



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Συστήματα Διαχείρισης Πόρων και Ελέγχου Αποδοχής Χρηστών σε  
Ασύρματα Δίκτυα**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ Δ. ΤΟΥΝΤΟΠΟΥΛΟΥ**

**Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού & Τεχνολογίας Υπολογιστών  
Πανεπιστημίου Πατρών**

Αθήνα, Ιούλιος 2005





## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

### Συστήματα Διαχείρισης Πόρων και Ελέγχου Αποδοχής Χρηστών σε Ασύρματα Δίκτυα

#### ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ Δ. ΤΟΥΝΤΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού & Τεχνολογίας Υπολογιστών  
Πανεπιστημίου Πατρών

**Συμβουλευτική Επιτροπή :** Νικόλαος Μήτρου

Γεώργιος Στασινόπουλος

Μιχαήλ Θεολόγου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 11<sup>η</sup> Ιουλίου 2005.

.....  
Ν. Μήτρου  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ε. Συκάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Γ. Στασινόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ε.Ν. Πρωτονοτάριος  
Καθηγητής ΕΜΠ.

.....  
Μ. Θεολόγου  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Χ. Δουλιγέρης  
Αν. Καθηγητής Παν. Πειραιώς

.....  
Π. Δεμέστιχας  
Επικ. Καθηγητής Παν. Πειραιώς

Αθήνα, Ιούλιος 2005

.....

**ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Δ. ΤΟΥΝΤΟΠΟΥΛΟΣ**

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © **ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Δ. ΤΟΥΝΤΟΠΟΥΛΟΣ, 2005.**

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 τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

*Αφιερώνεται στους γονείς μου, Δημήτριο και Ειρήνη,  
και τον αδερφό μου, Κανέλλο*



## Πρόλογος

Αισθάνομαι πανευτυχής που μετά από μακρά προσπάθεια πέντε χρόνων κατάφερα να ολοκληρώσω τη συγγραφή της διδακτορικής μου διατριβής. Η προσπάθεια υπήρξε, ομολογουμένως, δύσκολη και με πολλά εμπόδια. Όμως, πιστεύω ότι το αποτέλεσμα με δικαίωσε. Από την αρχή γνώριζα ότι ο χώρος της έρευνας απαιτεί γνώση, πειθαρχία, προσπάθεια και υπομονή. Εγώ, όμως, δεν πτοήθηκα και επιστράτευσα όλες μου τις δυνάμεις για να πετύχω το σκοπό μου. Ποιος είναι αυτός; Να μπορέσω να συνεισφέρω έστω και ένα λιθαράκι στον τομέα εκείνο της επιστήμης, με τον οποίο επέλεξα να ασχοληθώ. Έναν τομέα δύσκολο, αλλά με ξεχωριστό ενδιαφέρον.

Οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες και η πληροφορική είναι, ίσως, η επανάσταση του αιώνα μας. Με γοργά βήματα, κατάφεραν να κυριαρχήσουν στο προσκήνιο της επιστήμης και να αποτελούν, σήμερα, την ελπίδα του ανθρώπου για μία πιο ευχάριστη ζωή. Οι κινητές συσκευές γοητεύουν, γιατί σου προσφέρουν τη δυνατότητα να απελευθερωθείς από τους χωρικούς περιορισμούς που επιβάλλουν τα ενσύρματα δίκτυα. Όμως, οι συνθήκες για την καθολική τους επικράτηση δεν είναι ακόμα ώριμες, για πολλούς λόγους. Αυτό αποτέλεσε για μένα το στόχο και με ώθησε να ασχοληθώ στην εργασία μου αυτή με την έρευνα στα ασύρματα δίκτυα. Να συμβάλλω και εγώ με τις όποιες μου γνώσεις στο να ζήσουμε τη στιγμή που δε θα πρέπει να χρειάζεται να είμαστε καθηλωμένοι μπροστά από ένα σταθερό κουτί, κλεισμένοι στους τέσσερις τοίχους ενός σκοτεινού δωματίου, αλλά θα μπορούμε να χαρούμε τις τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες οπουδήποτε και οποτεδήποτε.

Η ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής κατέστη δυνατή χάρη στη συμπαράσταση και τη βοήθεια ενός μεγάλου αριθμού ανθρώπων. Όλοι αυτοί αλλά και ο καθένας τους ξεχωριστά συνέβαλαν τα μέγιστα για την επιτυχημένη ολοκλήρωση της ερευνητικής μου δραστηριότητας. Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να τους ευχαριστήσω προσωπικά για την ηθική και πνευματική τους υποστήριξη και να τους εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για τη βοήθειά τους.

Πρώτον απ' όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου κ. Νικόλαο Μήτρου, Καθηγητή του ΕΜΠ, ο οποίος μου έδειξε εμπιστοσύνη, με συμβούλεψε με την πείρα του και τις γνώσεις του και με στήριξε καθ' όλη τη διάρκεια της ερευνητικής μου προσπάθειας, από τη

στιγμή που έγινα δεχτός ως Υποψήφιος Διδάκτορας μέχρι και σήμερα. Τον ευχαριστώ θερμά για τη συνεργασία που είχαμε τόσο σε επιστημονικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο ανθρώπινων σχέσεων. Μαζί με τον κ. Ν. Μήτρου, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου για τις πολύτιμες συμβουλές τους προς τα υπόλοιπα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, τον κ. Γ. Στασινόπουλο, Καθηγητή ΕΜΠ, και τον κ. Μ. Θεολόγου, Καθηγητή ΕΜΠ. Θα ήταν μεγάλη μου παράλειψη να μην απευθύνω τις ευχαριστίες μου στον κ. Ε. Πρωτονοτάριο, Καθηγητή ΕΜΠ, ο οποίος πίστεψε στις δυνατότητές μου και μου έδωσε την ευκαιρία να ενταχθώ στην ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Τηλεπικοινωνιών του ΕΜΠ. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμησή μου και τις ευχαριστίες μου προς τον Δρ. Κίμων Κοντοβασίλη, Ερευνητή του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, ο οποίος, με την επιστημονική του σκέψη, με καθοδήγησε σε πολλά σημεία της ερευνητικής μου προσπάθειας, και τον Παναγιώτη Δεμέστιχα, Επίκουρο Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πειραιώς, για τις πολύτιμες συμβουλές του και την εποικοδομητική συνεργασία που είχαμε σε κρίσιμα θέματα που με απασχόλησαν στην εργασία αυτή.

Ιδιαίτερη αναφορά αξίζουν οι συνάδελφοί μου στα Εργαστήρια Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων Υπολογιστών, οι οποίοι αποδείχθηκαν για εμένα πολύτιμοι συνεργάτες και φίλοι. Μαζί τους έζησα ξεχωριστές στιγμές και οφείλω να ομολογήσω ότι με βοήθησαν σε μεγάλο βαθμό να ανταπεξέλθω στις απαιτήσεις αυτής της δοκιμασίας. Συνεπώς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους Παναγιώτη Σταθόπουλο, Δημήτριο Κουή και Βέρα-Αλεξάνδρα Σταυρουλάκη, με τους οποίους συνεργάστηκα στενά όλα αυτά τα χρόνια σε πολλά ερευνητικά προγράμματα και σε πλήθος δημοσιεύσεων και εργασιών, από τις οποίες προήλθε η παρούσα διατριβή. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Σταυρούλα Ζώη, Παναγιώτη Καλλιάρη, Δημήτριο Αθανάσιο Σωτηρίου, Παναγιώτη Παπαγεωργίου, Δημήτριο Λουκάτο, Εμμανουήλ Σολιδάκη, Γεώργιο Κουντουράκη, Νικόλαο Κουτσούρη και Λουίζα-Μαγδαληνή Παπαδοπούλου. Παράλληλα, δε θα ήθελα να μην αναφερθώ και στους υπόλοιπους ανθρώπους του Εργαστηρίου, οι οποίοι δημιούργησαν όλο αυτόν τον καιρό ένα πρόσχαρο και φιλικό περιβάλλον, το οποίο, σίγουρα θα μου λείπει και θα αναπολώ για πολλά χρόνια. Έτσι, ευχαριστώ πολύ τους Στυλιανό Ζώντο, Βασίλειο Σταθόπουλο, Ιωάννη Δεσποτόπουλο, Χαράλαμπο Λιναρδάκη, Ελένη-Κατερίνα Λελίγκου, Απόστολο Αναγνώστου, Νικόλαο Λιαμπότη και Φώτη Λαζαράκη, ο οποίος υπήρξε ο πρώτος μου συνεργάτης, όταν πρωτοήρθα στο Εργαστήριο Τηλεπικοινωνιών, αλλά και όλους τους υπόλοιπους ανθρώπους που κατά καιρούς αποτέλεσαν το δυναμικό του Εργαστηρίου. Στο σημείο αυτό, θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω για τη βοήθειά τους σε αυτήν την εργασία τους Αυγουστίνο Φιλιππουπολίτη, Πέτρο Αναπλιώτη και Ευστράτιο Τζωάννο. Επίσης, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω και όλους εκείνους, με τους οποίους συνεργάστηκα στα πλαίσια διαφόρων ερευνητικών προγραμμάτων και προτάσεων έργου, όπως τους Λέκτορες του Πανεπιστημίου Αιγαίου Χαράλαμπο Σκιάνη και Γεώργιο Κορμέντζα, τους Σπύρο Λούντζη και Μάριο Σεντρή από το τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών και τους Ιωάννη Μαρκουλιδάκη, Χρήστο Δεσσιניώτη και Κωνσταντίνο Κυπρή από την εταιρία Vodafone Hellas. Πιστεύω ότι η συνεργασία μαζί τους αποτέλεσε ένα πολύ καλό



παράδειγμα για τη μελλοντική πορεία μου στον χώρο της εργασίας και, σίγουρα, αισθάνομαι ευχαριστημένος που με πολλά από τα άτομα αυτά εξακολουθώ να διατηρώ φιλικές σχέσεις.

Ολοκληρώνοντας αυτές τις γραμμές, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη αγάπη μου στην οικογένειά μου και τα οικεία μου πρόσωπα, τα οποία υπήρξαν συνοδοιπόροι της όλης μου προσπάθειας και μου προσέφεραν απλόχερα τα απαραίτητα ψυχικά και συναισθηματικά εφόδια για να ανταπεξέλθω στις υποχρεώσεις μου. Γι' αυτό, θα ήθελα να αφιερώσω την παρούσα διατριβή στον πατέρα μου Δημήτριο, την μητέρα μου Ειρήνη και τον αδερφό μου Κανέλλο και να τους ευχαριστήσω από βάθος καρδιάς για τη συμπαράστασή τους στον δύσκολο αγώνα μου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ειρήνη-Γαρυφαλιά Κοντέα, γιατί με τη συμπαράστασή της και την αγάπη της συνέβαλε και αυτή στην ολοκλήρωση της προσπάθειάς μου.

*Βασίλειος Α. Τουντόπουλος*

*Αθήνα, 7 Ιουνίου 2005*



## Πίνακας Περιεχομένων

|            |                                                                       |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Κεφάλαιο 1 | Εισαγωγή.....                                                         | 1  |
| 1.1.       | Αντικείμενο της διατριβής.....                                        | 1  |
| 1.2.       | Δομή της διατριβής.....                                               | 4  |
| 1.3.       | Αναφορές.....                                                         | 8  |
| Κεφάλαιο 2 | Μελλοντικά Ασύρματα Συστήματα Τέταρτης Γενιάς .....                   | 11 |
| 2.1.       | Εισαγωγή .....                                                        | 11 |
| 2.2.       | Σχήματα αρχιτεκτονικών Διαλειτουργικότητας Ασύρματων Δικτύων B3G..... | 12 |
| 2.2.1.     | Γενικές Απαιτήσεις Διαλειτουργικότητας.....                           | 12 |
| 2.2.2.     | Απαιτήσεις διαλειτουργικότητας βάσει του οργανισμού 3GPP.....         | 15 |
| 2.2.3.     | Προσεγγίσεις Αρχιτεκτονικών Διαλειτουργικότητας.....                  | 16 |
| 2.2.4.     | Αρχιτεκτονική Συμπαγούς Σύζευξης.....                                 | 17 |
| 2.2.4.1.   | WLAN λειτουργία προσαρμογής .....                                     | 19 |
| 2.2.5.     | Αρχιτεκτονική Χαλαρής Σύζευξης.....                                   | 20 |
| 2.2.6.     | Mobile IP.....                                                        | 22 |
| 2.3.       | Αρχιτεκτονική Μελλοντικών Συστημάτων Τέταρτης Γενιάς .....            | 24 |
| 2.3.1.     | Αρχιτεκτονική .....                                                   | 24 |
| 2.3.2.     | Προκλήσεις για την εισαγωγή στα συστήματα 4G .....                    | 27 |
| 2.4.       | Επιχειρηματικό μοντέλο.....                                           | 30 |
| 2.4.1.     | Πάροχος Υπηρεσίας .....                                               | 32 |
| 2.4.2.     | Πάροχος Περιεχομένου Υπηρεσίας.....                                   | 33 |
| 2.4.3.     | Πάροχος Δικτυακών Πόρων.....                                          | 33 |
| 2.4.4.     | Αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οντοτήτων.....                             | 33 |
| 2.5.       | Μεσίτες.....                                                          | 35 |
| 2.5.1.     | Μεσίτης Υπηρεσίας.....                                                | 36 |
| 2.5.2.     | Μεσίτης Δικτυακών Πόρων .....                                         | 39 |
| 2.6.       | Τεχνολογίες Υλοποίησης - Τεχνολογία Πρακτόρων.....                    | 42 |
| 2.6.1.     | Εισαγωγή .....                                                        | 42 |
| 2.6.2.     | Πράκτορες .....                                                       | 43 |
| 2.6.3.     | Ορισμός .....                                                         | 43 |
| 2.6.4.     | Είδη Πρακτόρων.....                                                   | 44 |
| 2.6.4.1.   | Έξυπνοι πράκτορες.....                                                | 44 |

|            |                                                                           |     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.6.4.2.   | Κινητοί πράκτορες.....                                                    | 46  |
| 2.6.5.     | Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων.....                                        | 46  |
| 2.6.6.     | Εφαρμογή των πρακτόρων στη διαχείριση των πόρων.....                      | 47  |
| 2.6.7.     | Προδιαγραφές και Μοντέλα Αναφοράς.....                                    | 49  |
| 2.7.       | Ποιότητα Υπηρεσίας.....                                                   | 50  |
| 2.7.1.     | Ορισμός και βασικές παράμετροι QoS.....                                   | 50  |
| 2.7.2.     | Βασικοί μηχανισμοί QoS.....                                               | 55  |
| 2.7.3.     | Πρότυπα QoS αρχιτεκτονικής.....                                           | 58  |
| 2.7.4.     | Παράμετροι Αξιολόγησης των Μηχανισμών Παροχής Ποιότητας Υπηρεσίας.....    | 59  |
| 2.8.       | Συμπεράσματα.....                                                         | 61  |
| 2.9.       | Αναφορές.....                                                             | 61  |
| Κεφάλαιο 3 | Προσδιορισμός Χωρητικότητας Ασύρματων Δικτύων.....                        | 65  |
| 3.1.       | Εισαγωγή.....                                                             | 65  |
| 3.2.       | Χωρητικότητα Ασύρματων Δικτύων.....                                       | 66  |
| 3.2.1.     | Εκτίμηση της χρησιμοποίησης ασύρματου καναλιού.....                       | 67  |
| 3.3.       | General Packet Radio Service (GPRS).....                                  | 69  |
| 3.3.1.     | Enhanced Data Rates for GSM/GPRS Evolution (EDGE).....                    | 73  |
| 3.4.       | Universal Mobile Telecommunication System (UMTS).....                     | 74  |
| 3.5.       | Wireless Local Area Network (WLAN).....                                   | 78  |
| 3.5.1.     | Αρχιτεκτονική.....                                                        | 78  |
| 3.5.2.     | Περιγραφή των μηχανισμών του MAC.....                                     | 80  |
| 3.5.3.     | Φυσικό στρώμα WLAN.....                                                   | 84  |
| 3.6.       | Υπολογισμός της χωρητικότητας του δικτύου WLAN.....                       | 86  |
| 3.6.1.     | Περιγραφή ενός απλού μοντέλου υπολογισμού της χωρητικότητας.....          | 86  |
| 3.6.2.     | Συμπεράσματα και Παρατηρήσεις.....                                        | 89  |
| 3.7.       | Προσέγγιση Διαθέσιμης Χωρητικότητας.....                                  | 91  |
| 3.7.1.     | Επίδραση των χαρακτηριστικών του ασύρματου καναλιού στη χωρητικότητα..... | 91  |
| 3.7.2.     | Μέθοδος Προσδιορισμού της Διαθέσιμης Χωρητικότητας.....                   | 93  |
| 3.8.       | Συμπεράσματα.....                                                         | 97  |
| 3.9.       | Αναφορές.....                                                             | 98  |
| 3.10.      | Βιβλιογραφία.....                                                         | 102 |
| Κεφάλαιο 4 | Ενιαίο Σύστημα Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων.....             | 103 |
| 4.1.       | Εισαγωγή.....                                                             | 103 |

|            |                                                                                       |     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.       | Γενική Αρχιτεκτονική του Συστήματος .....                                             | 105 |
| 4.2.1.     | Στρώμα διαπραγμάτευσης υπηρεσιών .....                                                | 106 |
| 4.2.2.     | Στρώμα διαχείρισης πόρων .....                                                        | 108 |
| 4.2.3.     | Επίπεδα διαχείρισης του Παρόχου Υπηρεσιών .....                                       | 109 |
| 4.3.       | Αλγόριθμος Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων.....                            | 111 |
| 4.3.1.     | Ορισμός του προβλήματος Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων ...                | 111 |
| 4.3.2.     | Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων ..... | 114 |
| 4.4.       | Παράμετροι του προβλήματος .....                                                      | 118 |
| 4.4.1.     | Ανάλυση συμπεριφοράς του Παρόχου Δικτυακών Πόρων .....                                | 118 |
| 4.4.1.1.   | Μηχανισμοί Ελέγχου Αποδοχής Ροών .....                                                | 119 |
| 4.4.1.2.   | Καθορισμός τιμολογιακής πολιτικής ενός Παρόχου Δικτυακών Πόρων .....                  | 121 |
| 4.4.2.     | Ανάλυση συμπεριφοράς του Παρόχου Υπηρεσιών.....                                       | 122 |
| 4.4.2.1.   | Συναρτήσεις Χρησιμοποίησης .....                                                      | 122 |
| 4.5.       | Αποτελέσματα .....                                                                    | 123 |
| 4.5.1.     | Πρώτο Σενάριο .....                                                                   | 124 |
| 4.5.2.     | Δεύτερο σενάριο.....                                                                  | 130 |
| 4.6.       | Συμπεράσματα.....                                                                     | 133 |
| 4.7.       | Αναφορές.....                                                                         | 134 |
| 4.8.       | Βιβλιογραφία.....                                                                     | 136 |
| Κεφάλαιο 5 | Μελέτη και Μοντελοποίηση της Κίνησης Ασύρματων Δικτύων IP .....                       | 137 |
| 5.1.       | Εισαγωγή .....                                                                        | 137 |
| 5.2.       | Πρότυπα και μοντέλα κίνησης IP .....                                                  | 138 |
| 5.3.       | Εισαγωγικά στα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου UDP .....                               | 142 |
| 5.4.       | Εισαγωγικά στα χαρακτηριστικά της TCP κίνησης .....                                   | 144 |
| 5.5.       | Μοντελοποίηση κίνησης TCP .....                                                       | 148 |
| 5.6.       | Κίνηση με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας .....                                        | 149 |
| 5.6.1.     | Ύπαρξη κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας στα IP δίκτυα .....                  | 149 |
| 5.6.2.     | Χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας της κίνησης .....                                      | 153 |
| 5.6.3.     | Επίδραση της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας στην επίδοση δικτύων .....     | 158 |
| 5.6.4.     | Μοντέλα προσέγγισης της αυτό-ομοιότητας.....                                          | 159 |
| 5.7.       | Συμπεράσματα.....                                                                     | 161 |

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.8. Αναφορές.....                                                                                           | 162 |
| Κεφάλαιο 6 Προσέγγιση κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας με Μαρκοβιανά Μοντέλα .....                  | 167 |
| 6.1. Εισαγωγή.....                                                                                           | 167 |
| 6.2. Εισαγωγή στα Μαρκοβιανά Μοντέλα Ροής Ρευστού .....                                                      | 168 |
| 6.3. Μαρκοβιανό Μοντέλο για την περιγραφή των χαρακτηριστικών αυτό-ομοιότητας της κίνησης.....               | 173 |
| 6.3.1. Εισαγωγή.....                                                                                         | 173 |
| 6.3.2. Περιγραφή του μοντέλου .....                                                                          | 175 |
| 6.3.3. Επιλογή της κατάλληλης κλίμακας χρόνου παρατήρησης.....                                               | 181 |
| 6.4. Αποτελέσματα .....                                                                                      | 182 |
| 6.4.1. Επίδραση των παραμέτρων προσέγγισης της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας.....                | 182 |
| 6.4.1.1. Επίδραση της Hurst παραμέτρου.....                                                                  | 182 |
| 6.4.1.2. Επίδραση του αριθμού των υπερτιθέμενων IFP πηγών.....                                               | 185 |
| 6.4.1.3. Επίδραση της ομοιογένειας και του αριθμού των πηγών .....                                           | 188 |
| 6.4.2. Πειράματα .....                                                                                       | 190 |
| 6.4.2.1. Διαδικασία πειραμάτων .....                                                                         | 190 |
| 6.4.2.2. Μελέτη του αλγορίθμου προσέγγισης της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας .....               | 193 |
| 6.4.2.3. Παρατηρήσεις για το σύνολο των πειραμάτων .....                                                     | 202 |
| 6.5. Συμπεράσματα.....                                                                                       | 207 |
| 6.6. Αναφορές.....                                                                                           | 207 |
| 6.7. Παράρτημα .....                                                                                         | 209 |
| 6.7.1. Περιγραφή μοντέλου Con για την προσέγγιση της κίνησης με εξαρτήσεις από μεγάλες κλίμακες χρόνου ..... | 209 |
| Κεφάλαιο 7 Έλεγχος Αποδοχής Ροών .....                                                                       | 215 |
| 7.1. Εισαγωγή.....                                                                                           | 215 |
| 7.2. Απαιτήσεις Ελέγχου Αποδοχής.....                                                                        | 218 |
| 7.3. Ορισμός του προβλήματος .....                                                                           | 220 |
| 7.3.1. Παράμετροι του προβλήματος .....                                                                      | 224 |
| 7.3.1.1. Εγγύηση Καθυστέρησης.....                                                                           | 224 |
| 7.3.1.2. Έλεγχος Αποδοχής .....                                                                              | 226 |
| 7.3.1.3. Χρονικό Διάστημα Ελέγχου .....                                                                      | 226 |

|            |                                                                                         |     |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.4.       | Εισαγωγικά στη Θεωρία Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης .....                                     | 227 |
| 7.4.1.     | Ορισμός .....                                                                           | 228 |
| 7.4.2.     | Υπολογισμός της συνάρτησης ισοδύναμου εύρους ζώνης .....                                | 231 |
| 7.5.       | Δυναμικό Σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών .....                                            | 232 |
| 7.5.1.     | Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική .....                                                        | 232 |
| 7.6.       | Αποδοχέας Ροών .....                                                                    | 238 |
| 7.7.       | Κλίμακα Χρόνου Παρατήρησης των Πραγματικών Δεδομένων .....                              | 243 |
| 7.8.       | Συμπεράσματα .....                                                                      | 247 |
| 7.9.       | Αναφορές .....                                                                          | 247 |
| Κεφάλαιο 8 | Αποτελέσματα .....                                                                      | 253 |
| 8.1.       | Εισαγωγή .....                                                                          | 253 |
| 8.2.       | Επίδοση του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών .....                            | 253 |
| 8.2.1.     | Καθορισμός του χωρίου αποδοχής χρηστών .....                                            | 253 |
| 8.2.2.     | Εξομοιώσεις .....                                                                       | 255 |
| 8.2.2.1.   | Μεταβολή της Συνάρτησης Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης .....                                   | 257 |
| 8.2.2.2.   | Δυναμική αλλαγή φορτίου στο δίκτυο .....                                                | 258 |
| 8.3.       | Επίδραση του αλγορίθμου Ελέγχου Αποδοχής Ροών στη διαχείριση του<br>ραδιοφάσματος ..... | 266 |
| 8.3.1.     | Πρώτο Σενάριο .....                                                                     | 266 |
| 8.3.2.     | Δεύτερο Σενάριο .....                                                                   | 270 |
| 8.3.3.     | Τρίτο Σενάριο .....                                                                     | 272 |
| 8.3.4.     | Τέταρτο Σενάριο .....                                                                   | 276 |
| 8.4.       | Συμπεράσματα .....                                                                      | 279 |
| 8.5.       | Αναφορές .....                                                                          | 279 |
| Κεφάλαιο 9 | Γενικά Συμπεράσματα και Μελλοντικά Βήματα .....                                         | 281 |
| 9.1.       | Σύνοψη της διατριβής και συμπεράσματα .....                                             | 281 |
| 9.2.       | Ανακεφαλαίωση των καινοτομικών στοιχείων της διατριβής .....                            | 285 |
| 9.3.       | Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση .....                                                   | 288 |

## Πίνακας Σχημάτων

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 2-1. Απεικόνιση μελλοντικού ιεραρχικά δομημένου ασύρματου συστήματος.....                                                  | 13 |
| Σχήμα 2-2: Αρχιτεκτονικές διαλειτουργικότητας ασύρματων συστημάτων κατά ETSI. ....                                               | 17 |
| Σχήμα 2-3: Βασικές αρχές της αρχιτεκτονικής συμπαγούς σύζευξης.....                                                              | 18 |
| Σχήμα 2-4: Πιστοποίηση χρηστών WLAN με βάση την κάρτα SIM.....                                                                   | 21 |
| Σχήμα 2-5: Ροή πληροφορίας των πακέτων IP στο Mobile IP.....                                                                     | 23 |
| Σχήμα 2-6. Πρότυπο μοντέλο αρχιτεκτονικής μελλοντικού ασύρματου συστήματος τέταρτης γενιάς.....                                  | 25 |
| Σχήμα 2-7. Προσαρμογή της υπάρχουσας στοίβας πρωτοκόλλων για την υποστήριξη των συστημάτων 4G.....                               | 28 |
| Σχήμα 2-8. Προτεινόμενο Επιχειρηματικό Μοντέλο .....                                                                             | 31 |
| Σχήμα 2-9. Παράμετροι αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων επιχειρηματικών οντοτήτων. ....                                         | 34 |
| Σχήμα 2-10. Επιχειρηματικό μοντέλο με βάση την έννοια της μεσιτείας.....                                                         | 35 |
| Σχήμα 2-11. Παράμετροι επιλογής του κατάλληλου Παρόχου Υπηρεσιών από τον Μεσίτη Υπηρεσίας. ....                                  | 38 |
| Σχήμα 2-12. Παράμετροι επιλογής του κατάλληλου Παρόχου Δικτυακών Πόρων από τον Μεσίτη Δικτυακών Πόρων.....                       | 41 |
| Σχήμα 2-13. Επίδραση των μηχανισμών διαχείρισης της ποιότητας μιας υπηρεσίας στην στοίβα πρωτοκόλλων .....                       | 50 |
| Σχήμα 2-14. Ένα δομημένο μοντέλο για την αρχιτεκτονική ενός συστήματος επικοινωνιών πολυμέσων με αναφορά στο QoS.....            | 51 |
| Σχήμα 3-1. Η αρχιτεκτονική του συστήματος GPRS.....                                                                              | 70 |
| Σχήμα 3-2: Η αρχιτεκτονική του δικτύου πρόσβασης του UMTS.....                                                                   | 75 |
| Σχήμα 3-3. Διαστρωμάτωση του προτύπου 802.11 .....                                                                               | 78 |
| Σχήμα 3-4. Βασικές τοπολογίες δικτύων WLAN, α) ανεξάρτητο δίκτυο (ad-hoc mode) και β) δίκτυο υποδομής (infrastructure mode)..... | 79 |
| Σχήμα 3-5. Θετική επιβεβαίωση εκπομπής δεδομένων .....                                                                           | 81 |
| Σχήμα 3-6. Λειτουργία των μηχανισμών πρόσβασης μέσου: α) Βασικός Μηχανισμός Πρόσβασης και β) RTS/CTS Μηχανισμός Πρόσβασης.....   | 82 |
| Σχήμα 3-7. Σχέσεις διαπλεσιακών διακένων.....                                                                                    | 84 |
| Σχήμα 3-8. Χωρητικότητα συναρτήσεως του αριθμού των ενεργών κινητών σταθμών σε ένα δίκτυο WLAN 802.11b .....                     | 90 |



|                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 3-9. Επίδραση του μέσου μεταφερόμενου φορτίου στη χωρητικότητα του δικτύου WLAN 802.11b.....                                                           | 90  |
| Σχήμα 3-10. Επίδραση του μέγιστου αριθμού προσπαθειών επαναμετάδοσης για την φάση backoff στη χωρητικότητα του δικτύου WLAN 802.11b. ....                    | 91  |
| Σχήμα 3-11. Σχηματικό διάγραμμα ουράς αναμονής σε ένα Access Point.....                                                                                      | 94  |
| Σχήμα 3-12. Πλαίσιο ασύρματου δικτύου για την ανάλυση της επίδοσης του ασύρματου μέσου. ....                                                                 | 95  |
| Σχήμα 3-13. Μαρκοβιανό Μοντέλο Ροής Ρευστού Gilbert-Elliott.....                                                                                             | 95  |
| Σχήμα 4-1. Αρχιτεκτονική Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων. ....                                                                  | 106 |
| Σχήμα 4-2. Παράδειγμα εφαρμογής των πολιτικών του Παρόχου Υπηρεσιών. ....                                                                                    | 112 |
| Σχήμα 4-3. Διαγραμματική απεικόνιση του προβλήματος επιλογής βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων. ....                                                         | 116 |
| Σχήμα 4-4. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου επιλογής βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων. ....                                                                    | 117 |
| Σχήμα 4-5. Δομή της περιοχής εξυπηρέτησης για τα πειράματα.....                                                                                              | 124 |
| Σχήμα 4-6. Σύνολο αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου για το πρώτο σενάριο. ....                                                                   | 128 |
| Σχήμα 4-7. Σύνολο αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου για το δεύτερο σενάριο. ....                                                                 | 132 |
| Σχήμα 5-1. Ενιαίο πρότυπο για την κίνηση που παράγεται από τα διάφορα είδη υπηρεσιών.....                                                                    | 140 |
| Σχήμα 5-2. Ιεραρχική δόμηση για το πρότυπο κίνησης χρηστών.....                                                                                              | 141 |
| Σχήμα 5-3. Συγκριτική απεικόνιση κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας (αριστερά) και κίνησης Poisson (δεξιά) σε πέντε διαφορετικές κλίμακες χρόνου..... | 152 |
| Σχήμα 5-4. Λογαριθμική μεταβολή της διασποράς συναρτήσει του βήματος lag για LRD και SRD είδη κίνησης.....                                                   | 156 |
| Σχήμα 6-1. Μοντέλο αναφοράς για την περιγραφή της κίνησης αυτό-ομοιότητας, με βάση την υπέρθεση ανεξάρτητων πηγών MMFP.....                                  | 174 |
| Σχήμα 6-2. Σχεδιάγραμμα αλγορίθμου για την προσέγγιση της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας με Μαρκοβιανά μοντέλα MMFP.....                          | 179 |
| Σχήμα 6-3. Πιθανότητα υπέρβασης του ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα σαν συνάρτηση της καθυστέρησης για τις διάφορες τιμές του H.....                      | 184 |
| Σχήμα 6-4. Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της ακολουθίας των δειγμάτων της ροής IP για α) τρεις, β) τέσσερις και γ) πέντε υπερτιθέμενες IFP πηγές.....             | 187 |

|                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 6-5. Πιθανότητα υπέρβασης του ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα σαν συνάρτηση της καθυστέρησης ανάλογα με τον αριθμό των υπερτιθέμενων IFP πηγών .....                  | 188 |
| Σχήμα 6-6. Πιθανότητα υπέρβασης του ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα σαν συνάρτηση της καθυστέρησης ανάλογα με τον αριθμό των πολυπλεκόμενων πηγών .....                     | 189 |
| Σχήμα 6-7. Πιθανότητα υπέρβασης του ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα σαν συνάρτηση της καθυστέρησης για διαφορετικό βαθμό ομοιογένειας των πολυπλεκόμενων πηγών .....        | 190 |
| Σχήμα 6-8. Πλατόφορμα και τοπολογία δικτύου για τη διεξαγωγή πειραμάτων.....                                                                                                   | 191 |
| Σχήμα 6-9. Παράδειγμα αρχείου κειμένου με τη διαθέσιμη από το πρόγραμμα windump πληροφορία .....                                                                               | 192 |
| Σχήμα 6-10. Πιθανότητα υπέρβασης ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα συναρτήσει της καθυστέρησης για την υπηρεσία Serv1 για το πρώτο πείραμα .....                              | 195 |
| Σχήμα 6-11. Πιθανότητα υπέρβασης ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα συναρτήσει της καθυστέρησης για την υπηρεσία Serv2 για το δεύτερο πείραμα.....                             | 197 |
| Σχήμα 6-12. Πιθανότητα υπέρβασης ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα συναρτήσει της καθυστέρησης για την συνδυασμένη κίνηση του τρίτου πειράματος. ....                         | 198 |
| Σχήμα 6-13. Πιθανότητα υπέρβασης ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα συναρτήσει της καθυστέρησης για την υπηρεσία Serv1 για το τέταρτο πείραμα.....                             | 200 |
| Σχήμα 6-14. Πιθανότητα υπέρβασης ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα συναρτήσει της καθυστέρησης για την συνολική κίνηση για το πέμπτο πείραμα .....                            | 202 |
| Σχήμα 6-15. Ρυθμός μετάδοσης ( $\alpha$ ) και διέλευση ( $\beta$ ) για την υπηρεσία Serv2 .....                                                                                | 204 |
| Σχήμα 6-16. Μελέτη της κίνησης που παράγεται από την υπηρεσία Serv1 για το πρώτο και το τρίτο πείραμα: ( $\alpha$ ) ρυθμός μετάδοσης και ( $\beta$ ) διέλευση.....             | 205 |
| Σχήμα 6-17 Μελέτη της κίνησης που παράγεται από την ροή P1 της υπηρεσίας Serv1 για το πρώτο και το πέμπτο πείραμα: ( $\alpha$ ) ρυθμός μετάδοσης και ( $\beta$ ) διέλευση..... | 206 |
| Σχήμα 6-18. Μελέτη της κίνησης που παράγεται από την υπηρεσία Serv1 για το πρώτο και το τρίτο πείραμα: ( $\alpha$ ) ρυθμός μετάδοσης και ( $\beta$ ) διέλευση.....             | 206 |
| Σχήμα 7-1. Άθροιση κίνησης που διέρχεται από ένα κανάλι επικοινωνίας .....                                                                                                     | 221 |
| Σχήμα 7-2. Μοντέλο αναφοράς ενός αποδοτικού μηχανισμού Ελέγχου Αποδοχής Ροών.....                                                                                              | 222 |
| Σχήμα 7-3. Περιγραφή του προβλήματος σχεδιασμού ενός συστήματος ελέγχου αποδοχής.....                                                                                          | 223 |
| Σχήμα 7-4. Καμπύλες άφιξης πακέτων, εισόδου στον ταμιευτήρα και εξυπηρέτησης.....                                                                                              | 224 |
| Σχήμα 7-5. Λογική απεικόνιση των διαδικασιών Ελέγχου Αποδοχής Υπηρεσιών IP στην στοίβα πρωτοκόλλων. ....                                                                       | 232 |
| Σχήμα 7-6. Στρώμα διαχείρισης πόρων των Παρόχων Δικτυακών Πόρων στα πλαίσια του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων. ....                             | 233 |

|                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 7-7. Αρχιτεκτονική και βασικά δομικά στοιχεία του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών.....                                                                                | 235 |
| Σχήμα 7-8. Διάγραμμα ροής για την ανανέωση των πληροφοριών του Αποδοχέα Ροών.....                                                                                                      | 239 |
| Σχήμα 7-9. Λειτουργία ελέγχου αποδοχής του Αποδοχέα Ροών. ....                                                                                                                         | 241 |
| Σχήμα 7-10. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής του Αποδοχέα Ροών.....                                                                                                      | 242 |
| Σχήμα 8-1. Χωρίο αποδοχής χρηστών για διαφορετικές διαμορφώσεις των ροών κίνησης F1 και F2.....                                                                                        | 255 |
| Σχήμα 8-2. Μεταβολή της Συνάρτησης του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης συναρτήσει των ποιοτικών χαρακτηριστικών της υπηρεσίας Y3 .....                                                         | 258 |
| Σχήμα 8-3. Μεταβολή του αριθμού των χρηστών της υπηρεσίας Y2 σε συνδυασμό με χρήστες της υπηρεσίας Y1 για ποιότητα $(d, pr) = (1.5, 10^{-3})$ .....                                    | 259 |
| Σχήμα 8-4. Επαλήθευση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής με χρήση εξομοίωσης.....                                                                                        | 261 |
| Σχήμα 8-5. Μεταβολή του αριθμού των χρηστών της υπηρεσίας Y2 σε συνδυασμό με χρήστες της υπηρεσίας Y1 για ποιότητα $(d, pr) = (1.5, 10^{-4})$ .....                                    | 261 |
| Σχήμα 8-6. Μεταβολή του αριθμού των χρηστών της υπηρεσίας Y2 σε συνδυασμό με ένα χρήστη της υπηρεσίας Y1 και ένα της Y3 για $(d_{Y1}, pr_{Y1}) = (1.5, 10^{-3})$ .....                 | 263 |
| Σχήμα 8-7. Μεταβολή του αριθμού των χρηστών της υπηρεσίας Y2 σε συνδυασμό με ένα χρήστη της υπηρεσίας Y1 και ένα της Y3 για διαφορετικούς συνδυασμούς κριτηρίων ποιότητας της Y1 ..... | 264 |
| Σχήμα 8-8. Μεταβολή του αριθμού των χρηστών της υπηρεσίας Y2 σε συνδυασμό με ένα χρήστη της υπηρεσίας Y1 και τρεις της Y3 .....                                                        | 265 |
| Σχήμα 8-9. Μεταβολή του αριθμού των χρηστών της υπηρεσίας Y2 για διάφορους χρήστες της υπηρεσίας Y3 μόνο .....                                                                         | 265 |
| Σχήμα 8-10. Σύνολο αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου για το πρώτο σενάριο. ....                                                                                            | 270 |
| Σχήμα 8-11. Σύνολο αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου για το δεύτερο σενάριο. ....                                                                                          | 272 |
| Σχήμα 8-12. Σύνολο αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου για το τρίτο σενάριο. ....                                                                                            | 275 |
| Σχήμα 8-13. Σύνολο αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου για το τέταρτο σενάριο. ....                                                                                          | 278 |

## Πίνακας Πινάκων

|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 2.1. Ενδεικτικές παράμετροι QoS στα διάφορα στρώματα του μοντέλου αναφοράς.....                                 | 52  |
| Πίνακας 2.2. Παράδειγμα εφαρμογών με QoS χαρακτηριστικά.....                                                            | 53  |
| Πίνακας 3-1. Παράμετροι για τα διάφορα σχήματα κωδικοποίησης συχνότητας του δικτύου GPRS.....                           | 71  |
| Πίνακας 3-2. Spreading factor, ρυθμός μετάδοσης συμβόλων και ρυθμός μετάδοσης bits για ένα σύστημα WCDMA.....           | 76  |
| Πίνακας 3-3. Τυπικές τιμές των MAC παραμέτρων ανάλογα με το υποκείμενο PHY επίπεδο ....                                 | 82  |
| Πίνακας 3-4. Παράμετροι για τον υπολογισμό της διέλευσης κορεσμού στο WLAN .....                                        | 89  |
| Πίνακας 4-1. Σενάρια οικονομικής πολιτικής του $np_2$ .....                                                             | 125 |
| Πίνακας 4-2. Διάνυσμα της προσφερόμενης κίνησης ανά κομμάτι της περιοχής εξυπηρέτησης                                   | 125 |
| Πίνακας 4-3. Παράμετροι απαιτήσεων των χρηστών για τις τέσσερις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. ....                     | 127 |
| Πίνακας 4-4. Διαθέσιμη και κατειλημμένη χωρητικότητα του $np_2$ για τις τέσσερις περιπτώσεις του δευτέρου σεναρίου..... | 131 |
| Πίνακας 5-1. Εφαρμογές διαδικτύου και τα αντίστοιχα πρωτόκολλα μεταφοράς.....                                           | 143 |
| Πίνακας 5-2. Παράδειγμα απαιτήσεων εφαρμογών IP και του τύπου της πληροφορίας που μεταφέρουν.....                       | 150 |
| Πίνακας 6-1. Παράμετροι των υπερτιθέμενων IFP πηγών για $H=0.6$ .....                                                   | 183 |
| Πίνακας 6-2. Παράμετροι των υπερτιθέμενων IFP πηγών για $H=0.65$ .....                                                  | 183 |
| Πίνακας 6-3. Παράμετροι των υπερτιθέμενων IFP πηγών για $H=0.7$ .....                                                   | 183 |
| Πίνακας 6-4. Παράμετροι των υπερτιθέμενων IFP πηγών για $D=3$ .....                                                     | 185 |
| Πίνακας 6-5. Παράμετροι των υπερτιθέμενων IFP πηγών για $D=4$ .....                                                     | 185 |
| Πίνακας 6-6. Παράμετροι των υπερτιθέμενων IFP πηγών για $D=5$ .....                                                     | 185 |
| Πίνακας 6-7. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για την συνολική κίνηση .....                                           | 189 |
| Πίνακας 6-8. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για την υπηρεσία Serv1 για το πρώτο πείραμα.....                        | 194 |
| Πίνακας 6-9. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για την υπηρεσία Serv2 για το δεύτερο πείραμα.....                      | 196 |
| Πίνακας 6-10. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για την υπηρεσία Serv1 για το τρίτο πείραμα.....                       | 198 |
| Πίνακας 6-11. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για την υπηρεσία Serv1 για το τέταρτο πείραμα.....                     | 199 |

|                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 6-12. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για την ροή P1 της υπηρεσίας Serv1 για το πέμπτο πείραμα .....                | 201 |
| Πίνακας 6-13. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για την ροή P2 της υπηρεσίας Serv1 για το πέμπτο πείραμα .....                | 201 |
| Πίνακας 6-14. Χαρακτηριστικά πρώτης τάξης για τις παραμέτρους κίνησης των πέντε πειραμάτων.....                                | 203 |
| Πίνακας 8-1. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών και της κίνησης Poisson για τις ροές κίνησης F1 και F2.....                    | 254 |
| Πίνακας 8-2. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών και της κίνησης Poisson για την υπηρεσία Y1. ....                              | 256 |
| Πίνακας 8-3. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών και της κίνησης Poisson για την υπηρεσία Y2. ....                              | 257 |
| Πίνακας 8-4. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών και της κίνησης Poisson για την υπηρεσία Y3. ....                              | 257 |
| Πίνακας 8-5. Σενάρια οικονομικής πολιτικής του $np_2$ .....                                                                    | 267 |
| Πίνακας 8-6. Διάγραμμα της προσφερόμενης κίνησης ανά κομμάτι της περιοχής εξυπηρέτησης                                         | 267 |
| Πίνακας 8-7. Παράμετροι απαιτήσεων των χρηστών για τις τέσσερις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. ....                            | 269 |
| Πίνακας 8-8. Διαθέσιμη και κατειλημμένη χωρητικότητα του $np_2$ για τις τέσσερις περιπτώσεις του δευτέρου σεναρίου.....        | 271 |
| Πίνακας 8-9. Παράμετροι απαιτήσεων των χρηστών και χρέωσης για τις πέντε δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. ....                   | 273 |
| Πίνακας 8-10. Διαθέσιμη και κατειλημμένη χωρητικότητα του $np_{WLAN2}$ για τις τέσσερις περιπτώσεις του τετάρτου σεναρίου..... | 277 |



## Περίληψη

Η παρούσα διατριβή ασχολείται με τη σχεδίαση και υλοποίηση ενός Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων σε ασύρματα δίκτυα IP, εστιάζοντας στην ανάπτυξη ενός δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών κίνησης. Το προτεινόμενο σύστημα βασίζεται στη συνδυασμένη παρακολούθηση της εισερχόμενης στο δίκτυο κίνησης και των συνθηκών του ασύρματου μέσου, με σκοπό την υλοποίηση αποδοτικών μηχανισμών ελέγχου αποδοχής κινητών χρηστών, για την εγγύηση της ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας. Η διαδικασία αυτή συμβάλλει στην επιλογή του βέλτιστου ασύρματου δικτύου πρόσβασης και την υποστήριξη λειτουργιών εξισορρόπησης φορτίου μεταξύ των συνεργαζόμενων δικτύων, στα πλαίσια λειτουργίας των ασύρματων συστημάτων 4<sup>ης</sup> Γενιάς.

Το Ενιαίο Σύστημα Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων είναι ένα μεσισμικό σύστημα διαχείρισης για τη διασύνδεση των επιχειρηματικών οντοτήτων ενός σύγχρονου επιχειρηματικού μοντέλου, το οποίο αποτελείται από ένα πλήθος Παρόχων Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων. Στα πλαίσια λειτουργίας του συστήματος αυτού, υλοποιείται ένας αλγόριθμος Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, ο οποίος αξιοποιεί τις πολιτικές των Παρόχων Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων με τις απαιτήσεις των χρηστών και διαπραγματεύεται τη χρονικά καλύτερη επιλογή ασύρματης πρόσβασης μέσα σε ένα σύνθετο ασύρματο περιβάλλον, με οικονομικά και τεχνικά κριτήρια.

Η βασικότερη συνεισφορά αυτής της διατριβής είναι η ανάπτυξη και η υλοποίηση ενός δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών, που παράγονται από πολλαπλές υπηρεσίες, και η ενσωμάτωσή του στα πλαίσια λειτουργίας του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων των ασύρματων δικτύων IP. Το σύστημα αυτό αναβαθμίζει τη λειτουργία των δικτυακών κόμβων, ώστε αυτοί να μπορέσουν να υποστηρίξουν διαδικασίες εγγυημένης ποιότητας στις παρεχόμενες υπηρεσίες. Η πρωταρχική του λειτουργία είναι η εφαρμογή ενός αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής των ανεξάρτητων ροών στους κόμβους των ασύρματων δικτύων, ο οποίος στηρίζεται στη θεωρία του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης. Ο αλγόριθμος αυτός περιλαμβάνει τη σύγκριση του ρυθμού μετάδοσης που παράγεται από την εισερχόμενη κίνηση, η οποία συνοδεύεται από τα αντίστοιχα κριτήρια ποιότητας, με τη διαθέσιμη χωρητικότητα του ασύρματου καναλιού.

Προς το σκοπό αυτό, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών αποτελείται από ένα σύνολο διαχειριστικών οντοτήτων, οι οποίες συνεπικουρούν τον αλγόριθμο ελέγχου αποδοχής των ανεξάρτητων ροών στη λήψη των συγκεκριμένων αποφάσεων. Η λειτουργία αυτών των οντοτήτων στοχεύει στην παρακολούθηση της εισερχόμενης κίνησης στα ασύρματα δίκτυα IP και την προσέγγιση των χαρακτηριστικών της, με βάση τα παραδοσιακά Μαρκοβιανά Μοντέλα Ροής Ρευστού MMFP, όπως και στην παρακολούθηση του επιπέδου ποιότητας του ασύρματου

καναλιού για την εκτίμηση της διαθέσιμης χωρητικότητας των υποκείμενων ασύρματων δικτύων IP.

Τα αποτελέσματα που παρατίθενται στην παρούσα διατριβή καταδεικνύουν τη σπουδαιότητα της υλοποίησης αποδοτικών μηχανισμών ελέγχου αποδοχής των ανεξάρτητων ροών κίνησης και της ενσωμάτωσής τους στα πλαίσια του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων. Ο απώτερος στόχος του προτεινόμενου συστήματος είναι η εγγύηση της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών και η επίτευξη της διαλειτουργικότητας για την αδιάλειπτη επικοινωνία των κινητών χρηστών.



## **Abstract**

This thesis deals with the design and implementation of a Unified Service and Network Management System for wireless IP networks, focusing on the development of a dynamic Admission Control System for individual flows. The proposed system is based on the combined monitoring of the incoming network traffic and the conditions of the wireless environment, aiming at the implementation of efficient admission control mechanisms, for guaranteeing the Quality of Service (QoS) of the offered set of services. This enables the selection of the best wireless access network and the support of load balancing techniques among the cooperative networks, in the context of 4G wireless systems.

The Unified Service and Network Management System belongs to the Middleware Management Layer and enables the cooperation of the business entities of a modern business model, consisting of multiple Service and Network Providers. In the framework of this system functionality, a best access network provider selection algorithm has been implemented, which takes into consideration both the policies of the Service and Network Providers and the user needs. In that way, it can negotiate the appropriate selection of the best wireless access network on a time basis, within a composite radio environment, subject to economic and technical criteria.

The basic contribution of this thesis is the development and implementation of a dynamic Admission Control system for individual flows, which are generated from multiple services, and the incorporation of such system as part of the functionality of the Unified Service and Network Management System for wireless IP networks. This system enhances the functionality of the network nodes, in order to be able to support QoS-oriented procedures for the offered load. The primary functionality of the system is the application of an admission control algorithm for the individual flows at the network nodes, which is based on the Effective Bandwidth theory. This algorithm includes the comparison of the actual transmission rate produced from the incoming traffic, which corresponds to certain quality requirements, with the available capacity of the underlying wireless network.

In that respect, the dynamic Admission Control system for individual flows consists of a set of management entities, which assist the admission control algorithm in making the appropriate decisions. The functionality of these entities aims at the monitoring of the incoming traffic and the fitting of the second order statistics, based on the traditional Markov Modulated Fluid Process (MMFP) models, as well as the monitoring of the quality conditions of the wireless medium, in order to estimate the available capacity of the underlying wireless IP networks.

The results, which are presented in this thesis, depict the significance of implementing efficient admission control mechanisms for the individual flows and incorporating them into the functionality of a Unified Service and Network Management System. The ultimate objective is to

guarantee the QoS of the offered set of services and the accomplishment of the interoperability between wireless networks for the seamless service provisioning of mobile users.

## Κατάλογος Ακρωνύμιων

|                 |                                                           |
|-----------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>3GPP</b>     | <i>Third Generation Partnership Project</i>               |
| <b>4G</b>       | <i>4th Generation</i>                                     |
| <b>AAA</b>      | <i>Authentication, Authorization and Accounting</i>       |
| <b>ABC</b>      | <i>Always Best Connected</i>                              |
| <b>AC</b>       | <i>Authentication Center</i>                              |
| <b>ACK</b>      | <i>Acknowledgement</i>                                    |
| <b>AP</b>       | <i>Access Point</i>                                       |
| <b>ARQ</b>      | <i>Automatic Repeat Request</i>                           |
| <b>B3G</b>      | <i>Beyond 3<sup>rd</sup> Generation</i>                   |
| <b>BER</b>      | <i>Bit Error Rate</i>                                     |
| <b>BG</b>       | <i>Border Gateway</i>                                     |
| <b>BPSK</b>     | <i>Binary Phase Shift Keying</i>                          |
| <b>BSC</b>      | <i>Base Station Controllers</i>                           |
| <b>BSS</b>      | <i>Base Station Subsystem</i>                             |
| <b>BSS</b>      | <i>Basic Service Set</i>                                  |
| <b>BTC</b>      | <i>Bulk-Transfer-Capacity</i>                             |
| <b>BTS</b>      | <i>Base Transceiver Station</i>                           |
| <b>CAC</b>      | <i>Call Admission Control</i>                             |
| <b>CCK</b>      | <i>Complementary Code Keying</i>                          |
| <b>CDMA</b>     | <i>Code Division Multiple Access</i>                      |
| <b>CN</b>       | <i>Core Network</i>                                       |
| <b>CP</b>       | <i>Content Provider</i>                                   |
| <b>CRC</b>      | <i>Cyclic Redundancy Check</i>                            |
| <b>CSMA/CA</b>  | <i>Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance</i> |
| <b>DAB</b>      | <i>Digital Audio Broadcasting</i>                         |
| <b>DCF</b>      | <i>Distributed Coordination Function</i>                  |
| <b>DiffServ</b> | <i>Differentiated Services</i>                            |
| <b>DIFS</b>     | <i>Distributed Interframe Space</i>                       |
| <b>DS</b>       | <i>Distribution Medium</i>                                |
| <b>DSSS</b>     | <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>                    |
| <b>DVB-T</b>    | <i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial</i>           |
| <b>EDGE</b>     | <i>Enhanced Data for GSM/GPRS Evolution</i>               |
| <b>ETSI</b>     | <i>European Telecommunications Standards Institute</i>    |
| <b>FDD</b>      | <i>Frequency Division Duplex</i>                          |
| <b>FEC</b>      | <i>Forward Error Correction</i>                           |

|                |                                                          |
|----------------|----------------------------------------------------------|
| <b>FIFO</b>    | <i>First In First Out</i>                                |
| <b>GE</b>      | <i>Gilbert Elliott</i>                                   |
| <b>GMSK</b>    | <i>Gaussian minimum shift keying</i>                     |
| <b>GPRS</b>    | <i>General Packet Radio Service</i>                      |
| <b>GSM</b>     | <i>Global System of Mobile Communication</i>             |
| <b>HLR</b>     | <i>Home Location Register</i>                            |
| <b>IDC</b>     | <i>Index of Dispersion of Counts</i>                     |
| <b>IEEE</b>    | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| <b>IETF</b>    | <i>Internet Engineering Task Force</i>                   |
| <b>IFP</b>     | <i>Interrupted Fluid Process</i>                         |
| <b>IntServ</b> | <i>Integrated Services</i>                               |
| <b>IP</b>      | <i>Internet Protocol</i>                                 |
| <b>ISO</b>     | <i>International Organizations of Standardization</i>    |
| <b>LLC</b>     | <i>Logical Link Control</i>                              |
| <b>LRD</b>     | <i>Long Range Dependence</i>                             |
| <b>MAC</b>     | <i>Medium Access Control</i>                             |
| <b>MMFP</b>    | <i>Markov Modulated Fluid Process</i>                    |
| <b>MMPP</b>    | <i>Markov Modulated Poisson Process</i>                  |
| <b>MS</b>      | <i>Mobile Station</i>                                    |
| <b>MSC</b>     | <i>Mobile services Switching Center</i>                  |
| <b>NP</b>      | <i>Network Provider</i>                                  |
| <b>OFDM</b>    | <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>        |
| <b>OSI</b>     | <i>Open System Interconnection</i>                       |
| <b>PDU</b>     | <i>Packet Data Unit</i>                                  |
| <b>PER</b>     | <i>Packet Error Rate</i>                                 |
| <b>PHY</b>     | <i>Physical Layer</i>                                    |
| <b>Q-O-QAM</b> | <i>Binary Offset Quadrature Amplitude Modulation</i>     |
| <b>Q-O-QAM</b> | <i>Quaternary Offset Quadrature Amplitude Modulation</i> |
| <b>QoS</b>     | <i>Quality of Service</i>                                |
| <b>QPSK</b>    | <i>Quadrature Phase Shift Keying</i>                     |
| <b>RLC</b>     | <i>Radio Link Control</i>                                |
| <b>RRM</b>     | <i>Radio Resource Management</i>                         |
| <b>RSVP</b>    | <i>Resource Reservation Protocol</i>                     |
| <b>RTT</b>     | <i>Round Trip Time</i>                                   |
| <b>RTS/CTS</b> | <i>Request To Send/Clear To Send</i>                     |
| <b>SIFS</b>    | <i>Short Interframe Space</i>                            |
| <b>SIM</b>     | <i>Subscriber Identity Module</i>                        |

|              |                                                  |
|--------------|--------------------------------------------------|
| <b>SLA</b>   | <i>Service Level Agreements</i>                  |
| <b>SNR</b>   | <i>Signal to Noise Ratio</i>                     |
| <b>SP</b>    | <i>Service Provider</i>                          |
| <b>SRD</b>   | <i>Short Range Dependence</i>                    |
| <b>TCP</b>   | <i>Transmission Control Protocol</i>             |
| <b>TDD</b>   | <i>Time Division Duplex</i>                      |
| <b>UDP</b>   | <i>User Datagram Protocol</i>                    |
| <b>UE</b>    | <i>User Equipment</i>                            |
| <b>UMTS</b>  | <i>Universal Mobile Telecommunication System</i> |
| <b>UTRAN</b> | <i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>     |
| <b>VLR</b>   | <i>Visitor Location Register</i>                 |
| <b>VoIP</b>  | <i>Voice over IP</i>                             |
| <b>WCDMA</b> | <i>Wideband Code Division Multiple Access</i>    |
| <b>WIG</b>   | <i>Wireless Interworking Group</i>               |
| <b>WLAN</b>  | <i>Wireless Local Area Network</i>               |



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1. Αντικείμενο της διατριβής

Το φάσμα των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών αλλάζει με την απελευθέρωση της αγοράς και την επίτευξη της σύγκλισης των διαφόρων δικτυακών τεχνολογιών, με σκοπό τη σχεδίαση και υλοποίηση ενός ενιαίου συστήματος παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Η μεγάλη πρόκληση της εποχής είναι η δημιουργία ενός καθολικού συστήματος ασύρματης πρόσβασης, το οποίο θα συνοδεύεται από ένα κοινό δίκτυο πυρήνα, βασισμένο στο πρωτόκολλο διαδικτύου (Internet Protocol - IP) [1]. Τέτοια συστήματα, τα οποία ονομάζονται ασύρματα συστήματα 4<sup>ης</sup> Γενιάς (4G), θα επιτρέψουν την επίτευξη των στόχων των Παρόχων τηλεπικοινωνιών και την ικανοποίηση των αναγκών των χρηστών για την απρόσκοπτη και αδιάλειπτη σύνδεσή τους, χωρίς χρονικούς ή χωρικούς περιορισμούς [2].

Παράλληλα με την εξέλιξη της δικτυακής υποδομής, οι τάσεις που επικρατούν σήμερα ευνοούν την ανάπτυξη εξελιγμένων υπηρεσιών, οι οποίες φιλοδοξούν να προβούν σε όφελος των αναγκών των χρηστών και της κοινωνικής τους ευημερίας [3]. Η υλοποίηση τέτοιων εφαρμογών πραγματοποιείται ανεξάρτητα από την υποκείμενη δικτυακή τεχνολογία, η οποία θα κληθεί να υποστηρίξει αυτές τις νέες υπηρεσίες. Το μόνο κοινό σημείο είναι η υιοθέτηση του πρωτοκόλλου IP σαν το κατάλληλο υπόστρωμα για τη διασύνδεση των στρωμάτων εφαρμογής με τα κατώτερα στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλων.

Τα προβλήματα που πηγάζουν από την υιοθέτηση του ασύρματου μέσου ως σημείου πρόσβασης των χρηστών στο διαδίκτυο είναι πολλά και μεγάλα [4][5]. Τα πιο βασικά από αυτά έχουν να κάνουν με την αδυναμία ανάπτυξης και οικοδόμησης ανεξάρτητων δικτύων με μεγάλη χωρητικότητα, υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και χαμηλούς ρυθμούς λαθών. Συνάμα, η επίτευξη της διαλειτουργικότητας (interworking/interoperability) των δικτύων απαιτεί και την υλοποίηση μηχανισμών που θα γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών και θα προσφέρουν τις απαιτούμενες συνθήκες για την εξασφάλιση της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών (Quality of Service – QoS). Βέβαια, όλα αυτά χρειάζεται να είναι αδιαφανή προς τον τελικό χρήστη, ο οποίος θα καλείται μόνο να αξιολογεί την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας

με υποκειμενικά κριτήρια. Αυτό σημαίνει ότι η πρόσβαση των χρηστών σε υπηρεσίες υπόκειται σε περιορισμούς, οι οποίοι πηγάζουν από την υποκειμενικότητα των αισθητηρίων οργάνων των χρηστών και, γενικά, έχουν να κάνουν με την αντίληψη της χρονικής καθυστέρησης για την παροχή μίας συγκεκριμένης υπηρεσίας. Σε τελική ανάλυση, εκείνο που αφορά στον χρήστη είναι η κατά το δυνατόν καλύτερη πρόσβαση στην παρεχόμενη υπηρεσία μέσα από την επιλογή της βέλτιστης υποκείμενης δικτυακής τεχνολογίας (Always Best Connected) [6], με χρονικά, οικονομικά και τεχνικά κριτήρια.

Μία ακόμα συνέπεια της εξέλιξης των τηλεπικοινωνιών αποτελεί η διαπλάτυνση του φάσματος των παρόχων τηλεπικοινωνιών και η δραστηριοποίηση στον τομέα αυτόν όλο και μεγαλύτερου αριθμού ανταγωνιστικών οντοτήτων. Σαν συνέπεια αυτού, είναι ο διαχωρισμός των λειτουργιών υποστήριξης των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, η οποία συντελείται από τους Παρόχους Υπηρεσιών (Service Providers), από τη διαδικασία ανάθεσης των απαιτούμενων δικτυακών πόρων, η οποία επιτελείται στα πλαίσια λειτουργίας των Παρόχων Δικτυακών Πόρων (Network Providers). Όμως, αυτή η επέκταση και ανακατανομή των λειτουργιών υποστήριξης των χρηστών συνεπάγεται και την ανάγκη ανάπτυξης και υλοποίησης δυναμικών συστημάτων διαχείρισης, τα οποία θα αναλαμβάνουν τη ρύθμιση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του συνόλου των οντοτήτων. Συνεπώς, οι ερευνητικές προσπάθειες εστιάζουν στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός ενιαίου συστήματος διαχείρισης των τηλεπικοινωνιών, με έμφαση στην ασύρματη πρόσβαση, το οποίο αποτελεί μετεξέλιξη των προσπαθειών του πρόσφατου παρελθόντος για τη συνεργασία των δικτυακών υποδομών. Είναι φανερό ότι ένα τέτοιο σύστημα δρα ανάμεσα στους μηχανισμούς παροχής και υποστήριξης των υπηρεσιών και στην ανεύρεση των δικτυακών πόρων, αποτελώντας, στην ουσία, ένα μεσάζοντα μεταξύ των διαφόρων οντοτήτων που δραστηριοποιούνται στην περιοχή των τηλεπικοινωνιών.

Με αναφορά σε ένα τέτοιο μοντέλο επικοινωνίας, η εργασία αυτή συνεισφέρει στο σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής και τον καθορισμό των προδιαγραφών λειτουργίας ενός μεσισμικού συστήματος διαχείρισης (Middleware Management Layer), το οποίο ονομάζεται Ενιαίο Σύστημα Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων. Αυτό το σύστημα αναλαμβάνει να συνδυάσει τις λειτουργίες που επιτελούνται από τους διαφόρους Παρόχους και να ικανοποιήσει την απαίτηση των χρηστών για την επιλογή της βέλτιστης δικτυακής τεχνολογίας, με κριτήρια την ποιότητα και το κόστος χρέωσης της παρεχόμενης υπηρεσίας αλλά και την αντίστοιχη προτίμηση των χρηστών στην παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσιών. Προς το σκοπό αυτό, η παρούσα διατριβή παρουσιάζει την αρχιτεκτονική ενός καινοτόμου και αποδοτικού αλγορίθμου επιλογής βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, για την επίλυση του προβλήματος επιλογής του βέλτιστου δικτύου ασύρματης πρόσβασης. Παρόμοιες εργασίες έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία, οι οποίες, όμως εστιάζουν στις λειτουργίες που επιτελούνται σε μεμονωμένες τηλεπικοινωνιακές οντότητες [7][8]. Η εργασία αυτή, όμως, ορίζει το σύστημα διαχείρισης υπό την ώθηση των αναγκών μίας ανοιχτής αγοράς τηλεπικοινωνιών, η οποία επιβάλλει το διαχωρισμό των λειτουργικών διαδικασιών σε διάφορες οντότητες.



Έτσι, η διαδικασία επιλογής της βέλτιστης σύνδεσης για μία συγκεκριμένη υπηρεσία περιλαμβάνει πληροφορίες τόσο από τους Παρόχους Υπηρεσιών όσο και από τους Παρόχους Δικτυακών Πόρων. Η κύρια συνεισφορά αυτής της εργασίας είναι ότι ο συνδυασμός των πολιτικών των διαφόρων ειδών παρόχων αποσκοπεί στην καλύτερη αξιοποίηση του ραδιοφάσματος, σε συνάρτηση με τις διαδικασίες ελέγχου αποδοχής (admission control) των ροών κίνησης των υπηρεσιών IP, που θα πρέπει να υλοποιούνται από τις αντίστοιχες δικτυακές τεχνολογίες, για την εξασφάλιση της απαιτούμενης ποιότητας. Αυτός ο συνδυασμός αποτελεί μία κρίσιμη παράμετρο για την επίτευξη της καλύτερης πρόσβασης στα σύγχρονα και μελλοντικά ασύρματα συστήματα.

Η διαδικασία ελέγχου αποδοχής κίνησης στα δίκτυα IP, και δη στα ασύρματα, αποτελεί μία πρόσφατη ερευνητική προσπάθεια [9][10]. Συνήθως, σε τέτοια συστήματα, οι μηχανισμοί παροχής ποιότητας αποσκοπούν στη διάκριση των ροών με βάση προτεραιότητες και την παραβίαση της First In First Out (FIFO) αρχής για την εξυπηρέτηση των εισερχόμενων σε ένα κόμβο δικτύου πακέτων. Αντιθέτως, η εργασία αυτή στηρίζεται στην αξιοποίηση υπαρχόντων παραδοσιακών Μαρκοβιανών θεωριών για την ανάπτυξη ενός δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Η καινοτομία αυτού του συστήματος είναι ότι ολοκληρώνει τις βασικές απαιτήσεις που πηγάζουν από την ίδια τη φύση του πρωτοκόλλου IP και των ασύρματων δικτυακών τεχνολογιών. Έτσι, συνδυάζει αλγορίθμους μοντελοποίησης της προσφερόμενης κίνησης, η οποία παρουσιάζει φαινόμενα αυτό-ομοιότητας και εξαρτήσεις μεγάλης κλίμακας χρόνου, με τους μηχανισμούς παρακολούθησης της ποιότητας των ασύρματων ζεύξεων και της ικανοποιητικής εκτίμησης της διαθέσιμης χωρητικότητας σε κάθε χρονική περίοδο.

Σχετικές εργασίες έχουν συνδυάσει τον έλεγχο αποδοχής ροών κίνησης με το κόστος των παρεχόμενων υπηρεσιών [11][12][13]. Ωστόσο, σε τέτοιες εργασίες, ο έλεγχος αποδοχής πραγματοποιείται, λαμβάνοντας υπόψη χαρακτηριστικά κίνησης που αφορούν στις συνδέσεις χρηστών μόνο (π.χ. άφιξη νέων κλήσεων ή κλήσεων από μεταγωγή συνήθως με κατανομή Poisson) και δεν προχωρούν στην ανάλυση των χαρακτηριστικών της κίνησης σε επίπεδο πακέτου. Αντιθέτως, η εργασία αυτή προχωρά περισσότερο στην εξέταση των χαρακτηριστικών της προσφερόμενης IP κίνησης και αναλύει τα φαινόμενα αυτό-ομοιότητας, που αυτή παρουσιάζει. Με βάση την σε επίπεδο πακέτου ανάλυση και περιγραφή της κίνησης, γίνεται εφικτή η προσέγγιση της συμπεριφοράς της εισερχόμενης στους δικτυακούς κόμβους κίνησης, με σκοπό να προβλεφθεί η επίδρασή της στους ταμειωτήρες των δικτύων. Έτσι, το προτεινόμενο δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών αποσκοπεί στην εξασφάλιση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών από στατιστική άποψη (statistical QoS), σε αντίθεση με τους μηχανισμούς παροχής ποιότητας υπηρεσίας με προτεραιότητες, οι οποίοι στοχεύουν στην εγγύηση ντετερμινιστικών κριτηρίων ποιότητας.

Και, πάλι, στο πεδίο ανάλυσης της IP κίνησης και των χαρακτηριστικών αυτό-ομοιότητάς της έχουν γίνει σχετικές μελέτες [14][15][16][17]. Η παρούσα εργασία κάνει χρήση των συμπερασμάτων που προκύπτουν από αυτές και τις επεκτείνει με σκοπό να παρουσιαστεί ένα

αποτελεσματικό, ευέλικτο και δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής των ροών κίνησης, που παράγονται από την υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών σε ασύρματα δίκτυα IP. Αν και τμήματα τέτοιων συστημάτων έχουν παρουσιαστεί [18][19], το σύστημα αυτό αποτελεί μία καινοτομία, καθώς χρησιμοποιεί μηχανισμούς παρακολούθησης τόσο της προσφερόμενης κίνησης, η οποία συνοδεύεται από τους αντίστοιχους περιγραφείς κίνησης και τα ζητούμενα επίπεδα ποιότητας, όσο και της διαθέσιμης χωρητικότητας κάτω ζεύξης, η οποία διαμορφώνεται χρονικά, ανάλογα με τον αριθμό των ενεργών χρηστών του δικτύου και, συνακόλουθα, την ποιότητα του ασύρματου μέσου.

Μέσα από το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής των ροών IP που παρουσιάζεται και αναλύεται, γίνεται σαφές ότι ένα αποδοτικό σύστημα διαχείρισης του ραδιοφάσματος, με προσανατολισμό στην εγγύηση του QoS των προσφερόμενων υπηρεσιών, απαιτεί την παράλληλη υποστήριξη αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής ροών. Η επιτυχία του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών έγκειται στην απλότητα των μεθόδων που χρησιμοποιεί για τη μοντελοποίηση τόσο της κίνησης όσο και της διαθέσιμης χωρητικότητας του ασύρματου μέσου μετάδοσης, οι οποίες πραγματοποιούνται σε χωριστές παράλληλες λειτουργίες. Αντιθέτως, παρόμοιες εργασίες στη βιβλιογραφία επιχειρούν μία προσπάθεια ενοποίησης των στατιστικών χαρακτηριστικών των πηγών κίνησης και του ασύρματου καναλιού, με αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας του τελικού μοντέλου [20][21].

Σε γενικές γραμμές, η καινοτομία αυτής της διατριβής έγκειται στον καθορισμό των απαιτήσεων, τη σχεδίαση και την υλοποίηση του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων σε ασύρματα δίκτυα IP, εστιάζοντας στην ανάπτυξη του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών κίνησης. Το προτεινόμενο σύστημα βασίζεται στη συνδυασμένη παρακολούθηση της εισερχόμενης στο δίκτυο κίνησης και των συνθηκών του ασύρματου μέσου, με σκοπό την υλοποίηση αποδοτικών μηχανισμών ελέγχου αποδοχής νέων χρηστών για την εγγύηση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας. Η αποδοχή ή απόρριψη των ροών με στόχο την εξασφάλιση των κριτηρίων ποιότητας πραγματοποιείται, σύμφωνα με τις ανάγκες των ανεξάρτητων ροών υπηρεσιών και τη διαθεσιμότητα των ασύρματων δικτύων. Η διαδικασία αυτή συμβάλλει στην επιλογή του βέλτιστου ασύρματου δικτύου πρόσβασης και την υποστήριξη λειτουργιών εξισορρόπησης φορτίου μεταξύ των συνεργαζόμενων δικτύων, στα πλαίσια λειτουργίας των ασύρματων συστημάτων 4<sup>ης</sup> Γενιάς. Μέσα από την περιγραφή που θα ακολουθήσει στα επόμενα κεφάλαια, καταδεικνύεται η σπουδαιότητα της ανάπτυξης ενός τέτοιου συστήματος για την εγγύηση του στατιστικού QoS της παρεχόμενης υπηρεσίας.

## **1.2. Δομή της διατριβής**

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει δομηθεί σε εννέα κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένης και της Εισαγωγής, η οποία δίνεται στο παρόν κεφάλαιο. Τα κεφάλαια αυτά στοχεύουν στην αναλυτική παρουσίαση και μελέτη των θεμάτων που τέθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Πιο συγκεκριμένα, το Κεφάλαιο 2 οριοθετεί το ερευνητικό πεδίο για την αντιμετώπιση του προβλήματος, με το οποίο ασχολείται η παρούσα εργασία. Έτσι, παρουσιάζει τη γενική αρχιτεκτονική των μελλοντικών ασύρματων συστημάτων 4<sup>ης</sup> γενιάς (4G systems), δίνοντας έμφαση στα ιδιαίτερα γνωρίσματα των επιμέρους στοιχείων που απαιτούνται για την επίτευξη αυτής της αρχιτεκτονικής. Συγκεκριμένα, αναλύονται οι απαιτήσεις που αποτελούν τα σημαντικά πεδία έρευνας, για την ανάπτυξη μίας τέτοιας αρχιτεκτονικής και περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα προς την προσπάθεια υλοποίησης των συστημάτων αυτών. Επίσης, δίνονται τα βασικά στοιχεία ενός σύγχρονου επιχειρηματικού μοντέλου, αναλύονται τα κυρίαρχα κομμάτια για τη διαμόρφωση της αρχιτεκτονικής των 4G συστημάτων και εισάγεται η έννοια του μεσισμικού συστήματος διαχείρισης. Το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με μία εισαγωγή στην έννοια της Ποιότητας Υπηρεσίας, η οποία αναλύεται διεξοδικά, καθώς αποτελεί τη μεγαλύτερη πρόκληση των μελλοντικών ασύρματων δικτύων. Η αναφορά στην έννοια αυτή περιλαμβάνει τόσο έναν ορισμό, μαζί με τα βασικά χαρακτηριστικά της ποιότητας υπηρεσιών, όσο και τις διάφορες διαδικασίες υλοποίησης και υποστήριξης της ποιότητας υπηρεσιών στα σύγχρονα και μελλοντικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα ασύρματης πρόσβασης.

Το Κεφάλαιο 3 επιχειρεί να δώσει τα βασικά χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στον προσδιορισμό της πραγματικής χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων, η οποία διατίθενται σε κάθε χρονική στιγμή για την εξυπηρέτηση των συνδέσεων κάτω ζεύξης (downlink) ενός ασύρματου συστήματος. Έτσι, αναλύει μία μέθοδο για τον προσδιορισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων, η οποία λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη απωλειών και αλλοιώσεων της ισχύος λόγω της εχθρότητας του ασύρματου περιβάλλοντος και της ύπαρξης θορύβου. Επίσης, δίνεται η αρχιτεκτονική και τα κύρια χαρακτηριστικά των βασικών ασύρματων δικτυακών τεχνολογιών, όπως το General Packet Radio Service (GPRS) και το Wireless Local Area Network (WLAN). Η τελευταία τεχνολογία αποτελεί το συνδετικό κρίκο για την ανάπτυξη των συστημάτων 4<sup>ης</sup> Γενιάς για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας, ιδιαίτερα σε περιοχές υψηλής ζήτησης φορτίου. Μέσα από την περιγραφή της αρχιτεκτονικής των δικτύων αυτών, δίνεται μία ιδέα για την προσέγγιση της διαθέσιμης χωρητικότητας και των παραμέτρων που συμβάλλουν στη διαμόρφωσή της. Επίσης, το κεφάλαιο εστιάζει σε ένα μοντέλο για τον προσδιορισμό της διαθέσιμης από το δίκτυο WLAN χωρητικότητας, ανάλογα με τον αριθμό των κινητών σταθμών που προσπαθούν να εγκαταστήσουν μία υπηρεσία. Λόγω των απλουστευμένων υποθέσεων, οι οποίες αφορούν, κυρίως, στο θόρυβο του ασύρματου περιβάλλοντος, που περιλαμβάνει ο υπολογισμός της διαθέσιμης χωρητικότητας ενός τέτοιου μοντέλου, το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με μία προτεινόμενη μέθοδο διόρθωσης της τρέχουσας διαθέσιμης χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων. Η μέθοδος αυτή αφορά στην παρακολούθηση των παραμέτρων που συμβάλλουν στη διαμόρφωση της κατάστασης της ασύρματης σύνδεσης κάτω ζεύξης και στον προσδιορισμό της τιμής της διαθέσιμης χωρητικότητας, με βάση το λόγο Σήματος προς Θόρυβο (Signal to Noise Ratio - SNR), τον ρυθμό αποστολής λαθών (Bit Error Rate – BER) και το ποσοστό των επαναμεταδόσεων (retransmission rate) που αντιλαμβάνεται το δίκτυο.

Το Κεφάλαιο 4 περιγράφει την αρχιτεκτονική ενός καινοτόμου Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων (ΕΣΔΥΔΠ) σε ένα σύνθετο ασύρματο περιβάλλον με πολλούς Παρόχους Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων. Το προτεινόμενο σύστημα επιτρέπει την ανάπτυξη μεθόδων και αλγορίθμων που συμπληρώνουν τους ήδη υπάρχοντες μηχανισμούς και θα δρουν στα πιο υψηλά επίπεδα ή ακόμα και κατά μήκος όλης της στοίβας πρωτοκόλλων, με σκοπό την ικανοποίηση των αναγκών των χρηστών για την υποστήριξη των προσφερόμενων υπηρεσιών, χωρίς περιορισμούς και συμβιβασμούς σε απαιτήσεις χαμηλότερες από τις πραγματικές τους ανάγκες. Πιο συγκεκριμένα, το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει ένα πρωτοποριακό σύστημα διαχείρισης που επιτρέπει τον έλεγχο της προσφερόμενης κίνησης και την ευέλικτη διαχείριση πόρων σε ένα σύνθετο ασύρματο περιβάλλον. Το σύστημα αυτό συμβάλλει στην επίτευξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ ανομοιογενών συστημάτων και στην αποτελεσματική διαχείριση των υπηρεσιών και των δικτυακών πόρων, με βάση τις απαιτήσεις των χρηστών και τις τρέχουσες δυνατότητες των δικτύων. Το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με την παρουσίαση ενός καινοτόμου αλγορίθμου για την επιλογή του Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων και την παράθεση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή του. Ο αλγόριθμος αυτός διαπραγματεύεται τη χρονικά καλύτερη επιλογή δικτύου πρόσβασης για την υποστήριξη της ποιότητας των ζητούμενων υπηρεσιών, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικά και τεχνικά κριτήρια, ενώ τονίζονται οι παράμετροι αυτού του αλγορίθμου που επιδέχονται βελτιώσεις, όσον αφορά στην ικανότητα των ασύρματων δικτύων IP να μεταφέρουν υπηρεσίες, με αυστηρά κριτήρια ποιότητας.

Το Κεφάλαιο 5 δίνει τα βασικά χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων των στρωμάτων δικτύου και μεταφοράς, με βάση τα οποία μεταφέρονται τα δεδομένα στα δίκτυα. Τα πρωτόκολλα αυτά, όπως το IP, το Transmission Control Protocol (TCP) και το User Datagram Protocol (UDP), αποτελούν τα βασικά κομμάτια επικοινωνίας των ομότιμων οντοτήτων στα διάφορα σημεία των δικτύων. Συνεπώς, η μελέτη της συμπεριφοράς των ασύρματων δικτύων επιβάλλει πρωτίστως την αντίστοιχη μελέτη και ανάλυση των πρωτοκόλλων αυτών, τα οποία και ρυθμίζουν τη συμπεριφορά της κίνησης. Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει μία διαφοροποίηση των υπηρεσιών, ανάλογα με το ποιο πρωτόκολλο μεταφοράς χρησιμοποιείται πάνω από το IP. Η διαφορά μεταξύ των δύο πρωτοκόλλων είναι σημαντική, γιατί ενώ το TCP χρησιμοποιεί μηχανισμούς που διαμορφώνουν το ρυθμό μετάδοσης, ανάλογα με τη συμφόρηση του υποκείμενου δικτύου, το UDP διαμορφώνει μια εντελώς αντίθετη συμπεριφορά, παραμένοντας «απαθής» στις επιπτώσεις της κίνησης στους δικτυακούς κόμβους. Επίσης, το κεφάλαιο αυτό παραθέτει μία αναλυτική περιγραφή της κίνησης IP. Συγκεκριμένα, περιγράφεται η κίνηση IP, η οποία διέπεται από χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας (self-similarity) και εξαρτήσεις από μεγάλες κλίμακες χρόνου (Long Range Dependence - LRD). Επίσης, παρατίθενται οι σχετικές ερευνητικές δραστηριότητες που πιστοποιούν την ύπαρξη μίας τέτοιας κίνησης στα δίκτυα IP και αναλύονται οι επιδράσεις της στην επίδοση των παραπάνω δικτύων.

Το Κεφάλαιο 6 εστιάζει στην προσέγγιση και μοντελοποίηση της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας μέσω Μαρκοβιανών μοντέλων Ροής Ρευστού (MMFP). Συνεπώς, στο κεφάλαιο αυτό, δίνεται μια παρουσίαση των μοντέλων MMFP και των εξισώσεων για την περιγραφή της συμπεριφοράς των δικτυακών κόμβων, με βάση αυτά τα μοντέλα. Δεδομένης της ανάλυσης αυτής, το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με την παράθεση ενός ευέλικτου και αποδοτικού αλγορίθμου για την ανάλυση και την περιγραφή της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας, με βάση τα μοντέλα MMFP, καθώς και με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγορίθμου σε πραγματικές συνθήκες. Η καινοτομία αυτού του αλγορίθμου είναι η εκμετάλλευση των στατιστικών στοιχείων της πραγματικής κίνησης για την κατανομή του μεγέθους και του χρόνου αφίξεων διαδοχικών πακέτων, με σκοπό την πρόβλεψη των επιδράσεων της κίνησης αυτής στην ουρά αναμονής ενός κόμβου ασύρματου δικτύου. Η σπουδαιότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου έγκειται στο ότι επιτρέπει τη μοντελοποίηση της εισερχόμενης κίνησης, με βάση τα παραδοσιακά μοντέλα MMFP, χρησιμοποιεί ένα σύνολο από σχετικά λίγες παραμέτρους για τη μοντελοποίηση και παρέχει ικανοποιητική προσέγγιση της κίνησης σε χρονικά διαστήματα, τα οποία επιτρέπουν τη χρησιμοποίησή του για τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.

Το Κεφάλαιο 7 προτείνει ένα πρωτοποριακό σύστημα για το δυναμικό έλεγχο της αποδοχής των ροών κίνησης που προκαλούνται από πολλαπλές υπηρεσίες σε ασύρματα δίκτυα IP. Συγκεκριμένα, περιγράφει τις απαιτήσεις για τον έλεγχο των εισερχόμενων ροών σε ένα δίκτυο και οριοθετεί το πεδίο εφαρμογής αυτού του συστήματος ελέγχου αποδοχής για την εγγύηση των κριτηρίων ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών στις συνδέσεις κάτω ζεύξης. Επίσης, το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει την αρχιτεκτονική και τα βασικά δομικά στοιχεία ενός δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Η παρουσίαση αυτή περιλαμβάνει την ανάλυση των βασικών δομικών στοιχείων του συστήματος και την οριοθέτηση των λειτουργιών που επιτελούνται από κάθε ένα από αυτά ξεχωριστά. Τέλος, το κεφάλαιο αυτό εστιάζει στην υλοποίηση ενός καινοτόμου και αποδοτικού αλγορίθμου για τον έλεγχο και την αποδοχή των ανεξάρτητων ροών κίνησης στα ασύρματα δίκτυα IP, ο οποίος στηρίζεται στη θεωρία του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης για την αποτίμηση της επίδοσης των δικτυακών κόμβων στην ικανότητα υποστήριξης των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσιών των χρηστών. Ο αλγόριθμος αυτός επιτρέπει τη λήψη αποφάσεων, σχετικά με την αποδοχή ή απόρριψη των εισερχόμενων ροών, σε πραγματικό χρόνο, με βάση παραδοσιακές τεχνικές ελέγχου αποδοχής, αναπροσαρμόζει τις παραμέτρους ελέγχου τόσο για την εισερχόμενη κίνηση όσο και για τη διαθέσιμη χωρητικότητα του υποκείμενου ασύρματου δικτύου και λαμβάνει υπόψη του τη συμπεριφορά των πρωτοκόλλων μεταφοράς που χρησιμοποιούν μηχανισμούς ανάδρασης, σε περιπτώσεις συμφόρησης των δικτύων.

Μετά την παρουσίαση της ολοκληρωμένης εικόνας του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων, συμπεριλαμβανομένου και του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών, το Κεφάλαιο 8 αναλύει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την

εφαρμογή αυτού του συστήματος. Εκεί, παρατίθεται ένα σύνολο εξομοιώσεων για την αποτίμηση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής ροών κίνησης, με σκοπό την εξασφάλιση της απαιτούμενης ποιότητας, ανάλογα με τα διάφορα κριτήρια που τίθενται από τις επιμέρους κατηγορίες χρηστών. Επίσης, το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει τα αποτελέσματα από την συνδυασμένη χρήση του αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, που θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 4, με το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών Υψηλεσιών.

Τέλος, το Κεφάλαιο 9 συνοψίζει κάποια γενικά συμπεράσματα για το περιεχόμενο των κεφαλαίων που προηγήθηκαν και παρουσιάζει τα καινοτόμα στοιχεία, που πραγματεύεται αυτή η διατριβή. Προς τον σκοπό αυτό, δίνονται τα συμπεράσματα από την παρουσίαση και αποτίμηση της επίδοσης του αλγορίθμου επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων και του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής ροών, που επιτελείται στα πλαίσια της λειτουργίας του προτεινόμενου δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Τα συμπεράσματα αυτά αφορούν στην αναγκαιότητα υποστήριξης τέτοιων μηχανισμών στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα και πώς αυτοί οι μηχανισμοί ολοκληρώνονται σε ένα ενιαίο σύστημα διαχείρισης, ώστε η από άκρο σε άκρο σύνδεση να ικανοποιεί τόσο τις απαιτήσεις των χρηστών όσο και τη λειτουργική ικανότητα των υποκείμενων δικτυακών τεχνολογιών. Το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με την παρουσίαση κάποιων μελλοντικών προεκτάσεων αυτής της διατριβής.

### **1.3. Αναφορές**

- [1] W. Kellerer, M. Wagner, R. Hirschfeld, J. Noll, B. Berg, S. Svaet, J. Ferreira, O. Karasti, T. Hodgkinson, R. Giaffreda, S. Fallis, J. C. Francis and C. Fischer “The operators’ vision of systems beyond 3G Operators’ key drivers for systems beyond 3G”, Eurescom Participants in Project P1203, May 2003.
- [2] W. Mohr, W. Konhauser, “Access network evolution beyond third generation mobile communications”, Communications Magazine, IEEE, Vol. 38, Issue 12, Dec. 2000, pp. 122-133.
- [3] A. Shneyderman and A. Casati, “Mobile VPN: Delivering Advanced Services in Next Generation Wireless Systems”, John Wiley & Sons Publishing, Inc., 2003.
- [4] A. Bria, F. Gessler, O. Queseth, R. Stridh, M. Unbehaun, J. Wu and J. Zander, “4th-Generation Wireless Infrastructures: Scenarios and Research Challenges”, IEEE Personal Communications, December 2001, pp. 25-31.
- [5] S. Y. Hui and K. H. Yeung, “Challenges in the Migration to 4G Mobile Systems”, IEEE Communications Magazine, December 2003, pp. 54-59.
- [6] E. Gustafsson and A. Jonsson, “Always Best Connected”, IEEE Wireless Communications, February 2003, pp. 49-55.

