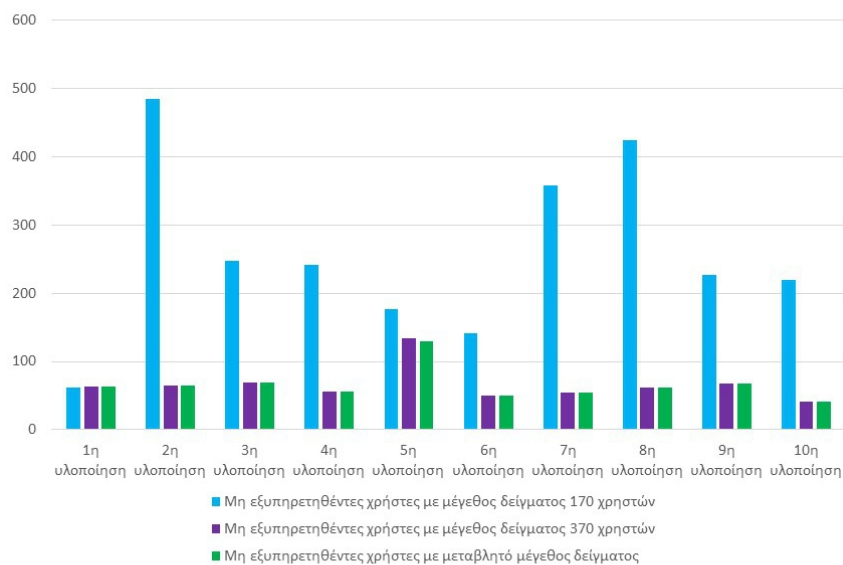
Επομένως, το μέγεθος δείγματος είναι αποτελεσματικό όταν συμβαδίζει με τη χρονική συμπεριφορά της κατανομής, δηλαδή μικρό μέγεθος δείγματος (170) για μεταβαλλόμενη κατανομή και μεγαλύτερο μέγεθος δείγματος (370) για στατική κατανομή, αλλά όταν δεν συμβαδίζει, αυτό έχει επίπτωση στην απόδοση του συστήματος. Το σύστημα δεν μπορεί πάντα να ξέρει εκ των προτέρων ποια θα είναι η συμπεριφορά της κατανομής με τον χρόνο (στατική ή μεταβαλλόμενη). Αντ' αυτού, θα πρέπει να παρακολουθεί τη συμπεριφορά της κατανομής με τον χρόνο και ανάλογα να ρυθμίζει το μέγεθος του δείγματος που χρησιμοποιεί. Προτείνεται το εξής σχήμα: Ο sBS να ξεκινά την κάλυψη του γεγονότος με αρχικό μέγεθος δείγματος ίσο με 370 χρήστες και, εάν διαπιστώσει ότι υπάρχει έντονη μεταβολή, να έχει τη δυνατότητα να αλλάξει το μέγεθος δείγματος σε 170 ώστε να μπορέσει να παρακολουθήσει καλύτερα την μεταβολή και να προσαρμοστεί σε αυτήν. Συγκεκριμένα, όταν η μέγιστη απόκλιση μεταξύ εμπειρικής και χρησιμοποιούμενης κατανομής, D , είναι μεγαλύτερη ή ίση του 0.065 σε ένα δείγμα, διαφορετικό του αρχικού, τότε το μέγεθος δείγματος μεταβάλλεται από 370 σε 170 χρήστες, καθώς η μεγάλη τιμή του D σημαίνει ότι είναι αρκετά πιθανό να υπάρχει μεταβολή στην κατανομή εμφάνισης χρηστών. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα προσαρμόζεται στην μεγάλη μεταβολή για να μην πέσει η απόδοσή του. Να σημειωθεί ότι αυτή η συνθήκη δεν εφαρμόζεται στο πρώτο δείγμα των 370 χρηστών, επειδή υπάρχει η περίπτωση η πραγματική κατανομή να είναι διαφορετική της αναμενόμενης και στατική με τον χρόνο, το οποίο σημαίνει ότι στο πρώτο δείγμα που θα σχηματιστεί η D θα είναι μεγαλύτερη του 0.065. Συνεπώς, σε αυτήν την περίπτωση μπορεί απλά να χρειαστεί μια ανακατανομή πόρων και το μέγεθος δείγματος θα διατηρηθεί στους 370 χρήστες. Η υπέρβαση της τιμής 0.071 σημαίνει ότι υπάρχει σημαντική απόκλιση και είναι αναγκαία η ανακατανομή των πόρων. Η τιμή του ορίου της συνθήκης ορίζεται λίγο χαμηλότερα της τιμής αυτής ώστε να προσαρμοστεί εγκαίρως το σύστημα σε μεταβολές, οι οποίες δεν έχουν ακόμα προκαλέσει ανάγκη ανακατανομής αλλά πιθανόν να προκαλέσουν στα επόμενα δείγματα που θα σχηματιστούν. Επιπλέον, ο αλγόριθμος του sBS θα έχει και μια δεύτερη συνθήκη, η οποία ορίζει ότι σε περίπτωση που το μέγεθος του δείγματος είναι 170 χρήστες και η D είναι μικρότερη ή ίση του 0.045 σε δύο διαδοχικά δείγματα, τότε το μέγεθος δείγματος ξαναγίνεται ίσο με 370, καθώς είναι πολύ πιθανό το γεγονός ότι η κατανομή είναι πλέον στατική με τον χρόνο. Η τιμή 0.045 προέκυψε από την μελέτη της συμπεριφοράς της τιμής της D σε διάφορες στατικές κατανομές. Δηλαδή, το σύστημα χρειάζεται να παρατηρήσει χαμηλές αποκλίσεις σε δείγμα $2*170=340$ χρηστών για να σιγουρευτεί ότι η κατανομή είναι στατική και να αρχίσει να ελέγχει την κίνηση των χρηστών με μικρότερη συχνότητα και κατ' επέκταση με μικρότερο περιθώριο σφάλματος δείγματος.

6.3.2 Εκτέλεση του αλγόριθμου κατανομής πόρων με μεταβλητό μέγεθος δείγματος στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο με μεταβλητό μέγεθος δείγματος στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης (στατική κατανομή διαφορετική της αρχικά αναμενόμενης), προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στα Σχ. 6.18 και 6.19.



Σχήμα 6.18: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης (στατική κατανομή) με μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πάνω διάγραμμα) και με σταθερό μέγεθος δείγματος 170 χρηστών (μεσαίο διάγραμμα) και 370 χρηστών (κάτω διάγραμμα).



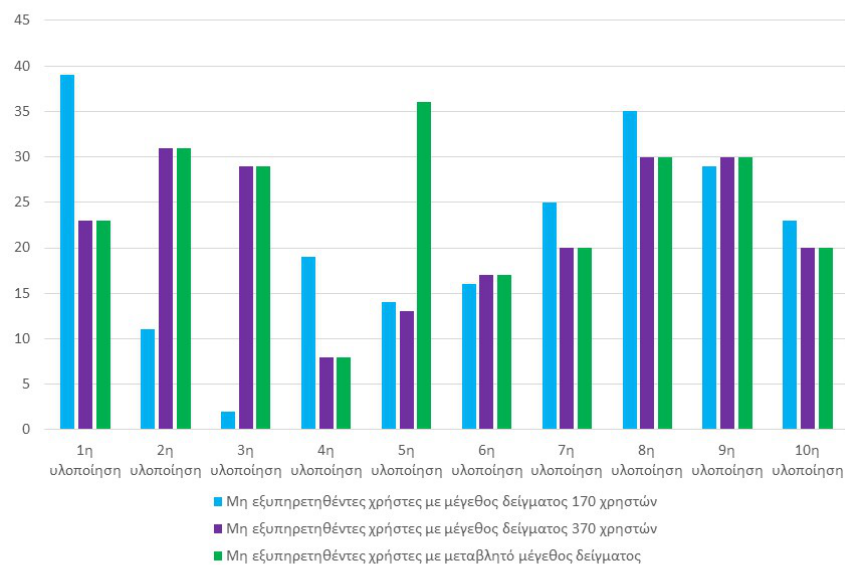
Σχήμα 6.19: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=55$) του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης (στατική κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και $depthmax=0$.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 6.18, το μέσο βάθος αναζήτησης κατά τις δέκα υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με μεταβλητό δείγμα έχει την ίδια συμπεριφορά με την περίπτωση του

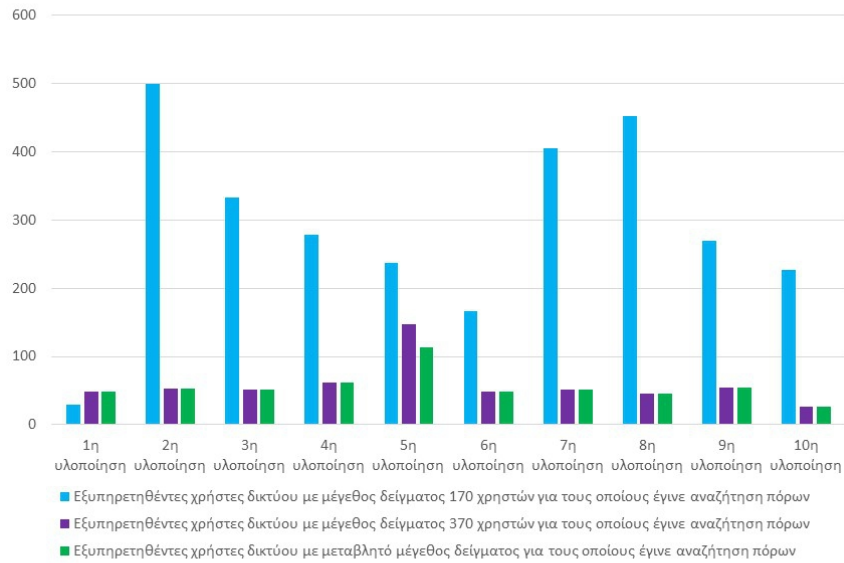
σταθερού μεγέθους δείγματος 370 χρηστών. Αυτό οφείλεται στο ότι οι υλοποιήσεις των δύο εκδοχών του αλγόριθμου έχουν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά όσον αφορά τις ανακατανομές. Με εξαίρεση την πέμπτη υλοποίηση, η απόκλιση D δεν ξεπερνά την τιμή 0.065 μετά το πρώτο δείγμα 370 χρηστών, με αποτέλεσμα να μην μειωθεί το μέγεθος δείγματος στους 170 χρήστες. Οι δύο αυτές εκδοχές του αλγόριθμου έχουν χαμηλότερο μέσο βάθος και λιγότερες περιπτώσεις αναζήτησης πόρων σε σχέση με τον αλγόριθμο με σταθερό μέγεθος δείγματος 170 χρηστών.

Χωρίς τη δυνατότητα αναζήτησης πόρων ($depthmax=0$), κατά τη διάρκεια των 10 υλοποιήσεων του δεύτερου σεναρίου, το δίκτυο με μεταβλητό μέγεθος δείγματος έχει βαθμό εξυπηρέτησης χρηστών ίσο με 99.343% και το δίκτυο με σταθερό μέγεθος δείγματος 370 χρηστών έχει βαθμό εξυπηρέτησης ίσο με 99.339%, όπως φαίνεται από το Σχ. 6.19. Αντίθετα, το δίκτυο με σταθερό μέγεθος δείγματος 170 χρηστών έχει βαθμό εξυπηρέτησης ίσο με 97.419%.

Εκτελώντας τις τρεις εκδοχές του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων (με μεταβλητό και σταθερό μέγεθος δείγματος 170/370 χρηστών) στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, δίνοντας στο δίκτυο τη δυνατότητα ενός βήματος αναζήτησης πόρων, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στα Σχ. 6.20 και 6.21.



Σχήμα 6.20: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=55$) του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης (στατική κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και $depthmax=1$.



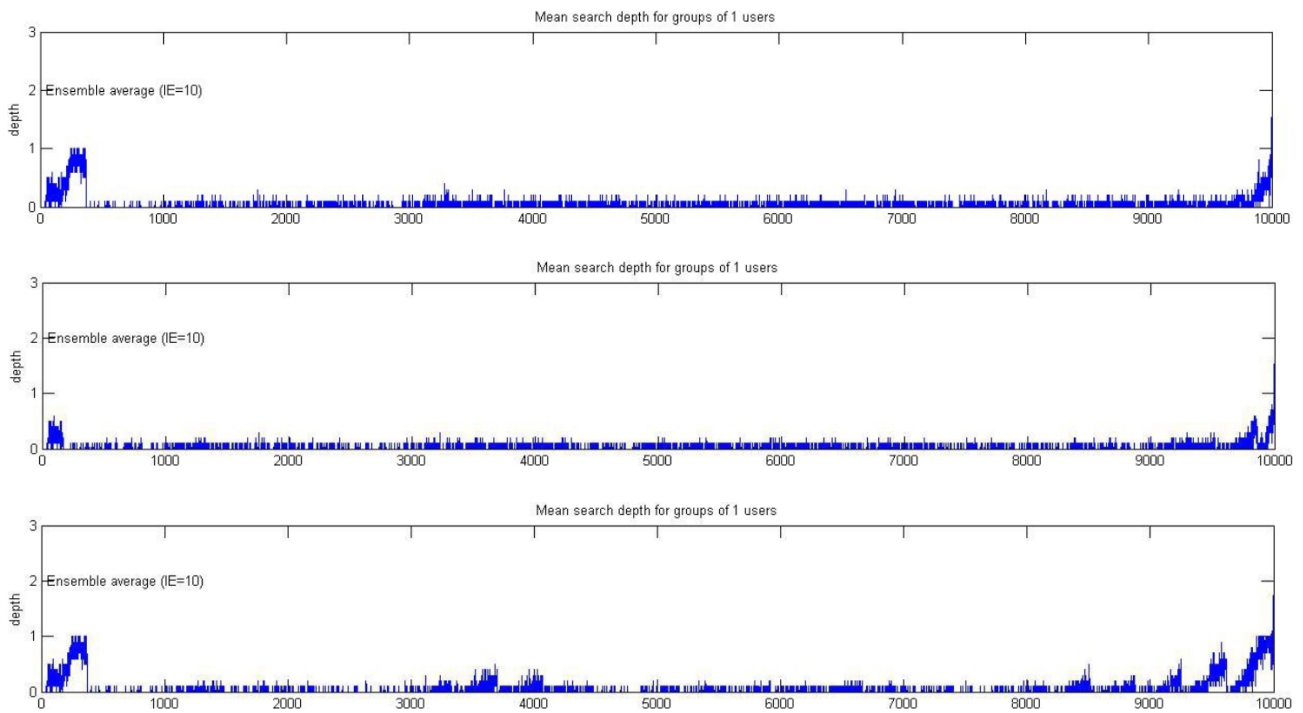
Σχήμα 6.21: Εξυπηρετηθέντες χρήστες για την εξυπηρέτηση των οποίων έγινε αναζήτηση πόρων σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=55$) του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης (στατική κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και $depthmax = 1$.

Κατά τη διάρκεια των 10 υλοποιήσεων του δεύτερου σεναρίου με $depthmax = 1$, στην εκδοχή του αλγόριθμου με μεταβλητό μέγεθος δείγματος, το δίκτυο έχει βαθμό εξυπηρέτησης ίσο με 99.756% και κάνει αναζήτηση πόρων στο 0.555% των περιπτώσεων των εξυπηρετηθέντων χρηστών. Στην εκδοχή του αλγόριθμου με σταθερό μέγεθος δείγματος ίσο με 370 χρήστες, το δίκτυο έχει βαθμό εξυπηρέτησης ίσο με 99.779% και κάνει αναζήτηση πόρων στο 0.588% των περιπτώσεων των εξυπηρετηθέντων χρηστών. Η εκδοχή του αλγόριθμου με σταθερό μέγεθος δείγματος ίσο με 170 χρήστες έχει και πάλι τη χειρότερη απόδοση από τις 3 εκδοχές στο δεύτερο σενάριο, καθώς, παρά το γεγονός ότι έχει κι αυτή υψηλό βαθμό εξυπηρέτησης (99.787%), αναγκάζεται να κάνει αναζήτηση πόρων σε περισσότερες περιπτώσεις εξυπηρετηθέντων χρηστών (στο 2.898% των περιπτώσεων).

Συνοψίζοντας από τα προηγούμενα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι με τη χρήση μεταβλητού μεγέθους δείγματος, σε περίπτωση στατικής κατανομής χρηστών, το δίκτυο επιτυγχάνει ίδια επίπεδα απόδοσης σε σχέση με το αν χρησιμοποιούσε σταθερό δείγμα 370 χρηστών και σαφώς υψηλότερα σε σχέση με το αν χρησιμοποιούσε σταθερό δείγμα 170 χρηστών.

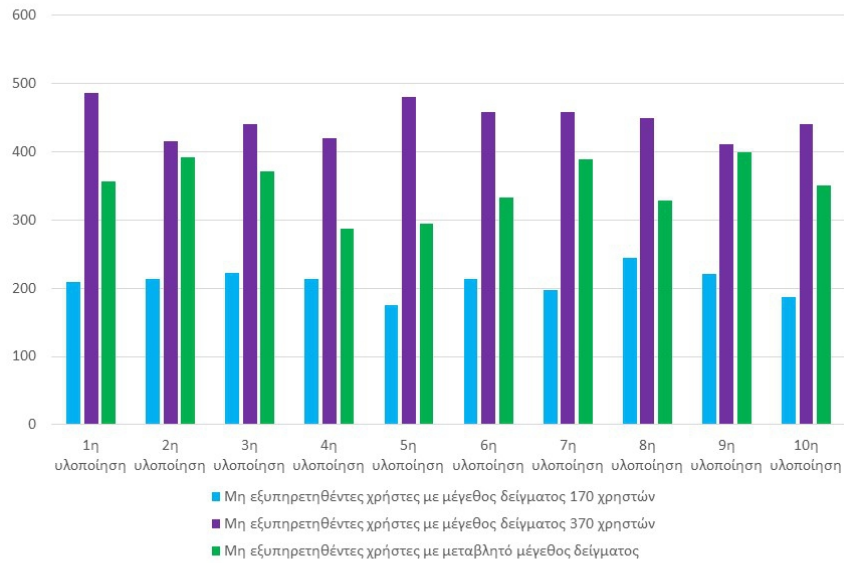
6.3.3 Εκτέλεση του αλγόριθμου κατανομής πόρων με μεταβλητό μέγεθος δείγματος στο τρίτο σενάριο προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μεταβλητού μεγέθους δείγματος στο τρίτο σενάριο προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή) φαίνονται στο Σχ. 6.22.



Σχήμα 6.22: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη στο τρίτο σενάριο προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή) με μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πάνω διάγραμμα) και με σταθερό μέγεθος δείγματος 170 χρηστών (μεσαίο διάγραμμα) και 370 χρηστών (κάτω διάγραμμα).

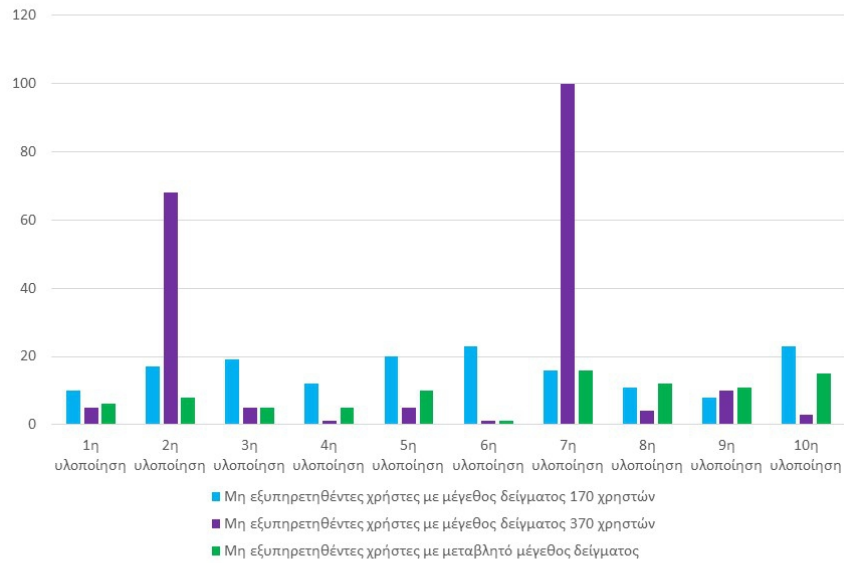
Το δίκτυο αντιλαμβάνεται μετά το πρώτο δείγμα 370 χρηστών ότι η κατανομή χρηστών είναι διαφορετική της αναμενόμενης και ανακατανέμει τους πόρους, μειώνοντας σημαντικά το μέσο βάθος αναζήτησης μετά τους 370 πρώτους χρήστες, όπως φαίνεται στο πρώτο διάγραμμα του Σχ. 6.22. Μετά το δεύτερο δείγμα 370 χρηστών, αντιλαμβάνεται την μεταβολή της κατανομής χρηστών με τον χρόνο και μειώνει το μέγεθος δείγματος σε 170 χρήστες. Ως αποτέλεσμα αυτού, ο αλγόριθμος επιτυγχάνει στη συνέχεια παρόμοια συμπεριφορά στο τρίτο σενάριο με τον αλγόριθμο σταθερού μεγέθους δείγματος 170 χρηστών, όπως φαίνεται από τη σύγκριση μεταξύ του πάνω και του μεσαίου διαγράμματος του Σχ. 6.22. Κατά συνέπεια, το μέσο βάθος αναζήτησης του αλγόριθμου μεταβλητού δείγματος είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο μέσο βάθος του αλγόριθμου σταθερού μεγέθους δείγματος 370 χρηστών, όπως φαίνεται από τη σύγκριση μεταξύ του πάνω και του κάτω διαγράμματος στο Σχ. 6.22.



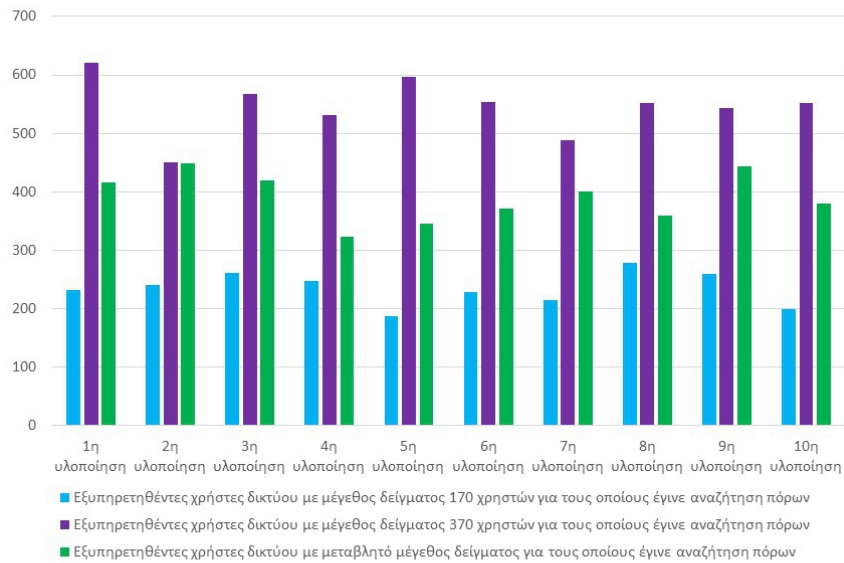
Σχήμα 6.23: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=35$) του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και $depthmax=0$.

Όσον αφορά την δυνατότητα εξυπηρέτησης των χρηστών σε 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης με $depthmax=0$, το δίκτυο με μεταβλητό μέγεθος δείγματος επιτυγχάνει βαθμό εξυπηρέτησης χρηστών ίσο με 96.45%, έναντι 95.538% που επιτυγχάνει με σταθερό μέγεθος δείγματος 370 χρηστών και 97.901% που επιτυγχάνει με σταθερό μέγεθος δείγματος 170 χρηστών. Αυτό σημαίνει ότι οι μη εξυπηρετηθέντες χρήστες ανά υλοποίηση είναι κατά μέσο όρο 141 περισσότεροι στο δίκτυο με μεταβλητό μέγεθος δείγματος σε σχέση με τους μη εξυπηρετηθέντες χρήστες του δικτύου σταθερού μεγέθους δείγματος 170 χρηστών. Αυτή η διαφορά είναι αναμενόμενη και αρκετά μικρή, αν ληφθεί υπόψη ότι στην περίπτωση του μεταβλητού μεγέθους δείγματος χρειάζεται να αφιχθούν πρώτα 740 χρήστες για να αντιληφθεί το σύστημα τη χρονική συμπεριφορά της κατανομής και να μειώσει το μέγεθος δείγματος σε 170 χρήστες.