- [7] H. Eguchi, M. Nakajima, and G. Wu, “Signaling Schemes over a Dedicated Wireless Signaling System in the Heterogeneous Network”, Proc. IEEE VTC, Spring 2002, pp. 464–67.
- [8] G. Wu, M. Mizuno and P. J. M. Havinga, “MIRAI Architecture for Heterogeneous Network”, IEEE Communications Magazine, February 2002, pp.126-134.
- [9] M.H. Ahmed, “Call Admission Control in Wireless Networks: A Comprehensive Survey”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, First Quarter 2005, Vol. 7, No. 1, pp 50-69.
- [10] L. Massoulié and J.W. Roberts, “Arguments in Favour of Admission Control for TCP Flows”, in Proc. of ITC 16, Edinbourg, June 1999.
- [11] J. Hou, J. Yang, and S. Papavassiliou, “Integration of Pricing with Call Admission Control to Meet QoS Requirements in Cellular Networks”, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 13, No. 9, September 2002, pp. 898-910.
- [12] C. Lindemann, M. Lohmann, and A. Thümmel, “Adaptive Call Admission Control for QoS/Revenue Optimization in CDMA Cellular Networks”, ACM Wireless Networks, Vol. 10, Issue 4, July 2004, pp. 457 – 472.
- [13] C. Saraydar, N. Mandayam and D. Goodman, “Efficient power control via pricing in wireless data networks”, IEEE Transactions on Communications, Vol. 50, No. 2, February 2002.
- [14] K. Park and W. Willinger, “Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation”, John Wiley and Sons Inc., 2000, ISBN 0-471-20644-X.
- [15] R. Kalden and S. Ibrahim, “Searching for Self-Similarity in GPRS”, Proc. of the 5th annual Passive & Active Measurement Workshop PAM2004, Antibes Juan-les-Pins, France, April 19-20, 2004.
- [16] H. Heffes and D. M. Lucantoni, “A Markov Modulated Characterization of Packetized Voice and Data Traffic and Related Statistical Multiplexer Performance”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. SAC-4, No. 6, September 1986, pp. 856-868.
- [17] Allan T. Andersen and Bo Friis Nielsen, “A Markovian Approach for Modeling Packet Traffic with Long-Range Dependence”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 16, No. 5, June 1998, pp 719-732.
- [18] Y. Lee and S. McLaughlin, “Radio resource metric estimation for a TDD-CDMA system supporting wireless internet traffic” Wireless Communications and Mobile Computing, Vol. 4, John Wiley & Sons, 2004, pp. 513–528.
- [19] P. Siripongwutikorn, S. Banerjee and D. Tipper, “A Survey of Adaptive Bandwidth Control Algorithms”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Third Quarter 2003, pp 14-26.

- [20] S. Wang, R. Nathuji, R. Bettati, and W. Zhao, “Providing Statistical delay Guarantees in Wireless Networks,” in Proc. IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), March 2004.
- [21] J. Geun Kim and M. Krunz, “Bandwidth Allocation in Wireless Networks with Guaranteed Packet-Loss Performance”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 8, No.3, June 2000.



## Κεφάλαιο 2

# Μελλοντικά Ασύρματα Συστήματα Τέταρτης Γενιάς

### 2.1. Εισαγωγή

Η μεγάλη ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών επιφέρει στην παγκόσμια αγορά αλλαγές σχετικά με τον τρόπο επικοινωνίας όσο και τη διαχείριση ενός συστήματος τηλεπικοινωνιών. Ένα σημαντικό βήμα αποτελεί η σύγκλιση των διαφόρων τεχνολογιών ασύρματων δικτύων γύρω από ένα ενιαίο δίκτυο πυρήνα, το οποίο είναι βασισμένο στην τεχνολογία του πρωτοκόλλου διαδικτύου (Internet Protocol - IP) [1]. Πολλά ασύρματα δίκτυα πρόσβασης επιτυγχάνουν την απρόσκοπτη και αδιάλειπτη σύνδεση των χρηστών χωρίς χρονικούς ή χωρικούς περιορισμούς. Έχοντας, σαν βάση αυτό το μοντέλο συστήματος, οι μελλοντικές προσπάθειες για παροχή τηλεπικοινωνιών φιλοδοξούν να παρέχουν ένα σύνολο έξυπνων και ανεπτυγμένων υπηρεσιών προς όφελος του χρήστη.

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει τη γενική αρχιτεκτονική των μελλοντικών ασύρματων συστημάτων τέταρτης γενιάς (4G systems) [2][3], δίνοντας έμφαση στα ιδιαίτερα γνωρίσματα των επιμέρους στοιχείων που απαιτούνται για την επίτευξη αυτής της αρχιτεκτονικής. Περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα προς την προσπάθεια υλοποίησης των συστημάτων αυτών. Προς τον σκοπό αυτό, γίνεται αναφορά στα δίκτυα πέραν της τρίτης γενιάς (Beyond 3G networks - B3G) [4] και τις προτεινόμενες αρχιτεκτονικές διαλειτουργικότητας μεταξύ των δικτύων αυτών. Έχοντας σαν βάση αυτό, οι επόμενες παράγραφοι αναλώνονται στην περιγραφή των απαιτήσεων για την εισαγωγή στα συστήματα 4<sup>ης</sup> Γενιάς, καθώς και στην ανάλυση μιας προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Επίσης, παρατίθενται τα πεδία έρευνας σχετικά με τα μελλοντικά συστήματα τηλεπικοινωνιών.

Σε μία επόμενη παράγραφο, δίνονται τα βασικά στοιχεία ενός σύγχρονου επιχειρηματικού μοντέλου και εισάγεται η έννοια της μεσιτείας. Η ανάγκη ύπαρξης τέτοιων μοντέλων πηγάζει από το γεγονός ότι η απελευθέρωση στην αγορά των τηλεπικοινωνιών επιτρέπει τη δραστηριοποίηση πολλών Παρόχων στην όλη διαδικασία προσφοράς τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών στους χρήστες. Επομένως, ένα ισχυρό όσο και απλό επιχειρηματικό μοντέλο κρίνεται αναγκαίο και απαραίτητο για την ρύθμιση των σχέσεων μεταξύ των διαφόρων επιχειρηματικών οντοτήτων.

Πέρα από την παράθεση των θεμάτων που αποτελούν τον πυρήνα της έρευνας την περίοδο αυτή, το κεφάλαιο αυτό κάνει μια εισαγωγή στις τεχνολογίες υλοποίησης των συστημάτων διαχείρισης. Συγκεκριμένα, περιγράφεται η τεχνολογία των πρακτόρων και δίνονται τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα αυτής της τεχνολογίας για την υποστήριξη των διαδικασιών κατανεμημένων λειτουργιών διαχείρισης.

Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την έννοια της Ποιότητας Υπηρεσίας, η οποία αναλύεται διεξοδικά, καθώς αποτελεί την μεγαλύτερη πρόκληση των μελλοντικών ασύρματων δικτύων. Η αναφορά στην έννοια αυτή περιλαμβάνει τόσο έναν ορισμό, μαζί με τα βασικά χαρακτηριστικά της ποιότητας υπηρεσιών, όσο και τις διάφορες διαδικασίες υλοποίησης και υποστήριξης της ποιότητας υπηρεσιών στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

## **2.2. Σχήματα αρχιτεκτονικών Διαλειτουργικότητας Ασύρματων Δικτύων B3G**

Η διαλειτουργικότητα αποτελεί την προσπάθεια ενοποίησης των διαφόρων τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης, με στόχο την επίτευξη της αδιάλειπτης υποστήριξης των συνόδων και συνδέσεων των χρηστών και την κάθετη μεταγωγή των δεδομένων των κινητών χρηστών από την μία δικτυακή τεχνολογία στην άλλη.

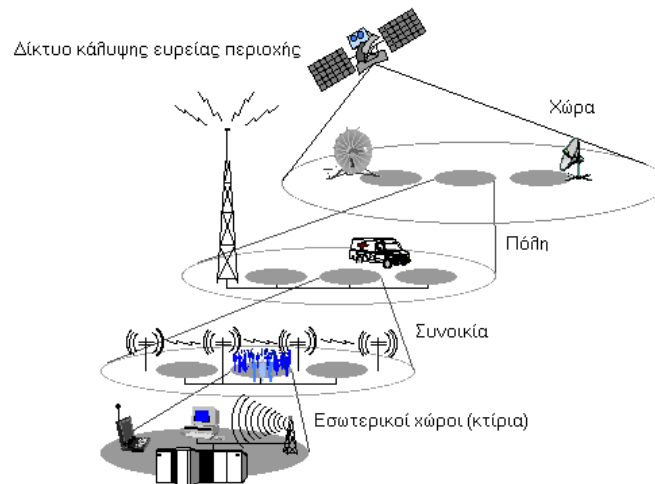
Όπως περιγράφηκε και στην εισαγωγή αυτού του κεφαλαίου, η τάση στην σύγχρονη εποχή ενισχύει την ανάπτυξη μηχανισμών που θα επιτρέψουν την συνεργασία μεταξύ διαφορετικών Παρόχων, οι οποίοι, στην πλειάδα των περιπτώσεων, διακρίνονται από την μεταξύ τους ανομοιογένεια. Έτσι, είναι απαραίτητη η θέσπιση κανόνων που θα ορίζουν τις σχέσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ομότιμων επιχειρηματικών οντοτήτων που ελέγχουν διαφορετικά υφιστάμενα δίκτυα και υπηρεσίες.

Η παράγραφος αυτή περιγράφει τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές για τη διαλειτουργικότητα μεταξύ ασύρματων δικτύων B3G [1]. Πιο συγκεκριμένα, παραθέτει ευέλικτους και αποτελεσματικούς τρόπους για την προσέγγιση της διαλειτουργικότητας τέτοιων δικτύων. Η προσέγγιση αυτή γίνεται σταδιακά, ώστε να επιτρέψει τη δυναμική ολοκλήρωση των υπάρχοντων και μελλοντικών τεχνολογιών σε μια ενιαία βάση επικοινωνίας με άξονα το πρωτόκολλο IP.

### **2.2.1. Γενικές Απαιτήσεις Διαλειτουργικότητας**

Όλες οι ερευνητικές προσπάθειες για την επίτευξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ ετερογενών δικτύων εστιάζονται στην υλοποίηση ενός ιεραρχικά δομημένου συστήματος, όπως αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 2-1. Η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος έγκειται στην ολοκλήρωση των υπάρχοντων, κυτταρικής δομής, ασύρματων δικτύων (Global System of Mobile Communication - GSM, General Packet Radio Service - GPRS, Universal Mobile Telecommunication System - UMTS) με άλλα δίκτυα ευρείας ζώνης (Digital Video Broadcasting

Terrestrial - DVB-T, Digital Audio Broadcasting - DAB) και ασύρματα δίκτυα τοπικής και προσωπικής εμβέλειας (Wireless Local Area Network - WLAN, HIPERLAN2, Bluetooth). Σε κάθε κατηγορία μπορούμε να διακρίνουμε μια σειρά από ανεξάρτητα δίκτυα, τα οποία υλοποιούν διαφορετικούς μηχανισμούς κωδικοποίησης, λειτουργούν σε διάφορες περιοχές του ραδιοφάσματος και, γενικά, συντηρούν όλα εκείνα τα στοιχεία που τους επιτρέπουν να ξεχωρίζουν από τα υπόλοιπα της ίδιας οικογένειας.



**Σχήμα 2-1. Απεικόνιση μελλοντικού ιεραρχικά δομημένου ασύρματου συστήματος**

Πολλές έρευνες επάνω στη διαλειτουργικότητα των ασύρματων δικτύων έχουν δείξει την ανάγκη ύπαρξης μιας πλατφόρμας παροχής υπηρεσιών, που θα είναι ανεξάρτητη από τη δικτυακή υποδομή των εμπλεκόμενων συστημάτων [4][5][6]. Η ανάπτυξη, βέβαια, μιας τέτοιας πλατφόρμας προϋποθέτει μια σειρά από αναγκαίες ρυθμίσεις στη λειτουργία των δικτύων, ωστόσο οι απαιτούμενες τροποποιήσεις δεν αφορούν τόσο στην εσωτερική λειτουργία των δικτύων, όσο στην ανάγκη ύπαρξης νέων διεπαφών και επικοινωνιακών πρωτοκόλλων με τον εξωτερικό κόσμο. Η προσαρμογή αυτή έγκειται τόσο στη δυνατότητα εναρμόνισης των τερματικών και των δικτύων με τις απαιτήσεις νέων υπηρεσιών και εφαρμογών, όσο και στην ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου ελέγχου της προσφερόμενης κίνησης, που θα χρησιμοποιεί τυποποιημένους μηχανισμούς μεταφοράς της πληροφορίας και θα επιτρέπει την αδιάλειπτη παροχή υπηρεσιών κατά τη μεταγωγή ενός χρήστη από ένα δίκτυο σε άλλο [7].

Σε γενικά πλαίσια, οι απαιτήσεις για τη διαλειτουργικότητα των ασύρματων τεχνολογιών έχουν να κάνουν με την ικανότητα, αλλά και τη δυνατότητα, ενσωμάτωσης της μίας τεχνολογίας μέσα στην άλλη ή την απαίτηση για τη διατήρηση της αυτονομίας κάθε συστήματος και την ανάπτυξη μιας νέας τεχνολογίας, ανεξάρτητης από τις άλλες, που θα επωμισθεί το βάρος της διασύνδεσης των ασύρματων δικτύων. Για την τήρηση της αυτονομίας των συστημάτων, ο δεύτερος τρόπος κρίνεται πιο αποτελεσματικός και, προς αυτήν την κατεύθυνση, συνιστώνται τα ακόλουθα :

- ❑ Λειτουργικός διαχωρισμός μεταξύ του δικτύου πρόσβασης και της εσωτερικής δικτυακής υποδομής.
- ❑ Τυποποίηση συγκεκριμένων απαιτήσεων για την επίτευξη της επιθυμητής διαλειτουργικότητας.
- ❑ Ανάπτυξη διεπαφών για την επικοινωνία μεταξύ πολλαπλών δικτυακών τεχνολογιών.

Συνεπώς, η υλοποίηση μιας αρχιτεκτονικής για την λειτουργική διασύνδεση αυτών των συστημάτων προϋποθέτει μια σειρά από απαιτήσεις, που σκοπό έχουν να συμβάλλουν στην επίτευξη της αδιάλειπτης παροχής υπηρεσιών προς τους τελικούς χρήστες. Οι απαιτήσεις αυτές μπορούν να συνοψισθούν στα ακόλουθα [5]:

- ❑ *Διαδικασίες εύρεσης δικτύου πρόσβασης.* Η επίτευξη διαλειτουργικότητας μεταξύ ετερογενών ασύρματων δικτύων απαιτεί την ανάπτυξη πολύπλοκων υπολογιστικών προγραμμάτων για την υποστήριξη διεπαφών, οι οποίες θα επιτρέπουν την πρόσβαση σε πολλαπλά ασύρματα περιβάλλοντα. Τέτοιοι μηχανισμοί θα πρέπει να μπορούν να ανακαλύπτουν νέα δίκτυα πρόσβασης και να συλλέγουν στατιστικές μετρήσεις σχετικά με την ποιότητα λήψης δεδομένων από το εκάστοτε δίκτυο.
- ❑ *Διαδικασίες πιστοποίησης, εξουσιοδότησης και λογιστικής χρέωσης (Authentication Authorization and Accounting, AAA) και διαχείρισης του προφίλ χρηστών.* Οι μηχανισμοί για την εξουσιοδοτημένη χρήση των δικτύων σε ένα σύνθετο περιβάλλον είναι ιδιαίτερα πολύπλοκοι, καθώς χρειάζεται να γίνεται μετάφραση των στοιχείων εγγραφής στο συγκεκριμένο σχήμα που υποστηρίζει κάθε δίκτυο. Είναι, επίσης, απαραίτητη η ανάπτυξη ενός ενιαίου συστήματος χρέωσης, που θα αναλαμβάνει να διαχειρίζεται τα λογιστικά στοιχεία των χρηστών ανεξάρτητα από το δίκτυο χρήσης και τους διακανονισμούς μεταξύ των διαφόρων Παρόχων, οι οποίοι εμπλέκονται στις διαδικασίες παροχής μιας υπηρεσίας προς ένα συγκεκριμένο πελάτη.
- ❑ *Διαδικασίες διαχείρισης πόρων.* Η ανάγκη για διαλειτουργικότητα εισάγει έναν επιπρόσθετο παράγοντα στις διαδικασίες διαχείρισης των δικτυακών πόρων. Αυτό σημαίνει ότι τα συνεργαζόμενα συστήματα πρέπει να υιοθετήσουν πιο ευέλικτους μηχανισμούς ανάθεσης πόρων, που, από την μια, θα επιτρέπουν στο εκάστοτε δίκτυο να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις ενός ανταγωνιστικού περιβάλλοντος και, από την άλλη, θα συμβάλλει στην σωστή διαχείριση ολόκληρου του ραδιοφάσματος προς όφελος του χρήστη. Προς αυτήν την κατεύθυνση, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη αλγόριθμοι βέλτιστης κατανομής πόρων, με βασικό γνώμονα την εξισορρόπηση του τηλεπικοινωνιακού φορτίου μεταξύ των διαθέσιμων δικτύων, τα κριτήρια ποιότητας των υποστηριζόμενων υπηρεσιών και τα χαρακτηριστικά των απαιτήσεων των χρηστών.
- ❑ *Διαχείριση κινητικότητας πρωτοκόλλου διαδικτύου (IP mobility).* Η επέκταση των πρωτοκόλλων διαδικτύου σε ασύρματα συστήματα επιτρέπει την αδιαφανή διασύνδεση των κινητών χρηστών κατά τη μετάβασή τους σε δίκτυα της ίδιας ή διαφορετικής υποδομής. Τα

πρωτόκολλα αυτά επιφέρουν βελτίωση, όσον αφορά την επαναχρησιμοποίησή τους σε ένα σύνθετο ασύρματο περιβάλλον, ώστε να ελαχιστοποιήσουν την καθυστέρηση κατά την μεταγωγή, να μειώσουν τις απώλειες των πακέτων και να εκμηδενίσουν τις πιθανότητες απώλειας της επικοινωνίας.

- *Διαδικασίες παροχής βελτιωμένων εφαρμογών.* Το περιεχόμενο μιας υπηρεσίας θα πρέπει να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του δικτύου και της τερματικής συσκευής.

### 2.2.2. Απαιτήσεις διαλειτουργικότητας βάσει του οργανισμού 3GPP

Η διαλειτουργικότητα των ασύρματων συστημάτων με βάση τον οργανισμό τυποποιήσεων Third Generation Partnership Project (3GPP) εστιάζεται στην ολοκλήρωση του WLAN με άλλα ασύρματα, κυτταρικά συστήματα. Οι προσπάθειες αυτές προωθούνται κυρίως από τους Παρόχους Δικτυακών Πόρων, οι οποίοι θέλουν να επωφεληθούν από την ραγδαία αναπτυσσόμενη τεχνολογία WLAN και να προσφέρουν στους συνδρομητές τους βελτιωμένες υπηρεσίες πακέτου υψηλής ταχύτητας. Όλοι οι οργανισμοί τυποποίησης έχουν δημιουργήσει μια ενιαία ομάδα για την υποστήριξη της ολοκλήρωσης του WLAN με τα ασύρματα δίκτυα, υπό την επωνυμία WIG (Wireless Interworking Group). Οι πιο έντονες προσπάθειες προς αυτήν την κατεύθυνση προέρχονται από τον διεθνή οργανισμό τυποποίησης 3GPP, ο οποίος παρέχει τις απαιτήσεις λειτουργίας του GSM και του UMTS. Ο 3GPP έχει αρχίσει την προσπάθεια για τη θέσπιση των απαιτήσεων διαλειτουργικότητας μεταξύ του WLAN και του GPRS.

Η σταδιακή προσέγγιση της διαλειτουργικότητας των ασύρματων δικτύων ακολουθεί μια σειρά από σενάρια. Σε κάθε σενάριο, μπορούν να αναγνωριστούν μια σειρά από απαιτήσεις για την επίτευξη του τελικού στόχου. Όλες, βέβαια, οι προσπάθειες πρέπει να έχουν ως στόχο την καλύτερη εξυπηρέτηση και φροντίδα του τελικού χρήστη.

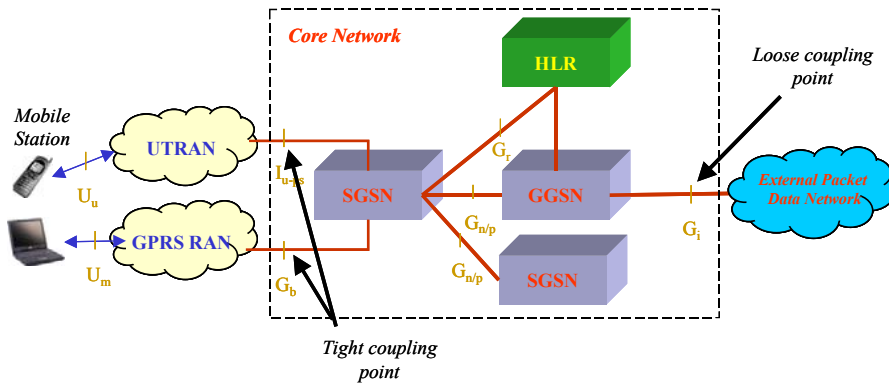
Πέρα από τις γενικές απαιτήσεις διαλειτουργικότητας που αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορεί να διατυπωθεί μια σειρά από επιμέρους απαιτήσεις, οι οποίες έχουν, κύρια, να κάνουν με τα απαραίτητα στάδια ολοκλήρωσης των ασύρματων δικτύων. Για τον σκοπό αυτό έχουν οριστεί τα ακόλουθα σενάρια διαλειτουργικότητας [8]:

- *Ενιαίο σύστημα έκδοσης λογαριασμού και φροντίδας του πελάτη.* Η ανάπτυξη ενός ενιαίου συστήματος έκδοσης λογαριασμών και η φροντίδα για την εξυπηρέτηση του πελάτη, αποτελούν το πρώτο στάδιο για τη διαλειτουργικότητα. Η ιδέα βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε σύστημα αναπτύσσει μια πελατειακή σχέση με τον χρήστη του δικτύου. Κάθε πελάτης λαμβάνει μια ενιαία χρέωση από το διαχειριστή του δικτύου για την χρήση όλων των υπηρεσιών που έχει κάνει. Αυτό, βέβαια, δεν επιβάλλει καμία νέα απαίτηση για την αλλαγή των προδιαγραφών στον καθορισμό της μονάδας χρέωσης ανά επίπεδο υπηρεσίας. Ένα σύστημα φροντίδας του πελάτη επιτρέπει έναν απλοποιημένο τρόπο παροχής υπηρεσιών, τόσο από την πλευρά του Παρόχου, όσο και από την πλευρά του χρήστη.

- ❑ *Έλεγχος πρόσβασης και χρέωση βάσει προδιαγραφών.* Με βάση αυτό το σενάριο, οι διαδικασίες πιστοποίησης, εξουσιοδότησης και λογιστικής χρέωσης βασίζονται στις αντίστοιχες για το GPRS/ UMTS. Για παράδειγμα, ένας χρήστης του δικτύου WLAN μπορεί να χρησιμοποιήσει, όπως στο GPRS/ UMTS, την κάρτα Subscriber Identity Module (SIM) για να εγγραφεί στο δίκτυο. Επίσης, η εξουσιοδότηση γίνεται από το GPRS/ UMTS βάσει των στοιχείων εγγραφής. Αυτό το σενάριο επιτρέπει τη σύνδεση των χρηστών GPRS/ UMTS με το διαδίκτυο μέσω του WLAN και δεν εισάγει νέες απαιτήσεις υπηρεσιών.
- ❑ *Πρόσβαση σε υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου.* Το σενάριο αυτό έχει σαν σκοπό να επιτρέψει στα κυτταρικά συστήματα να επεκτείνουν την πρόσβαση σε υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου και σε χρήστες WLAN. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι, παρόλο που προσφέρονται οι ίδιες υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου, δεν παρέχεται καμιά εγγύηση για την επίτευξη της συνέχειας στην παροχή υπηρεσίας μεταξύ των δικτύων.
- ❑ *Διάρκεια στην παροχή μιας υπηρεσίας.* Το σενάριο αυτό αποτελεί, ουσιαστικά, επέκταση του προηγούμενου σεναρίου. Υποστηρίζει, δηλαδή, υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου, εξασφαλίζοντας παράλληλα τη διαρκή παροχή αυτών των υπηρεσιών. Έτσι, ένας χρήστης που πραγματοποιεί μια υπηρεσία και μετακινείται από το ένα δίκτυο στο άλλο, μπορεί να συνεχίσει να έχει πρόσβαση στην ίδια υπηρεσία χωρίς να απαιτείται η διακοπή της. Όμως, οι απαιτήσεις για διαρκή παροχή υπηρεσιών δεν είναι αυστηρές, καθώς το δίκτυο, στο οποίο μετακινείται ο χρήστης, μπορεί να μην είναι ικανό να υποστηρίζει τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας, όπως η παροχή της ίδιας ποιότητας υπηρεσίας. Σαν αποτέλεσμα αυτού, η υπηρεσία τερματίζεται, καθώς ο χρήστης μεταγεται σε άλλο δίκτυο.
- ❑ *Εξασφάλιση της διαρκούς παροχής μιας υπηρεσίας.* Το σενάριο αυτό αποτελεί ένα επιπλέον βήμα, και σκοπό έχει να εξασφαλίσει τη διαρκή και αδιάλειπτη παροχή μιας υπηρεσίας κατά τη μεταγωγή χρηστών από ένα κυτταρικό σύστημα στο WLAN και αντίστροφα. Η διασφάλιση της συνέχειας στην παροχή μιας υπηρεσίας πρέπει να είναι αδιαφανής προς τον χρήστη, δηλαδή ο χρήστης δεν αντιλαμβάνεται κάποια μεταβολή κατά τη μεταγωγή.
- ❑ *Πρόσβαση σε υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος.* Ο σκοπός αυτού του σεναρίου είναι η υποστήριξη των υπηρεσιών μεταγωγής κυκλώματος από το WLAN, με βάση την εξασφάλιση της συνέχειας υπηρεσίας κατά την κινητικότητα των χρηστών.

### **2.2.3. Προσεγγίσεις Αρχιτεκτονικών Διαλειτουργικότητας**

Για την επίτευξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ των κυτταρικών συστημάτων και άλλων ασύρματων δικτύων, έχουν προταθεί πολλές προσεγγίσεις. Οι παρούσες ερευνητικές δραστηριότητες στην περιοχή της θέσπισης σεναρίων διαλειτουργικότητας συγκλίνουν σε δύο αρχιτεκτονικές, οι οποίες προσεγγίζουν το πρόβλημα από διαφορετικές πλευρές και παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό [9].



**Σχήμα 2-2: Αρχιτεκτονικές διαλειτουργικότητας ασύρματων συστημάτων κατά ETSI.**

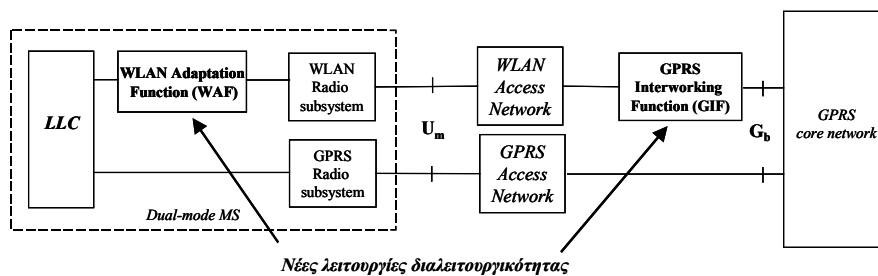
Ο διεθνής οργανισμός τυποποιήσεων European Telecommunications Standards Institute (ETSI) προτείνει δύο αρχιτεκτονικές προς αυτή την κατεύθυνση, τη λεγόμενη χαλαρή σύζευξη (loose coupling architecture) και την συμπαγή σύζευξη (tight coupling architecture). Αν και οι αρχιτεκτονικές αυτές έχουν περιγραφεί για την ολοκλήρωση των κυτταρικών δικτύων με το WLAN, εντούτοις δίνουν γενικές κατευθύνσεις και είναι άμεσα εφαρμόσιμες σε μεγάλο εύρος δικτύων. Η πρώτη αρχιτεκτονική οραματίζεται το WLAN σαν ένα ξεχωριστό, συμπληρωματικό δίκτυο πρόσβασης. Με τη δεύτερη αρχιτεκτονική, το WLAN διατηρεί το δίκτυό του όσον αφορά την ασύρματη πρόσβαση, αλλά κάνει χρήση του δικτύου πυρήνα του GPRS/ UMTS για την επικοινωνία με άλλα εξωτερικά δίκτυα πακέτων. Οι δύο αυτές προτάσεις του ETSI απεικονίζονται στο Σχήμα 2-2. Ακολουθώς, περιγράφονται οι δύο αυτές αρχιτεκτονικές για την ολοκλήρωση του WLAN με το GPRS, οι οποίες, βέβαια, είναι έγκυρες και για την τεχνολογία UMTS, αφού τόσο το GPRS όσο και το UMTS χρησιμοποιούν το ίδιο δίκτυο πυρήνα.

#### 2.2.4. Αρχιτεκτονική Συμπαγούς Σύζευξης

Η αρχιτεκτονική συμπαγούς σύζευξης προτείνει ένα νέο τρόπο για την επίτευξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ WLAN και άλλων κυτταρικών συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, προσπαθεί να ικανοποιήσει τα βασικά σενάρια ολοκλήρωσης που προτείνουν οι συστάσεις του ETSI, και με βάση τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας WLAN να προσφέρει στους χρήστες υπηρεσίες ασύρματης τεχνολογίας χωρίς διακοπές. Στην αρχιτεκτονική αυτή, το WLAN συνδέεται με το GPRS στο σημείο επαφής του ασύρματου κομματιού με το δίκτυο πυρήνα, δηλαδή στη διεπαφή Gb. Γενικά, η αρχιτεκτονική συμπαγούς σύζευξης παρέχει μια πρωτότυπη λύση για τη διαλειτουργικότητα του WLAN με άλλα κυτταρικά συστήματα, όπως το GPRS, και προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα:

- ⇒ Διαρκής παροχή υπηρεσιών μεταξύ WLAN και GPRS. οι χρήστες μπορούν να συνεχίσουν τις κλήσεις εξυπηρέτησης πακέτων, καθώς μετακινούνται από το ένα δίκτυο στο άλλο. Βέβαια, η επίτευξη της συνέχειας εξαρτάται και από την ικανότητα του νέου δικτύου να υποστηρίξει το ζητούμενο επίπεδο υπηρεσίας.
- ⇒ Επαναχρησιμοποίηση των διαδικασιών AAA του GPRS.

- ⇒ Επαναχρησιμοποίηση της δικτυακής υποδομής του GPRS (π.χ. το δίκτυο πυρήνα, τις βάσεις δεδομένων των συνδρομητών Home Location Register (HLR)/Visitor Location Register (VLR), τα συστήματα χρέωσης) και προστασία των επενδύσεων των Παρόχων.
- ⇒ Υποστήριξη θεμιτής αναχαίτισης (binding) για συνδρομητές WLAN.
- ⇒ Αυξημένες εγγυήσεις παροχής ασφάλειας, αφού οι διαδικασίες της πιστοποίησης και κρυπτογράφησης του GPRS εφαρμόζονται πάνω από τις αντίστοιχες για το WLAN.
- ⇒ Κοινές διαδικασίες παροχής υπηρεσιών και φροντίδας των χρηστών.
- ⇒ Πρόσβαση σε υπηρεσίες του δικτύου πυρήνα του GPRS (Short Messaging Service SMS, Multimedia Messaging Service MMS).



**Σχήμα 2-3: Βασικές αρχές της αρχιτεκτονικής συμπαγούς σύζευξης**

Το Σχήμα 2-3 περιγράφει τις βασικές αρχές της αρχιτεκτονικής συμπαγούς σύζευξης. Όπως απεικονίζεται, το WLAN θεωρείται ως ένα ανεξάρτητο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης, όπως το αντίστοιχο για την ασύρματη πρόσβαση στο GPRS. Αυτό σημαίνει ότι, το δίκτυο πυρήνα του GPRS δεν αναγνωρίζει τη διαφορά μεταξύ του δικτύου ασύρματης πρόσβασης WLAN και του αντίστοιχου GPRS. Το βασικό λειτουργικό κομμάτι στην αρχιτεκτονική αυτή είναι η Μονάδα Διαλειτουργικότητας GPRS (GPRS Interworking Function, GIF). Αυτή είναι ένας ενδιάμεσος κόμβος μεταξύ του συστήματος κατανομής (DS) του WLAN και του SGSN του GPRS. Η βασική λειτουργία της GIF είναι ότι παρέχει μια διεπαφή μεταξύ του δικτύου πυρήνα του GPRS και του WLAN, κρύβοντας τις ιδιαιτερότητες του WLAN, έτσι ώστε το τελευταίο να αναγνωρίζεται σαν ένα απλό δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. Πρέπει, εδώ, να σημειωθεί ότι, η αρχιτεκτονική αυτή δεν εισάγει την ανάγκη αντικατάστασης των υπάρχοντων πρωτοκόλλων, αλλά στην ουσία συνεισφέρει στην καλύτερη αξιοποίησή τους.

Όταν ένα τερματικό είναι εκτός της περιοχής κάλυψης ενός WLAN, η αντίστοιχη διεπαφή είναι σε παθητικό ρόλο, δηλαδή απλά ελέγχει την αντίστοιχη φασματική περιοχή και ψάχνει για το κατάλληλο σήμα ειδοποίησης. Όταν ανιχνευτεί το σήμα αυτό, το πεδίο αναγνώρισης του συνόλου υπηρεσιών (Service Set Identifier - SSID) ελέγχεται για να διαπιστωθεί αν το τερματικό είναι συνδεδεμένο με το συγκεκριμένο σημείο πρόσβασης (AP), στο οποίο ανήκει το SSID, και πραγματοποιεί τις διαδικασίες πιστοποίησης και εξουσιοδότησης. Βέβαια, για να μπορέσει το τερματικό να πραγματοποιήσει τη μεταγωγή από ένα κυτταρικό σύστημα (GPRS) στο WLAN, θα πρέπει να είναι ικανό να λειτουργήσει και στα δύο περιβάλλοντα. Ένα πρόβλημα, όμως, που



ανακύπτει έχει να κάνει με την ικανότητα του τερματικού να αναγνωρίσει τη διεύθυνση του πρωτοκόλλου Medium Access Control MAC που χρησιμοποιεί κάθε στιγμή, και η οποία εξαρτάται από το δίκτυο που χρησιμοποιεί εκείνη τη στιγμή. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με την ανάπτυξη, εντός του τερματικού, δύο ξεχωριστών ασύρματων υποσυστημάτων, ενός για το GPRS και ενός άλλου για το WLAN. Στο δεύτερο υπάρχει μια επιπλέον Συνάρτηση Προσαρμογής στο WLAN (WLAN Adaptation Function, WAF), η οποία αναγνωρίζει πότε το υποσύστημα WLAN του τερματικού είναι ενεργοποιημένο, και ειδοποιεί το επίπεδο Ελέγχου Λογικής Ζεύξης (Logical Link Layer, LLC) να δρομολογήσει τα πακέτα προς το WLAN. Σημειώνεται ότι, όλα τα πρωτόκολλα του GPRS λειτουργούν πάνω από το επίπεδο LLC και, επομένως, δεν αναγνωρίζουν ποιο υποσύστημα χρησιμοποιείται κάθε φορά.

#### ***2.2.4.1. WLAN λειτουργία προσαρμογής***

Η WLAN λειτουργία προσαρμογής (WLAN Adaptation Function - WAF) αποτελεί ένα σημαντικό συστατικό της αρχιτεκτονικής συμπαγούς σύζευξης. Η συνάρτηση αυτή υλοποιείται σε κάθε κινητό τερματικό, όπως και στην GIF μεταξύ του DS του WLAN και του κόμβου SGSN του GPRS, και υποστηρίζει τις απαραίτητες λειτουργίες διαλειτουργικότητας. Συνοπτικά, με την WAF μπορούμε να μεταφέρουμε σηματοδότηση και δεδομένα GPRS πάνω από WLAN.

Η WAF ειδοποιεί για την ενεργοποίηση της διεπαφής WLAN, όταν το τερματικό εισέρχεται μέσα στην περιοχή κάλυψης ενός WLAN, καθώς και την αλλαγή στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης κατά την προσκόλληση του τερματικού σε ένα AP. Επίσης, υποστηρίζει όλες τις διαδικασίες ανταλλαγής πακέτων, από το τερματικό προς την GIF και αντίστροφα. Για το σκοπό αυτό, υποστηρίζει παροχή ποιότητας υπηρεσίας με την εφαρμογή ενός αλγορίθμου κατά τη μετάδοση από κάθε κόμβο.

Κάθε LLC πακέτο PDU ενθυλακώνεται μέσα σε ένα WAF πακέτο Packet Data Unit (PDU). Η πληροφορία που σχετίζεται με την παροχή της ζητούμενης ποιότητας μεταφέρεται, μαζί με ένα μοναδικό αριθμό αναγνώρισης του προσωρινού λογικού καναλιού επικοινωνίας (Temporary Logical Link Identifier, TLLI), χρήσιμο στις διαδικασίες δρομολόγησης, στην επικεφαλίδα του πακέτου WAF. Το TLLI χρησιμοποιείται από τη συνάρτηση GIF για την ανανέωση ενός εσωτερικού πίνακα αντιστοίχισης, που συσχετίζει τα TLLI με διευθύνσεις MAC 802. Η συσχέτιση αυτή είναι αναγκαία για τη δρομολόγηση των LLC PDU που λαμβάνονται στη διεπαφή Gb προς το σωστό χρήστη στο WLAN. Ο αριθμός TLLI χρησιμοποιείται στον κόμβο SGSN, στη διεπαφή Gb, σαν πληροφορία διευθυνσιοδότησης, ενώ μέσα στο WLAN γίνεται χρήση των διευθύνσεων MAC 802. Κατά τη μεταφορά πληροφορίας από το τερματικό προς το δίκτυο, τα πακέτα περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τον μέγιστο μεταφερόμενο ρυθμό, την κλάση προτεραιότητας και την κατάσταση του επιπέδου Ελέγχου Ασύρματης Ζεύξης (Radio Link Control, RLC). Αυτές οι ιδιότητες χρησιμοποιούνται από το τερματικό και από την GIF για τη διαπίστωση της παρεχόμενης ποιότητας. Τα πακέτα που ακολουθούν την αντίστροφη πορεία (από το δίκτυο προς το τερματικό) δεν μεταφέρουν καμιά πληροφορία τέτοιου είδους.

Μια άλλη βασική λειτουργία της WAF είναι η υποστήριξη των διαδικασιών αναζήτησης GIF και αναγνώρισης της περιοχής ασύρματης κάλυψης (Radio Area Identifier, RAI), η οποία ξεκινά από το τερματικό, μόλις αυτό εισέλθει στην περιοχή του WLAN, με σκοπό την αναζήτηση της διεύθυνσης MAC της συνάρτησης GIF και του αριθμού αναγνώρισης του δικτύου ασύρματης πρόσβασης του WLAN. Η διεύθυνση MAC 802, που ανιχνεύεται με αυτήν τη διαδικασία, χρησιμοποιείται κατόπιν για τη μεταφορά των LLC πακέτων PDU. Επίσης, με την αναζήτηση GIF/RAI μεταφέρεται προς την GIF και ο αριθμός IMSI του χρήστη, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί για τα μηνύματα σελιδοποίησης στον SGSN.

Συμπερασματικά, παραπάνω περιγράφηκαν η αρχιτεκτονική συμπαγούς σύζευξης και τα βασικά της στοιχεία, που είναι η συνάρτηση GIF, μεταξύ του DS του WLAN και του SGSN κόμβου του GPRS, και η συνάρτηση WAF, που υλοποιείται μέσα στο τερματικό για την ανίχνευση της ενεργοποίησης του υποσυστήματος WLAN, καθώς και μέσα στην GIF. Με βάση αυτή την αρχιτεκτονική, το τερματικό μπορεί να κινηθεί μεταξύ των ασύρματων κυτταρικών δικτύων με διαφορετικές διαδικασίες ασύρματης πρόσβασης, αλλά με τις ίδιες διαδικασίες ελέγχου GPRS της κινητικότητας.

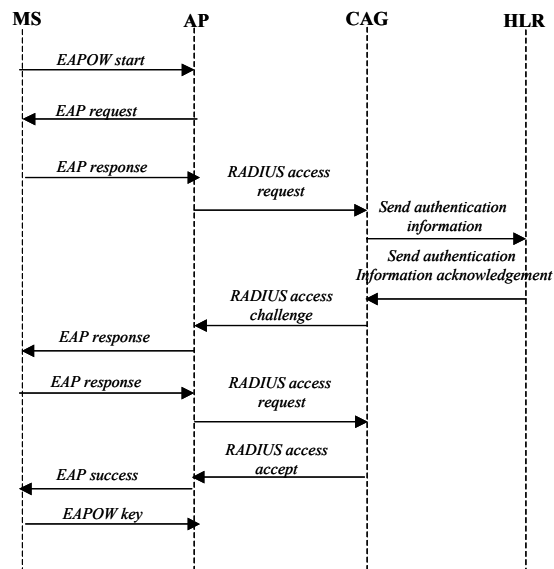
### **2.2.5. Αρχιτεκτονική Χαλαρής Σύζευξης**

Η αρχιτεκτονική χαλαρής σύζευξης αποτελεί μια βραχυπρόθεσμη λύση στην επίτευξη της διαλειτουργικότητας. Με αυτήν, ο χρήστης χρησιμοποιεί την κοινή κάρτα SIM για να κάνει χρήση των παρεχόμενων υπηρεσιών μέσω WLAN. Η πιστοποίηση γίνεται βάσει της κάρτας SIM και, έτσι, ο χρήστης αποκτά πρόσβαση τόσο στο GPRS όσο και στο WLAN. Επίσης, αυτή η αρχιτεκτονική υποστηρίζει ένα ολοκληρωμένο σύστημα χρέωσης μέσω ενός μεσολαβητή χρέωσης. Το δίκτυο WLAN μπορεί να ανήκει σε διαφορετικό Πάροχο, ενώ η υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών και της μεταγωγής γίνεται μέσω μιας αφιερωμένης σύνδεσης, μεταξύ του Παρόχου GPRS και WLAN ή μέσω ενός υπάρχοντος δικτύου, όπως είναι το διαδίκτυο.

Το σημείο διασύνδεσης μεταξύ GPRS και WLAN στην αρχιτεκτονική χαλαρής σύζευξης είναι το σημείο επαφής με το διαδίκτυο. Η ροή των πακέτων πληροφορίας από υπηρεσίες WLAN δεν περνά από το δίκτυο πυρήνα του GPRS, αλλά πηγαίνει απευθείας προς το διαδίκτυο. Η πιστοποίηση και η χρέωση γίνονται βάσει των τυποποιημένων πρωτοκόλλων Internet Engineering Task Force (IETF) [10], άρα δεν απαιτείται η εισαγωγή κάποιας από τις υπάρχουσες τεχνολογίες κυτταρικών συστημάτων στο WLAN.

Οι διαδικασίες πιστοποίησης είναι παρόμοιες με αυτές του GPRS. Ειδικά στην περίπτωση που ο Πάροχος GPRS είναι και Πάροχος του WLAN, η ανάγκη επαναχρησιμοποίησης της κάρτας SIM για την πιστοποίηση είναι προφανής. Σε κάθε περίπτωση, για την πιστοποίηση ενός χρήστη WLAN ακολουθείται η ίδια διαδικασία. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-4, η διαδικασία ξεκινά αφού ένα τερματικό χρήστη έχει προσκολληθεί σε κάποιο AP. Τότε στέλνει προς το AP ένα μήνυμα για την έναρξη της διαδικασίας πιστοποίησης μέσω μηνυμάτων Εκτεταμένου Πρωτοκόλλου Πιστοποίησης (Extensible Authentication Protocol, EAP) και EAP-over-WLAN

(EAPOW). Το AP επικοινωνεί με μια πύλη κυτταρικής πρόσβασης (Cellular Access Gateway, CAG) μέσω μηνυμάτων απομακρυσμένης πιστοποίησης για την παροχή υπηρεσίας στον χρήστη (Remote Authentication Dial In User Services, RADIUS), στέλνοντας προς την CAG τον μοναδικό αριθμό αναγνώρισης χρήστη International Mobile Subscriber Identity (IMSI). Με βάση αυτόν τον αριθμό, η CAG μπορεί να επικοινωνήσει με τη μητρική βάση καταχώρησης HLR, όπου είναι καταχωρημένα τα στοιχεία εγγραφής του συγκεκριμένου τερματικού, και αποκτά μια συγκεκριμένη τιμή για την πιστοποίηση. Αυτή η τιμή αποστέλλεται πίσω στο τερματικό, όπου στην κάρτα SIM υπολογίζεται βάσει κάποιου αλγορίθμου μια νέα τιμή πιστοποίησης. Η νέα τιμή στέλνεται πίσω προς την CAG, η οποία ελέγχει αν αυτές οι τιμές πιστοποίησης είναι ίδιες, για να δώσει έτσι την έγκριση στο τερματικό να κάνει χρήση του WLAN. Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι, για να γίνει η πιστοποίηση και η εξουσιοδότηση στο WLAN, πρέπει να γίνει χρήση της HLR του δικτύου GPRS.



**Σχήμα 2-4: Πιστοποίηση χρηστών WLAN με βάση την κάρτα SIM**

Όσον αφορά τη χρέωση, στην αρχιτεκτονική χαλαρής σύζευξης αυτή πραγματοποιείται μέσω μιας συνάρτησης μεσολαβητή χρέωσης. Το AP σε ένα δίκτυο WLAN κάνει αναφορές προς την CAG για τα λογιστικά στοιχεία χρέωσης, μέσω τυποποιημένων διαδικασιών AAA (π.χ. RADIUS accounting). Τα στοιχεία αυτά, κατόπιν, προωθούνται προς τον μεσολαβητή χρέωσης. Με την ίδια διαδικασία, το GPRS στέλνει μέσω του δικτύου πυρήνα (κόμβοι SGSN, GGSN) τα δικά του στοιχεία χρέωσης. Ο ρόλος του μεσολαβητή χρέωσης είναι να συλλέξει τα στοιχεία εισαγωγής από τα διάφορα δίκτυα και να τα μετατρέψει σε μια ενιαία μορφή, προσαρμοσμένη σε αυτή που χρησιμοποιεί το σύστημα χρέωσης του Παρόχου (π.χ. ένα κοινό σύστημα χρέωσης δικτύου GPRS ή ενός κοινού δικτύου IP, που χρησιμοποιεί ένας Πάροχος IP).

Η κινητικότητα συνόδου πραγματοποιείται μέσω του Mobile IP. Οι βασικές αρχές λειτουργίας του Mobile IP περιγράφονται παρακάτω (ενότητα 2.2.6). Το πρόβλημα, όμως, που ανακύπτει από

την εφαρμογή του Mobile IP για τη διαλειτουργικότητα του WLAN με ένα οποιοδήποτε ιδιωτικό δίκτυο, είναι ο τρόπος αναγνώρισης μιας ιδιωτικής διεύθυνσης IP (όπως αυτές που χρησιμοποιεί το GPRS) μέσα στο διαδίκτυο. Προς την κατεύθυνση αυτή έχουν γίνει πολλές μελέτες, οι οποίες έχουν οδηγήσει στη διατύπωση μιας τυποποίησης από τον IETF σχετικά με τη λειτουργία της τροποποιημένης μετάφρασης των διευθύνσεων δικτύου (Network Address Translator NAT traversal).

#### **2.2.6. Mobile IP**

Σε επίπεδο δικτύου, η επίτευξη της διαλειτουργικότητας απαιτεί την ύπαρξη πρωτοκόλλων υποστήριξης της κινητικότητας των χρηστών και της αποτελεσματικής δρομολόγησης των πακέτων στο διαδίκτυο, ώστε οι χρήστες να μπορούν να μετακινούνται ανάμεσα στα διάφορα δίκτυα, λαμβάνοντας διαφορετικό αναγνωριστικό (διεύθυνση διαδικτύου-IP address). Το Mobile IP έχει προταθεί σαν ένας ευέλικτος μηχανισμός προς την κατεύθυνση αυτή [11][12]. Εκείνο, όμως, που πρέπει να τονιστεί είναι ότι το πρωτόκολλο αυτό από μόνο του δεν εξασφαλίζει την επιθυμητή, αδιάλειπτη επικοινωνία με αποδεχτά επίπεδα ποιότητας, αλλά απαιτείται η ανάπτυξη και άλλων πρωτοκόλλων, που δρουν στο ίδιο ή σε υψηλότερα επίπεδα.

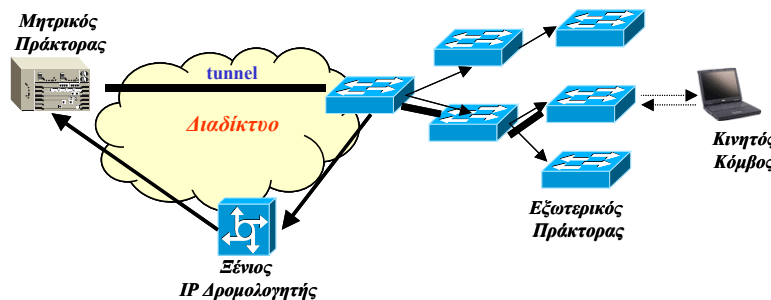
Για λόγους πληρότητας, το κεφάλαιο αυτό φιλοδοξεί να δώσει τις γενικές αρχές του Mobile IP και να περιγράψει τη γενική αρχιτεκτονική για τη δρομολόγηση των πακέτων IP που ανήκουν σε κινητούς χρήστες, οι οποίοι κινούνται μέσα σε διάφορα δίκτυα.

Το Mobile IP είναι ένας μηχανισμός για την αδιαφανή διασύνδεση των κινητών χρηστών κατά τη μετάβασή τους σε δίκτυα της ίδιας ή διαφορετικής υποδομής.. Είναι μια τυποποίηση του διεθνούς οργανισμού IETF, που επιτρέπει στους χρήστες να χρησιμοποιούν τη διεύθυνση IP, που τους έχει ανατεθεί από το μητρικό δίκτυο, ανεξάρτητα από το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένοι τοπικά.

Οι προδιαγραφές του Mobile IP εισάγουν ένα νέο σύνολο από οντότητες, που συνεργάζονται για την αποτελεσματική λειτουργία του Mobile IP. Ένας κινητός κόμβος είναι ένας χρήστης ή δρομολογητής, που κινείται ανάμεσα σε διάφορα δίκτυα με την ίδια, μοναδική διεύθυνση IP. Κάθε κινητός κόμβος υπόκειται σε ένα μητρικό πράκτορα, ο οποίος λειτουργεί ως δρομολογητής, αποθηκεύει την εκάστοτε θέση του κόμβου και αναλαμβάνει να μεταφέρει προς αυτόν τα αντίστοιχα πακέτα, όταν αυτός είναι συνδεδεμένος με ένα απομακρυσμένο δίκτυο. Η μεταφορά αυτή επιτυγχάνεται μέσα από τη συνεργασία με έναν εξωτερικό πράκτορα, που αντιπροσωπεύει το απομακρυσμένο δίκτυο και αναθέτει στον κόμβο μια νέα διεύθυνση αντιπροσώπευσης IP, καθ' όλη τη διάρκεια που αυτός είναι συνδεδεμένος στο απομακρυσμένο δίκτυο. Ένας απομακρυσμένος πράκτορας μπορεί να διαφημίσει την παρουσία του, μέσω ενός ειδικού μηνύματος. Η μοναδική διεύθυνση IP του κινητού κόμβου ονομάζεται μητρική διεύθυνση, ενώ η προσωρινή διεύθυνση, που του ανατίθεται από τον εξωτερικό πράκτορα, λέγεται διεύθυνση IP care-of (care-of IP address).

Η λειτουργία του Mobile IP βασίζεται στη συνεργασία τριών υποσυστημάτων. Αρχικά, καθώς οι κινητοί χρήστες κινούνται σε διάφορα λειτουργικά περιβάλλοντα, το Mobile IP χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό αναζήτησης για να καθορίσει τη σύνδεση του χρήστη με ένα δίκτυο, το οποίο διαθέτει ένα σύνολο από διευθύνσεις IP. Ο χρήστης εγγράφεται στο δίκτυο αυτό, το οποίο αναγνωρίζεται ως μητρικό δίκτυο, και του ανατίθεται μια διεύθυνση IP. Με βάση αυτήν, το Mobile IP καθορίζει αργότερα τον τρόπο δρομολόγησης των πακέτων IP που αντιστοιχούν στον χρήστη, καθώς αυτός κινείται μακριά από το μητρικό του δίκτυο. Κατά τη σύνδεσή του με ένα εξωτερικό δίκτυο, ο κινητός κόμβος πρέπει να εγγραφεί στον εξωτερικό πράκτορα και να λάβει μια διεύθυνση IP care-of. Με αυτόν τον τρόπο, τα πακέτα που αντιστοιχούν σε ένα συγκεκριμένο κινητό κόμβο, αρχικά δρομολογούνται προς τον μητρικό πράκτορα, ο οποίος αναγνωρίζει ότι ο κόμβος προορισμού έχει προσωρινά συνδεθεί σε έναν εξωτερικό πράκτορα. Έτσι, πραγματοποιεί μια διαδικασία ενθυλάκωσης της διεύθυνσης IP care-of και, μέσω ενός tunnel, προωθεί τα πακέτα προς τον εξωτερικό πράκτορα, ο οποίος και αναλαμβάνει να τα στείλει τελικά στον κινητό χρήστη. Βέβαια, η υπόλοιπη διαδικασία μεταφοράς των πακέτων IP, από και προς τον μητρικό πράκτορα, ακολουθεί την τυποποιημένη διαδικασία δρομολόγησης IP.

Η λειτουργία του Mobile IP, όπως περιγράφηκε παραπάνω, φαίνεται στο Σχήμα 2-5.



**Σχήμα 2-5: Ροή πληροφορίας των πακέτων IP στο Mobile IP**

Η διαδικασία αναζήτησης ενός πράκτορα, ακολουθεί τις βασικές αρχές αναζήτησης δρομολογητών διαδίκτυου μέσω του πρωτοκόλλου Internet Control Message Protocol (ICMP). Στην ουσία αποτελεί επέκταση αυτών, μέσω της διαφήμισης των πρακτόρων και της μεταφοράς πληροφορίας σχετικά με τις υπάρχουσες διευθύνσεις IP care-of. Η διαφήμιση των πρακτόρων περιλαμβάνει ένα σύνολο λειτουργιών. Πιο σημαντικές από αυτές είναι η ανίχνευση κινητών πρακτόρων με τη λίστα από τις διαθέσιμες διευθύνσεις IP care-of και η διαδικασία ενημέρωσης ενός κόμβου, αν ο εν λόγω πράκτορας είναι μητρικός ή εξωτερικός.

Για τη σωστή λειτουργία του Mobile IP, κάθε φορά που ένας κινητός κόμβος εγγράφεται σε έναν εξωτερικό πράκτορα και του ανατίθεται μια διεύθυνση IP care-of, πρέπει να ενημερώνει τον μητρικό πράκτορα για τη νέα του διεύθυνση. Αυτός με τη σειρά του ανανεώνει, στον πίνακα δρομολόγησης που διαθέτει, την τωρινή θέση του κινητού κόμβου και ενημερώνει τον εξωτερικό πράκτορα ότι μπορεί να δεχτεί αιτήσεις παροχής υπηρεσίας του κινητού κόμβου μέσω του εξωτερικού πράκτορα. Έτσι, για το διάστημα που ο κινητός χρήστης είναι συνδεδεμένος στο

απομακρυσμένο δίκτυο και επιθυμεί να εξυπηρετηθεί, ο μητρικός και ο εξωτερικός πράκτορας συνεργάζονται για την επιτυχημένη δρομολόγηση των πακέτων μέσα στο διαδίκτυο.

Το Mobile IP προσφέρει μια ικανοποιητική λύση για τη δρομολόγηση των πακέτων που αφορούν σε κινητούς χρήστες μέσα στο διαδίκτυο. Ωστόσο, πολλά προβλήματα έχουν προκύψει, τα οποία έχουν να κάνουν και με βασικές λειτουργίες του Mobile IP. Η διαδικασία σύνδεσης ενός κόμβου με ένα απομακρυσμένο δίκτυο, υπόκειται στους μηχανισμούς εξουσιοδότησης του δικτύου αυτού. Επίσης, τη λειτουργία του Mobile IP δυσχεραίνουν η ύπαρξη μηχανισμών προστασίας ενός δικτύου στα σημεία επικοινωνίας με το διαδίκτυο (φιλτράρισμα πακέτων), καθώς και οι εσωτερικοί μηχανισμοί ανάθεσης μητρικών διευθύνσεων IP σε κάθε δίκτυο.

Η επιτυχία του Mobile IP έγκειται στον τρόπο επιλογής της ενθυλάκωσης των πακέτων IP κατά την επαναδρομολόγηση τους από τον μητρικό προς τον εξωτερικό πράκτορα. Μια κοινή πρακτική, που έχει τυποποιηθεί ως ο βασικός μηχανισμός ενθυλάκωσης, αποτελεί η ενθυλάκωση IP εντός IP. Σε αυτήν, ο μητρικός κόμβος, κατά τη λήψη ενός πακέτου IP χρησιμοποιεί έναν προσυμφωνημένο τρόπο διαμόρφωσης και ενσωματώνει στην επικεφαλίδα του πακέτου τη διεύθυνση IP του εξωτερικού πράκτορα. Ο μηχανισμός αυτός είναι έγκυρος για δίκτυα, τα οποία χρησιμοποιούν κοινές διευθύνσεις IP για να μαρκάρουν τους χρήστες τους. Στην περίπτωση, όμως, που το μητρικό δίκτυο έχει αποδώσει σε έναν χρήστη μια ιδιωτική διεύθυνση IP, τότε πρέπει να αναζητηθούν άλλοι μηχανισμοί για την επιτυχή δρομολόγηση των πακέτων (π.χ. ενθυλάκωση IP σε UDP).

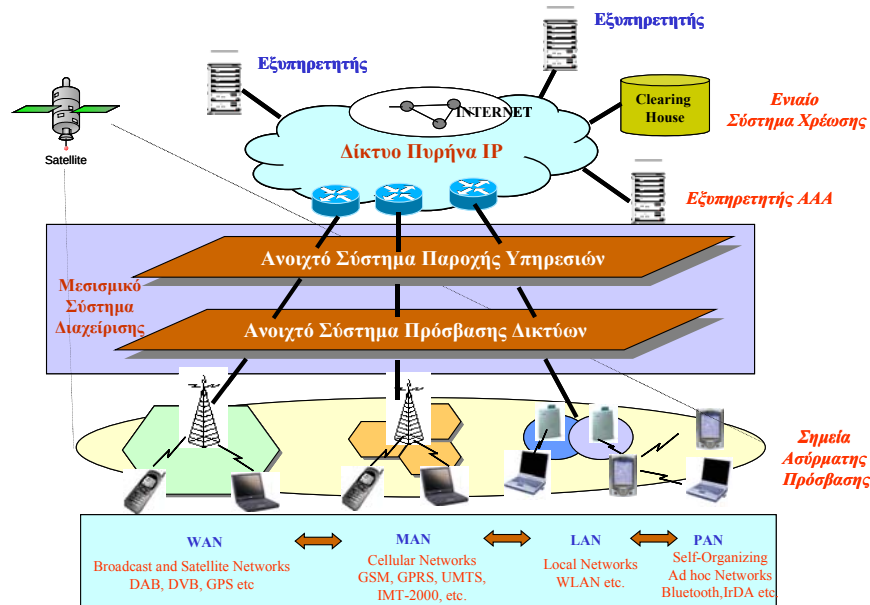
Τέλος, η επαναδρομολόγηση των πακέτων από και προς τον μητρικό πράκτορα επιβαρύνει το διαδίκτυο με επιπλέον μονοπάτια δρομολόγησης. Η επιβάρυνση αυτή έχει να κάνει και με τη φυσική απόσταση του μητρικού και απομακρυσμένου δικτύου, καθώς και τον αριθμό των δικτύων που μεσολαβούν για τη διασύνδεσή τους. Προς την κατεύθυνση αυτή, πολλές μελέτες έχουν γίνει για τη βέλτιστη δρομολόγηση των πακέτων και την ελαχιστοποίηση του μήκους του tunnel μεταξύ των πρακτόρων. Για την αντιμετώπιση της υποβάθμισης της ποιότητας χρησιμοποίησης του διαδικτύου, έχουν προταθεί πολλές λύσεις. Όλες αυτές επικεντρώνονται στο γεγονός ότι οι διαδικασίες μετάπτωσης ενός κινητού κόμβου από έναν εξωτερικό πράκτορα σε έναν άλλο είναι αδιαφανείς προς τον μητρικό πράκτορα, ο οποίος χρειάζεται να γνωρίζει μόνο τον πιο κοντινό του από τους πράκτορες αυτούς. Η ιεράρχηση των απομακρυσμένων πρακτόρων με βάση τη φυσική τους θέση αποτελεί έναν ευέλικτο μηχανισμό για τον περιορισμό των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται κατά την εξυπηρέτηση ενός κινητού κόμβου από ένα σύνολο πρακτόρων.

## **2.3. Αρχιτεκτονική Μελλοντικών Συστημάτων Τέταρτης Γενιάς**

### **2.3.1. Αρχιτεκτονική**

Έχοντας μια ιδέα της έννοιας της διαλειτουργικότητας μεταξύ των συστημάτων B3G και των τρόπων επίτευξης αυτής, προχωρούμε στην έννοια της διασύνδεσης των συστημάτων Τέταρτης

γενιάς, όπως αυτή περιγράφεται στα [1][2]. Έτσι, η παράγραφος αυτή περιγράφει ένα πρότυπο μοντέλο αρχιτεκτονικής για τα μελλοντικά ασύρματα συστήματα τέταρτης γενιάς. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύσσονται οι τάσεις προς την κατεύθυνση ενός ενιαίου συστήματος παροχής τηλεπικοινωνιών και δίνονται τα βασικά κομμάτια που αποτελούν ένα τέτοιο σύστημα. Το πρότυπο μοντέλο αρχιτεκτονικής των ασύρματων συστημάτων τέταρτης γενιάς απεικονίζεται στο Σχήμα 2-6.



**Σχήμα 2-6. Πρότυπο μοντέλο αρχιτεκτονικής μελλοντικού ασύρματου συστήματος τέταρτης γενιάς**

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2-6, η αρχιτεκτονική αυτή προτείνει την ενοποίηση των ασύρματων δικτύων πρόσβασης πάνω από ένα κοινό δίκτυο πυρήνα, το οποίο χαρακτηρίζεται από την υιοθέτηση του πρωτοκόλλου διαδικτύου IP για την μεταφορά και υποστήριξη όλων των υπηρεσιών.

Τα βασικά δομικά στοιχεία που μπορούμε να διακρίνουμε σε μια τέτοια αρχιτεκτονική είναι τα ακόλουθα [6][13]:

- ❑ Το σύστημα των δικτύων, τα οποία είναι υπεύθυνα για την ανάθεση των απαραίτητων δικτυακών πόρων.
- ❑ Το σύστημα των εξυπηρετητών, οι οποίοι παρέχουν το σύνολο των προσφερόμενων υπηρεσιών και εφαρμογών.
- ❑ Το μεσισμικό (middleware) σύστημα διαχείρισης, το οποίο αναλαμβάνει όλες τις λειτουργίες διαχείρισης και αποτελεί τον μεσάζοντα ανάμεσα στις υπηρεσίες και τους δικτυακούς πόρους.

Μια τέτοια αρχιτεκτονική γεννά ένα σύνολο από ερευνητικά θέματα, τα οποία απαιτείται να λυθούν για την πραγμάτωση ενός τέτοιου ενιαίου συστήματος. Η κύρια ερευνητική προσπάθεια προς την κατεύθυνση αυτή είναι ο σχεδιασμός και η προδιαγραφή ενός συγκροτημένου και αποδοτικού συστήματος διαχείρισης υπηρεσιών και δικτυακών πόρων. Τα προβλήματα που καλείται να λύσει ένα τέτοιο σύστημα διαχείρισης είναι πολλά και επίπονα και συνοψίζονται στις ακόλουθες παραγράφους αυτής της ενότητας. Σημειώνουμε ότι πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν γίνει για τον ορισμό διαφορετικών αρχιτεκτονικών προσέγγισης των προβλημάτων των 4G συστημάτων [14].

Ο βασικός σκοπός του συστήματος διαχείρισης είναι η εκμετάλλευση όλης της διαθέσιμης πληροφορίας από όλους τους ενδιαφερόμενους χρήστες του συστήματος και η κατά το δυνατόν δικαιότερη πρόσβαση στις προσφερόμενες λειτουργίες, με βάση κάποια αντικειμενικά κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά καθορίζονται από το είδος των εμπλεκόμενων οντοτήτων αλλά και από εξωτερικούς παράγοντες που ρυθμίζουν τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις.

Είναι προφανές ότι η ανάπτυξη ενός ενιαίου συστήματος διαχείρισης απαιτεί την εισαγωγή νέων στοιχείων, οι λειτουργίες των οποίων παίζουν αποφασιστικό ρόλο στη επίδοση του ιδίου του συστήματος διαχείρισης. Όμως, αυτή η εισαγωγή νέων στοιχείων καθιστά αυτομάτως επιτακτική την ανάγκη αναθεώρησης των σχέσεων μεταξύ των εμπλεκόμενων οντοτήτων, όπως και τη δημιουργία νέων οντοτήτων, οι οποίες συνδυάζονται με τις υπάρχουσες για τη βελτίωση της παρεχόμενης δικτυακής υποδομής και της υποστήριξης νέων εξελιγμένων υπηρεσιών.

Μερικές από τις ερευνητικές δραστηριότητες προς την κατεύθυνση των μελλοντικών ασύρματων συστημάτων τέταρτης γενιάς συνοψίζονται στα ακόλουθα [15]:

- ❑ Σχεδιασμός αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης που αλληλεπιδρούν αρμονικά με το Transmission Control Protocol (TCP): Σήμερα οι πιο πολλοί αλγόριθμοι είναι σχεδιασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να μην αντιδρούν κατάλληλα στην ροή δεδομένων που προκαλεί συμφόρηση. Από την άλλη πλευρά, οι πιο πολλές μελέτες για το TCP περιορίζονται στις περιπτώσεις όπου υπάρχει ένας μόνο χρήστης. Μια ενδιαφέρουσα μελλοντική περιοχή έρευνας θα αποτελούσε ο σχεδιασμός και η αναλυτική επίλυση ενός αλγορίθμου ειδικά για ελεγχόμενη ροή δεδομένων (όπως το TCP) η οποία θα συμπεριλαμβάνει και την περίπτωση πολλαπλών χρηστών.
- ❑ Σχεδιασμός συστημάτων με πολλαπλά φέροντα: Οι περισσότεροι αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης κάτω ζεύξης (για συστήματα τρίτης γενιάς) είναι σχεδιασμένοι για συστήματα με ένα φέρον. Τα ασύρματα συστήματα τέταρτης γενιάς αναμένονται να είναι βασισμένα σε ένα σχέδιο με πολλαπλά φέροντα (όπως το Orthogonal Frequency Division Multiplex-OFDM) τα οποία θα περιλαμβάνουν εκατοντάδες κανάλια. Έτσι θα δημιουργείται η απαίτηση για κατασκευή αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης με μικρή πολυπλοκότητα.
- ❑ Γρήγορη ανάπτυξη νέων αλγορίθμων: Με τις μεγάλες και γρήγορες αλλαγές που συντελούνται στην περιοχή των ασύρματων, κυρίως, δικτύων, φαίνεται να αποτελεί



επιτακτική ανάγκη η συνεχής ανανέωση και αναπροσαρμογή των ήδη υπαρχόντων αλγορίθμων στις νέες τεχνολογίες και στα νέα πρωτόκολλα που δημιουργούνται.

- ❑ Μοντελοποίηση της επίδοσης των ασύρματων δικτύων: Η κατανόηση των ιδιοτήτων της κίνησης IP, της σύνθεσης της κίνησης πάνω από ασύρματα δίκτυα και των τύπων των υπηρεσιών μέσω ασύρματων δικτύων σε κοινά περιβάλλοντα διάδοσης θα είναι πάρα πολύ σημαντική για την ανάπτυξη και την ανάλυση των μέτρων επίδοσης των μελλοντικών συστημάτων 4G. Έτσι, κρίνεται απαραίτητη η εστίαση της έρευνας για την επέκταση και ανάπτυξη των υπαρχόντων μοντέλων κίνησης στα παραδοσιακά ενσύρματα δίκτυα, ώστε τα μοντέλα αυτά να συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά της πραγματικής κίνησης με την συμπεριφορά του ασύρματου καναλιού μετάδοσης.

Η τελευταία δραστηριότητα που αφορά στην μοντελοποίηση της επίδοσης δικτύων είναι πολύ σημαντική και αποτελεί το βασικό κομμάτι της παρούσας εργασίας. Η μοντελοποίηση της εισερχόμενης στα δίκτυα κίνησης και η παραπέρα εκτίμηση της επίδοσης των συστημάτων δικτύων είναι κατά κανόνα ένα πολύ δύσκολο κομμάτι έρευνας, το οποίο, όμως αποτελεί ένα σημαντικό κρίκο στην επίτευξη των στόχων ενός μελλοντικού συστήματος τηλεπικοινωνιών.

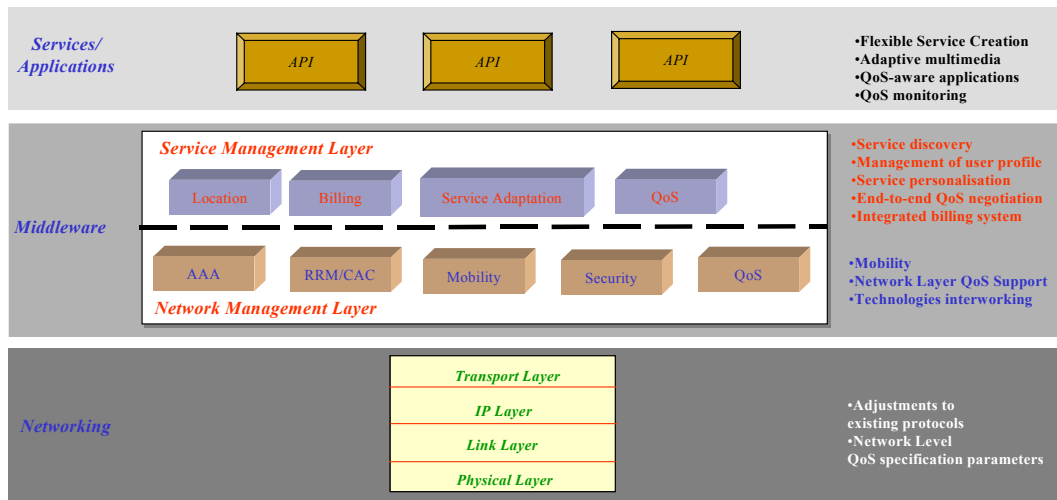
Ένας από τους βασικούς σκοπούς του ενιαίου συστήματος διαχείρισης είναι η υποστήριξη των μηχανισμών παροχής ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών. Αυτό συνδέεται άμεσα με τη βελτίωση των μηχανισμών ελέγχου αποδοχής και, στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων, της διαχείρισης του ραδιοφάσματος. Το ασύρματο κανάλι αποτελεί μια «μαύρη τρύπα» στην προσπάθεια προσέγγισης και μοντελοποίησης της κίνησης, καθώς η συμπεριφορά του αλλάζει δυναμικά και επιδρά σημαντικά στην χρονική εξέλιξη της κίνησης.

Αυτά τα θέματα θα εξεταστούν κατά περίπτωση σε αυτήν την εργασία και θα γίνει μια προσπάθεια να αποτιμηθούν οι παράμετροι παροχής ποιότητας των υπηρεσιών, όπως αυτοί εκφράζονται είτε από τον ίδιο τον χρήστη είτε από το αντίστοιχο υποκείμενο δίκτυο μετάδοσης. Στην επόμενη παράγραφο δίνεται μια γενική εικόνα των ερευνητικών προσπαθειών προς την κατεύθυνση ενοποίησης των δικτύων σε ένα σύνθετο περιβάλλον συνεργαζόμενων ασύρματων δικτύων.

### **2.3.2. Προκλήσεις για την εισαγωγή στα συστήματα 4G**

Τα υπάρχοντα δίκτυα και συστήματα τηλεπικοινωνιών διακρίνονται από την αυτονομία στον τρόπο κατασκευής και στην υποστήριξη των διαφόρων υπηρεσιών. Οι μελλοντικές υπηρεσίες θα είναι βασισμένες στο πρωτόκολλο διαδικτύου και θα είναι ανεξάρτητες από το υπόστρωμα της δικτυακής τεχνολογίας που θα χρησιμοποιείται για την υποστήριξή τους. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ανάγκη για την ανάπτυξη νέων συστημάτων διαχείρισης και ελέγχου, τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ των υπηρεσιών και των δικτύων, όπως φανερώνει και η ύπαρξη του μεσισμικού συστήματος διαχείρισης στο Σχήμα 2-6.

Παράλληλα με την ανάπτυξη του μεσισμικού συστήματος διαχείρισης, η εισαγωγή στα 4G συστήματα απαιτεί την προσαρμογή τόσο των υπηρεσιών και εφαρμογών όσο και των δικτύων. Η σύνθεση όλων αυτών των νέων λειτουργιών συμβάλλει στην υλοποίηση ενός ενιαίου συστήματος διαχείρισης. Το Σχήμα 2-7 δείχνει εννοιολογικά τις απαραίτητες λειτουργίες που χρειάζονται σε αυτό το ενιαίο σύστημα διαχείρισης. Με βάση τη δομή της στοίβας πρωτοκόλλων, οι λειτουργίες αυτές αντιπροσωπεύουν την ανάπτυξη των απαραίτητων διεπαφών για τη σύνδεση του επιπέδου παροχής υπηρεσιών με το επίπεδο ανάθεσης δικτυακών πόρων. Όπως φαίνεται και από το σχήμα, το μεγαλύτερο κομμάτι λειτουργιών εντάσσεται ανάμεσα στα στρώματα μεταφοράς των IP πακέτων και διαχείρισης των συνόδων ή συνδέσεων που παράγονται από μεμονωμένους χρήστες ή από ομάδες χρηστών με τα ίδια χαρακτηριστικά και απαιτήσεις.



**Σχήμα 2-7. Προσαρμογή της υπάρχουσας στοίβας πρωτοκόλλων για την υποστήριξη των συστημάτων 4G**

Το σύνολο αυτών των λειτουργιών μπορεί να ομαδοποιηθεί σε διάφορες γενικές κατηγορίες λειτουργιών, ενώ τα πρωτόκολλα υποστήριξης αυτών των λειτουργιών κατανέμονται σε όλα τα μήκη (από άκρη σε άκρη) του μονοπατιού επικοινωνίας, καλύπτοντας τόσο τα τερματικά των τελικών χρηστών που επικοινωνούν όσο και τους ενδιάμεσους κόμβους δικτύων που χρειάζονται για τη γεφύρωση της επικοινωνίας [6][16]. Έτσι, στην συνέχεια αυτής της παραγράφου αναλύουμε τις προκλήσεις και προδιαγραφές για την εισαγωγή στα συστήματα τέταρτης γενιάς, με βάση το τμήμα της επικοινωνίας, στο οποίο αυτές αναφέρονται.

Για τον κινητό τερματικό σταθμό των χρηστών διακρίνουμε τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Τερματικά πολλαπλού τρόπου χρήσης: η σχεδίαση ενός ενιαίου τερματικού, το οποίο να μπορεί να λειτουργήσει με διαφορετικά ασύρματα δίκτυα και να υπερνικά προβλήματα, όπως οι περιορισμοί στο μέγεθος των συσκευών, το κόστος, η κατανάλωση και οι λειτουργίες ανατροφοδότησης των συστημάτων ελέγχου και διαχείρισης με πληροφορίες που προέρχονται από τα τερματικά. Η λύση είναι η χρήση τερματικών με επιλογή της κατάλληλης ασύρματης

διεπαφής, κατά την οποία το τερματικό χρησιμοποιεί ένα λογισμικό για να προσαρμόζεται στις διεπαφές των διαθέσιμων ασύρματων δικτύων (software defined radio – SDR).

- ❑ Ανίχνευση του ασύρματου συστήματος: ανίχνευση των διαθέσιμων ασύρματων δικτύων μέσα από την επεξεργασία των σημάτων που στέλνονται από τα διαφορετικά ασύρματα δίκτυα, τα οποία διακρίνονται από ασυμβατότητες μεταξύ τους, όπως τα διαφορετικά πρωτόκολλα πρόσβασης. Η ανίχνευση αυτή μπορεί να επιτελεστεί είτε από τον ίδιο τον χρήστη είτε από το δίκτυο και περιλαμβάνει τη λήψη των απαραίτητων λογισμικών μηχανισμών από το διαδίκτυο.
- ❑ Επιλογή του ασύρματου συστήματος: κάθε ασύρματο δίκτυο έχει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του και η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας για την υποστήριξη μιας υπηρεσίας εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες χρόνου και χώρου.

Για το μεσισμικό σύστημα διαχείρισης οι γενικές απαιτήσεις είναι:

- ❑ Κινητικότητα χρήστη: ο εντοπισμός και η ενημέρωση της θέσης των τερματικών συσκευών στα διάφορα συστήματα. Επίσης, η εκτέλεση οριζόντιας και κατακόρυφης περιαγωγής με την ελάχιστη δυνατή απώλεια δεδομένων και την κατά το δυνατόν μικρότερη καθυστέρηση. Προς τον σκοπό αυτό, έχουν προταθεί πολλά σχήματα ευέλικτης σηματοδότησης και γρήγοροι μηχανισμοί περιαγωγής.
- ❑ Δικτυακή υποδομή και υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας: η ολοκλήρωση των υπαρχόντων υπηρεσιών IP με τις μη-IP υπηρεσίες και η διασφάλιση της από άκρη σε άκρη ποιότητας μιας υπηρεσίας που υποστηρίζεται από πολλά δίκτυα.
- ❑ Ασφάλεια: η ετερογένεια των ασύρματων δικτύων περιπλέκει τις τροποποιήσεις στα υπάρχοντα συστήματα ασφάλειας, τα οποία πρέπει να τροποποιηθούν, ώστε να είναι δυναμικά και προσαρμόσιμα στα ετερογενή αυτά δίκτυα.
- ❑ Ανοχή σφαλμάτων και ικανότητα επιβίωσης: μια σημαντική απαίτηση που καλούνται να ικανοποιήσουν τα σύγχρονα συστήματα διαχείρισης είναι να ελαχιστοποιήσουν τις αποτυχίες και τις πιθανές επιδράσεις τους σε οποιοδήποτε επίπεδο μιας σε μορφή δέντρου τοπολογίας των ασύρματων δικτύων. Και εδώ έχουν προταθεί αρχιτεκτονικές για τα ετερογενή δίκτυα, οι οποίες είναι ανεκτικές στα σφάλματα και στηρίζονται στα πρωτόκολλα αποκατάστασης αποτυχίας.
- ❑ Υποστήριξη συνδυασμένων λειτουργιών διαχείρισης του ραδιοφάσματος με βελτιωμένους μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής ροών, ώστε να μπορεί να εγγυηθεί η παροχή ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Τέλος, από την πλευρά των προσφερόμενων υπηρεσιών, μπορούμε να διακρίνουμε τις ακόλουθες απαιτήσεις.

- ❑ Συστήματα πολλαπλών Παρόχων και ένα ενιαίο σύστημα χρέωσης: η συλλογή, η διαχείριση και η αποθήκευση των πληροφοριών τιμολόγησης από τους πολλαπλούς φορείς παροχής υπηρεσιών, όπως και η χρέωση των χρηστών με απλές, αλλά αναλυτικές, πληροφορίες. Ήδη, πολλά τέτοια συστήματα έχουν εφαρμοστεί στην αγορά σήμερα.
- ❑ Κινητικότητα των χρηστών: η αδιάλειπτη παροχή μιας υπηρεσίας, ανεξάρτητα από τον τρόπο της προσωπικής κίνησης του χρήστη.

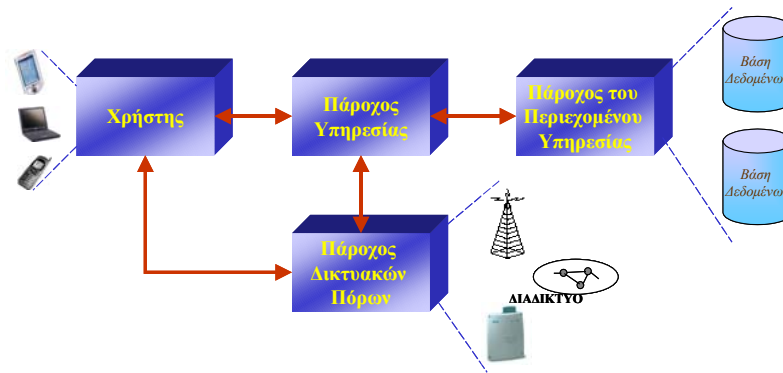
Το σύνολο των μηχανισμών που περιγράφηκαν παραπάνω κάνει φανερή την ανάγκη διάσπασης των απαιτούμενων λειτουργιών υποστήριξης τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών σε ένα ευρύτερο σύνολο επιχειρηματικών οντοτήτων. Το πρόβλημα που γεννάται είναι ότι όσο περισσότερες ανεξάρτητες λειτουργίες εισάγονται σαν απαίτηση για την στροφή προς τα συστήματα 4G, τόσο πιο πολύπλοκο μπορεί να καταλήξει το απαραίτητο επιχειρηματικό μοντέλο. Η επόμενη παράγραφος κάνει μια ανάλυση ενός ευέλικτου όσο και απλουστευμένου επιχειρηματικού μοντέλου, το οποίο μπορεί να επιβιώσει σε ένα μελλοντικό σύστημα σύνθετου ασύρματου περιβάλλοντος.

## **2.4. Επιχειρηματικό μοντέλο**

Οι τάσεις της σύγχρονης εποχής στην αγορά των τηλεπικοινωνιών επιβάλλουν την εγκατάλειψη των μοντέλων του παρελθόντος και την υιοθέτηση νέων επιχειρηματικών μοντέλων. Τα νέα αυτά μοντέλα, αναπόφευκτα, χαρακτηρίζονται από αυξημένη πολυπλοκότητα, καθώς καλούνται να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες της εποχής για την εξεύρεση τρόπων αξιοποίησης της χωρητικότητας και της ευέλικτης διαχείρισης των δικτυακών πόρων.

Μια σημαντική τάση των νέων επιχειρηματικών μοντέλων είναι ο διαχωρισμός της παροχής μιας υπηρεσίας από την ανάθεση των απαιτούμενων πόρων. Αυτό σημαίνει ότι οι Πάροχοι Δικτυακών Πόρων αποδεσμεύονται από την ευθύνη παροχής υπηρεσιών, αλλά διατηρούν τη δικαιοδοσία για την εξασφάλιση των δικτυακών πόρων. Έτσι, η παροχή υπηρεσιών αποσπάται σε νέες επιχειρηματικές οντότητες, οι οποίες φιλοδοξούν να διαδραματίσουν έναν πρωταγωνιστικό ρόλο στη σύγχρονη εποχή των τηλεπικοινωνιών.

Πολλά μοντέλα έχουν, κατά καιρούς προταθεί και μελετηθεί με στόχο την ικανοποίηση των νέων αναγκών. Κάποια από αυτά επιχειρούν την πλήρη αποκέντρωση των ρόλων των διαφόρων οντοτήτων, με αποτέλεσμα το μοντέλο που προκύπτει να χαρακτηρίζεται από αυξημένη πολυπλοκότητα, τόσο από πλευράς μελέτης των σχέσεων των διαφόρων οντοτήτων, όσο και από πλευράς υλοποίησης. Άλλα, πάλι, μοντέλα εμμένουν σε μια επιφανειακή ανάθεση των ρόλων, με αποτέλεσμα τα μοντέλα που προκύπτουν να είναι, μεν, απλά, αλλά να μην είναι αποτελεσματικά.



**Σχήμα 2-8. Προτεινόμενο Επιχειρηματικό Μοντέλο**

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται ένα επιχειρηματικό μοντέλο, το οποίο προσπαθεί να γεφυρώσει τις παραπάνω αναφερθείσες αποκλίσεις και να παραμείνει όσο το δυνατόν πιο γενικό με ευρύ φάσμα εφαρμογής [17][18]. Το μοντέλο αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 2-8. Όπως φαίνεται από αυτό, οι κύριες οντότητες που έχουν καθοριστικό ρόλο σε αυτό το μοντέλο είναι [19][20] ο Χρήστης (User), ο Πάροχος Δικτυακών Πόρων (Network Provider/Network Operator - NP/NO) και δύο νέες οντότητες, ο Πάροχος Υπηρεσίας (Service Provider - SP) και ο Πάροχος του Περιεχομένου μιας Υπηρεσίας (Content Provider). Ο χρήστης μπορεί να διακριθεί ανάλογα με τον εκάστοτε ρόλο του σε συνδρομητή ενός Παρόχου, υπό την έννοια ότι είναι εγγεγραμμένος χρήστης του Παρόχου, και σε πελάτη, υπό την έννοια ότι είναι εγγεγραμμένος σε άλλον Πάροχο και απλά κάνει χρήση των πλεονεκτημάτων και παροχών του συγκεκριμένου Παρόχου.

Είναι φανερό ότι, για την ευσταθή και ισορροπημένη λειτουργία του παραπάνω μοντέλου, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ισχυρών συμβολαίων που καθορίζουν τις σχέσεις και αλληλεπιδράσεις των επιχειρηματικών οντοτήτων μεταξύ τους. Τα συμβόλαια αυτά έχουν διαφορετική δομή, ανάλογα με τις εμπλεκόμενες οντότητες. Κάθε οντότητα διατηρεί ξεχωριστούς μηχανισμούς εποπτείας των αλληλεπιδράσεων με τις άλλες οντότητες και δύναται να προσβάλλει την συμφωνία, όταν ανακαλύψει ότι τα συμφωνηθέντα έχουν παραβιαστεί.

Πέρα από την αναγνώριση των κυρίαρχων οντοτήτων του προτεινόμενου επιχειρηματικού μοντέλου που απεικονίζεται στο Σχήμα 2-8, εκείνο που χρειάζεται να γίνει κατανοητό είναι το γεγονός ότι ο ρόλος καθεμιάς από τις οντότητες αυτές ποικίλει ανάλογα με το περιβάλλον, μέσα στο οποίο καλείται να λειτουργήσει το μοντέλο αυτό. Σαν αποτέλεσμα αυτού, είναι το γεγονός ότι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οντοτήτων διαμορφώνονται ανάλογα. Ένα παράδειγμα εφαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου, το οποίο υλοποιείται, με βάση την τεχνολογία των Πρακτόρων, που περιγράφεται παρακάτω, δίνεται στο [21] για το περιβάλλον ενός αεροδρομίου.

Οι επόμενες ενότητες συνοψίζουν το ρόλο των διαφόρων οντοτήτων, με βάση το επιχειρηματικό μοντέλο που περιγράφηκε στο Σχήμα 2-8, και προσεγγίζουν τα πιθανά γενικά σημεία σύναψης συμφωνιών. Βέβαια, οι ιδιαίτερες απαιτήσεις για σύναψη συμβολαίων εξαρτώνται πάντα από την εκάστοτε εφαρμογή του γενικού μοντέλου σε ένα επιμέρους σύστημα.

#### **2.4.1. Πάροχος Υπηρεσίας**

Ο Πάροχος Υπηρεσίας είναι μια επιχειρηματική οντότητα, η οποία έχει σαν στόχο την παροχή του μέσου, δηλαδή της υπηρεσίας, για την πρόσβαση στο περιεχόμενο μιας υπηρεσίας. Ο ρόλος που διαδραματίζει στην σύγχρονη αγορά των τηλεπικοινωνιών είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς αποτελεί τον συνδετικό κρίκο ανάμεσα στον τελικό χρήστη που ζητά μια υπηρεσία και τον Πάροχο Δικτυακών Πόρων, ο οποίος αναλαμβάνει να προσφέρει τους πόρους για τη μεταφορά της υπηρεσίας.

Κάθε Πάροχος Υπηρεσίας δύναται να προσφέρει ένα σύνολο υπηρεσιών. Κάθε χρήστης μπορεί να γίνει συνδρομητής σε ένα συγκεκριμένο Πάροχο Υπηρεσίας με το να εγγραφεί σε μέρος ή στο σύνολο των παρεχόμενων υπηρεσιών. Η εγγραφή προϋποθέτει την αποδοχή εκ μέρους των χρηστών των όρων που έχουν τεθεί για την παροχή μιας υπηρεσίας. Οι όροι αυτοί μπορεί να στηρίζονται σε οικονομικά κριτήρια και σε συγκεκριμένους περιορισμούς, όσον αφορά τον μέγιστο ή μέσο ρυθμό, με τον οποίο μπορεί ο χρήστης να επικοινωνεί με το περιεχόμενο της υπηρεσίας. Ανάλογα με τους όρους αποδοχής, ο χρήστης κατατάσσεται από τον Πάροχο σε μία τυπική κατηγορία, η οποία ονομάζεται κλάση χρηστών.