Εκτελώντας τις τρεις εκδοχές του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων στο τρίτο σενάριο προσομοίωσης, δίνοντας αυτή τη φορά στο δίκτυο τη δυνατότητα ενός βήματος αναζήτησης πόρων, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στα Σχ. 6.24 και 6.25.



Σχήμα 6.24: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=35$) του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και $depthmax = 1$.



Σχήμα 6.25: Εξυπηρετηθέντες χρήστες για την εξυπηρέτηση των οποίων έγινε αναζήτηση πόρων σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednum=35$) του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και $depthmax = 1$.

Κατά τη διάρκεια των 10 υλοποιήσεων του τρίτου σεναρίου με $depthmax = 1$, στην εκδοχή του

αλγόριθμου με μεταβλητό μέγεθος δείγματος, το δίκτυο έχει βαθμό εξυπηρέτησης ίσο με 99.911% και κάνει αναζήτηση πόρων στο 3.907% των περιπτώσεων των εξυπηρετηθέντων χρηστών. Στην εκδοχή του αλγόριθμου με σταθερό μέγεθος δείγματος ίσο με 170 χρήστες, το δίκτυο έχει βαθμό εξυπηρέτησης ίσο με 99.841% και κάνει αναζήτηση πόρων στο 2.349% των περιπτώσεων των εξυπηρετηθέντων χρηστών. Η εκδοχή του αλγόριθμου με σταθερό μέγεθος δείγματος ίσο με 370 χρήστες έχει και πάλι τη χειρότερη απόδοση από τις 3 εκδοχές στο δεύτερο σενάριο, καθώς, παρά το γεγονός ότι έχει κι αυτή υψηλό βαθμό εξυπηρέτησης (99.798%), αναγκάζεται να κάνει αναζήτηση πόρων σε περισσότερες περιπτώσεις εξυπηρετηθέντων χρηστών (στο 5.457% των περιπτώσεων).

Επομένως, συνάγεται το συμπέρασμα ότι με τη χρήση μεταβλητού μεγέθους δείγματος, σε περίπτωση χρονικά μεταβαλλόμενης κατανομής χρηστών, το δίκτυο επιτυγχάνει ίδια επίπεδα απόδοσης σε σχέση με το αν χρησιμοποιούσε σταθερό δείγμα 170 χρηστών και σαφώς υψηλότερα σε σχέση με το αν χρησιμοποιούσε σταθερό δείγμα 370 χρηστών.

Με βάση τα προηγούμενα, η μεταβολή του μεγέθους δείγματος δίνει στον υπολογιστή του sBS τη δυνατότητα να μπορεί να καλύψει μια μεταβαλλόμενη ή στατική κατανομή χρηστών χωρίς εξωτερική παρέμβαση κατά τη διάρκεια της κάλυψης του ad hoc γεγονότος και να πετυχαίνει την ίδια σχεδόν απόδοση που θα είχε εάν ήξερε εκ των προτέρων τη χρονική συμπεριφορά της κατανομής (στατική ή μεταβαλλόμενη). Κατ' επέκταση, η απόδοση του συστήματος με μεταβλητό μέγεθος δείγματος είναι σε ίδια ή σε υψηλότερα επίπεδα σε σύγκριση με ένα σύστημα στο οποίο επιλέγεται τυχαία στην αρχή ένα σταθερό μέγεθος δείγματος για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

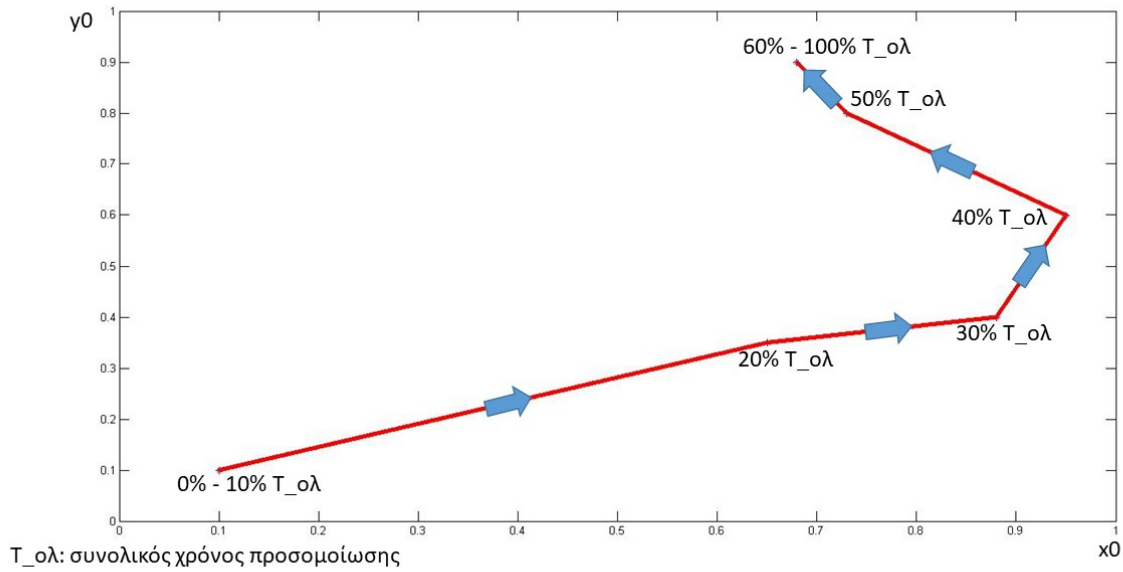
6.3.4- Εκτέλεση του αλγόριθμου κατανομής πόρων με μεταβλητό μέγεθος δείγματος στο τέταρτο σενάριο προσομοίωσης

Στη συνέχεια, θα εξεταστεί η απόδοση του συγκεκριμένου αλγορίθμου στο τέταρτο σενάριο προσομοίωσης, στο οποίο η κατανομή είναι μεταβαλλόμενη, αλλά κατά μεγάλα χρονικά διαστήματα είναι στατική με τον χρόνο. Σύμφωνα με την πραγματική κατανομή που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό το σενάριο, η εμφάνιση των χρηστών ακολουθεί μεταβαλλόμενη κατανομή με τον χρόνο κατά τη διάρκεια της άφιξης της δεύτερης, της τρίτης, της τέταρτης, της πέμπτης και της έκτης χιλιάδας χρηστών, ενώ ακολουθεί στατική κατανομή με τον χρόνο κατά την άφιξη της πρώτης χιλιάδας χρηστών καθώς και στους τελευταίους 4000 χρήστες. Για να υλοποιηθεί το συγκεκριμένο σενάριο για τον διδιάστατο χώρο S χρησιμοποιείται και πάλι η συνάρτηση

κανονικής κατανομής έντασης
$$\lambda(x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}} * e^{-\frac{((x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2)}{2\sigma^2}},$$
 όπου το

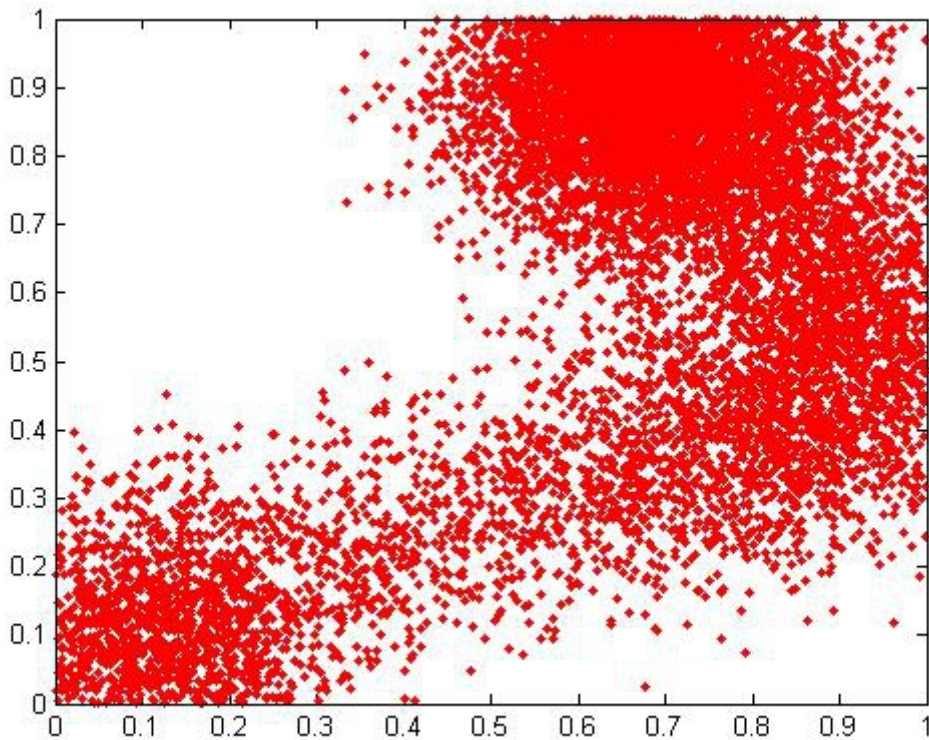
$(x_0(t), y_0(t))$ είναι το κέντρο της κατανομής και το σ είναι η διακύμανση της συνάρτησης κατανομής. Στην προηγούμενη εφαρμογή της συγκεκριμένης κατανομής στο δεύτερο σενάριο, το κέντρο της συνεχώς μεταβαλλόταν με εξαίρεση το χρονικό διάστημα της άφιξης της 3ης χιλιάδας. Αυτή τη φορά το κέντρο θα παραμένει σε ένα σημείο του χώρου S για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, κατά το οποίο η κατανομή των χρηστών είναι στατική, δηλαδή στην πρώτη, έβδομη, όγδοη, ένατη και δέκατη χιλιάδα χρηστών, και θα μετακινείται όταν η κατανομή γίνεται μεταβλητή με τον χρόνο, δηλαδή στη δεύτερη, τρίτη, τέταρτη, πέμπτη και έκτη χιλιάδα χρηστών. Με τον ορισμό της συγκεκριμένης πραγματικής κατανομής, το σύστημα καλείται να αλλάξει το μέγεθος του δείγματος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ανάλογα με το αν η κατανομή είναι μεταβαλλόμενη ή στατική. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται οι αχρείαστες ανακατανομές πόρων σε περίπτωση που το δείγμα είναι 170 χρήστες και η πραγματική κατανομή στατική και επίσης αποφεύγεται το μεγάλο βάθος αναζήτησης που θα προκύψει σε περίπτωση αραιού ελέγχου (για δείγμα 370 χρηστών) και μεταβαλλόμενης κατανομής. Στο Σχ. 6.26 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον

οποίο μετακινείται το (x_0, y_0) κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της προσομοίωσης.



Σχήμα 6.26: Μετακίνηση του κέντρου της κανονικής κατανομής χρηστών, (x_0, y_0) , κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης.

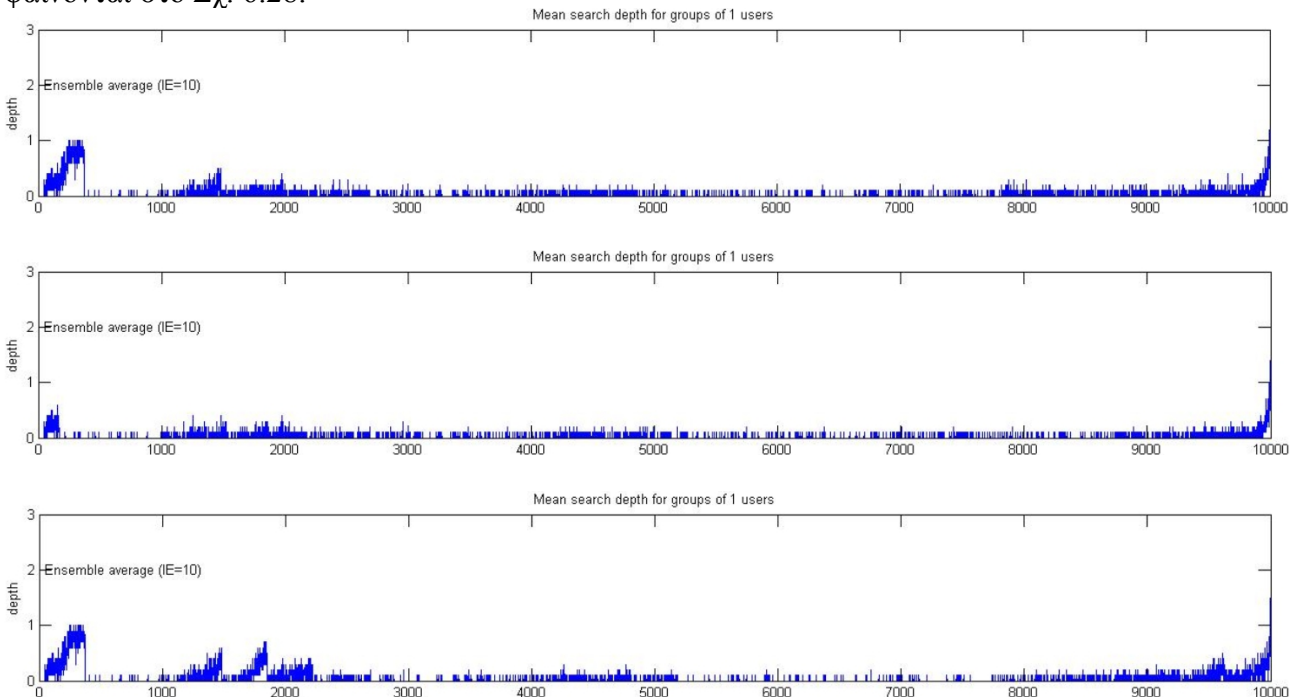
Τα βέλη στο Σχ. 6.26 δείχνουν την κατεύθυνση προς την οποία κινείται το κέντρο της κατανομής των χρηστών καθώς περνά ο χρόνος. Με βάση τα ανωτέρω, οι χρήστες του τέταρτου σεναρίου της προσομοίωσης κατανέμονται στον χώρο S με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχ. 6.27.



Σχήμα 6.27: Προσομοίωση θέσεων των $N_{users} = 10000$ χρηστών με βάση τη συνάρτηση κανονικής

κατανομής έντασης $\lambda_{real}(x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}} * e^{-\frac{((x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2)}{2\sigma^2}}$.

Αρχικά γίνεται εκτέλεση των τριών εκδοχών του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων (με μεταβλητό και σταθερό μέγεθος δείγματος 170/370 χρηστών) με μέγιστο αποδεκτό βάθος αναζήτησης $depthmax=5$, προκειμένου να μελετηθούν τα επίπεδα του μέσου βάθους αναζήτησης. Τα αποτελέσματα από την εκτέλεση 10 υλοποιήσεων του τέταρτου σεναρίου φαίνονται στο Σχ. 6.28.



Σχήμα 6.28: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη στο τέταρτο σενάριο προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή με μεγάλα χρονικά διαστήματα που είναι στατική) με μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πάνω διάγραμμα) και με σταθερό μέγεθος δείγματος 170 χρηστών (μεσαίο διάγραμμα) και 370 χρηστών (κάτω διάγραμμα).

Όπως φαίνεται από το πάνω διάγραμμα του Σχ. 6.28, ο αλγόριθμος με μεταβλητό μέγεθος δείγματος επιτυγχάνει χαμηλά επίπεδα μέσου βάθους αναζήτησης κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Αρχικά, η τιμή του μέσου βάθους αναζήτησης είναι αυξανόμενη και φθάνει τη μονάδα, αλλά όταν σχηματίζεται το πρώτο δείγμα των 370 χρηστών, το σύστημα αντιλαμβάνεται την απόκλιση μεταξύ της πραγματικής και της χρησιμοποιούμενης κατανομής και κάνει ανακατανομή πόρων με αποτέλεσμα το μέσο βάθος αναζήτησης να πηγαίνει κατευθείαν κοντά στο 0. Η τιμή του μέσου βάθους παραμένει κοντά στο 0 μέχρι την άφιξη των 1000 πρώτων χρηστών, καθώς η κατανομή είναι στατική και δεν υπάρχουν έντονες μεταβολές. Στη συνέχεια, η κατανομή των χρηστών αρχίζει να μεταβάλλεται με τον χρόνο και κατά συνέπεια η τιμή του μέσου βάθους αναζήτησης αυξάνεται, αλλά δεν ξεπερνά την τιμή 0.5 σε κανέναν χρήστη κατά τη διάρκεια της μεταβολής. Το σύστημα αντιλαμβάνεται ότι η κατανομή είναι μεταβαλλόμενη στον χρήστη 1480, όπως θα φανεί και στον πίνακα 6.3, και μειώνει το μέγεθος του δείγματος σε 170. Ως αποτέλεσμα, το μέσο βάθος αναζήτησης πέφτει μετά την άφιξη του συγκεκριμένου χρήστη και παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια της εμφάνισης χρηστών με μεταβαλλόμενη κατανομή. Κατά την άφιξη της έβδομης χιλιάδας, η κατανομή ξαναγίνεται στατική με τον χρόνο και το σύστημα επαναφέρει το μέγεθος του δείγματος στους 370 χρήστες. Στο πάνω διάγραμμα του Σχ. 6.28 φαίνεται ότι οι αυξήσεις των τιμών του μέσου βάθους κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης γίνονται στα χρονικά διαστήματα που η κατανομή μεταβάλλεται με τον χρόνο, δηλαδή κατά τη

διάρκεια άφιξης της δεύτερης, τρίτης, τέταρτης, πέμπτης και έκτης χιλιάδας. Με εξαίρεση την μεταβολή κατά τη διάρκεια άφιξης της δεύτερης χιλιάδας, το μέσο βάθος δεν φθάνει σε καμιά περίπτωση μεταβαλλόμενης κατανομής την τιμή 0.5. Στην τελευταία χιλιάδα χρηστών το μέσο βάθος αναζήτησης έχει τιμή μεγαλύτερη ή ίση του 1 μόνο στον 9997ο, στον 9998ο και 10000ο χρήστη με τιμές 1.2, 1.1 και 1.3 αντίστοιχα.

Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων του Σχ. 6.28 εξάγεται το συμπέρασμα ότι το μέσο βάθος αναζήτησης του αλγορίθμου με μεταβλητό μέγεθος δείγματος προσεγγίζει το μέσο όρο του μέσου βάθους αναζήτησης που προκύπτει από τους αλγόριθμους με σταθερό μέγεθος δείγματος 170 και 370 χρηστών. Συγκεκριμένα, όσον αφορά το μέσο βάθος του αλγορίθμου σταθερού μεγέθους δείγματος 370 χρηστών, παρατηρούνται πιο αυξημένες τιμές του μέσου βάθους κατά τη διάρκεια των μεταβολών σε σύγκριση με το μέσο βάθος του αλγορίθμου μεταβλητού μεγέθους δείγματος. Αυτό οφείλεται στο ότι χρειάζεται συχνότερος έλεγχος των αποκλίσεων, δηλαδή μικρότερο μέγεθος δείγματος, σε εκείνες τις χρονικές περιόδους. Ο αλγόριθμος με μεταβλητό μέγεθος δείγματος ελέγχει αν υπάρχει μεταβαλλόμενη κατανομή χρηστών και μικραίνει το δείγμα αν χρειαστεί, ενώ ο αλγόριθμος με σταθερό δείγμα 370 χρηστών συνεχίζει να ελέγχει αραιά την κατανομή με αποτέλεσμα να μην προσαρμόζεται αρκετά γρήγορα και να προκύπτουν σημαντικές αποκλίσεις. Από την άλλη πλευρά, το μέσο βάθος με μεταβλητό μέγεθος δείγματος είναι λίγο πιο μεγάλο κατά τις περιόδους στατικής κατανομής που ακολουθούν μετά από μεταβαλλόμενη κατανομή. Ο λόγος που δεν συμπεριφέρεται με την ίδια απόδοση είναι επειδή το δίκτυο έχει ήδη μικρύνει το δείγμα σε 170 χρήστες για να ανταποκριθεί στη μεταβολή που έγινε προηγουμένως και δεν αντιλαμβάνεται αμέσως ότι η κατανομή είναι πλέον στατική, προκειμένου να αρχίσει να ελέγχει πιο αραιά την κατανομή. Στον αλγόριθμο με σταθερό μέγεθος δείγματος ίσο με 170 χρήστες, το μέσο βάθος αναζήτησης στους πρώτους 370 χρήστες είναι πιο μικρό αφού αντιλαμβάνεται πιο νωρίς την απόκλιση από τη αναμενόμενη κατανομή. Κατά τη χρονική διάρκεια της πρώτης μεγάλης μετατόπισης της κατανομής, έχει χαμηλότερες τιμές σε σχέση με το μέσο βάθος του αλγορίθμου μεταβλητού μεγέθους, καθώς προσαρμόζεται πιο γρήγορα στις αλλαγές. Στον υπόλοιπο χρόνο της προσομοίωσης έχουν παρόμοια συμπεριφορά.

Στον πίνακα 6.3 παρουσιάζονται οι ανακατανομές των πόρων στους ισχυρούς κόμβους, οι οποίες έγιναν κατά τη διάρκεια της πρώτης υλοποίησης του τέταρτου σεναρίου με μεταβλητό μέγεθος δείγματος.

Πίνακας 6.3: Τιμές της μέγιστης διαφοράς μεταξύ της αναμενόμενης και της εμπειρικής κατανομής κίνησης και συνολικές ανακατανομές για την πρώτη υλοποίηση του τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης άφιξης χρηστών με μεταβλητό μέγεθος δείγματος.

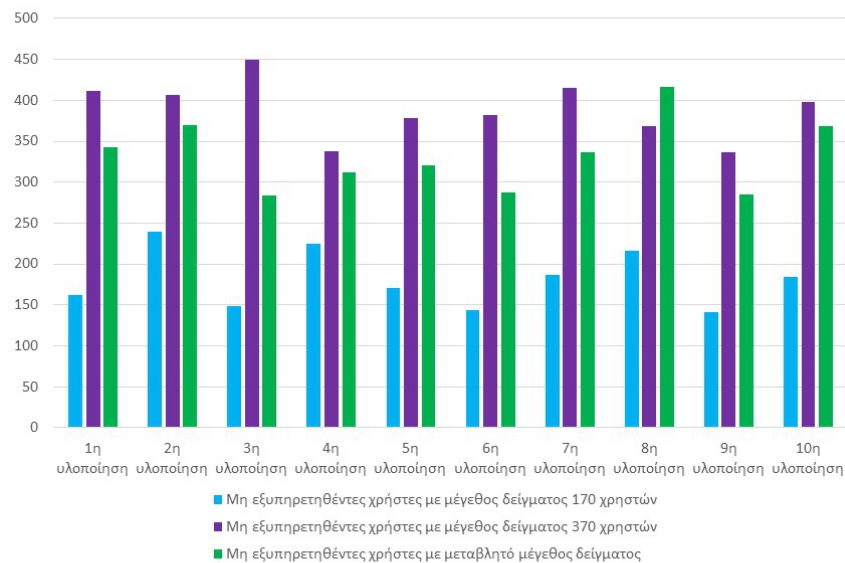
iensemble=1	
i=370 / D=0.30073 / Resource reallocation	i=5900 / D=0.041176
i=740 / D=0.024324	i=6070 / D=0.041176
i=1110 / D=0.027027	i=6440 / D=0.091097 / Resource reallocation
i=1480 / D=0.20541 / Resource reallocation	i=6610 / D=0.032273
i=1650 / D=0.17917 / Resource reallocation	i=6780 / D=0.033863
i=1820 / D=0.15882 / Resource reallocation	i=7150 / D=0.037838
i=1990 / D=0.17647 / Resource reallocation	i=7520 / D=0.048649
i=2160 / D=0.13529 / Resource reallocation	i=7890 / D=0.021622
i=2330 / D=0.094118 / Resource reallocation	i=8260 / D=0.021622
i=2500 / D=0.070588	i=8630 / D=0.02973
i=2670 / D=0.12353 / Resource reallocation	i=9000 / D=0.040541
i=2840 / D=0.070588	i=9370 / D=0.037838
i=3010 / D=0.14706 / Resource reallocation	i=9740 / D=0.037838
i=3180 / D=0.070588	
i=3350 / D=0.076471 / Resource reallocation	i=9740 / D_static=0.018943 / Resource reallocation for better approximation of real distribution
i=3520 / D=0.15882 / Resource reallocation	
i=3690 / D=0.12353 / Resource reallocation	
i=3860 / D=0.12353 / Resource reallocation	
i=4030 / D=0.088235 / Resource reallocation	
i=4200 / D=0.17647 / Resource reallocation	
i=4370 / D=0.10588 / Resource reallocation	
i=4540 / D=0.094118 / Resource reallocation	
i=4710 / D=0.13529 / Resource reallocation	
i=4880 / D=0.12941 / Resource reallocation	
i=5050 / D=0.13529 / Resource reallocation	
i=5220 / D=0.047059	
i=5390 / D=0.058824	
i=5560 / D=0.094118 / Resource reallocation	
i=5730 / D=0.076471 / Resource reallocation	

Όπως είναι αναμενόμενο, ο sBS κάνει ανακατανομή πόρων όταν σχηματιστεί το πρώτο δείγμα 370 χρηστών, αφού η πραγματική κατανομή είναι διαφορετική από την αναμενόμενη. Η πραγματική κατανομή χρηστών είναι στατική για τους πρώτους 1000 χρήστες με αποτέλεσμα ο sBS να μην κάνει άλλες ανακατανομές πόρων για τα άλλα δύο δείγματα της πρώτης χιλιάδας και επιπλέον το μέγεθος δείγματος παραμένει ίσο με 370 χρήστες. Στη συνέχεια, μετά τους 1000 χρήστες, η κατανομή γίνεται μεταβαλλόμενη με τον χρόνο. Το δίκτυο αντιλαμβάνεται αυτήν την αλλαγή κατά την άφιξη του 1480ου χρήστη, οπότε και ελέγχει το δείγμα, κάνει ανακατανομή και παράλληλα μειώνει το μέγεθος του δείγματος σε 170 χρήστες για να παρακολουθεί με μεγαλύτερη συχνότητα τη μεταβολή. Η απόκλιση μεταξύ της εμπειρικής και χρησιμοποιούμενης κατανομής,

D , διατηρείται σε υψηλές τιμές καθ' όλη τη διάρκεια της μεταβολής και για αυτόν τον λόγο το μέγεθος δείγματος παραμένει ίσο με 170 χρήστες. Μετά τους 6000 πρώτους χρήστες η κατανομή γίνεται στατική, αλλά το σύστημα συνεχίζει να βρίσκει μεγάλες αποκλίσεις και κρατάει το δείγμα ίσο με 170 χρήστες μέχρι τον 6780ο χρήστη, οπότε και διαπιστώνει ότι η κατανομή είναι στατική και αυξάνει το μέγεθος δείγματος σε 370 χρήστες. Η τιμή της D παραμένει μικρή, αφού η κατανομή είναι στατική και έτσι το σύστημα διατηρεί το μέγεθος δείγματος στους 370 χρήστες μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Οι υπόλοιπες υλοποιήσεις του τέταρτου σεναρίου έχουν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά τον αριθμό και τις χρονικές στιγμές των ανακατανομών. Σε όλες τις υλοποιήσεις, το σύστημα μειώνει το μέγεθος δείγματος στους 170 χρήστες το αργότερο μετά την άφιξη του 1480ου χρήστη. Η βασική διαφορά που έχουν μεταξύ τους είναι ότι σε κάποιες υλοποιήσεις το σύστημα καθυστερεί πιο πολύ να διαπιστώσει ότι η κατανομή είναι στατική μετά την άφιξη των 6000 χρηστών. Αυτό οφείλεται στο ότι τα δείγματα των 170 χρηστών μπορούν να εμφανίσουν μη αμελητέες αποκλίσεις ακόμα και σε στατική κατανομή, κάτι το οποίο παρατηρήθηκε και στην εφαρμογή σταθερού μεγέθους δείγματος 170 χρηστών στο δεύτερο

σενάριο προσομοίωσης με στατική κατανομή. Επιπροσθέτως, η συνθήκη αύξησης του μεγέθους δείγματος χρηστών είναι αυστηρή, καθώς απαιτεί σε δύο διαδοχικά δείγματα των 170 χρηστών να είναι η D σε χαμηλά επίπεδα, ώστε να επιβεβαιώσει το σύστημα ότι η κατανομή είναι στατική. Χάρη στην αυστηρότητα αυτής της συνθήκης, όμως, το σύστημα αντιμετωπίζει επιτυχώς πολλές περιπτώσεις όπου ο ρυθμός μιας μεταβολής πέφτει σε χαμηλά επίπεδα για μικρό χρονικό διάστημα προτού αρχίσει να αυξάνεται απότομα.

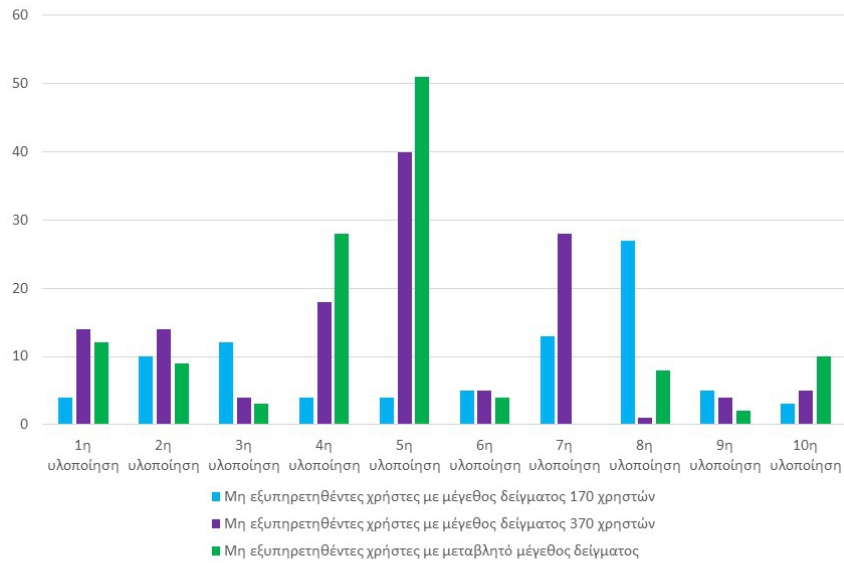
Οι μη εξυπηρετηθέντες χρήστες του δικτύου για τις τρεις εκδοχές του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων σε περίπτωση που δεν επιτραπεί δυνατότητα αναζήτησης πόρων ($depthmax=0$) για τις 10 υλοποιήσεις του τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης παρουσιάζονται στο Σχ. 6.29.



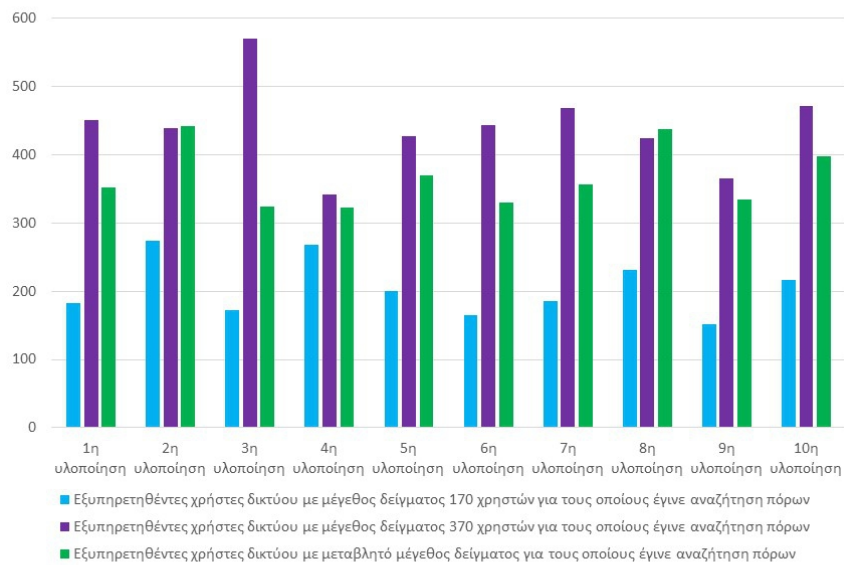
Σχήμα 6.29: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=50$) του τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή με μεγάλα χρονικά διαστήματα που είναι στατική) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και $depthmax = 0$.

Στις 10 υλοποιήσεις του τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης χωρίς δυνατότητα αναζήτησης πόρων το δίκτυο με μεταβλητό μέγεθος δείγματος επιτυγχάνει 96.676% βαθμό εξυπηρέτησης χρηστών. Το δίκτυο με σταθερό μέγεθος δείγματος 170 και 370 χρηστών επιτυγχάνει 98.182% και 96.115% αντίστοιχα. Συνεπώς, στο τέταρτο σενάριο, όπου, με βάση τον αλγόριθμο μεταβλητού δείγματος, το δίκτυο αναγκάζεται να αλλάξει το μέγεθος δείγματος δύο φορές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, οι αποκλίσεις από τον αλγόριθμο σταθερού μεγέθους όσον αφορά τον βαθμό εξυπηρέτησης δεν είναι πολύ μεγάλες.

Εκτελώντας τις τρεις εκδοχές του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων στο τέταρτο σενάριο προσομοίωσης, δίνοντας στο δίκτυο τη δυνατότητα ενός βήματος αναζήτησης πόρων, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στα Σχ. 6.30 και 6.31.



Σχήμα 6.30: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=50$) του τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και $depthmax=1$.



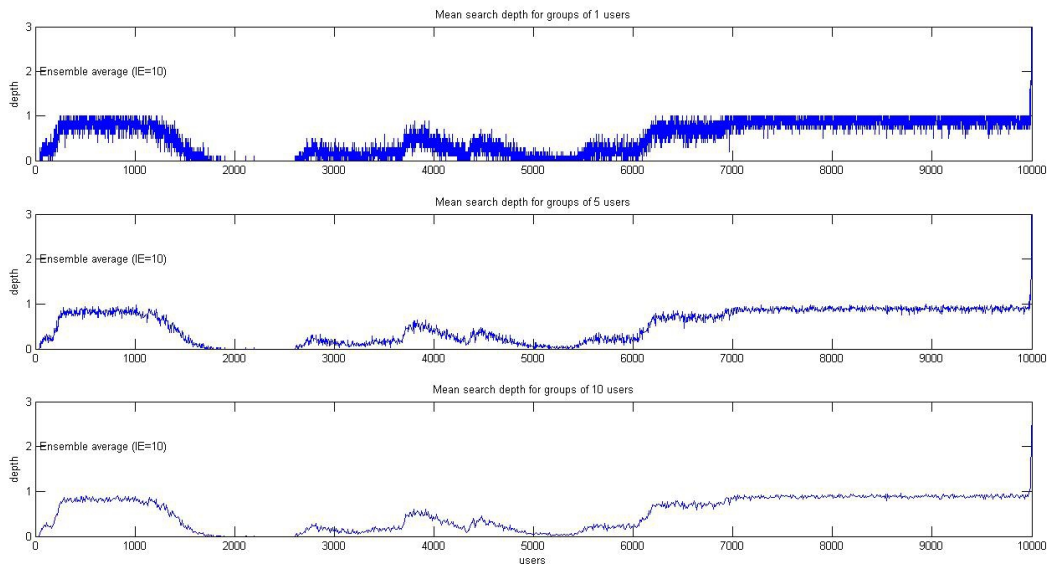
Σχήμα 6.31: Εξυπηρετηθέντες χρήστες για την εξυπηρέτηση των οποίων έγινε αναζήτηση πόρων σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednum=35$) του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης (χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες), μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και $depthmax=1$.

Κατά τη διάρκεια των 10 υλοποιήσεων του τέταρτου σεναρίου με $depthmax = 1$, στην εκδοχή του αλγόριθμου με μεταβλητό μέγεθος δείγματος, το δίκτυο έχει βαθμό εξυπηρέτησης ίσο με 99.873% και κάνει αναζήτηση πόρων στο 3.67% των περιπτώσεων των εξυπηρετηθέντων χρηστών. Στην εκδοχή του αλγόριθμου με σταθερό μέγεθος δείγματος ίσο με 170 χρήστες, το δίκτυο έχει βαθμό εξυπηρέτησης ίσο με 99.913% και κάνει αναζήτηση πόρων στο 2.05% των περιπτώσεων των εξυπηρετηθέντων χρηστών. Η εκδοχή του αλγόριθμου με σταθερό μέγεθος δείγματος ίσο με 370 χρήστες έχει τη χειρότερη απόδοση από τις 3 εκδοχές στο τέταρτο σενάριο, καθώς, παρά το γεγονός ότι έχει κι αυτή υψηλό βαθμό εξυπηρέτησης (99.867%), αναγκάζεται να κάνει αναζήτηση πόρων σε περισσότερες περιπτώσεις εξυπηρετηθέντων χρηστών (στο 4.4% των περιπτώσεων).

Το σύστημα με μεταβλητό μέγεθος δείγματος, λοιπόν, καταφέρνει την ίδια σχεδόν απόδοση με το σύστημα σταθερού μεγέθους δείγματος στην περίπτωση κατανομής που είναι μεταβαλλόμενη με τον χρόνο, αλλά και στατική σε μεγάλα χρονικά διαστήματα. Λαμβάνοντας υπόψη την καλύτερη συμπεριφορά του αλγορίθμου σε κατανομές που είναι ή μεταβαλλόμενες ή στατικές μόνο σε σύγκριση με το να επιλεγεί τυχαία ένα σταθερό μέγεθος δείγματος, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το μεταβλητό μέγεθος δείγματος δίνει ευελιξία στο σύστημα, διατηρώντας την απόδοσή του σε υψηλά επίπεδα.

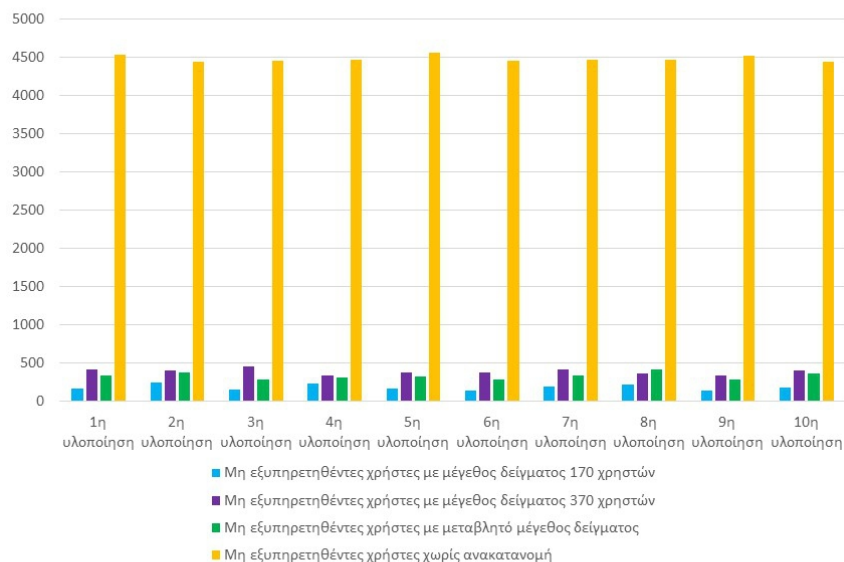
Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι η απόδοση του αλγόριθμου μεταβλητού μεγέθους δείγματος εξαρτάται σε ένα βαθμό και από τον ρυθμό μεταβολής της πραγματικής κατανομής χρηστών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Για παράδειγμα, υπάρχει η περίπτωση στην οποία ο χαμηλός ρυθμός μεταβολής μιας κατανομής σε μια χρονική περίοδο επιτρέπει στο δίκτυο να ελέγχει πιο αραιά την πραγματική κατανομή χρηστών και στη συνέχεια ξεκινάει μια έντονη αύξηση του ρυθμού μεταβολής της κατανομής. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την μειωμένη απόδοση του συστήματος στους χρήστες που θα αφιχθούν στην αρχή της εντονότερης μεταβολής. Επιπλέον, υπάρχει η περίπτωση μια αρχικά στατική κατανομή χρηστών να αρχίσει να μεταβάλλεται με τον χρόνο κατά την άφιξη των τελευταίων χρηστών ενός δείγματος 370 χρηστών. Το δίκτυο δεν θα μπορέσει να ανιχνεύσει αυτήν τη μεταβολή και δεν θα μειώσει το μέγεθος δείγματος χρηστών. Θα χρειαστεί να μεσολαβήσει ο σχηματισμός του επόμενου δείγματος 370 χρηστών, κατά το χρονικό διάστημα άφιξης του οποίου η απόδοση λειτουργίας θα είναι χαμηλότερη, για να αντιληφθεί το δίκτυο την μεταβλητότητα της κατανομής και να μειώσει το μέγεθος δείγματος στους 170 χρήστες. Η συγκεκριμένη περίπτωση είναι εμφανής στο τέταρτο σενάριο προσομοίωσης, στο οποίο αρχίζει έντονη μεταβολή της κατανομής με τον χρόνο κατά την άφιξη της δεύτερης χιλιάδας χρηστών. Το δίκτυο δεν αντιλαμβάνεται αυτή τη μεταβλητότητα της κατανομής στο πρώτο δείγμα που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της άφιξης της δεύτερης χιλιάδας, επειδή περιλαμβάνει μόνο τους πρώτους 110 χρήστες της δεύτερης χιλιάδας. Το δίκτυο αντιλαμβάνεται ότι η κατανομή είναι μεταβαλλόμενη στο επόμενο δείγμα χρηστών, το οποίο ελέγχει μετά την άφιξη του 1480ου χρήστη, οπότε και μειώνει το μέγεθος δείγματος για να προσαρμοστεί καλύτερα στη μεταβολή. Συνεπώς, ένας αστάθμητος παράγοντας για την απόδοση του συστήματος είναι οι συνθήκες κατά τις οποίες εμφανίζεται μια έντονη μεταβολή της κατανομής χρηστών, όσον αφορά το πόσο συχνά κάνει το δίκτυο ελέγχους εκείνη την χρονική περίοδο και σε ποιο σημείο (στην αρχή ή στο τέλος) του δείγματος χρηστών αρχίζει να εμφανίζεται η μεταβολή. Παρ' όλα αυτά, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα εφαρμογής μεταβλητού μεγέθους δείγματος στο τέταρτο σενάριο προσομοίωσης, τα επίπεδα απόδοσης του δικτύου (βάθος αναζήτησης, βαθμός εξυπηρέτησης) παραμένουν υψηλά δεδομένων αυτών των περιπτώσεων.

Στη συνέχεια γίνεται εκτέλεση του αλγορίθμου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής στο τέταρτο σενάριο προσομοίωσης. Το μέσο βάθος αναζήτησης που προκύπτει κατά τις 10 υλοποιήσεις φαίνεται στο Σχ. 6.32.



Σχήμα 6.32: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις (*seednumber*=50) του τέταρτου σεναρίου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.

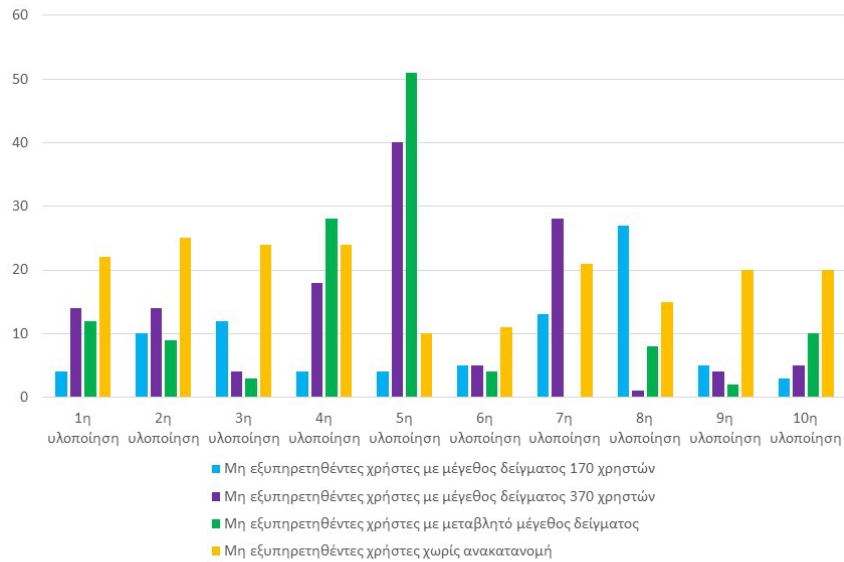
Όπως και στα προηγούμενα δύο σενάρια, το μέσο βάθος αναζήτησης του αλγόριθμου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής προκύπτει σημαντικά μεγαλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο μέσο βάθος αναζήτησης του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής. Παραμένει κοντά στη μονάδα για το μεγαλύτερο διάστημα της προσομοίωσης και εμφανίζει μειωμένες τιμές μόνο στις χρονικές περιόδους όπου η εμφάνιση χρηστών είναι σε περιοχές με πλεόνασμα πόρων. Οι συνολικοί μη εξυπηρετηθέντες χρήστες του αλγόριθμου χωρίς ανακατανομή καθώς και των τριών εκδοχών του αλγόριθμου ανακατανομής στο τέταρτο σενάριο προσομοίωσης εμφανίζεται στο Σχ. 6.33.



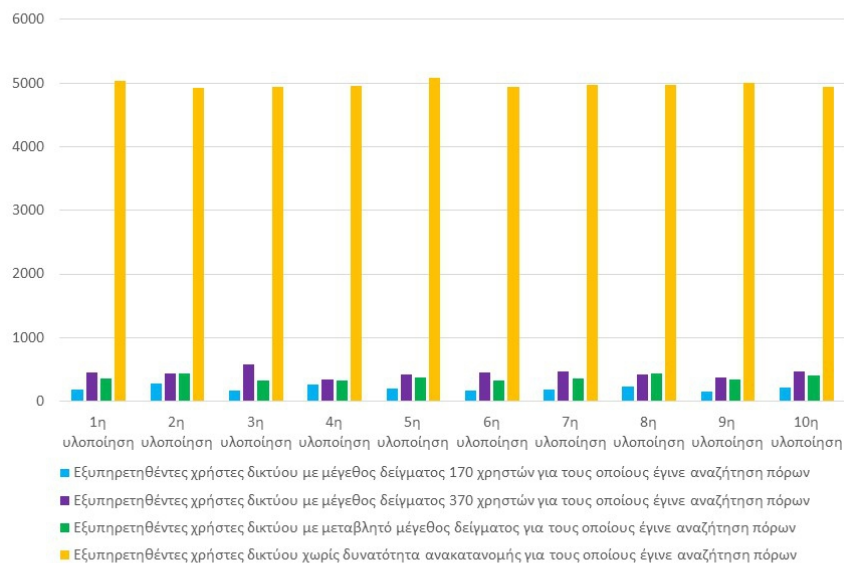
Σχήμα 6.33: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (*seednumber*=50) του τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170

(γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες) ή μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και χωρίς δυνατότητα ανακατανομής (κίτρινες στήλες) και $depthmax = 0$.

Το δίκτυο χωρίς δυνατότητα ανακατανομής έχει βαθμό εξυπηρέτησης χρηστών ίσο με 55.129% που είναι πολύ χαμηλότερος σε σύγκριση με τα επίπεδα βαθμού εξυπηρέτησης (97-98%) που επιτυγχάνει το δίκτυο με τις τρεις εκδοχές του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής.



Σχήμα 6.34: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=50$) του τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες) ή μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και χωρίς δυνατότητα ανακατανομής (κίτρινες στήλες) και $depthmax = 1$.



Σχήμα 6.35: Εξυπηρετηθέντες χρήστες για την εξυπηρέτηση των οποίων έγινε αναζήτηση πόρων σε

καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις (*seednumber=50*) του τέταρτου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα ανακατανομής, σταθερό μέγεθος δείγματος 170 (γαλάζιες στήλες) και 370 χρηστών (μωβ στήλες) ή μεταβλητό μέγεθος δείγματος (πράσινες στήλες) και χωρίς δυνατότητα ανακατανομής (κίτρινες στήλες) και *depthmax =1*.