Μία κλάση χρηστών καθορίζει τους όρους πρόσβασης των χρηστών, που ανήκουν στην κλάση αυτή, στις υπηρεσίες, οι οποίες παρέχονται από τον συγκεκριμένο Πάροχο Υπηρεσίας. Οι όροι αυτοί συνδέονται με τις προτεραιότητες που τίθενται στην πρόσβαση των υπηρεσιών, τους τυπικούς ρυθμούς μετάδοσης για την πρόσβαση στο περιεχόμενο μίας υπηρεσίας, οι οποίοι και καθορίζουν τη συμμετοχή ενός χρήστη στην κατανάλωση δικτυακών πόρων και την ποιότητα στην παρεχόμενη υπηρεσία, και τη μέγιστη τιμή του οικονομικού αντιτίμου, το οποίο ο χρήστης είναι διατεθειμένος να πληρώσει, ώστε να έχει πρόσβαση στη συγκεκριμένη υπηρεσία. Παράλληλα με αυτούς τους παράγοντες, ένας χρήστης δύναται να δηλώσει την προτίμησή του σε ένα επίπεδο υπηρεσίας έναντι άλλων διαθέσιμων, εκφράζοντας με αυτόν τον τρόπο την εμπειρία του από την χρήση της ίδιας υπηρεσίας στο παρελθόν.

Ένας από τους σημαντικότερους ρόλους του Παρόχου Υπηρεσίας είναι ο καθορισμός ενός επιπέδου αναφοράς για την ποιότητα μιας υπηρεσίας. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να αποφασίσει για το ελάχιστο απαιτούμενο εύρος ζώνης, ώστε η υποστηριζόμενη υπηρεσία να διατίθεται σε αποδεχτά επίπεδα. Κατά την εξέλιξη στην παροχή μιας υπηρεσίας, ο Πάροχος Υπηρεσίας μπορεί να αποφασίζει ανάμεσα σε διάφορες τιμές εύρους ζώνης, οι οποίες σχετίζονται, βέβαια, και με το είδος του χρήστη, αν αυτό είναι αποδεχτό από τον Πάροχο Δικτυακών Πόρων και την κατάσταση της χωρητικότητάς του. Παράλληλα, ο Πάροχος Υπηρεσίας είναι υπεύθυνος στο να αναθέτει τους χρήστες του στον πιο κατάλληλο Πάροχο Δικτυακών Πόρων, σύμφωνα με κριτήρια ποιότητας και οικονομικής αντοχής, ώστε να διασφαλίζεται τουλάχιστον το επίπεδο αναφοράς στην ποιότητα μιας υπηρεσίας.

#### **2.4.2. Πάροχος Περιεχομένου Υπηρεσίας**

Ο ρόλος του Παρόχου του Περιεχομένου μιας Υπηρεσίας είναι η ανάπτυξη και η προσφορά του περιεχομένου μιας υπηρεσίας. Οι διαδικασίες που επιτελούνται από μια τέτοια επιχειρηματική οντότητα έχουν να κάνουν, κύρια, με τη διαχείριση του περιεχομένου που προσφέρεται στα πλαίσια μιας υπηρεσίας. Επειδή τέτοιες διεργασίες δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας, ο Πάροχος του Περιεχομένου μιας Υπηρεσίας δεν πρόκειται να μας απασχολήσει σαν εμπλεκόμενη οντότητα στα θέματα που πραγματεύεται αυτή η εργασία.

#### **2.4.3. Πάροχος Δικτυακών Πόρων**

Ο ρόλος του Παρόχου Δικτυακών Πόρων είναι να προσφέρει την κατάλληλη υποδομή σε επίπεδο δικτύου για την παροχή μιας υπηρεσίας. Αυτό σημαίνει ότι ο Πάροχος Δικτυακών Πόρων αναθέτει τους κατάλληλους πόρους από την υπάρχουσα χωρητικότητα για να εξυπηρετήσει την από άκρη σε άκρη σύνδεση του χρήστη με τον Πάροχο Υπηρεσίας.

Ένας Πάροχος Δικτυακών Πόρων είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τη δεδομένη χωρητικότητα του δικτύου που αντιπροσωπεύει. Αυτό σημαίνει ότι οι αλληλεπιδράσεις του με τις υπόλοιπες οντότητες κατευθύνονται από την τρέχουσα κατάσταση των δικτυακών του πόρων σε μία δεδομένη χρονική στιγμή, δηλαδή πόσοι είναι κατειλημμένοι από εν εξελίξει κλήσεις και πόσοι είναι ακόμα διαθέσιμοι.

Οι Πάροχοι Δικτυακών Πόρων εκτελούν διαδικασίες διαχείρισης των πόρων που τους αναλογούν. Αυτό σημαίνει ότι πραγματοποιούν διάφορους μηχανισμούς για την εξεύρεση κατάλληλων τρόπων ανάθεσης των διαθέσιμων πόρων. Οι μηχανισμοί αυτοί διαφέρουν από δίκτυο σε δίκτυο, αλλά έχουν μια κοινή λογική βάση. Όλοι είναι ελεγχόμενοι από την κατάσταση του επικοινωνιακού διαύλου (π.χ. για την περίπτωση ασύρματων δικτύων που εξετάζουμε, οι μηχανισμοί αυτοί στηρίζονται στα επίπεδα παρεμβολών της ραδιοζεύξης) και από οικονομικά κριτήρια.

#### **2.4.4. Αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οντοτήτων**

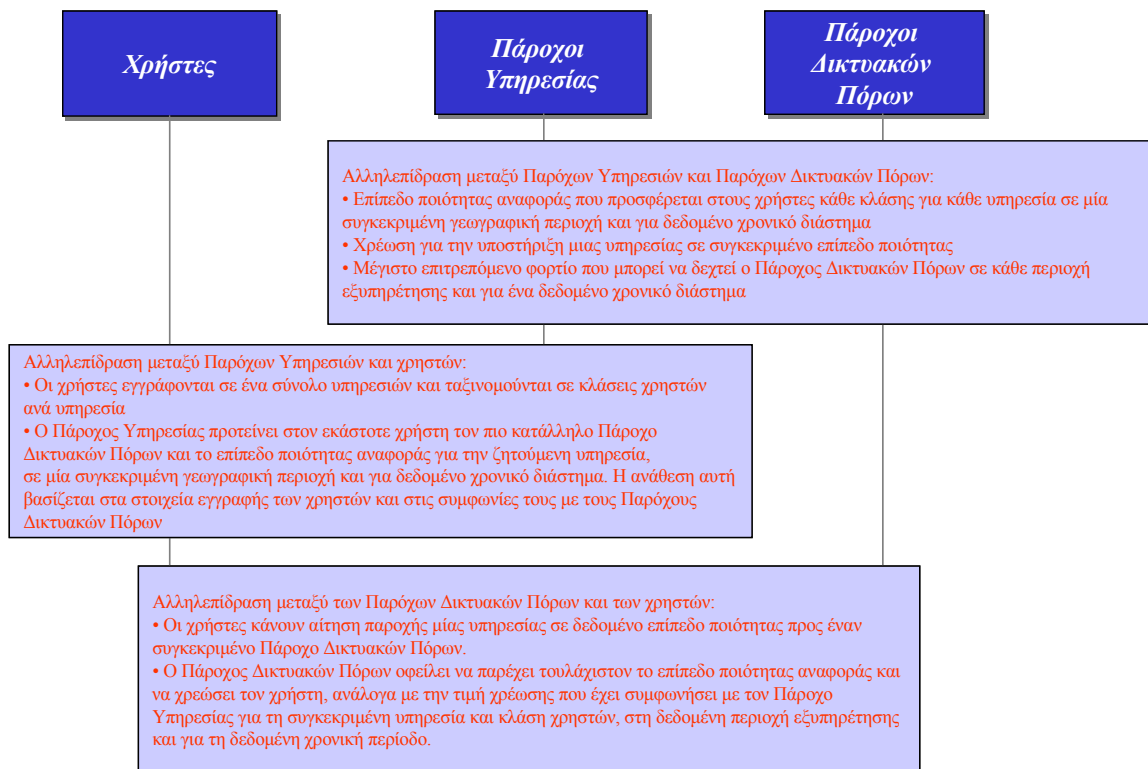
Η ενότητα αυτή αναλύει τις σχέσεις μεταξύ των βασικών οντοτήτων που έχουν περιγραφεί παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, δίνει τις πολιτικές που διακρίνουν κάθε οντότητα όταν επικοινωνεί με μια άλλη οντότητα για την εκπλήρωση κάποιου σκοπού. Οι αλληλεπιδράσεις και οι πολιτικές αυτές στηρίζονται σε μηχανισμούς, που σκοπό έχουν την μεγιστοποίηση του κέρδους από πλευράς της οντότητας, είτε αυτό πρόκειται για οικονομικό αντίτιμο (π.χ. στις περιπτώσεις των Παρόχων Δικτυακών Πόρων και Υπηρεσιών) ή για κοινωνικό όφελος, υπό την έννοια μεγιστοποίησης του βαθμού ικανοποίησης (π.χ. στην περίπτωση των χρηστών).

Το σύνολο των δυνατών αλληλεπιδράσεων έχει ήδη παρατεθεί στο Σχήμα 2-8. Εδώ, απλά, αναλύονται αυτές οι αλληλεπιδράσεις και περιγράφονται οι παράμετροι εκείνες που καθορίζουν την συμπεριφορά των οντοτήτων σε αυτές. Το σύνολο των παραμέτρων εμπεριέχεται σε

συμβόλαια προσυμφωνημένου επιπέδου υπηρεσιών, τα οποία συμφωνούνται εκ των προτέρων και αποτελούν τους ρυθμιστές των σχέσεων αυτών.

Η σύναψη συμβολαίων προσυμφωνημένου επιπέδου υπηρεσιών μπορεί να είναι μακροπρόθεσμη ή βραχυπρόθεσμη. Αυτό σημαίνει ότι η διάρκειά της αλλάζει δυναμικά και αποτελεί τον ρυθμιστικό παράγοντα για την εξέλιξη των σχέσεων μεταξύ των οντοτήτων. Αυτό, πρακτικά, μεταφράζεται στο γεγονός ότι ανάλογα με τη διάρκεια αυτών των συμβολαίων, η συμπεριφορά μίας οντότητας μπορεί να αλλάξει δραστικά από την μια χρονική στιγμή στην άλλη. Έτσι, υπάρχουν σχέσεις που ρυθμίζονται από συμβόλαια μικρής διάρκειας, όπως στην περίπτωση της διαπραγμάτευσης της εγκατάστασης μιας συνόδου ανάμεσα σε ένα χρήστη και έναν Πάροχο Υπηρεσίας. Ομοίως, υπάρχουν και σχέσεις μεγάλης διάρκειας, όπως στην περίπτωση της σύναψης συμφωνίας ανάμεσα σε έναν Πάροχο Υπηρεσίας και έναν Πάροχο Δικτυακών Πόρων. Στη δεύτερη αυτή περίπτωση, η εγκυρότητα του συμβολαίου είναι πιο στατική και αυτό οφείλεται, κύρια, στο γεγονός ότι η κατάσταση του συστήματος δεν επιτρέπει την άμεση αλληλεπίδρασή τους (π.χ. προκαλείται μεγάλος όγκος δεδομένων σηματοδότησης).

Το Σχήμα 2-9 καθορίζει το σύνολο των παραμέτρων που μπορούμε να διακρίνουμε για κάθε είδους επικοινωνία οντοτήτων.

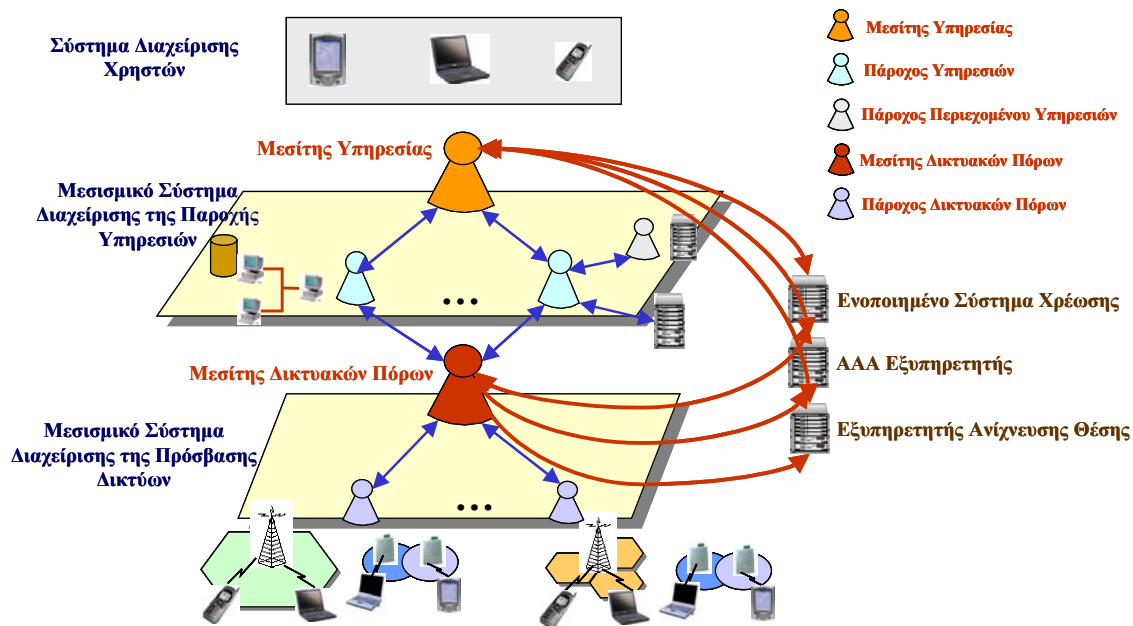


**Σχήμα 2-9. Παράμετροι αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων επιχειρηματικών οντοτήτων.**



## 2.5. Μεσίτες

Μια σημαντική όσο και κρίσιμη παράμετρος ενός μελλοντικού συστήματος ασύρματης πρόσβασης είναι η έννοια του μεσίτη ή διαμεσολαβητή (broker) [18]. Ο μεσίτης είναι μια οντότητα, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ των υπάρχοντων οντοτήτων μιας παραδοσιακής αρχιτεκτονικής και αποσκοπεί στην ανάληψη όλων των απαιτούμενων καθηκόντων για την εύρεση του επόμενου συνδετικού κρίκου σε ένα τηλεπικοινωνιακό μονοπάτι. Ο ρόλος του κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικός, γιατί η επίτευξη της επικοινωνίας και η διασφάλιση των απαιτήσεων όλων των εμπλεκόμενων οντοτήτων καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις αποφάσεις που λαμβάνονται από τους διαμεσολαβητές αυτούς. Στην ουσία, η λειτουργία που επιτελούν οι διαμεσολαβητές είναι η μεσιτεία πόρων και υπηρεσιών εκ μέρους των επιχειρησιακών οντοτήτων, τις οποίες εκπροσωπούν.



Σχήμα 2-10. Επιχειρηματικό μοντέλο με βάση την έννοια της μεσιτείας

Το Σχήμα 2-10 εισάγει την έννοια της μεσιτείας ανάμεσα στις επιχειρηματικές οντότητες που ορίστηκαν στην παράγραφο 2.4. Στο ίδιο σχήμα απεικονίζονται και οι οντότητες που επιφορτίζονται με τις συμπληρωματικές λειτουργίες ενός μελλοντικού σύνθετου συστήματος ασύρματης πρόσβασης, όπως αυτές έχουν ορισθεί στο Σχήμα 2-6. Έτσι, σε ένα σύγχρονο μοντέλο τηλεπικοινωνιών, μπορούμε να διακρίνουμε μεταξύ δύο βασικών κατηγοριών διαμεσολαβητών:

- Μεσίτης Υπηρεσίας
- Μεσίτης Δικτυακών Πόρων

Το επιχειρηματικό μοντέλο που περιγράφεται στο Σχήμα 2-10, βρίσκει εφαρμογή σε Συστήματα Διαχείρισης πολλαπλών Παρόχων Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων, τα οποία καλούνται να

αντιμετωπίσουν ένα σύνολο βελτιωμένων αλλά απαιτητικών εφαρμογών πολυμέσων [22][23][24]. Στις επόμενες ενότητες κάνουμε μια εισαγωγή στην έννοια των δύο αυτών κατηγοριών μεσιτείας και αναλύουμε ειδικότερα τους ρόλους που διαδραματίζουν στην σύγχρονη εποχή των ασύρματων τηλεπικοινωνιών.

### **2.5.1. Μεσίτης Υπηρεσίας**

Με βάση το επιχειρηματικό μοντέλο που έχει αναλυθεί στην προηγούμενη παράγραφο 2.4 και τις οντότητες, οι οποίες ορίστηκαν εκεί, ο Μεσίτης Υπηρεσίας είναι μια οντότητα, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ του χρήστη και ενός συνόλου από Παρόχους Υπηρεσιών. Ο ρόλος του είναι να παρέχει τη διεπαφή μεταξύ των δύο αυτών επιχειρηματικών οντοτήτων και να επιλέγει τον κατάλληλο Πάροχο Υπηρεσίας για την εξυπηρέτηση ατομικών αιτήσεων πρόσβασης σε υπηρεσίες ή ακόμα και αιτήσεις που προέρχονται από ομάδες χρηστών με ίδια ή παρόμοια χαρακτηριστικά.

Τα κριτήρια επιλογής του κατάλληλου Παρόχου πηγάζουν από τις ανάγκες και τις απαιτήσεις, που οι ίδιοι οι χρήστες επιβάλλουν. Σε γενικές γραμμές, πάντως, ο Μεσίτης Υπηρεσίας αξιολογεί τις εισερχόμενες αιτήσεις παροχής υπηρεσιών και, ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση, αναλαμβάνει να καθοδηγήσει τους τελικούς χρήστες προς τους κατάλληλους Παρόχους Υπηρεσιών.

Ο Μεσίτης Υπηρεσίας λαμβάνει αιτήσεις από μια πλειάδα χρηστών, οι οποίοι είναι καταναμεμημένοι στο χώρο ελέγχου του συγκεκριμένου στοιχείου και ζητούν εξυπηρέτηση από ένα σύνολο υπηρεσιών. Αντικειμενικός σκοπός της μεσιτείας είναι η επιλογή του κατάλληλου Παρόχου, βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων, όπως το είδος της υπηρεσίας και το προφίλ του χρήστη [22].

Ο ρόλος του Μεσίτη Υπηρεσίας συνοψίζεται στα ακόλουθα καθήκοντα:

- Εγγράφει το σύνολο των χρηστών που αιτούνται την πρόσβαση σε μέρος ή ακόμα και στο σύνολο των προσφερόμενων υπηρεσιών
- Εγγράφει τους πιθανούς Παρόχους Υπηρεσιών, οι οποίοι δραστηριοποιούνται στην περιοχή ελέγχου του Μεσίτη Υπηρεσίας και μπορούν να παρέχουν ανά πάσα στιγμή μία ή περισσότερες υπηρεσίες.
- Επιλέγει τον κατάλληλο Πάροχο Υπηρεσίας, ώστε να εξυπηρετήσει τις εισερχόμενες αιτήσεις από τους διάφορους πιστοποιημένους χρήστες.

Η πρώτη λειτουργία του Μεσίτη Υπηρεσίας είναι μεγάλης σπουδαιότητας, δεδομένου ότι εξετάζει τις πτυχές ασφάλειας που πρέπει να κατέχουν ένα αξιόπιστο σύστημα διαχείρισης. Πριν από την υποβολή μίας αίτησης για παροχή μιας υπηρεσίας, ο αντίστοιχος χρήστης πρέπει να περάσει τον έλεγχο πιστοποίησης και επικύρωσης των στοιχείων του και να καταχωρηθεί στο σύστημα ως τρέχον πελάτης.

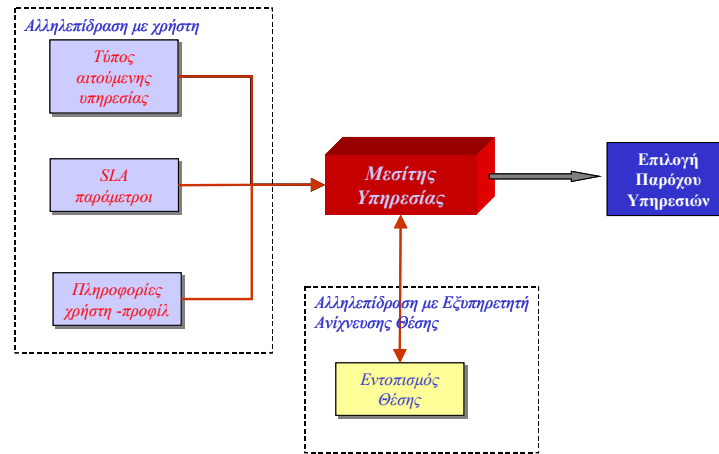
Η δεύτερη λειτουργία του Μεσίτη Υπηρεσίας ανήκει και αυτή στο στάδιο πιστοποίησης των εν δυνάμει χρηστών του συστήματος, μόνο που αυτήν την φορά ο χρήστης έχει την ιδιότητα του Παρόχου. Σε αυτήν την περίπτωση, ο Μεσίτης Υπηρεσίας εγγράφει τους Παρόχους Υπηρεσιών, έτσι ώστε οι Πάροχοι που διαφημίζουν το σύνολο των προσφερόμενων υπηρεσιών, να είναι πιστοποιημένοι και να υπόκεινται σε πιθανές κυρώσεις, όταν αυτό χρειάζεται. Μετά την επιτυχημένη πιστοποίηση, ο Μεσίτης Υπηρεσίας ανανεώνει τη λίστα με τους διαθέσιμους Παρόχους Υπηρεσίας, ώστε να συμπεριλάβει όλους τους Παρόχους στη διαδικασία επιλογής κατά την άφιξη μιας συγκεκριμένης αίτησης υπηρεσίας.

Η τρίτη και σημαντικότερη, ίσως, λειτουργία του Μεσίτη Υπηρεσίας είναι η επιλογή του κατάλληλου Παρόχου Υπηρεσιών για να εξυπηρετήσει την εισερχόμενη από τον χρήστη αίτηση. Αυτή η λειτουργία υπονοεί διάφορες δευτερεύουσες υποχρεώσεις που πρέπει να ολοκληρωθούν εσωτερικά για την ολοκλήρωση αυτής της κύριας λειτουργίας. Σε ένα πραγματικό, απαιτητικό περιβάλλον, στο οποίο υπάρχουν διάφοροι Πάροχοι Υπηρεσιών που προσφέρουν ίδιες ή διαφορετικές υπηρεσίες, ο Μεσίτης Υπηρεσίας καλείται να ανταποκριθεί καταλλήλως στο σύνολο των εισερχόμενων αιτήσεων χρηστών για παροχή υπηρεσιών. Η απόκριση του στοιχείου αυτού πρέπει να διακρίνεται από δύο βασικά χαρακτηριστικά. Πρέπει, αρχικά, να είναι γρήγορη, ώστε να μην καθυστερεί τη διαδικασία εξυπηρέτησης των χρηστών. Ακολούθως, η απόκριση του Μεσίτη Υπηρεσίας πρέπει να είναι αξιόπιστη και σύμφωνη με τα χαρακτηριστικά των χρηστών που καθορίζονται κατά τη διαδικασία υποβολής αιτήσεων. Αυτό σημαίνει ότι ο Μεσίτης Υπηρεσίας οφείλει να εγγυηθεί την αποτελεσματική διοικητική λειτουργία του συστήματος, ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των χρηστών, ειδικά σε περιπτώσεις, όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση χρηστών.

Μια σημαντική παράμετρος των μελλοντικών ασύρματων συστημάτων είναι η παροχή υπηρεσιών, με βάση τη θέση των κινητών χρηστών. Συνεπώς, ένα αποτελεσματικό σύστημα διαχείρισης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του ένα τέτοιο κριτήριο και να δρομολογεί τις αιτήσεις παροχής υπηρεσιών, με βάση και τη θέση των χρηστών. Μια τέτοια δουλειά αναλαμβάνει να διεκπεραιώσει και ο Μεσίτης Υπηρεσίας. Κατά τη διαδικασία επιλογής του κατάλληλου Παρόχου Υπηρεσίας, αξιολογεί τις πληροφορίες θέσης των χρηστών που παρέχονται από τον Εξυπηρετητή Ανίχνευσης Θέσης, που φαίνεται στο Σχήμα 2-10, και δρα αναλόγως. Οι πληροφορίες θέσης μπορούν να αποδειχθούν σημαντικές και ιδιαίτερα κρίσιμες σε περιπτώσεις, όπου η μεγάλη συγκέντρωση χρηστών ή και η δραστηριοποίηση πλήθους Παρόχων επιβάλλουν διαδικασίες ανταγωνισμού, οι οποίες επιφέρουν δυναμικές αλλαγές στην κατάσταση των χρεώσεων των προσφερόμενων δικτυακών πόρων και συνακόλουθα των υπηρεσιών.

Στόχος του Μεσίτη Υπηρεσίας είναι η μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας, χωρίς την παραβίαση των δικαιωμάτων των εμπλεκόμενων οντοτήτων. Παράλληλα, ένα τέτοιο στοιχείο, λόγω του ότι πρέπει να συμπεριφέρεται ανεξάρτητα από τους χρήστες και τους Παρόχους Υπηρεσιών, οφείλει να δρα κατά το δυνατόν δικαιότερα. Αυτό σημαίνει ότι οι αποφάσεις που λαμβάνονται από την οντότητα αυτή πρέπει να είναι αμερόληπτες και να αποσκοπούν στην

εξυπηρέτηση των απαιτήσεων των χρηστών και τη διαφύλαξη των δικαιωμάτων των Παρόχων Υπηρεσιών. Το Σχήμα 2-11 συνοψίζει τις παραμέτρους λειτουργίας του Μεσίτη Υπηρεσίας για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την κατάλληλη επιλογή Παρόχου Υπηρεσιών.



**Σχήμα 2-11. Παράμετροι επιλογής του κατάλληλου Παρόχου Υπηρεσιών από τον Μεσίτη Υπηρεσίας.**

Τα μηνύματα αίτησης για εγγραφή αποτελούνται από πολλές παραμέτρους. Υπό αυτήν τη μορφή, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους του χρήστη που αποτελούν το προφίλ του και τον μοναδικό συνδυασμό κωδικής ονομασίας και συνθηματικής λέξης. Το προφίλ του χρήστη περιλαμβάνει πολλές παραμέτρους, οι οποίες περιλαμβάνουν πληροφορίες, σχετικά με τον συγκεκριμένο χρήστη, όπως είναι το σύνολο των υπηρεσιών και εφαρμογών, στις οποίες ο χρήστης είναι πρόθυμος να εγγραφεί, το επίπεδο ποιότητας αναφοράς, στο οποίο μια συγκεκριμένη υπηρεσία πρέπει να προσφερθεί στον χρήστη αυτόν και μια ένδειξη της μέγιστης αποδεκτής αξίας χρέωσης που ο χρήστης μπορεί να αντέξει οικονομικά για την παροχή της συγκεκριμένης υπηρεσίας ή εφαρμογής.

Κατά τη διαδικασία εγγραφής των Παρόχων Υπηρεσιών, ένας Πάροχος μπορεί να αναθεωρήσει το σύνολο των υπηρεσιών που μπορεί να παρέχει στους χρήστες του συστήματος. Η ανανέωση των παρεχόμενων από τον Πάροχο υπηρεσιών, μαζί με τα χαρακτηριστικά που τις συνοδεύουν, όπως το κόστος πρόσβασης στην υπηρεσία ή τα διαθέσιμα επίπεδα ποιότητας, πρέπει να κοινοποιηθούν στον Μεσίτη Υπηρεσίας. Ο τελευταίος αναλαμβάνει να ενημερώσει τους χρήστες για τις διαθέσιμες υπηρεσίες στην περιοχή ελέγχου του Μεσίτη Υπηρεσίας.

Μια εξίσου σημαντική συνιστώσα των μελλοντικών ασύρματων συστημάτων είναι η σύναψη εμπορικών συμφωνιών για την παροχή συγκεκριμένων επιπέδων ποιότητας. Είναι τα Συμβόλαια Προσυμφωνημένου Επιπέδου Ποιότητας (Service Level Agreements - SLA), τα οποία διαδραματίζουν ρυθμιστικό ρόλο στις σχέσεις των επιχειρηματικών οντοτήτων μεταξύ τους. Κατά τη διαδικασία διαπραγματεύσεων για την εγκατάσταση συνδέσεων, ο Μεσίτης Υπηρεσίας παίζει το ρόλο του διαμεσολαβητή μεταξύ των χρηστών και των Παρόχων Υπηρεσιών και

μεταφέρει μηνύματα σχετικά με την προσφορά, αποδοχή/ απόρριψη ή επαναδιαπραγμάτευση των SLA.

### **2.5.2. Μεσίτης Δικτυακών Πόρων**

Με έναν ανάλογο τρόπο, ο Μεσίτης Δικτυακών Πόρων παρεμβάλλεται μεταξύ των διαφόρων Παρόχων Υπηρεσιών και των Παρόχων Δικτυακών Πόρων για να προσφέρει τη διεπαφή μεταξύ των επιχειρηματικών αυτών οντοτήτων. Αν και φαινομενικά οι λειτουργίες που επιτελούνται από τα δύο είδη μεσιτών είναι παρόμοιες, εντούτοις, οι ρόλοι τους διαφέρουν σημαντικά. Αυτό γίνεται καλύτερα αντιληπτό, αν αναλογιστεί κανείς ότι οι σχέσεις και αλληλεπιδράσεις που διέπουν το σύνολο των επιχειρησιακών οντοτήτων (και οι οποίες ορίστηκαν περιληπτικά στο Σχήμα 2-9 στην προηγούμενη ενότητα) είναι τελείως διαφορετικές.

Συνεπώς, ο ρόλος που επιτελείται από τον Μεσίτη Δικτυακών Πόρων αφορά στην επιλογή του κατάλληλου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, με κριτήρια, κυρίως, τεχνικά και οικονομικά. Συγκεκριμένα, η απόφαση των αλγορίθμων αυτού του είδους μεσιτείας εξαρτάται από τις παραμέτρους αιτήσεων υπηρεσίας των χρηστών για την παροχή της απαιτούμενης ποιότητας. Τα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη σε μια τέτοια περίπτωση εξαρτώνται άμεσα από την επιμέρους υποδομή των υποκείμενων δικτυακών τεχνολογιών και για το λόγο αυτό μια επιτυχημένη διαδικασία διαπραγμάτευσης μεταξύ των εμπλεκόμενων οντοτήτων αποτελεί το κλειδί για την αξιοπιστία του συνολικού συστήματος έναντι των χρηστών.

Συνεπώς, ο Μεσίτης Δικτυακών Πόρων είναι μια άλλη σημαντική οντότητα σε ένα σύγχρονο σύστημα διαχείρισης ασύρματων δικτύων και συστημάτων. Αποτελεί, με απλά λόγια, τη διεπαφή για την επικοινωνία μεταξύ της υπηρεσίας και της περιοχής δικτύων. Είναι αρμόδιος για την παροχή των μηχανισμών μεσολάβησης στα τμήματα φορέων παροχής υπηρεσιών, προκειμένου να βρεθούν οι καταλληλότεροι δικτυακοί πόροι, που θα διασφαλίζουν την πρόσβαση στην υπηρεσία με τα κριτήρια που τίθενται από τους χρήστες.

Η έννοια της δικαιοσύνης αποτελεί ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματα της λειτουργίας του Μεσίτη Δικτυακών Πόρων. Αυτό σημαίνει ότι αυτή η λειτουργία πρέπει να διακατέχεται από δίκαιη συμπεριφορά ενάντια όλων των σχετικών Παρόχων Δικτυακών Πόρων, επιτρέποντας κατά συνέπεια την ισορροπημένη και αξιόπιστη λειτουργία ολόκληρου του συστήματος. Η δικαιοσύνη προέρχεται από το γεγονός ότι αυτό το στοιχείο είναι ένα σημαντικό κομβικό σημείο στην επιλογή του κατάλληλου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, καθώς επίσης και τον επιχειρησιακό προσανατολισμό του συστήματος, ο οποίος περιλαμβάνει τη συνεργασία των διαφορετικών επιχειρησιακών φορέων σε ένα καλά ορισμένο πλαίσιο.

Η ανάγκη ανάπτυξης και υποστήριξης του Μεσίτη Δικτυακών Πόρων είναι εμφανής σε ένα πλήρως ανταγωνιστικό περιβάλλον, το οποίο χαρακτηρίζεται από την ταυτόχρονη ύπαρξη πολλαπλών δικτυακών τεχνολογιών (όπως αυτό που περιγράφεται στο Σχήμα 2-6). Περιορίζει τον αριθμό των απαραίτητων συνδέσεων μεταξύ των Παρόχων Υπηρεσιών και Δικτυακών

Πόρων και ανταπεξέρχεται στις γρήγορες και δυναμικές αλλαγές του ασύρματου περιβάλλοντος. Συνεπώς, μπορεί ανά πάσα στιγμή να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κατάλληλη επιλογή του Παρόχου Δικτυακών Πόρων για την εξυπηρέτηση μιας συγκεκριμένης αίτησης παροχής μιας υπηρεσίας, με συγκεκριμένες, όσο και αυστηρές, απαιτήσεις ποιότητας.

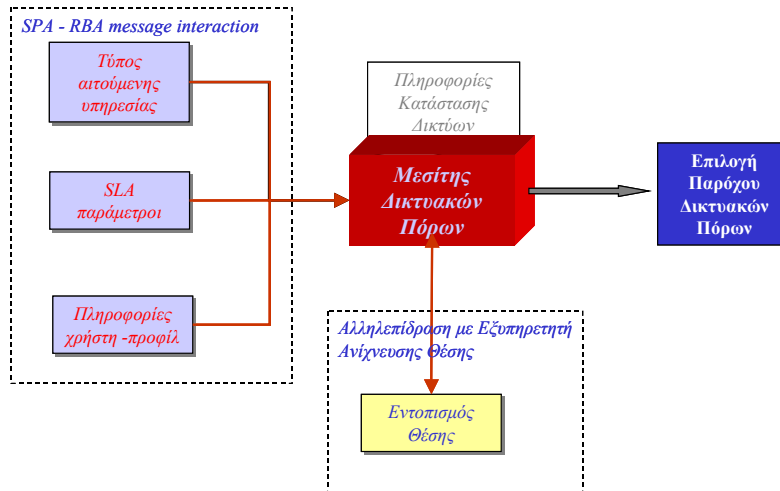
Συμπερασματικά, ο ρόλος του Μεσίτη Δικτυακών Πόρων είναι διπλός:

- Εκτελεί τις διαδικασίες εγγραφής σε νέους Παρόχους Δικτυακών Πόρων.
- Επιλέγει τον πιο κατάλληλο Πάροχο για την εξυπηρέτηση των εισερχόμενων αιτημάτων υπηρεσιών.

Η πρώτη λειτουργία αποτελεί αντικείμενο των απαραίτητων διεργασιών σε ένα αξιόπιστο περιβάλλον, το οποίο χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ανταγωνιστικών παραγόντων για την εξυπηρέτηση των κινητών χρηστών. Ο ρόλος του Μεσίτη Δικτυακών Πόρων είναι να διατηρεί τα στοιχεία εγγραφής των Παρόχων Δικτυακών Πόρων και να επικοινωνεί με αυτούς, ώστε να λαμβάνει προσφορές σχετικά με την καλύτερη κατανομή των ασύρματων πόρων, στα πλαίσια των διαδικασιών της κατάλληλης διαχείρισης του ραδιοφάσματος.

Η δεύτερη και σημαντικότερη λειτουργία του Μεσίτη Δικτυακών Πόρων αποκαλύπτει τον πραγματικό ρόλο της μεσιτείας σε μία σύγχρονη αρχιτεκτονική διαχείρισης ασύρματων δικτύων. Το στοιχείο αυτό αποτελεί έναν μεσίτη πληροφοριών που συγκεντρώνει τις χρήσιμες πληροφορίες από τις διάφορες πηγές, προκειμένου να εφαρμοστούν μερικές εσωτερικές μέθοδοι και να παραχθεί η τελική απόφαση σχετικά με την επιλογή του κατάλληλου Παρόχου Δικτυακών Πόρων. Συνεπώς, η διαδικασία επιλογής βασίζεται στις πληροφορίες που ανταλλάσσονται μεταξύ των διαφόρων διεπαφών, οι οποίες μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα:

- Η απαιτούμενη υπηρεσία από τον Πάροχο Υπηρεσιών.
- Η πραγματική θέση των χρηστών που αιτούνται τη συγκεκριμένη υπηρεσία.
- Κάποιες πληροφορίες σχετικές με τα ιδιαίτερα γνωρίσματα των ξεχωριστών χρηστών, οι οποίες, σε καμιά περίπτωση, δεν παραβιάζουν την ιδιωτικότητα (privacy) του χρήστη. Τέτοιες πληροφορίες μπορούν να είναι οι δυνατότητες του αντίστοιχου τερματικού χρηστών και η προτεραιότητα του συγκεκριμένου χρήστη για την πρόσβαση στην προσφερόμενη υπηρεσία.
- Μερικές παράμετροι SLA, που έχουν συμφωνηθεί μεταξύ του χρήστη και του Παρόχου Υπηρεσιών, οι οποίες καθορίζουν, μεταξύ άλλων, το μέγιστο εύρος ζώνης που διατίθενται για την παροχή της υπηρεσίας και την οικονομική ανοχή του συγκεκριμένου χρήστη.
- Η κατάσταση του δικτύου ή των δικτύων που βρίσκονται υπό τον έλεγχο όλων των διαθέσιμων Παρόχων Δικτυακών Πόρων. Η κατάσταση αυτή αφορά στην τρέχουσα κατοχή του εύρους ζώνης και τη συνακόλουθη ικανότητα μιας δικτυακής τεχνολογίας να εξυπηρετήσει και να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των χρηστών.



**Σχήμα 2-12. Παράμετροι επιλογής του κατάλληλου Παρόχου Δικτυακών Πόρων από τον Μεσίτη Δικτυακών Πόρων.**

Μια γραφική αναπαράσταση των παραμέτρων που απαιτούνται για την επιλογή του κατάλληλου Παρόχου Δικτυακών Πόρων φαίνεται στο Σχήμα 2-12. Η σημαντικότερη και πιο κρίσιμη, ίσως, πληροφορία είναι η αναφορά στην κατάσταση των υποκείμενων δικτυακών τεχνολογιών σχετικά με την ικανότητα διάθεσης πόρων για να εγκαταστήσουν νέες ροές υπηρεσιών και το τρέχον κόστος διάθεσης των πόρων. Για τον σκοπό αυτό, απαιτείται η περιοδική αλληλεπίδραση του Μεσίτη Δικτυακών Πόρων με τους διαθέσιμους Παρόχους Δικτυακών Πόρων, ώστε η πληροφορία που χρησιμοποιείται από τον Μεσίτη Δικτυακών Πόρων κατά τη διαδικασία εκτέλεσης του αλγορίθμου και επιλογής του καταλληλότερου Παρόχου Δικτυακών Πόρων να είναι ανανεωμένη.

Η αλληλεπίδραση που μόλις αναφέρθηκε σχετίζεται άμεσα με τις πληροφορίες θέσης των χρηστών, οι οποίες πρέπει να είναι διαθέσιμες στον Μεσίτη Δικτυακών Πόρων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος επιλογής είναι σχεδιασμένος, ώστε να συνυπολογίζει τέτοιες πληροφορίες και, επομένως, η απόφαση του αλγορίθμου εξαρτάται και από την τρέχουσα θέση των χρηστών. Έτσι, ο Μεσίτη Δικτυακών Πόρων διατηρεί επικοινωνία με τον Εξυπηρετητή Ανίχνευσης Θέσης, που φαίνεται στο Σχήμα 2-10. Αυτό, όμως, συνεπάγεται ότι οι αναφορές σχετικά με τα επίπεδα συμφόρησης των δικτύων θα πρέπει να παρέχονται στο επίπεδο των αντίστοιχων δικτυακών κόμβων και όχι σε μία ευρεία περιοχή.

Όσον αφορά στην πολιτική τιμολόγησης ενός συγκεκριμένου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, τέτοιου είδους πληροφορία υπόκειται σε αργές αλλαγές σε σχέση με το εκάστοτε κατειλημμένο εύρος ζώνης. Ωστόσο, μια τέτοια πληροφορία μπορεί να ασκήσει σημαντική επίδραση στην απόφαση του αλγορίθμου που εκτελείται στα πλαίσια λειτουργίας του Μεσίτη Δικτυακών Πόρων. Οι πληροφορίες χρέωσης που συγκεντρώνει το στοιχείο αυτό επιτρέπουν στο να βρεθεί ο πλέον οικονομικά αποδοτικός Πάροχος, ο οποίος μπορεί να ικανοποιήσει το εισερχόμενο αίτημα για την προσφορά μίας ή περισσότερων υπηρεσιών. Οι εσωτερικές πολιτικές τιμολόγησης κάθε

Παρόχου μπορούν να αλλάξουν δυναμικά, και αυτές οι αλλαγές θα πρέπει να κοινοποιούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα στον Μεσίτη Δικτυακών Πόρων. Για τον σκοπό αυτό, οι παράμετροι χρέωσης που υιοθετούνται από το σύνολο των Παρόχων Δικτυακών Πόρων πρέπει να περιλαμβάνονται ως παράμετροι των μηνυμάτων αναφορών σχετικά με την κατάσταση των δικτύων. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η δυναμική συμπεριφορά του Μεσίτη Δικτυακών Πόρων και η λειτουργία του καθίσταται να είναι προσαρμόσιμη σε οποιαδήποτε συμπεριφορά των Παρόχων.

Τέλος, μια επιπλέον λειτουργία του Μεσίτη Δικτυακών Πόρων είναι να ενεργεί ως διαμεσολαβητής για την ανταλλαγή μηνυμάτων SLA μεταξύ των διαφόρων Παρόχων Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων. Όπως και στην περίπτωση του Μεσίτη Υπηρεσίας, αυτά τα μηνύματα μπορούν να συμπεριλάβουν την πρόταση SLA ενός Παρόχου Δικτυακών Πόρων προς ένα Πάροχο Υπηρεσιών, την απάντηση σχετικά με την αποδοχή ή απόρριψη του προτεινόμενου σχήματος SLA και άλλα μηνύματα επαναδιαπραγμάτευσης των σχημάτων SLA.

## **2.6. Τεχνολογίες Υλοποίησης - Τεχνολογία Πρακτόρων**

### **2.6.1. Εισαγωγή**

Η παράγραφος αυτή παρουσιάζει τις προτεινόμενες από τη βιβλιογραφία τεχνολογίας υλοποίησης για τα σύγχρονα και μελλοντικά συστήματα διαχείρισης. Λόγω της πολυπλοκότητας των απαιτούμενων λειτουργιών που απαιτούνται για την υποστήριξη διαδικασιών διαλειτουργικότητας ετερογενών ασύρματων δικτύων πρόσβασης, η έννοια των κατανεμημένων συστημάτων αρχίζει και απασχολεί έντονα τη διεθνή επιστημονική κοινότητα.

Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις κεντροποιημένων αρχιτεκτονικών διαχείρισης, όπως το γνωστό TMN (δίκτυο διαχείρισης τηλεπικοινωνιών) εμφανίζουν μειονεκτήματα στην εξελισσιμότητα, την αξιοπιστία, την αποδοτικότητα, και την ευελιξία και είναι συνεπώς ακατάλληλες για τα μεγάλα και ετερογενή δίκτυα. Επομένως είναι αρκετά φυσικό να αναζητηθεί μια νέα προσέγγιση σε μια κατανεμημένη αρχιτεκτονική με την εισαγωγή των πρακτόρων λογισμικού (agents).

Ο πράκτορας λογισμικού [25] είναι μια αυτόνομη οντότητα λογισμικού στην οποία μεταβιβάζονται διαδικασίες λογισμικού, τις οποίες αυτοματοποιεί. Είναι μια οντότητα λογισμικού, που έχει τη δική της κατάσταση, συμπεριφορά, νήμα ελέγχου και τη δυνατότητα να αλληλεπιδρά και να επικοινωνεί με άλλες οντότητες. Ο όρος πράκτορας έχει χρησιμοποιηθεί επίσης εδώ και πολλά χρόνια στον τομέα των κατανεμημένων υπολογιστικών συστημάτων, όπου αναφέρεται στις συγκεκριμένες οντότητες (πελάτης ή εξυπηρετητής υπολογιστής) που χρησιμοποιούνται στην επίλυση των συγκεκριμένων στόχων σε ένα κατανεμημένο σύστημα υπολογισμού [26].



### 2.6.2. Πράκτορες

Η ιστορία των πρακτόρων ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του '90 με την εμφάνιση διαφορετικών αντιλήψεων και τεχνολογιών σχετικά με αυτούς. Οι αντιλήψεις αυτές σήμερα έχουν καταλήξει σε δύο είδη πρακτόρων, στους έξυπνους πράκτορες και στους κινητούς πράκτορες. Στις αρχές της εμφάνισης των πρακτόρων, η έννοια αυτή δεν ήταν σαφώς ορισμένη, και αυτό επειδή πολλοί από αυτούς που όριζαν ως «πράκτορες» δε βασίζονταν πάντοτε σε έννοιες και τεχνολογίες των πρακτόρων, όπως αυτές είναι γνωστές σήμερα. Για παράδειγμα, ο όρος «πράκτορες» έχει χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια στον τομέα των κατανεμημένων υπολογιστικών συστημάτων, όπου αναφέρθηκε σε συγκεκριμένες οντότητες που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση διεργασιών σε ένα κατανεμημένο υπολογιστικό σύστημα.(π.χ. directory system agents, mail user agents, management agents)

Το ενδιαφέρον για τους έξυπνους πράκτορες ξεκίνησε με την αύξηση της χρήσης των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων (Multi-agent systems). Τα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων έχουν ως βασική ιδέα τον καταμερισμό των πολύπλοκων διαδικασιών. Οι διαδικασίες αυτές μπορούν να αποτελέσουν το γινόμενο των επιμέρους ενεργειών ανεξαρτήτων προγραμματιστικών οντοτήτων, που ονομάζονται πράκτορες. Ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων μπορεί να οριστεί ως ένα σύνολο πρακτόρων, οι οποίοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και με το περιβάλλον τους ώστε να λύσουν ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Έτσι, η επικοινωνία και η συνεργασία των πρακτόρων αποτελούν ένα σημαντικό θέμα μελέτης. Τέλος, η άνθιση της εποχής της γλώσσας προγραμματισμού java ευνόησε την ανάπτυξη των πρακτόρων και γενικότερα αυτή η γλώσσα προγραμματισμού αποτελεί σήμερα τη βάση για τα περισσότερα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων.

### 2.6.3. Ορισμός

Ο όρος πράκτορας λογισμικού ('software agent') έχει υιοθετηθεί σαν γενικός όρος για να περιγράψει την έννοια μιας αυτόνομης οντότητας λογισμικού που αυτοματοποιεί μερικές από τις διεργασίες που της έχουν ανατεθεί, οι οποίες αποτελούν μέρος μιας ανθρώπινης ή λογισμικής διαδικασίας.

Ο πράκτορας δηλαδή είναι μια οντότητα λογισμικού, η οποία έχει τη δική της κατάσταση, συμπεριφορά, νήμα ελέγχου και ικανότητα να συνεργάζεται, να αλληλεπιδρά και να επικοινωνεί με άλλες οντότητες, όπως άλλους πράκτορες, χρήστες ή συστήματα.

Είναι φανερό ότι ο παραπάνω ορισμός τοποθετεί τον όρο πράκτορα στην ίδια οικογένεια με τα αντικείμενα, τις συναρτήσεις, τις διαδικασίες και τους δαίμονες. Σημειώνεται ότι ο πράκτορας διαφέρει από το κλασσικό client-server πρότυπο. Οι πράκτορες μπορούν να αλληλεπιδρούν σε επίπεδο ομότιμων οντοτήτων (peer to peer), να επικοινωνούν και να συνεργάζονται ώστε να επιτύχουν το σκοπό τους.

Ωστόσο, δεν υπάρχει μονοσήμαντος ορισμός ενός πράκτορα λογισμικού. Αυτό αντικατοπτρίζει τις μεγάλες διαφορές στο χώρο των θεωριών, γλωσσών, αρχιτεκτονικών, τεχνολογιών και προτύπων σχετικά με αυτούς. Σήμερα μπορούμε να απλοποιήσουμε την αντίληψη σχετικά με τους πράκτορες με το διαχωρισμό του φάσματος όλων των αντιλήψεων σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Αυτές οι δύο κατηγορίες είναι οι Κινητοί Πράκτορες και οι Έξυπνοι Πράκτορες.

Οι κινητοί πράκτορες, οι οποίοι συνήθως έχουν περιορισμένη νοημοσύνη σε σχέση με τους έξυπνους πράκτορες, είναι αυτοί που έχουν τη δυνατότητα να μεταπηδούν από μία πλατφόρμα σε άλλη διατηρώντας πληροφορίες κατάστασης. Από την άλλη, οι έξυπνοι πράκτορες είναι πράκτορες που επιδεικνύουν 'έξυπνη συμπεριφορά'. Τέτοιες συμπεριφορές μπορεί κυμαίνονται από τη συμπεριφορά που ακολουθείται πλήρως έπειτα από προκαθορισμένες εντολές του χρήστη έως τη συμπεριφορά που μεταβάλλεται συνεχώς στα νευρωνικά δίκτυα. Οι έξυπνοι πράκτορες κατά κανόνα δεν είναι κινητοί καθώς, όσο μεγαλύτερος είναι ένας πράκτορας τόσο λιγότερο επιθυμητό είναι να μετακινηθεί. Γενικά, όσο πιο 'νοήμων' είναι ένας πράκτορας, τόσο μεγαλύτερο μέγεθος θα έχει, καθώς ο κώδικας που του παρέχει την τεχνητή νοημοσύνη, όπως είναι λογικό, του αυξάνει το μέγεθος.

Μέχρι προσφάτως, υπήρχε αυστηρή διάκριση μεταξύ αυτών των δύο ειδών πρακτόρων και οι δύο αυτοί διαφορετικοί τομείς ερευνούσαν διαφορετικά θέματα και εστίαζαν την προσοχή τους σε διαφορετικά προβλήματα. Ωστόσο, και οι δύο τομείς βασίζονται στην ίδια γενικότερη αντίληψη, δηλαδή στη χρησιμοποίηση πολλών επιμέρους αυτόνομων διαδικασιών που η καθεμία από αυτές λειτουργεί σαν αυτόνομη οντότητα για την αντιμετώπιση διεργασιών αυτομάτου ελέγχου. Οδηγούμαστε σιγά-σιγά σε μία ενοποιημένη αντίληψη, που θα έχει ως εξέλιξη την πλατφόρμα 'έξυπνων κινητών πρακτόρων' που δίνει το δικαίωμα στο σχεδιαστή να συμπεριλάβει πράκτορες με τα χαρακτηριστικά τόσο των έξυπνων πρακτόρων, όσο και των κινητών πρακτόρων.

Παρακάτω παραθέτουμε τα δύο είδη πρακτόρων και τα ειδικότερα χαρακτηριστικά τους.

## **2.6.4. Είδη Πρακτόρων**

### **2.6.4.1. Έξυπνοι πράκτορες.**

Το σημαντικότερο στοιχείο που διακρίνει αυτόν τον τύπο πρακτόρων από τους υπόλοιπους τύπους των διεργασιών λογισμικού, είναι ότι μπορεί να συνεργάζεται κατά κάποιο τρόπο με άλλους χρήστες (ανθρώπινους ή άλλους πράκτορες λογισμικού) είτε για να κάνει χρήση των δυνατοτήτων τους, είτε για να συνεισφέρει στη δράση τους και να επιτευχθεί ο κοινός σκοπός τους. Έτσι, συχνά καλούνται και ως έξυπνοι συνεργάσιμοι πράκτορες (intelligent co-operative agents). Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής της ομάδας πρακτόρων, στα οποία θα επικεντρωθούμε στη συνέχεια, είναι η επικοινωνία και η συνεργασία.

Η επικοινωνία επιτρέπει στους πράκτορες συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων να ανταλλάσσουν πληροφορίες και να προσαρμόζουν τη συμπεριφορά και τη δράση τους σύμφωνα με αυτές.

Γενικά οι πράκτορες λογισμικού επικοινωνούν με άλλους πράκτορες ώστε να γίνει η δράση τους πιο ευέλικτη. Για να γίνει εφικτή η κοινή δράση των πρακτόρων είναι απαραίτητο να αλληλεπιδρούν, να ανταλλάσσουν πληροφορίες ακόμα και να διαπραγματεύονται. Αυτά γίνονται μέσω ενός προκαθορισμένου πρωτοκόλλου επικοινωνίας, που ονομάζεται ACL (Agent Communicative Language) και είναι μια γλώσσα με αυστηρά καθορισμένο συντακτικό και σημασιολογία (semantics). Ωστόσο, σημειώνεται ότι η επικοινωνία των πρακτόρων πραγματοποιείται μέσω της χρήσης τριών συστατικών

- ACL
- Γλώσσα περιεχομένου - content language
- Οντολογία - ontology

Η οντολογία περιλαμβάνει τους όρους που συνιστούν το πεδίο της εφαρμογής και αναπαριστά ένα λεξικό δεδομένων σε ένα κλασσικό σύστημα πληροφορίας. Η γλώσσα περιεχομένου χρησιμοποιείται για το συνδυασμό των όρων της οντολογίας σε προτάσεις οι οποίες είναι χρήσιμες στους πράκτορες. Ορισμένες φορές η γλώσσα περιεχομένου και η οντολογία είναι τόσο στενά δεμένες μεταξύ τους ώστε είναι πολύ δύσκολο να ξεχωρίσουμε. Για παράδειγμα, μία λίστα από προτάσεις είναι η γλώσσα περιεχομένου, που αναπαριστά την οντολογία. Τέλος, η ACL δρα σαν ένα πρωτόκολλο, δίνοντας τη δυνατότητα ανάπτυξης διαλόγων που περιλαμβάνουν προτάσεις της γλώσσας περιεχομένου μεταξύ πρακτόρων και να καθορίσει τη σημασιολογία για τη συμπεριφορά πρακτόρων που παίρνουν μέρος σε τέτοιους διαλόγους.

Οι περισσότερες ACL γλώσσες προκύπτουν από τη θεωρία πράξεων ομιλίας (speech act theory), που καλλιεργήθηκε από γλωσσολόγους σε μια απόπειρα να κατανοήσουν τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι χρησιμοποιούν τη γλώσσα για να αντιμετωπίσουν καθημερινές καταστάσεις και να πραγματοποιήσουν καθημερινούς στόχους, όπως επιθυμίες, αιτήσεις, διαταγές, υποσχέσεις κλπ. Βασίζεται στην ιδέα ότι με τη γλώσσα ο ομιλητής όχι μόνο κάνει δηλώσεις, αλλά επιπλέον πραγματοποιεί δράσεις.

Η πρώτη γλώσσα ACL που κυριάρχησε ήταν η KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) η οποία καθορίζει ένα πλαίσιο για ανταλλαγή γνώσεων. Εστιάζεται σε ένα σύνολο από performatives ή τύπους μηνυμάτων, τα οποία καθορίζουν τις επιτρεπτές ενέργειες που οι πράκτορες μπορούν να πραγματοποιήσουν στις γνώσεις και στις επιδιώξεις των άλλων πρακτόρων. Καθώς το περιεχόμενο των μηνυμάτων δεν ήταν μέρος του πρωτοκόλλου, ορίστηκε μια νέα επίσημη γλώσσα, η KIF (Knowledge Interchange Format). Η KQML και η KIF αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της DARPA Knowledge Sharing Effort (Ginsberg 1991)

### **Πλεονεκτήματα πρακτόρων**

Στην συνέχεια παραθέτουμε τα βασικά πλεονέκτημα της χρήσης πρακτόρων:

- Η επίλυση προβλημάτων που είναι πολύ μεγάλα για να λυθούν από μία κεντρική οντότητα (π.χ. λόγω περιορισμού των πόρων).

- Μείωση κόστους επεξεργασίας και υπολογισμού. Μικρότερο κόστος σε υλικό για τη χρήση πολλών μικρών φθηνών επεξεργαστών από το κόστος ενός ισοδύναμης συνολικής απόδοσης μεγάλου επεξεργαστή.
- Βελτίωση της δυνατότητας κλιμάκωσης (scalability) και προσαρμοστικότητας (adaptability). Η δομή οργάνωσης των πρακτόρων μπορεί να μεταβάλλεται δυναμικά ώστε να αντεπεξέλθει στο περιβάλλον. Π.χ. όσο ένα δίκτυο μεγαλώνει, ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων μπορεί να μεταβάλλει τους ρόλους των πρακτόρων του, τις συμπεριφορές τους και τη δράση τους.
- Λύσεις σε κατανεμημένα προβλήματα διαχείρισης συστημάτων.

#### **Μειονεκτήματα πρακτόρων**

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα στη χρήση πρακτόρων είναι το ότι για να εργαστεί ένας υπεύθυνος ανάπτυξης λογισμικού σε συστήματα πολλαπλών πρακτόρων χρειάζεται να έχει καλή γνώση τεχνητής νοημοσύνης και κατανεμημένης τεχνητής νοημοσύνης, οι οποίες δεν είναι ιδιαίτερα προσιτές.

#### **2.6.4.2.Κινητοί πράκτορες**

Οι κινητοί πράκτορες, συχνά αποκαλούμενοι και ως μετακινήσιμοι βασίζονται στην αρχή της δυνατότητας μετακίνησης κώδικα. Ο μετακινούμενος κώδικας βελτιώνει το κλασσικό client/server πρότυπο κάνοντας αλλαγές κατά μήκος δύο ορθογωνίων αξόνων.

Τα βασικά ερωτήματα που γεννιούνται από την υιοθέτηση των κινητών πρακτόρων έχουν να κάνουν με το πού είναι εγκατεστημένο το know how της υπηρεσίας και το ποιος παρέχει τους υπολογιστικούς πόρους για την υποστήριξη της υπηρεσίας.

Τρία βασικά πρότυπα για κινητούς υπολογισμούς έχουν οριστεί. Αυτά είναι :

- Απομακρυσμένη αξιολόγηση
- Κώδικας έπειτα από αίτηση
- Κινητοί Πράκτορες.

Αυτά τα πρότυπα διαφέρουν ως προς το πώς το know how, ο επεξεργαστής και οι πόροι είναι κατανεμημένοι γύρω από τα συστατικά ενός κατανεμημένου συστήματος. Το know how εκπροσωπεί τον κώδικα που είναι απαραίτητος για την υλοποίηση του υπολογισμού. Οι πόροι (π.χ. δεδομένα) είναι αυτοί που είναι εγκατεστημένοι στη μηχανή που θα εκτελέσει τον υπολογισμό.

#### **2.6.5. Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων**

Τα Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων (Multiagent Systems - MAS) [27] συνήθως προσφεύγουν στα κοινά πρότυπα και τις αρχιτεκτονικές των πρακτόρων όπως οι αντιδραστικές και υβριδικές αρχιτεκτονικές (reactive and hybrid architectures). Ο πράκτορας βρίσκεται κάπου

στο δίκτυο και είναι σε θέση να ανταλλάξει τα μηνύματα με άλλους πράκτορες που βρίσκονται σε απομακρυσμένους ξένιους κόμβους (hosts) προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι τους. Τα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων έχουν μεγάλες ικανότητες επίλυσης προβλημάτων χωρίς τον περιορισμό της παρουσίας συγκεντρωτικού προγραμματισμού. Τέτοια συστήματα χαρακτηρίζονται συνήθως από την αλληλεπίδραση ενός μεγάλου αριθμού απλών πρακτόρων που έχουν τη δυνατότητα να αισθάνονται και να μεταβάλλουν το περιβάλλον τους τοπικά. Οι κοινωνίες αυτές των απλών πρακτόρων είναι σε θέση να επιλύουν σύνθετα προβλήματα ακόμα κι αν μεμονωμένα κατέχουν περιορισμένες δυνατότητες. Ο όρος "σύστημα πολλαπλών πρακτόρων" χρησιμοποιείται για όλους τους τύπους συστημάτων που αποτελούνται από πολλαπλάσια αυτόνομα συστατικά που παρουσιάζουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- κάθε πράκτορας έχει ελλειπείς ικανότητες να λύσει ένα πρόβλημα.
- δεν υπάρχει κανένας σφαιρικός έλεγχος συστημάτων.
- χρησιμοποιείται αρχιτεκτονική αποκέντρωσης
- ο υπολογισμός είναι ασύγχρονος.

Σε υψηλό επίπεδο (όπως το στρώμα εφαρμογής) η προσέγγιση συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων είναι διαισθητικά απλή. Αυτό δίνει στους υπεύθυνους της ανάπτυξης πρακτόρων ένα πλεονέκτημα στην κατασκευή συστημάτων τεχνολογίας πολλαπλών πρακτόρων, δεδομένου ότι υπάρχει κοινή βάση σε μια φυσική μεθοδολογία για την απομόνωση των διαφορετικών ενοτήτων αλληλεπίδρασης που αποτελούν το πλήρες σύστημα πρακτόρων. Επομένως, η ιδέα των κατανεμημένων πρακτόρων λογισμικού δίνει τη δυνατότητα στον υπεύθυνο ανάπτυξης λογισμικού για συμπαγή σύλληψη της επίλυσης προβλήματος, όπως αυτή απαιτείται στον αποκεντρωμένο έλεγχο. Η προσέγγιση πρακτόρων παρέχει επίσης μια κατάλληλη αναλογία για την απλοποίηση των προβλημάτων αφαιρώντας μερικές πολυπλοκότητες που προκύπτουν βαθμιαία στην περιοχή των τηλεπικοινωνιών.

#### **2.6.6. Εφαρμογή των πρακτόρων στη διαχείριση των πόρων**

Ο όρος διαχείριση δικτύων χρησιμοποιείται συχνά για το μηχανισμό που ενεργεί κατά σφαιρικό τρόπο σε πολλές οντότητες και τείνει να μεταβάλει τη διαμόρφωση συστημάτων (π.χ. αναδιανομή των πόρων συστημάτων) από μια κατάσταση ισορροπίας σε άλλη. Οι διαδικασίες διαχείρισης ενεργούν συνήθως πάνω σε σχετικά μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Ο έλεγχος παρέχει τις ενέργειες που είναι απαραίτητες για να διατηρήσουν το σύστημα σε μία σταθερή κατάσταση

Οι ερευνητές της τεχνολογίας των πρακτόρων έχουν στραφεί προς την ολοκλήρωση του ελέγχου και της διαχείρισης και έχουν εφαρμόσει οικονομικές έννοιες, καθώς και θεωρητικές έννοιες παιχνιδιών στην κατανομή των πόρων. Τα οικονομικά συστήματα αποτελούν μια μελετημένη κατηγορία μηχανισμών για τη διανομή των πόρων μεταξύ των κατανεμημένων οντοτήτων υπευθύνων για τη λήψη αποφάσεων.

Παρόλο που η κατανομή των πόρων είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει κανείς να εξετάσει κατά την εφαρμογή των πρακτόρων στις τηλεπικοινωνίες εφαρμογές, υπάρχουν και πολλά άλλα σημαντικά ζητήματα που προκύπτουν, όπως :

- ❑ Ο τρόπος επικοινωνίας που έχει ο πράκτορας με τους άλλους πράκτορες - προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί η επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων έτσι ώστε η δράση να επιτυγχάνεται γρηγορότερα.
- ❑ Η θέση στην οποία πρέπει να βρίσκεται ο πράκτορας. Ένας πράκτορας ανά κόμβο, ένας ανά φυσική σύνδεση, ή ένας για να αντιπροσωπεύσει κάθε σύνδεση;
- ❑ Πρέπει οι πράκτορες να είναι στάσιμοι ή κινητοί;
- ❑ Ποια αντίληψη του δικτύου έχει ο πράκτορας; Είναι σκόπιμο να διατηρείται ο πράκτορας ενήμερος για άλλα έμμεσα σχετιζόμενα γεγονότα με αυτόν που συμβαίνουν στην περιοχή του;
- ❑ Ποιος βαθμός εξάρτησης θα έπρεπε να υπάρξει μεταξύ των πρακτόρων στο σύστημα; Εάν ένας πράκτορας 'πεθάνει' , είναι το σύστημα ακόμα ισχυρό;

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η επιχειρησιακή στρατηγική που υιοθετείται μεταξύ των εμπλεκόμενων επιχειρησιακών οντοτήτων. Η καλύτερη στρατηγική για έναν δράστη είναι πιθανό να συγκρουστεί με την καλύτερη στρατηγική άλλου. Είναι επομένως σημαντικό να εξεταστούν οι προσεγγίσεις που ικανοποιούν όλους τους συμμετέχοντες. Η αυτοματοποιημένη διαπραγμάτευση μεταξύ των σχετικών πρακτόρων μπορεί να προσφέρει μια ενδιαφέρουσα λύση στο πρόβλημα των στόχων σύγκρουσης. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της διαπραγμάτευσης υπό εξέταση είναι:

- η γλώσσα που χρησιμοποιείται από τους συμμετέχοντες πράκτορες.
- το πρωτόκολλο που ακολουθείται από τους πράκτορες καθώς διαπραγματεύονται.
- η διαδικασία απόφασης που κάθε πράκτορας χρησιμοποιεί για να καθορίσει τις θέσεις, τις παραχωρήσεις και τα κριτήριά του για τη συμφωνία.

Ο μηχανισμός διαπραγμάτευσης πρέπει να έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Αποδοτικότητα - οι πράκτορες δεν πρέπει να σπαταλήσουν τους πόρους στη διαπραγμάτευση μια συμφωνίας.
- Σταθερότητα - κανένας πράκτορας δεν πρέπει να έχει ένα κίνητρο για να παρεκκλίνει από τις συμφωνημένες στρατηγικές.
- Απλότητα - ο μηχανισμός διαπραγμάτευσης πρέπει να επιβάλει χαμηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και υπολογιστικές ανάγκες στους πράκτορες.
- Κατανομή - ο μηχανισμός δεν πρέπει να απαιτεί κεντρικό λήπτη αποφάσεων .

- Συμμετρία και αμεροληψία - ο μηχανισμός δεν πρέπει να είναι προκατειλημμένος απέναντι σε οποιονδήποτε πράκτορα για αυθαίρετους ή ακατάλληλους λόγους.

### 2.6.7. Προδιαγραφές και Μοντέλα Αναφοράς

Έπειτα από έρευνες που έγιναν στον τομέα των πρακτόρων, αποδείχτηκε ότι τα στοιχεία κλειδιά για την αλληλεπίδραση των πρακτόρων σε ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων είναι τα εξής:

- Κοινή ACL γλώσσα και πρωτόκολλο.
- Κοινό format για το περιεχόμενο της επικοινωνίας
- Κοινή (shared) οντολογία

Παρόλο που η σχετική έρευνα προχώρησε με εντατικούς ρυθμούς κατά τη διάρκεια των προηγούμενων δεκαετιών, δεν υπάρχει καθορισμός μιας ευρέως αποδεκτής αρχιτεκτονικής για συστήματα πολλαπλών πρακτόρων. Αντιθέτως, μεμονωμένες βιομηχανικές και ερευνητικές ομάδες άρχισαν να ακολουθούν την τυποποίηση σε αυτόν τον τομέα. Ως αποτέλεσμα, σήμερα μερικές καρποφόρες προσπάθειες έχουν κυριαρχήσει και περιγράφονται παρακάτω.

Το Object Management Group (OMG) [28] είναι μια πρώτη απόπειρα για την αναπαράσταση ενός ολικού συνόλου προδιαγραφών σε διαλειτουργικές (interoperable) διεπαφές. Συγκεκριμένα, προτείνει ένα μοντέλο αναφοράς, το Common Object Request Broker Architecture (CORBA), σαν οδηγό για την ανάπτυξη τεχνολογιών πρακτόρων. Το μοντέλο αυτό καθορίζει διαφορετικά επίπεδα από επαναχρησιμοποίηση υπηρεσιών. Το OMG καθιέρωσε παγκοσμίως αποδεκτές υλικολογισμικές προδιαγραφές για τα καταναμεμημένα συστήματα. Επίσης σκιαγραφεί τα χαρακτηριστικά ενός περιβάλλοντος αποτελούμενου από πράκτορες και διαμεσολαβήσεις (agencies) ως οντότητες που συνεργάζονται κάνοντας χρήση γενικών σχηματομορφών (patterns) και πολιτικών αλληλεπίδρασης.

Κάτω από αυτό το μοντέλο οι πράκτορες χαρακτηρίζονται από τις δυνατότητες τους, τον τύπο της αλληλεπίδρασης (σύγχρονος, ασύγχρονος), την μετακινησιμότητά τους (στατικοί, μετακινήσιμοι με ή χωρίς κατάσταση).

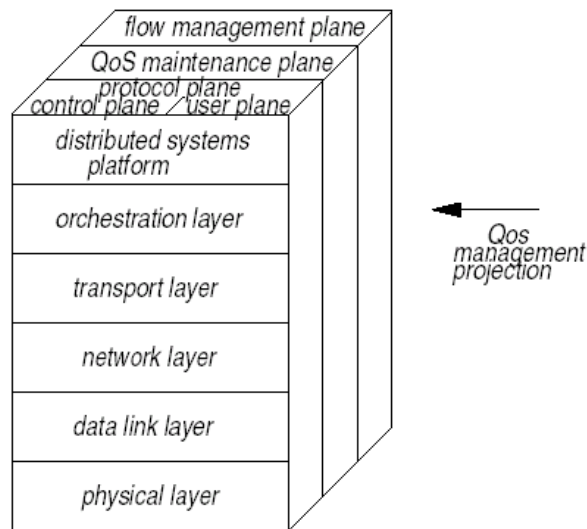
Το Knowledge-able Agent-oriented System (KAoS) [29] είναι άλλο ένα σημαντικό αποτέλεσμα προσπάθειας τυποποίησης και εισαγωγής προδιαγραφών. Το σύστημα αυτό περιγράφεται σαν μία ανοιχτή και καταναμεμημένη (open distributed) αρχιτεκτονική για πράκτορες. Η αρχιτεκτονική KAoS περιγράφει υλοποιήσεις πρακτόρων (αρχίζοντας από την αναφορά ενός απλού γενικού πράκτορα, σε πράκτορες με ρόλους) και εργάζεται στην επικοινωνία των πρακτόρων με μηνύματα χρησιμοποιώντας πολιτικές συζήτησης (conversation policies).

Τέλος, η Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) [30] είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός που ιδρύθηκε στη Γενεύη της Ελβετίας με την προοπτική να προωθήσει την τεχνολογία πρακτόρων μέσα από την ανάπτυξη προδιαγραφών και προτύπων που μεγιστοποιούν τη διαλειτουργικότητα σε εφαρμογές, υπηρεσίες και εξοπλισμό που χρησιμοποιούν οι πράκτορες.

## 2.7. Ποιότητα Υπηρεσίας

### 2.7.1. Ορισμός και βασικές παράμετροι QoS

Ο διεθνής οργανισμός προτύπων (International Organizations of Standardization - ISO) καθορίζει την ποιότητα μιας υπηρεσίας, η οποία διεθνώς συμβολίζεται με τα αρχικά QoS (από την αγγλική ορολογία Quality of Service), σαν μια έννοια που χρησιμοποιείται για την ποσοτική μέτρηση του πόσο καλή είναι μια προσφερόμενη υπηρεσία πάνω από ένα συγκεκριμένο δίκτυο. Το QoS σημαίνει τη συνεπή και προβλέψιμη παράδοση των δεδομένων μιας υπηρεσίας, υπό την έννοια ότι παρέχεται ένα επίπεδο διαβεβαίωσης ότι οι απαιτήσεις της κίνησης μπορούν να ικανοποιηθούν. Η εγγύηση του QoS μιας υπηρεσίας απαιτεί τη συνεργασία όλων των στρωμάτων της στοίβας πρωτοκόλλων. Η έννοια του QoS δε δημιουργεί το εύρος ζώνης, αλλά μόνο διαχειρίζεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τις ρυθμίσεις για τη διαχείριση των δικτύων. Ως εκ τούτου, το QoS, με εγγυημένο το επίπεδο υπηρεσιών, απαιτεί την κατανομή των πόρων στις μεμονωμένες ροές.



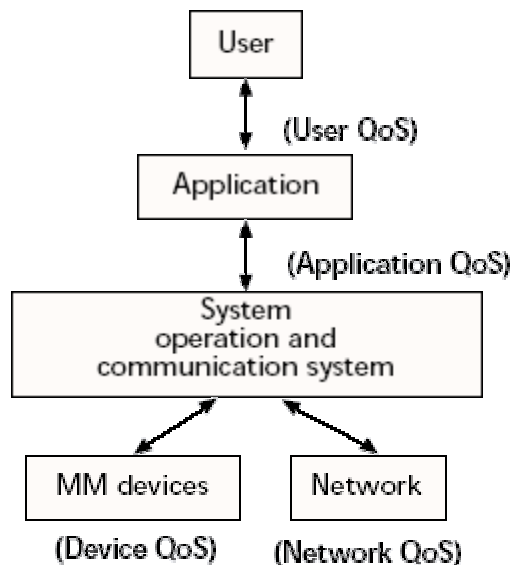
**Σχήμα 2-13. Επίδραση των μηχανισμών διαχείρισης της ποιότητας μιας υπηρεσίας στην στοίβα πρωτοκόλλων**

Η ποιότητα μιας υπηρεσίας μπορεί να οριστεί κατά μήκος πολλών στρωμάτων της στοίβας πρωτοκόλλων. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2-13, οι μηχανισμοί διαχείρισης της ποιότητας μιας υπηρεσίας δρουν σε όλο το φάσμα πρωτοκόλλων σε παράλληλο επίπεδο με τις διεργασίες για τη διαχείριση των ροών πληροφορίας μέσα σε ένα δίκτυο. Ανάλογα με το στρώμα, στο οποίο αναφερόμαστε, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά μιας υπηρεσίας διαφέρουν και αντιστοιχούν στις απαιτήσεις και τις δυνατότητες των δομικών στοιχείων των εκάστοτε Παρόχων. Έτσι, το QoS μιας υπηρεσίας ή εφαρμογής έχει πολλαπλές έννοιες ανάλογα με το στρώμα επιπέδου, στο οποίο αναφερόμαστε.



Στη σύγχρονη εποχή των τηλεπικοινωνιών, οι υπηρεσίες που διακρίνονται για τις απαιτήσεις σε ποιότητα είναι οι υπηρεσίες πολυμέσων ή πολυμεσικές υπηρεσίες. Τα κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματα των υπηρεσιών, όπως αυτά αντανακλούνται στις ανθρώπινες αισθήσεις, είναι ο ήχος, η εικόνα (στατική ή κινούμενη) και το βίντεο. Σαν πολυμεσικές υπηρεσίες λογίζονται οι υπηρεσίες εκείνες που συνδυάζουν ένα μέρος ή όλα αυτά τα χαρακτηριστικά. Επειδή οι πολυμεσικές υπηρεσίες αποτελούν το βασικό κομμάτι του συνόλου των υπηρεσιών που απαιτούν την ύπαρξη μηχανισμών ποιότητας, στα επόμενα περιγράφουμε την έννοια της ποιότητας μιας υπηρεσίας, εστιάζοντας στις πολυμεσικές υπηρεσίες.

Ένα δομημένο μοντέλο για την αρχιτεκτονική ενός συστήματος πολυμεσικών επικοινωνιών με αναφορά στο QoS [31] παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-14. Όπως φαίνεται και από το σχήμα αυτό, οι QoS παράμετροι που αφορούν σε μια υπηρεσία ή εφαρμογή αντιστοιχίζονται στις διάφορες διεπαφές ενός συστήματος επικοινωνιών και μπορούν να χωριστούν σε δύο υποσύνολα, δηλαδή εξαρτημένες από την εφαρμογή παράμετροι και ανεξάρτητες από εφαρμογή παράμετροι. Μπορούν επίσης να ταξινομηθούν στα ακόλουθα τρία στρώματα: χρήστη, εφαρμογή, και στρώματα συστημάτων. Στο στρώμα συστημάτων, οι QoS παράμετροι αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε δύο υποκατηγορίες, οι οποίες είναι οι παράμετροι των δικτύων και οι παράμετροι των λειτουργικών συστημάτων και παράμετροι συσκευών.



**Σχήμα 2-14. Ένα δομημένο μοντέλο για την αρχιτεκτονική ενός συστήματος επικοινωνιών πολυμέσων με αναφορά στο QoS**

Η πρώτη διεπαφή αφορά στον ίδιο τον χρήστη, ο οποίος δύναται να καθορίσει την ποιότητα της υπηρεσίας που επιθυμεί να λάβει. Τα κριτήρια ποιότητας που τίθενται από τον χρήστη έχουν να κάνουν με υποκειμενικά χαρακτηριστικά ποιότητας και έχουν σαν βάση τα αισθητήρια όργανα του χρήστη. Καθώς οι παράμετροι αυτές περνούν στη ζητούμενη υπηρεσία, τα QoS χαρακτηριστικά μετατρέπονται σε τεχνικές παραμέτρους που αφορούν στην ίδια την υπηρεσία

και τον τρόπο υλοποίησής της. Τέλος, οι τεχνικές παράμετροι ποιότητας μιας υπηρεσίας μεταφράζονται σε τεχνικά χαρακτηριστικά των υποκείμενων δικτύων που χρησιμοποιούνται για την εξυπηρέτηση της συγκεκριμένης υπηρεσίας. Μελέτες σχετικές με τη διαδικασία «μετάφρασης» των παραμέτρων QoS στα διάφορα στρώματα υπάρχουν στα [32][33].

**Πίνακας 2.1. Ενδεικτικές παράμετροι QoS στα διάφορα στρώματα του μοντέλου αναφοράς**

| QoS Layer   | QoS Parameters                                                                                      |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Application | Frame Rate, Frame Size and Resolution, Response Time<br>Throughput, Security, Price and Convenience |
| System      | Buffer Size, Process Priority , Scheduling Policy<br>Caching Policy, Time Quantum                   |
| Network     | Bandwidth, Throughput, Bit Error Rate, End-to-End Delay<br>Delay Jitter , Peak Duration             |

Για να γίνει καλύτερα κατανοητή αυτή η αλληλουχία μεταφράσεων των χαρακτηριστικών και παραμέτρων QoS στα διάφορα στρώματα [34], παρατίθεται ο Πίνακας 2.1. Σε αυτόν, φαίνονται ενδεικτικά κάποιες παράμετροι, οι οποίες καθορίζουν το QoS στα στρώματα εφαρμογής, κόμβων δικτύων και καναλιών δικτύων. Γενικά, οι παράμετροι που καθορίζουν το QoS είναι τα διάφορα μέτρα επίδοσης κατά μήκος των διεπαφών συστημάτων. Τέτοια μέτρα είναι, για παράδειγμα, το ποσοστό λαθεμένων bits, η πιθανότητα απώλειας πακέτων, η καθυστέρηση, η διασπορά της καθυστέρησης και η εγγύηση μιας δεδομένης τιμής καθυστέρησης, η οποία θέτει ένα άνω όριο στη μέγιστη διαφορά μεταξύ των καθυστερήσεων διαδοχικών πακέτων.

Αναφερόμενοι πάλι στο Σχήμα 2-14, παρατηρούμε ότι οι απαιτήσεις τόσο των χρηστών όσο και των εφαρμογών αντιστοιχίζονται σε ένα σύστημα επικοινωνιών που προσπαθεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των παραμετροποιήσιμων υπηρεσιών. Η παραμετροποίηση αυτή καθορίζεται από τα πρότυπα του ISO μέσα από την έννοια του QoS. Σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση της ποιότητας παίζει το QoS στο στρώμα δικτύου, το οποίο και καθορίζει τα χαρακτηριστικά της κίνησης και διαμορφώνει την επίδοση των δικτύων. Το σύνολο των παραμέτρων που επιλέγονται για να περιγράψουν μια υπηρεσία καθορίζει και το τι θα μετρηθεί ως QoS για την υπηρεσία αυτή.

Οι παράμετροι QoS που αφορούν τα δίκτυα περιγράφουν τις απαιτήσεις για τις δικτυακές υπηρεσίες και μπορούν να προδιαγραφούν σε σχέση με:

- ❑ Το φορτίο δικτύου, που χαρακτηρίζεται από τον μέσο ή ελάχιστο χρόνο μεταξύ της αποστολής διαδοχικών πακέτων κατά τη σύνδεση, το μέγεθος των πακέτων και το ρυθμό εξυπηρέτησης σε ένα κόμβο του δικτύου.
- ❑ Την επίδοση του δικτύου, που περιγράφει τις απαιτήσεις που πρέπει να εγγυηθούν για τις δικτυακές υπηρεσίες. Η επίδοση αυτή μπορεί να εκφραστεί μέσω της από άκρο σε άκρο καθυστέρησης και του ποσοστού απώλειας πακέτων της συγκεκριμένης σύνδεσης.

Οι πολυμεσικές υπηρεσίες, γενικά, χωρίζονται σε υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου. Οι πολυμεσικές υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, όπως η μεταφορά βίντεο και φωνής,

είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση, ενώ οι πολυμεσικές υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, όπως η μεταφορά αρχείων και εν γένει πακέτων TCP, είναι ανεκτικές σε μεγάλες καθυστερήσεις. Ο Πίνακας 2.2 καταγράφει ένα σύνολο από πολυμεσικές υπηρεσίες και τις αντίστοιχες κατατάξεις τους σε κλάσεις χρηστών [35]. Επίσης, ο Πίνακας 2.2 παρουσιάζει ενδεικτικές τιμές παραμέτρων QoS για διάφορα είδη υπηρεσιών και εφαρμογών. Πιο σημαντικές είναι οι πραγματικού χρόνου πολυμεσικές εφαρμογές, οι οποίες και διακρίνονται από ευαισθησία στην προσφερόμενη ποιότητα.

**Πίνακας 2.2. Παράδειγμα εφαρμογών με QoS χαρακτηριστικά**

| Traffic Class | Bandwidth Requirement             | Average Bandwidth | Connection Duration  | Average Duration | Applications                         |
|---------------|-----------------------------------|-------------------|----------------------|------------------|--------------------------------------|
| Real Time     | 30 Kbps<br>(const bit rate)       |                   | 1-10 mins            | 3 mins           | Voice Service<br>Audio-phone         |
| Real Time     | 256 Kbps<br>(const bit rate)      |                   | 1-30 mins            | 5 mins           | Video-phone<br>Video-conference      |
| Real Time     | 1-6 Mbps (avg)<br>2-9 Mbps (peak) | 3 Mbps            | 5 mins to<br>5 hrs   | 10 mins          | Interactive Video<br>Video on Demand |
| Non-real Time | 5-20 Kbps                         | 10 Kbps           | 10-20 sec            | 30 sec           | E-mail, paging, fax                  |
| Non-real Time | 64-512 Kbps                       | 256 Kbps          | 30 sec - 10 hrs      | 3 mins           | Remote Login                         |
| Non-real Time | 1-10 Mbps                         | 5 Mbps            | 30 sec to<br>20 mins | 2 mins           | FTP,<br>Retrieval Service            |

Οι υπηρεσίες για δικτυακές εφαρμογές πολυμέσων απαιτούν την ανάθεση πόρων για να μπορέσουν να εκτελέσουν τις λειτουργίες τους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι πόροι που μοιράζονται μεταξύ της εφαρμογής, του ενδιαμέσου συστήματος και του δικτύου. Υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιηθούν κατά τη διάρκεια μιας μετάδοσης πολυμέσων:

- ❑ Περιορισμοί στο πεδίο του χρόνου, οι οποίοι περιλαμβάνουν τις καθυστερήσεις, τους χρόνους υπολογισμού, και τις καθυστερήσεις σηματοδότησης.
- ❑ Περιορισμοί στο πεδίο του χώρου, όπως οι ταμιευτήρες συστημάτων.
- ❑ Περιορισμοί στο πεδίο της συχνότητας, οι οποίοι είναι το εύρος ζώνης των δικτύων και των συστημάτων για τη μετάδοση δεδομένων.

Η καλύτερη χρησιμοποίηση πόρων σε ένα περιβάλλον δικτύων μπορεί να προκύψει αν αρχικά χαρακτηριστεί η κίνηση και έπειτα καθοριστούν οι παράμετροι, όπως το μέγεθος των ταμιευτήρων στους ενδιάμεσους κόμβους δικτύων και το εύρος ζώνης για τη μεγιστοποίηση της επίδοσης. Οι παράμετροι δικτύου για την ικανοποίηση ενός συγκεκριμένου QoS διευκρινίζονται από την άποψη του φορτίου του δικτύου και από την επίδοσή του. Το φορτίο δικτύων αναφέρεται στην τρέχουσα κατάσταση των τεχνικών χαρακτηριστικών κίνησης μιας ροής πληροφορίας, όπως είναι ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών αποστολών πακέτων (interarrival time). Η επίδοση του δικτύου περιγράφει τις απαιτήσεις που αυτό πρέπει να εγγυηθεί στην υπηρεσία, όσον αφορά στο εύρος ζώνης, την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση και τη μεταβολή (διασπορά)

της καθυστέρησης (jitter). Οι υπηρεσίες δικτύων εξαρτώνται από ένα πρότυπο κίνησης, όπως είναι η άφιξη των αιτήσεων για την εγκατάσταση μιας σύνδεσης και εκτελούνται σύμφωνα με τις παραμέτρους του προτύπου κίνησης, όπως είναι ο μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (εκφρασμένος σε αριθμό πακέτων ή bits ανά μονάδα χρόνου) και το μήκος της έκρηξης. Ως εκ τούτου, οι υπολογισμένες παράμετροι κίνησης εξαρτώνται από τις παραμέτρους των δικτύων και καθορίζονται στα SLA.

Είναι φανερό ότι η προσφερόμενη ποιότητα σε μία υπηρεσία μπορεί να διαστασιοποιηθεί, με βάση τις τιμές των παραμέτρων που έχουν ορισθεί σε κάθε στρώμα της αρχιτεκτονικής QoS ενός συστήματος. Έτσι, μπορεί να διαμορφωθεί το διάστημα τιμών για παραμέτρους, όπως ο ρυθμός μετάδοσης, η καθυστέρηση και οι απώλειες ή τα λάθη μετάδοσης, το οποίο είναι αποδεκτό σε μια εφαρμογή ή υπηρεσία. Αυτό έχει ουσιαστικά αναφερθεί και στον Πίνακα 2.2. Για παράδειγμα, η μεταβολή της καθυστέρησης είναι σημαντική για την ποιότητα της IP τηλεφωνίας, η οποία μπορεί να ανεχτεί ένα ορισμένο ποσοστό της απώλειας πακέτων χωρίς οποιαδήποτε υποβάθμιση της ποιότητας. Για τη μεταφορά αρχείων, η απώλεια είναι μια κρίσιμη παράμετρος QoS. Συνεπώς, η ποιότητα του ελέγχου των υπηρεσιών απαιτεί την κατανόηση των ποσοτικών παραμέτρων QoS σε κάθε ένα από τα στρώματα (εφαρμογής, συστήματος, δικτύου).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας καθορίζεται από τα QoS χαρακτηριστικά της. Στο εξής, τα χαρακτηριστικά αυτά θα διακρίνονται στις δύο προαναφερθείσες κατηγορίες, δηλαδή την κατηγορία των εξαρτημένων από την εφαρμογή και το δίκτυο παραμέτρων ή των τεχνολογικής φύσης QoS χαρακτηριστικών και την κατηγορία των ανεξάρτητων από εφαρμογή και το δίκτυο παραμέτρων ή των QoS χαρακτηριστικών του τελικού χρήστη [36][37]. Οι δύο αυτές κατηγορίες αναλύονται στη συνέχεια και παρατίθενται τα χαρακτηριστικά τους.