Κατά τη διάρκεια των 10 υλοποιήσεων του τέταρτου σεναρίου με *depthmax =1*, στην εκδοχή του αλγόριθμου χωρίς δυνατότητα ανακατανομής πόρων, το δίκτυο εξυπηρετεί το 99.808% των χρηστών, αλλά χρειάζεται να κάνει αναζήτηση πόρων στο 49.781% των περιπτώσεων των εξυπηρετηθέντων χρηστών προκειμένου να επιτύχει τέτοιο βαθμό εξυπηρέτησης. Αντίθετα, το δίκτυο με δυνατότητα ανακατανομής πέτυχε τα ίδια επίπεδα εξυπηρέτησης (άνω του 99%) κάνοντας πολύ λιγότερες αναζητήσεις πόρων (στο 3%-4% των εξυπηρετηθέντων χρηστών) και στις τρεις εκδοχές του αλγόριθμου με δυνατότητα ανακατανομής.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν στα τέσσερα σενάρια προσομοίωσης, τα οποία μελετήθηκαν στο 5ο και στο 6ο κεφάλαιο, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Ο αλγόριθμος με δυνατότητα ανακατανομής επιτυγχάνει σημαντικά καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τον αλγόριθμο χωρίς δυνατότητα ανακατανομής, όταν η πραγματική κατανομή χρηστών είναι διαφορετική της αρχικής ή μεταβάλλεται με τον χρόνο. Το σύστημα που, αν χρειαστεί, ανακατανέμει τους πόρους του κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης επιτυγχάνει μέσο βάθος αναζήτησης κοντά στο 0 για τη μεγαλύτερη διάρκεια των προσομοιώσεων των σεναρίων που μελετήθηκαν. Επιπλέον, ως αποτέλεσμα αυτού, εάν δεν δίνεται στο δίκτυο δυνατότητα αναζήτησης, η δυνατότητα ανακατανομής πόρων βοηθά το σύστημα να ανταπεξέλθει διατηρώντας υψηλά επίπεδα βαθμού εξυπηρέτησης (96-99%) σε περιπτώσεις όπου εάν βασιζόταν αποκλειστικά στην αρχική εκτίμηση της πραγματικής κατανομής, θα είχε πολύ χειρότερα αποτελέσματα (50-60% βαθμός εξυπηρέτησης). Σε περίπτωση που δίνεται στο δίκτυο η δυνατότητα ενός βήματος αναζήτησης, τότε ο βαθμός εξυπηρέτησης του δικτύου με δυνατότητα ανακατανομής έχει υψηλότερες τιμές από 99% και επιτυγχάνει αυτόν τον βαθμό εξυπηρέτησης κάνοντας πολύ λίγες αναζητήσεις πόρων (μόλις στο 3%-4% των περιπτώσεων). Αντίθετα, όταν δεν υπάρχει δυνατότητα ανακατανομής πόρων, το δίκτυο θα πρέπει να κάνει πολύ πιο συχνά αναζήτηση πόρων (περίπου στο 40%- 50% των περιπτώσεων) για να επιτύχει αυτόν τον βαθμό εξυπηρέτησης και κατ' επέκταση καθυστερεί πολύ περισσότερο για να εξυπηρετήσει τους χρήστες.
- Η εφαρμογή μεταβλητού μεγέθους δείγματος χρηστών στον αλγόριθμο ανακατανομής δίνει στο σύστημα τη δυνατότητα να έχει τα ίδια επίπεδα απόδοσης με την περίπτωση όπου είναι γνωστή η χρονική συμπεριφορά της κατανομής και εφαρμόζεται αναλόγως το κατάλληλο μέγεθος δείγματος. Επίσης πετυχαίνει τα ίδια υψηλά επίπεδα απόδοσης ακόμα και σε περιπτώσεις κατανομών που σε μερικά χρονικά διαστήματα είναι μεταβαλλόμενες και σε μερικά είναι στατικές με τον χρόνο.

Κεφάλαιο 7

Διαφοροποίηση των υπηρεσιών που προσφέρει το δίκτυο (Service Differentiation)

7.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα δύο κεφάλαια αναφέρθηκε ως A ο αριθμός πόρων που ζητεί ο κάθε χρήστης από το δίκτυο. Στην πραγματικότητα, όμως, το A δεν είναι το ίδιο για κάθε χρήστη, καθώς κάθε χρήστης ζητεί διαφορετική υπηρεσία, η οποία απαιτεί διαφορετικό αριθμό πόρων. Για παράδειγμα, αν ο χρήστης θέλει να κατεβάσει ένα βίντεο υψηλής ποιότητας, θα χρειαστεί περισσότερους πόρους σε σύγκριση με την περίπτωση όπου θέλει να κατεβάσει ένα μικρό αρχείο κειμένου ή να επισκεφτεί μια ιστοσελίδα. Συνεπώς, πρέπει να υπάρξει μια υποδιαίρεση των διαφόρων τύπων υπηρεσιών προκειμένου η προσομοίωση της κατανομής πόρων στους χρήστες να προσεγγίζει ένα πραγματικό δίκτυο, όπου κάθε χρήστης έχει διαφορετικές απαιτήσεις.

7.2 Ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, διαφοροποίηση υπηρεσιών και αντιστοίχιση ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων στους προσφερόμενους πόρους

7.2.1 Διαφοροποίηση τύπου υπηρεσιών ανάλογα με την ταχύτητα μετάδοσης

Ο τύπος της υπηρεσίας χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων (bits/sec) που απαιτείται προκειμένου να ολοκληρωθεί η υπηρεσία. Συγκεκριμένα, σε κάθε τύπο υπηρεσίας υπάρχει απαίτηση συγκεκριμένης ελάχιστης ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, προκειμένου να παρέχεται η απαραίτητη ποιότητα (Quality of Service- QoS). Τα επίπεδα ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων μιας υπηρεσίας εξαρτώνται από τον αριθμό των τηλεπικοινωνιακών πόρων που έχουν δοθεί για την εκτέλεσή της.

Ένας χρήστης, όταν χρησιμοποιεί το Internet, λαμβάνει δεδομένα από τον ιστό και αποστέλλει δεδομένα σε αυτόν. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της διαδικασίας είναι το video conference. Ο χρήστης λαμβάνει δεδομένα από το κανάλι downlink για να λάβει την εικόνα και τον ήχο του συνομιλητή του και αποστέλλει δεδομένα μέσω του καναλιού uplink για να λάβει ο συνομιλητής την εικόνα και τον ήχο του χρήστη. Το κατέβασμα δεδομένων από τον ιστό είναι υπηρεσία downstream και το ανέβασμα δεδομένων στον ιστό είναι υπηρεσία upstream. Ακολούθως, δίνονται τιμές ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων που αφορούν υπηρεσίες downstream και upstream.

Πίνακας 7.1: Ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που απαιτούνται για υπηρεσίες upstream-downstream.

General web surfing, email, social media	1 Mbps
Online gaming	1-3 Mbps
Video conferencing	1-4 Mbps
Standard-definition video streaming	3-4 Mbps
High-definition video streaming	5-8 Mbps
Augmented Reality	5-10 Mbps

Στον πίνακα 7.1 φαίνεται η προαναφερθείσα διαφοροποίηση στις απαιτήσεις κάθε υπηρεσίας. Το κατέβασμα ενός βίντεο απαιτεί μεγαλύτερη ταχύτητα και συνεπώς περισσότερους

πόρους σε σύγκριση με την αναζήτηση στον ιστό. Αυτό δείχνει ότι δεν είναι αποδοτικό να δοθεί ο ίδιος αριθμός πόρων για όλες τις υπηρεσίες, καθώς σε κάποιες υπηρεσίες δεν θα επαρκούν οι πόροι και σε κάποιες άλλες θα είναι περισσότεροι από αυτούς που χρειάζονται, με αποτέλεσμα την μη αποδοτική αξιοποίηση τους.

Ο αλγόριθμος κατανομής πόρων στους χρήστες πρέπει να έχει κατηγοριοποιημένους τους τύπους υπηρεσιών, ώστε κάθε χρήστης που εμφανίζεται να μπορεί να αντιστοιχιστεί σε κάποιον από αυτούς. Με βάση τον πίνακα 7.1, μπορούν να οριστούν τρεις τύποι υπηρεσιών:

- Τύπου 1: Υπηρεσίες Αναζήτησης στον Ιστό (Ταχύτητα: 1 Mbps)
- Τύπου 2: Υπηρεσίες Λήψης Video (video streaming, τηλεδιάσκεψη κτλ.) (Ταχύτητα : 4 Mbps)
- Τύπου 3: Υπηρεσίες Αυξημένων Απαιτήσεων (απαιτητικές real time εφαρμογές κτλ.) (Ταχύτητα: 10 Mbps)

Οι υπηρεσίες τύπου 3 αναφέρονται σε εφαρμογές που απαιτούν διαρκή παροχή πόρων κατά τη διάρκεια της σύνδεσής τους. Σε αυτήν την κατηγορία real time εφαρμογών εντάσσεται, για παράδειγμα, ένα δίκτυο αισθητήρων, το οποίο απαιτεί συνεχή παροχή πόρων για να στέλνει διαρκώς μετρήσεις στο κέντρο ελέγχου. Επιπλέον, σε αυτή τη κατηγορία υπηρεσιών εντάσσονται εφαρμογές video για AR (augmented reality) και VR (virtual reality). Επειδή όμως οι εφαρμογές VR και AR δεν έχουν αναπτυχθεί σε βαθμό που να χρησιμοποιούνται ευρέως από τους χρήστες δικτύων κινητών τηλεπικοινωνιών και τα δίκτυα αισθητήρων προορίζονται για εξειδικευμένους σκοπούς, οι υπηρεσίες τύπου 3 δεν συναντώνται συνήθως σε ad hoc γεγονότα που χαρακτηρίζονται από μεγάλη συγκέντρωση φυσικών προσώπων (π.χ. συναυλίες). Σε τέτοιες περιπτώσεις οι χρήστες χρησιμοποιούν κατά κόρον τους άλλους δύο τύπους υπηρεσιών (αναζήτηση στον ιστό και λήψη video). Παρ' όλα αυτά, θα χρησιμοποιηθεί και αυτός ο τύπος υπηρεσιών στην προσομοίωση έτσι ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του αλγόριθμου δυναμικής κατανομής πόρων σε όλους τους τύπους υπηρεσιών.

Οι ανωτέρω τρεις τύποι υπηρεσιών βρίσκονται σε πλήρη αντιστοίχιση με τις τρεις κλάσεις συνδέσεων που παρουσιάστηκαν στο 2ο Κεφάλαιο και είχαν ως κριτήριο την ευελιξία της σύνδεσης σε ανακατανομές. Συγκεκριμένα, οι υπηρεσίες τύπου 1 απαιτούν συνδέσεις 3ης κλάσης, αφού αναφέρονται σε υπηρεσίες αναζήτησης στον ιστό που μπορούν να πραγματοποιηθούν με best effort συνδέσεις. Οι υπηρεσίες τύπου 2 απαιτούν συνδέσεις 2ης κλάσης, αφού αφορούν υπηρεσίες λήψης video. Οι υπηρεσίες τύπου 3 απαιτούν συνδέσεις 1ης κλάσης, επειδή αφορούν υπηρεσίες αυξημένων απαιτήσεων και οι συνδέσεις 1ης κλάσης απαιτούν εγγυημένη ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service- QoS) καθ' όλη τη διάρκειά τους.

Για να παρασχεθεί μια υπηρεσία με τα απαιτούμενα επίπεδα ταχύτητας μετάδοσης, γίνεται χρήση κατάλληλου αριθμού πόρων, δηλαδή χρησιμοποιείται συγκεκριμένο τμήμα του φάσματος συχνοτήτων για ορισμένο χρονικό διάστημα πάνω σε ένα ραδιοδίαυλο μεταξύ του τερματικού και του σταθμού βάσης. Για τον λόγο αυτό, πρέπει να υπάρξει αντιστοίχιση της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων με τον αριθμό πόρων που απαιτεί η υπηρεσία, καθώς το σύστημα πρέπει να καταναίμει τον κατάλληλο αριθμό πόρων στους χρήστες, προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιούν υπηρεσίες που έχουν απαίτηση συγκεκριμένων ταχυτήτων. Προκειμένου να γίνει αυτό, στην επόμενη υποενότητα αναλύονται κάποια μεγέθη που είναι απαραίτητα για να ποσοτικοποιηθεί η έννοια του τηλεπικοινωνιακού πόρου.

7.2.2 Δομή πλαισίων μετάδοσης δεδομένων τεχνολογίας LTE

Καταρχάς, διευκρινίζεται ότι το δίκτυο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιεί τεχνολογία 4G/ LTE. Με βάση αυτήν την τεχνολογία ορίζεται στη συνέχεια η αρχιτεκτονική δομή των πλαισίων

δεδομένων (LTE data frame structure), τα οποία ανταλλάσσονται μεταξύ πομπού και δέκτη. Υπάρχουν δύο τεχνικές αμφιδρόμησης (duplex method), οι οποίες αντιστοιχούν σε δύο διακριτούς τύπους πλαισίων, οι οποίοι διαφέρουν ως προς τον τρόπο διαχωρισμού της άνω ζεύξης από την κάτω ζεύξη (downlink, uplink). Αυτές οι δύο τεχνικές είναι οι εξής:

- FDD (Frequency Division Duplexing): Η αμφιδρόμηση πραγματοποιείται με διαχωρισμό των ζεύξεων στο πεδίο συχνοτήτων.
- TDD (Time Division Duplexing): Η αμφιδρόμηση πραγματοποιείται με διαχωρισμό των ζεύξεων στο πεδίο του χρόνου.

[4]

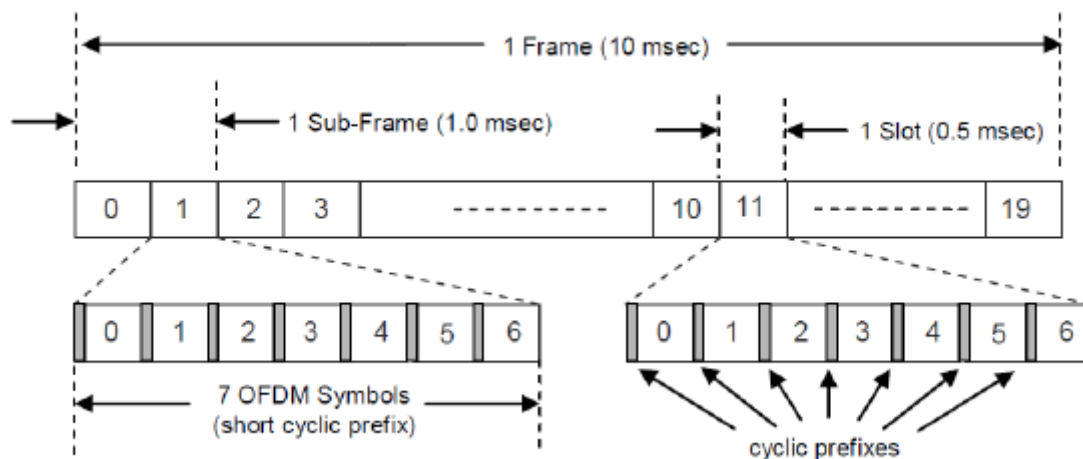
Η τεχνική FDD απαιτεί δύο συμμετρικά τμήματα φάσματος για τα κανάλια άνω ζεύξης και τα κανάλια κάτω ζεύξης. Η τεχνική TDD, αντίθετα, μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις στις οποίες υπάρχει ασυμμετρία μεταξύ της κίνησης των δύο ζεύξεων, οδηγώντας έτσι σε αποδοτικότερη χρησιμοποίηση του φάσματος, καθώς όλο το εύρος συχνοτήτων μπορεί να αποδοθεί δυναμικά με βάση τις εκάστοτε ανάγκες ζήτησης [3]. Από τα προηγούμενα, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η τεχνική TDD αποτελεί την πιο ευέλικτη τεχνική αμφιδρόμησης. Τα περισσότερα συστήματα κινητών επικοινωνιών και τα νεότερα συστήματα 4G/ LTE, όμως, χρησιμοποιούν την τεχνική FDD. Αυτό οφείλεται στο ότι η τεχνική αυτή συμβαδίζει με τον τρόπο που έχει αποδοθεί το φάσμα συχνοτήτων στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Επιπλέον, η τεχνική TDD απαιτεί ένα πολύ ακριβές σύστημα συγχρονισμού τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη για να βεβαιωθεί ότι οι χρονοσχισμές (υποδιαίρεση του πλαισίου δεδομένων, εξηγούνται στη συνέχεια της ενότητας) δεν επικαλύπτονται και δεν παρεμβάλλονται μεταξύ τους με οποιοδήποτε τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται αναβάθμιση των υποδομών του δικτύου, η οποία δεν έχει εφαρμοστεί ευρέως και κατά συνέπεια η τεχνική FDD είναι πιο συμβατή με τα σύγχρονα δίκτυα. Για τον λόγο αυτό, επιλέγεται η τεχνική FDD στην παρούσα εργασία.

[18]

Στο πεδίο του χρόνου οι πόροι απονέμονται ανά 1 msec, το οποίο θεωρείται ως ελάχιστη μονάδα χρονοπρογραμματισμού (minimum scheduling unit). Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του πλαισίου 4G/ LTE, το πλαίσιο χωρίζεται σε χρονοσχισμές (slots), καθεμιά από τις οποίες έχει διάρκεια 0.5 msec. Δύο χρονοσχισμές συνιστούν ένα υποπλαίσιο (subframe), το οποίο έχει διάρκεια 1 msec. Το πλαίσιο έχει συνολική διάρκεια 10 msec και διαιρείται σε 10 υποπλαίσια. Τα σύμβολα που αποστέλλονται κατά τη διάρκεια μιας χρονοσχισμής έχουν υποστεί ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Αυτή η τεχνική πολυπλεξίας χωρίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε επιμέρους φέροντα με φασματική απόσταση 15 kHz. Με την OFDM επιτυγχάνεται υψηλή φασματική απόδοση, καθώς κάθε κυψέλη μεταφέρει διαφορετικά υποφέροντα σε διαφορετικούς χρήστες και η ορθογωνιότητα μεταξύ των υποφερόντων περιορίζει σημαντικά την ενδοκυψελική παρεμβολή αυξάνοντας έτσι το ρυθμό μετάδοσης [3]. Με βάση την τεχνική αυτή λοιπόν, το διαθέσιμο εύρος ζώνης διαιρείται σε υποδιαύλους (subchannels) που απέχουν 15kHz μεταξύ τους και έκαστος αυτών περιέχει 12 υποφέροντα (subcarriers). Υποθέτοντας χρήση κανονικού κυκλικού προθέματος (normal Cyclic Prefix-CP), κάθε slot περιέχει τιμές 7 OFDM συμβόλων. Κάθε χρονοσχισμή περιέχει ένα Resource Block (RB), το οποίο, όπως έχει προαναφερθεί, είναι η μικρότερη μονάδα πόρου που μπορεί να αποδοθεί σε ένα χρήστη. Σε ένα πλαίσιο, δηλαδή, περιέχονται 20 RBs, καθένα εκ των οποίων έχει διάρκεια 0.5 msec και στο πεδίο της συχνότητας αποτελείται από 12 υποφέροντα (subcarriers). Εφόσον το κάθε υποφέρον είναι εύρους 15 kHz, το 1 RB διαθέτει εύρος ζώνης ίσο με:

$$W = 12 * 15 \text{ kHz} = 180 \text{ kHz} \quad (7.1)$$

[19]

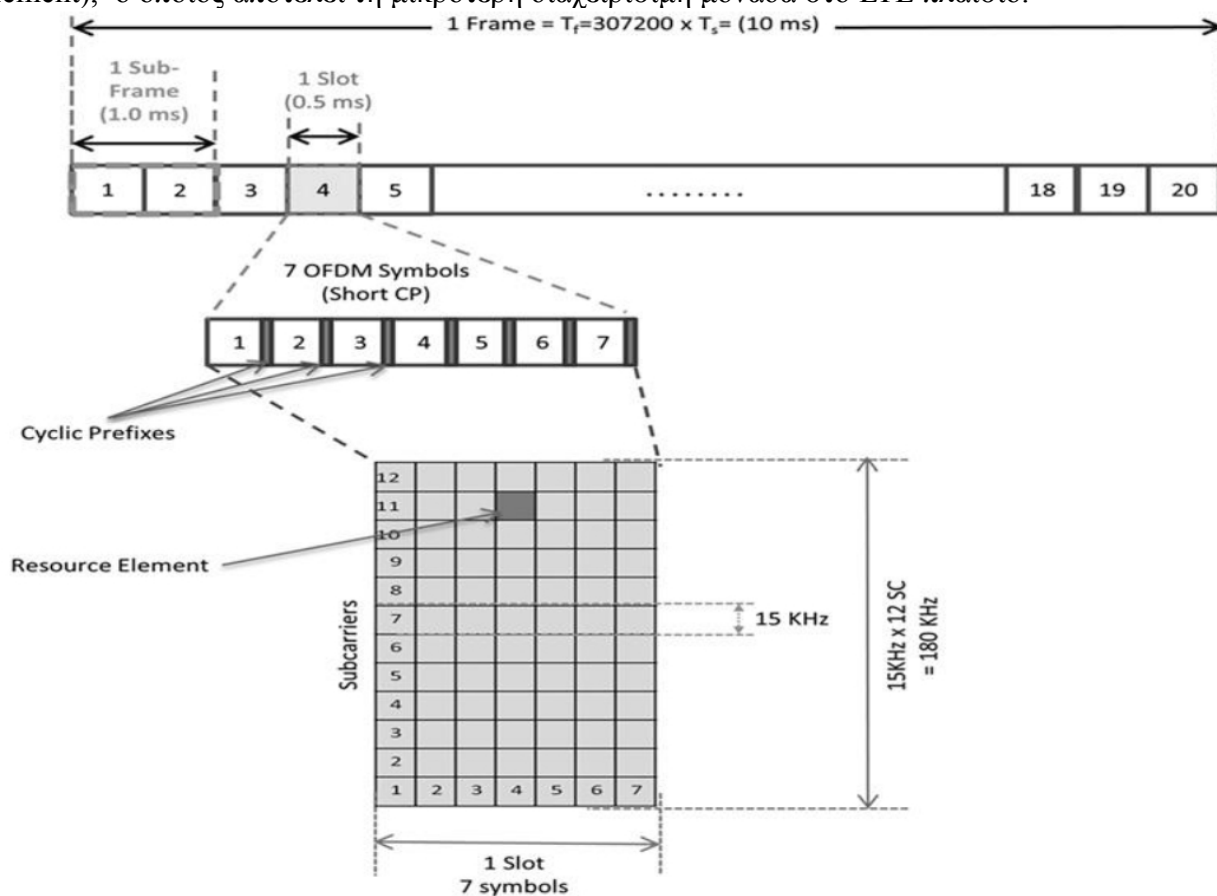


Σχήμα 7.1: Δομή πλαισίου στο LTE (LTE frame structure)

Κάθε RB αποτελείται από 12 υποφέροντα, έκαστο των οποίων περιέχει 7 OFDM σύμβολα. Επομένως ο συνολικός αριθμός των OFDM συμβόλων σε ένα RB ισούται με:

$$12 \text{ subcarriers / RB} * 7 \text{ OFDM symbols / subcarrier} = 84 \text{ OFDM symbols / RB} \quad (7.2)$$

Στο Σχ. 7.2 παρουσιάζεται το πλέγμα πόρων (resource grid) για την καθοδική ζεύξη του LTE, το οποίο αποτελείται από 84 τετράγωνα με OFDM σύμβολα. Κάθε τετράγωνο στο πλέγμα αντιστοιχεί σε ένα υποφέρον για διάρκεια ενός συμβόλου και ονομάζεται στοιχειώδης πόρος (RE- Resource Element), ο οποίος αποτελεί τη μικρότερη διαχειρίσιμη μονάδα στο LTE πλαίσιο.



Σχήμα 7.2: Πλέγμα ραδιοπόρων LTE (LTE resource grid).

Το φυσικό στρώμα σε ένα σταθμό βάσης τεχνολογίας LTE, eNodeB, αναλαμβάνει την προστασία της πληροφορίας, ώστε να μην αλλοιωθεί από λάθη που οφείλονται στις συνθήκες μετάδοσης. Η προστασία αυτή επιτυγχάνεται με την τεχνική της προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Adaptive Modulation and Coding- AMC) [3]. Τα σχήματα διαμόρφωσης καθορίζουν τον αριθμό των ψηφίων (bits) που αποτελούν ένα σύμβολο μεταφερούμενης πληροφορίας. Τα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται για την καθοδική όσο και για την ανοδική ζεύξη στην τεχνολογία 4G/ LTE είναι τα εξής:

- QPSK/4QAM: 2 bits/symbol
- 16QAM: 4bits/ symbol
- 64QAM: 6 bits/symbol

Εφόσον το κάθε RB έχει 84 σύμβολα, τότε το 4QAM αντιστοιχεί σε $2 \text{ bits/symbol} * 84 \text{ symbols/RB} = 168 \text{ bits/RB}$, το 16QAM σε 336 bits/RB και το 64QAM σε 504 bits/RB.

Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιούνται όλες οι χρονοσχισμές του πλαισίου δεδομένων για την εξυπηρέτηση του χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι παρέχονται από το δίκτυο και τα 20 RBs του κάθε πλαισίου. Με δεδομένα τα προηγούμενα, οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης που προκύπτουν για τα 3 σχήματα διαμόρφωσης είναι οι εξής:

$$\bullet \text{ QPSK/4QAM: } R = \frac{168 \text{ bits/RB} * 20 \text{ RBs/frame}}{10 \text{ ms/frame}} = 336 \text{ kbps} \quad (7.3.1)$$

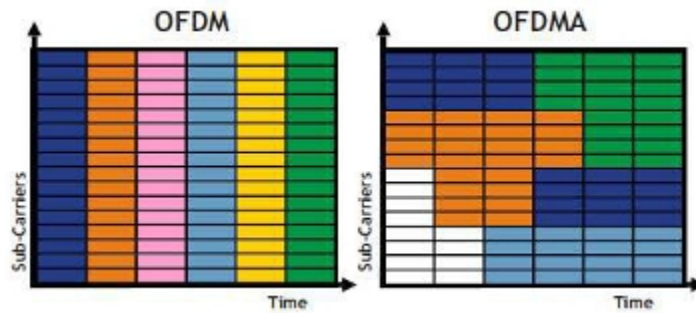
$$\bullet \text{ 16QAM: } R = \frac{336 \text{ bits/RB} * 20 \text{ RBs/frame}}{10 \text{ ms/frame}} = 672 \text{ kbps} \quad (7.3.2)$$

$$\bullet \text{ 64QAM: } R = \frac{504 \text{ bits/RB} * 20 \text{ RBs/frame}}{10 \text{ ms/frame}} = 1.008 \text{ Mbps} \quad (7.3.3)$$

Οι ανωτέρω ρυθμοί μετάδοσης είναι οι μέγιστοι που μπορούν να δοθούν από το δίκτυο για κάθε σχήμα διαμόρφωσης και με εύρος ζώνης ίσο με 180 kHz με βάση τη σχέση (7.1). Στην LTE υπάρχουν προτυποποιημένα διαθέσιμα κανάλια με συγκεκριμένο εύρος ζώνης, το οποίο αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο αριθμό RBs από τα οποία αποτελούνται [4].

7.2.3 Υπολογισμός απαιτούμενων πόρων για συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης υπηρεσίας

Στην προηγούμενη υποενότητα έγινε αναφορά στην τεχνική πολυπλεξίας OFDM, η οποία χωρίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε επιμέρους φέροντα. Η τεχνική αυτή παρέχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης αποστολής πολλών συμβόλων χρησιμοποιώντας διαφορετικό τμήμα φάσματος για την αποστολή κάθε συμβόλου. Η τεχνική πολυπλεξίας OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) αποτελεί βελτιωμένη εκδοχή της τεχνικής OFDM, καθώς επιτυγχάνει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών. Συγκεκριμένα, εφαρμόζει την τεχνική OFDM διαιρώντας τη διαθέσιμη ζώνη συχνοτήτων του φάσματος σε επιμέρους φέροντα και την επεκτείνει για την εξυπηρέτηση πολλών χρηστών με το να χρησιμοποιεί τα διαφορετικά φέροντα για την εξυπηρέτηση διαφορετικών χρηστών. Δηλαδή, η διαφορά μεταξύ της OFDM και της OFDMA έγκειται στο ότι η τεχνική OFDM δεσμεύει ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων για μια χρονοσχισμή για την εξυπηρέτηση ενός μόνο χρήστη, ενώ η τεχνική OFDMA μοιράζει το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων σε διαφορετικούς χρήστες κατά τη διάρκεια μιας χρονοσχισμής. Αυτή η διαφορά είναι εμφανής στο Σχ. 7.3.



Σχήμα 7.3: Υλοποίηση της τεχνικής πολυπλεξίας OFDM (αριστερά) και OFDMA (δεξιά).

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 προτυποποιημένα διαθέσιμα κανάλια του LTE, μπορούν να δοθούν σε διαφορετικούς χρήστες.

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 10 msec. Συνεπώς, ο ρυθμός μετάδοσης για χρήστη με ένα RB είναι ένα ποσοστό του συνολικού ρυθμού μετάδοσης που υπολογίστηκε προηγουμένως στις σχέσεις (7.3). Συγκεκριμένα, ο ρυθμός μετάδοσης ανά RB μπορεί να υπολογιστεί αν διαιρεθεί ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης με τον αριθμό των RBs. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις εξισώσεις (7.4.1) έως (7.4.3) ακολούθως.

- QPSK/4QAM: $\frac{R}{\text{Number of RBs}} = \frac{336 \text{ kbps}}{20 \text{ RBs}} = 16.8 \text{ kbps/RB}$ (7.4.1)

- 16QAM: $\frac{672 \text{ kbps}}{20 \text{ RBs}} = 33.6 \text{ kbps/RB}$ (7.4.2)

- 64QAM: $\frac{1.008 \text{ Mbps}}{20 \text{ RBs}} = 50.4 \text{ kbps/RB}$ (7.4.3)

Συνεπώς, τα ανωτέρω αποτελέσματα αντιστοιχούν στην ελάχιστη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων που μπορεί να έχει ένας χρήστης, έχοντας μόνο ένα RB για πόρο. Η αύξηση των Resource Blocks συνεπάγεται μεγαλύτερη προσφορά πόρων σε κάθε πλαίσιο και κατ' επέκταση μεγαλύτερη ταχύτητα. Η σχέση της ταχύτητας μετάδοσης με τον αριθμό των RBs είναι γραμμική:

$\text{Transmission Rate/user} = G * (\text{Number of RBs/user})$, όπου το $G = R/\text{Number of RBs}$ προσδιορίστηκε στις σχέσεις (7.4) για το κάθε σχήμα διαμόρφωσης.

Με βάση τα προηγούμενα, οι απαιτούμενοι πόροι (ο απαιτούμενος αριθμός RBs που χρειάζονται για να επιτευχθεί η ζητούμενη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων για μια υπηρεσία δίνεται από την εξής σχέση:

$$N_{\text{Απαιτούμενων RB}} = \frac{\text{Transmission rate}}{G} \quad (7.5)$$

Ένα ποσοστό των απαιτούμενων RBs χρησιμοποιείται για μετάδοσης ωφέλιμης πληροφορίας και τα υπόλοιπα RBs χρησιμοποιούνται για λειτουργίες που αφορούν τον έλεγχο και τη διόρθωση λαθών μετάδοσης (κωδικοποίηση: εισαγωγή διορθωτικών ψηφίων στην μεταδιδόμενη πληροφορία). Για τον λόγο αυτόν, ο ρυθμός μετάδοσης της ωφέλιμης πληροφορίας είναι περίπου το 75% του συνολικού ρυθμού μετάδοσης, συνεπώς ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης της ωφέλιμης πληροφορίας είναι περίπου το 75% του συνολικού μέγιστου ρυθμού μετάδοσης, δηλαδή:

$$R_{\omega\phi\epsilon\lambda\mu\omicron\varsigma} = 0.75 * R \quad (7.6)$$

Ο ωφέλιμος ρυθμός μετάδοσης είναι αυτός που γίνεται αντιληπτός από τον χρήστη.

Συνεπώς, επιλέγοντας ως σχήμα διαμόρφωσης το QPSK/4QAM, από τις σχέσεις (7.4), (7.5) και (7.6) προκύπτει η εξής αντιστοίχιση ταχυτήτων μετάδοσης και απαιτούμενων πόρων:

Υπηρεσίες τύπου 1: Για $Transmissionrate_{\omega\phi\epsilon\lambda\mu\omicron\varsigma} = 1 Mbps$ απαιτούνται $N_{\text{Απαιτούμενων RB}} = 80 RBs$

Υπηρεσίες τύπου 2: Για $Transmissionrate_{\omega\phi\epsilon\lambda\mu\omicron\varsigma} = 4 Mbps$ απαιτούνται $N_{\text{Απαιτούμενων RB}} = 318 RBs$ (Στην προσομοίωση τίθεται ίσο με 320 RBs για ευκολία στα νούμερα)

Υπηρεσίες τύπου 3: Για $Transmissionrate_{\omega\phi\epsilon\lambda\mu\omicron\varsigma} = 10 Mbps$ απαιτούνται $N_{\text{Απαιτούμενων RB}} = 794 RBs$ (Στην προσομοίωση τίθεται ίσο με 800 RBs για ευκολία στα νούμερα)

[4]

7.3 Σχεδίαση και εκτέλεση του αλγόριθμου κατανομής πόρων με διαφοροποίηση υπηρεσιών

Στην προσομοίωση, θα χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος τυχαίας επιλογής τύπου υπηρεσίας για κάθε νεοεισερχόμενο χρήστη με βάση προδιαγεγραμμένες πιθανότητες εμφάνισης του κάθε τύπου υπηρεσίας. Λαμβάνοντας υπόψη τις τάσεις των χρηστών, η υπηρεσία τύπου 1 (αναζήτηση στον Ιστό) θα έχει P1=50% πιθανότητα να επιλεγεί, η υπηρεσία τύπου 2 (κατέβασμα Video) θα έχει P2=40% πιθανότητα και η υπηρεσία τύπου 3 (αυξημένες απαιτήσεις) θα έχει P3=10% πιθανότητα. Με δεδομένη την αντιστοίχιση ταχύτητας και πόρων που εξηγήθηκε προηγουμένως, στην υπηρεσία τύπου 1 δίνονται 80 RBs, στην υπηρεσία τύπου 2 δίνονται 320 RBs και στην υπηρεσία τύπου 3 δίνονται 800 RBs. Για κάθε εμφανιζόμενο χρήστη, ο αλγόριθμος κατανομής πόρων στους χρήστες θα καλεί τη συνάρτηση fdice, η οποία με βάση τις προδιαγεγραμμένες πιθανότητες θα επιλέγει τον τύπο υπηρεσίας και θα επιστρέφει ως τιμή τον αριθμό πόρων που απαιτεί ο χρήστης. Ο κώδικας MATLAB που ακολουθεί είναι η συνάρτηση fdice:

```
function y = fdice
```

```
global p1 p2 A
```

```
% 3-number dice with unequal probabilities p1, p2, p3
```

```
A=80;
```

```
p1=0.5;
```

```
p2=0.4;
```

```
p3=1-p1-p2;
```

```
aux=rand;
```

```
if aux < p1
```

```
    y=A;
```

```
elseif aux >=p1 & aux < p1+p2
```

```
    y=4*A;
```

```
else
```

```
    y=10*A;
```

```
end
```

Επεξήγηση: Η συνάρτηση fdice θεωρεί μια ομοιόμορφη κατανομή rand στο διάστημα [0,1], το

οποίο χωρίζεται σε τρία υποδιαστήματα $[0, p_1]$, $[p_1, p_1 + p_2]$, $[p_1 + p_2, 1]$. Η πιθανότητα του πρώτου διαστήματος είναι p_1 , του δεύτερου $(p_1 + p_2) - p_1 = p_2$ και του τρίτου $1 - (p_1 + p_2) = p_3$. Η περιοχή $[0, p_1]$ αντιστοιχεί στην πιθανότητα η υπηρεσία να είναι τύπου 1 και για αυτό η πιθανότητα p_1 ισούται με 0.5, καθώς υπάρχει 50% πιθανότητα να ζητηθεί η υπηρεσία 1 από τον χρήστη. Ομοίως, η περιοχή $[p_1, p_1 + p_2]$ αντιστοιχεί στην πιθανότητα η υπηρεσία να είναι τύπου 2 και η περιοχή $[p_1 + p_2, 1]$ αντιστοιχεί στη πιθανότητα η υπηρεσία να είναι τύπου 3.

Δεδομένης αυτής της αλλαγής που επιτελέστηκε στο σύστημα προσομοίωσης με το να διαφοροποιηθούν οι υπηρεσίες σε τρεις τάξεις, πρέπει να αλλάξει και η ποσότητα των συνολικών διαθέσιμων πόρων που έχει αρχικά ο SBS. Στο κεφάλαιο 4 ο αριθμός χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει το σύστημα προσδιορίστηκε από την διαίρεση των συνολικών διαθέσιμων πόρων του δικτύου με τον αριθμό πόρων, A , που ζητούσε ο κάθε χρήστης. Με βάση αυτό, εάν οι συνολικοί πόροι ήταν $N = 800000 \text{ RBs}$ και οι ζητούμενοι πόροι ανά χρήστη ήταν $A = 80 \text{ RBs}$, τότε οι συνολικοί χρήστες που θα μπορούσε να εξυπηρετήσει το σύστημα είναι $N/A = 10000$. Εφόσον στη συγκεκριμένη εκδοχή του αλγόριθμου υπάρχει διαφοροποίηση στους απαιτούμενους πόρους ανά χρήστη, ο κάθε χρήστης μπορεί πλέον να ζητήσει παραπάνω από A πόρους, συνεπώς καθίσταται πολύ πιθανό τα 800000 RBs να μην επαρκούν για 10000 χρήστες. Με βάση τις πιθανότητες επιλογής καθεμιάς από τις τρεις υπηρεσίες που προαναφέρθηκαν, ο κάθε χρήστης θα λάβει περίπου $0.5 * A + 0.4 * 4A + 0.1 * 10A$ πόρους. Συνεπώς, ο SBS πρέπει να μοιράσει αρχικά

$$N = N_{users} * (0.5 * A + 0.4 * 4A + 0.1 * 10A) = 10000 * (0.5 * 80 + 0.4 * 320 + 0.1 * 800) = 2480000 \text{ RBs}$$

στους ισχυρούς κόμβους προκειμένου να μπορεί προσεγγιστικά να καλύψει τις ανάγκες 10000 χρηστών.

Με την ενσωμάτωση του αλγόριθμου επιλογής τύπου υπηρεσίας στον αλγόριθμο κατανομής πόρων με δυνατότητα ανακατανομής και την κατάλληλη αλλαγή της ποσότητας των συνολικών πόρων του συστήματος ($N = 2480000 \text{ RBs}$) δημιουργείται ένα πιο ρεαλιστικό περιβάλλον προσομοίωσης στο οποίο ο κάθε χρήστης έχει διαφορετικές ανάγκες. Αρχικά για την εκτέλεση της προσομοίωσης θα χρησιμοποιηθεί μέγιστο βάθος αναζήτησης, $depthmax$, ίσο με 41 ώστε να μπορεί το σύστημα να ψάξει για πόρους σε όλους τους υπόλοιπους 41 ισχυρούς κόμβους. Με αυτόν τον τρόπο, είναι αδύνατη η περίπτωση να μείνει χωρίς εξυπηρέτηση ένας χρήστης και να υπάρχουν οι απαιτούμενοι πόροι στους υπόλοιπους ισχυρούς κόμβους. Έτσι θα μπορεί να μελετηθεί εάν οι συνολικοί πόροι, N , ήταν αρκετοί για τους 10000 χρήστες. Επιπλέον για τις ακόλουθες προσομοιώσεις θα χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος μεταβλητού μεγέθους δείγματος, όπως ορίστηκε στην ενότητα 6.2.

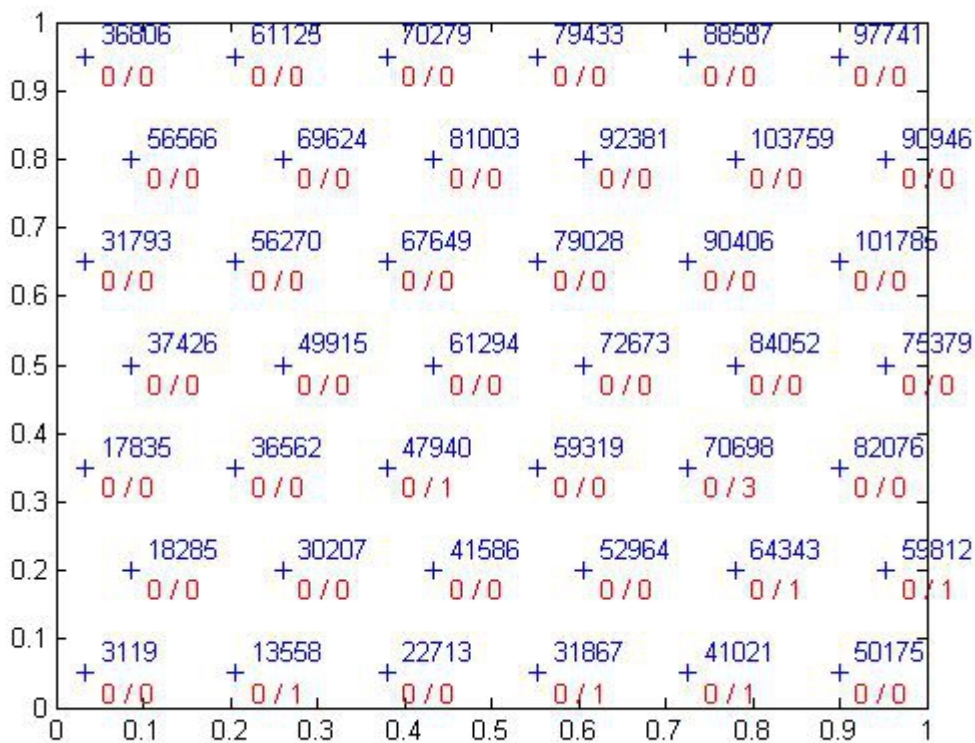
Για τις εκτελέσεις προσομοιώσεων που έγιναν στα προηγούμενα δύο κεφάλαια ορίστηκε ότι δεν λαμβάνεται υπόψη το ενδεχόμενο διακοπής σύνδεσης ενός χρήστη λόγω ανακατανομής. Όπως εξηγήθηκε και στο Κεφάλαιο 2, όμως, κάποιοι τύποι συνδέσεων δεν είναι ευέλικτοι στις ανακατανομές πόρων. Οι υπηρεσίες τύπου 3 χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που λαμβάνουν και στέλνουν διαρκώς δεδομένα. Αυτές οι εφαρμογές λειτουργούν αδιάκοπα για μεγάλα χρονικά διαστήματα μέσα στη μέρα. Οι υπηρεσίες τύπου 3 υλοποιούνται με συνδέσεις 1ης κλάσης. Αυτό σημαίνει ότι εάν κατά τη διάρκεια εξυπηρέτησης των χρηστών που τις χρησιμοποιούν προκύψει μια ανακατανομή πόρων, τότε η σύνδεση με το δίκτυο μπορεί να διακοπεί (connection drop) λόγω ενδεχόμενης αυξομείωσης του διατιθέμενου εύρους συχνοτήτων, με αποτέλεσμα οι χρήστες να μείνουν τελικά χωρίς εξυπηρέτηση και οι πόροι που διατέθηκαν να πάνε χαμένοι. Οι υπηρεσίες τύπου 2 υλοποιούνται με συνδέσεις 2ης κλάσης, οι οποίες, παρά το γεγονός ότι δεν διακόπτονται σε περίπτωση ανακατανομής πόρων, ενδέχεται να παρουσιάσουν χειρότερη ποιότητα, όσον αφορά την λαμβανόμενη εικόνα video που βλέπει ο χρήστης, κατά τη διάρκεια των ανακατανομών. Η ποιότητα λαμβανόμενης εικόνας, όμως, δεν απασχολεί την παρούσα εργασία ως κριτήριο για τη

συνολική ποιότητα εξυπηρέτησης, αφού τα κριτήρια που έχουν τεθεί είναι η καθυστέρηση απόκρισης του δικτύου σε αίτηση παροχής πόρων (βάθος αναζήτησης πόρων) και η ικανότητα εξυπηρέτησης χρηστών (ποσοστό εξυπηρετηθέντων χρηστών). Συνεπώς, με βάση τα δεδομένα αυτά, οι υπηρεσίες τύπου 2 δεν επηρεάζονται από ενδεχόμενη ανακατανομή πόρων. Οι υπηρεσίες τύπου 1 δεν επηρεάζονται ούτε κι αυτές από ενδεχόμενη ανακατανομή πόρων, αφού υλοποιούνται με best effort συνδέσεις. Για την υλοποίηση της προσομοίωσης, λοιπόν, πρέπει να προσδιοριστεί ο βαθμός στον οποίο επηρεάζονται οι υπηρεσίες τύπου 3 από τις ανακατανομές πόρων. Με το σχήμα ανακατανομής που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία υλοποιείται μερική ανακατανομή πόρων, καθώς, όταν χρειαστεί, το δίκτυο ανακατανέμει μόνο τους εναπομείναντες πόρους στους ισχυρούς κόμβους, δηλαδή τους πόρους που δεν έχουν δεσμευτεί για την εξυπηρέτηση κάποιου χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι οι δεσμευμένοι πόροι για την εξυπηρέτηση των χρηστών, των οποίων η άφιξη έχει προηγηθεί της χρονικής στιγμής της ανακατανομής, διατηρούνται στους ισχυρούς κόμβους που παρέχουν υπηρεσίες σε αυτούς τους χρήστες. Με τον αυτόν τον τρόπο, δεν προκύπτει αυξομείωση του διατιθέμενου εύρους συχνοτήτων στις συνδέσεις αυτών των υπηρεσιών κατά τη διάρκεια μιας ανακατανομής, συμπεριλαμβανομένων των υπηρεσιών τύπου 3. Επομένως, κανένας από τους 3 τύπους υπηρεσιών δεν επηρεάζεται από ενδεχόμενη ανακατανομή πόρων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Αρχικά, θα εξεταστεί η συμπεριφορά του αλγόριθμου στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, όπου η πραγματική κατανομή των χρηστών είναι διαφορετική της αναμενόμενης και στατική με τον χρόνο. Η στατική συνάρτηση έντασης κατανομής της πραγματικής κίνησης, λ_{real} , που επιλέγεται για το συγκεκριμένο σενάριο της προσομοίωσης είναι η εξής:

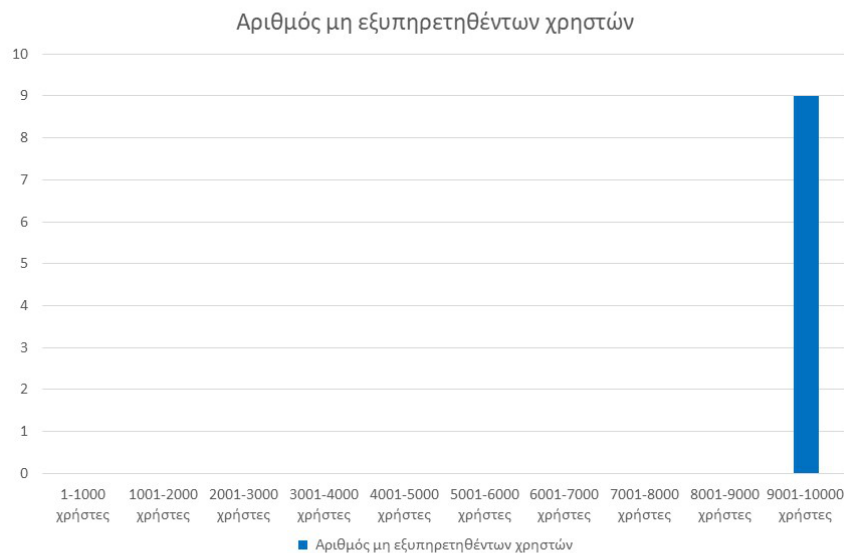
$$\lambda_{real}(x, y) = \sqrt{x} - \sqrt{y}$$

Τρέχοντας την ίδια υλοποίηση άφιξης χρηστών (seednumber=55) του δευτέρου σεναρίου προσομοίωσης του κεφαλαίου 5 με διαφοροποίηση υπηρεσιών και με $depthmax=41$ προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στα Σχ. 7.4 και 7.5.



Σχήμα 7.4: Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του

δεύτερου σεναρίου με διαφοροποίηση υπηρεσιών, με δυνατότητα ανακατανομής πόρων και με $depthmax = 41$. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).