Τα τεχνολογικής φύσης QoS χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα:

- Καθυστέρηση: είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάδοση δεδομένων από τον πομπό στο δέκτη.
- Λανθάνουσα κατάσταση (Latency). Γενικά, είναι ο χρόνος μεταξύ της αποστολής ενός μηνύματος από ένα κόμβο και της παραλαβής του μηνύματος από έναν άλλο κόμβο. Αυτή η παράμετρος καλύπτει την καθυστέρηση κατά τη μετάδοση μέσα από ένα τηλεπικοινωνιακό κανάλι και την καθυστέρηση σε μια συσκευή δικτύου κατά τη μετάδοση. Επίσης, η παράμετρος αυτή αναφέρεται ως καθυστέρηση διάδοσης. Είναι μέρος της καθυστέρησης που αναφέρθηκε παραπάνω.
- Χρόνος αντίδρασης: είναι ο χρόνος πλήρους διαδρομής, ο οποίος είναι το άθροισμα του χρόνου που απαιτείται για τη μετάδοση δεδομένων από τον πομπό στο δέκτη και του χρόνου που απαιτείται για να φτάσει η απάντηση πίσω στον πομπό.
- Διασπορά της καθυστέρησης (Jitter). Είναι μια παρέκκλιση που εμφανίζεται όταν μεταδίδεται μια υπηρεσία πάνω από ένα δίκτυο και αφορά στην υφιστάμενη καθυστέρηση.

Στα δίκτυα μεταγωγής πακέτων, το jitter είναι μια διαστρέβλωση του χρόνου άφιξης των διαδοχικών πακέτων έναντι του αντίστοιχου χρόνου της αρχικής μετάδοσης. Αυτή η διαστρέβλωση είναι ιδιαίτερα καταστρεπτική στην κίνηση πολυμέσων.

- ❑ Εύρος ζώνης. Είναι ένα μέτρο της ικανότητας μετάδοσης δεδομένων πάνω από ένα συγκεκριμένο δίκτυο, που εκφράζεται συνήθως σε kilobits ανά δευτερόλεπτο (kbps) ή megabits ανά δευτερόλεπτο (Mbps). Το εύρος ζώνης δείχνει τη θεωρητικά μέγιστη ικανότητα του δικτύου να υποστηρίξει μία ή πολλαπλές συνδέσεις. Μπορεί περαιτέρω να αναλυθεί σε:
  - Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων συστήματος: είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος ρυθμός για τη σωστή μετάδοση δεδομένων σε επίπεδο συστήματος (σε bits/bytes per second).
  - Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων εφαρμογής: είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος ρυθμός για τη σωστή μετάδοση δεδομένων σε επίπεδο εφαρμογής. Η παράμετρος αυτή εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και μπορεί να συνοδεύει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων συστήματος ή ακόμα και να τον υποκαθιστά.
- ❑ Ρυθμός απώλειας δεδομένων: είναι ο ανεκτός ρυθμός δεδομένων που χάνονται κατά τη μετάδοση των πακέτων IP προς τον κόμβο προορισμού.
- ❑ Αξιοπιστία: είναι ένα μέτρο της αξιοπιστίας του συστήματος. Η αξιοπιστία μπορεί να αφορά στο χρόνο λειτουργίας του συστήματος, πέρα από τον οποίο μπορεί να παρουσιαστεί μια αποτυχία στην επικοινωνία ή στο χρόνο που χρειάζεται το σύστημα για να ανακάμψει από μία αποτυχία.

Τα QoS χαρακτηριστικά που αναφέρονται στον τελικό χρήστη είναι:

- ❑ Προτεραιότητα: είναι ένα μέτρο της διαφοροποίησης των χρηστών όσον αφορά τη σπουδαιότητά τους στη διατήρησή τους στο σύστημα.
- ❑ Λαμβανόμενη ποιότητα υπηρεσίας: είναι ένα μέτρο της υποκειμενικότητας του χρήστη στη λήψη της υπηρεσίας. Το χαρακτηριστικό αυτό μπορεί να διαιρεθεί σε πολλές παραμέτρους, ανάλογα με το είδος της προσφερόμενης υπηρεσίας.
- ❑ Κόστος: εκφράζει το μέγιστο κόστος, το οποίο ο χρήστης είναι διατεθειμένος να πληρώσει για τη λήψη μίας υπηρεσίας.
- ❑ Ασφάλεια: είναι ένα μέτρο της ασφάλειας στην επικοινωνία του χρήστη με το σύστημα, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει την εμπιστευτικότητα και την ακεραιότητα στη μετάδοση δεδομένων.

### **2.7.2. Βασικοί μηχανισμοί QoS**

Για την εξασφάλιση των QoS χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.7.1 κατά την επικοινωνία και μετάδοση μιας υπηρεσίας είναι απαραίτητη η ύπαρξη μηχανισμών που θα

διαχειρίζονται αυτά τα χαρακτηριστικά. Οι μηχανισμοί αυτοί ελέγχουν και εποπτεύουν τις ιδιότητες των προσφερόμενων υπηρεσιών και ενεργοποιούν τους κατάλληλους μηχανισμούς όποτε αυτό κρίνεται αναγκαίο.

Οι μηχανισμοί για την εξασφάλιση και τη διαχείριση του QoS των υπηρεσιών πρέπει να έχουν τμήματα που να ικανοποιούν τις ακόλουθες λειτουργίες [38][39]:

- Έλεγχος αποδοχής: Το τμήμα ελέγχου αποδοχής πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τα αιτήματα διαφύλαξης των απαιτούμενων πόρων και την ικανότητα ενός δικτύου να ανταποκριθεί σε ένα νέο αίτημα εγκατάστασης μιας υπηρεσίας με συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS [40]. Έτσι, ο έλεγχος αποδοχής καθορίζει εάν μια ζητούμενη υπηρεσία επιτρέπεται να μεταφερθεί από το δίκτυο. Οι κύριες παράμετροι που συμβάλουν στην απόφαση είναι το τρέχον φορτίο κίνησης, το πραγματικό QoS που επιτυγχάνεται, το ζητούμενο σχεδιάγραμμα της κίνησης, το ζητούμενο QoS, η τιμή κόστους μετάδοσης της κίνησης πάνω από το δίκτυο και άλλες επιμέρους πολιτικές.
- Σχεδιασμός Πόρων: Το τμήμα σχεδιασμού των πόρων πρέπει να κατανέμει τους δικτυακούς πόρους, ανάλογα με τις απαιτήσεις ποιότητας των ζητούμενων υπηρεσιών. Αυτό απαιτεί τον σαφή καθορισμό του απαιτούμενου QoS από την πλευρά του χρήστη.
- Οικονομική διαχείριση πόρων: Το τμήμα της οικονομικής διαχείρισης των πόρων μεριμνάει για να παρασχεθούν οι πόροι ενός δικτύου, με γνώμονα την αύξηση του κέρδους του Παρόχου. Η κατάλληλη διαχείριση των πόρων μπορεί να αποτελέσει μια οικονομικά αποδοτική λύση, αν εξασφαλιστεί ότι οι εφαρμογές θα λαμβάνουν το προαποφασισμένο επίπεδο ποιότητας με το καλύτερο δυνατό κόστος.
- Διαμόρφωση και ρύθμιση κίνησης. Στα δίκτυα IP, είναι απαραίτητο να διευκρινιστεί το σχεδιάγραμμα κίνησης για μια σύνδεση, ώστε να αποφασιστεί ο καταλληλότερος τρόπος διάθεσης των δικτυακών πόρων. Ένας τέτοιος μηχανισμός εξασφαλίζει ότι η εισερχόμενη σε ένα κόμβο κίνηση εμμένει στο σχεδιάγραμμα που διευκρινίζεται γι' αυτήν. Χαρακτηριστικά, αυτός ο μηχανισμός χρησιμοποιείται για να μειώσει την εκρηκτικότητα μιας ροής κίνησης, η οποία περιλαμβάνει την απώλεια κίνησης και τη διαμόρφωση της καθυστέρησης.
- Χαρακτηρισμός και ταξινόμηση των πακέτων. Είτε ως αποτέλεσμα ενός μηχανισμού ελέγχου κυκλοφορίας είτε μιας εθελοντικής διάκρισης, ένα πακέτο μπορεί να σχολιαστεί για μια ιδιαίτερη μεταχείριση QoS στο δίκτυο (π.χ., υψηλή/ χαμηλή προτεραιότητα απώλειας /καθυστέρησης). Επίσης, προκειμένου να παρασχεθεί το ζητούμενο QoS, τα πακέτα μπορούν να ταξινομηθούν, ώστε να επιτραπεί η διαφορετική μεταχείριση, όσον αφορά το QoS.
- Προτεραιότητα και μηχανισμοί προγραμματισμού. Η ικανοποίηση των αναγκών σε QoS των διαφορετικών χρηστών είναι εφικτή μέσω μηχανισμών προτεραιότητας και προγραμματισμού. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα της προτεραιότητας αναφέρεται στην ικανότητα παροχής διαφορετικής μεταχείρισης στην καθυστέρηση, π.χ., τα πακέτα υψηλής

προτεραιότητας εξυπηρετούνται πάντα πριν από τα χαμηλότερης προτεραιότητας. Οι κόμβοι εφαρμόζουν, επίσης, διαφορετική μεταχείριση στην προτεραιότητα απώλειας, δηλαδή τα πακέτα υψηλής προτεραιότητας απώλειας χάνονται λιγότερο συχνά από τα αντίστοιχα χαμηλότερης προτεραιότητας απώλειας. Παραδείγματα τέτοιων μηχανισμών περιλαμβάνουν τους Generalized Processor Sharing (GPS), Weighted Round Robin (WRR), Weighted Fair Queueing (WFQ) και Class Based Queueing (CBQ). Η αποδοτική εφαρμογή αυτών των μηχανισμών απαιτεί την επέκτασή τους, ώστε να περιλαμβάνουν τις ανάγκες καθυστέρησης και εύρους ζώνης ταυτόχρονα, αλλά και τον ιεραρχικό προγραμματισμό.

- Πρωτόκολλα σηματοδότησης. Οι μηχανισμοί παροχής πρωτοκόλλων σηματοδότησης για την υποστήριξη της ποιότητας υπηρεσιών έχουν προσδιοριστεί για δίκτυα προσανατολισμένα σε σύνδεση (connection-oriented) και περιλαμβάνουν την επισήμανση προς το δίκτυο για την εγκατάσταση συνδέσεων με QoS απαιτήσεις. Στα χωρίς σύνδεση δίκτυα (connectionless), όπως το IP, αυτό επιτυγχάνεται με πρωτόκολλα, όπως το RSVP και το Πρωτόκολλο διανομής ετικετών (LDP).
- Ουρές αναμονής. Μερικά στοιχεία δικτύων επιτρέπουν τους αλγορίθμους δίκαιης αναμονής, ώστε μια εφαρμογή με εχθρική συμπεριφορά (π.χ. συνεχίζει να στέλνει κατά τη διάρκεια των χρόνων συμφόρησης) δε θα τιμωρήσει άλλη ή ο μέσος όρος των χαμένων πακέτων διανέμεται ομοιόμορφα στις διάφορες ροές. Βασικά, αυτοί οι μηχανισμοί καθορίζουν τον τρόπο απόρριψης πακέτων, όταν εμφανίζεται συμφόρηση σε έναν κόμβο δικτύου.
- Έλεγχος συμφόρησης. Το τμήμα ελέγχου της συμφόρησης λειτουργεί για την αποφυγή ανεπιθύμητων απωλειών μέσα σε μια περιοχή λόγω υπέρβασης της διαθέσιμης χωρητικότητας ενός δικτύου. Σκοπός του είναι η ανίχνευση και ο αποκλεισμός εκείνων των εφαρμογών ή υπηρεσιών που παραβιάζουν τα προσυμφωνημένα επίπεδα ποιότητας και, με αυτόν τον τρόπο, προκαλούν την επιδείνωση του QoS άλλων εφαρμογών. Επίσης, τέτοιοι μηχανισμοί φροντίζουν για την ανάκαμψη των δικτύων μετά από περιόδους συμφόρησης. Έτσι, για να λειτουργήσουν τα δίκτυα QoS IP με σταθερό και αποδοτικό τρόπο, είναι ουσιαστικό ότι έχουν βιώσιμους και γερούς μηχανισμούς ελέγχου συμφόρησης. Η τυχαία έγκαιρη ανίχνευση (Random Early Detection-RED) και η ρητή ανακοίνωση συμφόρησης (Explicit Congestion Notification ECN) είναι δύο από τις προτεινόμενες στη βιβλιογραφία λύσεις του ελέγχου συμφόρησης.

Με βάση αυτές τις γενικές απαιτήσεις λειτουργιών, οι μηχανισμοί για τη διαχείριση των QoS χαρακτηριστικών που έχουν περιγραφεί μέχρι σήμερα διακρίνονται σε στατικούς και δυναμικούς [37]. Οι στατικοί μηχανισμοί διαχείρισης επιφορτίζονται με τις ακόλουθες επιμέρους λειτουργίες:

- Προδιαγραφή: είναι ο καθορισμός των απαιτήσεων των QoS χαρακτηριστικών
- Διαπραγμάτευση: είναι η διαδικασία για την επίτευξη μια συμφωνηθείσας προδιαγραφής μεταξύ όλων των συμβαλλόμενων μερών.

- ❑ Έλεγχος αποδοχής: είναι η σύγκριση των απαιτούμενων QoS χαρακτηριστικών και της ικανότητας να ικανοποιηθούν αυτές οι απαιτήσεις.
- ❑ Δέσμευση πόρων: είναι η λειτουργία της κατανομής των πόρων σε συνδέσεις.

Από την άλλη μεριά, οι δυναμικοί μηχανισμοί διαχείρισης εκτελούν τις ακόλουθες επιμέρους λειτουργίες:

- ❑ Παρακολούθηση: είναι η λειτουργία της μέτρησης των πραγματικών τιμών των QoS χαρακτηριστικών που παρέχονται από το σύστημα για την υποστήριξη της υπηρεσίας.
- ❑ Αστυνόμευση: η λειτουργία της εξασφάλισης ότι όλα τα συμβαλλόμενα μέρη τηρούν τα συμβόλαια.
- ❑ Επαναδιαπραγμάτευση: είναι η λειτουργία της επαναδιαπραγμάτευσης ενός συμβολαίου.
- ❑ Συντήρηση: Τροποποίηση των παραμέτρων από το σύστημα για να διατηρηθεί το απαιτούμενο QoS. Οι εφαρμογές δεν απαιτείται να τροποποιήσουν την συμπεριφορά τους.
- ❑ Προσαρμογή: οι εφαρμογές προσαρμόζονται στις αλλαγές του QoS που μπορεί να παρέχει το σύστημα, ενδεχομένως μετά από επαναδιαπραγμάτευση.
- ❑ Συγχρονισμός: η λειτουργία αυτή συνδυάζει δύο ή περισσότερες ροές με τους χρονικούς περιορισμούς για QoS μεταξύ τους.

### **2.7.3. Πρότυπα QoS αρχιτεκτονικής**

Η παράγραφος αυτή περιγράφει κάποια πρότυπα QoS αρχιτεκτονικών, τα οποία έχουν οριστεί και λειτουργούν στα ενσύρματα δίκτυα. Κάποιες από αυτές τις αρχιτεκτονικές έχουν, ήδη, προταθεί να κυριαρχήσουν ως το βασικό πρότυπο αρχιτεκτονικής για την παροχή QoS και στα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης. Καθένα από τα πρότυπα που περιγράφονται εδώ παρουσιάζει πλεονεκτήματα και αδυναμίες.

Τα πρότυπα QoS αρχιτεκτονικών που έχουν ορισθεί μέχρι σήμερα είναι:

- Παροχή πέρα από την κανονική. Μια προφανής λύση για να χειριστεί κανείς τις περιόδους αιχμών μιας κίνησης είναι η παροχή περισσότερων πόρων από το δίκτυο, για να παρέχεται η δυνατότητα κάλυψης αυτών των αναμενόμενων περιόδων αιχμής. Είναι, όμως, προφανές ότι αυτό δεν είναι οικονομικά βιώσιμο, καθώς ο χρόνος και η περιοχή δικτύου εμφάνισης τέτοιων φαινομένων είναι δύσκολο να προβλεφθούν.
- Βασισμένο στη δέσμευση - Ενσωματωμένη αρχιτεκτονική υπηρεσιών (Integrated Services Architecture -IntServ). Η ενσωματωμένη αρχιτεκτονική υπηρεσιών που καθορίζεται από τον οργανισμό IETF [10] προορίζεται στη μετάβαση του Διαδικτύου σε μια γερή υποδομή επικοινωνιών με ενσωματωμένες υπηρεσίες που μπορεί να υποστηρίξει την μεταφορά όλων των ειδών κίνησης (ακουστικής, τηλεοπτικής, σε πραγματικό χρόνο, και κλασσικής κίνησης). Οι πόροι δικτύων διανέμονται σύμφωνα με το αίτημα QoS μιας εφαρμογής, και



υπαγόμενοι στην πολιτική διαχείρισης του εύρους ζώνης του δικτύου. Το πρωτόκολλο RSVP (Resource Reservation Protocol) παρέχει τους μηχανισμούς για την υποστήριξη της αρχιτεκτονικής αυτής.

- Καθορισμός προτεραιοτήτων (με λιγότερη δέσμευση) - Πλαίσιο διαφοροποιημένων υπηρεσιών (Differentiated Services framework-DiffServ). Το πλαίσιο διαφοροποιημένων υπηρεσιών, που επίσης καθορίζεται από τον IETF, προορίζεται να ικανοποιήσει την ανάγκη για σχετικά απλές μεθόδους παροχής διαφοροποιημένων κατηγοριών υπηρεσίας στο Διαδίκτυο, με υποστήριξη διαφόρων τύπων εφαρμογών και συγκεκριμένες επιχειρησιακές απαιτήσεις. Η προσέγγιση αυτή στην παροχή της ποιότητας μιας υπηρεσίας στα δίκτυα υιοθετεί ένα μικρό, καθορισμένο με σαφήνεια, σύνολο δομικών μονάδων, από τις οποίες ποικίλες υπηρεσίες μπορούν να χτιστούν. Ένα μικρό δομικό στοιχείο μέσα σε κάθε πακέτο (όπως το TOS στο IPv4 στοιχείο ή η κατηγορία κίνησης στο IPv6 στοιχείο), χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει ένα πακέτο, ώστε να λάβει μια ιδιαίτερη μεταχείριση κατά την αποστολή σε κάθε κόμβο δικτύου. Η κίνηση δικτύου είναι ταξινομημένη και το πλαίσιο διαφοροποιημένων υπηρεσιών παρέχει τη υπηρεσία για την προνομιακή μεταχείριση των εφαρμογών, που προσδιορίζονται να έχουν τις πιο μεγάλες απαιτήσεις.

#### 2.7.4. Παράμετροι Αξιολόγησης των Μηχανισμών Παροχής Ποιότητας Υπηρεσίας

Το κίνητρο πίσω από την υιοθέτηση της διαλειτουργικότητας των ασύρματων δικτύων είναι η, προς το παρόν, έλλειψη ενός συστήματος, το οποίο θα μπορέσει να συγκεντρώσει όλες τις αντικρουόμενες απαιτήσεις, δηλαδή εκτεταμένη ασύρματη κάλυψη, χαμηλό κόστος, υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και χαμηλούς χρόνους καθυστέρησης μετάδοσης. Τα υπάρχοντα συστήματα μπορούν εν μέρει να εξυπηρετήσουν αυτές τις γενικές απαιτήσεις. Έτσι, τα δίκτυα τοπικής και προσωπικής κάλυψης, WLAN και WPAN αντίστοιχα, προσφέρουν υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων σε χαμηλό κόστος, αλλά έχουν περιορισμένη ακτίνα εμβέλειας. Από την άλλη, τα ευρείας κλίμακας κυτταρικά ή δορυφορικά δίκτυα δεν μπορούν να εξασφαλίσουν τους απαιτούμενους ρυθμούς μετάδοσης σε προσιτές τιμές κόστους.

Συνεπώς, η υπάρχουσα προοπτική για την καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων είναι η αποτελεσματική διαχείριση ενός συστήματος, που αποτελεί συνονθύλευμα των υπαρχόντων δικτύων, αλλά ταυτόχρονα επιτρέπει την ενοποίηση των μελλοντικών ασύρματων τεχνολογιών πρόσβασης. Οι πρωταρχικοί στόχοι που οφείλει να εκπληρώσει αυτό το σύστημα ενιαίας διαχείρισης πόρων διακρίνονται σε κατηγορίες, ανάλογα με το ασύρματο περιβάλλον, και συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- ❑ Ομοιογενή Περιβάλλοντα. Σε τέτοια περιβάλλοντα, είναι απαραίτητη η επίτευξη οριζόντιας μεταγωγής, δηλαδή η μετατόπιση των χρηστών ανάμεσα στα λειτουργικά στοιχεία δικτύων της ίδιας υποδομής. Προς τον σκοπό αυτό απαιτείται η υλοποίηση αλγορίθμων που θα υποστηρίζουν την κινητικότητα των χρηστών σε τέτοιου είδους δίκτυα. Σημαντική, σε αυτό το σημείο, είναι η συνεισφορά των χαμηλών στρωμάτων της αρχιτεκτονικής των δικτύων.

- ❑ Ανομοιογενή Περιβάλλοντα. Εδώ, οι απαιτήσεις είναι αυξημένες, δεδομένου ότι οι αλγόριθμοι υποστήριξης της κατακόρυφης μεταγωγής θα πρέπει να λάβουν υπόψη τους την κινητικότητα των χρηστών σε δίκτυα διαφορετικής υποδομής. Συνεπώς, απαιτείται η υλοποίηση μηχανισμών που θα είναι ανεξάρτητη από τη δικτυακή τεχνολογία και, συνάμα, θα συνεργάζονται άσπαρα με αυτήν. Ένα παράδειγμα τέτοιου μηχανισμού είναι το Mobile IP, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.2.6.

Οι μηχανισμοί για την επίτευξη της οριζόντιας μεταγωγής έχουν λίγο ως πολύ καθοριστεί και τυποποιηθεί. Εκείνο που απομένει είναι η αποτίμηση των μηχανισμών της κατακόρυφης μεταγωγής. Το ενιαίο σύστημα διαχείρισης πόρων και υπηρεσιών θα πρέπει να είναι ανεξάρτητο από τις δικτυακές τεχνολογίες και οι διαδικασίες μεταγωγής αδιαφανής προς το επίπεδο δικτύου.

Η αρχιτεκτονική ενός τέτοιου συστήματος βασίζεται σε ένα ιεραρχικά δομημένο σύστημα, το οποίο περιγράφηκε στην παράγραφο 2.3 και που επιτρέπει τη μετατόπιση των ασύρματων χρηστών από το ένα δίκτυο στο άλλο. Πέρα από τα θέματα κινητικότητας χρηστών, ένα βασικό κομμάτι έρευνας σε ένα τέτοιο ενιαίο σύστημα είναι η καλύτερη διαχείριση των διαθέσιμων ασύρματων πόρων (Radio Resource Management - RRM) σε συνδυασμό με βελτιωμένους μηχανισμούς παροχής ποιότητας υπηρεσιών. Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, εστιάζουμε σε μηχανισμούς παροχής QoS μέσω του ελέγχου αποδοχής των ζητούμενων υπηρεσιών. Στη συνέχεια, θα επιχειρηθεί να αναγνωριστούν εκείνες οι παράμετροι, οι οποίες είναι καθοριστικές στη διαμόρφωση μιας εικόνας του ενιαίου συστήματος διαχείρισης και στην αξιολόγηση της επίδοσης του.

Μέσα από τους μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής υπηρεσιών, θα πρέπει να ικανοποιηθεί η γενική απαίτηση της σύγχρονης εποχής των τηλεπικοινωνιών για παροχή ποιότητας υπηρεσίας από άκρη σε άκρη. Ένας τέτοιος μηχανισμός οφείλει να επιτρέπει δυναμικά την τροποποίηση των επιπέδων ποιότητας μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας ανάλογα με τις προδιαγραφές του δικτύου πρόσβασης. Ο έλεγχος της ποιότητας είναι, γενικά, μια σύνθετη λειτουργία διαχείρισης και εκτεταμένες μελέτες πάνω στο θέμα αυτό έχουν πραγματοποιηθεί κατά καιρούς. Οι πλέον βασικές παράμετροι, σε σχέση με το σύνολο που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.7.1, που επιτρέπουν την αξιολόγηση των μηχανισμών παροχής ποιότητας είναι οι ακόλουθοι:

- ❑ Καθυστέρηση μετάδοσης πακέτου
- ❑ Απώλεια πακέτων
- ❑ Ρυθμός μετάδοσης πακέτων
- ❑ Ποσοστό εύρους ζώνης για σηματοδότηση

Επίσης, κάποιες επιπλέον παράμετροι μας επιτρέπουν μια πιο ολοκληρωμένη, από κάθε άποψη, αξιολόγηση του συστήματος και εντάσσονται στις απαιτήσεις κοινής ωφέλειας των χρηστών. Αυτές είναι:

- ❑ Η κατανάλωση ισχύος των τερματικών συσκευών και των στοιχείων του εκάστοτε δικτύου.

- ❑ Το κόστος επιβάρυνσης του χρήστη για την παροχή μιας υπηρεσίας σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας. Η παράμετρος αυτή συνδέεται με την οικονομική αποτίμηση της τηλεπικοινωνιακής αγοράς και το βαθμό απορρόφησης των νέων τεχνολογιών από το κοινωνικό γίγνεσθαι.

## 2.8. Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, αναφέραμε τις βασικές δραστηριότητες της επιστημονικής κοινότητας σχετικά με το μέλλον των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Συγκεκριμένα, περιγράψαμε τις τάσεις που σήμερα επικρατούν σχετικά με τις προσπάθειες ενοποίησης των συστημάτων B3G και την επίτευξη της διαλειτουργικότητάς τους. Η απαίτηση για παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών παντού και πάντα επιτρέπει την άνθιση των συστημάτων Τέταρτης Γενιάς, τα οποία έρχονται να συμπληρώσουν τις αρχικές προσπάθειες συνεργασίας των συστημάτων B3G.

Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό περιγράφηκε η γενική αρχιτεκτονική ενός σύνθετου περιβάλλοντος ασύρματης πρόσβασης, το οποίο αποτελεί το μοντέλο των 4G συστημάτων. Έμφαση δόθηκε στα επιμέρους στοιχεία που απαιτούνται για την επίτευξη αυτής της αρχιτεκτονικής και περιγράφηκαν αναλυτικά οι απαιτήσεις και προδιαγραφές σχεδίασης και υλοποίησης τέτοιων συστημάτων. Η γενική δομή της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής οδήγησε στον καθορισμό ενός σύγχρονου επιχειρηματικού μοντέλου, μαζί με όλες τις απαιτούμενες επιχειρηματικές οντότητες. Παράλληλα, έγινε μια εισαγωγή στην έννοια των Μεσιτών, τα οποία μεσολαβούν μεταξύ των βασικών επιχειρηματικών οντοτήτων, ώστε να ρυθμίσουν πιο αποτελεσματικά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους.

Το κεφάλαιο ολοκληρώθηκε με τον ορισμό της έννοιας της Ποιότητας μίας Υπηρεσίας, η οποία αναλύθηκε διεξοδικά, καθώς αποτελεί τη μεγαλύτερη πρόκληση των μελλοντικών ασύρματων δικτύων. Επίσης, περιγράφηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά της ποιότητας υπηρεσιών, όσο και οι διάφορες διαδικασίες υλοποίησης και υποστήριξης της ποιότητας υπηρεσιών στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

## 2.9. Αναφορές

- [1] W. Kellerer, M. Wagner, R. Hirschfeld, J. Noll, B. Berg, S. Svaet, J. Ferreira, O. Karasti, T. Hodgkinson, R. Giaffreda, S. Fallis, J. C. Francis and C. Fischer “The operators’ vision of systems beyond 3G Operators’ key drivers for systems beyond 3G”, Eurescom Participants in Project P1203, May 2003.
- [2] A. Bria, F. Gessler, O. Queseth, R. Stridh, M. Unbehaun, J. Wu and J. Zander, “4th-Generation Wireless Infrastructures: Scenarios and Research Challenges”, IEEE Personal Communications, December 2001, pp. 25-31.
- [3] Sudhir Dixit and Ramjee Prasad, “Wireless IP and Building the Mobile Internet”, Artech House, 2003, ISBN: 1-58053-354-X.

- [4] Y. Kim, B. Jang Jeong, J. Chung, Chan-Soo Hwang, J. S. Ryu, Ki-Ho Kim, and Y. Kyun Kim, “Beyond 3G: Vision, Requirements, and Enabling Technologies”, IEEE Communications Magazine, March 2003, pp. 120-124.
- [5] E. Gustafsson and A. Jonsson, “Always Best Connected”, IEEE Wireless Communications, February 2003, pp. 49-55.
- [6] S. Yu Hui and K. Hau Yeung, “Challenges in the Migration to 4G Mobile Systems”, IEEE Communications Magazine, December 2003, pp. 54-59.
- [7] IST project CREDO (Composite Radio and Enhanced service Delivery for the Olympics) Web site, [credo.nal.motlabs.com](http://credo.nal.motlabs.com), January 2002.
- [8] 3GPP, “Feasibility study on 3GPP system to Wireless Local Area Network (WLAN) interworking”, TR 22.934 v1.0.0, February 2002.
- [9] A. Salkintzis, C. Fors and R. Pazhyannur, “WLAN-GPRS integration for next-generation mobile data networks”, IEEE Wireless Communications, pp. 112-124, October 2002.
- [10] The Internet Engineering Task Force (IETF) web site: [www.ietf.org](http://www.ietf.org)
- [11] C.E. Perkins “Mobile IP”, IEEE Communications Magazine, 50<sup>th</sup> Anniversary Issue, pp. 66-83, May 2002.
- [12] Henrik Levkowetz, Sami Vaarala, “Mobile IP NAT/NAPT Traversal using UDP Tunnelling”, Internet-Draft (draft-ietf-mobileip-nat-traversal-07.txt), November 2002.
- [13] Shingo Ohmori, Yasushi Yamao and Nobuo Nakajima, “The Future Generations of Mobile Communications Based on Broadband Access Technologies”, IEEE Communications Magazine, December 2000, pp. 134-142.
- [14] IST-2001-32620 MATRICE Project, Deliverable 7.1, “Synthesis Report on worldwide research on 4G systems”, September 2003.
- [15] Sanjay Shakkottai and Theodore S. Rappaport, “Research Challenges in Wireless Networks: A Technical Overview”, invited presentation, International Symposium of Wireless Personal Multimedia Communications Proceedings, Honolulu, HI, October 27 – 30, 2002
- [16] Robert Berezdivin, Robert Breinig, and Randy Topp, Raytheon, “Next-Generation Wireless Communications Concepts and Technologies”, IEEE Communications Magazine, March 2002, pp.108-116.
- [17] IST project SHUFFLE (An agent based approach to controlling resources in UMTS) Web site, [www.ist-shuffle.org](http://www.ist-shuffle.org), January 2001.
- [18] IST project ADAMANT (Airport Decision And MAnagement NeTwork), Annex 1 “Description of work”, April 2002.

- [19] Thor Gunnar Eskedal, Rima Venturin, Irena Grgic, Ragnar Andreassen, AS Charles Francis, Christian Fischer, Marc Danzeisen, “The operators’ vision on systems beyond 3G:Business modelling for systems B3G”, Eurescom Participants in Project P1203, May 2003.
- [20] Andy Johnston, Åke Gustafsson, Anders Eriksson and Mike Slssingar, “The service network framework—An architectural blueprint for the service network”, Ericsson Review No. 1, 2003.
- [21] Y. Wang, L. Cuthbert, Francis J. Mullany, P. Stathopoulos, V. Tountopoulos, D.A. Sotiriou, N. Mitrou and M. Senis, “Exploring Agent-Based Wireless Business Models and Decision-Support Applications in an Airport Environment”, Journal of Telecommunications and Information Technology, National Institute of Telecommunications, Warsaw, 2004, pp. 57-64.
- [22] V. Tountopoulos, A.D. Sotiriou, N. Koutsouris, E. Solidakis, P. Kalliaras, V. Stavroulaki, D. Kouis, N. Mitrou, “Supporting wireless applications over a distributed, agent-based management system”, WSEAS Transactions on Communications, Vol. 3, Issue 2, April 2004, pp 545-550.
- [23] P. Kalliaras, A. D. Sotiriou, P. Stathopoulos, V. Tountopoulos, N. Mitrou, “A Security and Surveillance System For Mobile Users”, poster presentation in Proc. of IST Mobile & Wireless Telecommunications Summit 2004, Lyon, France, June 2004, pp 975-979.
- [24] D. Sotiriou , P. Kalliaras , P. Stathopoulos , V. Tountopoulos, N. Mitrou, “A Location-Based Multimedia Content Delivery System for Monitoring Purposes”, ICICT 2004 , December 2004, Cairo, Egypt, pp. 215-227.
- [25] Venieris, F. Zizza, Th. Magedanz, “Object Oriented Software Technologies in Telecommunications: From Theory to Practice”, Wiley, April 2000.
- [26] A. Tanenbaum, “Distributed Systems: Principles and Paradigms”, Prentice Hall, 2002, ISBN: 0-13-088893-1.
- [27] Frei, C., Faltings, B. (1997) ‘Intelligent Agents for Network Management’. AI for Network Management Systems 1997, IEE Digest No. 97/094.
- [28] Object Management Group (OMG) Web site: [www.omg.org](http://www.omg.org)
- [29] Bradshaw, J.M., Dutfield, S., Benoit, P. and Woolley, J.D. KAoS: Toward An Industrial-Strength Open Agent Architecture. In: Software Agents, J.M. Bradshaw (Ed.), Menlo Park, Calif., AAAI Press, 1997, pages 375-418
- [30] Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) Web site: <http://www.fipa.org/>
- [31] Zafer Sahinoglu and Sirin Tekinay, “ On Multimedia Networks: Self-Similar Traffic and Network Performance”, IEEE Communications Magazine, January 1999, pp. 48-52.

- [32] Rajiv Chakravorty, Ian Pratt, Jon Crowcroft and Maurizio D'Arienzo, "A Framework for Dynamic SLA-Based QoS Control for UMTS", IEEE Wireless Communications, October 2003, pp. 30-37.
- [33] Maurizio D'Arienzo, Antonio Pescape, and Giorgio Ventre, "Dynamic Service Management in Heterogeneous Networks", Journal of Network and Systems Management, Vol. 12, No. 3, September 2004, pp 349-370.
- [34] B. Bhargava, "Guest Editorial: Quality of Service in Multimedia Networks", Multimedia Tools and Applications an International Journal, July 2002, <http://raidlab.cs.purdue.edu/>
- [35] S. K. Das and M. Chatterjee, "Challenges in Wireless Multimedia Networks", Proceedings of the International Conference on Information Technology for the New Millennium (IConIT) 2001, pp 68-77.
- [36] Shin-Jer Yang and Hung-Cheng Chou, "Adaptive QoS parameters approach to modeling Internet performance", International Journal of Network Management, John Wiley & Sons, 2003, Vol. 13, pp. 69–82.
- [37] D. Chalmers and M. Sloman, "A Survey of Quality of Service in Mobile Computing Environments", IEEE Communications Surveys, <http://www.comsoc.org/pubs/surveys>, Second Quarter 1999, pp. 2-10.
- [38] M. Alam, R. Prasad and J. R. Farserotu, "Quality of Service among IP-Based Heterogeneous Networks", IEEE Personal Communications, December 2001, pp. 18-24.
- [39] Erik Weis, "Future Access Networks (FAN) - IP based access technologies and QoS", Eurescom Project Report, May 2003.
- [40] Edward W. Knightly and Ness B. Shroff, "Admission Control for Statistical QoS: Theory and Practice", IEEE Network, March 1999.

## Κεφάλαιο 3

# Προσδιορισμός Χωρητικότητας Ασύρματων Δικτύων

### 3.1. Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό επιχειρεί να δώσει τα βασικά χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στον προσδιορισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων, η οποία διατίθεται σε κάθε χρονική στιγμή για να εξυπηρετήσει τους χρήστες ενός ασύρματου συστήματος. Η γνώση της διαθέσιμης από το δίκτυο χωρητικότητας για την εξυπηρέτηση των προσφερόμενων υπηρεσιών βοηθά στην καλύτερη αξιοποίηση των μηχανισμών διαχείρισης του ραδιοφάσματος και του ελέγχου αποδοχής των εισερχόμενων ροών. Για το σκοπό αυτό, η προσέγγιση της χρονικά μεταβαλλόμενης διαθέσιμης χωρητικότητας του ασύρματου καναλιού είναι επιθυμητή όσο και απαραίτητη. Με τον όρο διαθέσιμη χωρητικότητα ή διέλευση δικτύου εννοούμε το ρυθμό εξυπηρέτησης (ή εύρος ζώνης) που μπορεί να επιτευχθεί από ένα ασύρματο δίκτυο, ώστε να εξυπηρετηθούν οι συνδέσεις κάτω ζεύξης (downlink). Η χωρητικότητα αυτή προκύπτει από την ονομαστική χωρητικότητα ενός ασύρματου δικτύου, αν ληφθεί υπόψη η χρησιμοποίηση του ασύρματου καναλιού.

Έτσι, το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει μία μελέτη της ονομαστικής χωρητικότητας των βασικών δικτύων ασύρματης πρόσβασης, σύμφωνα με τις προδιαγραφές αυτών των συστημάτων. Η συνεισφορά του κεφαλαίου στην εργασία αυτή είναι ότι περιγράφει έναν προτεινόμενο μηχανισμό για τον κατάλληλο προσδιορισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας, με βάση διάφορα προσεγγιστικά μοντέλα που έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία, όπως τα [1][2]. Ο μηχανισμός προσδιορισμού της διαθέσιμης χωρητικότητας της ασύρματης ζεύξης που παρουσιάζεται εδώ στηρίζεται στα αποτελέσματα των [3][4][5][6], σχετικά με την παρακολούθηση των κρίσιμων παραμέτρων του ασύρματου μέσου και την υλοποίηση ενός απλού Μαρκοβιανού μοντέλου, γνωστού σαν μοντέλο Gilbert Elliott, για την εύρεση της κατάλληλης τιμής διόρθωσης της ονομαστικής χωρητικότητας, που οφείλεται στην ποιότητα του ασύρματου καναλιού.

Η περιγραφή του κεφαλαίου ξεκινά με μία γενική ανάλυση για τον προσδιορισμό της ονομαστικής χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων. Αυτή στηρίζεται στα βασικά γνωρίσματα της θεωρίας μετάδοσης του σήματος πάνω από ένα ασύρματο κανάλι, το οποίο χαρακτηρίζεται

από την ύπαρξη απωλειών και αλλοιώσεων της ισχύος λόγω της εχθρότητας του ασύρματου περιβάλλοντος και την ύπαρξη θορύβου.

Στην συνέχεια, περιγράφεται η αρχιτεκτονική και τα βασικά χαρακτηριστικά μερικών ασύρματων δικτύων, όπως το GPRS και το WLAN, επειδή αυτή η τελευταία τεχνολογία αποτελεί το συνδετικό κρίκο στην ανάπτυξη των συστημάτων B3G και 4G για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας, ιδιαίτερα σε περιοχές υψηλής ζήτησης φορτίου. Μέσα από αυτήν την περιγραφή της αρχιτεκτονικής των δικτύων αυτών, δίνεται μία ιδέα της προσέγγισης της διαθέσιμης χωρητικότητας και των παραμέτρων που συμβάλλουν στη διαμόρφωσή της. Επίσης, το κεφάλαιο αυτό εστιάζει στο WLAN δίκτυο και περιγράφει ένα προσεγγιστικό μοντέλο για τον προσδιορισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας, ανάλογα με τον αριθμό των κινητών σταθμών που προσπαθούν να εγκαταστήσουν μία υπηρεσία.

Ανάλογα μοντέλα έχουν περιγραφεί κατά καιρούς και για άλλα ασύρματα δίκτυα. Όμως, τέτοια μοντέλα περιλαμβάνουν απλουστεύσεις και υποθέσεις σχετικά με τον υπολογισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας, οι οποίες αφορούν, κυρίως, στο θόρυβο του ασύρματου περιβάλλοντος. Έτσι, το κεφάλαιο αυτό συνοψίζει τις επιδράσεις τέτοιων χαρακτηριστικών στην κίνηση των ασύρματων δικτύων IP και ολοκληρώνεται με μία προτεινόμενη μέθοδο διόρθωσης της τρέχουσας διαθέσιμης χωρητικότητας. Η μέθοδος αυτή αφορά στην παρακολούθηση των παραμέτρων που συμβάλλουν στη διαμόρφωση της κατάστασης της ασύρματης κάτω ζεύξης και στον προσδιορισμό της τιμής της διαθέσιμης χωρητικότητας, με βάση το λόγο Σήματος προς Θόρυβο, το ρυθμό αποστολής λαθών και το ποσοστό των επαναμεταδόσεων που αντιλαμβάνεται το δίκτυο.

### **3.2. Χωρητικότητα Ασύρματων Δικτύων**

Η διαθέσιμη χωρητικότητα και η καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων αποτελούν δύο σημαντικές παραμέτρους για την αποτίμηση της επίδοσης ενός ασύρματου δικτύου. Ο στόχος είναι το δίκτυο να βελτιστοποιήσει την επίδοσή του, το οποίο μεταφράζεται στην επίτευξη της μέγιστης χωρητικότητας που μπορεί να διατεθεί στους χρήστες από τον κόμβο δικτύου με την χαμηλότερη καθυστέρηση μετάδοσης. Το πρόβλημα αυτό καθίσταται ακόμα πιο δύσκολο, καθώς αυξάνεται η ανομοιογένεια της προσφερόμενης κίνησης, δηλαδή όσο περισσότερα είδη υπηρεσιών καλείται να εξυπηρετήσει το δίκτυο. Επομένως, η επίλυση του προβλήματος συγκλίνει στην επίτευξη μιας υψηλής διέλευσης δικτύου με την καθυστέρηση μετάδοσης να διατηρείται κάτω από προκαθορισμένα επίπεδα.

Ένας αναλυτικός τύπος για τη διαθέσιμη χωρητικότητα περιλαμβάνει τόσο φαινόμενα παρεμβολής όσο και την χωροταξική κατανομή των τερματικών σταθμών μέσα στο δίκτυο. Είναι προφανές ότι η επιθυμητή ακρίβεια στην επίλυση θεωρητικών μοντέλων για τον υπολογισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας έχει κόστος σε υπολογιστική ισχύ και ταχύτητα. Συνεπώς, είναι θεμιτή η επιλογή ενός μοντέλου που θα προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματικότητα, σε ό,τι



αφορά τη χρονική μεταβολή των διαθέσιμων δικτυακών πόρων, και θα απαιτεί μικρό χρόνο εκτέλεσης των απαραίτητων υπολογισμών.

### 3.2.1. Εκτίμηση της χρησιμοποίησης ασύρματου καναλιού

Η διαθέσιμη χωρητικότητα των ασύρματων δικτύων αλλάζει δυναμικά λόγω του ότι μοιράζεται μεταξύ των χρηστών, εξασθενεί και επηρεάζεται από την κινητικότητα. Η μεταβολή αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον στις προσαρμοστικές εφαρμογές και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Η παράγραφος αυτή παρουσιάζει μια προσέγγιση για τον υπολογισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων, που βασίζεται στο λόγο Σήματος προς Θόρυβο (Signal to Noise Ratio - SNR) και έχει αναλυτικά παρουσιαστεί στο [3].

Οι πληροφορίες που αφορούν στην τρέχουσα τιμή του SNR σε μία δεδομένη χρονική στιγμή για να ένα συγκεκριμένο μονοπάτι σύνδεσης παρέχονται από τόσο από τις τερματικές συσκευές όσο και από τους δικτυακούς κόμβους [7]. Η ποιότητα μίας συγκεκριμένης ασύρματης ζεύξης μπορεί να επηρεάσει το ρυθμό αποστολής δεδομένων των υπολοίπων συνδέσεων στον συγκεκριμένο κόμβο δικτύου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας που μπορεί να δώσει το δίκτυο για την εξυπηρέτηση του συνόλου των χρηστών του. Η διαθέσιμη χωρητικότητα στις ασύρματες συνδέσεις αποτελεί το αποτελεσματικό εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο για τη μετάδοση δεδομένων προς όλους τους τερματικούς σταθμούς. Είναι η διέλευση που μπορεί να επιτευχθεί με βάση την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου αλλά και του περιβάλλοντος, που επηρεάζει σημαντικά την ασύρματη επικοινωνία. Η χωρητικότητα αυτή έχει ως άνω φράγμα την ονομαστική χωρητικότητα του δικτύου, η οποία μπορεί να επιτευχθεί μόνο θεωρητικά.

Η γνώση της συμπεριφοράς του ασύρματου καναλιού και η προσέγγιση της δυναμικής του είναι μια συχνά χρησιμοποιημένη τεχνική, η οποία επιτρέπει τη βελτίωση της απόδοσης των εφαρμογών και των πρωτοκόλλων επικοινωνίας στα ασύρματα περιβάλλοντα. Η γνώση της δυναμικής του ασύρματου εύρους ζώνης καθίσταται ακόμα πιο σημαντική για την αποδοτική εφαρμογή ενός ελέγχου αποδοχής υπηρεσιών. Η μέθοδος υπολογισμού της δυναμικής του ασύρματου καναλιού μέσω της απευθείας μέτρησης του SNR λαμβάνει υπόψη της και ένα σύνολο παραμέτρων, οι οποίες αυξάνουν την πολυπλοκότητα ενός αναλυτικού μοντέλου για την ασύρματη διαθέσιμη χωρητικότητα. Τέτοιες παράμετροι, οι οποίες προκαλούν εξασθένιση της ισχύος του σήματος, είναι η κινητικότητα χρηστών, η μορφολογία του εδάφους, η παρεμβολή καναλιού και οι καιρικές συνθήκες. Όλες αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν την αποστολή δεδομένων προς τους τερματικούς σταθμούς με αποτέλεσμα την αλλοίωση των δεδομένων και την αύξηση των επαναμεταδόσεων.

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι ένα μέτρο της ισχύος του σήματος σχετικά με τον θόρυβο που υπάρχει στο κανάλι. Σε ένα ασύρματο περιβάλλον, ο λόγος αυτός μεταφράζεται σε λόγο της ενέργειας του ληφθέντος bit προς την ενέργεια του θορύβου σύμφωνα με τη σχέση:

$$SNR(t) = a^2(t) \frac{E}{N} \quad (3-1)$$

όπου  $a^2(t)$  είναι μια τυχαία διαδικασία που περιγράφει την εξασθένιση κατά Rayleigh για ένα μοντέλο σταθερής εξασθένισης καναλιού [8],  $E$  είναι η μέση ενέργεια ανά bit του λαμβανομένου σήματος και  $N$  η κατανομή της ισχύος θορύβου.

Ο ρυθμός αποστολής λαθεμένων bit (bit error rate - BER) είναι το ποσοστό των bit που φτάνουν στο δέκτη σε λάθος μορφή σε σχέση με τον συνολικό αριθμό bit που παρελήφθησαν. Στις ασύρματες επικοινωνίες, η σχέση μεταξύ του BER και του SNR εξαρτάται μη γραμμικά από το σχήμα της διαμόρφωσης του καναλιού, δηλαδή [9]:

$$BER(t) = Q\{SNR(t)\} \quad (3-2)$$

Η σχέση μεταξύ του ποσοστού λαθεμένων πακέτων (packet error rate - PER) και του BER εξαρτάται από το σχήμα της κωδικοποίησης του καναλιού. Σε ένα σχήμα κωδικοποίησης χωρίς διόρθωση λαθών, εάν  $n$  είναι ο αριθμός των bit ανά πακέτο και με την προϋπόθεση ότι η χρονική μεταβολή της συμπεριφοράς του καναλιού είναι πολύ αργή σε σχέση με το χρόνο αποστολής πακέτων, έχουμε:

$$PER(t) = 1 - [1 - BER(t)]^n = P\{BER(t)\} \quad (3-3)$$

δηλαδή το PER μεταβάλλεται μη γραμμικά με το BER.

Η σχέση μεταξύ της χωρητικότητας ενός ασύρματου δικτύου και του PER εξαρτάται από τα πρωτόκολλα του MAC υποστρώματος. Γενικά ένα πακέτο μένει στην ουρά αναμονής του αποστολέα έως ότου παραλαμβάνεται επιτυχώς και αναγνωρίζεται από το δέκτη. Σύμφωνα με το σχέδιο αυτόματης επαναμετάδοσης (ARQ), το οποίο χρησιμοποιείται από τα σύγχρονα ασύρματα συστήματα, ένα νέο πακέτο δε θα σταλεί στο δέκτη αν (α) λήξει η περίοδος εγκυρότητας αποστολής του πακέτου, ή (β) το προηγούμενο πακέτο έχει παραληφθεί επιτυχώς και έχει αναγνωριστεί από το δέκτη και ο αποστολέας έλαβε την επιβεβαίωση. Επομένως, η χρησιμοποίηση (utilization)  $\eta$  του καναλιού, η οποία είναι το ποσοστό του χρόνου που το κανάλι χρησιμοποιείται για να μεταδώσει αποτελεσματικά τα δεδομένα μεταξύ του αποστολέα και του δέκτη, μπορεί να εξαχθεί σύμφωνα με την μεθοδολογία που περιγράφεται παρακάτω.

Έστω ότι  $t_p$  και  $t_a$  είναι οι χρόνοι μετάδοσης ενός πακέτου και της αντίστοιχης επιβεβαίωσης.

Επιπλέον,  $t_{proc}$  είναι ο χρόνος επεξεργασίας των πακέτων στις τερματικές συσκευές και  $t_{prop}$  ο χρόνος διάδοσης των πακέτων μέσα στο κανάλι. Επίσης,  $t_{t0}$  είναι ο χρόνος λήξης της εγκυρότητας αποστολής ενός πακέτου και  $t_s$  ο ελάχιστος χρόνος μεταξύ διαδοχικών επιτυχημένων μεταδόσεων πακέτων στον αποστολέα χωρίς την ανίχνευση λάθους. Η μέγιστη τιμή του  $t_s$  συμβολίζεται με  $t_s^*$  και δίνεται από τη σχέση:

$$t_s^* = t_p + 2t_{proc} + 2t_{prop} + t_a \quad (3-4)$$

Έστω η τυχαία μεταβλητή  $x$ , η οποία περιγράφει τον συνολικό χρόνο για μια επιτυχή μετάδοση πακέτου και της αναγνώρισής του και εξαρτάται από τη χρονική μεταβολή του PER. Τότε, η χρησιμοποίηση του καναλιού εκφράζεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{t_p}{E[x]} = \frac{(1 - PER)t_p}{t_0 + (1 - PER)t_s + PERt_{t_0}} \quad (3-5)$$

όπου  $t_0$  είναι ένας τυχαίος χρόνος, ο οποίος είναι το διάστημα, κατά το οποίο ο πομπός, ενώ έχει ανιχνεύσει ότι το κανάλι είναι αδρανές, περιμένει μέχρι να στείλει τα δεδομένα του. Ο χρόνος αυτός συναντάται σε πολλά πρωτόκολλα του επιπέδου σύνδεσης δεδομένων, όπως το 802.11, το οποίο δεν διακρίνει ξεχωριστά κανάλια επικοινωνίας για την άνω και κάτω ζεύξη. Με βάση τον παραπάνω τύπο για την χρησιμοποίηση του καναλιού, μπορεί να υπολογιστεί και η διαθέσιμη χωρητικότητα μίας ασύρματης σύνδεσης:

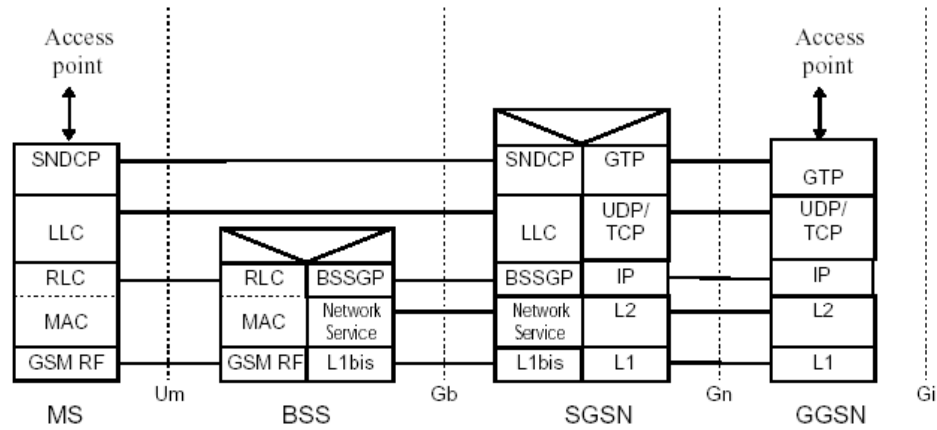
$$B(t) = \eta C = f(SNR) \quad (3-6)$$

όπου το  $C$  είναι η ονομαστική χωρητικότητα του υπό εξέταση ασύρματου δικτύου.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η χωρητικότητα που διατίθεται για την εξυπηρέτηση των χρηστών ενός ασύρματου δικτύου σχετίζεται άμεσα με το λόγο σήματος προς θόρυβο SNR, μέσω τριών μη γραμμικών συναρτήσεων. Ο συνδυασμός διαφορετικών μορφών αυτών των συναρτήσεων περιγράφει τα διάφορα ασύρματα δίκτυα και τις επιμέρους μεταβλητές τους (π.χ. διαφορετικοί αλγόριθμοι στο MAC επίπεδο του ίδιου δικτύου).

### 3.3. General Packet Radio Service (GPRS)

Το σύστημα GPRS είναι μια προέκταση του συστήματος κινητής τηλεφωνίας GSM, για την υποστήριξη υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου. Το Σχήμα 3-1 εικονογραφεί την αρχιτεκτονική του συστήματος αυτού [10].



**Σχήμα 3-1. Η αρχιτεκτονική του συστήματος GPRS**

Το δίκτυο GSM μπορεί να χωριστεί σε τρία επιμέρους τμήματα [11][12][13], τα οποία είναι ο Κινητός Σταθμός (Mobile Station, MS), το Υποσύστημα Σταθμού Βάσης (Base Station Subsystem, BSS), που ελέγχει την ασύρματη ζεύξη με τον MS, και το Υποσύστημα Δικτύου (Network Subsystem), του οποίου το κύριο μέρος είναι το Κέντρο Μεταγωγής Κινητών Υπηρεσιών (Mobile services Switching Center, MSC) και το οποίο πραγματοποιεί τη μεταγωγή των κλήσεων μεταξύ χρηστών του κινητού δικτύου και άλλων σταθερών ή κινητών δικτύων, καθώς και τη διαχείριση κινητών υπηρεσιών, όπως η πιστοποίηση. Για την ολοκλήρωση του GPRS σε αυτήν την αρχιτεκτονική GSM, εισήχθησαν κάποια νέα στοιχεία δικτύου, ενώ κάποια άλλα βελτιώθηκαν. Η καινούρια κατηγορία κόμβων δικτύου περιλαμβάνει τους Κόμβους Υποστήριξης GPRS (GPRS Support Nodes, GSNs). Οι GSN είναι υπεύθυνοι για την παράδοση και δρομολόγηση πακέτων δεδομένων μεταξύ των κινητών σταθμών και των εξωτερικών Δικτύων Δεδομένων Μετάδοσης Πακέτων (Packet Data Networks, PDNs). Υπάρχουν δύο είδη κόμβων GSN: ο Εξυπηρετών Κόμβος Υποστήριξης GPRS (Serving GPRS Support Node, SGSN) και ο Κόμβος Υποστήριξης Πύλης GPRS (Gateway GPRS Support Node, GGSN).

Το βασικό στοιχείο ασύρματης πρόσβασης στο δίκτυο GPRS είναι το BSS. Όπως δείχνει και το Σχήμα 3-1, στο στοιχείο αυτό το Στρώμα Ζεύξης Δεδομένων αναλύεται σε τρία επίπεδα, καθένα από τα οποία επιτελεί και διαφορετική λειτουργία [11]:

- ❑ Το επίπεδο Logical Link Control (LLC) παρέχει πληροφορίες για τη μεταφορά δεδομένων ανάμεσα στα MS και SGSN, όπως υποστήριξη διαδικασιών ελέγχου ορθής σειράς των πακέτων, έλεγχο των ροών και ανίχνευση λαθών.
- ❑ Το Radio Link Control (RLC) εγκαθιστά ένα προσωρινό περιεχόμενο (Temporary Block Flow-TBF) στο ασύρματο κομμάτι της πρόσβασης και μεταφέρει πληροφορίες αναγνώρισης και επαναμετάδοση λαθεμένων πληροφοριών.

- Το Medium Access Control (MAC) παρέχει τη διεπαφή με το Φυσικό Στρώμα και επιτρέπει στον κινητό σταθμό να επικοινωνεί με τον σταθμό βάσης και να μοιράζεται τα διαθέσιμα κανάλια.

Όπως είπαμε, το δίκτυο αυτό αποτελεί επέκταση του κλασσικού δικτύου GSM, το οποίο σημαίνει ότι καλείται να υποστηρίξει τόσο υπηρεσίες φωνής (οι συνδέσεις των οποίων έχουν αποκλειστική χρήση των πόρων που καταλαμβάνουν, αφού είναι μεταγωγής κυκλώματος υπηρεσίες) όσο και υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου δεδομένων. Συνεπώς, η ανάλυση της διαθέσιμης χωρητικότητας αυτού του δικτύου πρέπει να συνεκτιμά και τις δύο αυτές κατηγορίες υπηρεσιών. Όμως, η χωρητικότητα που μπορεί να διατεθεί στην περιοχή κάλυψης του δικτύου GPRS είναι συνάρτηση πολλών άλλων παραμέτρων, οι οποίες ταξινομούνται σε όλα τα χαμηλά στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλων. Άλλες από αυτές μπορούν να διαμορφωθούν καταλλήλως, ώστε να προσφέρουν μεγαλύτερες τιμές διέλευσης στους χρήστες, ενώ άλλες αποτελούν στατικές παραμέτρους, που καθορίζονται από τις προδιαγραφές των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται [14].

Κάθε σταθμός βάσης του δικτύου μπορεί να διαθέτει μέχρι ένα συγκεκριμένο αριθμό συχνοτήτων  $f$ . Επιπλέον, κάθε συχνότητα μπορεί να διαιρεθεί σε 8 κανάλια ή χρονοσχισμές (timeslots). Συνεπώς, η ονομαστική χωρητικότητα που μπορεί να διατεθεί στους χρήστες GPRS ανά συχνότητα είναι  $8f$ . Οι αντίστοιχοι ρυθμοί μετάδοσης που μπορούν να επιτευχθούν εξαρτώνται από το σχήμα κωδικοποίησης, το οποίο χρησιμοποιείται από τον εκάστοτε Πάροχο στο Φυσικό Στρώμα. Για το δίκτυο GPRS έχουν προδιαγραφεί τα σχήματα κωδικοποίησης που δίνει ο Πίνακας 3-1 [15]. Εκεί, φαίνονται, επίσης, οι ρυθμοί μετάδοσης που μπορούν να επιτευχθούν ανά χρονοσχισμή. Τα σημερινά δίκτυα GPRS έχουν υιοθετήσει το σχήμα κωδικοποίησης CS-2, το οποίο σημαίνει ότι σε ένα κόμβο με 3 συχνότητες η ονομαστική χωρητικότητα του κόμβου δικτύου είναι  $3 \cdot 8 \cdot 13.4 = 321.6 \text{ kbps}$ . Πρέπει, βέβαια, να σημειωθεί ότι ο ρυθμός αυτός περιλαμβάνει μέσα του το πλεονάζων φορτίο κάθε σύνδεσης, όπως και ότι κάποιες από τις χρονοσχισμές δεσμεύονται για την υποστήριξη και μεταφορά πληροφοριών σηματοδότησης. Συνεπώς, η διέλευση του δικτύου GPRS είναι μικρότερη από 321.6 kbps.

**Πίνακας 3-1. Παράμετροι για τα διάφορα σχήματα κωδικοποίησης συχνότητας του δικτύου GPRS**

| <i>Scheme</i> | <i>Code rate</i> | <i>Payload (bytes)</i> | <i>Data rate (kbps)</i> |
|---------------|------------------|------------------------|-------------------------|
| CS-1          | 1/2              | 181                    | 9.05                    |
| CS-2          | $\approx 2/3$    | 268                    | 13.4                    |
| CS-3          | $\approx 3/4$    | 312                    | 15.6                    |
| CS-4          | 1                | 428                    | 21.4                    |

Στο Στρώμα Ζεύξης Δεδομένων, η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση του καναλιού είναι η Gaussian minimum shift keying (GMSK) [15]. Η διαμόρφωση αυτή είναι ανεξάρτητη από το σχήμα κωδικοποίησης συχνότητας και επηρεάζει τη μετάδοση δεδομένων των επιπέδων MAC, RLC και LLC, όσον αφορά στην επίτευξη του SNR.

Ένα γεγονός που πρέπει να αναφερθεί και αφορά τον τελικό χρήστη είναι το ότι η διέλευση που επιτυγχάνεται στους τελικούς χρήστες εξαρτάται από το τερματικό του χρήστη και την κατηγορία, στην οποία αυτό ανήκει. Έτσι, ακόμα και αν ένας χρήστης έχει διαθέσιμους όλους τους πόρους του δικτύου, δεν μπορεί να τους χρησιμοποιήσει, αφού υπάρχει περιορισμός στον μέγιστο αριθμό καναλιών που μπορούν να του ανατεθούν (είτε πρόκειται για την σύνδεση κάτω ζεύξης-downlink ή για την σύνδεση άνω ζεύξης- uplink).

Για την επίδοση του δικτύου GPRS και, συνεπώς, τον υπολογισμό των χρηστών που μπορούν να υποστηριχθούν από το δίκτυο αυτό σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή απαιτείται η εκτίμηση ορισμένων παραμέτρων, οι οποίες διακρίνονται, ανάλογα με το επίπεδο του Στρώματος Ζεύξης Δεδομένων, που αντιστοιχούν:

- ❑ Στα επίπεδα RLC και LLC, οι παράμετροι αυτές είναι ο αριθμός των RLC/LLC στοιχείων που επαναμεταδίδονται στο uplink ή το downlink, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων RLC/LLC στο uplink ή το downlink και το RLC Block Error Rate (BLER) που είναι ο λόγος των στοιχείων RLC που δεν επαληθεύονται προς τον συνολικό αριθμό στοιχείων RLC που επαληθεύονται στον σταθμό.
- ❑ Στο MAC επίπεδο, οι παράμετροι επίδοσης έχουν αν κάνουν με τη διαθεσιμότητα του δικτύου GPRS να δεχτεί νέες αιτήσεις εγκατάστασης ροών. Τέτοιες παράμετροι είναι ο μέγιστος αριθμός καναλιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά των δεδομένων των χρηστών, ο αριθμός των δεσμευμένων καναλιών, για την αποκλειστική εξυπηρέτηση των χρηστών που επιθυμούν να εγκαταστήσουν υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου, το σχήμα κωδικοποίησης συχνότητας και η κλάση του GPRS τερματικού, που υποδηλώνει τον μέγιστο αριθμό καναλιών που μπορεί να χρησιμοποιήσει κάθε χρήστης ανά σύνδεση.

Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι ότι οι Πάροχοι δικτύων GPRS υιοθετούν ένα πρότυπο προτεραιοτήτων για την προστασία των κλήσεων φωνής. Αυτό σημαίνει ότι, εάν το δίκτυο δεν έχει επιπλέον κανάλια για να υποστηρίξει μία νεοεισερχόμενη κλήση φωνής, τότε απορρίπτει χρήστες υπηρεσίας δεδομένων, ώστε να ελευθερώσει πόρους. Επειδή, όμως, με τον τρόπο αυτό υπάρχει η πιθανότητα το δίκτυο να εξυπηρετεί μόνο χρήστες φωνής, έχει προβλεφθεί η δέσμευση χρονοσχισμών για την αποκλειστική τους χρήση από χρήστες πακέτων δεδομένων GPRS. Έτσι, το σχήμα με προτεραιότητα στις κλήσεις φωνής πραγματοποιείται μόνο όταν τα κατειλημμένα κανάλια από χρήστες GPRS ξεπερνούν τα δεσμευμένα κανάλια.

Με βάση τα παραπάνω, η μέση διαθέσιμη χωρητικότητα για την κάτω ζεύξη στους GPRS χρήστες για ένα διάστημα παρατήρησης  $\Delta t$  sec δίνεται από την ακόλουθη σχέση [14]:

$$\text{Throughput (kbps)} = \frac{\text{RBCDL} \times \text{DR}}{\Delta t \times \text{PSUSETB} \times 1000} = \eta \text{DR} \quad (3-7)$$

Στη σχέση αυτή, το RBCDL είναι η τιμή του μετρητή που δείχνει πόσα στοιχεία δεδομένων RLC έχουν σταλεί προς τους χρήστες, DR είναι ο μέγιστος διαθέσιμος ρυθμός μετάδοσης για το συγκεκριμένο επιλεγμένο σχήμα κωδικοποίησης και PSUETB είναι ο μέσος αριθμός των χρονοσχισμών που μεταφέρουν κίνηση πακέτων στο διάστημα  $\Delta t$ . Ο μέγιστος διαθέσιμος ρυθμός μετάδοσης DR υπολογίζεται, αφού αφαιρεθούν από τον μέγιστο αριθμό καναλιών οι χρονοσχισμές που έχουν δεσμευτεί από την κίνηση φωνής. Οι τελευταίες υπολογίζονται με βάση την κίνηση σε Erlangs που μετράται στο διάστημα παρατήρησης και την ποιότητα της κίνησης, η οποία διαμορφώνεται από την παράμετρο Grade of Service (GoS) που αντιστοιχεί στην πιθανότητα φραγής κλήσεων. Έτσι [16]:

$$\text{DR} = C - A(1 - \text{GoS})\text{drpts} \quad (3-8)$$

Στη σχέση αυτή, το  $C$  είναι ο μέγιστος ρυθμός που μπορεί να επιτευχθεί,  $A$  είναι η κίνηση φωνής σε Erlangs και  $\text{drpts}$  είναι ο ρυθμός μετάδοσης ανά χρονοσχισμή. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι η χρησιμοποίηση καναλιού  $\eta$  σε ένα δίκτυο GPRS για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα παρατήρησης εξαρτάται από τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων χρονοσχισμών από την κίνηση GPRS καθώς και από τον μέσο αριθμό κλήσεων φωνής που εξυπηρετούνται στο διάστημα αυτό.

Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί πολλά μοντέλα, τα οποία αναλύουν την επίδοση του δικτύου GPRS [17][18][19][20]. Ενδεικτικά μπορούμε να αναφέρουμε το [17], στο οποίο παρουσιάζεται ένα αναλυτικό μοντέλο για την εκτίμηση της επίδοσης του GPRS υπό δεδομένες συνθήκες φόρτισης. Επίσης, το [19] παρουσιάζει ένα μοντέλο ουράς αναμονής για την εκτίμηση της επίδρασης της κίνησης που καλείται να εξυπηρετήσει το δίκτυο. Πάντως, τα μοντέλα αυτά κάνουν μία απλούστευση στις υποθέσεις τους και διακρίνουν τους πόρους που ανατίθενται μεταξύ των δύο ειδών κίνησης του GPRS. Αντιθέτως, στο [21] παρουσιάζεται ένα εναλλακτικό μοντέλο ανάλυσης και υπολογισμού της διαθεσιμότητας του δικτύου αυτού να εξυπηρετήσει μία δεδομένη ποσότητα κίνησης, το οποίο θεωρεί ότι οι χρονοσχισμές μοιράζονται στα δύο είδη κίνησης, με την προϋπόθεση ότι η κίνηση φωνής έχει προτεραιότητα έναντι της κίνησης δεδομένων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

### 3.3.1. Enhanced Data Rates for GSM/GPRS Evolution (EDGE)

Το EDGE αποτελεί μία επέκταση του δικτύου GPRS [13]. Στην ουσία, δημιουργήθηκε για να βελτιώσει το ρυθμό μετάδοσης ανά χρονοσχισμή για το GPRS, γι' αυτό και συχνά καλείται και βελτιωμένο GPRS (Enhanced GPRS-EGPRS). Στο Στρώμα Ζεύξης Δεδομένων χρησιμοποιεί ένα νέο σχήμα διαμόρφωσης πέρα από το κλασσικό GMSK του GPRS, το οποίο είναι το 8-PSK (phase shift keying). Το σχήμα αυτό διαμόρφωσης αποτελεί ένα καινούριο στοιχείο στην

αρχιτεκτονική του EDGE, καθώς αρχικά είχαν προταθεί οι διαμορφώσεις πλάτους quaternary offset quadrature amplitude modulation (Q-O-QAM) και binary offset QAM (Q-O-QAM) [22].

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, φθάνοντας μέχρι και τα 384 kbps. Η τεχνολογία EDGE μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα εναλλακτικό δίκτυο ασύρματης πρόσβασης για την υποστήριξη υπηρεσιών τρίτης γενιάς. Επίσης, μπορεί να συνυπάρχει με το δίκτυο UMTS, το οποίο αναλύεται παρακάτω, ώστε να παρέχει υπηρεσίες με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές ασύρματης κάλυψης και για συχνότητες λειτουργίας των δικτύων GSM/GPRS. Σε μία τέτοια περίπτωση, το UMTS μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία ιεραρχική αρχιτεκτονική, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2, για να καλύψει σημεία υψηλής συγκέντρωσης φορτίου σε αστικές περιοχές.

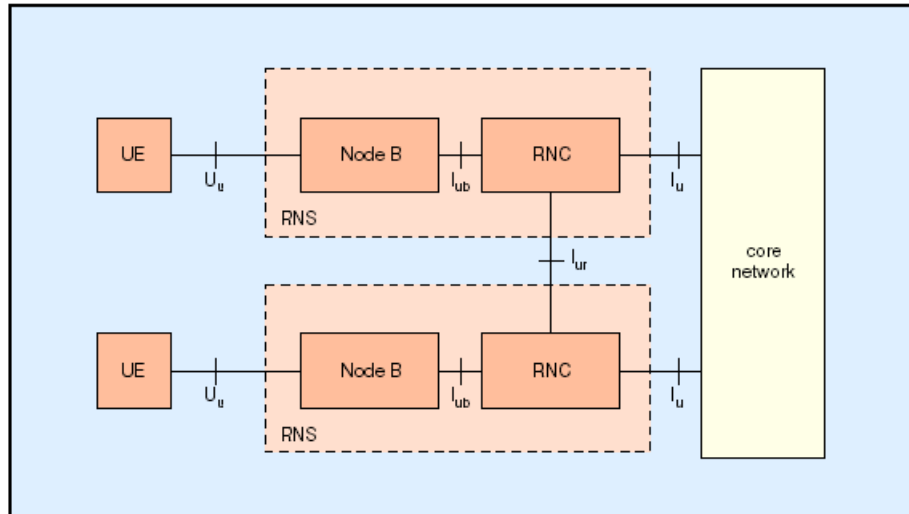
Η δυνατότητα μετάδοσης σε πολλαπλούς ρυθμούς που υποστηρίζει το δίκτυο EDGE οφείλεται σε μία μεταβλητή δομή για τις χρονοσχισμές, την κωδικοποίηση και τη διαμόρφωση. Ανάλογα με τις απαιτήσεις των χρηστών και την κατάσταση του καναλιού μετάδοσης, μπορεί να επιλεγεί και ο κατάλληλος συνδυασμός αριθμού χρονοσχισμών, κωδικοποίησης και διαμόρφωσης. Το EDGE υποστηρίζει ασύμμετρους ρυθμούς μετάδοσης για την άνω και κάτω ζεύξη, με την ανάθεση διαφορετικού αριθμού χρονοσχισμών. Επίσης, για υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου, τα πρωτόκολλα των επιπέδων RLC/MAC παρέχουν ταχεία πρόσβαση μέσω ενός σχήματος προσπέλασης μέσου με βάση δεσμεύσεις, το οποίο υποστηρίζεται από διαδικασίες ARQ για τις επαναμεταδόσεις.

### **3.4. Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)**

Η μοντελοποίηση της γενικής αρχιτεκτονικής του UMTS (Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών), τόσο από φυσικής όσο και από λειτουργικής πλευράς, παρέχεται στην προδιαγραφή 3G TS 23.101 της 3GPP [23]. Το δίκτυο αποτελείται από τρεις τομείς που αλληλεπιδρούν: το Δίκτυο Πυρήνα (Core Network, CN), το Επίγειο Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης του UMTS (UMTS Terrestrial Radio Access Network, UTRAN) και τον Εξοπλισμό Χρήστη (User Equipment, UE).

Η αρχιτεκτονική του UTRAN παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-2 [24]. Το UTRAN αποτελείται από ένα ή περισσότερα Υποσυστήματα Ραδιοδικτύου (Radio Network Subsystem, RNS). Κάθε RNS αποτελείται από έναν Ελεγκτή Ραδιοδικτύου (Radio Network Controller, RNC), από τον οποίο και ελέγχεται, και από έναν ή περισσότερους σταθμούς βάσης, οι οποίοι ονομάζονται Node B. Ένας Node B μπορεί να εξυπηρετεί μία ή περισσότερες κυψέλες. Οι κινητοί σταθμοί (που καλούνται εξοπλισμός ή συσκευές χρήστη) είναι στην πράξη πολλαπλής λειτουργίας, έτσι ώστε να επιτρέπουν την πλήρη γεωγραφική κάλυψη του UMTS, καθώς επίσης και του GSM.





**Σχήμα 3-2: Η αρχιτεκτονική του δικτύου πρόσβασης του UMTS**

Το κύριο χαρακτηριστικό του συστήματος UMTS είναι ότι χρησιμοποιεί ένα Δίκτυο Πυρήνα βασισμένο στο IP και υποστηρίζει βελτιωμένες υπηρεσίες πολυμέσων με ταχύτητες μετάδοσης της τάξης των 2Mbps, ενώ τα τερματικά είναι ικανά να λειτουργήσουν σε πολλαπλά σχήματα και να υποστηρίξουν μία ευρεία γκάμα υπηρεσιών. Μία σημαντική παράμετρος του UMTS είναι ότι έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει διαφορετικά QoS χαρακτηριστικά για κάθε κατηγορία υπηρεσιών. Έτσι, έχουν οριστεί οι ακόλουθες τέσσερις κλάσεις QoS [12]:

- ❑ Conversational class
- ❑ Streaming class
- ❑ Interactive class
- ❑ Background class

Κάθε μία από αυτές τις κλάσεις διακρίνεται για τα ξεχωριστά χαρακτηριστικά στο ασύρματο κομμάτι, όπως είναι το εύρος ζώνης και οι ρυθμοί μετάδοσης λαθών. Όμως, η κύρια διάκριση μεταξύ αυτών των κλάσεων είναι η απαίτηση για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την καθυστέρηση.

Μία κίνηση που διέρχεται μέσα από το δίκτυο αυτό μπορεί να οριστεί με βάση κάποια γνωρίσματα ή ιδιότητες [25]. Μερικά από αυτά είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης, ο εγγυημένος μέσος ρυθμός μετάδοσης, η κλάση QoS, το μέγιστο επιτρεπόμενο μέγεθος πακέτου, ο ρυθμός των λαθεμένων bits και η καθυστέρηση μεταφοράς.

Ο οργανισμός 3GPP έχει προδιαγράψει μόνον συχνότητες για την λειτουργία του UMTS και με τους δύο τρόπους ασύρματης πρόσβασης στο UTRAN, δηλαδή διαίρεσης συχνότητας (frequency division duplex-FDD) και χρόνου (time division duplex-TDD). Ανάλογα με το ποιος από αυτούς χρησιμοποιείται, προκύπτει και διαφορετικό σύστημα κωδικοποίησης [13]. Έτσι, για πρόσβαση με FDD χρησιμοποιείται η τεχνολογία Wideband Code Division Multiple Access

(WCDMA), στο οποίο χρησιμοποιούνται συχνότητες με εύρος ζώνης των 5MHz, με σχήματα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων σε γειτονικές κυψέλες, ενώ η ονομαστική χωρητικότητα φθάνει τα 4.096Mcps (mega chip per sec), όπου το chip είναι η πληροφορία του χρήστη κωδικοποιημένη με μία τυχαία ακολουθία ψευδοαριθμών. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι για το WCDMA έχουν προδιαγραφεί, επίσης, εύρη ζώνης της τάξης των 10MHz και 20MHz, οπότε οι αντίστοιχοι ρυθμοί μετάδοσης είναι 8.192Mcps και 16.384Mcps [22].

Η τεχνολογία CDMA υποστηρίζει την στιγμιαία πρόσβαση σε ασύρματα πολυμέσα, ιδανικά για δεδομένα μεταγωγής πακέτου. Με την CDMA, προσφέρονται υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας με αποτελεσματικότητα, πολύ καλή ποιότητα κλήσης και απλοποιημένο σχεδιασμό των συστημάτων, αφού σε κάθε τμήμα της κυψέλης γίνεται χρήση της ίδιας συχνότητας. Συνάμα, θα μπορούσαμε να προσθέσουμε την ασφαλή μετάδοση των δεδομένων, την καλύτερη κάλυψη και την λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Η WCDMA σχεδιάζεται για να ικανοποιήσει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων για ραδιοκάλυψη. Και αυτό, γιατί ορισμένες εφαρμογές πολυμέσων δεν μπορούν να μεταφερθούν μέσα από συστήματα στενής ζώνης. Η βελτιωμένη χωρητικότητα και η κάλυψη είναι μερικά από τα πλεονεκτήματα, καθώς τα ευρείας ζώνης δίκτυα εκμεταλλεύονται πιο αποτελεσματικά τη διάδοση πολλαπλών δρόμων. Η WCDMA έχει καλύτερη ευαισθησία από την CDMA στενής ζώνης, λόγω του ευρύτερου, σύμφωνου εύρους ζώνης, της σύμφωνης αποδιαμόρφωσης και του γρήγορου ελέγχου της ισχύος, που εφαρμόζεται στην άνω και κάτω ζεύξη. Σαν αποτέλεσμα, χαμηλώνει το κατώφλι ευαισθησίας του δέκτη, το οποίο βελτιώνει τόσο τη χωρητικότητα όσο και τη ραδιοκάλυψη.

**Πίνακας 3-2. Spreading factor, ρυθμός μετάδοσης συμβόλων και ρυθμός μετάδοσης bits για ένα σύστημα WCDMA**

| spreading factor (SF) | symbol rate<br>ksps | bit rate<br>kbps |
|-----------------------|---------------------|------------------|
| 512                   | 8                   | 16               |
| 256                   | 16                  | 32               |
| 128                   | 32                  | 64               |
| 64                    | 64                  | 128              |
| 32                    | 128                 | 256              |
| 16                    | 256                 | 512              |
| 8                     | 512                 | 1024             |
| 4                     | 1024                | 2048             |

Η διάκριση των ανεξάρτητων χρηστών στο CDMA γίνεται με την ανάθεση κωδίκων που διακρίνονται μεταξύ τους από ορθογωνιότητα, ενώ η μετάδοση δεδομένων των διαφόρων χρηστών μπορεί να πραγματοποιείται ταυτόχρονα πάνω από την ίδια συχνότητα. Για την

περιγραφή του μήκους της κωδικής λέξης που ανατίθεται στον χρήστη, το οποίο καθορίζει και το ρυθμό μετάδοσης που διατίθεται στον χρήστη, χρησιμοποιείται η έννοια του spreading factor. Έτσι, μία νέα σύνδεση μπορεί να πραγματοποιηθεί με την ανάθεση μίας νέας κωδικής λέξης. Βέβαια, υπάρχει ένας μέγιστος αριθμός συνδέσεων, αφού όσο περισσότερα δεδομένα μεταφέρονται τόσο αυξάνει ο θόρυβος και η παρεμβολή που επηρεάζει τις συνδέσεις και, συνεπώς, μειώνεται η ποιότητα. Το εύρος ζώνης των 5MHz που προσφέρει το WCDMA, μοιράζεται σε χρήστες που μπορούν να μεταδώσουν από 8 kbps μέχρι 2 Mbps, ανάλογα με το spreading factor, όπως δείχνει και ο Πίνακας 3-2 [26].

Επειδή το WCDMA χρησιμοποιεί την ίδια συχνότητα φορέα για άνω και κάτω ζεύξη, τα δεδομένα που μεταφέρονται σε κάθε μία σύνδεση διαμορφώνονται με ξεχωριστά σχήματα [22]. Έτσι, στην κάτω ζεύξη τα δεδομένα διαμορφώνονται σύμφωνα με το σχήμα της Quadrature Phase Shift Keying (QPSK). Αντιθέτως, στην σύνδεση άνω ζεύξης χρησιμοποιείται το σχήμα διαμόρφωσης Binary Phase Shift Keying (BPSK).

Πέρα από το WCDMA, το Time-Division TD-CDMA χρησιμοποιείται στην περίπτωση της πρόσβασης TDD για το UTRA, οπότε και ο φορέας συχνότητας που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση χωρίζεται σε χρονοσχισμές, οι οποίες ομαδοποιούνται σε ομάδες [13]. Αυτό σημαίνει ότι η επικοινωνία πραγματοποιείται με την χρησιμοποίηση μίας δεδομένης χρονοσχισμής είτε για την άνω είτε για την κάτω ζεύξη. Επίσης, οι κώδικες διαχωρίζουν τους χρήστες εντός μίας ή περισσότερων χρονοσχισμών. Έτσι, ενώ στην πρόσβαση FDD το φυσικό κανάλι ορίζεται από ένα συνδυασμό φορέα συχνότητας και κώδικα, στην περίπτωση του TDD το φυσικό κανάλι ορίζεται από ένα συνδυασμό φορέα συχνότητας, χρονοσχισμής και κώδικα. Οι χρήστες μπορούν να επιτύχουν μεταβαλλόμενους ρυθμούς μετάδοσης με τη μεταβολή του μήκους της κωδικής λέξης ή τη δέσμευση περισσότερων της μίας κωδικών λέξεων που ανατίθενται σε μία σύνδεση.

Στο σύστημα TD-CDMA, ο φορέας συχνότητας μπορεί να μεταδώσει με ταχύτητα 4.096 Mcps, η οποία χρονικά διαιρείται στην άνω και κάτω ζεύξη. Οι χρονοσχισμές ομαδοποιούνται, όπως αναφέρθηκε, σε ομάδες των 16 χρονοσχισμών, οι οποίες έχουν διάρκεια 10ms. Τέλος, τα δεδομένα στον τρόπο πρόσβασης TDD διαμορφώνονται, σύμφωνα με το σχήμα της QPSK [22].

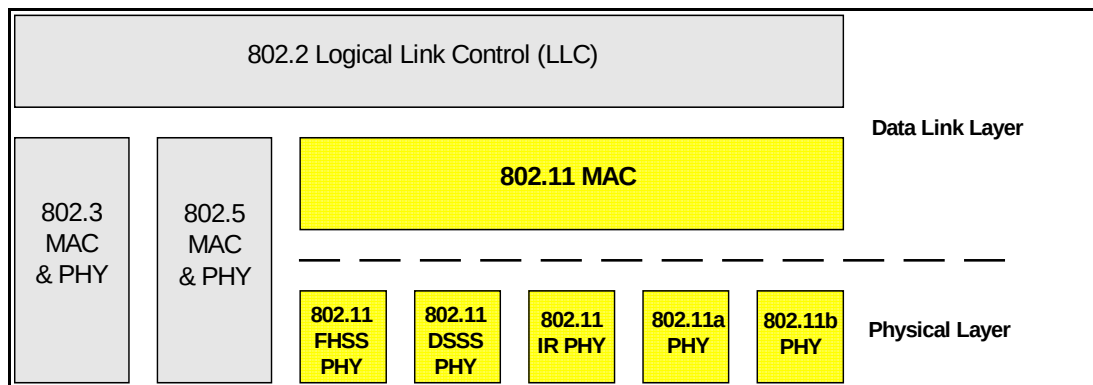
Λόγω της φύσης του δικτύου UMTS, η διαθέσιμη χωρητικότητα για τη εξυπηρέτηση του συνόλου των χρηστών σε μία περιοχή εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής και λήψης των τερματικών σταθμών. Αυτό συνδέεται άμεσα με την ποιότητα του καναλιού μέσα από το λόγο SNR και το ρυθμό μετάδοσης λαθών BER. Συνεπώς, σε ένα τέτοιο δίκτυο, ο μέγιστος αριθμός χρηστών που μπορούν να υποστηριχθούν από το δίκτυο υπολογίζεται, με κριτήριο, κυρίως, την ισχύ και όχι τόσο το ρυθμό μετάδοσης. Ωστόσο, υπάρχει ευθεία αναλογία μεταξύ της εκπεμπόμενης ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Στα [27][28][29] αναφέρονται κάποια παραδείγματα για τον υπολογισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας στο δίκτυο UMTS. Επίσης, σε επόμενη παράγραφο θα δοθεί μία μέθοδος προσδιορισμού της διαθέσιμης χωρητικότητας του δικτύου UMTS, η οποία προβλέπει την ύπαρξη επαναμεταδόσεων λόγω ανίχνευσης λαθών.

### 3.5. Wireless Local Area Network (WLAN)

#### 3.5.1. Αρχιτεκτονική

Το Ασύρματο Δίκτυο Τοπικής Εμβέλειας WLAN βασίζεται στο πρωτόκολλο 802.11. Το βασικότερο στοιχείο των προδιαγραφών του πρωτοκόλλου 802.11 είναι το MAC. Επηρεάζει κάθε φυσικό στρώμα και ελέγχει την εκπομπή των δεδομένων στο ασύρματο μέσο. Παρέχει τις βασικές διαδικασίες ανταλλαγής πλαισίων και δίνει την δυνατότητα για αλληλεπίδραση με το ενσύρματο δίκτυο υποδομής. Το 802.11 δεν απέχει πάρα πολύ από τα προηγούμενα IEEE 802 πρωτόκολλα. Απλά προσαρμόζει την δικτύωση Ethernet στις ασύρματες συνθήκες. Όπως και το Ethernet, το 802.11 χρησιμοποιεί την μέθοδο της πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος και αποφυγή συγκρούσεων (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance - CSMA/CA) για να προσπελάσει το ασύρματο μέσο. Αλλά υπάρχει μία βασική διαφορά. Αντί της τεχνικής ανίχνευσης συγκρούσεων χρησιμοποιείται η τεχνική αποφυγής συγκρούσεων. Αυτή η διαφορά οφείλεται στο διαφορετικό μέσο που χρησιμοποιούν τα δύο δίκτυα. Σε αυτήν την παράγραφο, θα αναλύσουμε τους βασικούς κανόνες πρόσβασης στο ασύρματο μέσο, καθώς και την δομή των πλαισίων 802.11 [30][31]. Επίσης θα περιγράψουμε τις βασικές ακολουθίες ανταλλαγής πλαισίων που λαμβάνουν χώρα σε ένα δίκτυο 802.11.

Το 802.11 αναφέρεται στα δύο χαμηλότερα στρώματα του μοντέλου διαστρωμάτωσης OSI (Open System Interconnection), δηλαδή στο φυσικό στρώμα (Physical Layer – PHY) και στο υπόστρωμα MAC (Medium Access Control) του στρώματος ζεύξης δεδομένων (Data Link Layer) [32]. Το άλλο υπόστρωμα του στρώματος ζεύξης δεδομένων, δηλαδή το υπόστρωμα ελέγχου λογικής ζεύξης LLC, είναι αυτό που έχει προτυποποιηθεί ως IEEE 802.2 και χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με όλα τα διαφορετικά MAC της σειράς IEEE 802, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-3.

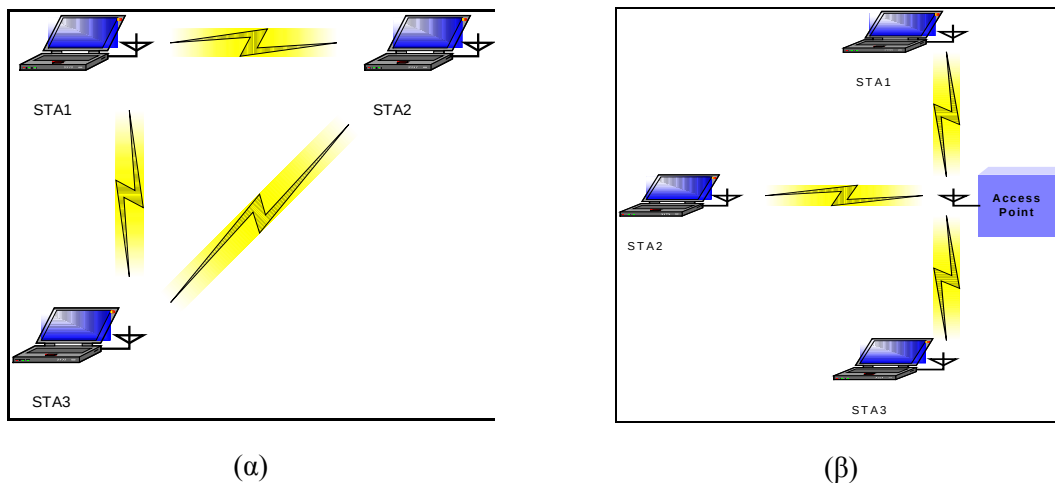


Σχήμα 3-3. Διαστρωμάτωση του προτύπου 802.11

Τα ασύρματα δίκτυα 802.11 αποτελούνται από τέσσερις βασικές μονάδες. Αυτές είναι:

- ❑ Σημείο πρόσβασης (Access Point – AP): Το AP είναι η μονάδα που παίζει το ρόλο γέφυρας μεταξύ του ενσύρματου και του ασύρματου δικτύου, μετατρέποντας κατάλληλα τα πλαίσια που ανταλλάσσονται μεταξύ αυτών.
- ❑ Σύστημα διανομής (Distribution System): Το σύστημα διανομής ενώνει τα διάφορα AP του ίδιου δικτύου, επιτρέποντάς τους να ανταλλάσσουν πλαίσια. Το 802.11 δεν προσδιορίζει τον τρόπο που θα γίνεται αυτό.
- ❑ Ασύρματο μέσο μετάδοσης (Wireless Medium): Έχουν οριστεί διάφορα φυσικά στρώματα που χρησιμοποιούν είτε ραδιοσυχνότητες είτε υπέρυθρες ακτίνες για τη μετάδοση των πλαισίων μεταξύ των σταθμών του ασύρματου δικτύου.
- ❑ Σταθμοί (Stations): Οι σταθμοί που ανταλλάσσουν πληροφορία μέσω του ασυρμάτου δικτύου συνήθως είναι φορητές συσκευές (για παράδειγμα laptops), χωρίς όμως αυτό να είναι απαραίτητο.

Η βασική δομική μονάδα κάθε 802.11 δικτύου αποκαλείται Basic Service Set (BSS) και αποτελείται από μία ομάδα σταθμών που επικοινωνούν μεταξύ τους. Τα όρια του BSS ορίζονται από την περιοχή ραδιοκάλυψης, που ονομάζεται Basic Service Area (BSA). Ένας σταθμός σε ένα BSS μπορεί να επικοινωνεί με οποιονδήποτε άλλο σταθμό στο ίδιο BSS. Επιπλέον υπάρχουν δύο βασικές τοπολογίες, βάσει των οποίων ορίζονται δύο είδη ασυρμάτων δικτύων. Τα είδη αυτά είναι τα ανεξάρτητα δίκτυα (independent networks) και τα δίκτυα υποδομής (infrastructure networks) και σχηματικά φαίνονται στο Σχήμα 3-4.



**Σχήμα 3-4. Βασικές τοπολογίες δικτύων WLAN, α) ανεξάρτητο δίκτυο (ad-hoc mode) και β) δίκτυο υποδομής (infrastructure mode)**

Στην περίπτωση infrastructure δικτύων ένας αριθμός από BSSs μπορούν να συνδεθούν και να αποτελέσουν ένα Extended Service Set (ESS). Αυτό δημιουργείται ενώνοντας τα APs των BSSs μέσω ενός ενσύρματου δικτύου κορμού. Με αυτόν τον τρόπο είναι εφικτή η επικοινωνία μεταξύ σταθμών που ανήκουν σε διαφορετικά BSSs αλλά στο ίδιο ESS. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει τα APs να επικοινωνούν στο στρώμα ζεύξης δεδομένων μέσω του δικτύου κορμού, επιτελώντας

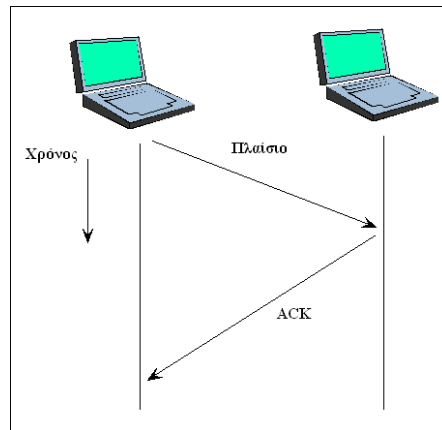
τη λειτουργία της γέφυρας για τους σταθμούς διαφορετικών BSSs. Το ESS τελειώνει όταν παρεμβληθεί μεταξύ των AP's οντότητα δικτύου που λειτουργεί σε υψηλότερο στρώμα, όπως είναι ο δρομολογητής (router). Το 802.11 προσφέρει κινητικότητα σε ένα ESS, αρκεί το δίκτυο κορμού να είναι ένα απλό LAN ή και VLAN (Virtual LAN). Σε κάθε άλλη περίπτωση, η σύνδεση στα ανώτερα επίπεδα θα χαθεί, εκτός κι αν χρησιμοποιείται κάποια άλλη τεχνολογία όπως το Mobile IP.

Το σύστημα διανομής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του 802.11, αν και δεν περιγράφεται στο πρότυπο η υλοποίησή του, αλλά μόνο οι υπηρεσίες που πρέπει να προσφέρει στους ασύρματους σταθμούς. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το σύστημα διανομής είναι υπεύθυνο για τη διασύνδεση APs, δηλαδή BSSs, και τη δημιουργία ESSs. Με αυτόν τον τρόπο καθιστά δυνατή την ανταλλαγή πλαισίων ανάμεσα σε σταθμούς που ανήκουν σε διαφορετικά BSSs εντός του ιδίου ESS. Το σύστημα διανομής είναι δυνατόν να είναι κι αυτό ασύρματο δίκτυο. Τέτοια περίπτωση είναι η διασύνδεση δύο LANs σε διαφορετικές φυσικές τοποθεσίες μέσω μιας ασύρματης ζεύξης σημείο – προς – σημείο. Τότε το ασύρματο δίκτυο χρησιμεύει ως γέφυρα που ενώνει τα δύο LANs στο στρώμα ζεύξης δεδομένων. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται wireless bridging.

### **3.5.2. Περιγραφή των μηχανισμών του MAC**

Σε ένα ενσύρματο Ethernet, είναι λογικό να εκπέμπουμε ένα πλαίσιο και να υποθέτουμε ότι φτάνει στον προορισμό του σωστά. Οι ραδιοζεύξεις είναι διαφορετικές, ειδικά όταν οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται είναι σε ελεύθερες μπάντες συχνοτήτων, όπως συμβαίνει με το WLAN. Ακόμη και εκπομπές στενού εύρους υπόκεινται σε θόρυβο και σε παρεμβολές, αλλά οι συσκευές πρέπει να υποθέσουν ότι θα υπάρχουν παρεμβολές και πρέπει να τις παρακάμψουν. Οι σχεδιαστές του 802.11 σκέφτηκαν τρόπους να αντισταθμίσουν τις παρεμβολές από φούρνους μικροκυμάτων και άλλες πηγές ραδιοσυχνοτήτων. Εκτός από τον θόρυβο, η εξασθένιση πολλαπλής διαδρομής μπορεί να οδηγήσει στην λανθασμένη μετάδοση ενός πλαισίου.

Σε αντίθεση με πολλά άλλα πρωτόκολλα στρώματος ζεύξης, το 802.11 χρησιμοποιεί θετικές επιβεβαιώσεις. Όλα τα μεταδιδόμενα πλαίσια πρέπει να επιβεβαιωθούν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-5. Αν οποιοδήποτε μέρος της μεταφοράς αποτύχει, το πλαίσιο θεωρείται χαμένο. Το 802.11 επιτρέπει στους σταθμούς να εμποδίζουν τον ανταγωνισμό κατά τη διάρκεια ατομικών εκπομπών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-5, ώστε οι ατομικές ακολουθίες να μην διακόπτονται από άλλους σταθμούς που επιχειρούν να χρησιμοποιήσουν το ασύρματο μέσο.



**Σχήμα 3-5. Θετική επιβεβαίωση εκπομπής δεδομένων**

Η πρόσβαση στο ασύρματο μέσο ελέγχεται από συναρτήσεις συντονισμού. Η πρόσβαση τύπου CSMA/CA παρέχεται από την κατανεμημένη συνάρτηση συντονισμού (Distributed Coordination Function - DCF). Αν απαιτείται υπηρεσία χωρίς ανταγωνισμό, αυτή μπορεί να την παρέχει η σημειακή συνάρτηση συντονισμού (Point Coordination Function - PCF) η οποία είναι επέκταση της DCF. Υπηρεσίες χωρίς ανταγωνισμό παρέχονται μόνο σε δίκτυα υποδομής. Η DCF είναι η βάση του μηχανισμού πρόσβασης CSMA/CA. Όπως και στο Ethernet, ελέγχει πριν την εκπομπή αν η ραδιοζεύξη είναι ελεύθερη. Για να αποφευχθούν οι συγκρούσεις, οι σταθμοί χρησιμοποιούν μία τυχαία οπισθοχώρηση μετά από κάθε πλαίσιο, με την πρώτη εκπομπή να καταλαμβάνει το κανάλι. Σε μερικές περιπτώσεις, η DCF μπορεί να χρησιμοποιήσει τον μηχανισμό RTS/CTS για να μειώσει ακόμη περισσότερο την πιθανότητα σύγκρουσης.

Ένας σταθμός με ένα νέο πακέτο για μετάδοση, παρακολουθεί την δραστηριότητα στο κανάλι. Εάν το κανάλι είναι αδρανές για μια χρονική περίοδο ίση με ένα κατανεμημένο interframe διάστημα (Distributed Interframe Space - DIFS), ο σταθμός μεταδίδει. Διαφορετικά, εάν το κανάλι διαπιστωθεί απασχολημένο (είτε αμέσως είτε κατά τη διάρκεια του DIFS), ο σταθμός εμμένει να παρακολουθεί το κανάλι έως ότου να διαπιστωθεί αδρανές για ένα DIFS. Σε αυτό το σημείο, ο σταθμός παράγει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα backoff πριν μεταδώσει, για να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα σύγκρουσης με τα πακέτα που μεταδίδονται από άλλους σταθμούς. Επιπλέον, για να αποφευχθεί κατάληψη του καναλιού, ένας σταθμός πρέπει να περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα backoff μεταξύ δύο διαδοχικών νέων μεταδόσεων πακέτου, ακόμα κι αν το μέσο παρατηρηθεί αδρανές στο χρονικό διάστημα DIFS.

Για λόγους αποδοτικότητας, στη μέθοδο DCF υιοθετούνται χρονικά διαστήματα backoff διακριτού χρόνου. Ο χρόνος που ακολουθεί αμέσως μετά από ένα αδρανές DIFS διαχωρίζεται σε σχισμές (slotted), και ένας σταθμός επιτρέπεται να μεταδώσει μόνο στην αρχή κάθε χρονικής σχισμής. Το μέγεθος των χρονικών σχισμών,  $\sigma$ , τίθεται ίσο με το χρόνο που απαιτείται σε οποιοδήποτε σταθμό για να ανιχνεύσει τη μετάδοση ενός πακέτου από οποιοδήποτε άλλο σταθμό. Όπως δείχνει και ο Πίνακας 3-3, εξαρτάται από το φυσικό στρώμα, και συμβάλει στην καθυστέρηση διάδοσης, στον απαιτούμενο χρόνο εναλλαγής από την κατάσταση λήψης στην

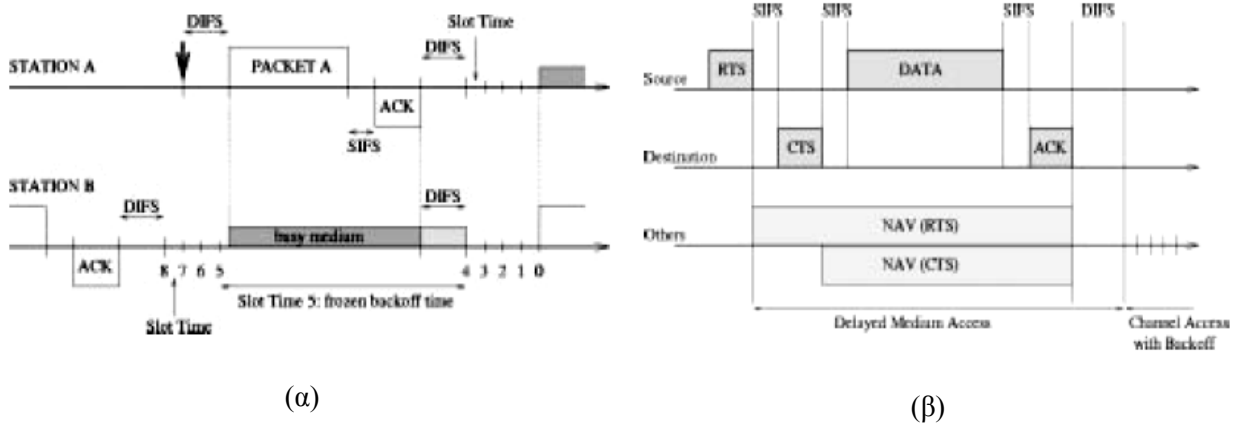
κατάσταση μετάδοσης (RX\_TX\_Turnaround\_Time), και στο χρόνο ενημέρωσης το στρώμα MAC για την κατάσταση του καναλιού.

**Πίνακας 3-3. Τυπικές τιμές των MAC παραμέτρων ανάλογα με το υποκείμενο PHY επίπεδο**

| PHY  | Slot Time ( $\sigma$ ) | $CW_{min}$ | $CW_{max}$ |
|------|------------------------|------------|------------|
| FHSS | 50 $\mu s$             | 16         | 1024       |
| DSSS | 20 $\mu s$             | 32         | 1024       |
| IR   | 8 $\mu s$              | 64         | 1024       |

Η μέθοδος DCF υιοθετεί ένα εκθετικό backoff σχήμα. Σε κάθε μετάδοση πακέτου, ο χρόνος backoff επιλέγεται ομοιόμορφα στο πεδίο  $(0, w-1)$ . Το μέγεθος  $w$  καλείται παράθυρο ανταγωνισμού (contention), και εξαρτάται από τον αριθμό αποτυχημένων μεταδόσεων πακέτου. Στην πρώτη προσπάθεια μετάδοσης, το  $w$  τίθεται ίσο με μια τιμή  $CW_{min}$  αποκαλούμενη ελάχιστο παράθυρο ανταγωνισμού. Μετά από κάθε ανεπιτυχή μετάδοση, το  $w$  διπλασιάζεται, μέχρι μια μέγιστη τιμή  $CW_{max} = 2^m CW_{min}$ . Οι τιμές  $CW_{min}$  και  $CW_{max}$  όπως αναφέρονται στην τελική έκδοση του προτύπου [7] είναι PHY-specific και τις συνοψίζει ο Πίνακας 3-3.

Ο χρονικός μετρητής backoff μειώνεται εφ' όσον το κανάλι παραμένει αδρανές, παραμένει αμετάβλητος, όταν ανιχνεύεται μια μετάδοση στο κανάλι, και ενεργοποιείται ξανά, όταν το κανάλι διαπιστωθεί αδρανές πάλι για ένα διάστημα μεγαλύτερο από DIFS. Ο σταθμός μεταδίδει όταν ο χρόνος backoff φθάσει στο μηδέν.



**Σχήμα 3-6. Λειτουργία των μηχανισμών πρόσβασης μέσου: α) Βασικός Μηχανισμός Πρόσβασης και β) RTS/CTS Μηχανισμός Πρόσβασης**

Το Σχήμα 3-6α εξηγεί αυτήν την λειτουργία για τον βασικό μηχανισμό πρόσβασης. Δύο σταθμοί A και B μοιράζονται το ίδιο ασύρματο κανάλι. Στο τέλος της μετάδοσης των πακέτων, ο σταθμός B περιμένει ένα χρονικό διάστημα DIFS και έπειτα επιλέγει ένα χρονικό διάστημα backoff ίσο με 8, πριν μεταδώσει το επόμενο πακέτο. Υποθέτουμε ότι το πρώτο πακέτο του σταθμού A φθάνει στο χρόνο που υποδεικνύεται με ένα βέλος στο σχήμα αυτό. Μετά από ένα χρονικό διάστημα DIFS, το πακέτο μεταδίδεται. Σημειώνουμε ότι η μετάδοση του πακέτου A



συμβαίνει στη μέση της χρονικής σχισμής που αντιστοιχεί σε μια τιμή backoff, για το σταθμό B, ίση με 5. Ως συνέπεια του απασχολημένου καναλιού, ο χρόνος backoff είναι παγωμένος στην τιμή του 5, και ο μετρητής backoff μειώνεται πάλι μόνο όταν το κανάλι παραμείνει αδρανές για ένα χρονικό διάστημα DIFS.

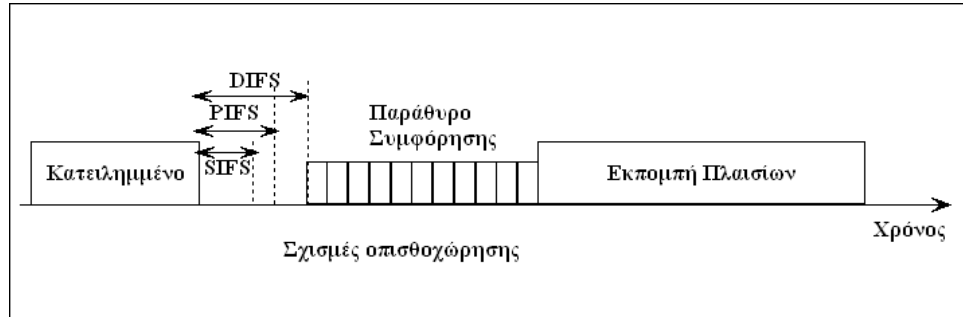
Από την στιγμή που το CSMA/CA δεν στηρίζεται στην ικανότητα των σταθμών να ανιχνεύσουν μια σύγκρουση με την παρακολούθηση της μετάδοσής τους, ένα ACK μεταδίδεται από το σταθμό προορισμού για να επισημάνει την επιτυχή λήψη του πακέτου. Το ACK (επιβεβαίωση) μεταδίδεται αμέσως μετά το τέλος του πακέτου, μετά από μια χρονική περίοδο που ονομάζεται σύντομο διάστημα μεταξύ των πλαισίων, δηλαδή Short Interframe Space (SIFS). Αφού το SIFS (συν την καθυστέρηση διάδοσης) είναι μικρότερο από ένα DIFS, κανένας άλλος σταθμός δεν είναι σε θέση να ανιχνεύσει ότι το κανάλι είναι αδρανές για ένα DIFS μέχρι το τέλος του ACK. Εάν ο σταθμός που μεταδίδει δεν λάβει το ACK μέσα σε ένα προκαθορισμένο ACK\_Timeout, ή ανιχνεύσει τη μετάδοση ενός διαφορετικού πακέτου στο κανάλι, αναπρογραμματίζει τη μετάδοση του πακέτου σύμφωνα με τους δοσμένους κανόνες backoff.

Η ανωτέρω περιγεγραμμένη τεχνική χειραψίας διπλής κατεύθυνσης για τη μετάδοση πακέτων καλείται βασικός μηχανισμός πρόσβασης. Η μέθοδος DCF καθορίζει μια πρόσθετη τετραπλής κατεύθυνσης τεχνική χειραψίας για να είναι προαιρετικά διαθέσιμη για μια μετάδοση πακέτων. Αυτός ο μηχανισμός, γνωστός με το όνομα RTS/CTS, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-6β. Ένας σταθμός που θέλει να μεταδώσει ένα πακέτο, περιμένει έως ότου το κανάλι είναι αδρανές για ένα διάστημα DIFS, ακολουθεί τους κανόνες backoff που εξηγούνται ανωτέρω, και έπειτα, αντί του πακέτου, μεταδίδει προκαταρκτικά ένα ειδικό σύντομο πλαίσιο αποκαλούμενο «αίτημα για αποστολή» (Request To Send - RTS). Όταν ο λαμβάνων σταθμός ανιχνεύσει ένα πλαίσιο RTS, αποκρίνεται, μετά από ένα διάστημα SIFS, με ένα «άδεια για αποστολή» (Clear To Send - CTS) πλαίσιο. Ο σταθμός που μεταδίδει επιτρέπεται να μεταδώσει το πακέτο του μόνο εάν το πλαίσιο CTS ληφθεί σωστά.

Ο μηχανισμός RTS/CTS είναι πολύ αποτελεσματικός από την άποψη της επίδοσης συστημάτων, ειδικά όταν εξετάζονται μεγάλα πακέτα, δεδομένου ότι μειώνει το μήκος των πλαισίων που περιλαμβάνονται στη διαδικασία ανταγωνισμού. Στην πραγματικότητα, με την προϋπόθεση ενός τέλει καναλιού που παρακολουθείται από κάθε σταθμό, μια σύγκρουση μπορεί να εμφανιστεί μόνο όταν μεταδίδονται δύο (ή περισσότερα) πακέτα μέσα στην ίδια χρονική σχισμή. Εάν και οι δύο σταθμοί που μεταδίδουν χρησιμοποιούν το μηχανισμό RTS/CTS, μια σύγκρουση εμφανίζεται μόνο στα πλαίσια RTS, και ανιχνεύεται έγκαιρα από τους σταθμούς που μεταδίδουν από την έλλειψη απαντήσεων CTS.

Όπως και στο κλασσικό Ethernet, το διαπλαισιακό διάκενο παίζει σπουδαίο ρόλο στο συντονισμό της πρόσβασης στο μέσο. Το 802.11 χρησιμοποιεί τρία βασικά διαφορετικά διαπλαισιακά διάκενα. Τα τρία χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την πρόσβαση στο μέσο. Η σχέση τους φαίνεται στο Σχήμα 3-7. Τα διαφορετικά διαπλαισιακά διάκενα θέτουν διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας για κάθε είδος κίνησης. Η λογική είναι απλή: Η κίνηση υψηλής προτεραιότητας

δεν χρειάζεται να περιμένει πολύ αφότου το μέσο έχει καταστεί ελεύθερο. Γι' αυτό αν υπάρχει κίνηση υψηλής προτεραιότητας, δεσμεύει το μέσο πριν από τα πλαίσια χαμηλής προτεραιότητας. Για να βοηθηθεί η διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών ρυθμών δεδομένων, το διαπλαισιακό διάκενο έχει καθορισμένη διάρκεια, ανεξάρτητη από την ταχύτητα της εκπομπής.



**Σχήμα 3-7. Σχέσεις διαπλαισιακών διακένων**

- ❑ **Σύντομο διαπλαισιακό διάκενο (Short Interframe Spacing, SIFS):** Το SIFS χρησιμοποιείται για τις εκπομπές υψηλότερης προτεραιότητας, όπως πλαίσια RTS/CTS και ACK. Οι εκπομπές αυτές μπορούν να ξεκινήσουν μετά το πέρας του SIFS. Όταν ξεκινήσουν οι εκπομπές υψηλής προτεραιότητας, το μέσο καθίσταται δεσμευμένο και έτσι τα πλαίσια που μεταδίδονται μετά το SIFS έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα έναντι αυτών που μπορούν να μεταδοθούν μόνο μετά από μεγαλύτερα διακένα.
- ❑ **Διαπλαισιακό Διάκενο PCF (PIFS):** Το PIFS χρησιμοποιείται από την PCF κατά τις εκπομπές χωρίς ανταγωνισμό. Οι σταθμοί που έχουν δεδομένα να μεταδώσουν κατά τη μη ανταγωνιστική περίοδο, μπορούν να το κάνουν μετά το μέρας του PIFS και να προλάβουν έτσι κάθε ανταγωνιστική κίνηση.
- ❑ **Διαπλαισιακό Διάκενο DCF (DIFS):** Το DIFS είναι ο ελάχιστος χρόνος που το μέσο μπορεί να παραμείνει ελεύθερο σε υπηρεσίες ανταγωνιστικές. Οι σταθμοί μπορούν να έχουν άμεση πρόσβαση στο μέσο αν αυτό έχει μείνει ελεύθερο για χρόνο μεγαλύτερο από το DIFS.

### 3.5.3. Φυσικό στρώμα WLAN

Το αρχικό πρότυπο 802.11 για το δίκτυο WLAN ορίστηκε από την IEEE το 1997 και περιελάμβανε προδιαγραφές για το υπόστρωμα MAC καθώς και για τρία διαφορετικά φυσικά στρώματα. Το 1999 η IEEE συμπλήρωσε τα διαθέσιμα φυσικά στρώματα προδιαγράφοντας άλλα δύο, τα 802.11b και 802.11a. Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν και τα δύο αυτά φυσικά στρώματα. Επίσης, γίνεται και μία αναφορά στο 802.11g, που είναι το νεότερο φυσικό στρώμα που προστέθηκε στα προηγούμενα.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τρία φυσικά στρώματα είχαν οριστεί αρχικά για το πρότυπο 802.11. Αυτά είναι τα εξής:

- Direct Sequence Spread Spectrum (Απλωμένο Φάσμα Ευθείας Ακολουθίας) στην ISM μπάντα των 2,4 GHz με ρυθμούς μετάδοσης 1 και 2 Mbps
- Frequency Hopping Spread Spectrum (Απλωμένο Φάσμα και Πήδημα Συχνότητας) στην ISM μπάντα των 2,4 GHz με ρυθμούς μετάδοσης 1 και 2 Mbps
- Infrared (Υπέρυθρες Ακτίνες) σε μήκη κύματος μεταξύ 850 και 950 nm με ρυθμούς μετάδοσης 1 και 2 Mbps

Το 802.11b είναι ένα εναλλακτικό φυσικό στρώμα πέραν των τριών που ορίστηκαν με το αρχικό πρότυπο 802.11. Το πρότυπο αυτό ανακοινώθηκε από την IEEE το 1999. Φυσικά, χρησιμοποιεί το ίδιο υπόστρωμα MAC όπως και τα υπόλοιπα φυσικά στρώματα του προτύπου. Χρησιμοποιεί την ελεύθερη μπάντα συχνοτήτων των 2,4 GHz και προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 11 Mbps. Αυτή τη στιγμή είναι το πιο διαδεδομένο πρότυπο στην αγορά, παρότι το 802.11a προσφέρει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Είναι συμβατό με το νέο πρότυπο 802.11g, που ακόμα δεν έχει ανακοινωθεί στην τελική του μορφή, κάτι που καθιστά την επιλογή του ακόμα πιο δελεαστική. Χρησιμοποιεί την τεχνική HR/DSSS (High Rate/ Direct Sequence Spread Spectrum) και τη διαμόρφωση CCK (Complementary Code Keying). Μπορεί να θεωρηθεί σαν επέκταση του αρχικού DSSS φυσικού στρώματος που ορίστηκε στο 802.11 και μάλιστα χρησιμοποιεί τα ίδια κανάλια με αυτό, πετυχαίνοντας αρκετά μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης.

Σε αντίθεση με το 802.11b που λειτουργεί στην ISM μπάντα των 2,4 GHz, το πρότυπο 802.11a χρησιμοποιεί την μπάντα των 5 GHz και μπορεί να μεταδώσει με ταχύτητες μέχρι 54Mbps. Παρά τα οφέλη που προσφέρει η χρήση υψηλότερων συχνοτήτων, που αναφέρονται παραπάνω, υπάρχουν και τα αντίστοιχα προβλήματα. Αυτά εντοπίζονται κυρίως στις αυξημένες απώλειες διάδοσης που εμφανίζονται στην μπάντα των 5 GHz σε σχέση με αυτές της μπάντας των 2,4 GHz. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται είτε με πυκνότερη διάταξη των AP για να καλυφθεί μία δεδομένη περιοχή είτε με αυξημένη ακτινοβολούμενη ισχύ από τους πομπούς. Η πρώτη λύση μπορεί να είναι οικονομικά ασύμφορη, ενώ η δεύτερη αυξάνει αρκετά την κατανάλωση ενέργειας των κινητών τερματικών, μειώνοντας έτσι την αυτονομία τους. Το 802.11a βασίζεται στην τεχνική πολυπλεξίας OFDM.

Τον Ιούνιο του 2003, η ομάδα εργασίας 802.11g ολοκλήρωσε τις εργασίες τις και πρόσθεσε άλλο ένα φυσικό στρώμα στο 802.11. Το 802.11g προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 54 Mbps αλλά και συμβατότητα με το 802.11b. Χρησιμοποιεί και αυτό την ISM μπάντα των 2,4 GHz. Σε αντίθεση με το 802.11b χρησιμοποιεί την OFDM για να πετύχει τους επιθυμητούς ρυθμούς μετάδοσης. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του 802.11g είναι η συμβατότητά του με το 802.11b. Το 802.11b αποτελεί σήμερα το φυσικό στρώμα που υλοποιείται στα περισσότερα προϊόντα ασύρματης δικτύωσης. Το 802.11g λειτουργώντας ταυτόχρονα με το 802.11b μπορεί να αντικαταστάσει σταδιακά εξολοκλήρου.

### 3.6. Υπολογισμός της χωρητικότητας του δικτύου WLAN

#### 3.6.1. Περιγραφή ενός απλού μοντέλου υπολογισμού της χωρητικότητας

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.2.1, η χωρητικότητα που είναι διαθέσιμη προς χρήση σε ένα ασύρματο περιβάλλον περιορίζεται λόγω κάποιων παραμέτρων. Σε αυτήν την παράγραφο, θα περιγράψουμε τον τρόπο σκέψης για τον υπολογισμό της χωρητικότητας σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο WLAN, όπως αυτή προκύπτει από το [2]. Ένα περισσότερο πολύπλοκο μοντέλο, το οποίο συνεκτιμά την παρουσία θορύβου για τον υπολογισμό της χωρητικότητας του WLAN, παρουσιάζεται στο [33]. Εκείνο που είναι σημαντικό σε ένα δίκτυο WLAN είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχουν διαφορετικά μονοπάτια για τις άνω και κάτω ζεύξεις, οπότε η χωρητικότητα του δικτύου μοιράζεται σε αυτές τις συνδέσεις, με βάση κάποιες παραμέτρους, όπως είναι το φορτίο που πρέπει να μεταδοθεί και κατά συνέπεια η πιθανότητα αποστολής δεδομένων από ένα σταθμό.

Λόγω της ύπαρξης συγκρούσεων μεταξύ των σταθμών και του AP που προσπαθούν να στείλουν δεδομένα στο ίδιο κανάλι, η χωρητικότητα του δικτύου μεταβάλλεται με τον αριθμό των σταθμών, συμπεριλαμβανομένου και του AP, που υπάρχουν στο δίκτυο. Πάντως, η χωρητικότητα αυτή είναι η θεωρητικά μέγιστη που μπορεί να επιτευχθεί κάθε φορά, καθώς το ασύρματο κανάλι χαρακτηρίζεται από αλλοιώσεις, όπως έχει ήδη ειπωθεί. Στην ουσία, η χωρητικότητα αυτή ποσοτικοποιεί το μέγιστο φορτίο που μπορεί να μεταφέρει το σύστημα σε σταθερές συνθήκες. Τονίζεται ότι η ενσωμάτωση των αλλοιώσεων του ρυθμού εξυπηρέτησης, οι οποίες οφείλονται στα χαρακτηριστικά του ασύρματου μέσου, αυξάνει την πολυπλοκότητα του μοντέλου που προκύπτει. Έτσι, είναι θεμιτή η υιοθέτηση απλών μοντέλων, όπως αυτό των [1][2], τα οποία προσφέρουν με ικανοποιητική προσέγγιση τη χωρητικότητα σε ένα ασύρματο δίκτυο WLAN υπό την παρουσία ενός AP και πλήθους τερματικών σταθμών. Η ανάλυση αυτή έχει κατά καιρούς προταθεί από μεγάλο μέρος των ερευνητών που ασχολούνται με τη μοντελοποίηση των διαδικασιών σε ένα δίκτυο WLAN (ενδεικτικά αναφέρουμε [33][34][35][36]). Στο εξής, όταν αναφερόμαστε στην ανταγωνιστικότητα των σταθμών θα συμπεριλαμβάνεται σε αυτούς και το AP.

Είναι ευρέως γνωστό ότι διάφορα σχήματα τυχαίας πρόσβασης παρουσιάζουν μια ασταθή συμπεριφορά. Ειδικότερα, καθώς το προσφερόμενο φορτίο αυξάνεται, ο ρυθμός εξυπηρέτησης αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη τιμή, που αναφέρεται ως μέγιστη διέλευση. Εντούτοις, περαιτέρω αυξήσεις του προσφερόμενου φορτίου οδηγούν σε μια ενδεχόμενη σημαντική μείωση στη χωρητικότητα του συστήματος. Αυτό οδηγεί στην πρακτική αδυναμία να λειτουργήσει το σχήμα τυχαίας πρόσβασης στη μέγιστη τιμή του για μια μεγάλη χρονική περίοδο, και έτσι είναι πρακτικά χωρίς νόημα η παράμετρος αυτή ως μέγεθος επίδοσης για το σχήμα πρόσβασης. Το πρωτόκολλο 802.11 είναι γνωστό ότι εμφανίζει τέτοιου είδους αστάθεια [37][38].

Το μοντέλο στα [1][2] υποθέτει έναν σταθερό αριθμό σταθμών, που ο κάθε ένας έχει πάντα ένα πακέτο διαθέσιμο για μετάδοση. Έστω  $\tau$  ότι ο σταθμός μεταδίδει ένα πακέτο σε μία τυχαία επιλεγμένη χρονική σχισμή. Αυτή η πιθανότητα δεν εξαρτάται από το μηχανισμό πρόσβασης που

υιοθετείται. Κατόπιν, με τη μελέτη των γεγονότων που μπορούν να εμφανιστούν μέσα σε μια χρονική σχισμή, εκφράζεται η χωρητικότητα τόσο για τον βασικό μηχανισμό πρόσβασης καθώς και για τον μηχανισμό RTS/CTS ως συνάρτηση της υπολογισμένης τιμής  $\tau$ .

Έστω ένας σταθερός αριθμός  $n$  ανταγωνιστικών σταθμών. Στις συνθήκες κορεσμού, κάθε σταθμός έχει αμέσως ένα πακέτο διαθέσιμο για τη μετάδοση, μετά από την ολοκλήρωση κάθε επιτυχούς μετάδοσης. Επιπλέον, όντας όλα τα πακέτα διαδοχικά, κάθε πακέτο πρέπει να περιμένει έναν τυχαίο χρόνο backoff πριν τη μετάδοση. Έστω  $b(t)$  μια στοχαστική διαδικασία που αντιπροσωπεύει τον backoff χρονικό μετρητή για έναν δεδομένο σταθμό. Από την στιγμή που η τιμή του μετρητή backoff κάθε σταθμού εξαρτάται από το ιστορικό μεταδόσεων του, η στοχαστική διαδικασία  $b(t)$  δεν είναι τύπου Markov. Εντούτοις, αν  $W = CW_{min}$  και έστω  $m$  το μέγιστο στάδιο backoff, για το οποίο ισχύει  $CW_{max} = 2^m W$ , τότε η έκφραση  $W_i = 2^i W$ , όπου  $i \in (0, m)$  ονομάζεται backoff στάδιο.

Έστω ότι σε κάθε απόπειρα μετάδοσης, και ανεξάρτητα από τον αριθμό των υφιστάμενων αναμεταδόσεων, κάθε πακέτο συγκρούεται με σταθερή και ανεξάρτητη πιθανότητα  $p$ . Προκύπτει ότι αυτή η υπόθεση είναι πιο ακριβής όσο τα  $W$  και  $n$  αυξάνονται. Μετά από τους σχετικούς υπολογισμούς, οι οποίοι παρουσιάζονται στο [2], προκύπτει ότι:

$$\tau = \frac{2(1-2p)(1-p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \quad (3-9)$$

Όπως φαίνεται, το  $\tau$  εξαρτάται από την πιθανότητα σύγκρουσης  $p$ , η οποία είναι ακόμα άγνωστη. Για να βρεθεί η τιμή της  $p$  είναι αρκετό να σημειωθεί ότι η πιθανότητα  $p$  να αντιμετωπίσει σύγκρουση ένα μεταδιδόμενο πακέτο, είναι η πιθανότητα που, σε μια χρονική σχισμή, τουλάχιστον ένας εκ των υπόλοιπων  $n-1$  σταθμών μεταδίδει. Η θεμελιώδης υπόθεση ανεξαρτησίας που δίνεται ανωτέρω υπονοεί ότι κάθε μετάδοση "βλέπει" το σύστημα στην ίδια κατάσταση, δηλ., στη σταθερή κατάσταση. Στη σταθερή κατάσταση, κάθε σταθμός που υπολείπεται μεταδίδει ένα πακέτο με πιθανότητα  $\tau$ . Αυτό συνεπάγεται ότι:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (3-10)$$

Οι εξισώσεις (3-9) και (3-10) αντιπροσωπεύουν ένα μη γραμμικό σύστημα με δύο αγνώστους  $\tau$  και  $p$ , το οποίο μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους. Είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι αυτό το σύστημα έχει μια μοναδική λύση.

Για τον υπολογισμό της χωρητικότητας του δικτύου WLAN, ορίζουμε σαν  $S$  την κανονικοποιημένη χωρητικότητα του συστήματος. Αυτή ορίζεται ως το μέρος του χρόνου που το κανάλι χρησιμοποιείται για να μεταδώσει επιτυχώς bits ωφέλιμου φορτίου. Για να υπολογιστεί το  $S$ , πρέπει πρώτα να αναλυθεί τι μπορεί να συμβεί σε μία τυχαία επιλεγμένη χρονική σχισμή. Έστω  $P_{tr}$  η πιθανότητα να υπάρχει τουλάχιστον μία μετάδοση στην εξεταζόμενη χρονική σχισμή. Από την στιγμή που οι  $n$  σταθμοί ανταγωνίζονται για το κανάλι, και κάθε ένας μεταδίδει με

πιθανότητα  $\tau$  τότε  $P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n$ . Η πιθανότητα  $P_s$  ύπαρξης μιας επιτυχημένης μετάδοσης στο κανάλι δίνεται από την πιθανότητα ένας ακριβώς σταθμός να μεταδώσει στο κανάλι, με την προϋπόθεση ότι τουλάχιστον ένα σταθμός μεταδίδει, δηλαδή  $P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1 - (1-\tau)^n}$ .

Το  $S$  εκφράζεται μέσω της ακόλουθης αναλογίας:

$$S = \frac{E[\text{payload information transmitted in a slot time}]}{E[\text{length of a slot time}]} \quad (3-11)$$

Αν  $E[P]$  είναι το μέσο μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου του πακέτου, τότε το μέσο ποσό πληροφοριών ωφέλιμου φορτίου που μεταδόθηκαν σε μια χρονική σχισμή είναι ίσο με  $P_{tr}P_sE[P]$ , δεδομένου ότι μια επιτυχής μετάδοση εμφανίζεται σε μια χρονική σχισμή με πιθανότητα  $P_{tr}P_s$ . Το μέσο μήκος μιας χρονικής σχισμής προκύπτει εύκολα αν λάβουμε υπόψη μας, ότι με πιθανότητα  $1-P_{tr}$ , η χρονική σχισμή είναι κενή, με πιθανότητα  $P_{tr}P_s$  η χρονική σχισμή περιέχει μια επιτυχής μετάδοση, και με πιθανότητα  $1-P_{tr}P_s$  η χρονική σχισμή περιέχει μια σύγκρουση  $P_{tr}(1-P_s)$ . Ως εκ τούτου, η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$S = \frac{P_s P_{tr} E[P]}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr} (1 - P_s) T_s} \quad (3-12)$$

Στη σχέση αυτή,  $T_s$  είναι ο μέσος χρόνος που το κανάλι είναι απασχολημένο (δηλαδή η διάρκεια της χρονικής σχισμής), λόγω μιας επιτυχούς μετάδοσης, και  $T_c$  είναι ο μέσος χρόνος που το κανάλι διαπιστώνεται απασχολημένο από κάθε σταθμό κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης, ενώ  $\sigma$  είναι η διάρκεια μιας κενής χρονικής σχισμής. Οι αναλυτικές σχέσεις και εξισώσεις αυτών των παραμέτρων παρατίθενται στο [2].

Εκείνο που χρειάζεται να τονιστεί, εδώ, είναι ότι η έκφραση της χωρητικότητας που δίνεται από τη σχέση (3-12) δεν κάνει διάκριση για άνω και κάτω ζεύξη. Απλά, δίνει το μέγιστο ρυθμό, με τον οποίο μπορούν να μεταδοθούν δεδομένα στο δίκτυο. Μία εκ των υποθέσεων του μοντέλου είναι ότι κάθε σταθμός, άρα και το AP, μεταδίδει με τη ίδια πιθανότητα  $\tau$ . Συνεπώς, η τιμή του  $S$  που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο αριθμό σταθμών μοιράζεται εξίσου σε αυτούς, λόγω της δικαιοσύνης του πρωτοκόλλου CSMA/CA. Όμως, αν υποθέσουμε την ύπαρξη τερματικών σταθμών και εξετάσουμε μόνο την κάτω ζεύξη, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η τιμή του  $S$  προσφέρεται αποκλειστικά στην κάτω ζεύξη, όπως συμβαίνει στην περίπτωση που εξετάζεται στα [39][40]. Αυτό είναι λογικό, αν υποθέσουμε ότι οι τερματικοί σταθμοί που λαμβάνουν δεδομένα από το AP επιχειρούν να έχουν πρόσβαση στο κανάλι επικοινωνίας για να στείλουν τα μηνύματα επιβεβαίωσης λήψης. Επίσης, στα [1][41][42] παρουσιάζονται βελτιωμένες εκδόσεις του DCF, ώστε να ληφθεί υπόψη η προτεραιότητα της σύνδεσης κάτω ζεύξης σε σχέση με την άνω, με σκοπό την εξασφάλιση μεγαλύτερων ρυθμών μετάδοσης της κάτω ζεύξης. Στο εξής, σε αυτήν την εργασία θεωρούμε ότι η χωρητικότητα κάτω ζεύξης του δικτύου WLAN μεταβάλλεται

με τον αριθμό των τερματικών σταθμών που εισάγονται στην περιοχή εξυπηρέτησης αυτού, σύμφωνα με τη σχέση (3-12) αυτής της παραγράφου.

### 3.6.2. Συμπεράσματα και Παρατηρήσεις

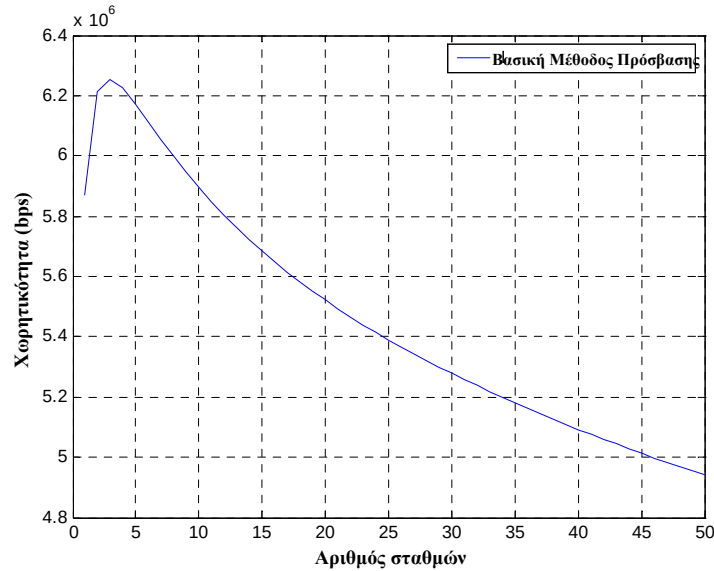
Στην παράγραφο αυτή δίνονται μερικά αποτελέσματα σχετικά με την συμπεριφορά της χωρητικότητας του ασύρματου καναλιού του WLAN, με βάση το μοντέλο που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.6.1. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στην μέθοδο βασικής πρόσβασης για ένα ασύρματο δίκτυο WLAN που ακολουθεί το πρότυπο 802.11b και έχει παραμέτρους, όπως δείχνει ο Πίνακας 3-4 [2][43].

**Πίνακας 3-4. Παράμετροι για τον υπολογισμό της διέλευσης κορεσμού στο WLAN**

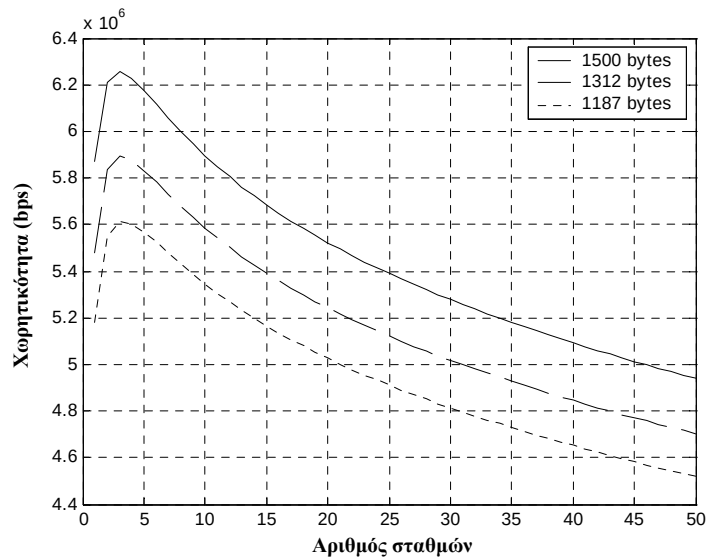
| Παράμετρος                 | Τιμή                         |
|----------------------------|------------------------------|
| <i>Maximum packet size</i> | <i>1500 bytes</i>            |
| <i>packet payload</i>      | <i>11232 bits</i>            |
| <i>MAC header</i>          | <i>272 bits</i>              |
| <i>PHY header</i>          | <i>192 bits</i>              |
| <i>ACK</i>                 | <i>112 bits + PHY header</i> |
| <i>RTS</i>                 | <i>160 bits + PHY header</i> |
| <i>CTS</i>                 | <i>112 bits + PHY header</i> |
| <i>Channel Bit Rate</i>    | <i>11 Mbit/sec</i>           |
| <i>Propagation Delay</i>   | <i>1 μsec</i>                |
| <i>Slot Time</i>           | <i>20 μsec</i>               |
| <i>SIFS</i>                | <i>10 sec</i>                |
| <i>DIFS</i>                | <i>50 μsec</i>               |
| <i>ACK_Timeout</i>         | <i>300 μsec</i>              |
| <i>CTS_Timeout</i>         | <i>300 μsec</i>              |
| <i>Cwmin</i>               | <i>32</i>                    |
| <i>Cwmax</i>               | <i>1024</i>                  |

Με βάση τις παραμέτρους αυτές και το μοντέλο για τον υπολογισμό της χωρητικότητας που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, σχεδιάζεται για ένα σύνολο ενεργών σταθμών η χωρητικότητα κάτω ζεύξης που διατίθεται από το δίκτυο, συναρτήσει του αριθμού των ενεργών σταθμών. Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 3-8, για μικρό αριθμό σταθμών αυτή αυξάνεται φτάνοντας μια μέγιστη τιμή, πέρα από την οποία αρχίζει να φθίνει σχεδόν εκθετικά. Σημειώνεται

ότι η καμπύλη αυτή αντιστοιχεί στον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό επαναμεταδόσεων, ο οποίος καθορίζεται από την κλίμακα του contention window, χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του θορύβου. Επίσης, η χωρητικότητα ανά σύνολο σταθμών είναι η θεωρητικά μέγιστη, καθώς έχει υποτεθεί ότι η χρονοθυρίδα του MAC επιπέδου μεταφέρει το μέγιστο επιτρεπόμενο καθαρό φορτίο ανά πακέτο.



**Σχήμα 3-8. Χωρητικότητα συναρτήσει του αριθμού των ενεργών κινητών σταθμών σε ένα δίκτυο WLAN 802.11b**

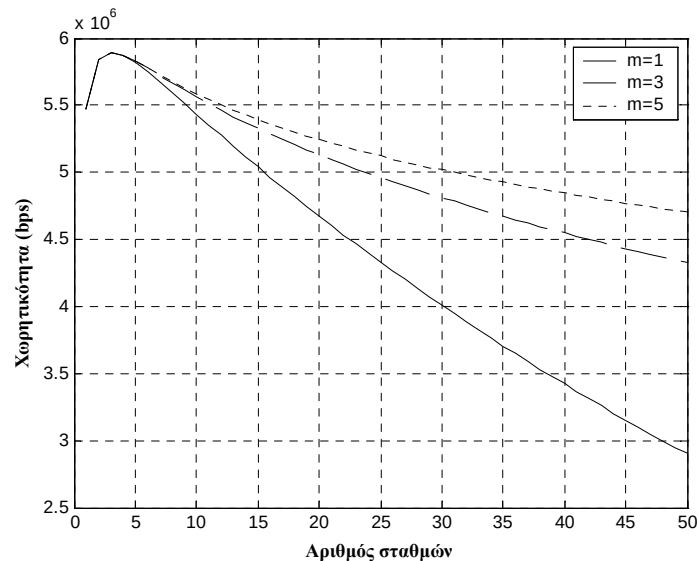


**Σχήμα 3-9. Επίδραση του μέσου μεταφερόμενου φορτίου στη χωρητικότητα του δικτύου WLAN 802.11b**



Μεγάλη επίδραση στην συμπεριφορά της μέγιστης επιτρεπόμενης διέλευσης του δικτύου WLAN σε μια δεδομένη χρονική στιγμή έχει το μέσο μέγεθος των πακέτων  $E[P]$  που διακινούνται μέσω του δικτύου αυτού. Αυτό συνδέεται άμεσα με την ποιότητα του ασύρματου καναλιού και με την κατανομή του μεγέθους των πακέτων που στέλνονται στο δίκτυο. Στο Σχήμα 3-9 απεικονίζεται η επίδραση της μείωσης του μέσου μεγέθους των πακέτων που εισέρχονται στο δίκτυο στη διέλευση που επιτυγχάνεται τελικά. Είναι προφανές ότι η κατάληψη του μέσου μετάδοσης από πακέτα μικρού μεγέθους μειώνει δραστικά τη μέγιστη χωρητικότητα που αποδίδεται στους χρήστες.

Στην συνέχεια εξετάζουμε την επίδραση του καθορισμού μέγιστου αριθμού προσπαθειών επαναμετάδοσης για την φάση backoff. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 3-10, από το οποίο παρατηρούμε ότι το κέρδος που επιτυγχάνεται από την αύξηση των προσπαθειών επαναμετάδοσης είναι σημαντικό, ιδιαίτερα υπό την ύπαρξη μεγάλου αριθμού σταθμών στο δίκτυο.



**Σχήμα 3-10. Επίδραση του μέγιστου αριθμού προσπαθειών επαναμετάδοσης για την φάση backoff στη χωρητικότητα του δικτύου WLAN 802.11b.**

### 3.7. Προσέγγιση Διαθέσιμης Χωρητικότητας

#### 3.7.1. Επίδραση των χαρακτηριστικών του ασύρματου καναλιού στη χωρητικότητα

Το πρόβλημα της επίδρασης της ιδιομορφίας του ασύρματου περιβάλλοντος στην κίνηση εστιάζεται πρωτίτως στο πρωτόκολλο TCP, το οποίο χρησιμοποιεί ανάδραση για τον έλεγχο της συμφόρησης δικτύων [44][45]. Η υποβάθμιση της επίδοσης του TCP πάνω από τις ασύρματες συνδέσεις οφείλεται, συνήθως, στην λαθεμένη εντύπωση της συμφόρησης στο ασύρματο τμήμα

δικτύου. Λόγω της ιδιαιτερότητας του ασύρματου περιβάλλοντος, πολλά πακέτα χάνονται, με αποτέλεσμα οι μηχανισμοί του TCP να ξεκινούν τη διαδικασία μείωσης του παραθύρου συμφόρησης και να αποστέλλουν με σημαντικά μικρότερο ρυθμό τα δεδομένα. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες λύσεις στο πρόβλημα αυτό, οι οποίες εστιάζουν στην πηγή δημιουργίας της μειωμένης επίδοσης του TCP. Επομένως, προτού αναφερθούμε στους τρόπους επίλυσης, αρχικά αναλύουμε τα γεγονότα που οδηγούν στην μειωμένη διέλευση που επιτυγχάνεται στα ασύρματα δίκτυα.

Το μεγάλο πρόβλημα των ασύρματων δικτύων είναι η αύξηση του αριθμού των λαθεμένων bits στη μεταδιδόμενη πληροφορία, λόγω της αλλοίωσης που υφίστανται τα πακέτα, κατά τη διαδρομή τους μέσα από το ασύρματο κανάλι. Οι μηχανισμοί ανίχνευσης και διόρθωσης λαθών στο επίπεδο της ζεύξης δεδομένων μπορούν να επιφέρουν διορθώσεις μέχρι ενός ορισμένου αριθμού bits, αλλά γενικά αδυνατούν να περιορίσουν τον καταιγισμό λαθών του ασύρματου περιβάλλοντος.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που αυξάνει τα λάθη στα ασύρματα δίκτυα είναι η μεταγωγή. Κατά τη διάρκεια των μεταγωγών, τα πακέτα μπορούν να καθυστερήσουν ή ακόμα και να χαθούν. Η αποκατάσταση από αυτές τις απώλειες πρέπει να αρχίζει αμέσως μετά από την ολοκλήρωση των διαδικασιών μεταγωγής, χωρίς την αναμονή να συμβεί μια λήξη εγκυρότητας. Το TCP μπορεί να αποφύγει τέτοια λάθη, εάν υπάρξει συνεργασία με τα χαμηλότερα στρώματα. Εναλλακτικά, το TCP μπορεί να εκμεταλλευτεί την πληροφορία των χαμηλότερων στρωμάτων για την κινητικότητα των χρηστών και με τον τρόπο αυτό να διακρίνει με ευριστικές μεθόδους τις απώλειες λόγω μεταγωγής. Για τις απώλειες αυτές, το TCP μπορεί να αποφύγει την μείωση του κατώτατου ορίου αργής έναρξης κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης, παραλείποντας κατά συνέπεια την φάση αποφυγής συμφόρησης. Για παράδειγμα, το πρότυπο Eifel [46] τροποποιεί το TCP, ώστε να αποφευχθούν οι πλαστές λήξεις εγκυρότητας και οι γρήγορες αναμεταδόσεις λόγω μεταγωγής ή καθυστερημένων αναμεταδόσεων του στρώματος ζεύξης δεδομένων.

Πέρα από τις μεταγωγές, οι άλλου είδους απώλειες που οφείλονται στο ασύρματο κανάλι μπορούν να αποκατασταθούν με τις αναμεταδόσεις των χαμένων πακέτων. Επειδή, οι από άκρο σε άκρο αναμεταδόσεις είναι αργές, οι συνδέσεις TCP μπορούν να χωριστούν χρησιμοποιώντας ως κομβικά σημεία τους δρομολογητές που συνδέονται με ασύρματες και ενσύρματες ζεύξεις. Έτσι, οι από άκρο σε άκρο συνδέσεις χωρίζονται σε ξεχωριστές συνόδους TCP για τα ασύρματα και ενσύρματα κομμάτια της σύνδεσης. Αυτό, όμως, εγκυμονεί τον κίνδυνο ότι τα μηνύματα επιβεβαίωσης μπορούν να φθάσουν στον αποστολέα πριν τα πακέτα δεδομένων φθάσουν στον προορισμό τους. Για να διατηρηθεί η σημασιολογία του πρωτοκόλλου TCP, οι επιβεβαιώσεις πρέπει να καθυστερήσουν, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό τη διέλευση. Τα κομβικά σημεία, όμως, καλούνται να αντιμετωπίσουν σημαντικά ποσά πληροφορίας ελέγχου, δεδομένου ότι τα πακέτα TCP υποβάλλονται σε επεξεργασία δύο φορές.

Πέρα από τις διάφορες τροποποιήσεις που έχουν προταθεί για τη βελτίωση της επίδοσης της κίνησης TCP στο επίπεδο του στρώματος μεταφοράς, υπάρχουν και λύσεις, οι οποίες σκοπεύουν

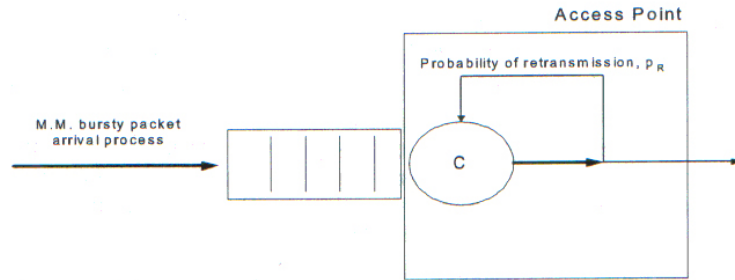
στην απόκρυψη των απωλειών του ασύρματου καναλιού από το πρωτόκολλο TCP. Η αποκατάσταση των λαθών ή απωλειών σε μία τέτοια περίπτωση έχει τοπικό χαρακτήρα και επιδρά στα πλαίσια του στρώματος ζεύξης δεδομένων. Ένα παράδειγμα τέτοιου μηχανισμού είναι το πρωτόκολλο Radio Link Protocol (RLP).

Σε κάθε περίπτωση, οι απώλειες που προέρχονται από την έμφυτη ιδιαιτερότητα του ασύρματου δικτύου, μειώνουν δραστικά την επίδοση των πρωτοκόλλων του στρώματος μεταφοράς με άμεση συνέπεια και επίδραση στη διέλευση δικτύου που επιτυγχάνεται για να εξυπηρετήσει τους τελικούς χρήστες. Τα κύρια προβλήματα της χρονικής και χωρικής μεταβολής της διάδοσης και της διασυμβολικής παρεμβολής οφείλονται κατά πρωτεύοντα ρόλο στην κινητικότητα των χρηστών, στην χρονική μεταβλητότητα της διασυμβολικής παρεμβολής, στην μορφολογία και το ανάγλυφο της γεωγραφικής περιοχής εξυπηρέτησης, κλπ. Σαν αποτέλεσμα, δεν υπάρχει κάποιος μεμονωμένος μηχανισμός κωδικοποίησης ή διαμόρφωσης, ο οποίος να βελτιστοποιεί την επίδοση για όλα τα πιθανά σενάρια κίνησης. Αντιθέτως, απαιτείται η ανάπτυξη μηχανισμών παρακολούθησης της τρέχουσας κατάστασης του ασύρματου δικτύου και η λήψη αποφάσεων προσαρμογής των παραμέτρων που συμβάλλουν στη διαμόρφωση του ρυθμού μετάδοσης και λήψης δεδομένων [36].

### 3.7.2. Μέθοδος Προσδιορισμού της Διαθέσιμης Χωρητικότητας

Στην προηγούμενη παράγραφο δόθηκε μία περιγραφή σχετικά με τις επιδράσεις που έχει η φύση του ασύρματου περιβάλλοντος στη χωρητικότητα που επιτυγχάνεται από το δίκτυο για να εξυπηρετήσει την σύνδεση κάτω (και άνω) ζεύξης. Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζεται μία μέθοδος, η οποία εκμεταλλεύεται τις πληροφορίες που είναι διαθέσιμες από τους κόμβους δικτύων, σχετικά με την ποιότητα του ασύρματου καναλιού, και προσεγγίζει την χρονικά μεταβαλλόμενη τιμή της διαθέσιμης χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων. Στην παράγραφο 3.3 περιγράφηκε ένας τύπος για τον απευθείας υπολογισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας στο δίκτυο GPRS. Για τα δίκτυα UMTS και WLAN, η μέθοδος προσδιορισμού της διαθέσιμης χωρητικότητας παρουσιάζεται εδώ.

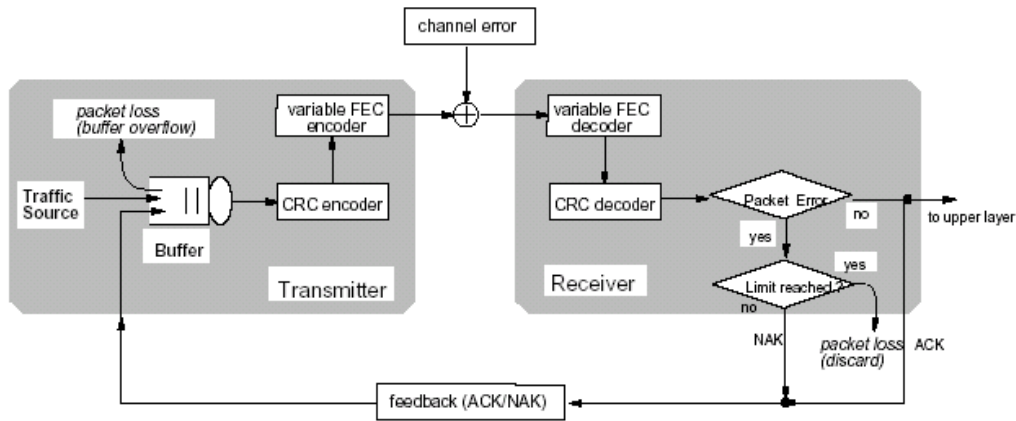
Παίρνουμε σαν παράδειγμα ένα δίκτυο WLAN και εξετάζουμε τον μηχανισμό που συμβάλλει στην μείωση της διαθέσιμης χωρητικότητας. Η επίδοση αυτού του ασύρματου δικτύου στην περιοχή που καλύπτεται από ένα AP εξαρτάται από πολλούς παράγοντες χαμηλών επιπέδων. Όμως, η δυνατότητα να μοντελοποιηθεί το δίκτυο WLAN, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-11 [21], όταν η εισερχόμενη κίνηση είναι εκρηκτική απλοποιεί την ανάλυση, σε βαθμό που η γνώση της πιθανότητας επανεκπομπής και της χωρητικότητας του συστήματος αρκούν για να περιγράψουν τη διαθεσιμότητα των πόρων.



**Σχήμα 3-11. Σχηματικό διάγραμμα ουράς αναμονής σε ένα Access Point.**

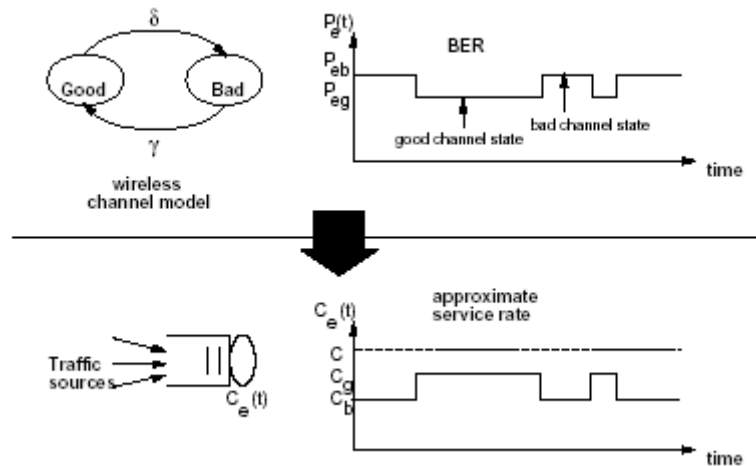
Έτσι, στην περίπτωση που η κίνηση είναι εκρηκτική και με δεδομένη την πιθανότητα επανεκπομπής  $p$  και τη χωρητικότητα  $c$ , η διαθέσιμη χωρητικότητα ισοδυναμεί με  $\tilde{c} = (1 - p)c$ . Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής. Ο αριθμός των επανεκπομπών για την επιτυχή μετάδοση ενός πακέτου μεγέθους  $X$  ακολουθεί γεωμετρική κατανομή. Επομένως ο συνολικός όγκος των δεδομένων που αποστέλλονται μέχρι να επιτευχθεί επιτυχής μετάδοση είναι  $X/(1 - p)$ . Έτσι, και ο χρόνος που απαιτείται για την επιτυχή μετάδοση επιμηκύνεται κατά ένα παράγοντα ίσο με  $1/(1 - p)$  και επομένως η ισοδύναμη μείωση του ρυθμού εξόδου του AP αντιστοιχεί σε ένα παράγοντα  $1 - p$ . Η παρατήρηση αυτή θα γίνει περισσότερο κατανοητή στην συνέχεια, οπότε και αναλύεται το μοντέλο Gilbert-Elliott και δίνεται η συσχέτιση της πιθανότητας επανεκπομπής ή ισοδύναμα της ανίχνευσης λαθών με τα χαρακτηριστικά του ασύρματου μέσου, όπως ο λόγος SNR και ο ρυθμός αποστολής λαθεμένων bits BER.

Ένα μεγάλο μέρος της ερευνητικής δραστηριότητας έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη μοντέλων για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του ασύρματου καναλιού και την προσέγγιση της συμπεριφοράς του διαθέσιμου ασύρματου εύρους ζώνης. Στα πλαίσια αυτά, στο υπόλοιπο αυτής της παραγράφου αναλύεται ένα απλό, αλλά αποτελεσματικό μοντέλο, το οποίο ονομάζεται μοντέλο Gilbert-Elliott (GE) [4][5][6]. Ο σκοπός μας είναι να χρησιμοποιηθεί αυτό το μοντέλο για την προσέγγιση των απωλειών που οφείλονται στο ασύρματο κανάλι, με βάση τα χαρακτηριστικά που μπορούν να προσδιοριστούν από την παρακολούθηση του ασύρματου μέσου. Η ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται στο πλαίσιο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-12 [4].



**Σχήμα 3-12. Πλαίσιο ασύρματου δικτύου για την ανάλυση της επίδοσης του ασύρματου μέσου.**

Λόγω της φύσης του ασύρματου καναλιού, η οποία επιβάλλει την αλλοίωση των χαρακτηριστικών των μεταφερόμενων στοιχείων, έχουν επιλεγεί διάφορα πρωτόκολλα, τα οποία ανιχνεύουν τα λαθεμένα δομικά στοιχεία (bits) με Cyclic Redundancy Check (CRC) διαδικασίες και διορθώνουν κάποια από αυτά ή στέλνουν αίτηση επανάληψης της αποστολής των δεδομένων. Παραδείγματα τέτοιων πρωτοκόλλων είναι το Automatic Repeat Request (ARQ) [47] και το Forward Error Correction (FEC) [48]. Σε γενικές γραμμές, το ARQ χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία, ενώ το FEC είναι πιο κατάλληλο για υπηρεσίες επιρρεπείς στην καθυστέρηση.



**Σχήμα 3-13. Μαρκοβιανό Μοντέλο Ροής Ρευστού Gilbert-Elliott**

Για την περίπτωση που εξετάζουμε, θεωρούμε ότι το μοντέλο GE αποτελείται από ένα Μαρκοβιανό σύστημα ροής ρευστού δύο καταστάσεων, όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 3-13 [4]. Κάθε κατάσταση αντιστοιχεί στην κατάσταση που επικρατεί στο ασύρματο κανάλι, μία για

την περίπτωση χαμηλού ρυθμού λαθεμένων bits (BER)  $P_{eg}$ , η οποία συμβολίζεται με “Good” και μία για την περίπτωση υψηλού BER  $P_{eb}$ , η οποία συμβολίζεται με “Bad”.

Η ικανότητα του μηχανισμού FEC του υποκείμενου προτύπου ARQ /FEC χαρακτηρίζεται από τρεις παραμέτρους. Η πρώτη από αυτές είναι ο αριθμός των bits που περιέχονται στην κωδικοποιημένη λέξη και η οποία συμβολίζεται με  $n$ , η δεύτερη παράμετρος είναι ο αριθμός των bits του καθαρού φορτίου των πακέτων  $k$  και η τρίτη είναι ο μέγιστος αριθμός των bits  $\tau$  που μπορούν να διορθωθούν σε μία κωδικοποιημένη λέξη. Σημειώνεται ότι το  $n$  εμπεριέχει μέσα του τα  $k$  bits του καθαρού φορτίου των πακέτων. Ο συσχετισμός μεταξύ των τριών αυτών παραμέτρων  $(n, k, \tau)$  του μηχανισμού FEC καθορίζεται από το όριο Hamming, το οποίο ορίζει ότι σε μία κωδική λέξη μήκους  $n$ , στην οποία αντιστοιχούν  $k$  bits του καθαρού φορτίου των πακέτων, μπορούν να διορθωθούν μέχρι  $\tau$  bits, αν ισχύει η σχέση  $2^{n-k} \geq \sum_{i=0}^{\tau} \binom{n}{i}$  [49].

Ο ρυθμός κωδικοποίησης μπορεί, τώρα, να ορισθεί ως  $e(\tau) = k/n(\tau)$ . Υποθέτοντας ότι τα λάθη των bits μέσα στο ασύρματο κανάλι, δεδομένης της κατάστασής του, είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, η πιθανότητα ένα πακέτο που λαμβάνεται στον δέκτη να μην μπορεί να διορθωθεί και να απαιτείται επανεκπομπή του, όταν το κανάλι είναι στην κατάσταση  $i$  δίνεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$P_c(i) = \sum_{j=\tau+1}^{n(\tau)} \binom{n(\tau)}{j} P_{e,i} (1 - P_{e,i})^{n(\tau)-j} \quad (3-13)$$

Έτσι, για να ληφθεί υπόψη το πλεονάζον φορτίο, λόγω του μηχανισμού FEC, το οποίο μειώνει το ρυθμό εξυπηρέτησης ή τη διαθέσιμη χωρητικότητα που μπορεί να επιτευχθεί σε ένα ασύρματο δίκτυο στην έξοδο των ταμιευτήρων, και με βάση το [6] καταλήγουμε στην ακόλουθη έκφραση για το μέγιστο πραγματικό εύρος ζώνης που διατίθεται σε κάθε χρονική στιγμή σε ένα ασύρματο μέσο που υλοποιεί μηχανισμούς ARQ /FEC:

$$C(i) = C_e(\tau)(1 - P_c(i)) \quad (3-14)$$

Στη σχέση αυτή το  $C$  εκφράζει τη χωρητικότητα του δικτύου, ενώ το  $C(i)$  αντιστοιχεί στην ελάττωση αυτής της τιμής της χωρητικότητας, ώστε να ληφθούν υπόψη οι απώλειες από την κατάσταση του καναλιού. Εδώ, μπορούμε να σημειώσουμε ότι αντί του διδιάστατου μοντέλου GE που παρουσιάστηκε στην παράγραφο αυτή, μπορεί να υιοθετηθεί αναλογικά ένα πολυδιάστατο μοντέλο, στο οποίο κάθε κατάσταση του Μαρκοβιανού μοντέλου αντιστοιχεί και σε διαφορετική κατάσταση του ασύρματου καναλιού. Μια τέτοια περίπτωση περιγράφεται στο [50].

Από τη σχέση (3-14), γίνεται φανερό ότι η χρησιμοποίηση του καναλιού για τον προσδιορισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας ενός ασύρματου δικτύου είναι ανάλογη του αριθμού των επανεκπομπών που πραγματοποιούνται στο ασύρματο κανάλι, μέσα από την σχέση  $\eta = e(\tau)(1 - P_c)$ . Ο ρυθμός κωδικοποίησης  $e(\tau)$  εφαρμόζεται για εκείνα τα δίκτυα, τα οποία υλοποιούν μηχανισμούς ανάθεσης κωδικών λέξεων για τη μετάδοση των δεδομένων. Το μοντέλο GE έχει ισχύ για όλα τα ασύρματα δίκτυα που υλοποιούν παρόμοιους μηχανισμούς με τα ARQ /FEC, όπως τα UMTS και WLAN, και στηρίζεται στην επεξεργασία των εκάστοτε τιμών του SNR και του BER που συλλέγονται από το δίκτυο. Έτσι, το μοντέλο αυτό δίνει μία βελτιωμένη τιμή για τη χωρητικότητα σε σχέση με το απλουστευμένο μοντέλο που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.6.1.

### 3.8. Συμπεράσματα

Οι απώλειες του ασύρματου περιβάλλοντος, μειώνουν δραστικά την επίδοση των πρωτοκόλλων μεταφοράς και έχουν σημαντική επίδραση στη διαθέσιμη χωρητικότητα που επιτυγχάνεται από το εκάστοτε ασύρματο δίκτυο για να εξυπηρετήσει τους τελικούς χρήστες. Έτσι, είναι φανερή η ανάγκη υλοποίησης και υποστήριξης μηχανισμών παρακολούθησης της τρέχουσας κατάστασης της ασύρματης ζεύξης και η λήψη αποφάσεων προσαρμογής των παραμέτρων που συμβάλλουν στη διαμόρφωση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων κάτω ζεύξης.

Με βάση τα παραπάνω, το κεφάλαιο αυτό περιέγραψε τα βασικά χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στον προσδιορισμό της χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων. Δόθηκε μία γενική ανάλυση για τον προσδιορισμό της χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων, η οποία στηρίζεται στη θεωρία μετάδοσης του σήματος πάνω από ένα ασύρματο κανάλι, που υπόκειται σε αλλοιώσεις λόγω θορύβων. Στην συνέχεια, περιγράφηκε η αρχιτεκτονική και τα βασικά χαρακτηριστικά κάποιων βασικών ασύρματων δικτύων, όπως του GPRS, του UMTS και του WLAN, τα οποία συμβάλλουν στη διαμόρφωση της ονομαστικής χωρητικότητας αυτών των δικτύων.

Επίσης, περιγράφηκε ένα μοντέλο για τον προσδιορισμό της χωρητικότητας ενός δικτύου WLAN, ανάλογα με το συνολικό αριθμό των τερματικών σταθμών που προσπαθούν να εγκαταστήσουν μία υπηρεσία. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποίησης του ασύρματου καναλιού, η οποία καθορίζει τη μείωση που υφίσταται η ονομαστική χωρητικότητα των ασύρματων δικτύων, το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώθηκε με μία προτεινόμενη μέθοδο διόρθωσης της τρέχουσας διαθέσιμης χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων, η οποία στηρίζεται στην παρακολούθηση της κατάστασης της ασύρματης ζεύξης και του επαναπροσδιορισμού της τιμής της τρέχουσας χωρητικότητας, με βάση την τιμή της πιθανότητας επανεκπομπής πακέτων λόγω αντίχνευσης λαθών.

### **3.9. Αναφορές**

- [1] Sung Won Kim, Byung-Seo Kim and Yuguang Fang, “Downlink and Uplink Resource Allocation in IEEE 802.11 Wireless LANs”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 54, No. 1, January 2005, pp. 320-327.
- [2] Giuseppe Bianchi, “Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 18, No. 3, March 2000, pp.535-547.
- [3] Jian Zhang, Liang Cheng, and Ivan Marsic, “Models for non-intrusive estimation of wireless link bandwidth”, Springer-Verlag Lecture Notes in Computer Science (LNCS) for Personal Wireless Communication 2003, Vol. 2775, pp. 334-348.
- [4] Jeong Geun Kim and Marwan Krunz, “Fluid Analysis of Delay Performance for QoS Support in Wireless Networks”, Seventh Annual International Conference on Network Protocols, 31<sup>st</sup> October – 3<sup>rd</sup> November 1999, Toronto, Canada
- [5] Marwan Krunz and Jeong Geun Kim, “Fluid analysis of delay and packet discard performance for QOS support in wireless networks,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 19, no. 2, 2001.
- [6] Jeong Geun Kim and Marwan Krunz, “Bandwidth Allocation in Wireless Networks with Guaranteed Packet-Loss Performance”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 8, No.3, June 2000.
- [7] IEEE Computer Society, “802.11 Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications” LAN MAN Standards Committee, IEEE Standard 802.11, 1999.
- [8] T. S. Rappaport, Wireless Communications Principles and Practice, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1996.
- [9] Y. Y. Kim and S. Li, “Modeling multipath fading channel dynamics for packet data performance analysis,” Wireless Networks, vol. 6, no. 6, pp. 481-492, 2001.
- [10] Christian Demetrescu, “LLC-MAC Analysis of General Packet Radio Service in GSM”, Bell Labs Technical Journal, July-September 1999, pp. 37-50.
- [11] C. Bettstetter, H. Jörg Vögel and J.Eberspächer, “Gsm Phase 2+ Packet Radio Service GPRS: Architecture, Protocols, and Air Interface”, IEEE Communications Surveys, <http://www.comsoc.org/pubs/surveys>, Third Quarter 1999, Vol. 2, No. 3, pp. 2-14.
- [12] Sudhir Dixit and Ramjee Prasad, “Wireless IP and Building the Mobile Internet”, Artech House, 2003, ISBN: 1-58053-354-X.
- [13] Toni Janevski, “Traffic Analysis and Design of Wireless IP Networks”, Artech House, 2003, ISBN 1-58053-331-0.



- [14] Deliverable 4b of IST-2001-33093 CREDO Project, “Architecture of NSMS for optimising composite radio environments”, February 2003.
- [15] ETSI TS 101 350 V8.9.0 (2001-11), “Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Overall description of the GPRS radio interface; Stage 2”, 3GPP 03.64 version 8.9.0 Release 1999.
- [16] D. Kouis, V. Tountopoulos, P. Stathopoulos, K. Kontovasilis, N. Mitrou, “Measurement-Based QoS Management in Composite Radio Environment”, 7th WSEAS International Conference on Communications, Corfu Island, Greece, July 2003.
- [17] C. Lindemann, A. Thümmel, “Evaluating the GPRS radio interface for different quality of service profiles”, in Informatik aktuell: 12th GI/ITG Fachtagung Kommunikation in Verteilten Systemen (KiVS), U. Killat, W. Lamersdorf (eds.), Hamburg, Germany, Springer-Verlag, 291-301, Feb. 2001.
- [18] C. Lindemann, A. Thümmel, ‘Performance Analysis of the General Packet Radio Service’, Proc. 21 Int. Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS), Phoenix, Arizona, 673-680, 2001.
- [19] D.D. Kouvatsos, K. Al-Begain, I. Awan, “A queueing model for a wireless GSM/GPRS cell with multiple service classes”, in Networking 2002, LNCS 2345, E. Gregori et al. (Eds.) Springer, 984-995, 2002.
- [20] C.H. Foh, B. Meini, B. Wydrowski, M. Zukerman, “Modelling and performance evaluation of GPRS”, in Proc. IEEE VTC 2001, Rhodes, Greece, 2108-2112, May 2001.
- [21] Deliverable 6b of IST-2001-33093 CREDO Project, “Specification of generic experiment components”, February 2003.
- [22] T. Ojanpera and R. Prasad, “An Overview of Third Generation Wireless Personal Communications: A European Perspective”, IEEE Personal Communications, December 1998, pp. 59-65.
- [23] 3GPP TS 23.101 V4.0.0, Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); General UMTS Architecture (Release 4), ETSI, April 2001.
- [24] 3GPP TS 25.401 V5.2.0, Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); UTRAN Overall Description (Release 5), 3GPP, March 2002.
- [25] 3GPP TS 23.107, Technical Specification Group Services and System Aspects; QoS Concept and Architecture (Release 5), V5.3.0, January 2002.
- [26] H. Gharavi, and Siavash m. Alamouti, “Multipriority Video Transmission for Third-Generation Wireless Communication Systems”, Proceedings of the IEEE, Vol. 87, No. 10, October 1999, pp. 1751-1763.

- [27] Szabolcs Malomsoky, Sandor Racz and Szilveszter Nadas, “Connection admission control in UMTS radio access networks”, Elsevier Science Publ., Computer Communications, Vol. 26, 2003, pp. 2011–2023.
- [28] David Lister, Shirin Dehghan, Ray Owen and Phil Jones, “UMTS Capacity and Planning Issues”, 3G Mobile Communication Technologies, IEE, Conference Publication No. 471, 2000, pp. 218-223.
- [29] Vincent Huang and Weihua Zhuang, “QoS-Oriented Access Control for 4G Mobile Multimedia CDMA Communications”, IEEE Communications Magazine, March 2002, pp.118-125.
- [30] Gast, S. Matthew, “802.11 Wireless Networks – The Definitive Guide”, O’Reilly & Associates, 2002
- [31] Ramjee Prasad and Luis Muñoz, “WLANs and WPANs towards 4G Wireless”, Artech House, 2003, ISBN 1-58053-090-7
- [32] IEEE 802.11b-1999, “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2,4 GHz Band”, 1999.
- [33] Vladimir Vishnevsky and Andrey Lyakhov, “802.11 LANs: Saturation Throughput in the Presence of Noise”, NETWORKING 2002 Conference, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002, LNCS 2345, pp. 1008–1019.
- [34] Eustathia Ziouva and Theodore Antonakopoulos, “The IEEE 802.11 Distributed Coordination Function in Small-Scale Ad-Hoc Wireless LANs”, International Journal of Wireless Information Networks, Vol. 10, No. 1, January 2003, pp.1-15
- [35] P. Chatzimisios, V. Vitsas and A. C. Boucouvalas, “Throughput and delay analysis of IEEE 802.11 protocol”, Proc. of the 5th IEEE International Workshop on Networked Appliances, Liverpool John Moores University, UK, October 30-31, 2002, pp. 168-174, ISBN: 0-7803-7686-2.
- [36] Javier del Prado and Sunghyun Choi, “Link Adaptation Strategy for IEEE 802.11 WLAN via Received Signal Strength Measurement,” in Proc. IEEE ICC’03, Anchorage, Alaska, USA, May 2003.
- [37] H. S. Chhaya and S. Gupta, “Performance modeling of asynchronous data transfer methods of IEEE 802.11 MAC protocol,” Wireless Networks, vol. 3, pp. 217–234, 1997.
- [38] G. Bianchi, L. Fratta, and M. Oliveri, “Performance analysis of IEEE 802.11 CSMA/CA medium access control protocol,” in Proc. IEEE PIMRC, Taipei, Taiwan, Oct. 1996, pp. 407–411.

- [39] L. C. Wang, S. Y. Huang, and A. Chen, “On the throughput performance of CSMA-based Wireless Local Area Network with directional antennas and capture effect: A Cross-Layer Analytical Approach,” in IEEE Wireless Communications and Networking Conference, May 2004.
- [40] Dennis Pong and Tim Moors, “Using Transmission Opportunities and Judicious Parameter Selection in Enhancing Real-time Applications over 802.11 Wireless LANs”, Proc. Australian Telecommunications Networks and Applications Conference (ATNAC), Dec. 8-10, 2003.
- [41] Jiwoong Jeong, Sunghyun Choi, and Chong-kwon Kim, “Achieving Weighted Fairness between Uplink and Downlink in IEEE DCF-Based WLANs”, to appear in Proc. IEEE QShine'2005 (invited contribution), Orlando, USA, August 22-24, 2005.
- [42] Dennis Pong and Tim Moors, “Fairness and Capacity Trade-off in IEEE 802.11 WLANs”, Proc. IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), November 16-18, 2004, pp. 310-317.
- [43] Jangeun Jun, Pushkin Peddabachagari and Mihail Sichitiu, “Theoretical Maximum Throughput of IEEE 802.11 and its Applications”, 2<sup>nd</sup> IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, Cambridge, Massachusetta, April 2003, pp 249-257.
- [44] G. Xylomenos, G. C. Polyzos, P. Mähönen, M. Saaranen, “TCP Performance Issues over Wireless Links”, IEEE Communications Magazine, Vol. 39, No 4, 2001, pp. 52–58.
- [45] Vassilis Tsaoussidis and Ibrahim Matta, “Open Issues on TCP for Mobile Computing”, The Journal of Wireless Communications and Mobile Computing, Wiley Academic Publishers, Issue 2, Vol. 2, February 2002
- [46] R. Ludwig and R.H. Katz, “The Eifel algorithm: making TCP robust against spurious retransmissions,” Computer Communications Review, vol. 30, no. 1, Jan. 2000, pp. 30-36.
- [47] Y. Bai, A. T. Ogielski and G. Wu. “Interactions of TCP and radio link ARQ protocol”, Proc. IEEE 50th VTC'99-Fall, 1998, pp. 1710-1714.
- [48] M. Luby and L. Vicisano, “Compact Forward Error Correction (FEC) Schemes”, RFC 3695, the Internet Society, 2004.
- [49] Andreas Willig, Martin Kubisch, Christian Hoene, and Adam Wolisz, “Measurements of a Wireless Link in an Industrial Environment using an IEEE 802.11-Compliant Physical Layer”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No 6, December 2002, pp. 100-114.
- [50] Shengquan Wang, Ripal Nathuji, Riccardo Bettati and Wei Zhao, “Providing Statistical Delay Guarantees in Wireless Networks”, 24th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'04), March 2004, Hachioji, Tokyo, Japan.

### **3.10. Βιβλιογραφία**

- [1] Pahlavan, Kaveh, Krishnamurthy Prashant, “Principles Of Wireless Networks – A Unified Approach”, Prentice Hall, 2002.
- [2] Stallings, William, “Wireless Communications and Networks”, Prentice Hall, 2002.

## **Κεφάλαιο 4**

# **Ενιαίο Σύστημα Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων**

### **4.1. Εισαγωγή**

Σε προηγούμενο κεφάλαιο δόθηκε μια εισαγωγή στους μηχανισμούς και τις αρχιτεκτονικές διαλειτουργικότητας μεταξύ ασύρματων ετερογενών συστημάτων. Οι μηχανισμοί που περιγράφηκαν δίνουν μια σαφή εικόνα των γενικών αρχών, απαιτήσεων και προδιαγραφών, οι οποίες είναι αναγκαίες για την επίτευξη της λειτουργικής διασύνδεσης τέτοιων συστημάτων. Όπως, βέβαια, αναφέρθηκε, η συνεργασία αυτή πρέπει να είναι αδιαφανής προς τον τελικό χρήστη, ο οποίος νοιάζεται μόνο για το αποτέλεσμα της συνεργασίας και όχι για τους μηχανισμούς ολοκλήρωσης των συστημάτων.

Ο δρόμος για την επίτευξη αδιάλειπτης επικοινωνίας είναι μεγάλος και ακολουθεί πολλά βήματα. Οι μηχανισμοί της χαλαρής και συμπαγούς σύζευξης προσφέρουν μόνο τον τρόπο ολοκλήρωσης των ασύρματων δικτύων. Ο μηχανισμός του Mobile IP προσφέρει μια ικανοποιητική λύση για τη δρομολόγηση των πακέτων που αφορούν σε κινητούς χρήστες μέσα στο διαδίκτυο και είναι το μέσο για τη γεφύρωση των δικτύων. Όμως, καμιά από αυτές τις αρχιτεκτονικές δεν μπορεί να εγγυηθεί τις απαιτήσεις των χρηστών για παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών. Στην ουσία, όλοι οι προαναφερθέντες μηχανισμοί ενεργούν στα χαμηλά στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλων.

Είναι, λοιπόν, απαραίτητη η ανάπτυξη μεθόδων και αλγορίθμων που θα συμπληρώνουν τους ήδη υπάρχοντες μηχανισμούς και θα δρουν στα πιο υψηλά επίπεδα ή ακόμα και εφ' όλης της στοίβας πρωτοκόλλων. Έτσι, θα ικανοποιηθεί η μελλοντική ανάγκη των χρηστών να κινούνται ασύρματα «παντού και πάντα», χωρίς περιορισμούς και συμβιβασμούς σε απαιτήσεις χαμηλότερες από τις πραγματικές τους ανάγκες. Η ανάπτυξη αυτών των πρωτοκόλλων οφείλει να αποτελέσει ένα συνονθύλευμα τεχνικών αναγκών και κοινωνικοοικονομικών απαιτήσεων, καθώς οι εξελίξεις της εποχής και τα επιχειρηματικά μοντέλα ευνοούν τη σύναψη συμφωνιών προς όφελος της ατομικής και κοινωνικής ύπαρξης.

Προς την κατεύθυνση αυτή έχουν περιγραφεί κάποια μοντέλα για την αποδοτική δρομολόγηση των εισερχόμενων αιτήσεων συνδέσεων προς τα κατάλληλα δίκτυα πρόσβασης [1][2][3], με σκοπό τη βέλτιστη κατανομή πόρων για την εγγύηση των κριτηρίων ποιότητας. Ωστόσο, τα μοντέλα αυτά δεν λαμβάνουν υπόψη τους τις πολιτικές του Παρόχου Υπηρεσιών, αλλά προτείνουν την κατανομή των πόρων, μόνο με βάση τα στοιχεία που διακρίνουν τους Παρόχους Δικτυακών Πόρων και, κυρίως, το κόστος. Ανάλογες εργασίες υπάρχουν στα [4][5], στις οποίες η παροχή ποιότητας διακρίνεται από την εύρεση των κατάλληλων τιμών κόστους των προσφερόμενων υπηρεσιών. Επίσης, στα [6][7][8][9] γίνεται μία προσπάθεια να συνδεθούν οι διαδικασίες παροχής ποιότητας με την κατάλληλη τιμολόγηση από πλευράς των Παρόχων Δικτυακών Πόρων και τον αποτελεσματικό έλεγχο αποδοχής των εισερχόμενων κλήσεων. Όμως, οι διαδικασίες που περιγράφονται εκεί, αγνοούν την κίνηση, που εισέρχεται στα δίκτυα και υιοθετούν ένα μοντέλο περιγραφής ανάλογο με μία σταθερή κίνηση εισροής κλήσεων Poisson.