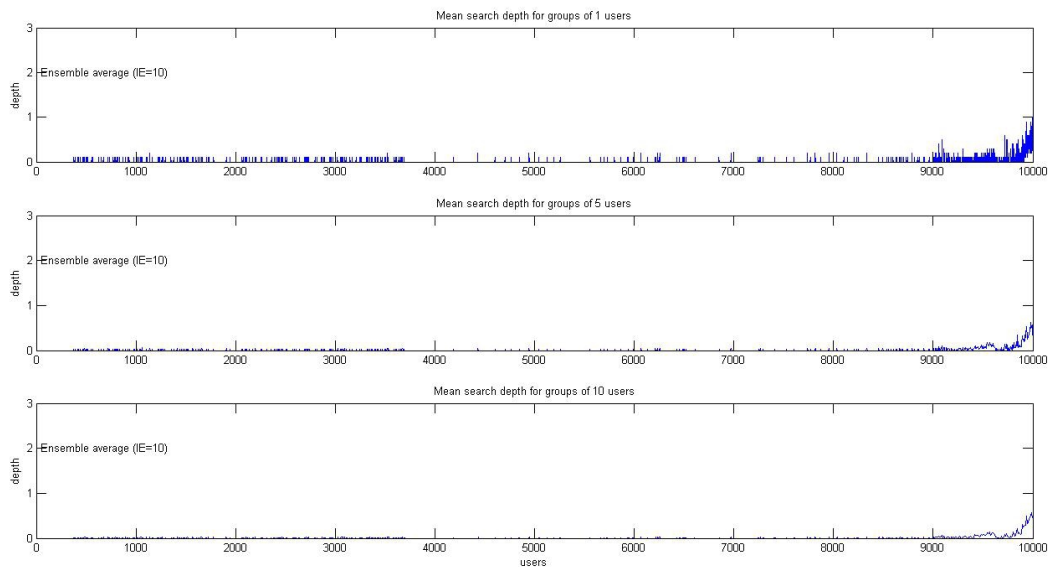


Σχήμα 7.5: Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με διαφοροποίηση υπηρεσιών ανά χρήστη, με δυνατότητα ανακατανομής πόρων και με $depthmax = 41$.

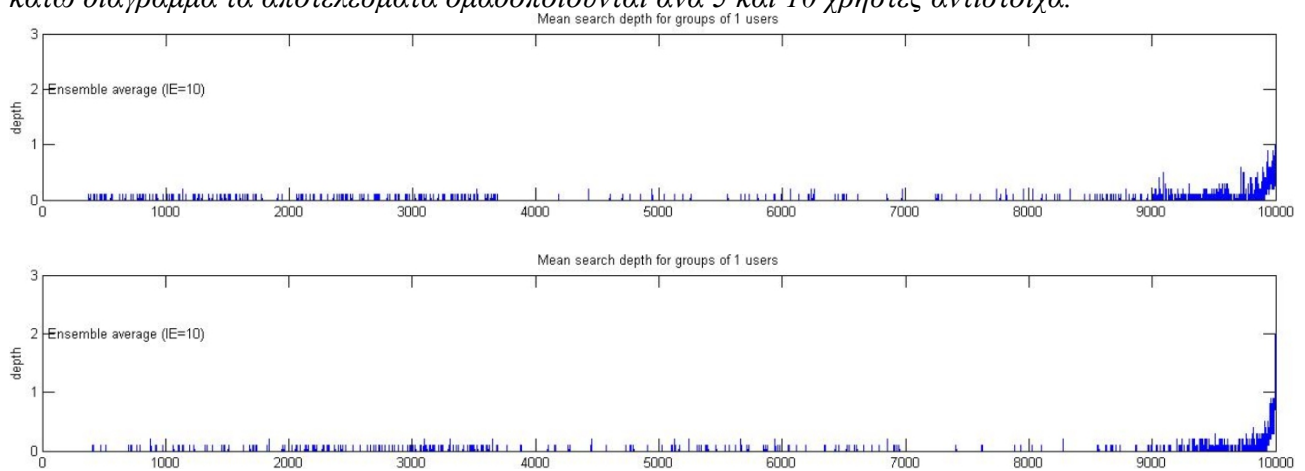
Όπως φαίνεται στα Σχ. 7.4 και 7.5, υπάρχουν συνολικά 9 μη εξυπηρετηθέντες χρήστες μετά το τέλος της πρώτης υλοποίησης του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, οι μη εξυπηρετηθέντες χρήστες είναι ο 9989ος, ο 9991ος, ο 9992ος, ο 9995ος, ο 9996ος, ο 9997ος, ο 9998ος ο 9999ος και ο 10000ος χρήστης. Ο 9989ος χρήστης ζητάει 320 RBs, ενώ οι διαθέσιμοι πόροι του δικτύου είναι 240 RBs και συνεπώς δεν εξυπηρετείται. Έπειτα εμφανίζεται ο 9990ος χρήστης που ζητάει 80 RBs και εξυπηρετείται, αφαιρώντας έτσι 80 RBs από το σύστημα. Ο 9991ος και ο 9992ος χρήστης δεν εξυπηρετούνται επειδή ζητούν 320 RBs έκαστος και το σύστημα έχει διαθέσιμους πόρους 160 RBs. Στη συνέχεια εμφανίζονται ο 9993ος και ο 9994ος χρήστης που ζητούν 80 RBs ο καθένας και εξυπηρετούνται με αποτέλεσμα να μείνουν 0 διαθέσιμοι πόροι στο σύστημα. Ως συνέπεια αυτού, οι τελευταίοι 6 χρήστες δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν. Δηλαδή, παρατηρείται ότι λόγω της διαφοροποίησης των υπηρεσιών ανά χρήστη δεν είναι πλέον σίγουρο ότι οι πόροι είναι αρκετοί για να εξυπηρετηθούν όλοι οι εισερχόμενοι χρήστες, ακόμα κι αν είναι γνωστό το πλήθος τους. Στις υπόλοιπες 9 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου μένουν χωρίς εξυπηρέτηση, κατά σειρά υλοποίησης, 0, 60, 15, 0, 6, 0, 3, 24, 0 χρήστες. Στις τέσσερις υλοποιήσεις, κατά τις οποίες όλοι οι χρήστες εξυπηρετούνται, υπάρχουν αχρησιμοποίητοι πόροι στους ισχυρούς κόμβους. Στη δεύτερη υλοποίηση περισεύουν 4080 RBs, στην πέμπτη 480 RBs, στην έβδομη 31200 RBs και στη δέκατη 3360 RBs. Επομένως, οι εναπομεινάντες πόροι δεν ξεπερνάνε σε καμιά περίπτωση από τις 10 υλοποιήσεις το 1.26% των συνολικών πόρων, οι οποίοι είναι 2480000 RBs. Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι η διαφοροποίηση των υπηρεσιών εισάγει μια ακόμα αστάθμητη παράμετρο στο πρόβλημα κατανομής πόρων, καθώς δεν είναι απόλυτα σίγουρο ότι το 50% των χρηστών θα χρησιμοποιήσει την υπηρεσία τύπου 1, το 40% την υπηρεσία τύπου 2 και το 10% την υπηρεσία τύπου 3. Ασυμπτωτικά αυτό τείνει να ισχύει, αλλά για πεπερασμένο αριθμό χρηστών θα υπάρχουν πάντα κάποιες μικρές αποκλίσεις από αυτά τα

ποσοστά. Αυτές οι μικρές αποκλίσεις οδηγούν σε καταστάσεις όπου οι πόροι δεν φτάνουν και κάποιοι χρήστες προς το τέλος της προσομοίωσης μένουν χωρίς εξυπηρέτηση ή σε καταστάσεις όπου περισσεύουν στους ισχυρούς κόμβους κάποιοι αχρησιμοποίητοι πόροι. Παρ' όλα αυτά το σύστημα παραμένει αποδοτικό καθώς, όπως φάνηκε στις 10 υλοποιήσεις, δεν μένουν πολλοί χρήστες χωρίς εξυπηρέτηση ούτε περισσεύει ανησυχητικά μεγάλο ποσοστό από τους συνολικούς πόρους στο δίκτυο.

Τα αποτελέσματα του μέσου βάθους αναζήτησης κατά την εκτέλεση των δέκα υλοποιήσεων του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης παρουσιάζονται στα Σχ. 7.6 και 7.7.



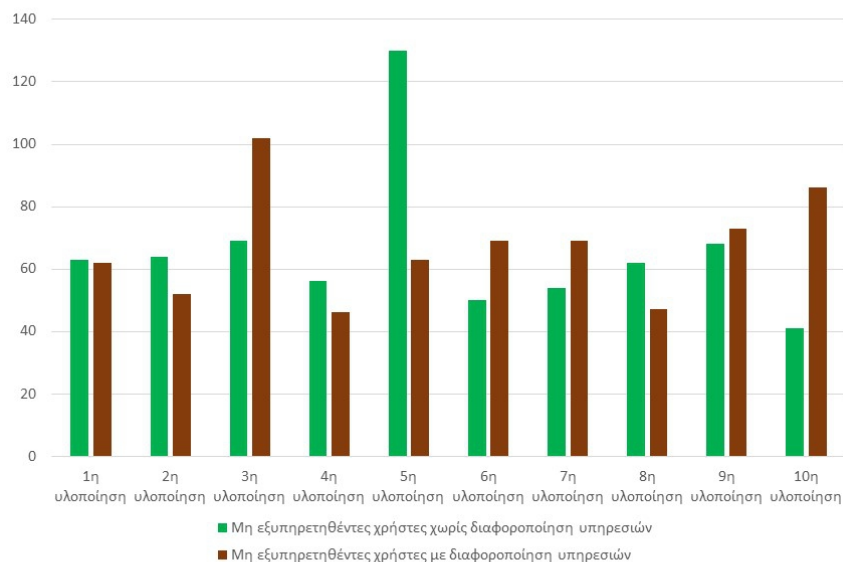
Σχήμα 7.6: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων και με διαφοροποίηση υπηρεσιών. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.



Σχήμα 7.7: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης (στατική κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, με μεταβλητό μέγεθος δείγματος, με (πάνω διάγραμμα) και χωρίς (κάτω διάγραμμα) διαφοροποίηση υπηρεσιών.

Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των δύο διαγραμμάτων του Σχ. 7.7, το μέσο βάθος αναζήτησης του δεύτερου σεναρίου ακολουθεί ίδια συμπεριφορά με την περίπτωση στην οποία οι πόροι ανά χρήστη είναι ίδιοι σε όλους. Συγκεκριμένα, το μέσο βάθος αναζήτησης δεν ξεπερνά σε κανένα χρήστη την τιμή 1 και παραμένει κοντά στο 0 για τη μεγαλύτερη διάρκεια της προσομοίωσης. Δηλαδή, το σύστημα ανακατανομής πόρων μπορεί να λειτουργήσει το ίδιο

αποδοτικά και σε πληθυσμό χρηστών με διαφορετική ανάγκη πόρων ανά χρήστη, αρκεί να ξέρει τις τάσεις των χρηστών όσον αφορά το πόσο συχνά επιλέγουν μια από τις τρεις υπηρεσίες, καθώς και το συνολικό πλήθος τους. Ως αποτέλεσμα του χαμηλού μέσου βάθους αναζήτησης, το σύστημα επιτυγχάνει και στην περίπτωση της διαφοροποίησης υπηρεσιών υψηλό βαθμό εξυπηρέτησης χρηστών για $depthmax=0$ στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 7.8.



Σχήμα 7.8: Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε καθεμιά από τις 10 υλοποιήσεις ($seednumber=55$) του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με (καφέ στήλες) και χωρίς (πράσινες στήλες) διαφοροποίηση υπηρεσιών ανά χρήστη και με $depthmax = 0$.

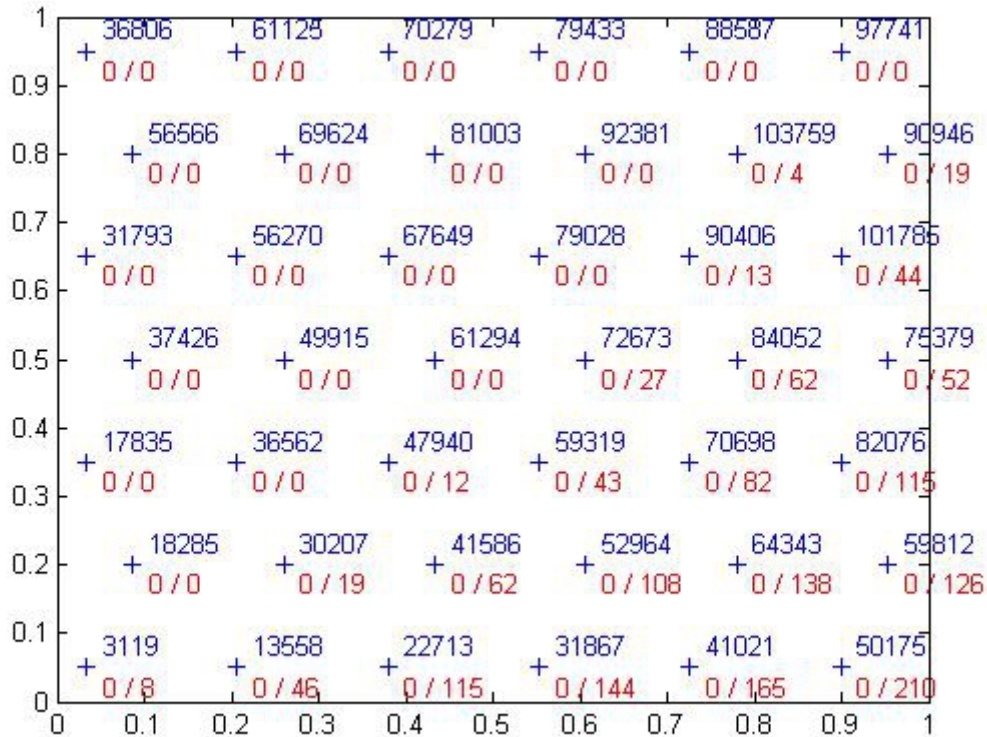
Ο μέσος όρος του βαθμού εξυπηρέτησης του συστήματος κατά τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου είναι 99.331%, δηλαδή είναι στα ίδια επίπεδα με τον βαθμό εξυπηρέτησης που προέκυψε στην περίπτωση ίδιας απαίτησης πόρων ανά χρήστη (μέσος βαθμός εξυπηρέτησης 99.343%).

Επιτρέποντας ένα βήμα αναζήτησης πόρων στο δίκτυο ($depthmax=1$) στις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με διαφοροποίηση υπηρεσιών ανά χρήστη, το δίκτυο επιτυγχάνει κατά μέσο όρο βαθμό εξυπηρέτησης ίσο με 99.616% και κάνει αναζήτηση στο 0.449% των περιπτώσεων των εξυπηρετηθέντων χρηστών. Αυτά τα επίπεδα εξυπηρέτησης χρηστών και αναζήτησης πόρων είναι ίδια με αυτά της περίπτωσης ίδιας απαίτησης πόρων ανά χρήστη.

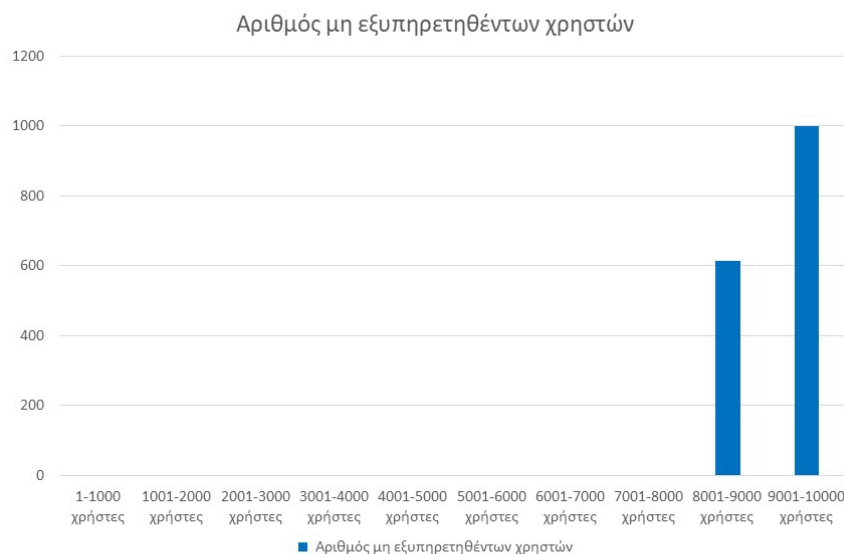
Οι ανωτέρω προσομοιώσεις αφορούσαν περιπτώσεις στις οποίες η πιθανότητα με την οποία επιλεγόταν ο κάθε τύπος υπηρεσίας από κάθε χρήστη προσέγγιζε με μικρές αποκλίσεις τα τελικά ποσοστά της χρήσης κάθε τύπου υπηρεσίας μετά το τέλος της κάθε υλοποίησης της προσομοίωσης. Εάν οι αρχικές εκτιμήσεις του συστήματος για τις προτιμήσεις των χρηστών για τους 3 τύπους υπηρεσιών δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, τότε μπορούν να προκύψουν περιπτώσεις όπου το σύστημα δεσμεύει στην αρχή περισσότερους ή λιγότερους συνολικούς πόρους απ' ό,τι πρόκειται να χρειαστεί. Εφόσον η κύρια εστίαση της εργασίας είναι στην χρονική απόκριση και στο ποσοστό εξυπηρέτησης του δικτύου, θα διερευνηθεί το σενάριο στο οποίο το δίκτυο έχει λιγότερους πόρους απ' ό,τι χρειάζεται. Για τον σκοπό αυτό, προσομοιώνεται η περίπτωση όπου το σύστημα περιμένει ποσοστά επιλογής 50%, 40%, 10% για τις υπηρεσίες τύπου 1, 2, 3 αντίστοιχα, ενώ στην προσομοίωση οι 10000 χρήστες επιλέγουν τις 3 αυτές υπηρεσίες με ποσοστά 30%, 60%, 10%. Αυτό σημαίνει ότι στην προσομοίωση το σύστημα θα χρειαστεί περίπου

$N = N_{users} * (0.3 * A + 0.6 * 4A + 0.1 * 10A) = 10000 * (0.3 * 80 + 0.6 * 320 + 0.1 * 800) = 2960000 RBs$,
 ενώ έχει διαθέσιμα μόνο 2480000 RBs. Αυτή η διαφορά των 480000 RBs αναμένεται να χειροτερεύσει την απόδοση του δικτύου, όσον αφορά το μέσο βάθος αναζήτησης και την εξυπηρευτικότητα του δικτύου.

Τρέχοντας την ίδια υλοποίηση άφιξης χρηστών του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με πριν, με $depthmax = 41$ προκύπτουν τα Σχ. 7.9 και 7.10.



Σχήμα 7.9: Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με διαφοροποίηση υπηρεσιών, με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με λάθος αρχική εκτίμηση προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών και με $depthmax = 41$. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).



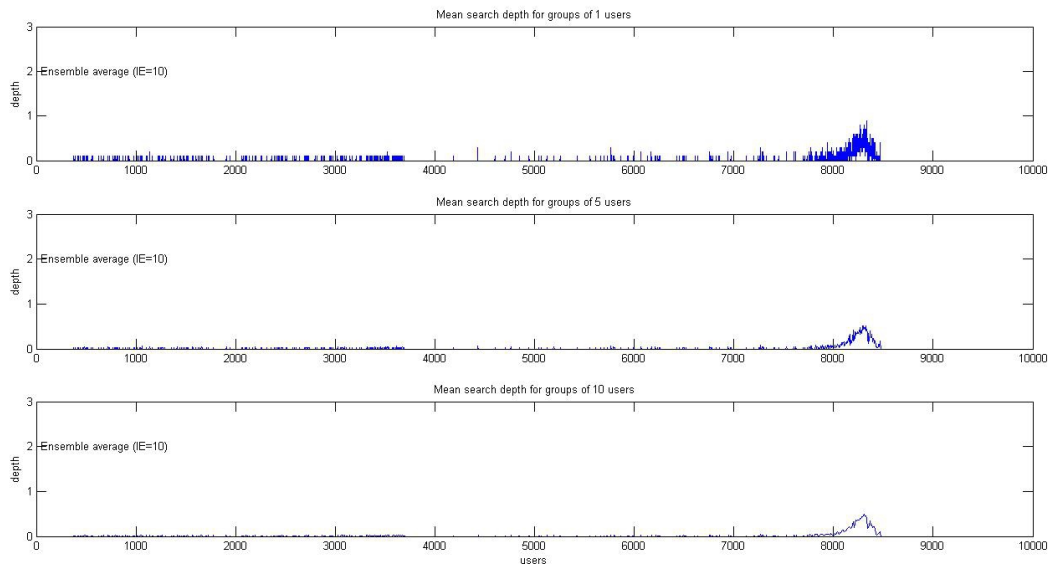
Σχήμα 7.10: Αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών σε κάθε χιλιάδα αφικνούμενων χρηστών στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με διαφοροποίηση υπηρεσιών ανά χρήστη, με λάθος αρχική εκτίμηση προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών και με $depthmax = 41$.

Αφού το σύστημα έχει 480000 πόρους λιγότερους απ' ό,τι θα χρειαζόταν προσεγγιστικά για να καλύψει τις ανάγκες των χρηστών, τότε αυτό συνεπάγεται ότι θα έχει περίπου

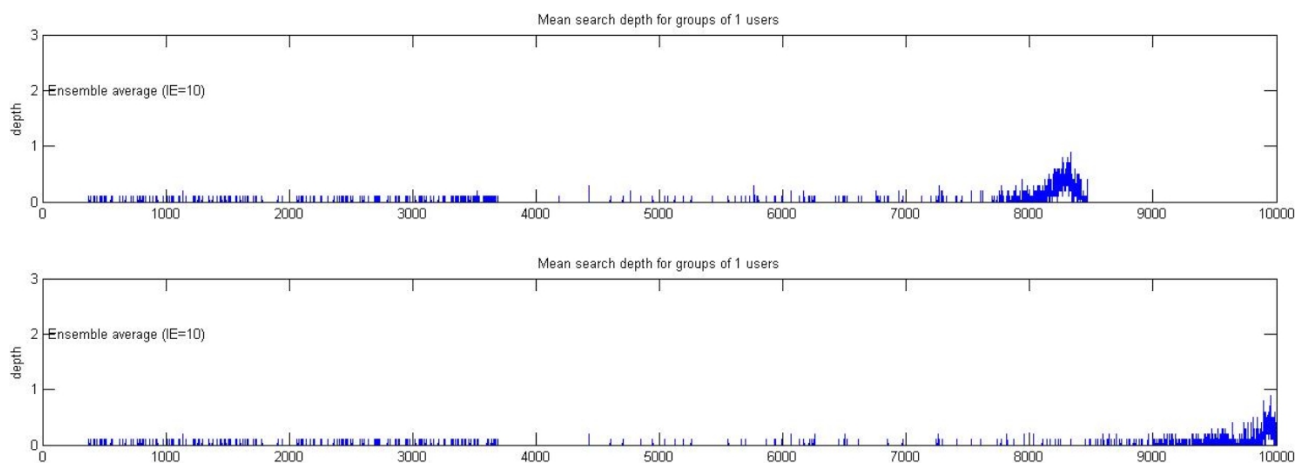
$$N_{unserved\ users} = \frac{480000\ RBs}{0.3 * 80RBs + 0.6 * 320RBs + 0.1 * 800RBs} = 1622\ \text{μη εξυπηρετηθέντες χρήστες.}$$

Πράγματι, αυτήν τη φορά υπάρχουν συνολικά 1614 μη εξυπηρετηθέντες χρήστες μετά το τέλος της πρώτης υλοποίησης του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης. Οι χρήστες αυτοί ανήκουν στις τελευταίες δύο χιλιάδες χρηστών που φθάνουν στον χώρο S, όπως φαίνεται στο Σχ. 7.10, και το σύστημα δεν έχει συνολικά στους ισχυρούς κόμβους τους πόρους που ζητά ο καθένας από αυτούς και δεν μπορεί να τους εξυπηρετήσει. Και στις υπόλοιπες 9 προσομοιώσεις μένουν πάνω από 1500 χρήστες χωρίς εξυπηρέτηση σε κάθε υλοποίηση, λόγω της έλλειψης πόρων, δηλαδή πάνω από το 15% του συνολικού πληθυσμού χρηστών.

Τα αποτελέσματα του μέσου βάθους αναζήτησης κατά την εκτέλεση των δέκα υλοποιήσεων του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης παρουσιάζονται στα Σχ. 7.11 και 7.12.



Σχήμα 7.11: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με διαφοροποίηση υπηρεσιών και με λάθος εκτίμηση προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών . Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.