Σε αντίθεση με τις εργασίες που μόλις παρουσιάστηκαν, το κεφάλαιο αυτό συνεισφέρει στο πεδίο της κατάλληλης επιλογής του εκάστοτε βέλτιστου δικτύου πρόσβασης, το οποίο αντιπροσωπεύεται από ένα συγκεκριμένο Πάροχο Δικτυακών Πόρων, για την εξυπηρέτηση των προσφερόμενων υπηρεσιών από ένα Πάροχο Υπηρεσιών. Η διαφορά με τα προηγούμενα έγκειται στο γεγονός ότι η επιλογή του βέλτιστου δικτύου ασύρματης πρόσβασης εμπεριέχει τόσο τις πολιτικές του Παρόχου Υπηρεσιών, οι οποίοι διαμορφώνουν το σύνολο των εφαρμογών τους, με βάση το βαθμό ικανοποίησης των χρηστών τους για την παροχή μίας συγκεκριμένης υπηρεσίας, όσο και τις πολιτικές του Παρόχου Δικτυακών Πόρων, ο οποίος αναλαμβάνει να διαμορφώσει την οικονομική του πολιτική, ανάλογα με τις απαιτήσεις ενός χρονικά μεταβαλλόμενου ανταγωνιστικού περιβάλλοντος, και να επιτελέσει τους απαραίτητους μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής των προσφερόμενων IP συνόδων υπηρεσιών, ώστε να εγγυηθεί την υποστήριξή τους, με βάση τα κριτήρια ποιότητας των χρηστών [10]. Μία σχετική έρευνα για την ανάθεση των Παρόχων Υπηρεσιών σε Παρόχους Δικτυακών Πόρων, με έμφαση στο κόστος και την αντίστοιχη διαμόρφωση της χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων παρουσιάζεται στο [11].

Έτσι, το κεφάλαιο αυτό περιγράφει την αρχιτεκτονική ενός ενιαίου συστήματος διαχείρισης υπηρεσιών και δικτυακών πόρων (ΕΣΔΥΔΠ). Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα αυτό επιτρέπει τον έλεγχο της προσφερόμενης κίνησης και την ευέλικτη διαχείριση πόρων σε ένα σύνθετο ασύρματο περιβάλλον, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικά και τεχνικά κριτήρια. Το σύστημα αυτό συμβάλλει στην επίτευξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ ανομοιογενών συστημάτων και στην αποτελεσματική διαχείριση των υπηρεσιών, με βάση τις απαιτήσεις των χρηστών και τις τρέχουσες δυνατότητες των δικτύων.

Πρέπει να σημειώσουμε, εδώ, ότι το [12] παρουσιάζει μία παρόμοια εργασία, σχετικά με την αρχιτεκτονική και τα χαρακτηριστικά ενός αλγορίθμου επιλογής του βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, η οποία εστιάζει στο κομμάτι της κατάλληλης διαμόρφωσης των προσφερόμενων υπηρεσιών από πλευράς του Παρόχου Υπηρεσιών, με βάση τα μικροοικονομικά μοντέλα που διακρίνουν τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα [13]. Όμως, η κατάλληλη διαχείριση των

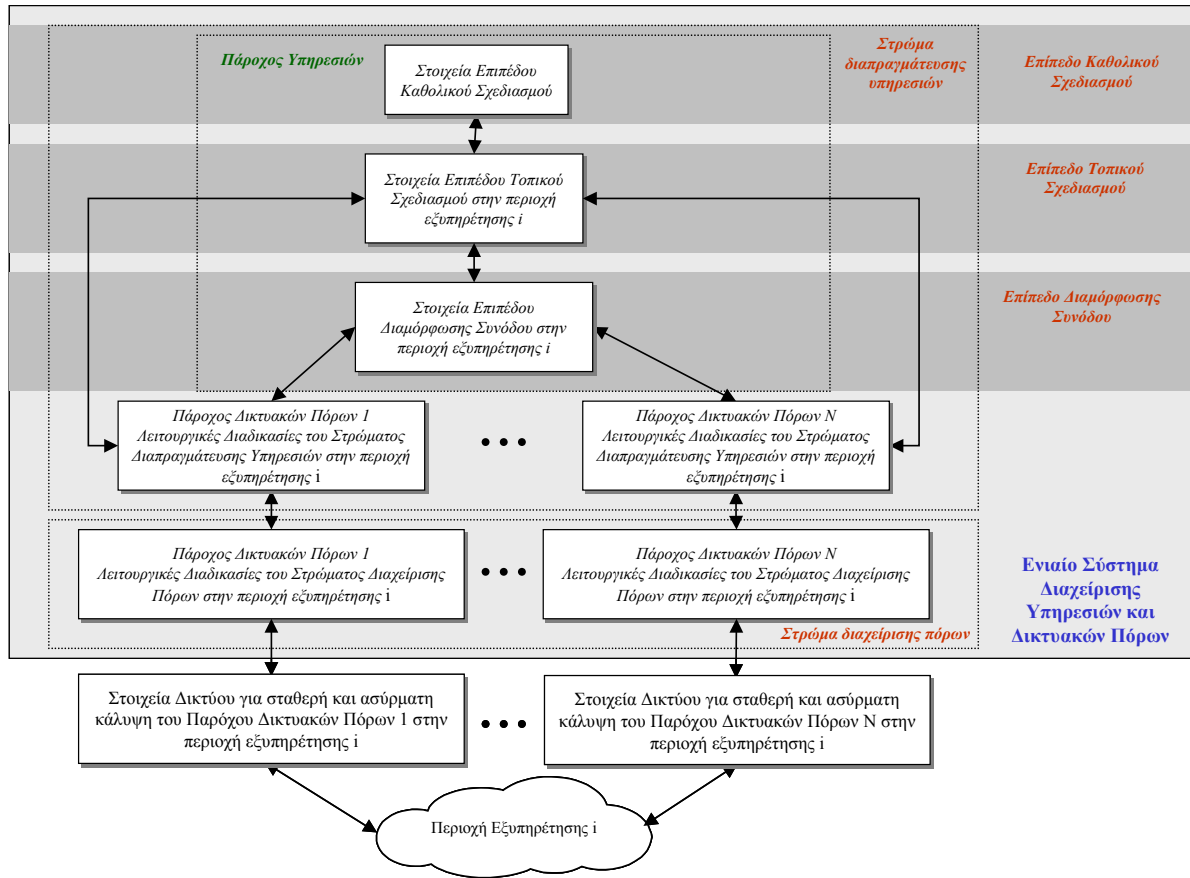
πόρων ενός ασύρματου δικτύου απαιτεί και την αξιοποίηση των μηχανισμών ελέγχου της κίνησης, όπως συνιστάται και στο [14]. Έτσι, η παρούσα εργασία έρχεται να συμπληρώσει την [12], με την εξέταση των πολιτικών που διέπουν τις λειτουργίες των Παρόχων Δικτυακών Πόρων με περισσότερο τεχνικά στοιχεία και ιδιαίτερα τη μελέτη των παραμέτρων που συμβάλλουν στην υλοποίηση ενός αποδοτικού μηχανισμού ελέγχου αποδοχής της κίνησης IP στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα.

## **4.2. Γενική Αρχιτεκτονική του Συστήματος**

Το ενιαίο σύστημα διαχείρισης υπηρεσιών και δικτυακών πόρων (ΕΣΔΥΔΠ) είναι ένα μεσισμικό σύστημα διαχείρισης, το οποίο δρα με σκοπό να γεφυρώσει την παροχή των ζητούμενων από τους χρήστες υπηρεσιών με την ανάθεση των ασύρματων δικτυακών πόρων [15][16]. Οι βασικοί παράγοντες του ΕΣΔΥΔΠ είναι, όπως έχει, ήδη, αναφερθεί, οι Πάροχοι Υπηρεσιών, οι Πάροχοι Δικτυακών Πόρων και οι Πάροχοι του Περιεχομένου Υπηρεσιών. Στα επόμενα, ο στόχος μας είναι να αναλύσουμε τις βασικές αρχές επικοινωνίας ανάμεσα στους Παρόχους Υπηρεσιών και στους Παρόχους Δικτυακών Πόρων, γι' αυτό και θα παραλείψουμε την αναφορά στους Παρόχους του Περιεχομένου Υπηρεσιών. Επίσης, επειδή ο αντικειμενικός μας σκοπός είναι η ανάλυση των διαδικασιών επιλογής του βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, στην περιγραφή του ΕΣΔΥΔΠ παραλείπουμε τα δομικά στοιχεία των Μεσιτών Υπηρεσίας και Δικτυακών Πόρων και επικεντρώνουμε στα απαραίτητα επίπεδα διαχείρισης, που είναι αναγκαία για την επιλογή αυτή, τόσο από την πλευρά των αντιπροσώπων της αιτούμενης υπηρεσίας όσο και από την πλευρά των δικτύων που διαθέτουν το απαιτούμενο εύρος ζώνης για την εξυπηρέτηση των χρηστών.

Εκείνο που πρέπει να τονιστεί είναι ότι το ΕΣΔΥΔΠ λειτουργεί ανεξάρτητα από όλους τους Πάροχους αυτούς και είναι υπεύθυνο για το διακανονισμό των μεταξύ τους σχέσεων και αλληλεπιδράσεων, με τρόπο ανάλογο με αυτόν που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 για τους Μεσίτες. Το Σχήμα 4-1 συνοψίζει τα βασικά κομμάτια του απλοποιημένου ΕΣΔΥΔΠ [17].

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4-1, η αρχιτεκτονική κάθε δομικού κομματιού του συστήματος διακρίνεται σε δύο στρώματα, τα οποία δρουν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Αυτά είναι το στρώμα διαπραγμάτευσης υπηρεσιών και το στρώμα διαχείρισης πόρων. Επίσης, οι λειτουργικές διαδικασίες κάθε οντότητας είναι κατανεμημένες σε διάφορα επίπεδα, τα οποία, να μεν είναι αμιγώς διαχωρισμένα μεταξύ τους, αλλά οι λειτουργίες του ενός κρίνονται απαραίτητες για τις λειτουργίες του άλλου.



**Σχήμα 4-1. Αρχιτεκτονική Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων.**

Το στρώμα διαπραγμάτευσης υπηρεσιών είναι εκείνο το στρώμα του συστήματος, στο οποίο λαμβάνουν χώρα οι διαδικασίες αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε όλες τις επιχειρηματικές οντότητες του συστήματος. Το στρώμα διαχείρισης πόρων είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο των διαθέσιμων πόρων των Παρόχων Δικτυακών Πόρων μεταξύ των διαφόρων στοιχείων δικτύου εντός της ίδιας λειτουργικής οντότητας.

Οι επόμενες δύο ενότητες αναλύουν τη συμπεριφορά αυτών των στρωμάτων και τις βασικές τους λειτουργίες. Η τελευταία ενότητα αυτού του κεφαλαίου περιγράφει τα επίπεδα διαχείρισης που διακρίνονται στο Σχήμα 4-1, στην πλευρά του Παρόχου Υπηρεσιών.

#### 4.2.1. Στρώμα διαπραγμάτευσης υπηρεσιών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στο στρώμα διαπραγμάτευσης υπηρεσιών λαμβάνουν χώρα όλες οι διαδικασίες αλληλεπίδρασης μεταξύ των λειτουργικών οντοτήτων ενός μελλοντικού συστήματος διαχείρισης ασύρματων δικτύων, δηλαδή των χρηστών, των Παρόχων Υπηρεσιών και των Παρόχων Δικτυακών Πόρων. Το στρώμα αυτό προσφέρει τη διεπαφή μεταξύ των διαφόρων οντοτήτων, καθώς και με τις υπηρεσίες που προσφέρονται από τα γειτονικά στρώματα



της ίδιας οντότητας. Εκείνο που πρέπει να αναφερθεί είναι, ότι οι διαδικασίες που πραγματοποιούνται εντός του στρώματος διαπραγμάτευσης υπηρεσιών πρέπει να διακρίνονται από την αμεσότητα στις τελικές αποφάσεις και τη γρήγορη ανταπόκριση στις αιτούμενες υπηρεσίες.

Τα μέλη του ΕΣΔΥΔΠ συνεργάζονται αλλά και συναγωνίζονται για να διασφαλίσουν τη δυναμική και κατανεμημένη διαχείριση των ασύρματων δικτύων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συνεχή διαπραγμάτευση και επαναδιαπραγμάτευση των υπηρεσιών και των δικτυακών πόρων, σύμφωνα με διάφορα κριτήρια, όπως η τρέχουσα κατανομή των διαθέσιμων πόρων και η προβλεπόμενη προσφερόμενη κίνηση στο σύστημα. Η διαπραγμάτευση λαμβάνει χώρα τόσο εντός του στρώματος διαπραγμάτευσης υπηρεσιών, όσο και στα όρια αυτού του στρώματος με τα άλλα υπάρχοντα. Όροι, όπως η υπόληψη των οντοτήτων (reputation) και η συλλογή στατιστικών στοιχείων για την μέτρηση της απαραίτητης υπόληψης, είναι σημαντικοί στο στρώμα αυτό. Οι παράμετροι που καθορίζουν την υπόληψη μιας οντότητας στο ενιαίο περιβάλλον προέρχονται από την αλληλεπίδραση με τα υπόλοιπα στρώματα και επίπεδα. Αυτές είναι αποφασιστικής σημασίας, αφού μπορούν να καθορίσουν τις στρατηγικές διαπραγμάτευσης που θα υιοθετήσει η λειτουργική οντότητα σε όλες τις αλληλεπιδράσεις της στα πλαίσια του σύνθετου ασύρματου περιβάλλοντος.

Ο όρος διαπραγμάτευση είναι ουσιώδης για την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων σε ένα πολυσυλλεκτικό περιβάλλον. Η διαπραγμάτευση σε ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνει την επικοινωνία μεταξύ Παρόχων Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων για τον καθορισμό ενός αποδεκτού επιπέδου ποιότητας της προσφερόμενης υπηρεσίας, την αλληλεπίδραση μεταξύ των Παρόχων Δικτυακών Πόρων, σε περιπτώσεις που το επιχειρηματικό μοντέλο επιτρέπει τη συνεργασία μεταξύ ετερόκλητων οντοτήτων για την εξεύρεση πόρων, και τη διαπραγμάτευση μεταξύ χρηστών και Παρόχων Υπηρεσιών για την πρόσβαση σε μία συγκεκριμένη υπηρεσία.

Από εμπορική άποψη, οι συναλλαγές μικρής αξίας επιτρέπουν κάποια περιθώρια ρίσκου, όταν είτε τα χρονικά ή τα οικονομικά όρια είναι στενά για την εξεύρεση της ιδανικής συναλλαγής. Μία τακτική περιλαμβάνει την παρακολούθηση των υπηρεσιών ανά δεδομένα χρονικά διαστήματα. Κατά τη διάρκεια του διαστήματος παρακολούθησης, κάθε οντότητα, που διαχειρίζεται μια υπηρεσία, υπόκειται στα χαρακτηριστικά των συμφωνιών που έχουν κατακυρωθεί. Το αποτέλεσμα της συναλλαγής αποτελεί ένα κριτήριο για τη διαμόρφωση του μοντέλου υπόληψης της οντότητας από τις άλλες συναλλασσόμενες. Έτσι, κάθε Πάροχος Υπηρεσιών διατηρεί ένα μοντέλο υπόληψης για τους Παρόχους Δικτυακών Πόρων, με τους οποίους συναλλάσσεται. Ομοίως, κάθε χρήστης μπορεί να έχει ένα παρόμοιο μοντέλο για τις συναλλαγές του με τους διαθέσιμους Παρόχους Υπηρεσιών.

Η διατήρηση ενός μοντέλου υπόληψης περιλαμβάνει ορισμένες υποχρεώσεις από πλευράς της λειτουργικής οντότητας, που το διαχειρίζεται. Καταρχήν, η οντότητα οφείλει να διακατέχεται από νομιμοφροσύνη και αμεροληψία, ώστε οι συναλλαγές να είναι κατά το δυνατόν αντικειμενικές. Κάθε οντότητα πρέπει να ανανεώνει συνεχώς τις παραμέτρους που καθορίζουν το

μοντέλο, με βάση το αποτέλεσμα των συναλλαγών και την τήρηση των όρων που έχουν τεθεί στα συμβόλαια προσυμφωνημένου επιπέδου υπηρεσιών (SLA).

Ο βαθμός ανταπόκρισης μιας οντότητας στις πραγματοποιούμενες διαπραγματεύσεις εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Οι βασικότεροι από αυτούς είναι η συμμόρφωση με τα συμβόλαια προσυμφωνημένου επιπέδου υπηρεσιών και η ελαστικότητα των διαχειριστών των μοντέλων. Για την καλύτερη κατανόηση αυτού, παραθέτουμε το ακόλουθο παράδειγμα: Ένας Πάροχος Υπηρεσιών διατηρεί ένα μοντέλο υπόληψης για ένα δεδομένο Πάροχο Δικτυακών Πόρων. Σε μια αίτηση εξυπηρέτησης μιας υπηρεσίας από τον Πάροχο Υπηρεσιών, ο Πάροχος Δικτυακών Πόρων κρίνει ότι δεν επαρκούν οι πόροι του για την υποστήριξη της υπηρεσίας σύμφωνα με το συμβόλαιο. Ωστόσο, αν οι συνθήκες το επιτρέπουν, υπό την έννοια ότι δε θα επιβληθούν υψηλές κυρώσεις, ο Πάροχος Δικτυακών Πόρων μπορεί να ρισκάρει την αποδοχή της αίτησης, χωρίς την απαιτούμενη κράτηση πόρων. Ακόμα και σε περιπτώσεις υψηλών κυρώσεων, ο Πάροχος Δικτυακών Πόρων μπορεί να αποφανθεί για την αποδοχή της αίτησης, αν διαπιστωθεί υποχρησιμοποίηση του δικτύου. Συνεπώς, η συνολική απόδοση του συστήματος εξαρτάται από το περιεχόμενο των συμβολαίων προσυμφωνημένου επιπέδου υπηρεσιών.

#### **4.2.2. Στρώμα διαχείρισης πόρων**

Το στρώμα διαχείρισης πόρων περιλαμβάνει τη διαχείριση των πόρων των ασύρματων δικτύων στην περιοχή κάλυψης του κάθε Παρόχου. Το στρώμα αυτό είναι υπεύθυνο για την καλύτερη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος. Η αξιοπιστία είναι η πιο σημαντική παράμετρος αυτού του επιπέδου, το οποίο περιλαμβάνει λειτουργίες χαμηλού επιπέδου, όπως η μεταγωγή, η σωστή διαχείριση της κυψέλης και η μεταφορά φορτίου σε άλλα δίκτυα.

Το στρώμα αυτό ανήκει εξ' ολοκλήρου στον Πάροχο Δικτυακών Πόρων. Ο Πάροχος υποχρεούται να διαχειρίζεται τους πόρους του κατά τον καλύτερο τρόπο, ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει στους όρους που έχουν τεθεί στα συμβόλαια προσυμφωνημένου επιπέδου υπηρεσιών. Έτσι, δύναται να επιβιώσει σε ένα σκληρό, ανταγωνιστικό περιβάλλον και να φαίνεται όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστος. Σε ιδιαίτερα απαιτητικές συνθήκες, όταν ο Πάροχος θέλει να είναι αξιόπιστος, αλλά δε διαθέτει τα κατάλληλα αποθέματα για να το επιτύχει (π.χ. δεν έχει πολλούς πόρους για να ικανοποιήσει μια αίτηση εξυπηρέτησης), μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε ποικίλους τρόπους.

Ο πρώτος τρόπος για τη διασφάλιση πόρων στηρίζεται σε τυπικές διαδικασίες συνεργασίας μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του ίδιου δικτύου. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η επιλογή ενός διαφορετικού τύπου κυψέλης κατά τη σύνδεση που, συνάμα, μπορεί να σημαίνει και χαμηλότερο επίπεδο ποιότητας από το ζητούμενο. Ένα άλλο παράδειγμα αποτελεί η εξαναγκασμένη μεταγωγή μιας κλήσης σε μια διαφορετική κυψέλη, που, επίσης, μπορεί να σημαίνει και υποστήριξη σε χαμηλότερο του ζητούμενου επίπεδο υπηρεσίας. Όλα αυτά τα

παραδείγματα εντάσσονται σε συμβατικούς μηχανισμούς διαχείρισης του στρώματος αυτού, οι οποίοι, λίγο έως πολύ, υπάρχουν και λειτουργούν στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Ένας άλλος τρόπος για την εξασφάλιση πόρων, στην περίπτωση που οι προαναφερθέντες μηχανισμοί δεν επαρκούν ή είναι ανεπιθύμητοι (δεδομένου ότι μπορεί να συνοδεύονται από τη μείωση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας), είναι η συνδυασμένη διαχείριση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος. Αυτό σημαίνει ότι ο Πάροχος Δικτυακών Πόρων μπορεί να συμμετάσχει στη λειτουργική διασύνδεση των συστημάτων και να επιτρέψει τη μετακίνηση χρηστών σε άλλα δίκτυα. Αυτός ο τρόπος διασφάλισης πόρων αποτελεί μια καινοτομία στον τομέα της σύγχρονης τηλεπικοινωνιακής αγοράς και ένα απαραίτητο βήμα προς τα συστήματα τέταρτης γενιάς.

#### **4.2.3. Επίπεδα διαχείρισης του Παρόχου Υπηρεσιών**

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4-1, το κομμάτι του ΕΣΔΥΔΠ που αναφέρεται στους Παρόχους Υπηρεσιών μπορεί, παραπέρα, να χωριστεί σε τρία επίπεδα, τα οποία είναι τα ακόλουθα: Επίπεδο Διαμόρφωσης Συνόδου, Επίπεδο Τοπικού Σχεδιασμού και Επίπεδο Καθολικού Σχεδιασμού [18]. Καθένα από αυτά τα επίπεδα περιέχει ένα τύπο στοιχείων, τα οποία μπορούν να διαχωριστούν από τα άλλα στοιχεία των υπόλοιπων επιπέδων, με βάση τα χρονικά και γεωγραφικά κριτήρια όπου λειτουργούν. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα στοιχεία που ανήκουν στα επίπεδα αυτά μπορούν να συνεργάζονται με τις ομότιμες οντότητες των Παρόχων Δικτυακών Πόρων που εντάσσονται στο στρώμα διαπραγμάτευσης υπηρεσιών.

Μια βασική επιλογή σχεδίασης του συστήματος περιλαμβάνει την ανάθεση απλών μηχανισμών και λειτουργιών στο Επίπεδο Διαμόρφωσης Συνόδου και την μεταφορά των πολύπλοκων μηχανισμών βελτιστοποίησης σε υψηλότερα επίπεδα. Η επιλογή αυτή κρίνεται αναγκαία, ώστε να επιτρέψει στο Επίπεδο Διαμόρφωσης Συνόδου να λαμβάνει γρήγορες αποφάσεις και, επομένως, να αντιδρά ικανοποιητικά σε δύσκολες συνθήκες και σε πλήθος ταυτόχρονων αιτήσεων. Αντίθετα, οι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα στο Επίπεδο Τοπικού Σχεδιασμού είναι πιο μακροπρόθεσμοι και, άρα, μπορούν να διακρίνονται από κάποια πολυπλοκότητα.

Τα στοιχεία του Επιπέδου Διαμόρφωσης Συνόδου διαχειρίζονται τις εισερχόμενες κλήσεις συνόδου. Κάθε αίτηση για κλήση μιας συνόδου παράγεται από έναν χρήστη (συνδρομητή ή πελάτη), ο οποίος έχει εγγραφεί σε ένα σύνολο υπηρεσιών και ανήκει σε μια συγκεκριμένη κλάση χρηστών. Σε απάντηση αυτής της αίτησης, το Επίπεδο Διαμόρφωσης Συνόδου θα πρέπει να υποδείξει το επίπεδο ποιότητας αναφοράς και τον κατάλληλο Πάροχο Δικτυακών Πόρων για κάθε υπηρεσία και κλάση χρηστών.

Για την επίτευξη του ρόλου του, το Επίπεδο Διαμόρφωσης Συνόδου χρησιμοποιεί πληροφορία, η οποία καθορίζει, για κάθε υπηρεσία και κλάση χρηστών, το επίπεδο ποιότητας αναφοράς, τον κατάλληλο, από οικονομική άποψη, Πάροχο Δικτυακών Πόρων και το μέγιστο φορτίο που μπορεί να υποστηρίξει καθένα από τα διαθέσιμα δίκτυα. Τα στοιχεία, λοιπόν, αυτού του επιπέδου διαμορφώνονται βάσει αυτής της πληροφορίας, ανάλογα με τις αποφάσεις των στοιχείων των

υψηλότερων επιπέδων. Έτσι, πραγματοποιούν μόνο λειτουργίες παρακολούθησης για τον έλεγχο των εισερχομένων κλήσεων συνόδου, αποφεύγοντας την εμπλοκή με μηχανισμούς εξιδανίκευσης, οι οποίοι είναι σύνθετοι και πολύπλοκοι.

Επίσης, τα στοιχεία του Επιπέδου Διαμόρφωσης Συνόδου είναι υπεύθυνα για την παρακολούθηση της απόδοσης του δικτύου και την ενεργοποίηση των κατάλληλων αλγορίθμων για την αναδιαμόρφωσή του, όταν αυτό απαιτείται. Σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές, πραγματοποιούν διαδικασίες ελέγχου για τη διαπίστωση της επιθυμητής παροχής της ζητούμενης υπηρεσίας. Αυτό σημαίνει ότι παρακολουθούν το φορτίο ανά υπηρεσία και κλάση χρηστών, καθώς και τα επίπεδα ποιότητας που προσφέρονται από τα δίκτυα, στην συγκεκριμένη περιοχή.

Η διαμόρφωση των στοιχείων του Επιπέδου Διαμόρφωσης Συνόδου προδιαγράφει για κάθε υπηρεσία και κλάση χρηστών το επίπεδο ποιότητας αναφοράς, το οποίο θα πρέπει να προσφέρεται από τους Πάροχους Δικτυακών Πόρων, τους πιο κατάλληλους Πάροχους Δικτυακών Πόρων, καθώς και το μέγιστο φορτίο που μπορεί να υποστηρίξει καθένας από αυτούς. Σε περιπτώσεις ανακατανομής του φορτίου, αυτή η διαμόρφωση κρίνεται απαραίτητη. Συνεπώς, τα στοιχεία αυτά θα πρέπει περιοδικά να ζητούν την ανανέωση της πληροφορίας διαμόρφωσης του συστήματος από τα στοιχεία των υψηλότερων επιπέδων. Η ανανέωση αυτή λαμβάνει χώρα σε τμήματα της περιοχής εξυπηρέτησης που ελέγχονται από το ίδιο Επίπεδο Διαμόρφωσης Συνόδου και έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής.

Τα στοιχεία του Επιπέδου Τοπικού Σχεδιασμού πραγματοποιούν διαδικασίες ελέγχου και διαχείρισης σε ένα ευρύτερο κομμάτι της περιοχής εξυπηρέτησης. Είναι υπεύθυνα για την αναδιαμόρφωση των στοιχείων του Επιπέδου Διαμόρφωσης Συνόδου. Ο ρόλος τους είναι η βελτίωση της παρεχόμενης υπηρεσίας, στην περιοχή που ελέγχουν, για μια δεδομένη χρονική περίοδο.

Η ενεργοποίηση των μηχανισμών αυτού του επιπέδου περιλαμβάνει την αναδιάταξη του συστήματος στην συγκεκριμένη περιοχή εξυπηρέτησης. Ο απώτερος στόχος αυτών των μηχανισμών είναι η διαμόρφωση των στοιχείων του Επιπέδου Διαμόρφωσης Συνόδου. Οι μηχανισμοί αυτοί αποφασίζουν για τα νέα επίπεδα ποιότητας, στα οποία πρέπει να παρέχονται οι προσφερόμενες υπηρεσίες, τους πιο κατάλληλους Παρόχους Δικτυακών Πόρων, με βάση ορισμένα κριτήρια αξιοπιστίας και οικονομικής ανοχής και το μέγιστο φορτίο που μπορεί να υποστηρίξει καθένας από τους διαθέσιμους Παρόχους.

Εκείνο που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι το Επίπεδο Τοπικού Σχεδιασμού μπορεί να έχει μια όψη της ευρύτερης γεωγραφικής περιοχής. Αυτό, όμως, δεν σημαίνει ότι τα στοιχεία αυτού του επιπέδου δεν μπορούν να διατηρούν ένα προς ένα αντιστοιχία με τα ομότιμα του χαμηλότερου επιπέδου. Στην πραγματικότητα, αυτή είναι η προσέγγιση που υιοθετείται στο εξής σε αυτήν την εργασία.

Τα στοιχεία του Επιπέδου Καθολικού Σχεδιασμού εστιάζουν σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές ή ακόμα και σε ολόκληρη την περιοχή εξυπηρέτησης. Σκοπός τους είναι να βοηθούν τα στοιχεία

των κατωτέρων επιπέδων στην πραγμάτωση των στόχων τους με το να παρέχουν υποστήριξη σε καθολικές πολιτικές και πληροφορίες ευρέως φάσματος. Επίσης, μπορούν να στέλνουν προς τα στοιχεία του Επιπέδου Τοπικού Σχεδιασμού αιτήσεις για μεταβολή της διαμόρφωσης στην συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή που ελέγχουν.

### 4.3. Αλγόριθμος Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων

Το υποκεφάλαιο αυτό περιγράφει έναν αλγόριθμο επιλογής του βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων για τη διαχείριση των εισερχόμενων κλήσεων σε ένα Πάροχο Υπηρεσίας. Συγκεκριμένα, θέτει το περιβάλλον και ορίζει τα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν καθεμιά από τις εμπλεκόμενες οντότητες. Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να εφαρμοστεί εξίσου καλά σε κατανεμημένα και μη συστήματα, αλλά για χάριν απλούστευσης εμείς εστιάζουμε σε ένα κομμάτι μόνο της περιοχής εξυπηρέτησης [17]. Το πρόβλημα που περιγράφεται παρακάτω έχει να κάνει με την ευέλικτη διαχείριση των ζητούμενων υπηρεσιών από τους Παρόχους Υπηρεσιών και την αποτελεσματική διαχείριση των διαθέσιμων ασύρματων πόρων από τους Παρόχους Δικτυακών Πόρων. Στις ακόλουθες παραγράφους, ορίζεται το πρόβλημα με τις πολιτικές των εμπλεκόμενων οντοτήτων, διατυπώνεται το πρόβλημα με μαθηματικές εκφράσεις και δίνεται περιγραφικά το διάγραμμα λειτουργίας του αλγορίθμου [13][19].

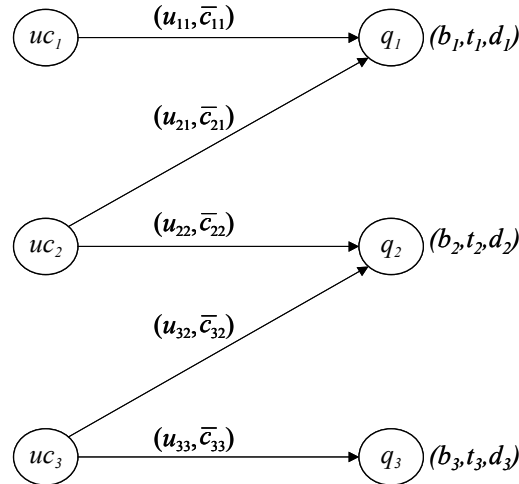
#### 4.3.1. Ορισμός του προβλήματος Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων

Έστω  $i$  το κομμάτι της περιοχής, στο οποίο υπάρχουν ένα πλήθος από Παρόχους Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων. Εστιάζουμε σε ένα μόνο Πάροχο Υπηρεσίας, τον οποίο συμβολίζουμε με  $SP$ , ενώ το σύνολο των διαθέσιμων Παρόχων Δικτυακών Πόρων συμβολίζεται με  $NP_{avail}$ . Στην περιοχή αυτή, υποθέτουμε ότι ο  $SP$  μπορεί να προσφέρει ένα σύνολο υπηρεσιών  $S$ . Το σύνολο των συνδρομητών του  $SP$  χωρίζεται σε κατηγορίες χρηστών, με βάση τα ειδικά χαρακτηριστικά κάθε χρήστη και την υπηρεσία, στην οποία οι χρήστες είναι εγγεγραμμένοι. Συμβολίζουμε με  $UC_s$  το σύνολο των κλάσεων χρηστών μιας υπηρεσίας  $s \in S$ . Υποθέτουμε, επίσης, ότι η υπηρεσία  $s$  μπορεί να προσφέρεται σε διακριτά επίπεδα υπηρεσίας  $Q_{s,uc}$  για μια συγκεκριμένη κλάση χρηστών  $uc \in UC_s$ , τα οποία αντιστοιχίζονται στην ουσία στα επίπεδα αναφοράς για την ποιότητα μιας υπηρεσίας.

Από την πλευρά του χρήστη, μπορούν να ορισθούν δύο παράμετροι, οι οποίες καθορίζουν το προφίλ του χρήστη, δηλαδή τις επιθυμίες του χρήστη που ανήκει στην κλάση  $uc$  για την παροχή της υπηρεσίας  $s$ . Αυτές είναι η μέγιστη τιμή του οικονομικού αντίτιμου, που ο χρήστης είναι διατεθειμένος να πληρώσει ανά επίπεδο ποιότητας  $q \in Q_{s,uc}$  της υπηρεσίας  $s$ , και ένα μέτρο αξιολόγησης του βαθμού ικανοποίησης για κάθε επίπεδο υπηρεσίας. Οι παράμετροι αυτές συμβολίζονται με  $\bar{c}_{s,uc,q}$  και  $u_{s,uc,q}$  αντίστοιχα.

Τα διάφορα επίπεδα ποιότητας της υπηρεσίας  $s$  μπορούν να διακριθούν μεταξύ τους, ανάλογα με τις πολιτικές που ακολουθεί ο Πάροχος Υπηρεσιών  $SP$ . Το είδος της προσφερόμενης υπηρεσίας καθορίζει και το σύνολο των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη για το διαχωρισμό των επιπέδων ποιότητας. Για παράδειγμα, στην περίπτωση μίας διαλογικής υπηρεσίας, τα διάφορα επίπεδα ποιότητας αντιστοιχούν σε διαφορετικές πιθανότητες μπλοκαρίσματος, οι οποίες καθορίζονται από το διάνυσμα  $B = \{b_i, i = 1, \dots, N_{s,uc}\}$ , όπου  $N_{s,uc}$  είναι το πλήθος των διαφορετικών επιπέδων ποιότητας της υπηρεσίας  $s$  ανά κλάση χρηστών  $uc \in UC_s$  της υπηρεσίας. Στην περίπτωση μίας αλληλεπιδραστικής υπηρεσίας, υπηρεσίας ροής ή, εν γένει, μίας υπηρεσίας μεταγωγής πακέτου, τα διάφορα επίπεδα ποιότητας αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές των παραμέτρων διέλευσης (throughput) και υφιστάμενης καθυστέρησης (delay) των πακέτων, δηλαδή  $T = \{t_i, i = 1, \dots, N_{s,uc}\}$  και  $d = \{d_i, i = 1, \dots, N_{s,uc}\}$  αντίστοιχα. Τα επίπεδα αυτά μπορούν να αντιστοιχούν, επίσης, στο ίδιο επίπεδο πιθανότητας μπλοκαρίσματος.

Εκείνο που πρέπει να σημειωθεί είναι το γεγονός ότι, ανάλογα με τις πολιτικές του Παρόχου  $SP$ , κάθε κλάση χρηστών μπορεί να αναφέρεται σε μέρος μόνο του συνόλου των διαθέσιμων επιπέδων ποιότητας. Αυτό απεικονίζεται παραστατικά στο Σχήμα 4-2, στο οποίο έχουμε θεωρήσει τρεις κλάσεις χρηστών της υπηρεσίας  $s$ , τα  $uc_1$ ,  $uc_2$  και  $uc_3$ . Η υπηρεσία  $s$  μπορεί να προσφέρεται σε τρία διακριτά επίπεδα ποιότητας, ονομαστικά τα  $q_1$ ,  $q_2$  και  $q_3$ . Τα επίπεδα αυτά αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές των παραμέτρων ανά κλάση χρηστών, δηλαδή καθορίζονται από το σύνολο  $b, t, d$ . Η κλάση  $uc_1$  θεωρούμε ότι έχει την υψηλότερη προτεραιότητα από όλες και μπορεί να αναφέρεται μόνο στο επίπεδο  $q_1$ . Ομοίως, το Σχήμα 4-2 απεικονίζει και τις υπόλοιπες σχέσεις των κλάσεων χρηστών με τα διαθέσιμα επίπεδα ποιότητας.



Σχήμα 4-2. Παράδειγμα εφαρμογής των πολιτικών του Παρόχου Υπηρεσιών.

Η συσχέτιση ενός επιπέδου ποιότητας  $q_i = \{q_1, q_2, q_3\}$  με μία κλάση χρηστών  $uc_i = \{uc_1, uc_2, uc_3\}$  ρυθμίζεται από το σύνολο των παραμέτρων των χρηστών που καθορίζουν το προφίλ, δηλαδή τη συμπεριφορά τους. Αυτές, όπως έχει αναφερθεί, είναι η μέγιστη τιμή του οικονομικού αντίτιμου  $\bar{c}_{s,uc,q}$  και ένα μέτρο αξιολόγησης της ικανοποίησης του χρήστη για την συγκεκριμένη υπηρεσία και για τη δεδομένη κλάση, στην οποία ανήκει, ανά επίπεδο ποιότητας  $u_{s,uc,q}$ .

Έχοντας θέσει τα χαρακτηριστικά τόσο του Παρόχου Υπηρεσίας όσο και του τελικού χρήστη, πρέπει να καθορίσουμε τα αντίστοιχα για τον Πάροχο Δικτυακών Πόρων. Υποθέτουμε ότι κάθε Πάροχος  $np \in NP_{avail}$  μπορεί να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές του συνόλου των υπηρεσιών  $S$ . Η συμπεριφορά του Παρόχου  $np$  καθορίζεται από δύο πολιτικές, οι οποίες έχουν να κάνουν τόσο με οικονομικά κριτήρια όσο και με τις τεχνικές δυνατότητες του εκάστοτε Παρόχου. Έτσι, σε κάθε  $np$  μπορούμε να διακρίνουμε την οικονομική πολιτική του για την ανάθεση των πόρων στις εισερχόμενες κλήσεις. Η πολιτική αυτή καθορίζεται από ένα σύνολο τιμών κόστους  $c(np, s, q)$  για την ανάθεση πόρων του Παρόχου  $np$  σε μία υπηρεσία  $s$ , η οποία προσφέρεται στο επίπεδο  $q$ . Φυσικά, για να είναι ανταγωνιστικός ο Πάροχος αυτός θα πρέπει να είναι ευέλικτος στον καθορισμό των τιμών κόστους που επιβάλλει, ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος (επίπεδο ανταγωνιστικότητας σε σχέση με τους άλλους Παρόχους) και την χρονική διάρκεια ή περίοδο ενοικίασης των πόρων. Η δεύτερη πολιτική έχει να κάνει με την μέγιστη χωρητικότητα του δικτύου  $L_{max}(np)$ , η οποία είναι ένα κριτήριο για τον μέγιστο αριθμό χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει ο Πάροχος  $np$ .

Οι χρήστες που βρίσκονται στην περιοχή  $i$  στέλνουν αιτήσεις εγκατάστασης κλήσεων συνόδων προς τα στοιχεία του Επιπέδου Διαμόρφωσης Συνόδου. Σε απάντηση, τα στοιχεία αυτά υποδεικνύουν για κάθε υπηρεσία το κατάλληλο επίπεδο ποιότητας  $q$  και τον πιο κατάλληλο Πάροχο  $np$ . Η απάντηση αυτή στηρίζεται σε πληροφορίες που έχουν ληφθεί από τα στοιχεία του Επιπέδου Τοπικού Σχεδιασμού. Τα στοιχεία του Επιπέδου Διαμόρφωσης Συνόδου, που είναι υπεύθυνα για την περιοχή  $i$ , παρακολουθούν την προσφερόμενη κίνηση ανά υπηρεσία και κλάση χρηστών, καθώς και το πραγματικό επίπεδο ποιότητας που προσφέρεται από το σύνολο των Παρόχων  $NP_{avail}$ , στην περιοχή  $i$ . Στην περίπτωση που διαπιστωθεί ότι η υπάρχουσα διαμόρφωση του συστήματος δεν επαρκεί για την σωστή εξυπηρέτηση του φορτίου, τα στοιχεία του Επιπέδου Διαμόρφωσης Συνόδου ενημερώνουν τα ομόλογά τους του Επιπέδου Τοπικού Σχεδιασμού ζητώντας αλλαγές στην υπάρχουσα διαμόρφωση. Αυτό επιτυγχάνεται από τα στοιχεία του Επιπέδου Τοπικού Σχεδιασμού μέσα από την εφαρμογή του αλγορίθμου επιλογής βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων.

Το προφίλ της ζήτησης μοντελοποιείται από ένα διάνυσμα  $D_s = \{d(s,uc) \mid \forall (s,uc) \in (S \times UC_s)\}$ . Κάθε στοιχείο αυτού του διανύσματος  $d(s,uc)$  αντιστοιχεί στη ζήτηση της υπηρεσίας  $s$ , η οποία εκκινεί σε μια δεδομένη χρονική στιγμή από τους χρήστες που ανήκουν στην κλάση  $uc$  του συγκεκριμένου Παρόχου Υπηρεσίας  $SP$  εντός των ορίων της περιοχής εξυπηρέτησης  $i$ .

#### 4.3.2. Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων

Το πρόβλημα επιλογής του βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων αποσκοπεί σε δύο στόχους. Ο πρώτος είναι ο υπολογισμός της ανάθεσης της ζήτησης κίνησης στα κατάλληλα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας, δηλαδή  $A_{QL} = \{ql(s,uc) \mid \forall (s,uc) \in (S \times UC_s)\}$ . Κάθε συνιστώσα αυτής της ανάθεσης,  $ql(s,uc)$  ( $ql(s,uc) \in Q_{s,uc}$ ), αντιπροσωπεύει το επιθυμητό επίπεδο υπηρεσίας, με το οποίο οι χρήστες της κλάσεως  $uc$  θα πρέπει να έχουν πρόσβαση στην υπηρεσία  $s$  τη δεδομένη χρονική στιγμή και για την συγκεκριμένη περιοχή εξυπηρέτησης.

Ο δεύτερος στόχος του προβλήματος είναι ο υπολογισμός της ανάθεσης της ζήτησης κίνησης στους κατάλληλους Παρόχους Δικτυακών Πόρων, δηλαδή  $A_{NP} = \{r(np,s,uc) \mid \forall (np,s,uc) \in (NP_{avail} \times S \times UC_s)\}$ . Κάθε συνιστώσα αυτής της ανάθεσης  $r(np,s,uc)$  αντιπροσωπεύει το μέρος εκείνο της ζήτησης, το οποίο ανήκει στην κλάση χρηστών  $uc$  και θα πρέπει να εξυπηρετηθεί από τον Πάροχο  $np \in NP_{avail}$ . Φυσικά, ο Πάροχος  $np$  θα πρέπει να δύναται να ικανοποιήσει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάθεση της ζήτησης υπηρεσιών στα κατάλληλα επίπεδα ποιότητας  $A_{QL}$ .

Η αξιολόγηση της επίδοσης του όλου συστήματος, με όρους την κατάλληλη ανάθεση των υπηρεσιών σε επίπεδα υπηρεσίας και της ανάθεσης της ζήτησης κίνησης σε Παρόχους Δικτυακών Πόρων, γίνεται μέσω μίας συνάρτησης, η οποία ονομάζεται συνάρτηση αμεροληψίας. Η συνάρτηση αυτή αποσκοπεί στο να συνθέσει τις συνιστώσες του προβλήματος, δηλαδή  $A_{QL}$  και  $A_{NP}$  σε μία ενιαία έκφραση. Η συνάρτηση αυτή, με άλλα λόγια, αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση των αλγορίθμων εύρεσης του κατάλληλου επιπέδου ποιότητας ανά υπηρεσία και του κατάλληλου Παρόχου Δικτυακών Πόρων ανά είδος προσφερόμενης κίνησης. Η βελτιστοποίηση αυτή έγκειται στη μεγιστοποίηση της συνάρτησης αμεροληψίας, η οποία δίνεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$OF(A_{QL}, A_{NP}) = \sum_{s \in S} \sum_{uc \in UC_s} d(s,uc) \cdot u_{s,uc,ql(s,uc)} - \sum_{s \in S} \sum_{uc \in UC_s} \sum_{np \in NP_{avail}} r(s,uc,np) \cdot c(np,s,ql(s,uc)) \quad (4-1)$$



Η μέθοδος επίλυσης του προβλήματος υπόκειται σε ένα σύνολο περιορισμών, οι οποίοι συγκεκριμενοποιούν τα ζεύγη επίλυσης της  $OF(A_{QL}, A_{NP})$ . Έτσι, ο πρώτος περιορισμός υποδηλώνει ότι το σύνολο των συνιστωσών επίλυσης του αλγορίθμου εύρεσης του κατάλληλου Παρόχου Δικτυακών Πόρων ανά είδος προσφερόμενης κίνησης δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το σύνολο της ζητούμενης προσφερόμενης κίνησης, δηλαδή:

$$\sum_{np \in NP_{avail}} r(np, s, uc) \leq d(s, uc), \forall (s, uc) \in (S \times UC_s) \quad (4-2)$$

Η ανισότητα στην εξίσωση αυτή αντιπροσωπεύει το γεγονός ότι κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης ένα ποσοστό της ζήτησης μπορεί να απορριφθεί από το σύστημα, γιατί δεν μπορεί να απορροφηθεί από κανέναν Πάροχο Δικτυακών Πόρων.

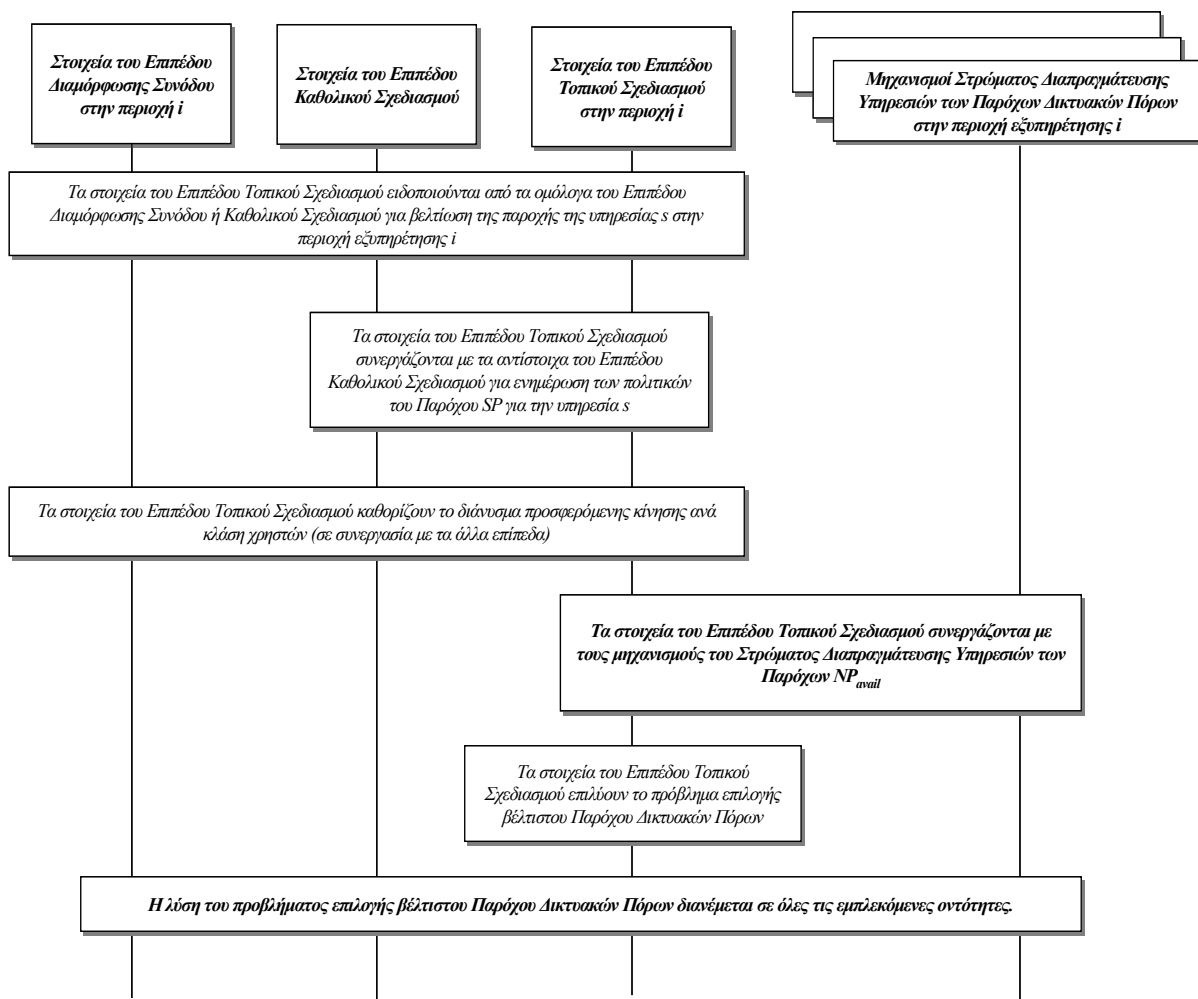
Ο δεύτερος περιορισμός οφείλεται στα φυσικά όρια που επιβάλλονται από τους ιδίους τους Παρόχους Δικτυακών Πόρων λόγω της περιορισμένης χωρητικότητάς τους. Αυτό αναλύεται στο γεγονός ότι το φορτίο που θα πρέπει να τεθεί σε έναν Πάροχο από την επίλυση του προβλήματος δε θα πρέπει να υπερβαίνει την συνολική του χωρητικότητα. Με τη μορφή εξισώσεων αυτό μεταφράζεται στο εξής:

$$r(np, A_{QL}, A_{NP}) \leq L_{\max}(np) \quad \forall np \in NP_{avail} \quad (4-3)$$

Μία ακόμα συνθήκη περιορισμού επιβάλλεται από την τάση που διέπει τις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες όσον αφορά τη φροντίδα και εξυπηρέτηση του τελικού χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος επίλυσης θα πρέπει να λάβει υπόψη της το γεγονός ότι ο χρήστης έχει ρητά δηλώσει στο προφίλ του, το οποίο είναι αποθηκευμένο στον Πάροχο Υπηρεσίας, στον οποίο είναι εγγεγραμμένος, το μέγιστο αποδεκτό οικονομικό τίμημα για την πρόσβαση σε μία υπηρεσία και σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας. Αυτό μπορεί να εκφραστεί μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

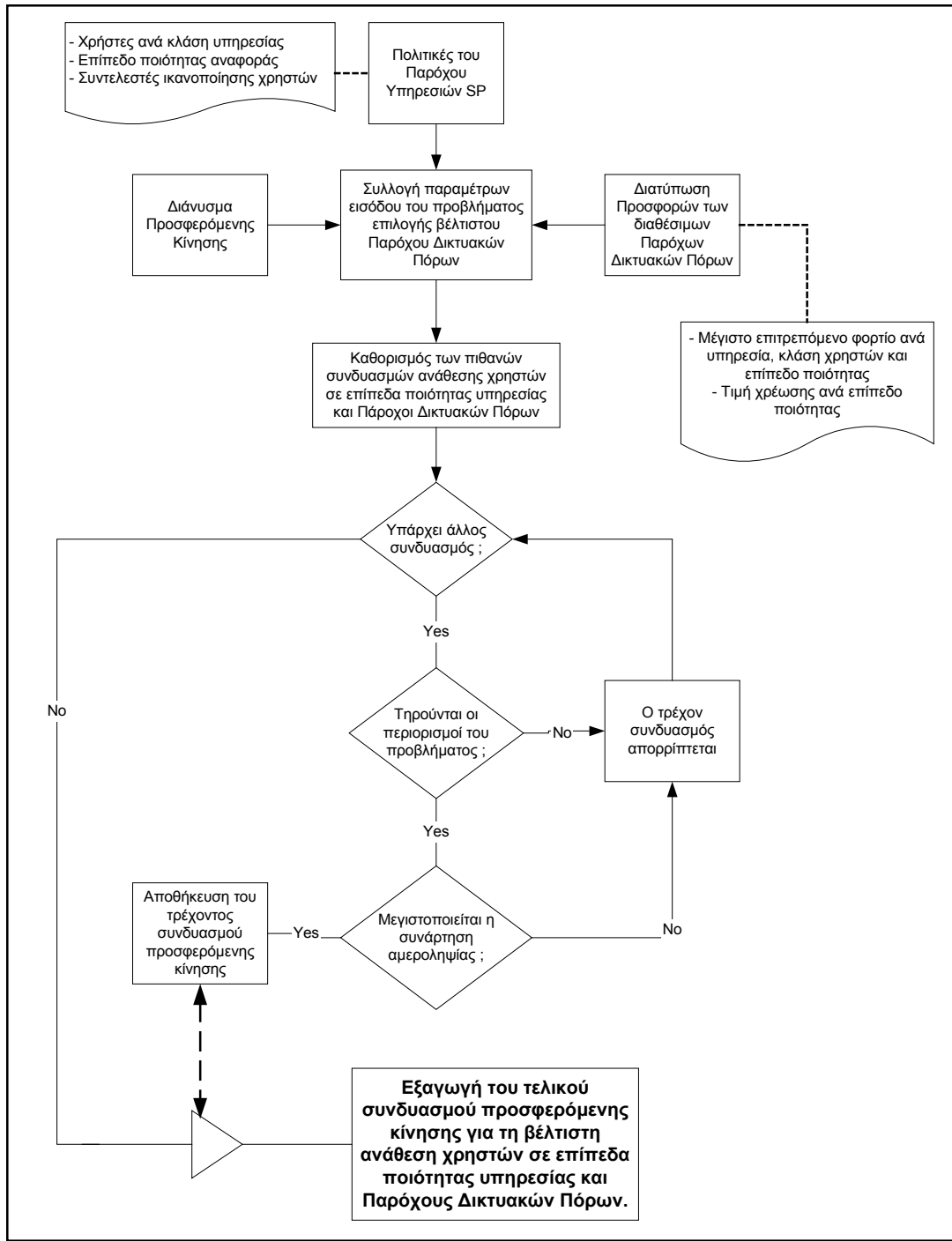
$$c(np, s, ql(s, uc)) < \bar{c}_{s,uc,ql_s(uc)}, \forall (s, uc) \in (S \times UC_s), \quad \forall np \in NP_{avail} : (r(np, s, uc) > 0) \quad (4-4)$$

Τέλος, αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι η λύση του προβλήματος της ανάθεσης της προσφερόμενης κίνησης σε επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας και Παρόχους Δικτυακών Πόρων θα πρέπει να διανεμηθεί σε όλα τα εμπλεκόμενα στοιχεία των διαφόρων επιπέδων και στρωμάτων διαχείρισης. Τα στοιχεία αυτά είναι του Επιπέδου Διαμόρφωσης Συνόδου, του Επιπέδου Καθολικού Σχεδιασμού και τα στοιχεία των Παρόχων Δικτυακών Πόρων που ανήκουν στο στρώμα διαπραγμάτευσης υπηρεσιών. Το Σχήμα 4-3 απεικονίζει διαγραμματικά τα στάδια του προβλήματος επιλογής βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων.



**Σχήμα 4-3. Διαγραμματική απεικόνιση του προβλήματος επιλογής βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων.**

Το Σχήμα 4-4 απεικονίζει το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου επιλογής βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων για την επίλυση του ομώνυμου προβλήματος.



**Σχήμα 4-4. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου επιλογής βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων.**

#### 4.4. Παράμετροι του προβλήματος

Η παράγραφος αυτή συνοψίζει τις παραμέτρους του αλγορίθμου, οι οποίες έχουν σημαντική επίδραση στην τελική απόφαση επιλογής του κατάλληλου συνδυασμού Παρόχου Δικτυακών Πόρων και επιπέδου ποιότητας ανά υπηρεσία. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι αυτοί έχουν να κάνουν με τη συμπεριφορά των υπαρχόντων Παρόχων Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων, που καθορίζουν και τη δυναμική της επιβίωσής τους σε ένα σύγχρονο, επιχειρηματικό και εξαιρετικά ανταγωνιστικό περιβάλλον. Έτσι, οι παράμετροι αυτές αντανακλούν τα ιδιαίτερα οικονομικά και τεχνικά χαρακτηριστικά των Παρόχων και συνοψίζονται παρακάτω:

- Ο καθορισμός την τιμολογιακής πολιτικής του Παρόχου και η διαγραφή μιας οικονομικά ευέλικτης συμπεριφοράς που θα προσαρμόζεται στις ραγδαίες αλλαγές του τηλεπικοινωνιακού φορτίου.
- Ο κατάλληλος μηχανισμός Ελέγχου Αποδοχής που θα βελτιστοποιεί τη χρησιμοποίηση και αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και, παράλληλα, θα θωρακίζει την αξιοπιστία του Παρόχου με καθαρά πελατειακά κριτήρια.
- Η διαμόρφωση των συναρτήσεων χρησιμοποίησης για την ανάθεση μιας κλάσεως χρηστών που επιζητούν πρόσβαση σε μια υπηρεσία σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας.

Οι προαναφερθείσες παράμετροι αποτελούν το κλειδί για την επιτυχία του αλγορίθμου και συνάμα διασφαλίζουν τη δικαιοσύνη των μηχανισμών επιλογής του κατάλληλου τηλεπικοινωνιακού μονοπατιού για την εγκατάσταση και εξέλιξη στην παροχή μιας υπηρεσίας, είτε φωνής είτε δεδομένων. Στα επόμενα, αναλύουμε ξεχωριστά καθεμιά από αυτές τις παραμέτρους και αναφέρουμε τις τάσεις της επιστημονικής κοινότητας προς την κατεύθυνση του επιστημονικού πεδίου, που αναδεικνύει καθεμιά από αυτές τις παραμέτρους, αλλά και προτείνουμε βιώσιμες λύσεις υπό το πρίσμα των εξελίξεων στην τεχνολογία των μελλοντικών ασύρματων τηλεπικοινωνιών.

##### 4.4.1. Ανάλυση συμπεριφοράς του Παρόχου Δικτυακών Πόρων

Όπως περιγράφηκε και στην προηγούμενη ενότητα ο ρόλος των Παρόχων Δικτυακών Πόρων είναι, ιδιαίτερα, σημαντικός στον καθορισμό επιλογής της βέλτιστης λύσης. Επίσης, βοηθά στην καλύτερη αξιοποίηση του ραδιοφάσματος και στην εγγυημένη παροχή ποιότητας των ζητούμενων υπηρεσιών.

Η παράγραφος αυτή έχει σαν σκοπό να παρουσιάσει μερικούς μηχανισμούς, οι οποίοι επιτρέπουν στα δίκτυα και στους Παρόχους, γενικότερα, να διαμορφώνουν τις πολιτικές τους, με βάση τις απαιτήσεις του προσφερόμενου φορτίου και να μαθαίνουν από τις ραγδαίες αλλαγές ενός σύγχρονου περιβάλλοντος ανταγωνισμού. Πιο, συγκεκριμένα, περιγράφει τις εισαγωγικές σημειώσεις της θεωρίας του ισοδύναμου εύρους ζώνης, η οποία αποτελεί έναν αξιόλογο μηχανισμό αποτίμησης της προσφερόμενης κίνησης, σε σχέση με τις απαιτήσεις των χρηστών

για συγκεκριμένα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας, και δίνει το πλαίσιο, με βάση το οποίο γίνεται μια εκτίμηση της κοστολογικής πολιτικής ενός Παρόχου Δικτυακών Πόρων.

#### **4.4.1.1.Μηχανισμοί Ελέγχου Αποδοχής Ροών**

Ο αλγόριθμος επιλογής του κατάλληλου συνδυασμού Παρόχου Δικτυακών Πόρων και επιπέδου ποιότητας ανά υπηρεσία συνδυάζει τις έννοιες του δικτυακού σχεδιασμού και της εφαρμοσμένης μηχανικής δικτύων με τις έννοιες της οικονομικής επιβίωσης και της συμπεριφοράς χρηστών. Σημαντικός παράγοντας προς αυτήν την κατεύθυνση είναι οι μηχανισμοί ελέγχου κίνησης, οι οποίοι πρέπει να παρέχουν μια γενική στρατηγική αποδοχής υπηρεσιών που συνδυάζει τα ακόλουθα:

1. Ανακουφίζει τα δίκτυα από τη συμφόρηση.
2. Καλύπτει τις απαιτήσεις QoS των χρηστών.
3. Αυξάνει το εισόδημα των Παρόχων Δικτυακών Πόρων.
4. Χρησιμοποιεί τους πόρους των δικτύων αποτελεσματικά.

Αυτό επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση στον έλεγχο αποδοχής υπηρεσιών των ακόλουθων εννοιών και στοιχείων:

- Τα ασύρματα δίκτυα και εν γένει τα δίκτυα πρόσβασης αποτελούν ένα δημόσιο αγαθό, το οποίο πρέπει να χρησιμοποιείται αποτελεσματικά, έτσι ώστε η κοινωνική ευημερία να μεγιστοποιείται.
- Είναι ανάγκη να υλοποιηθεί ένας καταναμεμημένος μηχανισμός που θα στηρίζεται στη συμπεριφορά των χρηστών και θα μπορεί να κατευθύνει τον εκάστοτε χρήστη στο να δώσει προτεραιότητα στις κλήσεις του, με την παροχή αρνητικών κινήτρων, ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση των δικτύων και, επομένως, να συμβάλλει στη διαμόρφωση της κίνησης.
- Ένας μηχανισμός αποδοχής πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τη συμπεριφορά των χρηστών και τη συνάρτηση ζήτησης φορτίου που διαμορφώνεται από τους χρήστες.

Η ίδια η φύση των ασύρματων δικτύων μεταγωγής πακέτου μας αναγκάζει να εισάγουμε πιο αυστηρά και σύνθετα συστήματα αναμονής, ώστε να προβλέψουμε τη δυναμική ενός τέτοιου συστήματος. Η φόρτιση ενός ασύρματου δικτύου εξαρτάται τόσο από την κίνηση μεταγωγής κυκλώματος υπηρεσιών (π.χ. φωνή), όσο και από τα διάφορα είδη κίνησης μεταγωγής πακέτου, τα οποία πολυπλέκονται, με σκοπό την παροχή ανομοιόμορφης κίνησης προς τους κινητούς χρήστες. Συνεπώς, η αξιολόγηση της επίδοσης ενός ασύρματου συστήματος εξαρτάται από τα μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται για να συσχετίσουν τα βραχυπρόθεσμα χαρακτηριστικά της κίνησης δεδομένων. Τα Μαρκοβιανά χαρακτηριστικά των πηγών κίνησης επιτρέπουν τη μελέτη μοντέλων ροής ρευστού με Μαρκοβιανή διαμόρφωση, τα οποία κρίνονται απόλυτα επαρκή για να εξομοιώσουν τη συμπεριφορά τέτοιων αναμονητικών συστημάτων. Η παρακάτω ανάλυση

στηρίζεται στο θεώρημα της υπέρθεσης διαφορετικών ροών ρευστού Μαρκοβιανής διαμόρφωσης για τη σύνθεση κίνησης της ίδιας μορφής.

Η θεωρία του ισοδύναμου εύρους ζώνης [20], προσφέρει μια ικανοποιητική αξιολόγηση της συμπεριφοράς ασύρματων δικτύων για την εξασφάλιση ποιοτικών χαρακτηριστικών κίνησης, όπως αυτά διαμορφώνονται στα συμβόλαια προσυμφωνημένου επιπέδου υπηρεσιών. Με βάση αυτήν τη θεωρία, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα αποτελέσματα όσον αφορά την εκτίμηση των επιπέδων συμφόρησης κίνησης ενός δικτύου, καθώς επίσης και της εν γένει συμπεριφοράς των ασύρματων συστημάτων ευρείας ζώνης. Η θεωρία αυτή κρίνεται ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα, αφού οι εξελίξεις στον τομέα των κινητών επικοινωνιών δείχνουν να υπερπηδούν τα προβλήματα του περιορισμού της χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων. Έτσι, οι τάσεις της εποχής συγκλίνουν στην προσπάθεια εξασφάλισης της ποιότητας στην παροχή μιας υπηρεσίας, με γνώμονα την καθυστέρηση απόκρισης και τις εγγυήσεις για την παρατηρούμενη καθυστέρηση.

Σε γενικές γραμμές, μία μαθηματική έκφραση του ισοδύναμου εύρους ζώνης για μια τυχαία διαδικασία  $A_t$  έχει ορισθεί στη βιβλιογραφία και έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\alpha(s,t) = \frac{1}{st} \log E[\exp(sA_t)] \quad (4-5)$$

Η έκφραση αυτή εξαρτάται από δύο παραμέτρους, την παράμετρο χώρου  $s$  και την παράμετρο χρόνου  $t$ . Το πρόβλημα που πηγάζει από την πρακτική εφαρμογή αυτής της έκφρασης είναι η εύρεση των κατάλληλων τιμών  $s$  και  $t$ , που εξαρτώνται από τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών και από τις παραμέτρους του συστήματος.

Οι τυποποιήσεις για την παροχή βελτιωμένων ασύρματων υπηρεσιών εξειδικεύονται στη διασφάλιση των απαιτήσεων ποιότητας, όσον αφορά την πιθανότητα υπέρβασης συγκεκριμένων τιμών καθυστέρησης. Οι παράμετροι που καθορίζουν την ποιοτική αξιολόγηση της καθυστέρησης βασίζονται, κύρια, στη στατιστική παροχή μιας μέσης τιμής για το ρυθμό μετάδοσης. Οι εγγυήσεις για τις προδιαγραφές της παροχής ποιότητας εξαρτώνται από δύο παράγοντες. Ο πρώτος έχει να κάνει με την εξασφάλιση του επιθυμητού μέσου ρυθμού μετάδοσης στα ευσταθή συστήματα ουρών. Αυτό αναλύεται στο κριτήριο ότι η πυκνότητα κίνησης δεν πρέπει να υπερβαίνει την μονάδα. Ο δεύτερος παράγοντας που εγγυάται την παροχή ποιότητας είναι η καθυστέρηση. Στην περίπτωση αυτή, τα κριτήρια είναι πιο αυστηρά και οδηγούν σε μείωση του φορτίου κίνησης του συστήματος, δεδομένης, βέβαια, της χωρητικότητάς του.

Οι δύο αυτοί παράγοντες για τη διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσιών σε ασύρματα δίκτυα εμπλέκονται μέσα στη θεωρία του ισοδύναμου εύρους ζώνης για να αποδώσουν, με έναν απλό μηχανισμό, μια εκτίμηση της προσφερόμενης κίνησης με συγκεκριμένες απαιτήσεις. Η θεωρία αυτή ορίζει τη συνάρτηση του ισοδύναμου εύρους ζώνης σαν μια μονότονη, αύξουσα συνάρτηση των απαιτήσεων ποιότητας. Οι τιμές της κυμαίνονται μεταξύ του μέγιστου και του μέσου ρυθμού

μετάδοσης της κίνησης που αντιπροσωπεύει. Η κυριότερη ιδιότητα αυτής της συνάρτησης είναι η προσθετικότητα ή αθροιστικότητα. Αυτή μας επιτρέπει την απλοποίηση των μηχανισμών εύρεσης της υπό κατάληψη χωρητικότητας ενός συστήματος, το οποίο φορτίζεται από έναν αριθμό, ανεξάρτητων μεταξύ τους, υπερτιθέμενων πηγών, σε μια απλή πρόσθεση των επιμέρους απαιτήσεων εύρους ζώνης των ανεξάρτητων πηγών.

Η συμπεριφορά αυτή του Παρόχου Δικτυακών Πόρων, η οποία έχει να κάνει με την επιτέλεση μηχανισμών παροχής ποιότητας υπηρεσιών, μέσα από αλγορίθμους Ελέγχου Αποδοχής ροών και υπηρεσιών θα μας απασχολήσει στα επόμενα κεφάλαια, καθώς αποτελεί ένα μεγάλο και δύσκολο κομμάτι έρευνας στα ασύρματα δίκτυα IP.

#### **4.4.1.2.Καθορισμός τιμολογιακής πολιτικής ενός Παρόχου Δικτυακών Πόρων**

Το πιο σημαντικό κομμάτι της λογιστικής και οικονομικής πολιτικής μιας εμπορικής επιχείρησης είναι η προδιαγραφή των μηχανισμών τιμολόγησης. Η τιμολόγηση περιλαμβάνει τη διαδικασία καθορισμού της μονάδας χρέωσης για την χρήση των προϊόντων της εταιρίας. Έτσι, πρέπει να εμπεριέχει όλα εκείνα τα στοιχεία, που εμπλέκονται κατά την παραγωγή και διάθεση του προϊόντος στην αγορά.

Κατά τη διαδικασία ανάθεσης πόρων για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, η τιμολόγηση μπορεί να περιλαμβάνει πολλές παραμέτρους [21][22], οι οποίες συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- ❑ Το νόμιμο κέρδος. Κάθε συναλλαγή βασίζεται στη δύσκολη προσπάθεια μιας εταιρίας να επιβιώσει σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον και να δημιουργήσει κέρδος για να ικανοποιήσει τις λειτουργικές της ανάγκες.
- ❑ Η απόσβεση του εξοπλισμού. Η χρέωση που θα επιβληθεί στο προϊόν πρέπει να λάβει υπόψη της το συνολικό κόστος που έχει δαπανηθεί για την εγκαθίδρυση της εταιρίας.
- ❑ Η χρονική περίοδος ζήτησης των πόρων. Οι πάροχοι μπορεί να υιοθετούν μια ευέλικτη τιμολογιακή πολιτική, η οποία τους επιτρέπει την σταδιακή μεταβολή της τιμής χρέωσης σε μια χρονική κλίμακα. Αυτό σημαίνει ότι ο πάροχος δύναται να αυξήσει την τιμή κατά τη διάρκεια της ώρας αιχμής, ώστε να αποφύγει τη συμφόρηση, ή να τη μειώσει, ώστε να προσελκύσει περισσότερους χρήστες.
- ❑ Η οικονομική αντοχή της εταιρίας. Σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον, οι πάροχοι επιτρέπουν την τιμολογιακή τους πολιτική να μεταλλάσσεται με βάση κάποια κριτήρια. Όμως, πρέπει να υφίσταται ένα κατώτερο όριο. Το όριο αυτό υποδηλώνει την οικονομική αντοχή της εταιρίας, κάτω από την οποία η εταιρία αρχίζει να παράγει ζημία και κρίνεται αμφίβολη η επιβίωσή της.
- ❑ Οι διαθέσιμοι πόροι. Η τιμή χρέωσης ενός προϊόντος μπορεί να καθοριστεί με βάση τη διαθέσιμη χωρητικότητα. Και πάλι η αύξηση ή μείωσή της εξαρτάται από τις προθέσεις της

εταιρίας (να ακολουθήσει χονδρική ή λιανική πολιτική) και τις εκάστοτε συγκυρίες, που έχουν να κάνουν με την κατάληψη πόρων του δικτύου.

- ❑ Η διάθεση ενός παρόχου να συμμετέχει ακατάπαυστα σε μία διαδικασία διαπραγμάτευσης των συναλλαγών με τον εξωτερικό κόσμο για τη διατύπωση της καλύτερης οικονομικής προσφοράς.

Το μέγιστο κέρδος για τον τελικό χρήστη, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να διαλέγει την πρόσβαση σε μια υπηρεσία από πολλούς παρόχους, έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να διαπραγματεύεται με πολλούς Παρόχους και να επιλέγει κάθε φορά εκείνον με την πιο συμφέρουσα οικονομική πολιτική. Οι Πάροχοι μπορούν να επιλέξουν αν θέλουν να συμμετέχουν σε ένα τέτοιο παιχνίδι διαμόρφωσης της τελικής προσφερόμενης τιμής, το οποίο, όμως, προϋποθέτει μια ευέλικτη συμπεριφορά από μέρους του εκάστοτε Παρόχου.

Σε κάθε περίπτωση, για την επιβίωση των Παρόχων μέσα στο φάσμα της σύγχρονης επιχειρηματικής σκηνής των μελλοντικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, η διαμόρφωση της τιμολογιακής πολιτικής ενός παρόχου αποτελεί ένα δυναμικό πρόβλημα με πολλές προεκτάσεις [3][23]. Το νομισματικό κίνητρο επηρεάζει σημαντικά τον τρόπο διάθεσης και αξιοποίησης των δικτυακών πόρων από τους χρήστες και, επομένως, επιβάλλεται η ανάλυση των οικονομικών στοιχείων των τηλεπικοινωνιακών επιχειρήσεων μέσα από πραγματικές συναρτήσεις ζήτησης φορτίου. Μια συνάρτηση ζήτησης φορτίου αντικατοπτρίζει την ανταπόκριση των χρηστών στην προσφορά μιας δεδομένης τιμής πώλησης αγαθών από την πλευρά ενός παρόχου. Μέσα από αυτήν τη συνάρτηση, ο πάροχος δύναται να καθορίσει την τιμή πώλησης του προσφερόμενου αγαθού, δηλαδή των πόρων του για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, κατά τη διάρκεια του οποίου η ζήτηση μένει σταθερή. Όπως γίνεται φανερό, ο καθορισμός της τιμής πώλησης ή καλύτερα ενοικίασης των δικτυακών πόρων πραγματοποιείται μέσα από την εφαρμογή ενός συστήματος κλειστού βρόχου. Ο στόχος είναι η σε κάθε περίπτωση μεγιστοποίηση των κερδών του παρόχου ( η οποία δε συνιστά κατ'ανάγκη και τη μεγιστοποίηση των εισοδημάτων).

#### **4.4.2. Ανάλυση συμπεριφοράς του Παρόχου Υπηρεσιών**

##### **4.4.2.1.Συναρτήσεις Χρησιμοποίησης**

Μια συνάρτηση χρησιμοποίησης εκφράζει τον βαθμό ικανοποίησης μιας κλάσεως χρηστών, οι οποίοι επιθυμούν να έχουν πρόσβαση σε μια προσφερόμενη υπηρεσία, από την ανάθεσή τους σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας αυτής. Η διαμόρφωση του πεδίου τιμών ή και η ακριβής συνάρτηση περιγραφής του βαθμού ικανοποίησης των χρηστών προκύπτει από την αποτίμηση πραγματικών πειραμάτων και την επεξεργασία των ερευνών που γίνονται με κύριο κριτή τον ίδιο τον χρήστη.

Είναι φανερό ότι ο καθορισμός τέτοιων συναρτήσεων εξαρτάται από την υποκειμενικότητα των χρηστών, οι οποίοι καλούνται να κάνουν χρήση των υπηρεσιών και να διαμορφώσουν με τη



γνώμη τους το τοπίο στην σημερινή εποχή. Αυτό φαίνεται και από την διαπίστωση των φορέων τηλεπικοινωνιακής υποδομής, οι οποίοι διακρίνουν μια στροφή των εξελίξεων σε απαιτήσεις που πηγάζουν από τους ιδίους τους χρήστες και όχι κατ' ανάγκη από την ίδια την προόδο των τεχνολογιών.

Μια έκφραση της συνάρτησης χρησιμοποίησης είναι η ακόλουθη [21]:

$$U = f(CP, Q) \quad (4-6)$$

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω σχέση, ο βασικός παράγοντας διαμόρφωσης της συνάρτησης χρησιμοποίησης έχει να κάνει με τις πιθανότητες μπλοκαρίσματος νέων κλήσεων και απόρριψης κλήσεων σε εξέλιξη  $CP$ , καθώς και η υποκειμενική αντίληψη του χρήστη για την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας  $Q$ . Αυτές οι παράμετροι είναι οι πλέον αντιληπτοί στους χρήστες και με κριτήριο αυτές μπορεί να διαμορφώσει τη συνάρτηση χρησιμοποίησης και το βαθμό ικανοποίησης από την ανάθεσή του σε ένα επίπεδο ποιότητας.

Η παράμετρος  $CP$  εμπεριέχει μέσα της τις πιθανότητες μπλοκαρίσματος νέων κλήσεων και απόρριψης κλήσεων σε εξέλιξη. Είναι ένας γραμμικός συνδυασμός αυτών, όπου τα βάρη που διαμορφώνουν την υπεροχή του ενός παράγοντα σε σχέση με τον άλλο μπορούν να καθοριστούν από τον ίδιο τον χρήστη. Εν γένει, όμως, ο κανόνας που διέπει την μεταξύ τους σχέση είναι κοινός για όλους τους χρήστες και δηλώνει ότι η πιθανότητα απόρριψης κλήσεων σε εξέλιξη είναι περισσότερο σημαντική από την πιθανότητα μπλοκαρίσματος νέων κλήσεων.

Αυτό που πρέπει να τονιστεί πάντως είναι το γεγονός ότι μια τέτοια συνάρτηση διαμορφώνεται και από το είδος της υπηρεσίας, ή ακόμα και από το δίκτυο πρόσβασης. Έτσι, στην περίπτωση μιας ελαστικής κίνησης, η συνάρτηση χρησιμοποίησης μπορεί να επιτρέπει την σε κάποιο βαθμό «αλλοίωση» της ποιότητας ή την διακοπή της χωρίς σημαντική επίδραση (μείωση) στο βαθμό ικανοποίησης των χρηστών. Από την άλλη, μια μη ελαστική κίνηση διακρίνεται από αυστηρά κριτήρια ποιότητας, τα οποία πρέπει να ικανοποιηθούν «πάση θυσία» και, συνεπώς, οποιαδήποτε παραβίασή τους έχει αποφασιστική επιρροή στη διαμόρφωση της συνάρτησης χρησιμοποίησης. Αυτό μεταφράζεται σε μια ομαλή μετάβαση του  $U$  συναρτήσει των  $CP$  και  $Q$  στο μηδέν στην πρώτη περίπτωση και σε μια απότομη μετάβαση στη δεύτερη περίπτωση (π.χ. η συνάρτηση παρουσιάζει κάποιο «γόνατο»).

#### 4.5. Αποτελέσματα

Η παράγραφος αυτή παρουσιάζει τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των αλγορίθμων εξισορρόπησης φορτίου και φροντίδας για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε ομοιογενή και ετερογενή ασύρματα περιβάλλοντα. Σε γενικές γραμμές, οι συναρτήσεις κέρδους που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους θα χρησιμοποιηθούν σαν στοιχεία μέτρησης της επίδοσης των δικτύων και του όλου συστήματος. Αυτό οφείλεται στο ότι οι αλγόριθμοι αυτοί αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά τέτοιων συστημάτων, όσον αφορά την καλύτερη κατανομή

της προσφερόμενης κίνησης, την παροχή της ζητούμενης ποιότητας, αλλά και τον σεβασμό των συμφωνιών μεταξύ των επιχειρηματικών οντοτήτων.

Τέλος, θα ληφθεί υπόψη η απόδοση του συστήματος συνολικά. Τέτοιες μετρήσεις μας επιτρέπουν την αποτίμηση των προτεινόμενων αλγορίθμων, όπως, επίσης, και την καταλληλότητα του επιχειρηματικού μοντέλου να εξομοιώσει τη συμπεριφορά και τις αλληλεπιδράσεις του Παρόχου Δικτυακών Πόρων, του Παρόχου Υπηρεσιών και του Παρόχου του Περιεχομένου Υπηρεσίας σε ένα σύνθετο ασύρματο περιβάλλον.



Σχήμα 4-5. Δομή της περιοχής εξυπηρέτησης για τα πειράματα

Στα ακόλουθα περιγράφουμε δύο σενάρια για την εξερεύνηση των παραπάνω. Τα σενάρια αυτά εστιάζονται σε ένα Πάροχο Υπηρεσιών SP, ο οποίος προσφέρει ένα σύνολο υπηρεσιών σε μία συγκεκριμένη περιοχή, εμβαδού  $100 \text{ Km}^2$ . Η περιοχή αυτή μπορεί να διασπασθεί σε 5 υποπεριοχές, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4-5. Στην ίδια περιοχή, υποθέτουμε ότι υπάρχουν δύο Πάροχοι Δικτυακών Πόρων κυτταρικής δομής, ο  $np_1$  και ο  $np_2$ , οι οποίοι προσφέρουν το απαραίτητο εύρος ζώνης και εξυπηρετούν την περιοχή με 100 κυψέλες. Κάνοντας την υπόθεση ότι η ακτίνα του κυττάρου είναι περίπου  $1 \text{ Km}^2$ , συμπεραίνουμε ότι κάθε Πάροχος έχει 20 κυψέλες ανά υποπεριοχή. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι παρά το γεγονός ότι τα πειράματα εστιάζονται σε δίκτυα κυτταρικής δομής, εντούτοις τα αποτελέσματα είναι ανάλογα για οποιαδήποτε μορφή ασύρματου δικτύου.

Κάθε σενάριο περιλαμβάνει ένα είδος υπηρεσίας και χαρακτηρίζεται από τις πολιτικές που μπορεί να υιοθετήσει ο SP, τις προσφορές τιμών των  $np_1$  και  $np_2$ , καθώς και το διάνυσμα της προσφερόμενης κίνησης, το οποίο αναλύεται σε πλήθος συνδρομητών ανά κλάση χρηστών.

#### 4.5.1. Πρώτο Σενάριο

Το πρώτο σενάριο πειραμάτων εστιάζει σε μία υπηρεσία ροής  $s_1$  (μεταγωγής κυκλώματος ή πακέτου). Οι πολιτικές που υιοθετεί ο SP για τη συγκεκριμένη υπηρεσία προδιαγράφουν τα είδη των κλάσεων χρηστών, τα επιτρεπτά επίπεδα υπηρεσίας, τα προφίλ των χρηστών ανά κλάση, τους συντελεστές ικανοποίησης και τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές που είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν οι χρήστες για κάθε επίπεδο ποιότητας. Υποθέτουμε ότι η συγκεκριμένη υπηρεσία προσφέρεται σε 40.000 συνδρομητές, οι οποίοι μοιράζονται εξίσου σε δύο κλάσεις  $uc_{s_1,1}$  και

$uc_{s_1,2}$ . Επίσης, η υπηρεσία  $s_1$  προσφέρεται σε δύο επίπεδα ποιότητας  $q_{s_1,1}$  και  $q_{s_1,2}$ . Τα επίπεδα αυτά αντιστοιχούν σε 0.5% πιθανότητα φραγής και σε ρυθμούς 128 και 64 kbps αντίστοιχα.

Κάθε κλάση χρηστών δεν αντιστοιχίζεται στα ίδια επίπεδα ποιότητας. Έτσι, η κλάση  $uc_{s_1,1}$  μπορεί να έχει μόνο το επίπεδο  $q_{s_1,1}$ , που σημαίνει ότι το σύνολο των επιτρεπόμενων επιπέδων ποιότητας της  $s_1$  για την κλάση  $uc_{s_1,1}$  είναι  $Q_{s_1,uc_{s_1,1}} = \{q_{s_1,1}\}$ . Αντίθετα, η κλάση  $uc_{s_1,2}$  μπορεί να έχει πρόσβαση στην  $s_1$  τόσο από το επίπεδο  $q_{s_1,1}$ , όσο και από το  $q_{s_1,2}$ , δηλαδή  $Q_{s_1,uc_{s_1,2}} = \{q_{s_1,1}, q_{s_1,2}\}$ . Συμβολίζουμε με  $UP_{s_1,uc_{s_1,1}}$  και  $UP_{s_1,uc_{s_1,2}}$  τα προφίλ κάθε κλάσης, τα οποία καθορίζουν το μέσο φορτίο κίνησης στα 0.04 Erlangs και για τις δύο κλάσεις όταν το  $q_{s_1,1}$  χρησιμοποιείται και στα 0.02 Erlangs όταν το  $q_{s_1,2}$  χρησιμοποιείται.

**Πίνακας 4-1. Σενάρια οικονομικής πολιτικής του  $np_2$**

| <i>Οικονομική Πολιτική του Παρόχου <math>np_2</math></i> | <i>Τιμή χρέωσης για το επίπεδο <math>q_{s_1,1}</math></i> | <i>Τιμή χρέωσης για το επίπεδο <math>q_{s_1,2}</math></i> |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Περίπτωση 1                                              | 1.60                                                      | 0.800                                                     |
| Περίπτωση 2                                              | 1.75                                                      | 0.875                                                     |
| Περίπτωση 3                                              | 2.00                                                      | 1.000                                                     |
| Περίπτωση 4                                              | 2.25                                                      | 1.125                                                     |
| Περίπτωση 5                                              | 2.50                                                      | 1.250                                                     |
| Περίπτωση 6                                              | 2.75                                                      | 1.375                                                     |
| Περίπτωση 7                                              | 3.25                                                      | 1.625                                                     |
| Περίπτωση 8                                              | 3.75                                                      | 1.875                                                     |
| Περίπτωση 9                                              | 4.25                                                      | 2.125                                                     |

**Πίνακας 4-2. Διάνυσμα της προσφερόμενης κίνησης ανά κομμάτι της περιοχής εξυπηρέτησης**

| <i>Περιοχή Εξυπηρέτησης</i> | <i>Σύνολο συνδρομητών της κλάσης <math>uc_{s_1,1}</math></i> | <i>Σύνολο συνδρομητών της κλάσης <math>uc_{s_1,2}</math></i> |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1                           | 3.500                                                        | 3.500                                                        |
| 2                           | 3.500                                                        | 3.500                                                        |
| 3                           | 3.500                                                        | 3.500                                                        |
| 4                           | 3.500                                                        | 3.500                                                        |
| 5                           | 6.000                                                        | 6.000                                                        |

Η προσφορά κάθε Παρόχου Δικτυακών Πόρων πρέπει να καθορίζει το κόστος υπηρεσίας ανά επίπεδο ποιότητας, καθώς και το φορτίο που μπορεί να δεχτεί ο συγκεκριμένος Πάροχος σε κάθε

περιοχή εξυπηρέτησης. Για τον Πάροχο  $np_1$ , οι τιμές κόστους είναι  $c_{s_1}(np_1, q_{s_1,1}) = 1.5$  και  $c_{s_1}(np_1, q_{s_1,2}) = 0.75$  αντίστοιχα. Ο Πίνακας 4-1 παρουσιάζει διάφορες οικονομικές πολιτικές για τον Πάροχο  $np_2$ . Όσον αφορά την χωρητικότητα του δικτύου, υποθέτουμε ότι αμφότεροι οι Πάροχοι Δικτυακών Πόρων διαθέτουν 32 κανάλια, τα οποία μπορούν να εξυπηρετήσουν 32 ταυτόχρονες κλήσεις των 128 kbps με πιθανότητα μπλοκαρίσματος 0.5%, δηλαδή περίπου 400 Erlangs κίνησης σε κάθε υποπεριοχή (ή ισοδύναμα 20 Erlangs ανά κυψέλη). Για παράδειγμα, οι Πάροχοι μπορούν να εξυπηρετήσουν μέχρι 10.000 χρήστες στο επίπεδο  $q_{s_1,1}$  στην συγκεκριμένη υποπεριοχή.

Σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, ο Πίνακας 4-2 παρουσιάζει το διάνυσμα της προσφερόμενης κίνησης (συνδρομητές ανά κλάση χρηστών) ανά περιοχή εξυπηρέτησης. Είναι φανερό ότι στις υποπεριοχές 1-4 υπάρχουν συνολικά 7.000 χρήστες (3.500 από κάθε κλάση). Η υποπεριοχή 5 παρουσιάζει υπερβολική κίνηση, αφού 12.000 χρήστες (6.000 από κάθε κλάση) ζητούν εξυπηρέτηση σε εκείνη την περιοχή. Στις υποπεριοχές 1-4, τόσο το είδος της προσφερόμενης κίνησης όσο και η χωρητικότητα, επιτρέπουν και τις δύο κλάσεις χρηστών  $uc_{s_1,1}$  και  $uc_{s_1,2}$  να εξυπηρετούνται στο υψηλό επίπεδο ποιότητας  $q_{s_1,1}$ . Επίσης, επειδή ο  $np_1$  παρουσιάζεται πιο οικονομικός τη δεδομένη στιγμή, όλοι οι χρήστες ανατίθενται στον συγκεκριμένο Πάροχο.