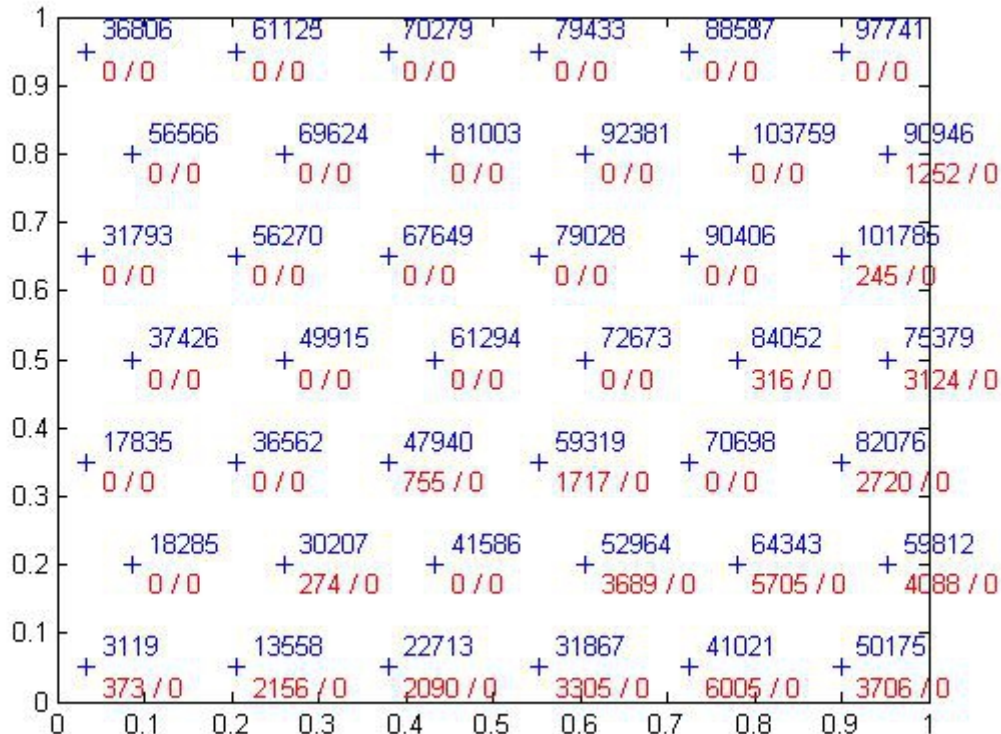
Σχήμα 7.12: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης (στατική κατανομή) με δυνατότητα ανακατανομής, με μεταβλητό μέγεθος δείγματος, με διαφοροποίηση υπηρεσιών, με λάθος (πάνω διάγραμμα) και σωστή (κάτω διάγραμμα) εκτίμηση προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών.

Μετά τον χρήστη 8470 το μέσο βάθος αναζήτησης μηδενίζεται, όπως φαίνεται στο Σχ. 7.11, καθώς δεν έχει απομείνει κανένας πόρος στο σύστημα και έτσι οι τελευταίοι 1530 χρήστες περίπου μένουν χωρίς εξυπηρέτηση. Συνεπώς, όταν τα ποσοστά επιλογής των 3 υπηρεσιών από τον πληθυσμό των χρηστών διαφέρουν σημαντικά από αυτά που περίμενε το σύστημα, υποβαθμίζεται η απόδοση του συστήματος.

7.4 Σχεδίαση και εκτέλεση αλγόριθμου με δυνατότητα προσαρμογής στις αλλαγές προτίμησης υπηρεσιών από τους χρήστες

Λαμβάνοντας τα προηγούμενα αποτελέσματα υπόψη, είναι προφανής η ανάγκη του συστήματος να μπορεί να προσαρμοστεί σε τέτοιου είδους αποκλίσεις για να διατηρήσει την

απόδοσή του σε υψηλά επίπεδα. Όπως και στην απόκλιση μεταξύ αναμενόμενης και εμπειρικής κατανομής χρηστών, έτσι και στη συγκεκριμένη περίπτωση το σύστημα θα πρέπει να παρακολουθεί τακτικά τις τάσεις των χρηστών όσον αφορά τα ποσοστά επιλογής των 3 ειδών υπηρεσιών και σε περίπτωση που διαπιστώνει σημαντικές αποκλίσεις να μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα. Η προσαρμογή του συστήματος αυτήν τη φορά συνίσταται στους συνολικούς πόρους που διαθέτει. Δηλαδή, εάν ο SBS διαπιστώνει ότι, με βάση τις επιλογές υπηρεσιών των χρηστών, δεν πρόκειται να επαρκέσουν οι πόροι που διαθέτει στους ισχυρούς κόμβους, τότε καλείται να διαθέσει παραπάνω συνολικούς πόρους για να καλύψει τις ανάγκες που δημιουργούνται με βάση τα νέα δεδομένα επιλογής υπηρεσιών. Εφαρμόζοντας αυτή τη λογική στον αλγόριθμο κατανομής πόρων, ορίζεται ότι το σύστημα θα ελέγχει τις τάσεις επιλογής υπηρεσιών των χρηστών κάθε φορά που σχηματίζεται δείγμα 1000 χρηστών. Ο λόγος επιλογής του συγκεκριμένου μεγέθους δείγματος είναι επειδή, με βάση τη σχέση (3.7), αντιστοιχεί σε 95% επίπεδο εμπιστοσύνης και σε 2,941% περιθώριο λάθους για πληθυσμό 10000 χρηστών. Είναι επιθυμητό το πολύ μικρό περιθώριο λάθους, καθώς το σύστημα πρέπει να είναι σίγουρο ότι οι τάσεις επιλογής υπηρεσιών που παρουσίασε το δείγμα ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα ώστε να μη διαθέσει άδικα επιπλέον τηλεπικοινωνιακούς πόρους στο σύστημα εάν στο δείγμα εμφανιστεί σημαντική απόκλιση. Επιπλέον, οι 1000 χρήστες αποτελούν το 10% του συνολικού πληθυσμού και κατά συνέπεια ικανοποιείται η τρίτη συνθήκη του εμπειρικού κανόνα του αντιπροσωπευτικού δείγματος που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3. Κάθε φορά που σχηματίζεται αντιπροσωπευτικό δείγμα 1000 χρηστών, το σύστημα θα ελέγχει εάν τα αναμενόμενα ποσοστά επιλογής τύπου υπηρεσιών προσεγγίζουν τα πραγματικά. Για αυτή τη διαδικασία θα χρησιμοποιηθεί ξανά ο έλεγχος Kolmogorov-Smirnov και η τιμή του ορίου D_a θα είναι, με βάση τον τύπο (3.9), ίσο με 0.0429, αφού αυτή η τιμή αντιστοιχεί για μέγεθος δείγματος 1000 χρηστών. Τρέχοντας με τον νέο αλγόριθμο την ίδια υλοποίηση άφιξης χρηστών του δευτέρου σεναρίου προσομοίωσης, με $depthmax=41$ προκύπτει το Σχ. 7.13.

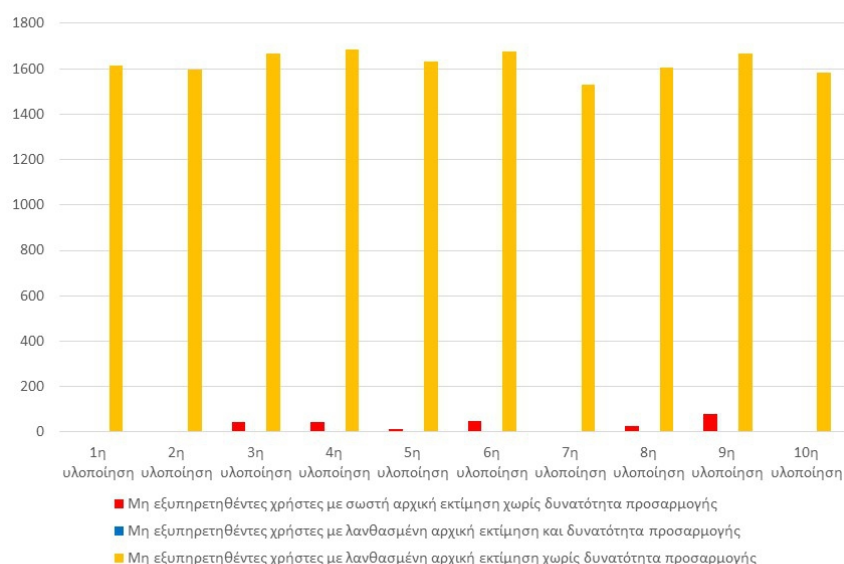


Σχήμα 7.13: Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του δεύτερου σεναρίου με διαφοροποίηση υπηρεσιών, με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με

δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών και με $depthmax = 41$. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).

Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, ο SBS συμπεραίνει με βάση το πρώτο δείγμα των 1000 χρηστών ότι οι χρήστες διαλέγουν τους 3 τύπους υπηρεσιών με αρκετά διαφορετικά ποσοστά από τα αναμενόμενα. Διακρίνοντας ότι το δίκτυο θα χρειαστεί παραπάνω πόρους από αυτούς που έχουν διατεθεί, ο SBS μαζεύει τους επιπλέον πόρους που θα χρειαστούν με βάση τα νέα ποσοστά επιλογής των υπηρεσιών και ανακατανέμει τους συνολικούς επαυξημένους πόρους στους ισχυρούς κόμβους με βάση την εκτιμώμενη κίνηση που περιμένει το σύστημα μετά τους 1000 πρώτους χρήστες. Τα πραγματικά ποσοστά επιλογής υπηρεσιών δεν μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και ως αποτέλεσμα ο SBS δεν χρειάζεται στη συνέχεια να δώσει επιπλέον πόρους στο σύνολο των ισχυρών κόμβων. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, μένουν 0 χρήστες χωρίς εξυπηρέτηση μετά το τέλος της πρώτης υλοποίησης της προσομοίωσης, έναντι 1614 που έμειναν χωρίς εξυπηρέτηση στην ίδια υλοποίηση, όταν το σύστημα δεν προσαρμόστηκε στα διαφορετικά ποσοστά επιλογής υπηρεσιών. Οι εναπομεινάντες πόροι στους ισχυρούς κόμβους μετά το τέλος της πρώτης υλοποίησης της προσομοίωσης είναι συνολικά 41520 RBs, δηλαδή το 1.4% των συνολικών πόρων που διατέθηκαν στο δίκτυο. Στις υπόλοιπες 9 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης εξυπηρετούνται και πάλι όλοι οι χρήστες. Οι εναπομεινάντες πόροι στις υπόλοιπες 9 υλοποιήσεις δεν υπερβαίνουν το 3% των συνολικών διατιθέμενων πόρων. Στο Σχ. 7.14 παρουσιάζονται οι μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με $depthmax=41$ για 3 εκδοχές δικτύου:

- δίκτυο με σωστή αρχική εκτίμηση των ποσοστών επιλογής υπηρεσιών, χωρίς δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των υπηρεσιών
- δίκτυο με λανθασμένη αρχική εκτίμηση των ποσοστών επιλογής υπηρεσιών και με δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των υπηρεσιών
- δίκτυο με λανθασμένη αρχική εκτίμηση των ποσοστών επιλογής υπηρεσιών, χωρίς δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των υπηρεσιών

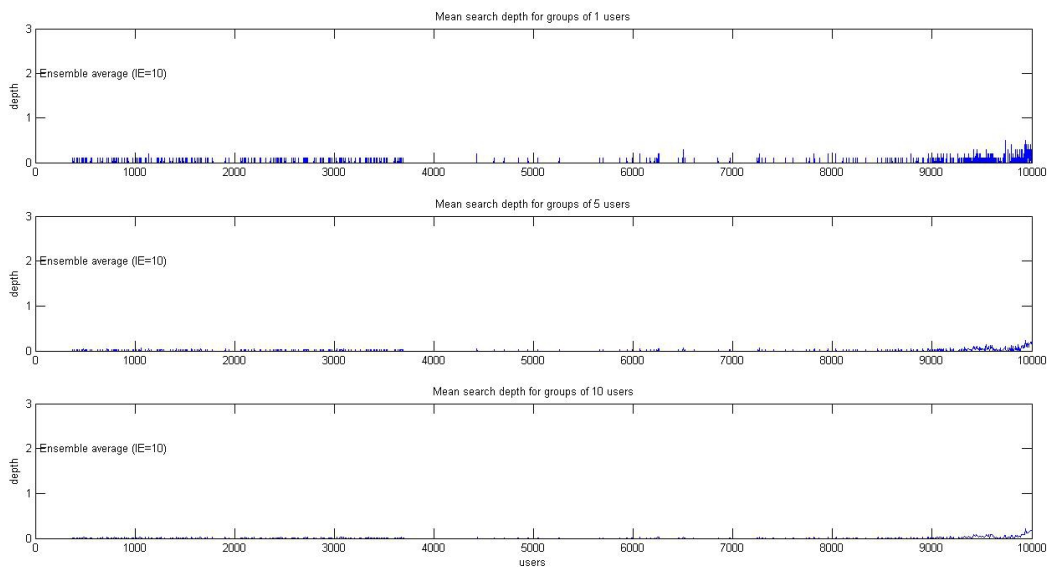


Σχήμα 7.14: Μη εξυπηρετηθέντες χρήστες σε καθεμία από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου

προσομοίωσης με σωστή αρχική εκτίμηση των ποσοστών επιλογής υπηρεσιών και χωρίς δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των υπηρεσιών (κόκκινες στήλες), με λανθασμένη αρχική εκτίμηση των ποσοστών επιλογής υπηρεσιών με (μπλε στήλες) και χωρίς (πορτοκαλί στήλες) δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των υπηρεσιών (μπλε στήλες), με $depthmax=41$.

Ο μέσος όρος του βαθμού εξυπηρέτησης του δικτύου με λάθος αρχική εκτίμηση και δυνατότητα προσαρμογής κατά τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου είναι 100%, ενώ ο μέσος όρος του βαθμού εξυπηρέτησης του δικτύου με σωστή εκτίμηση και χωρίς δυνατότητα προσαρμογής είναι 99.745%. Αντίθετα, όταν το δίκτυο κάνει λανθασμένη αρχική εκτίμηση και δεν έχει δυνατότητα προσαρμογής στις αλλαγές, έχει πολύ χαμηλότερο βαθμό εξυπηρέτησης (83.746%), επειδή δεν έχει τον απαιτούμενο αριθμό συνολικών διαθέσιμων πόρων.

Τα αποτελέσματα του μέσου βάθους αναζήτησης κατά την εκτέλεση των δέκα υλοποιήσεων του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης με δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης τύπου υπηρεσιών παρουσιάζονται στο Σχ. 7.15.



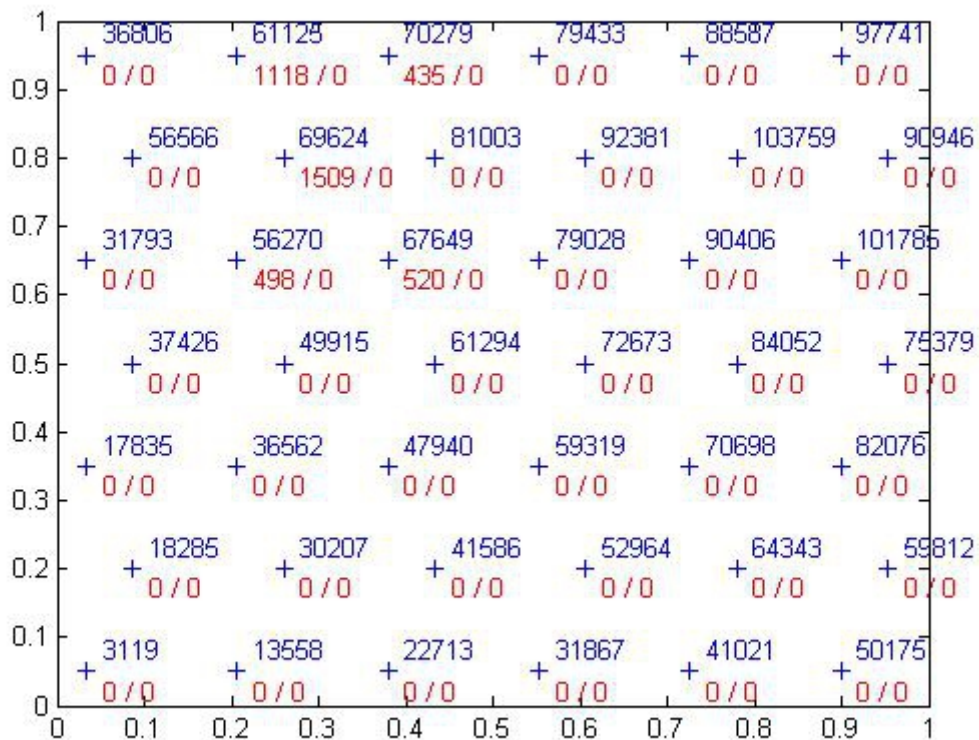
Σχήμα 7.15: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με διαφοροποίηση υπηρεσιών και με δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.

Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων του Σχ. 7.15 με το κάτω διάγραμμα του Σχ. 7.12, προκύπτει το συμπέρασμα ότι με τη δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών, το σύστημα μπορεί με λάθος αρχική εκτίμηση των ποσοστών επιλογής υπηρεσιών να επιτύχει παρόμοια συμπεριφορά βάθους αναζήτησης με την περίπτωση όπου είχε εκτιμήσει σωστά τα ποσοστά.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορεί να επιτύχει και παρόμοια επίπεδα βαθμού εξυπηρέτησης χρηστών, όταν δεν υπάρχει δυνατότητα αναζήτησης πόρων ($depthmax=0$). Συγκεκριμένα, ο μέσος όρος του βαθμού εξυπηρέτησης του δικτύου με λάθος αρχική εκτίμηση και δυνατότητα προσαρμογής κατά τις 10 υλοποιήσεις του δεύτερου σεναρίου είναι 99.527%, ενώ ο μέσος όρος του βαθμού εξυπηρέτησης του δικτύου με σωστή εκτίμηση και χωρίς δυνατότητα προσαρμογής είναι 99.292%.

Επιτρέποντας ένα βήμα αναζήτησης πόρων στο δίκτυο ($depthmax=1$) στις 10 υλοποιήσεις του δευτέρου σεναρίου προσομοίωσης με διαφοροποίηση υπηρεσιών ανά χρήστη, το δίκτυο με δυνατότητα προσαρμογής επιτυγχάνει κατά μέσο όρο βαθμό εξυπηρέτησης ίσο με 99.831% και κάνει αναζήτηση στο 0.363% των περιπτώσεων των εξυπηρετηθέντων χρηστών. Αυτά τα επίπεδα εξυπηρέτησης χρηστών και αναζήτησης πόρων είναι ίδια με αυτά της περίπτωσης όπου η αρχική εκτίμηση είναι σωστή (99.537% βαθμός εξυπηρέτησης, αναζήτηση πόρων στο 0.394% των περιπτώσεων). Συνοψίζοντας από τα προηγούμενα, με την προσαρμογή στις αλλαγές προτίμησης υπηρεσιών από τους χρήστες, το δίκτυο επιτυγχάνει λίγο καλύτερη απόδοση, όσον αφορά την εξυπηρέτηση και τον χρόνο απόκρισης, σε σχέση με την περίπτωση όπου είχε προβλέψει σωστά τα ποσοστά με τα οποία θα επιλέξουν οι χρήστες τους τρεις τύπους υπηρεσιών.

Με τη δυνατότητα προσαρμογής, το σύστημα βρίσκεται σε θέση να αποδώσει σε υψηλά επίπεδα, ακόμα κι όταν οι προτιμήσεις των 3 τύπων υπηρεσιών μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Για παράδειγμα, χρησιμοποιείται το σενάριο στο οποίο οι 3000 πρώτοι χρήστες έχουν ποσοστά προτίμησης για τις 3 υπηρεσίες 50%, 40% και 10%, οι επόμενοι 4000 χιλιάδες παρουσιάζουν ποσοστά προτίμησης 30%, 60% και 10% και οι τελευταίοι 3000 χρήστες παρουσιάζουν ποσοστά προτίμησης 25%, 55% και 20%. Ως πλαίσιο για αυτό το παράδειγμα χρησιμοποιείται το τρίτο σενάριο προσομοίωσης, στο οποίο η εμφάνιση των χρηστών ακολουθεί μεταβαλλόμενη κατανομή. Τρέχοντας σε αυτό το σενάριο τον αλγόριθμο με δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης υπηρεσιών με $depthmax=41$ προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχ. 7.16.



Σχήμα 7.16: Εναπομείναντες πόροι και μη εξυπηρετηθέντες χρήστες στην πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου με μεταβαλλόμενα ποσοστά προτίμησης υπηρεσιών με τον αλγόριθμο με δυνατότητα ανακατανομής πόρων, με δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών και με $depthmax = 41$. Με μπλε αναγράφεται ο αριθμός των πόρων που κατανεμήθηκαν αρχικά σε κάθε ισχυρό κόμβο, ενώ με κόκκινο αναγράφονται ο αριθμός εναπομεινάντων πόρων (αριστερά) και ο αριθμός μη εξυπηρετηθέντων χρηστών (δεξιά).

Στην πρώτη υλοποίηση του σεναρίου δεν μένει κανείς χρήστης χωρίς εξυπηρέτηση. Επιπλέον, οι εναπομείναντες πόροι στους ισχυρούς κόμβους είναι συνολικά 4080 RBs, οι οποίοι είναι λιγότεροι από το 0.137% των συνολικών πόρων που διατέθηκαν στο δίκτυο (2987360 RBs). Σε συνολικά 10 υλοποιήσεις, το δίκτυο έχει βαθμό εξυπηρέτησης ίσο με 99.884%, το οποίο σημαίνει ότι με τη δυνατότητα προσαρμογής το δίκτυο έχει επαρκή αριθμό πόρων. Όσον αφορά τους εναπομείναντες πόρους, δεν ξεπερνάνε σε καμιά υλοποίηση το 0.64% των διατιθέμενων πόρων. Συνεπώς, το δίκτυο καταφέρνει να προσαρμοστεί εγκαίρως στις μεταβαλλόμενες ανάγκες πόρων των χρηστών, χωρίς να θυσιάζει σημαντικές ποσότητες αχρησιμοποίητων πόρων.

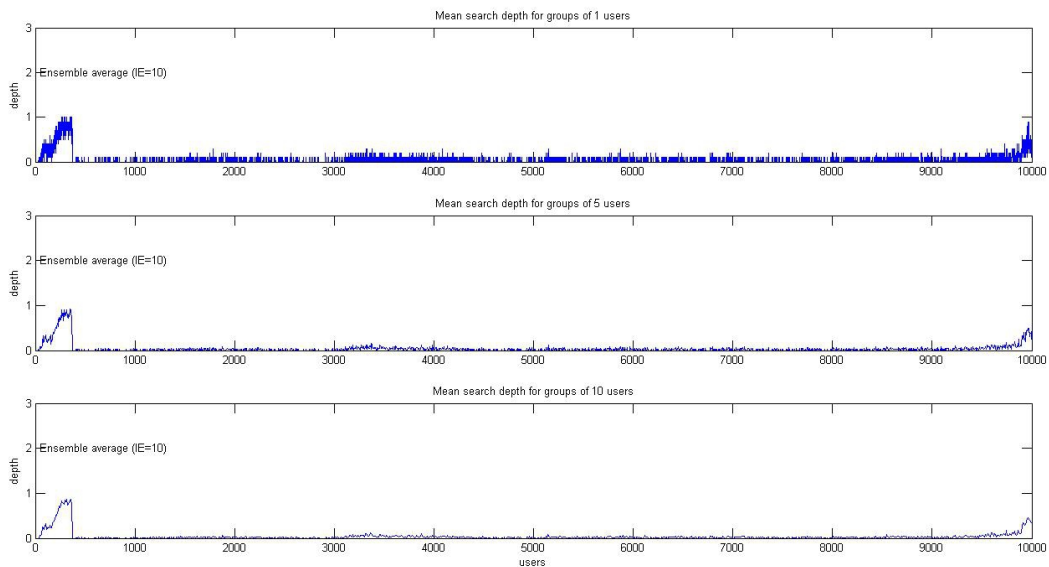
Στον πίνακα 7.2 παρουσιάζονται οι ανακατανομές των πόρων στους ισχυρούς κόμβους, οι οποίες έγιναν κατά τη διάρκεια της πρώτης υλοποίησης του τρίτου σεναρίου με μεταβαλλόμενες προτιμήσεις υπηρεσιών από τους χρήστες. Οι υπόλοιπες 9 υλοποιήσεις παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά τον αριθμό και τις χρονικές στιγμές των ανακατανομών.