Σύμφωνα με αυτά που έχουν ειπωθεί στην ενότητα 4.3, η υπέρβαση της μέγιστης επιτρεπόμενης κίνησης στην περιοχή 5 ενεργοποιεί τους μηχανισμούς των στοιχείων του Επιπέδου Τοπικού Σχεδιασμού στην περιοχή αυτή, μέσω των ομοτίμων του Επιπέδου Διαμόρφωσης Συνόδου, τα οποία αντιλαμβάνονται τη μεγάλη συγκέντρωση προσφερόμενης κίνησης. Τα στοιχεία του Επιπέδου Τοπικού Σχεδιασμού στην περιοχή 5 συλλέγουν πληροφορίες για την εφαρμογή του αλγορίθμου βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, ο οποίος στην προκειμένη περίπτωση επιλέγεται ανάμεσα σε δύο υποψήφιους.

Στην υποπεριοχή 5, το διάνυσμα της προσφερόμενης κίνησης αναλύεται σε δύο συνιστώσες, μία για κάθε κλάση χρηστών, δηλαδή  $d_{s_1, uc_{s_1,1}} = 6.000$  και  $d_{s_1, uc_{s_1,2}} = 6.000$ . Με βάση αυτό, οι δύο Πάροχοι Δικτυακών Πόρων προτείνουν την λύση  $l_{\min, s_1}(np_1) = l_{\min, s_1}(np_2) = 0$ ,  $l_{\max, s_1}(np_1) = l_{\max, s_1}(np_2) = 400$ , καθώς και τα αντίστοιχα κόστη, όπως έχουν δοθεί παραπάνω. Με άλλα λόγια, και οι δύο Πάροχοι προτείνουν ότι μπορούν να υποστηρίξουν μέχρι 400 Erlangs ανά περιοχή εξυπηρέτησης.

Οι πολιτικές του SP, το προφίλ της προσφερόμενης κίνησης και οι προσφορές των  $np_1$  και  $np_2$  θα χρησιμοποιηθούν από τον αλγόριθμο για να αποφασισθεί η καλύτερη κατανομή της κίνησης στους Παρόχους Δικτυακών Πόρων και στα επιθυμητά επίπεδα ποιότητας. Οι τυπικές λύσεις του προβλήματος είναι δύο:

- Η πρώτη προτείνει τη διατήρηση των χρηστών και των δύο κλάσεων στο επίπεδο αναφοράς  $q_{s_1,1}$  με την εκμετάλλευση των προσφορών και των δύο Παρόχων. Έτσι, 8.000 χρήστες θα οδηγηθούν στην πρόσβαση της υπηρεσίας  $s_1$  από τον τρέχοντα Παρόχο  $np_1$ . Οι χρήστες αυτοί αναλύονται σε 6.000 χρήστες της κλάσης  $uc_{s_1,1}$  και 2.000 της κλάσης  $uc_{s_1,2}$ . Οι υπόλοιποι 4.000 χρήστες θα δρομολογηθούν στον Πάροχο  $np_2$ , ο οποίος μπορεί, επίσης, να υποστηρίξει 8.000 χρήστες στο επίπεδο ποιότητας  $q_{s_1,1}$ .
- Η δεύτερη λύση είναι η λεγόμενη συμβατική, η οποία υπάρχει σήμερα, και περιλαμβάνει τη διατήρηση όλων των χρηστών στον αρχικό Πάροχο  $np_1$ , ο οποίος έχει τις καλύτερες τιμές. Αυτό, όμως, σημαίνει ότι οι χρήστες της κλάσης  $uc_{s_1,2}$  θα πρέπει να υποβιβασθούν σε χαμηλότερο επίπεδο ποιότητας, ώστε να εξευρεθούν πόροι για την εξυπηρέτηση του συνόλου της προσφερόμενης κίνησης. Η λύση αυτή, στην ουσία, αντιπροσωπεύει τους υπάρχοντες μηχανισμούς ανακατανομής πόρων στα δίκτυα, οι οποίοι, βέβαια, δεν υποστηρίζουν την συνεργασία μεταξύ πολλαπλών Παρόχων για την ικανοποίηση του τηλεπικοινωνιακού φορτίου.

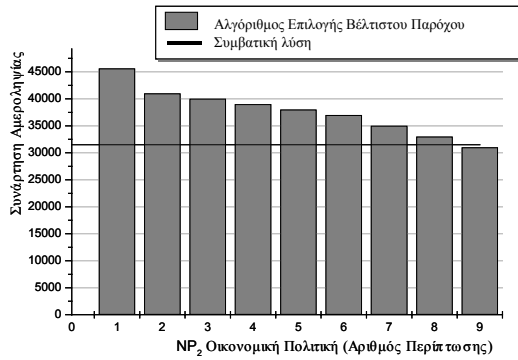
**Πίνακας 4-3. Παράμετροι απαιτήσεων των χρηστών για τις τέσσερις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.**

| Κλάση Χρηστών |              | Συντελεστής ικανοποίησης ανά επίπεδο ποιότητας |             | Μέγιστη τιμή χρέωσης ανά επίπεδο ποιότητας |             |
|---------------|--------------|------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------|-------------|
|               |              | $q_{s_1,1}$                                    | $q_{s_1,2}$ | $q_{s_1,1}$                                | $q_{s_1,2}$ |
| Δοκιμή 1      | $uc_{s_1,1}$ | 5                                              | —           | 10                                         | 5           |
|               | $uc_{s_1,2}$ | 5                                              | 2.5         | 10                                         | 5           |
| Δοκιμή 2      | $uc_{s_1,1}$ | 5                                              | —           | 10                                         | 5           |
|               | $uc_{s_1,2}$ | 4.5                                            | 2.5         | 10                                         | 5           |
| Δοκιμή 3      | $uc_{s_1,1}$ | 5                                              | —           | 10                                         | 5           |
|               | $uc_{s_1,2}$ | 4                                              | 2.5         | 10                                         | 5           |
| Δοκιμή 4      | $uc_{s_1,1}$ | 5                                              | —           | 10                                         | 5           |
|               | $uc_{s_1,2}$ | 3.5                                            | 2.5         | 10                                         | 5           |

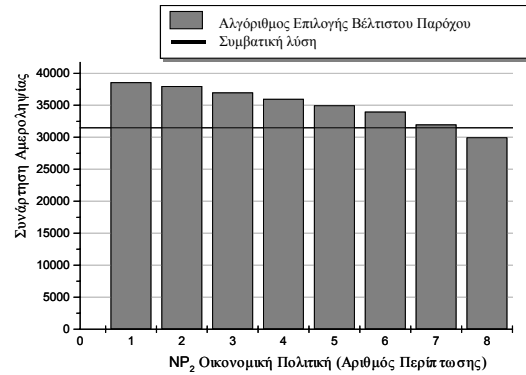
Το Σχήμα 4-6 παραθέτει το σύνολο των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου στο πρώτο σενάριο που περιγράφηκε παραπάνω. Τα αποτελέσματα αυτά περιλαμβάνουν τέσσερις περιπτώσεις δοκιμών. Κάθε δοκιμή διακρίνεται από τις άλλες από τη διαφορετική τιμή του

συντελεστή ικανοποίησης των χρηστών ανά επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας  $s_1$ . Ο Πίνακας 4-3 παρουσιάζει το σύνολο των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις απαιτήσεις του χρήστη για κάθε μία από τις τέσσερις δοκιμές. Εν γένει, το Σχήμα 4-6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της συνάρτησης αμεροληψίας για διάφορους συντελεστές ικανοποίησης και για διάφορες οικονομικές πολιτικές εκτίμησης κόστους.

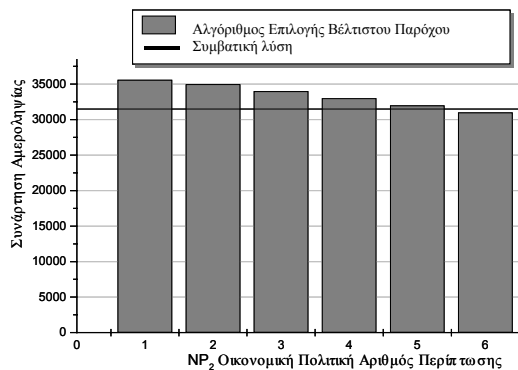
Για παράδειγμα, το Σχήμα 4-6α αντιπροσωπεύει τα αποτελέσματα από την πρώτη δοκιμή. Παρουσιάζει τις τιμές της συνάρτησης για  $u_{s_1, uc_{s_1,1}, q_{s_1,1}} = u_{s_1, uc_{s_1,2}, q_{s_1,1}} = 5$ ,  $u_{s_1, uc_{s_1,2}, q_{s_1,2}} = 2.5$  και για τις διάφορες οικονομικές πολιτικές του  $np_2$ , όπως αυτές που δείχνει ο Πίνακας 4-1. Ομοίως, τα Σχήμα 4-6 β, γ και δ δείχνουν τη συνάρτηση αμεροληψίας, όταν ο συντελεστής χρησιμοποίησης για την κλάση  $uc_{s_1,2}$  και για το επίπεδο ποιότητας  $q_{s_1,1}$  είναι, αντίστοιχα, 4.5, 4 και 3.5 (οι υπόλοιπες τιμές παραμένουν οι ίδιες).



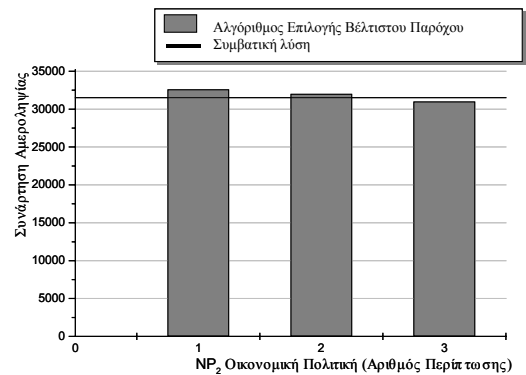
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 4-6. Σύνολο αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου για το πρώτο σενάριο.

Κρίνοντας από το Σχήμα 4-6α, παρατηρούμε ότι οι τιμές της συνάρτησης αμεροληψίας κυμαίνονται γύρω από 45.000, στην περίπτωση που ο  $np_2$  υιοθετεί το πρώτο σενario τιμών κόστους, μέχρι 31.000, στην περίπτωση που ο  $np_2$  υιοθετεί το ένατο σενario τιμών κόστους. Παράλληλα, στην περίπτωση που δεν εφαρμόζεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος και, συνεπώς, οι χρήστες διατηρούνται στον  $np_1$  με τους χρήστες της  $uc_{s_1,2}$  να υποβιβάζονται σε επίπεδο ποιότητας, η τιμή της συνάρτησης αμεροληψίας είναι 31.500. Αυτό, με άλλα λόγια, σημαίνει ότι όταν ο  $np_2$  υιοθετεί το ένατο σενario τιμών κόστους και γίνεται περίπου 3 φορές πιο ακριβός από τον  $np_1$ , ο αλγόριθμος προτείνει ότι είναι προτιμότερο να διατηρήσουμε όλους τους χρήστες στον φθηνό Πάροχο  $np_1$ , με μια απώλεια στο επιθυμητό επίπεδο ποιότητας στην χαμηλότερη κλάση χρηστών.

Γενικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος βελτιώνει τη συμπεριφορά και την απόδοση του SP, όταν οι χρήστες, ειδικά των χαμηλότερης προτεραιότητας κλάσεων, δείχνουν έντονο ενδιαφέρον για το επίπεδο της προσφερόμενης υπηρεσίας, ακόμα και σε συνθήκες ακραίων συνθηκών, όπως στην περίπτωση που ο ακριβός Πάροχος Δικτυακών Πόρων είναι πολύ πιο ακριβός από τον τρέχοντα Πάροχο. Σε πιο φυσιολογικές συνθήκες, δηλαδή οι οικονομικές πολιτικές των Παρόχων είναι συγκρίσιμες (όπως στις περιπτώσεις 1-4 που δείχνει ο Πίνακας 4-1), η βελτίωση στην απόδοση του SP, μετρούμενη με βάση τις τιμές της συνάρτησης αμεροληψίας, είναι γύρω στο 45%-25%. Η βελτίωση αυτή έγκειται στο γεγονός της προσφοράς καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας και εκμετάλλευση ευρέως ραδιοφάσματος, αφού η διαθέσιμη χωρητικότητα φαινομενικά αυξάνεται στα 480 Erlangs, έναντι 400 Erlangs, που ήταν πριν.

Το Σχήμα 4-6β παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τη δεύτερη δοκιμή. Εδώ, οι τιμές της συνάρτησης αμεροληψίας κυμαίνονται από 39.000, στην περίπτωση που ο  $np_2$  υιοθετεί το πρώτο σενario τιμών κόστους, μέχρι 30.000, στην περίπτωση που ο  $np_2$  υιοθετεί το όγδοο σενario τιμών κόστους. Πάλι, τα αποτελέσματα δείχνουν μια βελτίωση στην απόδοση του συστήματος, ακόμα και όταν το ενδιαφέρον των χρηστών χαμηλής προτεραιότητας για ποιότητα υπηρεσίας είναι μειωμένο σε σχέση με το προηγούμενο σενario δοκιμών. Συγκεκριμένα, σε φυσιολογικές συνθήκες, όπου ο  $np_2$  είναι 30% – 50% πιο ακριβός από τον  $np_1$  (όπως στις περιπτώσεις 1-4 που δείχνει ο Πίνακας 4-1), η βελτίωση στη συμπεριφορά του συστήματος είναι της τάξης των 25% – 15%. Στην περίπτωση αυτή, βέβαια, η ευελιξία του αλγορίθμου δεν είναι τόσο μεγάλη όπως στο Σχήμα 4-6α, γεγονός που οφείλεται στο μειωμένο ενδιαφέρον για πρόσβαση στην υπηρεσία  $s_1$  με το υψηλότερο δυνατό επίπεδο  $q_{s_1,1}$ . Και πάλι, όμως, η βελτίωση που επιτυγχάνεται είναι σημαντική.

Τα Σχήμα 4-6 γ και δ παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για την τρίτη και τέταρτη δοκιμή, αντίστοιχα. Και στις δύο δοκιμές, η κλάση  $uc_{s_1,2}$  παρουσιάζει κλιμακωτά μειούμενο ενδιαφέρον για το επίπεδο  $q_{s_1,1}$ , σε σχέση πάντα με τις προηγούμενες δοκιμές. Όπως αναμενόταν, η μείωση

αυτή συμβάλλει στην μείωση και της ευελιξίας του αλγορίθμου. Πιο συγκεκριμένα, οι μηχανισμοί εξακολουθούν να αποδίδουν καλά, τουλάχιστον στις πιο φυσιολογικές συνθήκες, δηλαδή όταν ο  $np_2$  είναι σε λογικά επίπεδα πιο ακριβός από τον  $np_1$  (της τάξης του 50%). Οι βελτιώσεις που παρατηρούνται στην απόδοση του συστήματος στις περιπτώσεις αυτές είναι 10% και 5%, αντίστοιχα.

Σε γενικές γραμμές, τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε αυτό το πρώτο σενάριο οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα. Η επιρροή του συντελεστή ικανοποίησης για την εκδήλωση ενδιαφέροντος των χρηστών σε επίπεδα υπηρεσίας, όπως, επίσης, και οι διάφορες πολιτικές χρέωσης εξετάστηκαν εδώ. Όταν ο συντελεστής ικανοποίησης είναι μεγάλος, που μεταφράζεται σε έντονο ενδιαφέρον για το προσφερόμενο επίπεδο υπηρεσίας, ο αλγόριθμος οδηγεί στη βελτίωση της συμπεριφοράς και της απόδοσης του SP, ακόμα και σε ακραίες περιπτώσεις πολιτικών χρέωσης του  $np_2$ . Καθώς ο συντελεστής αυτός μειώνεται, ο αλγόριθμος δίνει καλά αποτελέσματα στις περιπτώσεις ρεαλιστικών σεναρίων, όσον αφορά τις πολιτικές χρέωσης του  $np_2$ .

Τα αποτελέσματα, βέβαια, είναι ανάλογα όταν τα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας μεταφράζονται σε επιθυμητά επίπεδα πιθανότητας απόρριψης κλήσεων, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις των διαλογικών υπηρεσιών. Η μόνη διαφορά έγκειται στον τρόπο υπολογισμού της διαθέσιμης χωρητικότητας.

#### 4.5.2. Δεύτερο σενάριο

Σε αντίθεση με το πρώτο σενάριο, στο οποίο υποθέσαμε ότι οι δύο Πάροχοι Δικτυακών Πόρων έχουν την ίδια χωρητικότητα, στο δεύτερο αυτό σενάριο εξετάζουμε την επίδραση της διαθέσιμης χωρητικότητας στην όλη απόδοση του συστήματος. Εδώ, εστιάζουμε σε μία άλλη αλληλεπιδραστική υπηρεσία ή υπηρεσία ροής  $s_2$ . Και πάλι, οι πολιτικές του SP προδιαγράφουν τις κλάσεις των χρηστών, τα επιθυμητά επίπεδα υπηρεσίας, τους συντελεστές ικανοποίησης και την μέγιστη αποδεκτή τιμή χρέωσης της συγκεκριμένης υπηρεσίας ανά επίπεδο ποιότητας.

Υποθέτουμε ότι η υπηρεσία  $s_2$  προσφέρεται σε ένα σύνολο 20.000 συνδρομητών, οι οποίοι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε δύο κλάσεις χρηστών, τις  $uc_{s_2,1}$  και  $uc_{s_2,2}$ . Τα επίπεδα αναφοράς για την ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας είναι, αντίστοιχα, τα  $q_{s_2,1}$  και  $q_{s_2,2}$ , τα οποία αντιστοιχούν σε 0.5% πιθανότητα μπλοκαρίσματος και σε αντίστοιχους ρυθμούς μετάδοσης 384 και 128 kbps. Επίσης, η κλάση  $uc_{s_2,1}$  μπορεί να έχει μόνο το υψηλό επίπεδο  $q_{s_2,1}$ , ενώ η κλάση  $uc_{s_2,2}$  και τα δύο επίπεδα. Τα προφίλ των χρηστών καθορίζουν την μέση προσφερόμενη κίνηση της  $s_2$  ανά χρήστη στα 0.04 Erlangs, όταν το επίπεδο  $q_{s_2,1}$  χρησιμοποιείται και στα 0.013



Erlangs, όταν το επίπεδο  $q_{s_{12},2}$  χρησιμοποιείται. Τέλος, οι συντελεστές ικανοποίησης καθορίζονται στα  $u_{s_2,uc_{s_2,1},q_{s_2,1}} = u_{s_2,uc_{s_2,2},q_{s_2,2}} = 7.5$ ,  $u_{s_2,uc_{s_2,2},q_{s_2,2}} = 2.5$ .

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, οι προσφορές που διατυπώνουν οι Πάροχοι Δικτυακών Πόρων αφορούν, κυρίως, σε τιμές χρέωσης ανά επίπεδο υπηρεσίας και στο μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό χρηστών ανά επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας, που μπορεί να γίνει δεκτός σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Σε αυτό το δεύτερο σενάριο, οι τιμές κόστους διατηρούνται σταθερές και ίσες με  $c_{s_2}(np_1, q_{s_2,1}) = 4.5$ ,  $c_{s_2}(np_1, q_{s_2,2}) = 1.50$ ,  $c_{s_2}(np_2, q_{s_2,1}) = 5.0$ ,  $c_{s_2}(np_2, q_{s_2,2}) = 1.7$ .

Σε κάθε προσφορά, το διαθέσιμο φορτίο δικτύου είναι μεταβλητό και εξαρτάται από την κίνηση εν εξελίξει. Υποθέτουμε ότι η μέγιστη χωρητικότητα κάθε δικτύου ανά κυψέλη είναι 16 κανάλια των 384 kbps. Το διάνυσμα κίνησης ανά περιοχή διαμορφώνεται ως εξής: στις περιοχές 1-4 υπάρχουν 3.500 χρήστες (1.750 ανά κλάση χρηστών), ενώ στην περιοχή 5 υπάρχουν 6.000 χρήστες (3.000 ανά κλάση).

**Πίνακας 4-4. Διαθέσιμη και κατειλημμένη χωρητικότητα του  $np_2$  για τις τέσσερις περιπτώσεις του δευτέρου σεναρίου.**

| <i>Πολιτική του Παρόχου <math>np_2</math></i> | <i>Φορτίο που εξυπηρετείται από τον Πάροχο <math>np_2</math></i> | <i>Μέγιστο επιπλέον φορτίο που μπορεί να εξυπηρετηθεί από τον <math>np_2</math></i> |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Περίπτωση 1                                   | 0                                                                | 160                                                                                 |
| Περίπτωση 2                                   | 40                                                               | 120                                                                                 |
| Περίπτωση 3                                   | 80                                                               | 80                                                                                  |
| Περίπτωση 4                                   | 120                                                              | 40                                                                                  |

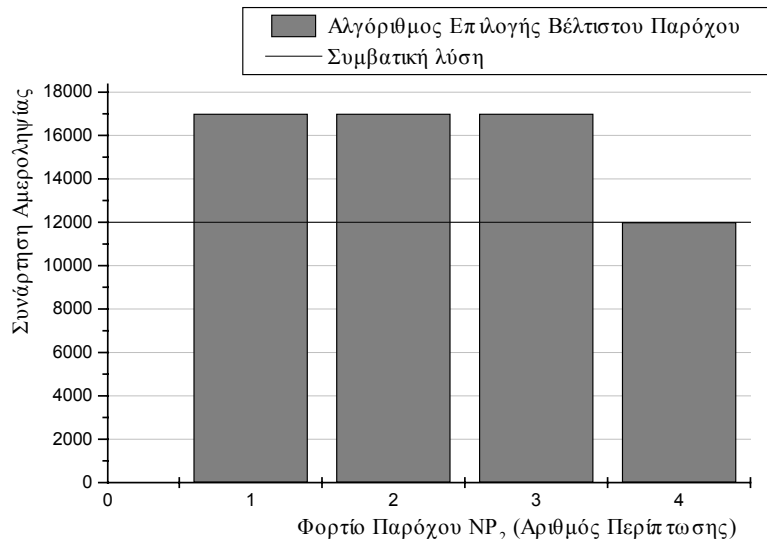
Στις υποπεριοχές 1-4, τόσο το φορτίο όσο και η χωρητικότητα των δικτύων επιτρέπουν σε αμφότερες τις κλάσεις να έχουν σαν επίπεδο αναφοράς το  $q_{s_2,1}$ . Οι χρήστες αυτοί ανατίθενται στον  $np_1$ , ο οποίος δύναται να εξυπηρετήσει μέχρι 4.000 χρήστες της υπηρεσίας  $s_2$  στο επίπεδο  $q_{s_2,1}$  και προσφέρει καλύτερες τιμές. Στην υποπεριοχή 5 παρατηρείται μια υπέρβαση του ορίου προσφερόμενης κίνησης, το οποίο αναλύεται σε συνιστώσες, ανάλογα με τις υπάρχουσες κλάσεις της υπηρεσίας. Έτσι, έχουμε:  $d_{s_2,uc_{s_2,1}} = d_{s_1,uc_{s_1,2}} = 3.000$ . Η προσφορά του  $np_1$  περιλαμβάνει το φορτίο που μπορεί να δεχτεί,  $l_{\min,s_2}(np_1) = 0$ ,  $l_{\max,s_2}(np_1) = 160$ , καθώς και τις

προαναφερθείσες τιμές κόστους. Ο Πίνακας 4-4 παρουσιάζει τις προσφορές του  $np_2$ , ανάλογα με το φορτίο που ήδη υπάρχει μέσα στο δίκτυο.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εκμεταλλεύεται τις πολιτικές του SP και τις προσφορές των Παρόχων Δικτυακών Πόρων για την πιο συμφέρουσα ανάθεση του διανύσματος της προσφερόμενης κίνησης σε Παρόχους Δικτυακών Πόρων και επίπεδα ποιότητας. Οι πιθανές λύσεις του αλγορίθμου είναι οι ακόλουθες:

- ❑ Αμφότερες οι κλάσεις των χρηστών της υπηρεσίας  $s_2$  διατηρούνται στο υψηλό επίπεδο  $q_{s_2,1}$ , σαν αποτέλεσμα του συνδυασμού των προσφορών των  $np_1$  και  $np_2$ . Έτσι, οι 4.000 χρήστες (3.000 της κλάσης  $uc_{s_2,1}$  και 1.000 της κλάσης  $uc_{s_2,2}$ ) θα οδηγηθούν στην λήψη της υπηρεσίας από τον  $np_1$ , ενώ οι υπόλοιποι 2.000 χρήστες θα μετακινηθούν στον  $np_2$ .
- ❑ Η δεύτερη συμβατική λύση περιλαμβάνει τη διατήρηση όλων των χρηστών στον ίδιο Πάροχο,  $np_1$ , και στην υποβάθμιση της ποιότητας που προσφέρεται στην χαμηλής προτεραιότητας κλάση  $uc_{s_2,2}$ . Στην ουσία, η λύση αυτή αποτελεί την μοναδική επιλογή των σύγχρονων συστημάτων, που δεν επιτρέπει την συνεργασία μεταξύ των διαφόρων παρόχων.

Το Σχήμα 4-7 παρουσιάζει το σύνολο των αποτελεσμάτων για το δεύτερο αυτό σενάριο. Εκεί, δίνεται η τιμή της συνάρτησης αμεροληψίας για τους διάφορους συνδυασμούς προσφορών του  $np_2$ , που δείχνει ο Πίνακας 4-4.



**Σχήμα 4-7. Σύνολο αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου για το δεύτερο σενάριο.**

Στις πρώτες τρεις περιπτώσεις, και οι δύο κλάσεις διατηρούνται στο υψηλό επίπεδο  $q_{s_2,1}$ . Στην τέταρτη περίπτωση, ο  $np_2$  είναι ήδη φορτωμένος σε τέτοιο βαθμό, που η διαθέσιμη χωρητικότητα δεν επιτρέπει τη διατήρηση όλων των χρηστών στο  $q_{s_2,1}$ . Όμως, αυτό δεν σημαίνει ότι οι χρήστες της χαμηλής κλάσης  $uc_{s_2,2}$  δεν μπορούν ποτέ να χρησιμοποιήσουν την υπηρεσία στο επίπεδο αυτό. Αντιθέτως, μπορούν να αιτούνται την πρόσβαση της  $s_2$  στο  $q_{s_2,1}$  και αν είναι εφικτό να εξυπηρετούνται σε αυτό το επίπεδο. Από την πλευρά τους, οι Πάροχοι είναι υποχρεωμένοι να τηρούν τις συμφωνίες και να παρέχουν στους χρήστες της κλάσης  $uc_{s_2,2}$  την  $s_2$  τουλάχιστον στο επίπεδο  $q_{s_2,2}$ .

Το γενικό συμπέρασμα που εξάγεται από τη διεξαγωγή του δεύτερου σεναρίου είναι συμπληρωματικό με εκείνα του πρώτου σεναρίου. Ο αλγόριθμος επιλογής των κατάλληλων δικτύων και των κατάλληλων επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας μπορεί να αποφανθεί για τη διατήρηση όλων των χρηστών στο πιο υψηλό επίπεδο και στον πιο οικονομικό Πάροχο. Αυτό είναι εφικτό με τη σύναψη συμφωνιών ευρέως φάσματος και οδηγεί στη μεγιστοποίηση του κοινωνικού κέρδους, τη βελτίωση της απόδοσης του συνολικού συστήματος και την κατά το δυνατόν φροντίδα του τελικού χρήστη. Από την πλευρά των Παρόχων Δικτυακών Πόρων, η συμμετοχή σε ένα ενιαίο περιβάλλον διαχείρισης οδηγεί σε καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος και την αύξηση του συντελεστή χρησιμοποίησης των δικτύων.

#### 4.6. Συμπεράσματα

Η αυξανόμενη απαίτηση για την παροχή υπηρεσιών, μέσω ασύρματης επικοινωνίας, με διάφορες απαιτήσεις QoS, αυξάνουν τη σημασία της αποδοτικής χρήσης και κατανομής των περιορισμένων πόρων των ασύρματων δικτύων. Η συμφόρηση είναι ένα από τα εντονότερα προβλήματα στα σημερινά ασύρματα δίκτυα. Με την εμφάνιση μελλοντικών ασύρματων υπηρεσιών, η κατάσταση θα χειροτερέψει, καθώς θα απαιτείται η χρήση περισσότερου εύρους ζώνης και η μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων, όπως η χρήση του βίντεο πραγματικού χρόνου. Οι παραδοσιακοί μηχανισμοί ελέγχου αποδοχής κλήσεων, που εφαρμόζεται στην σταθερή τηλεφωνία, εστιάζουν μόνο στην ανίχνευση της υπέρβασης κατωφλίων, όσον αφορούν τις πιθανότητες φραγής νέων κλήσεων και απόρριψης κλήσεων σε εξέλιξη και, συνεπώς, κρίνονται ακατάλληλοι για την επίλυση των προβλημάτων συμφόρησης στα ασύρματα δίκτυα.

Στα πλαίσια αυτά, το κεφάλαιο αυτό έδωσε μία εικόνα της αρχιτεκτονικής ενός ενιαίου συστήματος διαχείρισης υπηρεσιών και δικτυακών πόρων. Το σύστημα αυτό επιτρέπει τον έλεγχο της προσφερόμενης κίνησης και την ευέλικτη διαχείριση πόρων σε ένα σύνθετο ασύρματο περιβάλλον, λαμβάνοντας υπόψη κοινωνικά, οικονομικά και τεχνικά κριτήρια. Επίσης, αναλύθηκαν οι μηχανισμοί και οι λειτουργίες που δρουν εσωτερικά στο σύστημα αυτό, ώστε η

αίτηση παροχής υπηρεσιών από την πλευρά των χρηστών να ικανοποιείται, βάσει ενός συνόλου παραμέτρων.

Στο κεφάλαιο αυτό, η τιμολογιακή πολιτική των Παρόχων Δικτυακών Πόρων εξετάστηκε όχι μόνο ως μέσο παραγωγής εισοδήματος αλλά και ως ένα πρόσθετο στοιχείο για τον καλύτερο έλεγχο της αποδοτικής χρήσης του διαθέσιμου ραδιοφάσματος των ασύρματων δικτύων. Αυτό γίνεται με την υιοθέτηση μιας δυναμικής πολιτικής τιμολογίων και την ενσωμάτωσή τους σε ευέλικτους μηχανισμούς που θα προτρέπουν τους χρήστες στο να χρησιμοποιήσουν τους ασύρματους πόρους πιο αποτελεσματικά.

Εκείνο που μένει να εξεταστεί είναι η διαμόρφωση των συναρτήσεων Ελέγχου Αποδοχής κίνησης, ώστε να συμπεριλάβουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κίνησης IP πάνω από τα ασύρματα δίκτυα. Με τον όρο ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κίνησης εννοούμε όχι μόνο τις βασικές παραμέτρους δημιουργίας της κίνησης, όπως είναι ο μέσος και ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, αλλά και η ενσωμάτωση των απαιτήσεων της κίνησης σε QoS για την μετάδοση των δεδομένων μιας υπηρεσίας πάνω από συγκεκριμένα δίκτυα.

Τα επόμενα κεφάλαια εξετάζουν το πρόβλημα αυτό σε περισσότερη έκταση και προτείνουν λύσεις όσον αφορά τη μοντελοποίηση των πηγών IP κίνησης και την ικανοποίηση συγκεκριμένων κριτηρίων ποιότητας, που αφορούν στην καθυστέρηση μετάδοσης και την απώλεια κίνησης στους ενδιάμεσους κόμβους.

## **4.7. Αναφορές**

- [1] H. Eguchi, M. Nakajima, and G. Wu, “Signaling Schemes over a Dedicated Wireless Signaling System in the Heterogeneous Network”, Proc. IEEE VTC, Spring 2002, pp. 464–67.
- [2] Gang Wu, Mitsuhiro Mizuno and Paul J. M. Havinga, “MIRAI Architecture for Heterogeneous Network”, IEEE Communications Magazine, February 2002, pp.126-134.
- [3] Fernando J. Velez and Luis M. Correia, “Optimisation of Mobile Broadband Multi-Service Systems Based in Economics Aspects”, Wireless Networks, Kluwer Academic Publishers, Vol.9, 2003, pp. 525–533.
- [4] Christoph Lindemann, Marco Lohmann, and Axel Thümmmler, “Adaptive Call Admission Control for QoS/Revenue Optimization in CDMA Cellular Networks”, ACM Wireless Networks, Vol. 10, Issue 4, July 2004, pp. 457 – 472.
- [5] Neil J. Keon, and G. Anandalingam,” Optimal Pricing for Multiple Services in Telecommunications Networks Offering Quality-of-Service Guarantees”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 11, No. 1, February 2003, pp 66-80.

- [6] Jiongkuan Hou, Jie Yang, and Symeon Papavassiliou, "Integration of Pricing with Call Admission Control to Meet QoS Requirements in Cellular Networks", IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 13, No. 9, September 2002, pp. 898-910.
- [7] C. Saraydar, N. Mandayam and D. Goodman, "Efficient power control via pricing in wireless data networks", IEEE Transactions on Communications, Vol. 50, No. 2, February 2002.
- [8] F. Kelly, "Charging and rate control for elastic traffic," European Transactions on Telecommunications, Vol. 8, 1997, pp.33-37.
- [9] P. Marbach and R. Berry, "Downlink resource allocation and pricing for wireless networks", in Proc. Infocom, New York, 2001, pp. 1470-1479.
- [10] S. J. Shenker, "Fundamental Design Issues for the Future Internet," IEEE JSAC, Vol. 13, No. 7, September 1995, pp. 1176-88.
- [11] Anders Furuskär, "Allocation of Multiple Services in Multi-Access Wireless Systems", 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network, 2002, pp. 261-265, ISBN: 0-7803-7605-6.
- [12] Α. Σταυρουλάκη, «Διαχείριση Υπηρεσιών και Δικτύων σε Ασύρματα Περιβάλλοντα πέραν της 3<sup>ης</sup> Γενιάς», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2004.
- [13] R.J. La and V. Anantharam, "Optimal Routing Control: Repeated Game Approach," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 47, No. 3, March 2002.
- [14] Sajal K. Das and Haitao Lin and Mainak Chatterjee, "An Econometric Model for Resource Management in Competitive Wireless Data Networks", IEEE Network, November/December 2004, pp.20-26.
- [15] IST project SHUFFLE (An agent based approach to controlling resources in UMTS) Web site, [www.ist-shuffle.org](http://www.ist-shuffle.org), January 2001.
- [16] IST project ADAMANT (Airport Decision And MAnagement NeTwork), Annex 1 "Description of work", April 2002.
- [17] P.Demestichas, V.Stavroulaki, V.Tountopoulos, M.Theologou, N.Mitrou, "Service Provider Oriented Management Systems over Open Cellular Network Infrastructures", The Journal of Systems and Software, Elsevier ed., Vol. 69, 2004, pp.1-14.
- [18] Taskaris, V. Stavroulaki, V. Tountopoulos, P. Demestichas, M. Theologou, N. Mitrou, "Distributed Agent-based Architecture for Managing Services and Network Resources in Future Wireless Systems", 8th International Conference on Advances in Communications and Control (COMCON8), Crete, Greece, June 2001.

- [19] V.Tountopoulos, V.Stavroulaki, P.Demestichas, N.Mitrou, M.Theologou, “Service and Network Management Interworking in Future Wireless Systems”, Networking 2002, LNCS 2345, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, GERMANY, 2002.
- [20] F. Kelly: “Notes on effective bandwidths.” In Stochastic Networks: Theory and Applications, Eds: F. P. Kelly, S.Zachary, I. Ziedins, Clarendon Press, Oxford, 1996, pp.141-168.
- [21] Luiz A. Dasilva, “Pricing for QoS-enabled Networks: A Survey”, IEEE Communications Surveys, <http://www.comsoc.org/pubs/surveys>, Second Quarter 2000, pp. 2-8.
- [22] Hahnearl Jeon, Sung-Dae Kim, Young Joon Kim, Hyung-Taek Kim and Jai-Yong Lee, “Performance Analysis of QoS Routing with Network Dependant Delay Cost”, 15th International Conference on Information Networking, ICOIN'01, IEEE Computer Society, online publication, 31 January - 2 February 2001, Beppu City, Oita, Japan, pp. 689-693.
- [23] N. Blefari-Melazzi, D. Di Sorte, G. Reali,” Pricing Strategies for Broadband Radio Access to Network Services with Performance Guarantees”, Next Generation Wireless Networks: Technologies, Protocols, Services and Applications, European Wireless 2002 (EW2002), February 25-28, 2002 – Florence, Italy.

#### **4.8. Βιβλιογραφία**

1. Hal R. Varian, “Intermediate Microeconomics: A Modern Approach,” 5th Ed., 1999, Norton & Co.
2. Drew Fudenberg, Jean Tirole, “Game Theory,” 1991, MIT Press.
3. Mas-Colell, M.D. Whinston, J.R. Green, “Microeconomic Theory,” 1995, Oxford Univ. Press

## **Κεφάλαιο 5**

# **Μελέτη και Μοντελοποίηση της Κίνησης Ασύρματων Δικτύων IP**

### **5.1. Εισαγωγή**

Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια, ο σκοπός των μελλοντικών συστημάτων τηλεπικοινωνιών είναι η υιοθέτηση ενός δικτύου πυρήνα, για το οποίο η επικρατέστερη τεχνολογία φαίνεται να είναι το διαδίκτυο και τα πρωτόκολλα που το συνοδεύουν. Επίσης, τα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης συγκλίνουν προς την υιοθέτηση κοινών πρωτοκόλλων των στρωμάτων δικτύου και μεταφοράς, με τα πρωτόκολλα IP, TCP και UDP να αποτελούν τα βασικά κομμάτια επικοινωνίας των ομότιμων οντοτήτων στα διάφορα σημεία των δικτύων. Συνεπώς, η μελέτη της συμπεριφοράς των ασύρματων δικτύων επιβάλλει πρωτίστως την αντίστοιχη μελέτη και ανάλυση των πρωτοκόλλων αυτών, τα οποία και ρυθμίζουν τη συμπεριφορά της κίνησης.

Έτσι, σε αυτό το κεφάλαιο αναφερόμαστε στα πρωτόκολλα των στρωμάτων δικτύου και μεταφοράς, με βάση τα οποία μεταφέρονται τα δεδομένα στα δίκτυα. Οι υπηρεσίες είναι δυνατόν να διαφοροποιηθούν ανάλογα με το πιο πρωτόκολλο μεταφοράς χρησιμοποιείται πάνω από το IP. Ειδικότερα οι υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων μη πραγματικού χρόνου χρησιμοποιούν το TCP ενώ οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (ροή βίντεο) το UDP. Η διαφορά μεταξύ των δύο πρωτοκόλλων είναι σημαντική, γιατί το TCP χρησιμοποιεί μηχανισμούς που διαμορφώνουν το ρυθμό μετάδοσης ανάλογα με τη συμφόρηση, ενώ το UDP διαμορφώνει μια εντελώς αντίθετη συμπεριφορά, παραμένοντας «απαθής» στις επιπτώσεις της κίνησης στους δικτυακούς κόμβους.

Η τάση στην σύγχρονη εποχή είναι η υποστήριξη υπηρεσιών πάνω από ένα σύνθετο περιβάλλον ραδιοδικτύων, όπως το WLAN και το GPRS. Φαινομενικά, σε μία τέτοια περίπτωση το πρωτόκολλο TCP είναι πιο ελκυστικό και πιο κατάλληλο λόγω του προσαρμοστικού του χαρακτήρα, που μεταφράζεται σε διαφορετικές ελαστικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης σε κάθε δίκτυο. Όμως, ένα σύνολο υπηρεσιών, οι οποίες στηρίζονται στο UDP, είναι ήδη διαθέσιμο και δεν πρέπει να αποκλειστεί από τα μελλοντικά συστήματα. Άρα, και τα δύο πρωτόκολλα πρέπει να εξεταστούν, ενώ ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύνθεση διαφορετικών ειδών κίνησης, που στηρίζονται σε διαφορετικά πρωτόκολλα μεταφοράς, πάνω από το ίδιο κομμάτι δικτύου.

Επίσης, προχωρούμε σε μία αναλυτική ματιά στην έννοια και τα χαρακτηριστικά της κίνησης IP. Συγκεκριμένα, περιγράφεται η κίνηση με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας, η οποία διέπει την πραγματική κίνηση IP. Η περιγραφή αυτή περιλαμβάνει τις ιδιότητες της κίνησης αυτής, τις σχετικές ερευνητικές δραστηριότητες που πιστοποιούν την ύπαρξή της στα δίκτυα IP και τα μοντέλα περιγραφής μίας τέτοιας κίνησης. Επίσης, παρατίθενται και οι επιδράσεις που έχει η ύπαρξη κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας στα IP δίκτυα.

## **5.2. Πρότυπα και μοντέλα κίνησης IP**

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου κίνησης για την εξομοίωση της συμπεριφοράς των χρηστών και των εφαρμογών που αυτοί ενεργοποιούν και χρησιμοποιούν σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα είναι ένα σημαντικό θέμα στην προσπάθεια αξιολόγησης ενός πραγματικού συστήματος. Ειδικά, τα συστήματα εκείνα που υποστηρίζουν ένα σύνολο από διαφορετικές υπηρεσίες απαιτείται να προδιαγράφουν τα χαρακτηριστικά της κίνησης που θα υποστηρίξουν, ώστε να μπορέσουν να μεταχειριστούν αποτελεσματικά την εισερχόμενη κίνηση σε συνδυασμό με τους περιορισμούς του φυσικού περιβάλλοντος, όπως οι περιορισμένοι δικτυακοί πόροι και η διακύμανση του διαθέσιμου εύρους ζώνης του ασύρματου καναλιού.

Η έννοια του περιγραφέα κίνησης (traffic descriptor) έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά δίκτυα [1][2][3][4][5][6][7], ειδικότερα ενσύρματα, τα οποία καλούνται να παρέχουν μηχανισμούς ελέγχου. Οι περιγραφείς κίνησης είναι ένα σύνολο παραμέτρων, οι οποίες συνοδεύουν την αίτηση εγκατάστασης μίας υπηρεσίας, ώστε οι δικτυακοί κόμβοι, από τους οποίους διέρχεται η αίτηση, να έχουν μία αίσθηση της επίδρασης που πιθανόν θα έχει η εγκατάσταση της ζητούμενης υπηρεσίας στην συμπεριφορά του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, ένα δίκτυο μπορεί να εφαρμόσει τους κατάλληλους μηχανισμούς εποπτείας, ώστε να εξασφαλιστεί ότι το ζητούμενο επίπεδο ποιότητας θα εγγυηθεί καθ' όλη τη διάρκεια μιας υπηρεσίας (π.χ. μέσα από μηχανισμούς κράτησης πόρων).

Ανάλογα με το μοντέλο που υιοθετείται για να περιγράψει την κίνηση, οι περιγραφείς κίνησης διαφέρουν. Ωστόσο, σε γενικές γραμμές, λόγω της φύσης των απαιτούμενων συνδέσεων, οι υπηρεσίες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος και τις υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου. Η ειδοποιός διαφορά των δύο αυτών κατηγοριών έγκειται στο γεγονός ότι οι υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος απαιτούν την εγκατάσταση αφιερωμένων συνδέσεων και, συνεπώς, αποκλειστική χρήση του διαθέσιμου φάσματος, σε αντίθεση με τις υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου που δεν έχουν τέτοιες απαιτήσεις σύνδεσης, αλλά μοιράζονται τους πόρους μεταξύ τους.

Οι προσπάθειες ενοποίησης των δικτύων και οι προδιαγραφές των απαιτήσεων διαλειτουργικότητας οδηγούν στην εναρμόνιση των υπηρεσιών πάνω από δίκτυα IP. Αυτό σημαίνει ότι οι υπηρεσίες θα πρέπει να προσαρμοστούν πάνω από το ίδιο πρωτόκολλο IP, το οποίο από την φύση του δεν εξασφαλίζει την εκ των προτέρων σύνδεση, αλλά είναι πρωτόκολλο μεταγωγής πακέτου. Παρόλα αυτά, για να δείξουμε την αντιστοιχία των παραδοσιακών



μηχανισμών παροχής ποιότητας με τους βελτιωμένους για τα δίκτυα IP, όσον αφορά πάντα στους περιγραφείς κίνησης, εδώ θα αναφέρουμε τους περιγραφείς και για τις δύο αυτές κατηγορίες υπηρεσιών [8].

Για μία υπηρεσία μεταγωγής κυκλώματος οι περιγραφείς κίνησης περιλαμβάνουν:

- Το ρυθμό άφιξης κλήσεων ανά χρήστη
- Τη μέση διάρκεια παραμονής μέσα σε μία περιοχή δικτύου (όπως η κυψέλη προκειμένου για ένα κυψελωτό δίκτυο), η οποία δίνει και μια αίσθηση της κινητικότητας του χρήστη
- Τη μέση διάρκεια μιας κλήσης

Τέτοιες υπηρεσίες συνήθως μοντελοποιούνται με βάση τα παραδοσιακά Μαρκοβιανά μοντέλα και την Erlang-B/C φόρμουλα, τα οποία στηρίζονται σε απλές διαδικασίες γέννησης-θανάτου γεγονότων (birth-death process). Το πιο διαδεδομένο μοντέλο ανάλυσης κίνησης για μια υπηρεσία μεταγωγής κυκλώματος είναι το M/M/1, για την περίπτωση ενός εξυπηρετητή κίνησης [9]. Ο ρυθμός άφιξης τέτοιων γεγονότων ακολουθεί την κατανομή Poisson, ενώ για το ρυθμό αναχώρησης, ο οποίος αντιστοιχεί στη μέση διάρκεια μιας κλήσης, υιοθετείται η εκθετική κατανομή. Οι αντίστοιχες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης είναι σταθερές (σταθερού ρυθμού μετάδοσης υπηρεσίες).

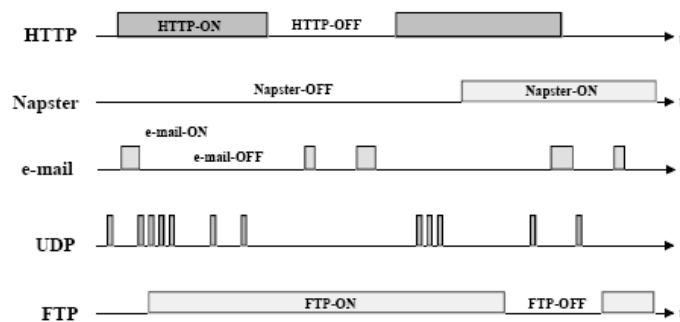
Στην περίπτωση των υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου, και ειδικότερα στην IP κίνηση, η κατάσταση είναι διαφορετική. Πολλά μοντέλα έχουν κατά καιρούς προταθεί, τα οποία εξαρτώνται από το πρωτόκολλο του στρώματος δικτύου, αλλά και από την ίδια την φύση των συστημάτων μεταφοράς. Οι υπηρεσίες μετάδοσης πακέτων απαιτούν την ύπαρξη περισσότερων περιγραφών, λόγω της δομής της κίνησης, η οποία φαίνεται να είναι ιεραρχική και διακρίνεται σε επίπεδα.

Οι αντίστοιχοι περιγραφείς κίνησης για τις υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου είναι:

- Ο ρυθμός άφιξης αιτήσεων συνδέσεων ανά χρήστη
- Ο ρυθμός άφιξης συνόδων ανά χρήστη
- Ο χρόνος αναμονής μεταξύ αίτησης και αντίστοιχης απάντησης
- Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών κλήσεων πακέτων της ίδιας συνόδου
- Ο αριθμός των κλήσεων πακέτων μιας συνόδου
- Ο αριθμός των πακέτων μιας κλήσεως πακέτων
- Το μέγεθος των πακέτων μιας κλήσεως πακέτων
- Ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων της ίδιας κλήσης πακέτων.

Το ενιαίο πρότυπο για την κίνηση των χρηστών, που παρουσιάζεται στο [10], χρησιμοποιεί την έννοια ότι ο χρήστης, ο οποίος τρέχει τις σε μη πραγματικό χρόνο εφαρμογές (π.χ. HTTP, FTP,

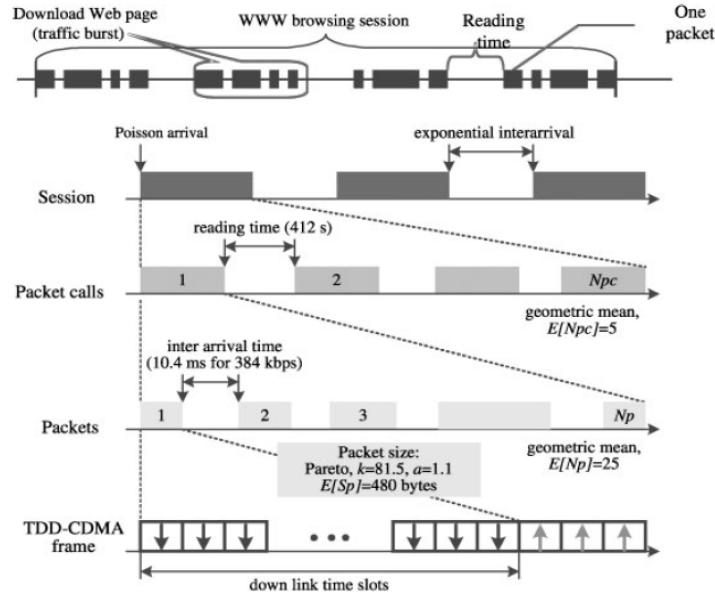
ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, Napster κ.λ.π.), ακολουθεί ένα χαρακτηριστικό σχέδιο χρήσης. Εξετάζοντας αυτό το πρότυπο, ένας χρήστης μπορεί να τρέξει ταυτόχρονα διαφορετικές εφαρμογές, π.χ. WWW ξεφύλλισμα, κατεβάζοντας παράλληλα αρχεία μουσικής. Κάθε μία εφαρμογή μπορεί να περιγραφεί από τις στατιστικές ιδιότητές της. Αυτές οι στατιστικές ιδιότητες περιλαμβάνουν μια εναλλασσόμενη διαδικασία περιόδων ON και OFF με συγκεκριμένο μήκος εφαρμογής ή κατανομή του όγκου της πληροφορίας, αντίστοιχα. Επιπλέον, μέσα σε κάθε ON περίοδο, η διαδικασία άφιξης πακέτων προσδιορίζεται πλήρως από τους χρόνους διαδοχικών αφίξεων πακέτων και τα αντίστοιχα μεγέθη πακέτων. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-1 [11], κάθε υπηρεσία διακρίνεται από διαφορετικές στατιστικές ιδιότητες, οι οποίες όμως πρέπει να είναι ίδιες για κάθε χρήστη που ζητά την συγκεκριμένη υπηρεσία.



**Σχήμα 5-1. Ενιαίο πρότυπο για την κίνηση που παράγεται από τα διάφορα είδη υπηρεσιών**

Το ενιαίο πρότυπο κίνησης των χρηστών χαρακτηρίζει την κίνηση που παράγεται από ένα μεμονωμένο χρήστη. Οι χρήστες διακρίνονται μεταξύ τους σε πραγματικό χρόνο χρήστες και σε μη σε πραγματικό χρόνο χρήστες, ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που λαμβάνουν. Οι εναλλασσόμενες περίοδοι ON και OFF που φαίνονται στο Σχήμα 5-1 αναλύονται παραπέρα στα δομικά κομμάτια της επικοινωνίας, όπως είναι οι σύνοδοι και οι κλήσεις πακέτων [12]. Έτσι, το ενιαίο πρότυπο κίνησης όλων αυτών των χρηστών μπορεί να δομηθεί σε τρία τουλάχιστον διαφορετικά επίπεδα, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 5-2 [13]:

- Το επίπεδο συνόδου, το οποίο περιγράφει τη συμπεριφορά των χρηστών κατά τη διαδικασία εγκατάστασης και χαρακτηρίζεται από την κατανομή των χρόνων μεταξύ διαδοχικών αφίξεων συνόδων και την κατανομή του όγκου των δεδομένων συνόδων.
- Το επίπεδο κλήσης πακέτων, το οποίο περιγράφει για κάθε ξεχωριστή εφαρμογή ή σύνοδο τις αντίστοιχες κατανομές των χρόνων μεταξύ διαδοχικών αφίξεων κλήσεων πακέτων και όγκου δεδομένων κλήσεων πακέτων.
- Το επίπεδο πακέτου, το οποίο χαρακτηρίζει τις αντίστοιχες κατανομές των χρόνων μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων και όγκου δεδομένων πακέτων, εντός συγκεκριμένων κλήσεων πακέτων εφαρμογών.



Σχήμα 5-2. Ιεραρχική δόμηση για το πρότυπο κίνησης χρηστών

Για να γίνει κατανοητή η διάκριση των διαφόρων αυτών επιπέδων, παρατίθεται το ακόλουθο παράδειγμα.. Υποθέτουμε ένα χρήστη, ο οποίος επιθυμεί να πλοηγηθεί σε διάφορες σελίδες εντός του διαδικτύου. Κάθε φορά που ο χρήστης επιλέγει να εισέλθει σε μία σελίδα εκκινεί μία σύννοδος (session). Κατά τη διαδικασία πλοήγησης του χρήστη εντός των περιεχομένων της σελίδας αυτής, ο χρήστης λέμε ότι πραγματοποιεί κλήσεις πακέτων (packet calls), που μπορεί να αντιστοιχούν, για παράδειγμα, στη λήψη μίας εικόνας ή του αντίστοιχου κειμένου. Προφανώς, κάθε κλήση πακέτων αποτελείται από μία σειρά πακέτων (packets), τα οποία μεταδίδονται πάνω από το δίκτυο και τα οποία τεμαχίζονται κατά την μεταφορά τους (segmentation), ώστε να συμμορφωθούν με τις δυνατότητες μεταφοράς του δικτύου αυτού.

Κάθε χρήστης μπορεί να τρέχει ταυτόχρονα ένα σύνολο εφαρμογών, όπως HTTP, ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, και διάφορες άλλες εφαρμογές. Κάθε εφαρμογή χαρακτηρίζεται από την εναλλαγή περιόδων ON και OFF, όπως ήδη παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5-1. Οι κατανομές των χρόνων μεταξύ διαδοχικών αφίξεων συνδέσεων και του μεγέθους των δεδομένων συνδέσεων ακολουθούν γενικές στατιστικές κατανομές. Ομοίως, οι αντίστοιχες κατανομές στο επίπεδο πακέτου εξαρτώνται από την εφαρμογή. Η συνολική ροή κίνησης από ένα χρήστη αποτελείται από την υπέρθεση της διαδικασίας άφιξης πακέτων από όλες τις συνδέσεις εφαρμογών μέσα στη σύννοδο του χρήστη. Οι νέοι χρήστες που εισάγονται στο εξεταζόμενο περιβάλλον εισέρχονται σύμφωνα με μια συγκεκριμένη κατανομή του χρόνου διαδοχικών αφίξεων συνόδων και εγκαταλείπουν το σύστημα μετά από τη μετάδοση συγκεκριμένου όγκου πληροφορίας, η οποία ακολουθεί μία δεδομένη κατανομή για το μέγεθος συνόδου. Αν και αυτή η προσέγγιση για τη μοντελοποίηση της κίνησης είναι αποδοτική για μελέτες προσομοίωσης, η φύση των πηγών, που παράγονται από το πρότυπο κίνησης μεμονωμένων χρηστών και παρουσιάζει μακρές ουρές των αντίστοιχων κατανομών, δεν οδηγεί σε αναλυτικά αποτελέσματα για την υιοθέτηση ενός

προτύπου, που μπορεί να ενσωματωθεί ως ένα συστατικό παραγωγή κίνησης μέσα στα αναλυτικά μοντέλα. Αυτό οδηγεί σε μια διαφορετική προσέγγιση μοντελοποίησης, η οποία χρησιμοποιεί μια πιθανολογική διαδικασία για την προσέγγιση των κρίσιμων ιδιοτήτων της εξεταζόμενης κίνησης IP.

Το πρότυπο κίνησης που μόλις περιγράφηκε αποτελεί τη βάση για τα μοντέλα προσέγγισης και ανάλυσης της IP κίνησης. Όπως θα φανεί και στο επόμενο κεφάλαιο, μια τέτοια ιεραρχική δομή της κίνησης IP είναι σημαντική για την κατανόηση των ιδιοτήτων της και συμβάλλει αποφασιστικά στην εξεύρεση ασυμπτωτικών όσο και ικανοποιητικών μοντέλων περιγραφής της κίνησης. Το υπόλοιπο αυτού του κεφαλαίου αναλώνεται στη μελέτη των χαρακτηριστικών των πρωτοκόλλων του στρώματος μεταφοράς, τα οποία συμβάλλουν στη δημιουργία της ειδοποιού διαφοράς μεταξύ των χαρακτηριστικών των διαφόρων IP υπηρεσιών.

### **5.3. Εισαγωγικά στα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου UDP**

Το πρωτόκολλο UDP [14] επιτελεί τις λιγότερες δυνατές λειτουργίες που θα περιμέναμε από ένα πρωτόκολλο μεταφοράς. Εκτός από τη λειτουργία της πολυπλεξίας / αποπλεξίας και ενός μικρού ελέγχου λαθών, δεν προσθέτει τίποτα στο IP. Στην ουσία, αν διαλέξουμε το UDP τότε είναι σαν να μιλάμε απευθείας με το IP. Μπορεί βέβαια να αναρωτηθεί κανείς γιατί κάποιος προγραμματιστής να διαλέξει μια υλοποίηση βασισμένη στο UDP, παρά στο TCP. Το TCP μπορεί να παρέχει μια αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων, αλλά το UDP έχει και αυτό αρκετά πλεονεκτήματα, τα οποία αναλύονται παρακάτω σε σχέση με αυτά που προσφέρει το TCP:

*Δεν απαιτεί σύνδεση:* Το TCP χρησιμοποιεί μια τριμερή διαπραγμάτευση πριν αρχίσει τη μεταφορά δεδομένων. Το UDP απλά μεταδίδει χωρίς προκαταρκτικές διαδικασίες. Έτσι το UDP δεν εισάγει καθυστέρηση, περιμένοντας να δημιουργήσει μια σύνδεση. Γι' αυτό και οι εφαρμογές DNS (Domain Name Service) χρησιμοποιούν το UDP, αλλιώς με τη χρήση του TCP τέτοιες εφαρμογές θα ήταν πολύ πιο αργές. Το HTTP απεναντίας χρησιμοποιεί το TCP γιατί η αξιοπιστία είναι πολύ σημαντική όταν μεταδίδονται ιστοσελίδες με κείμενο. Γι' αυτό και υπάρχει μια καθυστέρηση κατά την πλοήγησή μας στο διαδίκτυο.

*Δεν διατηρεί σύνδεση:* Το TCP διατηρεί τη σύνδεση όταν επικοινωνούν δύο συστήματα. Αυτή η κατάσταση σύνδεσης περιλαμβάνει buffers αποστολής και λήψης, παραμέτρους ελέγχου συμφόρησης, και παραμέτρους αριθμού σειράς και επιβεβαίωσης. Αυτή η κατάσταση είναι απαραίτητη για να υλοποιήσει το TCP την υπηρεσία αξιόπιστης μεταφοράς δεδομένων και ελέγχου συμφόρησης. Το UDP από την άλλη, δε διατηρεί κατάσταση σύνδεσης και δε χρησιμοποιεί καμία από τις παραπάνω παραμέτρους. Γι' αυτό το λόγο, ένας διακομιστής/ εξυπηρετητής που τρέχει μια συγκεκριμένη εφαρμογή (π.χ. video streaming), μπορεί να υποστηρίξει πολλούς περισσότερους πελάτες όταν η εφαρμογή βασίζεται στο UDP παρά στο TCP.

*Μικρή επικεφαλίδα πακέτου:* Ένα τεμάχιο TCP έχει επικεφαλίδα 20 bytes, ενώ το UDP έχει μόλις 8 bytes.

*Καλύτερος έλεγχος της εφαρμογής όσον αφορά το είδος και το συγχρονισμό των δεδομένων που στέλνονται:* Στο UDP, μόλις μια εφαρμογή περάσει δεδομένα στο UDP, αυτό θα τα τοποθετήσει σε ένα τεμάχιο UDP και θα το στείλει απευθείας στο δίκτυο. Το TCP από την άλλη υλοποιεί ένα μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης ο οποίος τροποποιεί το ρυθμό αποστολής πακέτων του επιπέδου μεταφοράς, όταν μια ζεύξη μεταξύ πηγής και προορισμού έχει πολύ μεγάλο φορτίο. Επίσης, το TCP θα συνεχίσει να στέλνει ένα τεμάχιο δεδομένων έως ότου λάβει επιβεβαίωση από τον παραλήπτη, ανεξάρτητα από το χρόνο που θα χρειαστεί για αυτήν την αξιόπιστη παράδοση. Οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου όμως, απαιτούν ένα ελάχιστο ρυθμό αποστολής, δε δέχονται πακέτα με μεγάλη καθυστέρηση και ανέχονται κάποια απώλεια δεδομένων. Γι' αυτό και το μοντέλο του TCP δεν τους ταιριάζει. Αυτές οι εφαρμογές χρησιμοποιούν το UDP και υλοποιούν από τη μεριά τους όποια επιπλέον λειτουργικότητα χρειάζεται.

Ο Πίνακας 5-1 αναφέρει ένα σύνολο από δημοφιλείς εφαρμογές του διαδικτύου καθώς και τα πρωτόκολλα μεταφοράς που χρησιμοποιούν. Όπως θα περιμέναμε, το E-mail, το telnet, το WEB browsing και το FTP χρησιμοποιούν το TCP, αφού χρειάζονται την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων. Παρόλα αυτά, η χρησιμότητα του πίνακα είναι στο να δείξει ότι ένα αξιοσέβαστο πλήθος σημαντικών εφαρμογών χρησιμοποιούν το UDP σαν το πρωτόκολλο μεταφοράς.

**Πίνακας 5-1. Εφαρμογές διαδικτύου και τα αντίστοιχα πρωτόκολλα μεταφοράς**

| Εφαρμογή                          | Πρωτόκολλο στρώματος εφαρμογής | Πρωτόκολλο μεταφοράς |
|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Ηλεκτρονικό ταχυδρομείο           | SMTP                           | TCP                  |
| Απομακρυσμένη πρόσβαση τερματικού | Telnet                         | TCP                  |
| Web                               | HTTP                           | TCP                  |
| Μεταφορά αρχείων                  | FTP                            | TCP                  |
| Απομακρυσμένη μεταφορά αρχείων    | NFS                            | UDP                  |
| Πολυμέσα                          | Εξαρτάται από εφαρμογή         | UDP                  |
| Τηλεφωνία μέσω διαδικτύου         | Εξαρτάται από εφαρμογή         | UDP                  |
| Διαχείριση δικτύου                | SNMP                           | UDP                  |
| Πρωτόκολλο δρομολόγησης           | RIP                            | UDP                  |
| Μετάφραση ονόματος                | DNS                            | UDP                  |

Το UDP χρησιμοποιείται για την ενημέρωση των πινάκων δρομολόγησης στους κόμβους μέσω του RIP (Routing Information Protocol), γιατί οι ανανεώσεις στέλνονται περιοδικά και οι χαμένες ανανεώσεις αντικαθίστανται από τις πιο πρόσφατες. Το UDP χρησιμοποιείται, επίσης, για να μεταφέρει δεδομένα διαχείρισης δικτύου (Simple Network Management Protocol - SNMP). Σε αυτήν την περίπτωση είναι προτιμότερο από το TCP γιατί οι εφαρμογές διαχείρισης πρέπει να τρέχουν και όταν το δίκτυο βρίσκεται σε συμφόρηση, και τότε δεν μπορούμε να έχουμε αξιόπιστη υπηρεσία δεδομένων μαζί με έλεγχο συμφόρησης (αυτό που υλοποιεί δηλαδή το TCP). Επίσης, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, το DNS χρησιμοποιεί το UDP αποφεύγοντας έτσι τις καθυστερήσεις του TCP λόγω εγκατάστασης και απόλυσης σύνδεσης.

Επίσης, ο Πίνακας 5-1 δείχνει ότι το UDP είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο για εφαρμογές πολυμέσων όπως τηλεφωνία μέσω διαδικτύου, συνδιάσκεψη video πραγματικού χρόνου, και εκπομπή αποθηκευμένου video [15]. Όλες αυτές οι εφαρμογές ανέχονται μία μικρή απώλεια δεδομένων, και γι' αυτό η αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων δεν είναι τόσο κρίσιμη για την επιτυχία της υπηρεσίας. Επίσης, οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως τηλεφωνία μέσω διαδικτύου και η συνδιάσκεψη video, επηρεάζονται σημαντικά από τον έλεγχο συμφόρησης που εφαρμόζει το TCP. Γι' αυτό και οι προγραμματιστές εφαρμογών πολυμέσων χρησιμοποιούν το UDP.

Παρόλο που η χρήση του UDP είναι πολύ διαδεδομένη, είναι και λίγο αντιφατική. Το UDP δεν έχει καθόλου έλεγχο συμφόρησης. Χωρίς αυτόν, το δίκτυο μπορεί να φορτιστεί σε πολύ μεγάλο βαθμό. Αν όλοι οι σταθμοί ενός δικτύου αρχίσουν να εκπέμπουν υψηλής ποιότητας video, θα υπήρχε τεράστιο φορτίο στους δρομολογητές και το δίκτυο θα βρισκόταν σε πολύ δυσμενή κατάσταση. Γι' αυτό και η έλλειψη μηχανισμού ελέγχου συμφόρησης μπορεί να αποτελέσει πιθανώς ένα σημαντικό πρόβλημα..

Μια εφαρμογή μπορεί να παρέχει αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων χρησιμοποιώντας το UDP. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί αν ο μηχανισμός που θα εξασφαλίζει την αξιοπιστία ενσωματωθεί στην εφαρμογή. Για παράδειγμα, μπορούν να υλοποιηθούν μηχανισμοί επιβεβαίωσης και επανεκπομπής. Αλλά αυτό θα προσέδιδε μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας στην εφαρμογή. Πάντως, αρκετές εφαρμογές πολυμέσων πραγματικού χρόνου υλοποιούν μηχανισμούς επιβεβαίωσης και επανεκπομπής για να μειώσουν το ποσοστό χαμένων πακέτων.

#### **5.4. Εισαγωγικά στα χαρακτηριστικά της TCP κίνησης**

Το TCP δουλεύει πάνω στο IP για να επιτευχθεί η από άκρη σε άκρη αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων [2]. Η ροή δεδομένων του TCP είναι επιρρεπής σε προσαρμογές του ρυθμού μετάδοσης, όπως, ήδη, αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο. Το μέγεθος ενός TCP πακέτου είναι 1500 bytes. Τα δεδομένα αποστέλλονται σε ομάδες τέτοιων πακέτων τα οποία ονομάζονται «παράθυρα» (TCP Windows). Με τη λήψη ενός τέτοιου παραθύρου ο αποστολέας πρέπει να στείλει, μέσα σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, μια επιβεβαίωση (μία για κάθε παράθυρο). Αν

δε σταλεί η επιβεβαίωση ή δε σταλεί μέσα σε ένα προκαθορισμένο χρονικό περιθώριο αναμονής της επιβεβαίωσης (timeout) τότε ο αποστολέας αναμεταδίδει ολόκληρο το παράθυρο.

Το TCP είναι το δημοφιλέστερο πρωτόκολλο στρώματος μεταφοράς σχετικά με το διαδίκτυο και προσφέρει μια αξιόπιστη υπηρεσία ροών ψηφιολέξεων (bytes). Παρέχει μία αδιαφανή κατάτμηση και την επανασυναρμολόγηση των δεδομένων που αποστέλλονται από τους χρήστες και διαθέτει μηχανισμούς ελέγχου των ροών και συμφόρησης των δικτύων. Τα πακέτα TCP αναγνωρίζονται συσσωρευτικά καθώς φθάνουν σε σειρά, ενώ η λήψη πακέτων εκτός σειράς οδηγεί στην παραγωγή διπλών μηνυμάτων επιβεβαίωσης λήψης. Ο αποστολέας ανιχνεύει μια απώλεια όταν λαμβάνει πολλαπλάσιες επιβεβαιώσεις λήψεων πακέτων (συνήθως 3) και θεωρεί έτσι ότι το επόμενο πακέτο χάθηκε. Το πρωτόκολλο IP μπορεί να αναπροσαρμόσει την σειρά των IP πακέτων, με συνέπεια το TCP να μην μπορεί άμεσα να αντιληφθεί ότι η λήψη πακέτων εκτός σειράς σημαίνει κατ' ανάγκη και απώλεια πακέτων.

Όταν μία σύνοδος καθίσταται ανενεργή ή οι επιβεβαιώσεις λήψης χάνονται, το TCP ανιχνεύει τις απώλειες χρησιμοποιώντας τους χρονομέτρες λήξης εγκυρότητας (timeouts). Τα χρονόμετρα αναμετάδοσης ενημερώνονται συνεχώς, με βάση ένα σταθμισμένο μέσο όρο των προηγούμενων μετρήσεων των χρονικών περιόδων καθυστέρησης πλήρους διαδρομής (Round Trip Time - RTT). Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι κρίσιμη, δεδομένου ότι οι καθυστερημένες λήξεις εγκυρότητας επιβραδύνουν την αποκατάσταση από τα λάθη, ενώ οι αντίστοιχες πρόωρες οδηγούν σε περιττές αναμεταδόσεις.

Μια πρωταρχική ανησυχία για το TCP είναι η συμφόρηση [16]. Η συμφόρηση εμφανίζεται όταν οι δρομολογητές υπερφορτώνονται με κίνηση που αναγκάζει τις ουρές αναμονής τους να γεμίζουν και τελικά να υπερχειλίζουν, με αποτέλεσμα τις υψηλές καθυστερήσεις και τις απώλειες πακέτων. Δεδομένου ότι η κίνηση TCP είχε αρχικά σχεδιαστεί για ενσύρματες συνδέσεις, όπου η αξιοπιστία μετάδοσης είναι μεγάλη, το TCP υποθέτει ότι όλες οι απώλειες οφείλονται στη συμφόρηση των δικτύων. Επομένως, όταν ανιχνεύονται απώλειες, εκτός από την αναμετάδοση του χαμένου πακέτου, το TCP μειώνει, επίσης, το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ώστε να επιτραπεί στους δρομολογητές να αδειάσουν τις ουρές. Στη συνέχεια, αυξάνει βαθμιαία (εκθετικά) το ρυθμό μετάδοσης ώστε να εξεταστεί πάλι η χωρητικότητα του δικτύου.

Η συμφόρηση στο δίκτυο, που έχει σαν αποτέλεσμα τις απώλειες, επηρεάζει την απόδοση του στρώματος μεταφοράς και εφαρμογής. Ένας γενικός κανόνας διατυπώνει ότι η συνολική διέλευση του TCP αυξάνει με το μέγεθος του παραθύρου γραμμικά μέχρι το σημείο, όπου είτε το μέγιστο μέγεθος του παραθύρου έχει επιτευχθεί είτε το παράθυρο ισοδυναμεί με το γινόμενο της καθυστέρησης πλήρους διαδρομής (round-trip time) επί το εύρος ζώνης.

Μια σημαντική αναβάθμιση στην αρχική υλοποίηση του TCP, η οποία έχει γίνει καθολικά αποδεκτή σήμερα, αποτελεί το TCP αργής εκκίνησης [17]. Αυτό το βελτιωμένο πρωτόκολλο έχει σχεδιαστεί για τη δυναμική μεγιστοποίηση της διέλευσης και την αποφυγή της κατάρρευσης λόγω συμφόρησης. Το TCP διατηρεί το παράθυρο συμφόρησης, το οποίο είναι μια εκτίμηση του

αριθμού των πακέτων που μπορούν να μεταφερθούν χωρίς την πρόκληση συμφόρησης. Νέα πακέτα στέλνονται μόνο εάν επιτρέπεται τόσο από αυτό το παράθυρο όσο και από το παράθυρο του δέκτη. Η βασική αρχή αυτού του αλγορίθμου στηρίζεται στον απλό κανόνα ότι ο TCP αποστολέας ανιχνεύει το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης το οποίο δε μπορεί να γίνει μεγαλύτερο από το μέγεθος του παραθύρου που στέλνει ο TCP αποστολέας.

Το παράθυρο συμφόρησης αρχίζει με ένα πακέτο, το οποίο προσανξάνεται με εκθετικό τρόπο, αμέσως μετά την λήψη πακέτων επιβεβαίωσης. Αυτό ονομάζεται αργή φάση εκκίνησης (slow start). Αν ανιχνευθεί η απώλεια ενός πακέτου, τότε το πρωτόκολλο θεσπίζει σαν κατώτατο όριο αργής εκκίνησης το μισό της τρέχουσας τιμής του παραθύρου συμφόρησης, το παράθυρο συμφόρησης επαναρυθμίζεται σε ένα πακέτο, και το χαμένο πακέτο αναμεταδίδεται. Η φάση αργής εκκίνησης επαναλαμβάνεται έως ότου επιτυγχάνεται το κατώτατο όριο. Στη συνέχεια, το παράθυρο συμφόρησης αυξάνεται ανά ένα πακέτο ανά επιβεβαίωση. Αυτή είναι γνωστή σαν φάση αποφυγής συμφόρησης (congestion avoidance) και το παράθυρο συμφόρησης αυξάνεται γραμμικά. Όταν ανιχνεύονται απώλειες λόγω λήψης διπλών επιβεβαιώσεων, που δείχνουν ότι τα αντίστοιχα πακέτα έχουν παραληφθεί, το TCP αναμεταδίδει το χαμένο πακέτο, μειώνει στο μισό το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης, και ξεκινά μια νέα φάση αποφυγής συμφόρησης. Η περιγραφή αυτή είναι βασισμένη στο TCP Reno [18], το οποίο αποτελεί μία έκδοση λειτουργίας του TCP. Αν ανιχνευθούν πολλές απώλειες, αυτές μπορούν επανειλημμένα να μειώσουν το κατώτατο όριο αργής εκκίνησης, προκαλώντας την εισαγωγή στη φάση αποφυγής συμφόρησης, η οποία αυξάνει μόνο γραμμικά (και όχι εκθετικά) το τρέχον μέγεθος παραθύρου, οδηγώντας με τον τρόπο αυτό σε σημαντική υποβάθμιση της διέλευσης.

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε ένα παράδειγμα για τη λειτουργία του αλγορίθμου του δυναμικού TCP παραθύρου μεταξύ ενός σταθμού και ενός εξυπηρετητή. Ο αποστολέας θεωρεί αρχικά μέγεθος παραθύρου συμφόρησης ίσο με το μήκος ενός πακέτου TCP και περιμένει για την παραλαβή μιας επιβεβαίωσης. Συγχρόνως, ο αποστολέας ενεργοποιεί ένα μετρητή, ο οποίος καθορίζει το μέγιστο χρόνο που θα πρέπει να περιμένει ο αποστολέας μέχρι να του αποσταλεί η επιβεβαίωση. Όταν το πακέτο παραδοθεί στον σταθμό για τον οποίο προορίζεται, στέλνεται αμέσως στον αποστολέα ένα μήνυμα επιβεβαίωσης. Κατόπιν αυτού, ο σταθμός αποστολής διπλασιάζει το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης και σταματά να περιμένει την επιβεβαίωση. Όταν ξαναγίνει επιτυχής λήψη επιβεβαίωσης, ο αποστολέας μεγαλώνει ξανά το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης στα τέσσερα TCP πακέτα. Αυτή η διαδικασία διπλασιασμού του παραθύρου συνεχίζεται με κάθε επιτυχή λήψη του μηνύματος επιβεβαίωσης. Αν δεν αποσταλεί η επιβεβαίωση και εκπνεύσει το χρονικό διάστημα που έχει καθοριστεί από το μετρητή, τότε ο αποστολέας επαναμεταδίδει το πακέτο, το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης μειώνεται στο ένα πακέτο και αρχίζει από την αρχή η ίδια διαδικασία.

Όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 5.2, η ροή των πακέτων TCP ακολουθούν το μοντέλο της ON/OFF κίνησης [19], όπου η κατάσταση ON αντιστοιχεί στην αποστολή ενός παραθύρου, και η κατάσταση OFF αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα «σιωπής», κατά το οποίο ο αποστολέας



περιμένει το μήνυμα επιβεβαίωσης λήψης. Επομένως η TCP κίνηση μπορεί να μοντελοποιηθεί με ON/OFF πηγές, αρκεί να καθορίσουμε την αντιστοιχία των παραμέτρων που περιγράφουν την TCP κίνηση με αυτές των ON/OFF πηγών.

Αρχικά θα καθορίσουμε τις παραμέτρους που περιγράφουν το μοντέλο κίνησης με τις ON/OFF πηγές. Αυτές είναι ο ρυθμός αιχμής (peak rate)  $\hat{r}$  (π.χ. ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων κατά την ON περίοδο) και οι μέσοι χρόνοι παραμονής στην ON και στην OFF περίοδο  $\tau$  και  $\sigma$  αντίστοιχα. Για την ανάλυση μπορούν να χρησιμοποιηθούν Μαρκοβιανά μοντέλα ροής ρευστού υποθέτοντας εκθετικά κατανομημένους χρόνους παραμονής στις αντίστοιχες καταστάσεις. Στην πράξη, η κατανομή των χρόνων παραμονής είναι λιγότερο μεταβλητοί και το εκθετικό μοντέλο παρέχει ένα συντηρητικό υπολογισμό, ο οποίος απαιτεί ένα ελάχιστο αριθμό πράξεων. Η εν γένει προσέγγιση της κίνησης IP με Μαρκοβιανά μοντέλα, πάντως, θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο. Ο αντικειμενικός σκοπός αυτής εδώ της παρουσίασης είναι μόνο να καταδειχθεί η αναλογία μεταξύ της συμπεριφοράς του πρωτοκόλλου TCP με την αντίστοιχη των ON/OFF πηγών.

Έτσι, στην προσπάθεια να αντιστοιχίσουμε τις παραμέτρους του ON/OFF μοντέλου με τα χαρακτηριστικά της TCP κίνησης προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Το μέγεθος του TCP παραθύρου  $u$  είναι ισοδύναμο με το μέγεθος έκρηξης του ON/OFF μοντέλου, π.χ. το συνολικό ποσό κίνησης  $\hat{r}\tau$  που παράγεται κατά τη διάρκεια της ON περιόδου.
- Η καθυστέρηση πλήρους διαδρομής μέχρι τη λήψη της επιβεβαίωσης για το πιο πρόσφατα απεσταλμένο TCP παράθυρο αντιστοιχεί στη διάρκεια της OFF περιόδου  $\sigma$ .
- Ο μέσος ρυθμός  $\bar{r}$  αντιστοιχεί στο ρυθμό σε ένα κύκλο ON/OFF.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει για το μέσο ρυθμό  $\bar{r} = \hat{r} \frac{\tau}{\tau + \sigma} = \frac{u}{\tau + \sigma}$  το οποίο αν λύσουμε ως προς  $\tau$  έχουμε ,

$$\tau = u / \bar{r} - \sigma \quad (5-1)$$

και επίσης

$$\hat{r} = \frac{\bar{r}}{1 - \sigma \bar{r} / u} \quad (5-2)$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις και με δεδομένο το μέσο ρυθμό  $\bar{r}$ , το μέγεθος του TCP παραθύρου  $u$  και την καθυστέρηση πλήρους διαδρομής  $\sigma$  είναι δυνατό να καθορίσουμε τις άλλες δυο παραμέτρους του ON/OFF μοντέλου. Το μέγεθος του παραθύρου  $u$  εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του δικτύου και από το είδος των υπηρεσιών. Μάλιστα, για το ίδιο είδος υπηρεσιών, δίκτυα με υψηλότερο εύρος ζώνης παρέχουν μεγαλύτερα μεγέθη παραθύρων.

## 5.5. Μοντελοποίηση κίνησης TCP

Όπως γίνεται φανερό, το TCP είναι ένα σύνθετο πρωτόκολλο του στρώματος μεταφοράς, το οποίο βασίζεται στην έννοια του παραθύρου και εξασφαλίζει αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων με την αναμετάδοση χαμένων πακέτων. Ο αλγόριθμος αποφυγής συμφόρησης που υλοποιείται στα πλαίσια του TCP στοχεύει στο να ελαχιστοποιήσει την απώλεια και να πραγματοποιήσει μια δίκαιη διανομή των πόρων, με το να ρυθμίζει δυναμικά το μέγεθος του TCP παραθύρου. Ειδικότερα, λόγω της φύσης των ασύρματων δικτύων, η υποστήριξη κίνησης TCP σε ένα σύνθετο περιβάλλον γεννά ένα σύνολο από ερευνητικά θέματα, τα οποία έχουν να κάνουν, κυρίως, με τη διάκριση των απωλειών, η οποία μπορεί να οφείλεται είτε στην συμφόρηση του δικτύου, οπότε ο μηχανισμός σταδιακής μείωσης του ρυθμού μετάδοσης, όπως περιγράφηκε παραπάνω, είναι έγκυρος, είτε οι απώλειες αυτές προέρχονται από το ασύρματο κανάλι, οπότε μια ενδεχόμενη κίνηση ανάδρασης του TCP κρίνεται εσφαλμένη. Προς την κατεύθυνση αυτή έχουν προταθεί πολλές λύσεις, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά στο [20].

Στο [21] δίνεται μια έκφραση του ρυθμού μετάδοσης κίνησης TCP, η οποία περιλαμβάνει και τις αναμεταδόσεις χαμένων πακέτων. Η έκφραση αυτή είναι η ακόλουθη:

$$R_{tcp}(p) \approx \min \left( \frac{W_{\max}}{RTT}, \frac{1}{RTT \sqrt{2p/3} + T_0 \min(1, 3\sqrt{3p/8}) p(1 + 32p^2)} \right) \quad (5-3)$$

Στη σχέση αυτή  $W_{\max}$  είναι το μέγιστο μέγεθος παραθύρου,  $RTT$  είναι ο χρόνος πλήρους διαδρομής και  $T_0$  είναι η αρχική τιμή time-out για την επιβεβαίωση λήψης. Ανάλογες εκφράσεις για την προσομοίωση του ρυθμού μετάδοσης των TCP συνδέσεων έχουν δοθεί σε πολλές άλλες μελέτες [22][23], οι οποίες παρουσιάζουν την εξάρτηση του ρυθμού από το  $RTT$  και τις απώλειες δεδομένων. Έτσι, καθώς μία οποιαδήποτε κίνηση, που εισέρχεται σε ένα κόμβο δικτύου, προκαλεί συμφόρηση, οι ροές TCP διαμορφώνουν ανάλογα με την παραπάνω εξίσωση το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Μία σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι καθώς  $p \rightarrow 1$ , δηλαδή οι αναμεταδόσεις είναι πολλές και συγκρίσιμες με τον αριθμό των πακέτων που πρέπει να αποσταλούν από τον πομπό στον δέκτη, ο ρυθμός δεν τείνει στο μηδέν, αλλά σε μια ορισμένη οριακή τιμή. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις συμφόρησης, το TCP εκπέμπει ένα πακέτο την φορά σε ένα χρονικό διάστημα, στη λήξη του time-out που αυξάνεται μέχρι την μέγιστη τιμή του  $64T_0$ . Η έκφραση που παρουσιάζεται σε αυτήν την εξίσωση είναι ακριβής για μικρές τιμές του  $p$ , ενώ αποκλίνει σε μια συντηρητική τιμή του ρυθμού μετάδοσης καθώς  $p \rightarrow 1$ . Έτσι, η διαδικασία της σταδιακής μείωσης του ρυθμού αποστολής δεδομένων παρουσιάζει ένα κάτω φράγμα, πέρα από το οποίο οι ροές TCP συμπεριφέρονται όπως οι ροές UDP, δηλαδή λειτουργούν εχθρικά προς την συμφόρηση των δικτύων και οι απώλειες δεδομένων είναι καταγιστικές.

Η διαδρομή που ακολουθείται από τα τμήματα των πακέτων TCP σε ένα σύνθετο ασύρματο περιβάλλον μπορεί να περιλαμβάνει πολλές δικτυακές τεχνολογίες. Σε μία τέτοια διαδρομή, δύο είναι οι σημαντικές πτυχές, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η πρώτη είναι το πρόβλημα από τις απώλειες πακέτων λόγω της συμφόρησης δικτύου, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του παραθύρου συμφόρησης και ως εκ τούτου την μείωση της επιτυγχανόμενης διέλευσης από το δίκτυο. Η δεύτερη πτυχή που πρέπει να εξεταστεί σε μία κίνηση TCP είναι η καθυστέρηση πλήρους διαδρομής για το τμήμα που κινείται μέσω των ενδιάμεσων κόμβων ενός δικτύου [22]. Σαν αποτέλεσμα της δεύτερης αυτής πτυχής του TCP πρωτοκόλλου είναι ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ενδιάμεσων κόμβων από τους οποίους διέρχονται τα πακέτα, τόσο αυξάνει και η τιμή αυτής της παραμέτρου με απώτερη συνέπεια την αύξηση της τιμής του χρονομέτρου πλήρους διαδρομής και τη σημαντική επίδραση στα ποσοστά αναμετάδοσης πακέτων.

Αφού μετρηθούν η καθυστέρηση πλήρους διαδρομής και το μέσο μέγεθος του TCP παραθύρου, μπορεί να υπολογιστεί η δραστηριότητα της πηγής TCP. Αυτή η υπολογιζόμενη δραστηριότητα της TCP πηγής δίνει μια αίσθηση της χωρητικότητας του υποκείμενου δικτύου και μπορεί να συμβάλλει αποφασιστικά στους μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής υπηρεσιών.

Όταν πολλές ροές TCP μοιράζονται μια δεδομένη σύνδεση, η διέλευση που επιτυγχάνεται από κάθε ροή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των χρόνων πλήρους διαδρομής και της διαθέσιμης σε άλλες συνδέσεις διέλευσης. Σε περιπτώσεις πλήρους δικαιოსύνης του πρωτοκόλλου TCP, η διέλευση που επιτυγχάνεται από καθεμιά από τις, έστω,  $N$  ροές TCP που υπάρχουν στο δίκτυο ισούται με τη διαθέσιμη χωρητικότητα προς τον αριθμό των υπαρχόντων ροών  $N$  (δηλαδή  $C/N$ ). Η τελευταία αυτή παρατήρηση δίνει μια ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα πρόβλεψης της συμπεριφοράς του TCP σε περιόδους συμφόρησης και βοηθά στην υιοθέτηση μηχανισμών αποδοχής ροών για τις TCP υπηρεσίες.

## 5.6. Κίνηση με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας

### 5.6.1. Ύπαρξη κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας στα IP δίκτυα

Η κίνηση διαδικτύου, η οποία είναι βασισμένη στο πρωτόκολλο IP, περιλαμβάνει πολλές υπηρεσίες πολυμέσων που έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, η εκρηκτικότητα, ο χρόνος διάρκειας σύνδεσης, καθώς επίσης και απαιτήσεις απόδοσης, όπως η καθυστέρηση, η απώλεια κατά την μετάδοση και η διέλευση. Η μελέτη της επίδοσης δικτύων υπό δεδομένες συνθήκες φόρτισης εστιάζει στην συμπεριφορά τόσο των μεμονωμένων ροών όσο και στην συμπεριφορά της συνολικής κίνησης διαδικτύου. Η ανάλυση μίας τέτοιας κίνησης περιλαμβάνει την εξέταση του ίχνους της κίνησης, η οποία προκύπτει από την εφαρμογή μηχανισμών παρακολούθησης και λήψης πραγματικών μετρήσεων.

Οι περισσότερες υπηρεσίες σήμερα βασίζονται στο πρωτόκολλο IP. Η υποστήριξη πολλών υπηρεσιών και εφαρμογών πάνω από το ίδιο δίκτυο συνθέτουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών με διαφορετικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις. Η ανάλυση της σύνθετης αυτής κίνησης IP

φανερώνει την ανομοιογένεια του δικτύου. Η σχεδίαση ενός συστήματος δικτύων, ειδικά στην περίπτωση που τα δίκτυα πρόσβασης είναι ασύρματα, χρειάζεται την ταξινόμηση των διαφόρων ειδών κίνησης, τόσο των υπαρχόντων όσο και εκείνων που πρόκειται να εμφανιστούν στο μέλλον.