Πίνακας 7.2: Τιμές της μέγιστης διαφοράς μεταξύ της αναμενόμενης και της εμπειρικής κατανομής κίνησης και συνολικές ανακατανομές για την πρώτη υλοποίηση του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης άφιξης χρηστών με μεταβαλλόμενες προτιμήσεις υπηρεσιών από τους χρήστες.

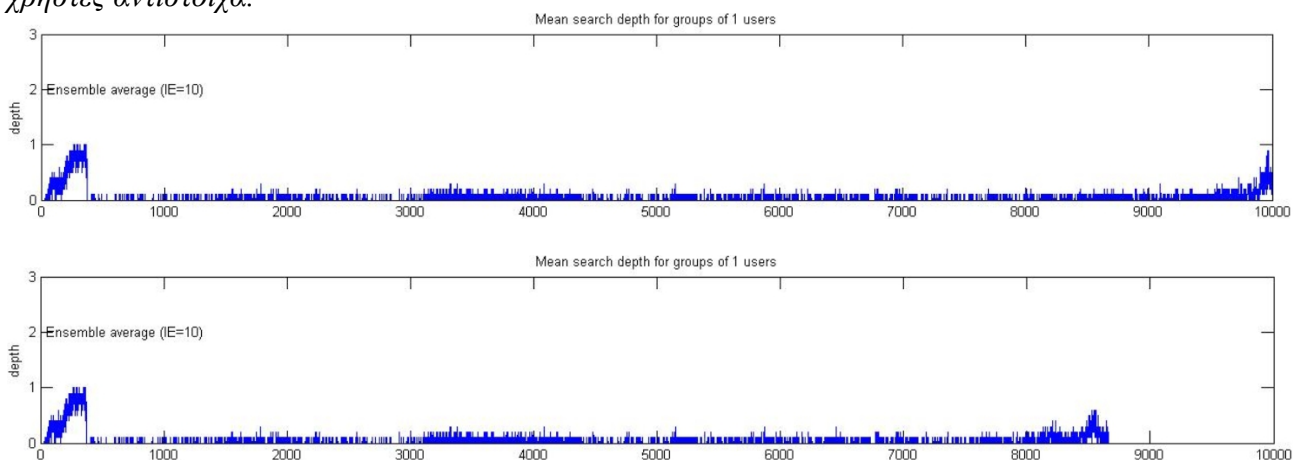
iensemble=1	i=4820 / D=0.10588 / Resource reallocation
i=370 / D=0.34398 / Resource reallocation	i=4990 / D=0.058824
i=740 / D=0.072973 / Resource reallocation	i=5000 / D_serv=0.02
i=910 / D=0.042448	i=5160 / D=0.11176 / Resource reallocation
i=1000 / D_serv=0.007	i=5330 / D=0.070588
i=1080 / D=0.095866 / Resource reallocation	i=5500 / D=0.088235 / Resource reallocation
i=1250 / D=0.11176 / Resource reallocation	i=5670 / D=0.12353 / Resource reallocation
i=1420 / D=0.088235 / Resource reallocation	i=5840 / D=0.058824
i=1590 / D=0.070588	i=6000 / D_serv=0.024
i=1760 / D=0.070588	i=6010 / D=0.14118 / Resource reallocation
i=1930 / D=0.15882 / Resource reallocation	i=6180 / D=0.058824
i=2000 / D_serv=0.014	i=6350 / D=0.064706
i=2100 / D=0.082353 / Resource reallocation	i=6520 / D=0.16471 / Resource reallocation
i=2270 / D=0.082353 / Resource reallocation	i=6690 / D=0.058824
i=2440 / D=0.070588	i=6860 / D=0.064706
i=2610 / D=0.052941	i=7000 / D_serv=0.009
i=2780 / D=0.064706	i=7030 / D=0.12941 / Resource reallocation
i=2950 / D=0.064706	i=7200 / D=0.070588
i=3000 / D_serv=0.032	i=7370 / D=0.052941
i=3120 / D=0.076471 / Resource reallocation	i=7540 / D=0.064706
i=3290 / D=0.13529 / Resource reallocation	i=7710 / D=0.064706
i=3460 / D=0.082353 / Resource reallocation	i=7880 / D=0.11765 / Resource reallocation
i=3630 / D=0.14706 / Resource reallocation	i=8000 / D_serv=0.112 / New service percentages-Reallocation
i=3800 / D=0.15882 / Resource reallocation	i=8050 / D=0.052941
i=3970 / D=0.064706	i=8220 / D=0.1 / Resource reallocation
i=4000 / D_serv=0.194 / New service percentages-Reallocation	i=8390 / D=0.11176 / Resource reallocation
i=4140 / D=0.16471 / Resource reallocation	i=8560 / D=0.058824
i=4310 / D=0.10588 / Resource reallocation	i=8730 / D=0.10588 / Resource reallocation
i=4480 / D=0.070588	i=8900 / D=0.11765 / Resource reallocation
i=4650 / D=0.088235 / Resource reallocation	i=9000 / D_serv=0.03
i=9070 / D=0.094118 / Resource reallocation	
i=9240 / D=0.094118 / Resource reallocation	
i=9410 / D=0.12353 / Resource reallocation	
i=9580 / D=0.052941	
i=9750 / D=0.18235 / Resource reallocation	
i=9920 / D=0.12941 / Resource reallocation	

Στους πρώτους 3000 χρήστες τα ποσοστά επιλογής των υπηρεσιών είναι κοντά στα αναμενόμενα και έτσι ο sBS δεν κάνει κάποια αλλαγή όσον αφορά τους συνολικούς πόρους που διαθέτει στους ισχυρούς κόμβους. Κατά την άφιξη της 4ης χιλιάδας τα ποσοστά επιλογής υπηρεσιών αλλάζουν σημαντικά. Το σύστημα το διαπιστώνει αυτό μόλις φθάσουν 4000 χρήστες και βλέποντας ότι το σύστημα έχει ανάγκη επιπλέον πόρων, διαθέτει 296160 επιπλέον πόρους στους ισχυρούς κόμβους. Τα ποσοστά επιλογής υπηρεσιών παραμένουν στα ίδια επίπεδα μέχρι και την άφιξη της 7ης χιλιάδας, καθώς κατά την άφιξη της 8ης χιλιάδας αρχίζουν και πάλι να αλλάζουν. Το σύστημα καταλαβαίνει αυτή τη μεταβολή κατά την άφιξη του 8000ου χρήστη και διαθέτει στους ισχυρούς κόμβους 211200 επιπλέον πόρους που έχει ανάγκη το σύστημα λόγω της μεταβολής.

Τα αποτελέσματα του μέσου βάθους αναζήτησης κατά την εκτέλεση των δέκα υλοποιήσεων του τρίτου σεναρίου προσομοίωσης με μεταβαλλόμενα ποσοστά προτίμησης υπηρεσιών με τον αλγόριθμο με δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης τύπου υπηρεσιών παρουσιάζονται στα Σχ. 7.17 και 7.18.



Σχήμα 7.17: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου με μεταβαλλόμενα ποσοστά προτίμησης υπηρεσιών με τον αλγόριθμο με δυνατότητα ανακατανομής πόρων και με δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών. Στο μεσαίο και στο κάτω διάγραμμα τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανά 5 και 10 χρήστες αντίστοιχα.



Σχήμα 7.18: Μέσο βάθος αναζήτησης ανά χρήστη που προέκυψε από τις 10 υλοποιήσεις του τρίτου σεναρίου με μεταβαλλόμενα ποσοστά προτίμησης υπηρεσιών με τον αλγόριθμο με (πάνω διάγραμμα)

και χωρίς (κάτω διάγραμμα) δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 7.17, το μέσο βάθος αναζήτησης παραμένει κοντά στο 0 για το μεγαλύτερο μέρος της προσομοίωσης. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα του Σχ. 7.18, παρατηρείται ίδια συμπεριφορά στο βάθος αναζήτησης μέχρι την αρχή της 8ης χιλιάδας. Από εκεί και πέρα το βάθος αναζήτησης αρχίζει να αυξάνει στον αλγόριθμο χωρίς δυνατότητα προσαρμογής, καθώς οι πόροι λιγοστεύουν. Όταν έχουν αφιχθεί πλέον 8600 περίπου χρήστες, οι συνολικοί πόροι έχουν εκμηδενιστεί στον αλγόριθμο χωρίς δυνατότητα προσαρμογής, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εξυπηρετηθεί καθόλου η τελευταία χιλιάδα χρηστών. Αντίθετα, στον αλγόριθμο με δυνατότητα προσαρμογής στις αλλαγές στην προτίμηση υπηρεσιών, οι χρήστες συνεχίζουν να εξυπηρετούνται κανονικά. Συνολικά, σε 10 υλοποιήσεις του σεναρίου προσομοίωσης με $depthmax=41$, η εφαρμογή του αλγόριθμου με δυνατότητα προσαρμογής βοηθά το δίκτυο να επιτύχει ποσοστό εξυπηρέτησης ίσο με 99.884%, ενώ χωρίς την δυνατότητα προσαρμογής το δίκτυο επιτυγχάνει μόνο 85.58%.

Σε 10 υλοποιήσεις του σεναρίου προσομοίωσης χωρίς δυνατότητα αναζήτησης ($depthmax=0$), ο βαθμός εξυπηρέτησης χρηστών για δίκτυο με δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές στα ποσοστά προτίμησης των 3 τύπων υπηρεσιών είναι 96.34%. Αν δοθεί η δυνατότητα ενός βήματος αναζήτησης ($depthmax=1$), ο αντίστοιχος βαθμός είναι ίσος με 99.874% και επιτυγχάνεται κάνοντας αναζήτηση πόρων μόνο στο 3.955% των περιπτώσεων των εξυπηρετηθέντων χρηστών.

Συνοψίζοντας από τα προηγούμενα, συνάγεται το συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος βρίσκεται σε θέση να μπορεί να διατηρήσει υψηλά επίπεδα απόδοσης ακόμα και σε περιπτώσεις στις οποίες υπάρχει μεταβολή τόσο στον τρόπο εμφάνισης χρηστών στον χώρο όσο και στις προτιμήσεις των τύπων υπηρεσιών που επιλέγουν. Ο αλγόριθμος δυναμικής κατανομής πόρων συνιστά ένα αυτόνομο και δυναμικό σύστημα που μπορεί ακόμη και με λανθασμένες αρχικές εκτιμήσεις και σε αντίξοες συνθήκες, όσον αφορά την μεταβλητότητα στην κίνηση των χρηστών και στην απαίτηση πόρων ανά χρήστη, να μπορέσει να προσαρμοστεί και να αποδώσει.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα και δυνατές επεκτάσεις του αλγόριθμου δυναμικής κατανομής πόρων

8.1 Συμπεράσματα

Στα διάφορα σενάρια προσομοίωσης της άφιξης των χρηστών που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα τρία κεφάλαια, διαπιστώθηκε η προσαρμοστικότητα του δικτύου σε μεταβαλλόμενες κατανομές ζήτησης πόρων (RBs) χάρη στον αλγόριθμο δυναμικής κατανομής πόρων. Συγκεκριμένα, στις προσομοιώσεις που έγιναν στο 5ο και 6ο κεφάλαιο, με δέκα διαφορετικές υλοποιήσεις η καθεμιά, μελετήθηκαν σενάρια ad hoc γεγονότων με χρονικά σταθερή κατανομή χρηστών στον χώρο S, διαφορετική της αναμενόμενης, καθώς και σενάρια ad hoc γεγονότων με χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή χρηστών. Στις εκτελέσεις αυτών των σεναρίων άφιξης των χρηστών το δίκτυο με τη δυνατότητα της δυναμικής κατανομής πόρων ήταν σε θέση να ελέγχει ανά χρονικές περιόδους την κατανομή των νεοεισερχόμενων χρηστών στον χώρο S, εξάγοντας την εμπειρική κατανομή ζήτησης από αντιπροσωπευτικά δείγματα νέων χρηστών, και να κάνει ανακατανομή των εναπομεινάντων πόρων όταν η κατανομή αυτή διέφερε σημαντικά από την αναμενόμενη (ή από αυτήν που είχε χρησιμοποιηθεί για την τελευταία ανακατανομή). Ως αποτέλεσμα αυτού του μοντέλου λειτουργίας, επιτεύχθηκαν πολύ υψηλά επίπεδα απόδοσης δικτύου, όσον αφορά τις εξής παραμέτρους :

- Γρήγορη απόκριση δικτύου: Η απόκριση του δικτύου στις απαιτήσεις πόρων του κάθε χρήστη ήταν πολύ γρήγορη, αφού στις περισσότερες συνδέσεις χρηστών το δίκτυο δεν αναγκάστηκε να αναζητήσει τους απαιτούμενους πόρους σε διαφορετικούς ισχυρούς κόμβους από τον αρχικό στον οποίο βρισκόταν ο χρήστης. Ειδικότερα, μέσω της ανακατανομής πόρων, το ποσοστό των περιπτώσεων χρηστών στις οποίες ο αρχικός ισχυρός κόμβος είχε τους ζητούμενους πόρους, απαλλάσσοντας έτσι το δίκτυο από ενδεχόμενη καθυστέρηση και υπολογιστικά κόστη που θα προέκυπταν λόγω αναζήτησης πόρων, ανήλθε σε επίπεδα μεγαλύτερα του 96%. Όσον αφορά τις περιπτώσεις στις οποίες το δίκτυο αναγκάστηκε να κάνει αναζήτηση πόρων, το γεγονός ότι το μέσο βάθος αναζήτησης πόρων παρέμεινε κοντά στο 0 κατά τις 10 υλοποιήσεις του κάθε σεναρίου προσομοίωσης δείχνει ότι το δίκτυο βρήκε τους απαιτούμενους πόρους στο πρώτο βήμα αναζήτησης στην πλειοψηφία αυτών των περιπτώσεων.
- Μεγάλα ποσοστά εξυπηρέτησης χρηστών με ή και χωρίς δυνατότητα αναζήτησης πόρων: Ως αποτέλεσμα του πολύ χαμηλού μέσου βάθους αναζήτησης, όταν δεν δίνεται στο δίκτυο δυνατότητα αναζήτησης πόρων, το δίκτυο διατηρεί υψηλό βαθμό εξυπηρέτησης (σε επίπεδα μεγαλύτερα του 96%) ακόμα και στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η κατανομή των νεοεισερχόμενων χρηστών στον χώρο μεταβάλλεται έντονα με τον χρόνο. Επιπλέον, δίνοντας στο δίκτυο τη δυνατότητα ενός βήματος αναζήτησης, επιτυγχάνεται βαθμός εξυπηρέτησης μεγαλύτερος του 99% χωρίς να επιβαρύνεται σημαντικά η λειτουργία του δικτύου, καθώς οι περιπτώσεις ανάγκης αναζήτησης πόρων είναι κάτω από το 4% των συνολικών συνδέσεων χρηστών.

Παράλληλα, στο 6ο κεφάλαιο έγινε επέκταση του αλγόριθμου δυναμικής κατανομής πόρων, δίνοντας στο δίκτυο την δυνατότητα να αυξομειώνει το μέγεθος δείγματος χρηστών που χρησιμοποιεί για να εξάγει την εμπειρική κατανομή του φορτίου δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, σε περίπτωση μεταβαλλόμενης κατανομής χρηστών, το δίκτυο ήταν σε θέση να μειώσει το μέγεθος

δείγματος ώστε να παρακολουθεί καλύτερα τη μεταβολή και να προσαρμοστεί γρηγορότερα.

Στο 7ο κεφάλαιο μελετήθηκαν σενάρια ad hoc γεγονότων, στα οποία οι χρήστες μπορούσαν να επιλέξουν έναν εκ των τριών τύπων υπηρεσίας (αναζήτησης στον ιστό, κατέβασμα video, real time applications) απαιτώντας έτσι διαφορετικό αριθμό πόρων σε κάθε περίπτωση. Για την προσομοίωση αυτή έγινε επέκταση του αλγόριθμου έτσι ώστε το δίκτυο να ελέγχει τα ποσοστά με τα οποία επιλέγονται οι τρεις υπηρεσίες και σε περίπτωση που υπάρξει απόκλιση από τα προβλεπόμενα ποσοστά και προκύψει ανάγκη για μεγαλύτερο αριθμό συνολικών διαθέσιμων πόρων, να διανέμονται συμπληρωματικοί πόροι στους ισχυρούς κόμβους. Έτσι δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος με τον οποίο το δίκτυο μπορούσε να πετύχει υψηλά επίπεδα απόδοσης (χαμηλό μέσο βάθος αναζήτησης, ποσοστό εξυπηρετηθέντων χρηστών για τους οποίους έγινε αναζήτηση πόρων κάτω του 4%, ποσοστό εξυπηρέτησης μεγαλύτερο του 99% για depthmax=0 και depthmax=1) κατά την προσομοίωση ad hoc γεγονότος στο οποίο υπήρχε μεταβολή στην κατανομή τηλεπικοινωνιακής κίνησης τόσο στον τρόπο που κατανέμονταν οι νέοι χρήστες στον χώρο S όσο και στα ποσοστά επιλογής των τριών υπηρεσιών.

Συμπερασματικά, ο προτεινόμενος αλγόριθμος δυναμικής κατανομής πόρων δίνει τη δυνατότητα στο δίκτυο να προσαρμόζεται γρήγορα στις μεταβαλλόμενες κατανομές ζήτησης πόρων, εκτιμώντας σε συνεχή βάση τις μεταβολές στη βάση της πραγματικής κίνησης, συμβάλλοντας έτσι στη διατήρηση υψηλής απόδοσης καθ' όλην τη διάρκεια κάλυψης ενός ad hoc γεγονότος. Με τη χρήση του αλγόριθμου αυτού, η εκ των προτέρων σωστή πρόβλεψη του τρόπου με τον οποίον θα διαμορφωθεί η ζήτηση πόρων κατά τη διάρκεια του γεγονότος δεν είναι πλέον αναγκαία προϋπόθεση για την καλή απόδοση του δικτύου. Εξάλλου, η σωστή εκ των προτέρων πρόβλεψη είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί, ειδικά στην περίπτωση που η πραγματική κατανομή χρηστών μεταβάλλεται με τον χρόνο. Μάλιστα, όπως παρατηρήθηκε στο 5ο κεφάλαιο, ακόμα και μια καλή εκ των προτέρων πρόβλεψη της κατανομής ζήτησης, οδηγεί σε χαμηλότερη απόδοση δικτύου σε σύγκριση με την περίπτωση στην οποία εξάγεται η εμπειρική κατανομή ζήτησης στη βάση της πραγματικής κίνησης κατά τη διάρκεια του ad hoc γεγονότος.

Σημειώνεται, τέλος, ότι η χρήση του αλγόριθμου δυναμικής κατανομής πόρων μπορεί να επεκταθεί, πέραν της κάλυψης ad hoc γεγονότων, σε δίκτυα που προορίζονται για σταθερή κάλυψη περιοχών.

8.2 Επεκτάσεις του αλγόριθμου δυναμικής κατανομής πόρων

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην προσαρμογή του δικτύου, μέσω της ανακατανομής πόρων, στις μεταβολές της κατανομής ζήτησης πόρων που προκύπτουν κατά την διάρκεια κάλυψης ενός ad hoc γεγονότος, εκτιμώντας τις μεταβολές αυτές στη βάση της πραγματικής ζήτησης σε συνεχή βάση, σε αντιδιαστολή με μεθόδους που κατανέμουν τους πόρους μια και μοναδική φορά βασιζόμενες σε μια εκ των προτέρων πρόβλεψη της κατανομής ζήτησης. Μια επέκταση της προτεινόμενης μεθόδου μπορεί να είναι ο συνδυασμός εκτίμησης και πρόβλεψης της κατανομής ζήτησης. Δηλαδή, στη βάση των πραγματικών δεδομένων που προκύπτουν από τα δείγματα χρηστών να γίνεται εκτίμηση όχι μόνο της πραγματικής κατανομής ζήτησης αλλά και κατάλληλων δεικτών του ρυθμού μεταβολής, με βάση τους οποίους να μπορεί να γίνει πρόβλεψη της κατανομής που θα προκύψει στο προσεχές χρονικό διάστημα. Αυτό μπορεί να γίνει με χρήση κατάλληλων χωροχρονικών μαθηματικών μοντέλων που επιτρέπουν τη συνεχή αναπροσαρμογή/ διόρθωση τους στη βάση των δεδομένων που προκύπτουν στην πορεία του χρόνου (βλ. Markov Chain).

Βιβλιογραφία

- [1] Cisco Visual Networking Index: *Global Mobile Data Traffic Forecast Update*, 2016–2021 White Paper, February 7, 2017.
<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>
- [2] Ericsson, *Ericsson mobility report - On the pulse of the networked society*, November 2015.
<https://www.ericsson.com/assets/local/news/2016/03/ericsson-mobility-report-nov-2015.pdf>
- [3] Πιτερός Κ., *Τηλεπικοινωνιακή κάλυψη πολυπληθών ad hoc γεγονότων*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Οκτώβριος 2016.
- [4] Μαντέλλου Σ., *Ad hoc ασύρματα δίκτυα πρόσβασης για πολυπληθείς εφαρμογές*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Μάρτιος 2018.
- [5] Linnartz J.P., JPL's Wireless Communication Reference Website / Cellular Telephone Networks
<http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr04/cellplan/cellsize.htm>.
- [6] Curescu C., *Utility-based Optimisation of Resource Allocation for Wireless Networks*, PhD Thesis, Linköping University, 2005.
<https://pdfs.semanticscholar.org/c415/9e3cfd43626587a2e098f096cc5e2b4351eb.pdf>
- [7] Salman T., *Cloud RAN: Basics, Advances and Challenges A Survey of C-RAN Basics, Virtualization, Resource Allocation, and Challenges*, Wireless and Mobile Networking, 2016.
<https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-16/ftp/cloudran.pdf>
- [8] China Mobile Research Institute. *C-RAN The Road Towards Green RAN*. White Paper, Version 2.5, October 2011.
<https://pdfs.semanticscholar.org/ea3/ca62c9d5653e4f2318aed9ddb8992a505d3c.pdf>
- [9] Checko, A., *Cloud Radio Access Network architecture. Towards 5G mobile networks*, PhD Thesis, Technical University of Denmark, 2016.
<http://orbit.dtu.dk/files/123876544/ACheckoPhDThesisCRANFinalRC.pdf>
- [10] Namba S., Matsunaka T., Warabino T., Kaneko S., and Y. Kishi Y., Colony-RAN architecture for future cellular network, In *Proc. Future Network & Mobile Summit (FutureNetw)*, pp. 1-8, Berlin 2012. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6294209>
- [11] Dunn O.J., Clark V., *Basic Statistics, A Primer for the Biomedical Sciences*, John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [12] Hinders D.C., Yates, D.S., Moore, D.S. and Starnes, D.S. *The Practice of Statistics (3rd Edition), Annotated Teacher's Edition*, W.H. Freeman and Company, 2008.
- [13] Berenson, M. L., Levine, D.M. and Szabat, K., *Estimation and Sample Size Determination for Finite Populations. Basic Business Statistics*, Global Edition (13th edition), Pearson, 2014.
- [14] Khan Academy, Conditions for inference on a proportion, October 29, 2010.
<https://www.khanacademy.org/math/ap-statistics/estimating-confidence-ap/one-sample-z-interval->

[proportion/a/conditions-inference-one-proportion](#)

[15] Kvam, P.H., Vidakovic, B., *Nonparametric Statistics with Applications to Science and Engineering*. John Wiley & Sons, Inc, 2007.

[16] Statistics How To, Alpha Level (Significance Level), November 6, 2012.
<http://www.statisticshowto.com/what-is-an-alpha-level/>

[17] Massey F. J., The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 46, No. 253 (Mar., 1951), pp. 68-78
https://r-forge.r-project.org/scm/viewvc.php/*checkout*/pkg/literature/1951-jamsta-massey-kolmsmirntest.pdf?root=glogis

[18] Frenzel L., What's The Difference Between FDD And TDD?, *Electronic Design*, 2012.
<https://www.electronicdesign.com/communications/what-s-difference-between-fdd-and-tdd>

[19] Frenzel L., An Introduction to LTE-Advanced: The Real 4G, *Electronic Design*, 2013.
<https://www.electronicdesign.com/4g/introduction-lte-advanced-real-4g>