**Πίνακας 5-2. Παράδειγμα απαιτήσεων εφαρμογών IP και του τύπου της πληροφορίας που μεταφέρουν**

| Application           | Audio | Video | Data | Real Time | QoS |
|-----------------------|-------|-------|------|-----------|-----|
| WWW                   | —     | —     | X    | 2         | 3   |
| IP telephony          | X     | —     | —    | 1         | 1   |
| Multimedia conference | X     | X     | X    | 1         | 1   |
| Audio streaming       | X     | —     | —    | 2         | 2   |
| Video streaming       | X     | X     | —    | 2         | 2   |
| File download         | —     | —     | X    | 3         | 3   |
| Electronic mail       | —     | —     | X    | 3         | 3   |
| Multimedia mail       | X     | X     | X    | 3         | 2   |
| E-commerce            | —     | —     | X    | 1         | 1   |
| Services on demand    | X     | X     | X    | 2         | 2   |

Η διάκριση των υπηρεσιών βασίζεται σε δύο θεμελιώδεις παραμέτρους: τον τύπο της πληροφορίας (ήχος, βίντεο, δεδομένα, πολυμέσα) και τον τρόπο διανομής της πληροφορίας (π.χ. πραγματικού χρόνου). Ο Πίνακας 5-2 [3] απαριθμεί το σύνολο των υπηρεσιών σήμερα, καθώς και μερικές οι οποίες πρόκειται να εμφανιστούν στο μέλλον, ταξινομώντας αυτές ανάλογα με τον τύπο της πληροφορίας που μεταδίδεται, τις απαιτήσεις για μετάδοση πραγματικού χρόνου και τις απαιτήσεις για παροχή ποιότητας. Οι περισσότερες από τις εφαρμογές αυτές είναι εφαρμογές πολυμέσων, που περιέχουν ήχο, βίντεο, και δεδομένα/ εικόνες. Υπό το πρίσμα των χρηστών, η ταξινόμηση των εφαρμογών μπορεί να γίνει σε τρεις κατηγορίες [3]:

- διαλογικές εφαρμογές (π.χ., τηλεφωνία IP)
- κατανεμημένες υπηρεσίες (audio or video streaming and Web TV)
- υπηρεσίες μετά από την απαίτηση (π.χ., ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, βίντεο ή ήχος κατ' απαίτηση και μεταφορά δεδομένων).

Όπως έχει αναφερθεί, οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν τις απαιτήσεις ποιότητας μιας υπηρεσίας είναι η απώλεια πακέτων, η καθυστέρηση των πακέτων, η διακύμανση της καθυστέρησης (jitter), και η διέλευση, η οποία επιτυγχάνεται κατά την μετάδοση των δεδομένων της υπηρεσίας πάνω από ένα συγκεκριμένο κομμάτι δικτύου. Αυτές οι παράμετροι παίζουν σημαντικό ρόλο στην ταξινόμηση των υπηρεσιών σε κατηγορίες και για το λόγο αυτό οι

αλγόριθμοι αποδοχής υπηρεσιών στα IP δίκτυα πρέπει να λαμβάνουν μέριμνα ώστε να μην παραβιάζεται καμιά από αυτές τις απαιτήσεις, προτού δεχτούν τη συγκεκριμένη υπηρεσία.

Οι υπηρεσίες για δικτυακές εφαρμογές πολυμέσων απαιτούν την ανάθεση πόρων για να μπορέσουν να εκτελέσουν τις λειτουργίες τους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι πόροι που μοιράζονται μεταξύ της εφαρμογής, του συστήματος και του δικτύου. Υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιηθούν κατά τη διάρκεια μιας μετάδοσης πολυμέσων [24]:

- Περιορισμοί στο πεδίο του χρόνου, οι οποίοι περιλαμβάνουν τις καθυστερήσεις, τους χρόνους υπολογισμού, και τις καθυστερήσεις σηματοδότησης.
- Περιορισμοί στο πεδίο του χώρου, όπως οι ταμιευτήρες συστημάτων.
- Περιορισμοί στο πεδίο της συχνότητας, οι οποίοι είναι το εύρος ζώνης των δικτύων και των συστημάτων για τη μετάδοση δεδομένων.

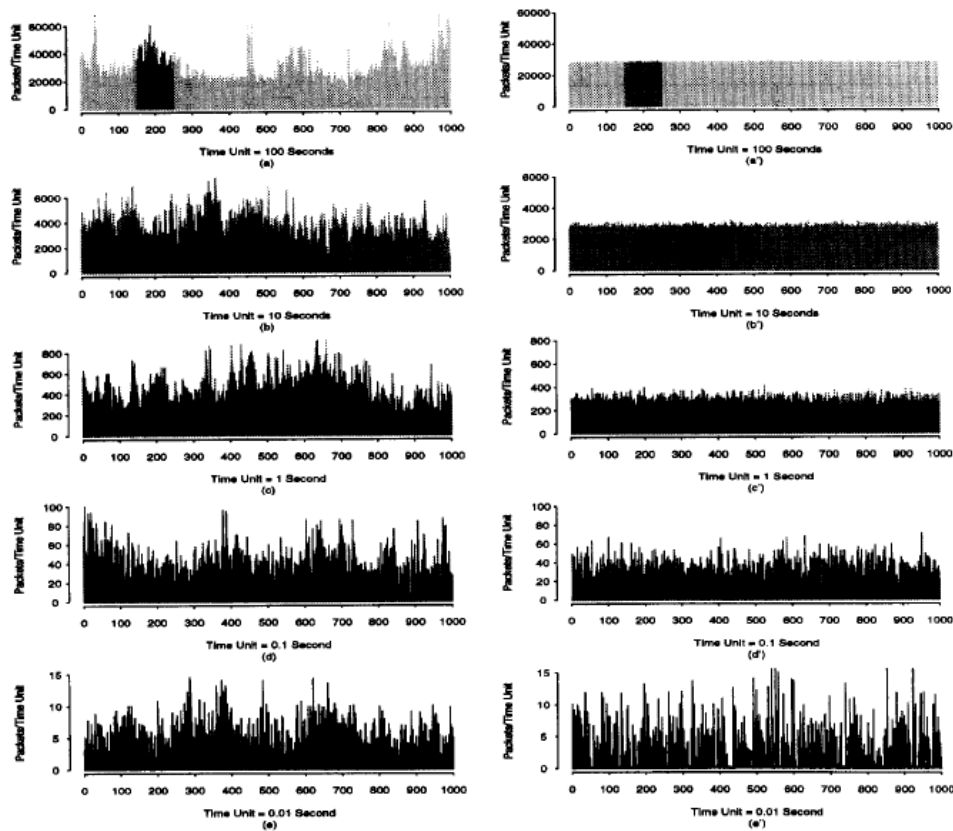
Η καθυστέρηση, το ποσοστό απώλειας πακέτων, η διαθεσιμότητα δικτύου και η διέλευση μεμονωμένων ροών κίνησης αποτελούν θεμελιώδεις παραμέτρους για την μέτρηση και τη σύγκριση στην επίδοση δικτύων. Η καλύτερη χρησιμοποίηση πόρων σε ένα περιβάλλον δικτύων μπορεί να προκύψει αν αρχικά χαρακτηριστεί η κίνηση και έπειτα καθοριστούν οι παράμετροι, όπως το μέγεθος των ταμιευτήρων και το εύρος ζώνης για την μεγιστοποίηση της επίδοσης. Γενικά, οι χρήστες περισσότερο ενδιαφέρονται για την πιθανότητα τα πακέτα τους να φτάσουν στον προορισμό κατά τρόπο έγκαιρο. Επομένως, εκτιμήσεις της προηγούμενης και αναμενόμενης επίδοσης της κίνησης (και όχι απλά της τρέχουσας) πάνω από συγκεκριμένα επικοινωνιακά μονοπάτια είναι σημαντικές.

Πρόσφατες μελέτες και αναλύσεις μετρήσεων υψηλής ποιότητας και ευκρίνειας πάνω στην κίνηση πολυμέσων και την εν γένει κίνηση IP για ένα μεγάλο σύνολο δικτύων, ενσύρματων και ασύρματων, έχει δείξει συμπεριφορά, η οποία είναι πολύ διαφορετική από την Poisson [25][26][27][28][29]. Έτσι, οι πειραματικές μετρήσεις στην κίνηση των δικτύων τοπικής και ευρείας εμβέλειας έχουν αποδείξει ότι η κίνηση αυτή παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις σε πολλές κλίμακες χρόνου, οι οποίες έρχονται σε αντίθεση με τα παραδοσιακά μοντέλα ανάλυσης της κίνησης δικτύων. Οι μετρήσεις αυτές δείχνουν ότι η κατανομή του μεγέθους των πακέτων που φθάνουν σε μια χρονοσχισμή ή και του χρόνου των διαδοχικών αφίξεων πακέτων έχουν εξαρτήσεις από μεγάλες κλίμακες χρόνου και παρουσιάζουν μακρές ουρές, οι οποίες σβήνουν αργά. Με άλλα λόγια, τα χαρακτηριστικά της παρατηρηθείσας συμπεριφοράς είναι όμοια με μίας κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας.

Συνεπώς, η κίνηση μέσα από το διαδίκτυο, είτε πραγματικού είτε μη πραγματικού χρόνου παρουσιάζει χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας. Τα σημερινά απλά μοντέλα κρίνονται ανεπαρκή και ακατάλληλα να συλλάβουν την όλη συμπεριφορά μιας τέτοιας κίνησης. Αντιθέτως, προσφέρουν μόνο προσεγγιστικά αποτελέσματα σχετικά με τη συμπεριφορά της κίνησης διαδικτύου πάνω από συγκεκριμένα δίκτυα και η χρήση τους συνιστάται μόνο για λόγους

απλότητας. Κάποιες φορές τα αποτελέσματα αυτά είναι ικανοποιητικά, σε γενικό όμως βαθμό απαιτείται περισσότερη ακρίβεια, ώστε να προβλεφθεί επακριβώς η συμπεριφορά του υπό εξέταση δικτύου υπό δεδομένη φόρτιση κίνησης διαδικτύου. Συνεπώς είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μηχανισμών που θα συλλαμβάνουν με περισσότερη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της κίνησης διαδικτύου, αλλά παράλληλα θα παραμένουν απλοί και αποτελεσματικοί στη χρήση τους.

Η IP κίνηση, που είναι εκρηκτική σε πολλές ή όλες τις κλίμακες χρόνου, μπορεί να περιγραφεί στατιστικά χρησιμοποιώντας την έννοια της αυτό-ομοιότητας [28]. Είναι η ιδιότητα που συνδέεται με τα "fractals," τα οποία είναι αντικείμενα, των οποίων οι εμφανίσεις είναι αμετάβλητες ανεξάρτητα από την κλίμακα στην οποία αντιμετωπίζονται [30]. Στην περίπτωση των πιθανολογικών αντικειμένων όπως μια χρονοσειρά, η αυτό-ομοιότητα χρησιμοποιείται υπό την ακόλουθη έννοια: όταν μια χρονοσειρά αντιμετωπίζεται σε πολλές κλίμακες χρόνου, η λογική δομή του αντικειμένου παραμένει αμετάβλητη, με αποτέλεσμα μια τέτοια χρονοσειρά να παρουσιάζει εκρηκτικά φαινόμενα σε ένα ευρύ φάσμα χρονοδιαγραμμάτων.



**Σχήμα 5-3. Συγκριτική απεικόνιση κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας (αριστερά) και κίνησης Poisson (δεξιά) σε πέντε διαφορετικές κλίμακες χρόνου**

Όταν λέμε ότι μια κίνηση δικτύου παρουσιάζει αυτό-ομοιότητα (δηλ., συμπεριφορά fractal) χαρακτηριστικά, σημαίνει ότι η κίνηση αυτή έχει παρόμοιες στατιστικές ιδιότητες σε μια σειρά

χρονικών κλιμάκων: χιλιοστά του δευτερολέπτου, δευτερόλεπτα, λεπτά της ώρας, ώρες, ακόμη και ημέρες και εβδομάδες. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την παραδοσιακή κίνηση Poisson, όπως φαίνεται και από την απεικόνιση που παρατίθεται στο Σχήμα 5-3 [31]. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι η συγχώνευση πολλών ροών κίνησης, δεν οδηγεί κατ' ανάγκη στη λείανση της κίνησης. Οι ροές που υπερτίθενται τείνουν να παραγάγουν μια συνολική εκρηκτική ροή.

Έτσι, η παρατήρηση των χαρακτηριστικών αυτό-ομοιότητας της κίνησης έρχεται σε αντίθεση των παραδοσιακών μεθόδων υπολογισμού των χαρακτηριστικών της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Παραδοσιακά, τα δίκτυα έχουν περιγραφεί με τις γενικευμένες Μαρκοβιανές διαδικασίες που είναι στατιστικά πρότυπα και στηρίζονται στα αξιώματα που πλαισιώνονται από τον Ρώσο μαθηματικό Α. Α. Markov. Τα Μαρκοβιανά πρότυπα δικτύων στηρίζονται στην εξάρτηση σε μικρές κλίμακες χρόνου. Αντίθετα, ένα δίκτυο βασισμένο σε fractal μορφές έχει διαφορετικές παραμέτρους και τεχνικές ελέγχου συμφοράρης.

Επειδή η ύπαρξη φαινομένων αυτό-ομοιότητας στην κίνηση επηρεάζει σημαντικά την επίδοση των δικτύων, όπως θα αναφερθεί παρακάτω, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε πρώτα τι προκαλεί τα φαινόμενα αυτά. Παρατηρώντας την κίνηση που παράγεται από μια υπηρεσία World Wide Web, βλέπουμε ότι οι κατανομές των χρόνων ON και OFF διατηρούν μια μακρά ουρά, με την ουρά της ON περιόδου να φθίνει πιο αργά [3][32]. Επίσης, η κατανομή που περιγράφει το μέγεθος των αρχείων σε μια υπηρεσία WWW καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αυτό-ομοιότητα της συνολικής κίνησης. Στην πραγματικότητα, σχετικές μελέτες έχουν δείξει ότι μια κατανομή του μεγέθους των πακέτων με μακρά ουρά είναι ικανή να παραγάγει τα φαινόμενα αυτό-ομοιότητας μιας κίνησης, ανεξάρτητα από τις κατανομές των ON και OFF περιόδων. Μάλιστα, τα χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας είναι ανεξάρτητα από τα πρωτόκολλα δικτύου και τους μηχανισμούς επεξεργασίας που επιβάλλονται στην κίνηση.

### 5.6.2. Χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας της κίνησης

Μια διαδικασία θεωρείται διαδικασία αυτό-ομοιότητας, εάν φαίνεται ποιοτικά η ίδια ανεξάρτητα από το χρονικό διάστημα, μέσα στο οποίο την εξετάζουμε. Στην περίπτωση της κίνησης διαδικτύου ή της ροής βίντεο μεταβλητού ρυθμού, η αυτό-ομοιότητα φανερώνεται από την έλλειψη ενός φυσικού μήκους μιας έκρηξης. Αυτό σημαίνει ότι σε οποιαδήποτε κλίμακα χρόνου και αν εξετάσουμε την κίνηση, διάρκειας είτε μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου είτε μιας ώρας, η κίνηση χαρακτηρίζεται από περιόδους εκρηκτικότητας, οι οποίες συνοδεύονται από περιόδους λιγότερης εκρηκτικότητας. Συχνά χρησιμοποιείται και ο όρος fractals για να περιγραφεί μια διαδικασία με ιδιότητες αυτό-ομοιότητας.

Η κατανομή του μεγέθους των πακέτων έχει ιδιότητες αυτό-ομοιότητας και παρουσιάζει μια μακρά ουρά [28]. Μια κατανομή θεωρείται ότι διατηρεί μακρά ουρά όταν η πιθανότητα η τιμή της τυχαίας μεταβλητής  $X$ , που περιγράφει το μέγεθος των πακέτων, να υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή  $\chi$  συγκλίνει ασυμπτωτικά στην  $P[X > \chi] \sim \chi^{-\alpha}$ , όπου  $0 < \alpha < 2$ . Η Pareto

κατανομή είναι μια απλή αντιπροσωπευτική κατανομή μακράς ουράς με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$pdf(x) = ak^a x^{-a-1} \quad (5-4)$$

όπου  $a, k > 0$  και  $x \geq k$ . Η αντίστοιχη συνάρτηση αθροιστικής κατανομής είναι:

$$cdf(x) = P[X \leq x] = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^a \quad (5-5)$$

Οι κατανομές μακράς ουράς έχουν ένα σύνολο από ιδιότητες που τις διαφοροποιούν ποιοτικά από τις συνήθεις εκθετικές ή κανονικές κατανομές. Αν  $a < 2$ , η κατανομή παρουσιάζει άπειρη διασπορά. Καθώς το  $a$  μειώνεται και πλησιάζει τη μονάδα, τα φαινόμενα της εκρηκτικότητας της κίνησης διατηρούνται σε μεγάλες κλίμακες χρόνου, ενώ αν  $a < 1$ , τότε η κατανομή έχει και άπειρη μέση τιμή. Αυτό σημαίνει ότι όσο το  $a$  μειώνεται τόσο το πλήθος των τιμών της κατανομής μετατοπίζεται προς την ουρά της.

Στην συνέχεια, θα δώσουμε τις μαθηματικές και στατιστικές ιδιότητες των διαδικασιών αυτό-ομοιότητας. Πέρα από τη διαίσθηση για την αυτό-ομοιότητα της κίνησης διαδικτύου, οι θεμελιώδεις ιδιότητες που διακρίνουν μια τέτοια διαδικασία είναι [3][28]:

- Η εξάρτηση από μεγάλες κλίμακες χρόνου (Long Range Dependence - LRD) και με μακρά ουρά στην κατανομή των χαρακτηριστικών μεγεθών της κίνησης (όπως το μέγεθος των πακέτων και η χρονική απόσταση μεταξύ της αποστολής των διαδοχικών πακέτων).
- Συνάρτηση διασποράς, η οποία φθίνει αργά.

Έστω  $X$  μια στατική (stationary) διαδικασία διακριτού χρόνου, η οποία περιγράφεται από την  $X = \{x_t, t > 0\}$ . Η διαδικασία αυτή παρουσιάζει μια μέση τιμή  $\mu = E\{x_t\}$  και πεπερασμένη διασπορά  $\sigma^2 = Var(X) = E\{(x_t - \mu)^2\}$ . Τότε η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης αυτής της διαδικασίας για οποιαδήποτε τιμή του θετικού ακεραίου  $k > 0$  είναι:

$$r(k) = E\{(x_t - \mu)(x_{t+k} - \mu)\} = \frac{Cov(x_t, x_{t+k})}{\sigma^2} \quad (5-6)$$

όπου  $Cov(x_t, x_{t+k})$  είναι η συνάρτηση Συνδιασποράς (covariance) μεταξύ δύο δειγμάτων της διαδικασίας  $X$ , που απέχουν μεταξύ τους  $k$  βήματα.

Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μιας ακολουθίας αυτό-ομοιότητας τείνει να είναι η ίδια σε διάφορες κλίμακες χρόνου. Αναλυτικά, η  $m$  τάξης συσσωρευμένη χρονική ακολουθία της διαδικασίας  $X$ , μπορεί να ορισθεί σαν  $X(m) = X_k^{(m)}$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ , όπου  $X(m)$  είναι η ακολουθία των δειγμάτων της κίνησης, η οποία προκύπτει από την αρχική ακολουθία με άθροιση των ομάδων δειγμάτων μεγέθους  $m$ . Πιο συγκεκριμένα:



$$X_k^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=km-m+1}^{km} X_i \quad (5-7)$$

Αν η χρονική ακολουθία παρουσιάζει αυτό-ομοιότητα, τότε η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της συνολικής διαδικασίας  $X(m)$  είναι ίση με την αντίστοιχη της αρχικής ακολουθίας  $X$  για όλες τις τιμές της παραμέτρου  $m$ , άρα μια διαδικασία αυτό-ομοιότητας έχει την ίδια συνάρτηση αυτοσυσχέτισης σε όλες τις κλίμακες χρόνου, σε αντίθεση με διαδικασίες που δεν παρουσιάζουν αυτό-ομοιότητα, για τις οποίες ισχύει ότι  $r^{(m)}(k) \rightarrow 0, k = 0, 1, 2, \dots$  καθώς το  $m \rightarrow \infty$ .

Επειδή μια διαδικασία αυτό-ομοιότητας περιγράφεται από τα χαρακτηριστικά πρώτης και δευτέρας τάξεως (μέση τιμή και διασπορά αντίστοιχα), συχνά μια τέτοια διαδικασία ονομάζεται και δευτέρας τάξεως διαδικασία αυτό-ομοιότητας. Επομένως η διαδικασία  $X$  ονομάζεται δευτέρας τάξεως διαδικασία αυτό-ομοιότητας, αν οι συνολικές διαδικασίες  $X(m)$  έχουν την ίδια συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, δηλαδή:

$$r^{(m)}(k) = r(k), k = 0, 1, 2, \dots, m = 1, 2, 3, \dots \quad (5-8)$$

Έτσι, μια διαδικασία παρουσιάζει αυτό-ομοιότητα, εφόσον οι συνολικές διαδικασίες που προκύπτουν από αυτήν έχουν ταυτόσημα χαρακτηριστικά πρώτης και δευτέρας τάξεως, δηλαδή ταυτόσημη μέση τιμή και διασπορά. Για τις διαδικασίες πραγματικού χρόνου, η παραπάνω σχέση ισχύει ασυμπτωτικά και για το λόγο αυτό καλούμε τέτοιες διαδικασίες ασυμπτωτικά δευτέρας τάξεως διαδικασίες αυτό-ομοιότητας.

Τα συνήθη μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση διαδικασιών κίνησης φωνής παρουσιάζουν εξάρτηση από μικρές κλίμακες χρόνου (SRD). Συνεπώς, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ασυμπτωτικά φθίνει σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση [33]:

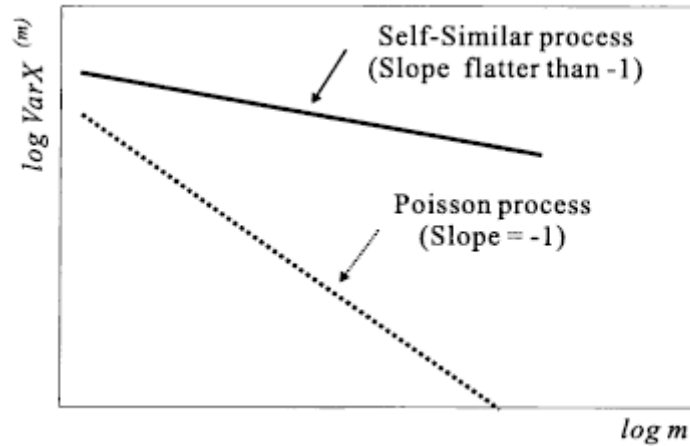
$$r(k) \sim a^{|k|}, k \rightarrow \infty \text{ και } 0 < a < 1 \quad (5-9)$$

δηλαδή παρουσιάζει μια απότομη (γρήγορη) εκθετική μείωση κατά το σταθερό παράγοντα  $a$ .

Σε αντίθεση, μια χρονοσειρά με εξάρτηση σε μεγάλες κλίμακες χρόνου παρουσιάζει μια συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της μορφής:

$$r(k) \sim k^{-\beta}, k \rightarrow \infty \text{ και } 0 < \beta < 1 \quad (5-10)$$

Παρατηρούμε δηλαδή ότι η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μιας χρονοσειράς με εξάρτηση σε μεγάλες κλίμακες χρόνου, όπως είναι η κίνηση με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας, ασυμπτωτικά τείνει σε μια εκθετική μείωση κατά τον παράγοντα  $\beta$ , σε αντίθεση με μια χρονοσειρά με εξάρτηση σε μικρές κλίμακες χρόνου, όπου η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης φθίνει πολύ γρήγορα. Αυτή η διαφορά μεταξύ της μορφής της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης για τα LRD και SRD είδη κίνησης φαίνεται στο Σχήμα 5-4.



**Σχήμα 5-4. Λογαριθμική μεταβολή της διασποράς συναρτήσει του βήματος lag για LRD και SRD είδη κίνησης**

Η σημαντικότερη ιδιότητα μιας διαδικασίας αυτό-ομοιότητας για τη μοντελοποίηση των χρονικών ακολουθιών μιας κίνησης διαδικτύου είναι ο βαθμός αυτό-ομοιότητας που παρουσιάζει και ο οποίος μετράται με την παράμετρο Hurst. Διαισθητικά, η παράμετρος αυτή εκφράζει την ταχύτητα, με την οποία φθίνει η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, δηλαδή ο παράγοντας  $\beta$  στην παραπάνω εξίσωση.

Σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον, ο βαθμός στον οποίο η κατανομή του μεγέθους των πακέτων παρουσιάζει μακρά ουρά, μπορεί άμεσα να καθορίσει και το βαθμό αυτό-ομοιότητας της κίνησης σε επίπεδο συνδέσεων. Η διαπίστωση αυτή είναι ανθεκτική σε αλλαγές στην κατάσταση των πόρων των δικτύων (εύρος ζώνης bottleneck και ρυθμιστική ικανότητα), την τοπολογία δικτύων, την επιρροή της συνδυασμένης κίνησης, και την κατανομή των χρόνων μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων. Συγκεκριμένα, μετρώντας την αυτό-ομοιότητα μέσω της Hurst παραμέτρου και την κατανομή του μεγέθους πακέτων μέσω του εκθέτη του νόμου της δύναμης  $\beta$ , έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει μια γραμμική εξάρτηση μεταξύ τους, η οποία ισχύει για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών δικτύων. Έτσι, ο παράγοντας  $\beta$  και η Hurst παράμετρος  $H$  συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$H = 1 - \frac{\beta}{2} \quad (5-11)$$

Δεδομένων των ορίων του  $\beta$ , η εξάρτηση σε μεγάλες κλίμακες χρόνου συμβαίνει για  $\frac{1}{2} < H < 1$ .

Καθώς το  $H$  πλησιάζει το 1, ο βαθμός αυτής της εξάρτησης αυξάνει. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την αυτό-ομοιότητα της κίνησης είναι η κατανομή του χρόνου μεταξύ διαδοχικών μεταδόσεων πακέτων ή του χρόνου αδράνειας της πηγής δεδομένων. Ο χρόνος αυτός μπορεί επίσης να παρουσιάσει φαινόμενα εξάρτησης από μεγάλες κλίμακες χρόνου. Όταν η κατανομή

του μεγέθους των πακέτων παρουσιάζει το  $\alpha$  να τείνει στο 2, τότε η μακράς ουράς κατανομή του χρόνου αδράνειας είναι εξίσου σημαντική με τη συμβολή της κατανομής του μεγέθους των πακέτων, το οποίο αυξάνει την αυτό-ομοιότητα που μετράται με το  $H$ . Καθώς, το  $\alpha$  τείνει στο 1, η ουρά της κατανομής του μεγέθους των πακέτων υπερισχύει έναντι της αντίστοιχης του χρόνου αδράνειας.

Με βάση την τιμή της παραμέτρου  $H$  και την εξίσωση (5-8), για μια ασυμπτωτικά δευτέρας τάξεως διαδικασία αυτό-ομοιότητας ισχύει η ακόλουθη σχέση για όλα τα  $k \geq 1$ :

$$r^{(m)}(k) \sim \frac{1}{2} \left( (k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H} \right), m \rightarrow \infty \quad (5-12)$$

Για να καθοριστεί εάν μια δεδομένη σειρά παρουσιάζει αυτό-ομοιότητα, απαιτείται μια μέθοδος για να υπολογιστεί το  $H$ . Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί πολλοί τρόποι υπολογισμού του  $H$  μιας πραγματικής διαδικασίας, εκ των οποίων εδώ αναφέρουμε τις ακόλουθες τρεις [3][25][28][34]:

- Ανάλυση των διαφορών των αθροισμένων διαδικασιών  $X(m)$
- Η ανάλυση της στατιστική σειράς (R/S)
- Whittle εκτιμητής

Η πρώτη μέθοδος εκμεταλλεύεται την αργά μειούμενη διασπορά των διαδικασιών αυτό-ομοιότητας και τη μέθοδο του γραφήματος περιόδου, η οποία χρησιμοποιεί την κλίση του φάσματος ισχύος της ακολουθίας, καθώς η συχνότητα τείνει στο μηδέν. Η διαφορά των διαδικασιών  $X(m)$  σχεδιάζεται σε σχέση με το  $m$  σε ένα λογαριθμικό διάγραμμα. Κατόπιν γίνεται προσέγγιση του διαγράμματος με μια ευθεία γραμμή, η κλίση της οποίας πρέπει να είναι μεγαλύτερη από -1 και καθορίζει το  $H$  [32].

Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί το γεγονός ότι για τα δεδομένα της κίνησης αυτό-ομοιότητας, η στατιστική R/S σειρά αυξάνεται και ακολουθεί ασυμπτωτικά το νόμο της δύναμης και εκφράζεται από τη σχέση:

$$E[R(n)/S(n)] = cn^H, n \rightarrow \infty \quad (5-13)$$

όπου το  $c$  είναι μια θετική σταθερά,  $R(n)$  είναι η προσαρμοσμένη κλίμακα των δειγμάτων που λαμβάνουμε από την ανάλυση της διαδικασίας,  $S(n)$  είναι η τυπική απόκλιση των δειγμάτων και  $H$  η παράμετρος Hurst, η οποία κυμαίνεται μεταξύ  $0.5 < H < 1$ .

Αν  $X_i$  είναι η ακολουθία των δειγμάτων, τότε το  $R(n)/S(n)$  υπολογίζεται όπως στο [35]:

$$\frac{R(n)}{S(n)} = \frac{\max(0, W_1, W_2, \dots, W_n) - \min(0, W_1, W_2, \dots, W_n)}{S(n)} \quad (5-14)$$

$$\text{όπου } W_k = \sum_{i=1}^n iX - k \overline{X(n)}, k = 1, 2, \dots, n$$

Για τον υπολογισμό του  $H$  χρειάζεται να υπολογιστεί ο λόγος  $R(n)/S(n)$  για πολλές τιμές της παραμέτρου  $n$ . Τότε η παράμετρος  $H$  υπολογίζεται με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης από το διάγραμμα των τιμών του λόγου  $R(n)/S(n)$  συναρτήσει του  $n$ , σε λογαριθμική κλίμακα, δηλαδή:

$$H = \frac{\log(E[R(n)/S(n)])}{\log(n)} \quad (5-15)$$

Η τρίτη μέθοδος, ο Whittle εκτιμητής, παρέχει ένα διάστημα εμπιστοσύνης σε σχέση με τις άλλες δύο, οι οποίες μπορεί να αποκλίνουν για υψηλές τιμές της  $H$  παραμέτρου. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί την ιδιότητα ότι μια διαδικασία με εξάρτηση σε μεγάλες κλίμακες χρόνου προσεγγίζει την ανάλυση του κλασματικού γκαουσιανού θορύβου (fractional Gaussian noise - FGN), όταν αθροιστεί σε ένα ορισμένο επίπεδο [36].

Ένας ακόμα μηχανισμός για τη μέτρηση του  $H$  παρουσιάζεται στο [37].

### 5.6.3. Επίδραση της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας στην επίδοση δικτύων

Τα αποτελέσματα της αυτό-ομοιότητας στη συμπεριφορά της προσφερόμενης σε ένα δίκτυο κίνησης επιδρούν σημαντικά στην επίδοση των δικτύων και έχουν να κάνουν κυρίως με την αύξηση της καθυστέρησης αναμονής στους κόμβους και του ποσοστού απώλειας πακέτων. Μια πρακτική επίδραση της αυτό-ομοιότητας είναι ότι οι ταμειυτήρες που απαιτούνται στους ενδιάμεσους κόμβους πρέπει να είναι μεγαλύτεροι από εκείνους που προβλέπει η κλασική θεωρία ανάλυσης δικτύων, και έτσι δημιουργούν μεγαλύτερες καθυστερήσεις σε μεμονωμένες ροές. Η υποστήριξη ζητημάτων ποιότητας υπηρεσιών σε πολυμεσικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου εντείνει το πρόβλημα της βέλτιστης διαχείρισης πόρων.

Τα πρωτόκολλα που ενεργούν στα στρώματα μεταφοράς και δικτύου επηρεάζουν το βαθμό επιρροής της αυτό-ομοιότητας της κίνησης στην επίδοση των δικτύων [38][39][40][41]. Έχει παρατηρηθεί μια εκθετική σχέση μεταξύ της καθυστέρησης αναμονής και του ποσοστού απώλειας πακέτων. Τα κλασικά μοντέλα ανάλυσης κίνησης δείχνουν ότι μια γραμμική αύξηση στα μεγέθη των ταμειυτήρων οδηγεί σε ανάλογη εκθετική μείωση στην απώλεια πακέτων, και παράλληλα σε μια ανάλογη αύξηση της αποτελεσματικής χρήσης της ικανότητας μετάδοσης. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει στην περίπτωση της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας, όπου η μείωση στην απώλεια πακέτων με την αύξηση του μεγέθους των ταμειυτήρων είναι πολύ λιγότερη.

Επιπλέον, η χρονικά αμετάβλητη εκρηκτικότητα της κίνησης υπονοεί την ύπαρξη περιόδων που συγκεντρώνουν υψηλή δραστηριότητα σε μια μεγάλη κλίμακα χρόνου, το οποίο έχει επιπτώσεις

στη συμφόρηση. Η επίδοση ενός δικτύου, όπως αυτή περιγράφεται από τη διέλευση, το ποσοστό απώλειας πακέτων και την επαναμετάδοση πακέτων, μειώνεται βαθμιαία με την αύξηση του μήκους της ουράς στην κατανομή του μεγέθους των πακέτων. Ο βαθμός, στον οποίο το μήκος της ουράς επηρεάζει την αυτό-ομοιότητα της κίνησης, εξαρτάται από την ικανότητα του δικτύου να ελέγξει την εισερχόμενη ροή και να διαμορφώσει την κίνηση σε μια εν γένει σταθερή ροή.

Ένας δυναμικός μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης είναι δύσκολος να εφαρμοστεί. Μια τέτοια στρατηγική είναι βασισμένη στη μέτρηση της πρόσφατης κίνησης και μπορεί να αποτύχει εντελώς να προσαρμοστεί σε γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες. Επίσης, η πρόληψη της συμφόρησης μέσα από την κατάλληλη διαστασιολόγηση των στοιχείων δικτύου είναι δύσκολη, επειδή η κίνηση δεν παρουσιάζει ένα προβλέψιμο επίπεδο με περιόδους εκρηκτικότητας.

Επιγραμματικά, μπορούμε ακόμα να αναφέρουμε ότι η επίδραση της τοπολογίας του δικτύου στη διαμόρφωση της αυτό-ομοιότητας της κίνησης δεν είναι σημαντική. Εκείνο που παίζει ρόλο είναι η μίξη της κίνησης, δηλαδή ο αριθμός και το είδος των ροών που συνδυάζονται στη συνολική κίνηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε δεδομένη κίνηση, η παρουσία μιας λιγότερη εκρηκτικής κίνησης στο δίκτυο δεν εξομαλύνει δραματικά την εκρηκτικότητα της υπόλοιπης κίνησης, αλλά η εξομάλυνση αυτή είναι σχεδόν γραμμική.

Τέλος, σημαντική είναι και η επίδραση της στοίβας πρωτοκόλλων στη διαμόρφωση της αυτό-ομοιότητας της κίνησης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα πρωτόκολλα του στρώματος μεταφοράς, τα οποία και καθορίζουν την αξιοπιστία στην μετάδοση των δεδομένων. Έτσι, μια UDP κίνηση παρουσιάζει λιγότερα φαινόμενα εξάρτησης από μεγάλες κλίμακες χρόνου, λόγω της απληστίας του πρωτοκόλλου. Αντίθετα, η αξιόπιστη μετάδοση και ο έλεγχος της συμφόρησης που επιτυγχάνονται με το TCP διατηρούν την αυτό-ομοιότητα της κίνησης. Ο έλεγχος της συμφόρησης και η αξιοπιστία μετάδοσης σε τέτοια είδη κίνησης μετασχηματίζει την κίνηση σε πιο ελαστική, με αποτέλεσμα την εξάπλωση της μετάδοσης μεγάλων πακέτων στο χρόνο και την αποστολή τους σε ροές μικρότερων πακέτων. Αυτό δικαιολογεί και τη μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών ενός σύνθετου, μη γραμμικού συστήματος, όπως είναι τα σημερινά δίκτυα, με τη χρήση απλών γραμμικών μοντέλων ON/OFF.

#### **5.6.4. Μοντέλα προσέγγισης της αυτό-ομοιότητας**

Λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα στην παρατηρηθείσα εκρηκτικότητα, η οποία είναι ανεξάρτητη της κλίμακας του χρόνου παρατήρησης, είναι σημαντική η εύρεση αλγορίθμων ελέγχου που θα συλλαμβάνουν ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας της κίνησης. Ο έλεγχος μίας ροής αυτό-ομοιότητας περιλαμβάνει τη διαμόρφωση της κίνησης, ώστε η προκύπτουσα επίδοση να βελτιστοποιείται. Μια τέτοια βελτιστοποίηση, με σκοπό την παροχή του καλύτερου δυνατού QoS, κρίνεται ιδιαίτερα δύσκολη, εάν λάβουμε υπόψη το συνδυασμό της ανεξαρτήτου κλίμακας χρόνου εκρηκτικότητας της κίνησης και την επίτευξη υψηλής χρησιμοποίησης δικτύου.

Μέχρι πριν λίγο καιρό, δεν ήταν απόλυτα σαφές, εάν ο παραδοσιακός τρόπος περιγραφής της κίνησης και η ανάλυση των παραδοσιακών μοντέλων τηλεφωνίας επαρκεί για την απεικόνιση της συμπεριφοράς της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας. Έτσι, έχει αρχίσει η διερεύνηση εναλλακτικών μηχανισμών, όπως η ανάλυση χαοτικών μοντέλων, η κλασματική αυτοανάνδρομη ενσωματωμένη κίνηση (πρότυπο FARIMA) και η κλασματική κίνηση BROWN (Fractional Brownian Model) [42]. Ωστόσο, τα εργαλεία ανάλυσης για τα μοντέλα αυτά δεν είναι ακόμα ώριμα, αλλά, επίσης, παρουσιάζουν ένα σχετικό βαθμό πολυπλοκότητας. Από την άλλη, οι παραδοσιακές μέθοδοι για την περιγραφή και ανάλυση των συστημάτων αναμονής δεν έχουν εφαρμογή σε τέτοια μοντέλα και, συνεπώς, καθιστούν δύσκολη την προς το παρόν υιοθέτησή τους.

Η βασική διαφορά είναι ότι τα παραδοσιακά μοντέλα περιγράφουν τη διακύμανση της κίνησης σε μικρές κλίμακες, ενώ αποτυγχάνουν να συλλάβουν τις διακυμάνσεις που υφίσταται η κίνηση δικτύων σε μεγάλες κλίμακες χρόνου. Έτσι τα φαινόμενα εξάρτησης της κίνησης από μεγάλες κλίμακες χρόνου δε λαμβάνονται υπόψη κατά την μελέτη της επίδοσης των δικτύων. Πρόσφατα, έχουν προταθεί τρόποι, ώστε τα παραδοσιακά Μαρκοβιανά μοντέλα, τα οποία έχουν εφαρμοστεί για τα συστήματα με εξαρτήσεις σε μικρές κλίμακες χρόνου (Short Range Dependence – SRD) να βρουν εφαρμογή και στην περιγραφή της αυτό-ομοιότητας, η οποία παρουσιάζει εξαρτήσεις σε μεγάλες κλίμακες χρόνου (Long Range Dependence – LRD) [43][44][45]. Έτσι, η συναρμολόγηση ενός ιεραρχικού μοντέλου που προκύπτει από την υπέρθεση ανεξάρτητων Μαρκοβιανών πηγών, μπορεί να προσεγγίσει τη συμπεριφορά της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας.

Όμως, η προσέγγιση της αυτό-ομοιότητας μέσω Μαρκοβιανών μοντέλων απαιτεί την εξομοίωση των χαρακτηριστικών κίνησης μέχρι μια ορισμένη κλίμακα χρόνου. Αυτό είναι ένα σημαντικό θέμα στα μοντέλα που υιοθετούνται εδώ, καθώς η επιλογή του χρονικού διαστήματος προσέγγισης των χαρακτηριστικών αυτό-ομοιότητας της κίνησης πρέπει να είναι η κατάλληλη. Ανάλογη έρευνα πάνω στο θέμα της επιλογής του αριθμού των κλιμάκων χρόνου, για τις οποίες η προσέγγιση της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας μέσω ενός ιεραρχικού Μαρκοβιανού μοντέλου είναι ενδεδειγμένη, υπάρχει στις [43][46][47][48][49][50].

Είναι ευρέως γνωστό ότι η επίδοση των συστημάτων αναμονής επιδεινώνεται με την ύπαρξη φαινομένων εξάρτησης από μεγάλες κλίμακες χρόνου και συμπεριφοράς αυτό-ομοιότητας. Επομένως, είναι σημαντικό να προβλεφθεί η συμπεριφορά της ουράς αναμονής υπό τη φόρτιση τέτοιου είδους κινήσεων. [46][47][50] δείχνουν ότι οι μέθοδοι συναρμολόγησης που βασίζονται μόνο στα μέχρι δεύτερης τάξης χαρακτηριστικά της κατανομής του αριθμού των αφίξεων δεν επαρκούν, αλλά χρειάζεται να εξεταστεί και η επίδραση της κατανομής του χρόνου των διαδοχικών αφίξεων.

Ο Heyman [38] έδειξε ότι για πηγές κίνησης με υψηλή τιμή της παραμέτρου Hurst τα πρότυπα ανάλυσης κίνησης με Μαρκοβιανές αλυσίδες είναι ικανοποιητικά για μεγέθη ταμιευτήρων όχι πολύ μεγάλα. Αντίθετα, σε περιπτώσεις μεγάλων ταμιευτήρων, η καθυστέρηση αναμονής

παρουσιάζει μια υπεργραμμική (superlinear) εξάρτηση από την αυτό-ομοιότητα και φθίνει πιο αργά, διατηρώντας ένα μεγάλο μήκος ουράς. Στην περίπτωση αυτή, απαιτείται η ανάλυση της συμπεριφοράς της ουράς με Μαρκοβιανά μοντέλα, που υπερτίθενται για την παραγωγή της συμπεριφοράς της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας.

Έχοντας σαν βάση την ανάλυση που προηγήθηκε, η παρούσα εργασία επιχειρεί να προσεγγίσει τα χαρακτηριστικά της κίνησης αυτό-ομοιότητας, μέσα από την κατάλληλη παραμετροποίηση ενός ιεραρχικού μοντέλου, το οποίο υποθέτει την υπέρθεση ανεξάρτητων Markov Modulated πηγών. Οι πιο διαδεδομένες διαδικασίες Markov Modulated συνεχούς χρόνου είναι οι Markov Modulated Poisson Process (MMPP) και Markov Modulated Fluid Process (MMFP) πηγές. Η μόνη διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι οι πηγές MMFP εκπέμπουν σε κάθε κατάσταση σταθερό ρυθμό, ενώ οι MMPP πηγές εκπέμπουν διακριτά πακέτα ανά κατάσταση με ένα θόρυβο γύρω από τη μέση τιμή, λόγω της ιδιότητας Poisson. Πάντως και τα δύο είδη διαδικασιών χρησιμοποιούν τις ίδιες ακριβώς παραμέτρους περιγραφής.

Προς το σκοπό αυτό, στο επόμενο κεφάλαιο, προτού προχωρήσουμε στην ανάλυση του μοντέλου προσέγγισης της κίνησης IP με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας, θα κάνουμε μια εισαγωγή στη θεωρία των MMFP μοντέλων.

## **5.7. Συμπεράσματα**

Στο κεφάλαιο αυτό, τα πρότυπα συμπεριφοράς της κίνησης IP που παράγεται από μεμονωμένους χρήστες αναλύθηκαν και περιγράφηκαν σε σχέση με το μοντέλο πηγών ON/OFF. Αναλύθηκε η έννοια των περιγραφέων κίνησης και της σημασίας τους στον σχεδιασμό και την υλοποίηση αποδοτικών μηχανισμών Ελέγχου Αποδοχής υπηρεσιών IP.

Μέσα από μια σύντομη, εισαγωγική περιγραφή των γνωστών και δημοφιλών πρωτοκόλλων TCP και UDP του στρώματος μεταφοράς που δρουν πάνω από το IP έγινε κατανοητή η ανάγκη για τη μοντελοποίηση της κίνησης IP, η οποία συμβάλλει στην ανάπτυξη των μηχανισμών παροχής ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών. Επίσης, το κεφάλαιο αυτό εστίασε στο πρωτόκολλο TCP, η συμπεριφορά του οποίου παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάλυση της συμπεριφοράς των υποκείμενων δικτύων που καλούνται να εξυπηρετήσουν τις ροές της IP κίνησης, ανεξάρτητα από το πρωτόκολλο μεταφοράς που χρησιμοποιείται.

Τέλος, το κεφάλαιο αυτό έδωσε μία αναλυτική περιγραφή της έννοιας και των χαρακτηριστικών της κίνησης IP. Συγκεκριμένα, δόθηκαν οι ιδιότητες της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας, η οποία διέπει την πραγματική κίνηση IP, αναφέρθηκαν οι σχετικές ερευνητικές δραστηριότητες που πιστοποιούν την ύπαρξή της στα δίκτυα IP και έγινε μία εισαγωγή στα μοντέλα περιγραφής μίας τέτοιας κίνησης. Επίσης, παρατέθηκαν και οι επιδράσεις που έχει η ύπαρξη κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας στα IP δίκτυα.

## **5.8. Αναφορές**

- [1] Sudhir Dixit and Ramjee Prasad, “Wireless IP and Building the Mobile Internet”, Artech House, 2003, ISBN: 1-58053-354-X.
- [2] Matthew G. Naugle, “Illustrated TCP/IP”, Wiley Computer Publishing, John Wiley & Sons, Inc., 1998, ISBN: 0471196568.
- [3] Toni Janevski, “Traffic Analysis and Design of Wireless IP Networks”, Artech House, 2003, ISBN 1-58053-331-0.
- [4] 3GPP TS 23.107, Technical Specification Group Services and System Aspects; QoS Concept and Architecture (Release 5), V5.3.0, January 2002.
- [5] M. Alam, R. Prasad and J. R. Farserotu, “Quality of Service among IP-Based Heterogeneous Networks”, IEEE Personal Communications, December 2001, pp. 18-24.
- [6] Erik Weis, “Future Access Networks (FAN) - IP based access technologies and QoS”, Eurescom Project Report, May 2003.
- [7] Edward W. Knightly and Ness B. Shroff, “Admission Control for Statistical QoS: Theory and Practice”, IEEE Network, March 1999.
- [8] Panagiotis Demestichas, Vera Stavroulaki, Vasilios Tountopoulos, Konstantinos Tsagkaris and Nikolas Mitrou, “Simulation platform for the validation of network and service management strategies for future generation wireless systems”, European Simulation Interoperability Workshop (EuroSIW), London, UK, June 2002.
- [9] Gunter Belch, Stefan Greiner, Hermann de Meer, and Kishor S. Trivedi, “Queueing Networks and Markov Chains-Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications”, Wiley Interscience, John Wiley & Sons, Inc., 1998, ISBN 0-471-20058-1.
- [10] D. Staehle, K. Leibnitz, and P. Tran-Gia, “Source Traffic Modeling of Wireless Applications”, University of Würzburg, Technical Report No. 261, 2000.
- [11] A. Klemm, C. Lindemann, and M. Lohmann, Traffic Modeling and Characterization for UMTS Networks, Proc. of the Globecom, Internet Performance Symposium, San Antonio TX, pp. 1741-1746, Nov. 2001.
- [12] Jia-Shiang Jou and John S. Baras, “A Multilevel ON/OFF Model for Multifractal Internet Traffic”, Technical Report at [www.isr.umd.edu](http://www.isr.umd.edu), CSHCN TR 2002-5 (ISR TR 2002-9).
- [13] Y. Lee and S. McLaughlin, “Radio resource metric estimation for a TDD-CDMA system supporting wireless Internet traffic”, Wireless Communications and Mobile Computing, Vol. 4, John Wiley & Sons, pp. 513–528.
- [14] J. Postel, “User Datagram Protocol (UDP)”, RFC 768, <http://www.faqs.org/rfcs/rfc768.html>, 1980.



- [15] Ramjee Prasad and Luis Muñoz, “WLANs and WPANs towards 4G Wireless”, Artech House, 2003, ISBN 1-58053-090-7.
- [16] Panos Gevros, Jon Crowcroft, Peter Kirstein, and Saleem Bhatti, “Congestion Control Mechanisms and Best Effort Service Model”, IEEE Network, May/June 2001, pp.16-26
- [17] W. Stevens, “TCP Slow Start Congestion Avoidance, Fast Retransmit and Fast Recovery Algorithms”, RFC2001, IETF, January 1997.
- [18] Jitendra Padhye, Victor Firoiu, Donald F. Towsley, and James F. Kurose, “Modeling TCP Reno Performance: A Simple Model and Its Empirical Validation”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 8, No. 2, April 2000, pp. 133-145.
- [19] IST-2001-33093 CREDO Project “Deliverable 9: Prototype applications and profiles”, Web site, [credo.nal.motlabs.com](http://credo.nal.motlabs.com), May 2003
- [20] G. Xylomenos, G. C. Polyzos, P. Mähönen, M. Saaranen, “TCP Performance Issues over Wireless Links”, IEEE Communications Magazine, Vol. 39, No 4, 2001, pp. 52–58.
- [21] L. Massoulié and J.W. Roberts, “Arguments in Favour of Admission Control for TCP Flows”, in Proc. of ITC 16, Edinbourg, June 1999.
- [22] Sanjoy Sen. Jastinder Jawanda, Kalyan Basu, Saveen K. Kakani and Sajal K. Das, “TCP Source Activity and its Impact on Call Admission Control in CDMA Voice/Data Network”, Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, Dallas, Texas, United States, 1998, pp. 276 – 283.
- [23] Chadi Barakat, “TCP/IP Modeling and Validation”, IEEE Network, May/June 2001, pp.38-47.
- [24] P. Siripongwutikorn, S. Banerjee and D. Tipper, “A Survey of Adaptive Bandwidth Control Algorithms”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Third Quarter 2003, pp 14-26.
- [25] Zafer Sahinoglu and Sirin Tekinay, “ On Multimedia Networks: Self-Similar Traffic and Network Performance”, IEEE Communications Magazine, January 1999, pp. 48-52.
- [26] F. Geerts and C. Blondia, “Superposition of Markov Sources and Long Range Dependence”, Proc. of the 4th International Conference on Broadband Communications (BC '98), 1998, pp. 550-562.
- [27] D. Heyman and T.V. Lakshman, “Source models for VBR broadcast video traffic,” IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 5, No. 1, February 1996, pp.40-48.
- [28] K. Park and W. Willinger, “Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation”, John Wiley and Sons Inc., 2000, ISBN 0-471-20644-X.

- [29] Roger Kalden and Sami Ibrahim, “Searching for Self-Similarity in GPRS”, Proc. of the 5th annual Passive & Active Measurement Workshop PAM2004, Antibes Juan-les-Pins, France, April 19-20, 2004.
- [30] Sandrine Vaton, “Fractal versus markov models of traffic and near completely decomposable markov models of traffic,” in ATM & IP workshop, Ilkley, UK, 2000.
- [31] W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger and D. Wilson, “On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 2, No.1 , February 1994.
- [32] M. E. Crovella, “Self-Similarity in WWW Traffic: Evidence and Possible Causes,” IEEE Transactions on Networking, Vol. 5, No. 6, December 1997, pp. 835–45.
- [33] Erramilli, A., O. Narayan, and W. Willinger, “Experimental Queuing Analyses with Long-Range Dependent Packet Traffic,” IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol. 4, No. 2, April 1996.
- [34] A. Popescu, “Traffic Self-Similarity”, ICT2001, Bucharest, 2001.
- [35] Izquierdo, M. R., and D. S. Reeves, “A Survey of Statistical Models for Variable Bit-Rate Compressed Video”, Center for Advanced Computing and Communications Technical Report 97/10, June 1997.
- [36] P. Abry, Flandrin, M.S. Taqqu, D. Veitch, "Wavelets for the analysis, estimation and synthesis of scaling data." In: K. Park and W. Willinger, Eds., "Self Similar Network Traffic Analysis and Performance Evaluation," Wiley, 2000.
- [37] Matthew Roughan and Darryl Veitch. Measuring long-range dependence under changing traffic conditions. In IEEE INFOCOM'99, NY, NY, March 1999. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California.
- [38] D. P. Heyman and T. V. Lakshman, “What are the Implications of Long-Range Dependence for VBR-Video Traffic Engineering?” IEEE Trans. Networking, vol. 4, no. 3, June 1996, pp. 301–17.
- [39] K. Park, G. Kim, and M. Crovella, “On the Relation Between File Sizes, Transport Protocols, and Self-Similar Network Traffic,” Proc. IEEE Int’l. Conf. Network Protocols, Oct. 1996, pp. 171–80.
- [40] K. Park, G. Kim, and M. Crovella, “On the Effect of Traffic Self-Similarity on Network Performance,” Proc. SPIE Int’l. Conf. Perf. and Control of Network Sys., 1997, pp. 296–310.
- [41] P. R. Morin, “The Impact of Self-Similarity on Network Performance Analysis,” Ph.D. dissertation, Carleton Univ., Dec. 1995.

- [42] Stefan Bodamer and Joachim Charzinski, “Evaluation of Effective Bandwidth Schemes for Self-Similar Traffic”, Proc. of the 13th ITC Specialist Seminar on IP Measurement, Modeling and Management, Monterey, CA, September 2000, pp. 21.1-21.10.
- [43] T. C. Yu and J. A. Silvester, “A four-state DMMPP for characterization multimedia traffic with short-term and long-term correlation,” Proc. Of IEEE ICC’99, vol. 2, September 1999, pp.880-885.
- [44] D. Heyman and T.V. Lakshman, “Source models for VBR broadcast video traffic,” IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 5, No. 1, February 1996, pp.40-48.
- [45] D. Heyman and T. V. Lakshman, “Statistical analysis and simulation study of video teleconference traffic in ATM networks,” IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 2, No. 1, March 1992, pp.49-59.
- [46] Allan T. Andersen and Bo Friis Nielsen, “A Markovian Approach for Modeling Packet Traffic with Long-Range Dependence”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 16, No. 5, June 1998, pp 719-732.
- [47] S. Robert and J.-Y. Le Boudec, “On a Markov modulated chain exhibiting self-similarities over finite timescale,” Perf. Eval., vols. 27, 28, 1996, pp. 159–173.
- [48] Tadafumi Yoshihar, Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi, “Practical Time-Scale Fitting of Self-Similar Traffic with Markov-Modulated Poisson Process”, Telecommunication Systems, Springer pub., Vol 17, No 1-2, May 2001, pp. 185–211.
- [49] Allan T. Andersen and Bo Friis Nielsen, “An Application of Superpositions of two state Markovian Sources to the Modelling of Self-similar Behaviour”, Proceedings of the INFOCOM '97- Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, pp.195-203.
- [50] F. Geerts and C. Blondia, “Superposition of Markov Sources and Long Range Dependence”, Proc. of the 4th International Conference on Broadband Communications (BC '98), 1998, pp. 550-562.



## Κεφάλαιο 6

# Προσέγγιση κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας με Μαρκοβιανά Μοντέλα

### 6.1. Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύσαμε τις τάσεις της σύγχρονης εποχής για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός σύνθετου ασύρματου περιβάλλοντος για την υποστήριξη τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Μέσα από την προδιαγραφή ενός μοντέλου για την υλοποίηση τέτοιων συστημάτων παρουσιάσαμε τις απαιτήσεις προς την κατεύθυνση της λειτουργικής διασύνδεσης των ασύρματων δικτύων πρόσβασης και την ολοκλήρωσή τους πάνω από ένα κοινό δίκτυο πυρήνα, βασισμένο στο πρωτόκολλο διαδικτύου. Μια σημαντική παράμετρος για την επίτευξη αυτών των στόχων είναι η μελέτη και περιγραφή της κίνησης των ασύρματων δικτύων, η οποία παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εκεί είδαμε τα γενικά χαρακτηριστικά της κίνησης διαδικτύου, η οποία παρουσιάζει χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας. Επίσης, μελετήσαμε, με βάση τη βιβλιογραφία, την επίδραση τέτοιων χαρακτηριστικών στη συμπεριφορά των δικτύων.

Η IP κίνηση παρουσιάζει φαινόμενα αυτό-ομοιότητας, τα οποία επιβάλλουν την υιοθέτηση διαφορετικών μοντέλων περιγραφής σε σχέση με την κίνηση των παραδοσιακών δικτύων π.χ. ATM. Αυτό σημαίνει ότι τα Μαρκοβιανά μοντέλα δεν μπορούν να συλλάβουν όλα τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς μίας τέτοιας κίνησης και, συνεπώς, απαιτείται η κατασκευή νέων. Εντούτοις, η βιβλιογραφία [1][2][3][4][5][6] έχει δείξει ότι η υπέρθεση ανεξάρτητων Μαρκοβιανών μοντέλων μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα, σχετικά με την προσέγγιση της συμπεριφοράς της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας σε πολλές κλίμακες χρόνου. Η διαφορά μεταξύ των προτεινόμενων μοντέλων έγκειται στις στατιστικές παραμέτρους δεύτερης τάξης, που χρησιμοποιούνται ως αναφορά για την κατασκευή τέτοιων μοντέλων, αλλά και στις κλίμακες χρόνου, για τις οποίες πραγματοποιείται η προσέγγιση.

Έτσι, για παράδειγμα, το [1] χρησιμοποιεί τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης για να προσομοιώσει τη συμπεριφορά της κίνησης σε πολλές κλίμακες χρόνου. Προς το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται μία προσεγγιστική συνάρτηση για την εκτίμηση της αυτοσυσχέτισης. Επίσης, τα [3][4] εστιάζουν στην προσέγγιση της χρονικής καμπύλης της διασποράς. Ειδικότερα, η ανάλυση του [3] στηρίζεται σε ακριβή περιγραφή της καμπύλης της διασποράς, με βάση την υπέρθεση

Μαρκοβιανών πηγών. Όμως, η ανάλυση αυτή υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς που αφορούν στην κατάλληλη επιλογή της ελάχιστης χρονικής κλίμακας. Παράλληλα, το [7] προτείνει την υιοθέτηση μίας πολυδιάστατης Μαρκοβιανής αλυσίδας και προσεγγίζει την κίνηση με χαρακτηριστικά μέχρι τρίτης τάξης. Μία ανάλογη, αλλά περισσότερο πολύπλοκη, ανάλυση της κίνησης IP με ιεραρχικά Μαρκοβιανά μοντέλα παρουσιάζεται στο [8], το οποίο κάνει διάκριση μεταξύ των επιπέδων της κίνησης σε ροές και συνόδους κίνησης.

Όμως, προκειμένου να διατηρηθούν τα μοντέλα αυτά όσο το δυνατόν πιο απλά, σε πολλές περιπτώσεις η προσέγγιση στηρίζεται στην ανάλυση των χαρακτηριστικών δεύτερης τάξης για την κατανομή του μεγέθους των πακέτων, ενώ παραλείπεται η περιγραφή των χαρακτηριστικών της κατανομής των χρόνων άφιξης διαδοχικών πακέτων, η οποία μπορεί να επηρεάσει εξίσου τα φαινόμενα αυτό-ομοιότητας της κίνησης. Συνεπώς, με αναφορά το μοντέλο [1], το κεφάλαιο αυτό συνεισφέρει με την περιγραφή ενός βελτιωμένου μοντέλου του [1], με βάση τα αποτελέσματα και του [7], το οποίο πραγματοποιεί ένα επιπλέον βήμα προσέγγισης της κίνησης, με την προσαρμογή των παραμέτρων των τιμών των Μαρκοβιανών πηγών στα χαρακτηριστικά μέχρι δεύτερης τάξης και της κατανομής των χρόνων άφιξης διαδοχικών πακέτων.

Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, η μοντελοποίηση της κίνησης μέσω Μαρκοβιανών μοντέλων Ροής Ρευστού (Markov Modulated Fluid Process – MMFP) έχει επιλεγεί. Έτσι, αρχικά, δίνεται μια παρουσίαση των μοντέλων MMFP και των εξισώσεων περιγραφής για την ανάλυση της συμπεριφοράς των δικτυακών κόμβων, με βάση αυτά τα μοντέλα. Δεδομένης της ανάλυσης αυτής, το παρόν κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παράθεση ενός προσεγγιστικού μοντέλου ανάλυσης και περιγραφής της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας, με βάση τα μοντέλα MMFP.

## 6.2. Εισαγωγή στα Μαρκοβιανά Μοντέλα Ροής Ρευστού

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία της γενικής θεωρίας των Μαρκοβιανών μοντέλων ροής ρευστού [9][10]. Το υπό μελέτη σύστημα αποτελείται από μια ουρά αναμονής, η οποία δέχεται εισερχόμενη κίνηση συνεχούς ροής με στοχαστικά μεταβαλλόμενο ρυθμό. Η κίνηση περιγράφεται μαθηματικά από τη στοχαστική διαδικασία  $r(t)$ ,  $t \geq 0$  του ρυθμού εισροής. Υποθέτουμε εδώ ότι ο ρυθμός αυτός διαμορφώνεται από μια πλήρως συνδεδεμένη (irreducible) Αλυσίδα Markov (AM) συνεχούς χρόνου, με πεπερασμένο πλήθος καταστάσεων. Συγκεκριμένα, σε κάθε κατάσταση  $i = 1, \dots, N$  αντιστοιχεί ένας ρυθμός ροής  $r_i$ . Καθώς η AM μεταβαίνει από κατάσταση σε κατάσταση, ο ρυθμός ροής αλλάζει σύμφωνα με την αντιστοιχία ρυθμών και καταστάσεων. Σε μαθηματική περιγραφή, αν  $s(t)$  συμβολίζει την κατάσταση που βρίσκεται η AM κατά τη χρονική στιγμή  $t$ , έχουμε  $r(t) = r_{s(t)}$ .

Έστω  $M = [m_{ij}]$  ο πίνακας ρυθμών μετάβασης (transition rate matrix) που περιγράφει τα χαρακτηριστικά της AM, και έστω  $\pi$  το αντίστοιχο διάνυσμα πιθανοτήτων μόνιμης κατάστασης. Ως γνωστόν, το  $\pi$  είναι το μοναδικό διάνυσμα που ικανοποιεί την εξίσωση :

$$\pi M = 0, \quad \sum_{i=1}^N \pi_i = 1 \quad (6-1)$$

Αφού η πιθανότητα  $\pi_j$  είναι ίση με το ποσοστό του χρόνου, κατά το οποίο η ΑΜ «επισκέπτεται» την κατάσταση  $j$ , και αφού σε όλο το διάστημα μίας τέτοιας επίσκεψης ο ρυθμός εισόδου είναι ίσος προς  $r_j$ , ο μέσος ρυθμός εισόδου δίδεται από τη σχέση:

$$\bar{r} \equiv Er(t) = \sum_{i=1}^N \pi_i r_i \quad (6-2)$$

Η παρπάνω σχέση μπορεί να γραφεί σε μητρική μορφή ως εξής: έστω  $R = \text{diag}\{r_1, \dots, r_N\}$  και  $\mathbf{1} = (1, \dots, 1)^T$ , δηλαδή ένα διάνυσμα στήλης (σε αντιδιαστολή προς το  $\pi$ , το οποίο είναι διάνυσμα γραμμής) με όλα τα στοιχεία του ίσα με τη μονάδα. Ο μέσος ρυθμός ροής στην είσοδο μπορεί να εκφραστεί ως  $\bar{r} = \pi R \mathbf{1}$ .

Η εισερχόμενη κίνηση εξυπηρετείται με ένα ρυθμό  $C$ , ο οποίος αντιστοιχεί στη χωρητικότητα (capacity) του συστήματος. Ανάλογα με το υποκείμενο δίκτυο, η χωρητικότητα αυτή μπορεί να είναι σταθερή (προκειμένου για ενσύρματα δίκτυα) ή να παρουσιάζει διακυμάνσεις σε σχέση με το χρόνο (στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων που μας απασχολούν εδώ). Αποσυνπλέκοντας τη χρονική μεταβολή της χωρητικότητας από την ανάλυση του υπό μελέτη συστήματος, θεωρούμε ότι το  $C$  αντιπροσωπεύει μία σταθερή τιμή για τη χωρητικότητα, ανεξάρτητα από το δίκτυο που μελετάμε.

Όταν  $r(t) > C$ , η εισροή δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί στην ολότητα της και το υπερβάλλον τμήμα της αποθηκεύεται σε ένα ταμιευτήρα (buffer) προκειμένου να εξυπηρετηθεί αργότερα. Έστω  $\{X(t), t \geq 0\}$  η στοχαστική διαδικασία που περιγράφει το περιεχόμενο του ταμιευτήρα. Ενδιαφερόμαστε για την κατανομή αυτού του περιεχομένου, ιδιαίτερα στη μόνιμη κατάσταση, δηλαδή για την κατανομή  $\lim_{t \rightarrow \infty} \Pr\{X(t) \leq x\}$ . Η γνώση αυτής της κατανομής παρέχει όλη την

πληροφορία που χρειάζεται για την εκτίμηση της πιθανότητας υπερχειλίσσης του ταμιευτήρα, φαινόμενο κατά το οποίο παρουσιάζονται απώλειες της εισερχόμενης κίνησης. Σημειώνεται ότι η

ένταση της κίνησης στο εν λόγω σύστημα αναμονής είναι ίση προς  $\bar{\rho} = \bar{r} / C$ .

Προκειμένου να περιγράψουμε τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος ορίζουμε το διάνυσμα γραμμής  $F(x, t) \triangleq (F_1(x, t), \dots, F_N(x, t))$  ούτως ώστε:

$$F_i(x, t) = \Pr\{X(t) \leq x, s(t) = i\}, \forall i, x, t \quad (6-3)$$

Βάσει της εξίσωσης αυτής, η ποσότητα  $F_i(x, t)$  συμβολίζει την από κοινού πιθανότητα, ώστε το περιεχόμενο του ταμιευτήρα να μην υπερβαίνει το επίπεδο  $x$  και η κατάσταση που επισκέπτεται η ΑΜ την ίδια χρονική στιγμή να είναι η  $i$ . Μετά από την ανάλυση που παρουσιάζεται στο [10] καταλήγουμε στο ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$\frac{\partial F(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial F(x,t)}{\partial x}(R - CI) = F(x,t)M. \quad (6-4)$$

Στο εξής θα χρησιμοποιούμε το σύμβολο  $D$  για τον διαγώνιο πίνακα  $R-CI$ , του οποίου τα στοιχεία είναι ίσα με το διαφορικό ρυθμό ροής, κατά τον οποίο η είσοδος υστερεί ως προς την έξοδο. Ας παρατηρηθεί ότι ο μέσος διαφορικός ρυθμός ροής είναι ίσος με  $\pi D1 = \bar{r} - C = C(\rho - 1)$ , δηλαδή μικρότερος του μηδενός για ένα ευσταθές σύστημα με  $\rho < 1$ . Ενδιαφερόμαστε, τώρα, για τη μόνιμη κατάσταση όταν  $t \rightarrow \infty$ . Στην κατάσταση αυτή  $\lim_{t \rightarrow \infty} F(x,t) = F(x)$ , δηλαδή ανεξάρτητο του χρόνου. Συνεπώς, παίρνοντας το όριο στην εξίσωση καταλήγουμε στο σύστημα εξισώσεων [11]:

$$\frac{dF(x)}{dx} D = F(x)M \quad (6-5)$$

το οποίο διέπει τη μόνιμη κατάσταση. Η επίλυση, εκτός από την απαίτηση για ευσταθές σύστημα, δηλαδή  $\rho < 1$ , απαιτεί και την ύπαρξη ενός τουλάχιστον ρυθμού  $r_i > C$ . Αλλιώς, ο ταμιευτήρας του συστήματος δε γεμίζει ποτέ και ισχύει  $F(x) = 0$ , για κάθε  $x \geq 0$ .

Η πιθανότητα να παρουσιαστεί απώλεια κίνησης στην είσοδο είναι ίση με την πιθανότητα ο ταμιευτήρας να είναι πλήρης και η  $AM$  να βρεθεί σε κατάσταση  $j$  κατά την οποία  $r_j > C$ .

Τέτοιες καταστάσεις ονομάζονται υπερφορτίζουσες (overload). Αυτό διότι αν  $r_j \leq C$ , τότε η αντίστοιχη κατάσταση ονομάζεται υποφορτίζουσα (underload), ακόμη και με γεμάτο ταμιευτήρα ο ρυθμός εξόδου είναι επαρκής για να χειριστεί την κίνηση που παρουσιάζεται στην είσοδο.

Αν υπολογιστεί το διάνυσμα  $F(x)$ , είναι αμέσως διαθέσιμη η κατανομή του περιεχομένου του ταμιευτήρα στη μόνιμη κατάσταση, δεδομένου ότι

$$\Pr\{X(\infty) \leq x\} = \sum_{i=1}^N \Pr\{X(\infty) \leq x \& s(\infty) = i\} = \sum_{i=1}^N F_i(x) = F(x)1 \quad (6-6)$$

Η κατανομή αυτή έχει νόημα για  $x \in [0, \infty)$  αν ο ταμιευτήρας έχει άπειρο μέγεθος, και για  $x \in [0, B)$  αν ο ταμιευτήρας είναι πεπερασμένος, με μέγεθος  $B$ . Εμείς, εδώ ενδιαφερόμαστε για την περίπτωση του άπειρου ταμιευτήρα, οπότε παίρνουμε:

$$P_{\text{overflow}} = 1 - F(B^-)1 \quad (6-7)$$

Η πιθανότητα απωλειών είναι ίση με το ποσοστό του χρόνου, κατά το οποίο παρουσιάζονται απώλειες, και ποσοτικοποιεί το ενδεχόμενο να παρουσιαστεί συμφόρηση, χωρίς όμως να εκτιμά πόση πληροφορία χάνεται κατά τις περιόδους συμφόρησης. Προκειμένου να υπολογιστεί το ποσοστό της κίνησης που χάνεται λόγω συμφόρησης  $H_{\text{overflow}}$ , κάθε όρος της εξίσωσης αυτής πρέπει να ζυγιστεί με το αντίστοιχο τμήμα του ρυθμού εισροής που δεν μπορεί να εξυπηρετήσει η έξοδος, οπότε ισχύει [11]:



$$H_{overflow} = \frac{P_{overflow}}{\rho} \quad (6-8)$$

όπου  $\rho = \bar{r} / C$  είναι η ένταση κίνησης. Λόγω της σχέσης αυτής, ο υπολογισμός της πιθανότητας απωλειών παρέχει επίσης το ποσοστό της κίνησης που χάνεται χωρίς επιπρόσθετο υπολογιστικό κόστος. Επίσης, η σχέση αυτή δείχνει ότι η πιθανότητα απωλειών και το ποσοστό της κίνησης που χάνεται είναι της «ίδιας τάξεως μεγέθους», συνεπώς οποιοδήποτε από τα δύο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της επίδοσης του συστήματος.

Προκειμένου να επιλύσουμε το διαφορικό σύστημα (6-5) πρέπει να μελετήσουμε το γενικευμένο πρόβλημα ιδιοτιμών [9]:

$$z\phi D = \phi M \quad (6-9)$$

Εφόσον ο πίνακας  $D$  είναι ομαλός (δηλαδή δεν υπάρχει ρυθμός  $r_j = C$ ) τα  $z$ , και  $\phi$ , είναι, αντίστοιχα η ιδιοτιμή και αριστερό ιδιοδιάνυσμα του πίνακα  $MD^{-1}$ .

Δεδομένου ότι υπάρχουν  $N$  γραμμικά ανεξάρτητα αριστερά ιδιοδιανύσματα του συστήματος (6-9), οι αντίστοιχες διανυσματικές συναρτήσεις  $e^{z_i x} \phi_i$  παρέχουν  $N$  ανεξάρτητες λύσεις του διαφορικού συστήματος (6-5). Αυτές οι γραμμικά ανεξάρτητες λύσεις ονομάζονται, συνήθως, φασματικές συνιστώσες του συστήματος. Επομένως, η κατανομή  $F(x)$  είναι ένας κατάλληλος γραμμικός συνδυασμός [11]:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N a_i e^{z_i x} \phi_i \quad (6-10)$$

όπου οι συντελεστές  $a_i$  πρέπει να προσδιορισθούν από τις αρχικές συνθήκες. Ο προσδιορισμός αυτός διαφέρει ανάλογα με το αν το μέγεθος του ταμιευτήρα είναι πεπερασμένο ή άπειρο. Έτσι, για την περίπτωση του άπειρου μεγέθους ταμιευτήρα ισχύει ότι:

$$F(x) = \pi + \sum_{i \in S_o} a_i e^{z_i x} \phi_i \quad (6-11)$$

Άρα απαιτείται να υπολογίσουμε τους συντελεστές  $a_i$  για τις υπερφορτιζουσες καταστάσεις του συστήματος, μέσα από το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων:

$$a_o \Phi_{oo} = -\pi_o, \quad (6-12)$$

όπου ο πίνακας  $\Phi_{oo}$  έχει ως γραμμές του τα κατάλληλα τμήματα των ιδιοδιανυσμάτων που αντιστοιχούν στις υπερφορτιζουσες καταστάσεις, ενώ  $\pi_o$  είναι το αντίστοιχο τμήμα του διανύσματος  $\pi$ .

Η ακριβής αποτίμηση της επίδοσης ευρυζωνικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων υπό εκρηκτική φόρτιση είναι πολύπλοκο πρόβλημα. Προϋποθέτει σύνθετα μαθηματικά μοντέλα τα οποία, ακόμη και όταν είναι επιλύσιμα, παρουσιάζουν υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα και χρειάζονται μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Ως εκ τούτου, οι συναφείς μέθοδοι ανάλυσης δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν σε διαδικασίες πραγματικού χρόνου (real-time), όπως, π.χ., ο έλεγχος αποδοχής ροών και ο έλεγχος κίνησης γενικότερα, αλλά ένας προσεγγιστικός μηχανισμός που στηρίζεται στην παραπάνω θεωρία.

Στο [10] αναλύεται η περίπτωση μίας απλής εκθετικής πηγής ON/OFF και η πολυπλεξία  $N$  ομοιογενών πηγών για την εξαγωγή των μέτρων επίδοσης του συστήματος, με βάση τη θεωρία που μόλις περιγράφηκε. Για την περίπτωση της υπέρθεσης  $N$  ετερογενών πηγών, το αποτέλεσμα είναι και αυτό Μαρκοβιανό μοντέλο της ίδιας μορφής [12]. Αν  $M_i$  είναι οι πίνακες των ρυθμών μετάβασης και  $R_i$  οι πίνακες των ρυθμών ροής των ξεχωριστών ομογενών συστημάτων τότε οι πίνακες  $M$  και  $R$  του σύνθετου συστήματος υπολογίζονται με τη βοήθεια του αθροίσματος του Kronecker ως εξής:

$$\begin{aligned} M &= M_1 \oplus M_2 \oplus \dots \oplus M_n, \\ R &= R_1 \oplus R_2 \oplus \dots \oplus R_n. \end{aligned} \quad (6-13)$$

όπου το σύμβολο  $\oplus$  δηλώνει το άθροισμα του Kronecker. Αν οι πίνακες  $M_i, R_i$  είναι  $k_i \times k_i$  πίνακες, τότε και οι  $M, R$  είναι  $k \times k$  πίνακες όπου  $k = \prod_{i=1}^n k_i$ .

Το άθροισμα του Kronecker ορίζεται ως εξής :

$$A \oplus B = (A \otimes I_B) + (I_A \otimes B), \quad (6-14)$$

όπου  $I_A$  και  $I_B$  είναι οι μοναδιαίοι πίνακες της ίδιας τάξης με τους πίνακες  $A$  και  $B$  αντίστοιχα, ενώ το σύμβολο  $\otimes$  παριστάνει το γινόμενο του Kronecker και για δύο πίνακες  $C$  και  $D$  δίνεται από τη σχέση:

$$C \otimes D = \begin{bmatrix} c_{11}D & c_{12}D & \dots & c_{1m}D \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n1}D & c_{n2}D & \dots & c_{nm}D \end{bmatrix} \quad (6-15)$$

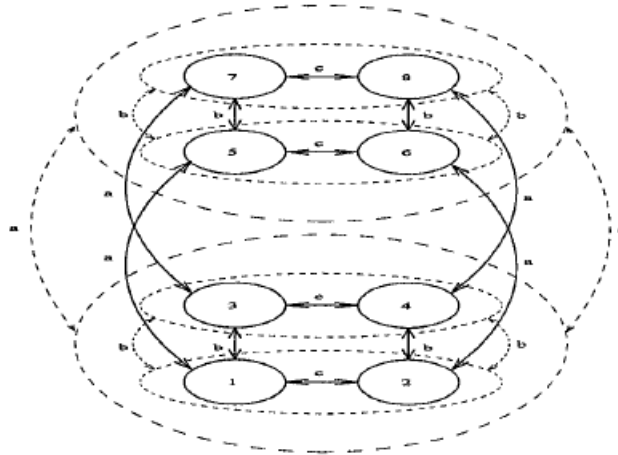
### 6.3. Μαρκοβιανό Μοντέλο για την περιγραφή των χαρακτηριστικών αυτό-ομοιότητας της κίνησης

#### 6.3.1. Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 5, ένα χαρακτηριστικό της κίνησης που παρατηρείται στα IP δίκτυα, εν γένει, και, συνεπώς, και στα ασύρματα δίκτυα IP είναι ότι οι στατιστικές ιδιότητες δεύτερης τάξης επιδεικνύουν συμπεριφορά, η οποία παρουσιάζει χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας και εξάρτηση από μεγάλες κλίμακες χρόνου [13]. Κατά συνέπεια, αυτή η κίνηση εκθέτει συμπεριφορά κίνησης με ιδιότητες δεύτερης τάξης, οι οποίες πρέπει να εξεταστούν και να ληφθούν υπόψη από τους σχεδιαστές κατά τη διαστασιολόγηση ενός ασύρματου συστήματος. Από τη σκοπιά αξιολόγησης της επίδοσης δικτύων, ο στόχος διαμόρφωσης της προσφερόμενης κίνησης είναι να υπολογιστούν τα μέτρα επίδοσης, δεδομένου ενός συνόλου λίγων, αλλά ικανοποιητικών, χαρακτηριστικών κίνησης, και να ερευνηθεί ο αντίκτυπος των αλλαγών τέτοιων χαρακτηριστικών σε ολόκληρη την επίδοση των συστημάτων.

Έχει υποστηριχτεί ότι τα παραδοσιακά Μαρκοβιανά μοντέλα δεν επαρκούν, επειδή οι μετρήσεις δείχνουν ότι τα χαρακτηριστικά της κίνησης διαφέρουν πολύ ανάλογα με την ημέρα και την ώρα παρατήρησης. Εντούτοις, δεν είναι προφανές εάν αυτό οφείλεται στα χαρακτηριστικά της ίδιας της κίνησης, που παρουσιάζουν φαινόμενα αυτό-ομοιότητας και εξάρτηση από μεγάλες κλίμακες χρόνου, ή εάν τα διαστήματα, στα οποία λαμβάνονται οι μεμονωμένες μετρήσεις δεν είναι αρκετά μεγάλα, ώστε να συλλάβουν όλα τα χαρακτηριστικά της κίνησης. Στην τελευταία περίπτωση, είναι χαρακτηριστικά τα διαφορετικά αποτελέσματα που λαμβάνονται καθημερινά, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις με σχετικά μεγάλη τιμή της  $H$  παραμέτρου (δηλαδή κοντά στο 1).

Η καλύτερη προσέγγιση για τη μοντελοποίηση της κίνησης είναι αυτή που καταρχήν επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό των σχετικών μέτρων επίδοσης, με βάση τα χαρακτηριστικά της παρεχόμενης κίνησης. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας κατά τη διαδικασία επιλογής ενός μοντέλου κίνησης είναι ο αριθμός των απαιτούμενων παραμέτρων. Λαμβάνοντας υπόψη, γενικά, ότι η συμπεριφορά συστημάτων αναμονής δεν μπορεί ακριβώς να προβλεφθεί, με βάση τις πρώτης και δεύτερης τάξης ιδιότητες της εισερχόμενης κίνησης, δε φαίνεται να υπάρχει λόγος να θεωρηθεί ότι μια κίνηση με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας προσδιορίζεται επακριβώς από τέτοιες παραμέτρους. Αντίθετα, είναι προφανώς ελκυστικό να χρησιμοποιούνται μοντέλα, τα οποία απαιτούν ένα ελάχιστο αριθμό παραμέτρων, για παράδειγμα τρεις ή τέσσερις. Από την άλλη, δεν είναι ακόμα κατανοητό πόσα και ποια είναι τα χαρακτηριστικά που μπορούν να κριθούν επαρκή για να περιγράψουν την συμπεριφορά της κίνησης. Συνεπώς, η Μαρκοβιανή θεωρία κρίνεται ικανοποιητική από την άποψη των παραμέτρων, λόγω της μεταβλητότητάς της στο ταίριασμα ποικίλων παραμέτρων, ακόμη και με σχετικά απλά μοντέλα.



**Σχήμα 6-1. Μοντέλο αναφοράς για την περιγραφή της κίνησης αυτό-ομοιότητας, με βάση την υπέρθεση ανεξάρτητων πηγών MMFP.**

Έχοντας περιγράψει τα γενικά χαρακτηριστικά των μοντέλων MMFP και με βάση το γεγονός ότι η κίνηση IP στα ασύρματα δίκτυα παρουσιάζει συμπεριφορά εξάρτησης από μεγάλες κλίμακες χρόνου και φαινομένων αυτό-ομοιότητας, στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε ένα μοντέλο που προσπαθεί να προσεγγίσει την κίνηση IP με τα γνωστά Μαρκοβιανά μοντέλα MMFP. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη δόμηση ενός ιεραρχικού μοντέλου, με αναφορά τα αντίστοιχα μοντέλα που περιγράφονται στα [1][3][5][6], το οποίο αποτελείται από ανεξάρτητες πηγές MMFP, όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 6-1 [14], και μία πηγή Poisson. Οι διαδικασίες συναρμολόγησης του ιεραρχικού μοντέλου σκοπεύουν στην προσομοίωση των χαρακτηριστικών των Μαρκοβιανών μοντέλων στην υπό μελέτη συμπεριφορά της κίνησης αυτό-ομοιότητας και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της ουράς αναμονής στα ασύρματα δίκτυα υπό τη φόρτιση οποιουδήποτε είδους κίνησης, δηλαδή στην προσέγγιση των μέτρων επίδοσης. Η προσέγγιση της πραγματικής κίνησης από την υπέρθεση Μαρκοβιανών πηγών πραγματοποιείται σε διάφορες κλίμακες χρόνου, με σκοπό η προσέγγιση αυτή να συλλαμβάνει, όσο αυτό είναι εφικτό, τα χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας της κίνησης, τα οποία εκτείνονται σε πολλές κλίμακες χρόνου.

Η αποτίμηση του πόσο καλή είναι η διαδικασία προσέγγισης μπορεί να γίνει, βάσει των ακόλουθων κριτηρίων [3]:

- Τα στατιστικά χαρακτηριστικά: αν η χρονική καμπύλη των χαρακτηριστικών δευτέρας τάξης που προκύπτει από το ιεραρχικό Μαρκοβιανό μοντέλο συμφωνεί με την αντίστοιχη καμπύλη που προκύπτει από την ανάλυση της πραγματικής διαδικασίας για ένα δεδομένο αριθμό κλιμάκων χρόνου, τότε μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος της συναρμολόγησης λειτουργεί καλά, όσον αφορά στα στατιστικά χαρακτηριστικά της κίνησης.
- Επίδοση της ουράς αναμονής: Εξετάζουμε το μέσο χρόνο αναμονής ή και την κατανομή του μήκους της ουράς. Εάν γι' αυτά τα μέτρα επίδοσης, τα αποτελέσματα της ανάλυσης της πραγματικής διαδικασίας και του ιεραρχικού μοντέλου για οποιοδήποτε είδος κίνησης είναι

σε μεγάλο βαθμό παρόμοια, τότε μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος προσέγγισης λειτουργεί καλά, όσον αφορά στη συμπεριφορά της ουράς αναμονής.

Εδώ, εστιάζουμε στο γεγονός ότι η επίδοση της ουράς αναμονής μελετάται υπό την έννοια της ποσοτικοποίησης της υπέρβασης καθορισμένων ορίων καθυστέρησης μέσα στην ουρά αναμονής. Έτσι, μπορεί να γίνει ευθεία αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών επίδοσης του συστήματος αναμονής με τους περιγραφείς κίνησης, οι οποίοι συγκεκριμενοποιούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της κίνησης. Τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα IP καλούνται να εξυπηρετήσουν υπηρεσίες και εφαρμογές πολυμέσων, οι οποίες διακρίνονται από αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας και πολυπλέκονται με κλασσικές υπηρεσίες TCP. Αυτό σημαίνει ότι τα ποιοτικά κριτήρια, με τα οποία ασχολούμαστε, ποσοτικοποιούνται, συνήθως, στην προδιαγραφή της υπέρβασης τιμών καθυστέρησης μερικών δευτερολέπτων της τάξης των 5 sec με πιθανότητα της τάξης του  $10^{-2}$ . Συνεπώς, το μοντέλο που θα περιγραφεί στη συνέχεια, θα πρέπει να αποτιμηθεί ως προς την ικανότητά του να προσομοιώνει την ουρά αναμονής του υπό εξέταση συστήματος σε εκείνες τις περιοχές. Άλλωστε, όπως αποδεικνύουν και οι σχετικές αναφορές [1][3][6][15], η ακριβής προσέγγιση της ουράς αναμονής για μία ευρεία περιοχή τιμών υπερχείλισης των ταμειωτήρων είναι ακόμα ένα ανοιχτό θέμα διερεύνησης και απαιτεί την υιοθέτηση περισσότερων περιγραφών της εισερχόμενης κίνησης.

### 6.3.2. Περιγραφή του μοντέλου

Η ανάλυση που ακολουθεί αποσκοπεί στην εύρεση των χαρακτηριστικών μιας πραγματικής κίνησης IP, με βάση τα δείγματα που συλλέγονται κατά την παρακολούθηση του δικτύου. Η ανάλυση αυτή είναι βασισμένη στα αποτελέσματα που παρέχονται από τα [1][7][14]. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εκεί συντίθενται και επεκτείνονται στην παρούσα εργασία, ώστε να ενσωματωθούν πρόσθετα χαρακτηριστικά για την περιγραφή της κίνησης, τα οποία, όπως θα αποδειχθεί παρακάτω, προσφέρουν μια καλύτερη προσέγγιση της επίδοσης του δικτύου, βάσει του μοντέλου που προκύπτει.

Στο υπόλοιπο αυτής της εργασίας, αναφερόμαστε στο μοντέλο που παρουσιάζεται στο [1] ως μοντέλο Con, ενώ το εκτεταμένο μοντέλο που παρουσιάζεται εδώ καλείται Adv μοντέλο. Η κύρια διαφορά μεταξύ τους είναι ότι στο Adv μοντέλο κατά τη διαδικασία προσέγγισης χρησιμοποιείται ένα επιπλέον (σημαντικό) βήμα προσέγγισης, που αφορά στην κατανομή του χρόνου αφίξεων μεταξύ διαδοχικών πακέτων (interarrival times). Επίσης, πρέπει να σημειώσουμε ότι, ενώ η ανάλυση του [1] βασίζεται στην υπέρθεση συμμετρικών MMPP πηγών, το Adv μοντέλο υποθέτει ανεξάρτητες, ασύμμετρες πηγές MMFP, με εστίαση στην ειδική περίπτωση των πηγών Interrupted Fluid Process (IFP). Συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι η μεταβαλλόμενη κίνηση IP μπορεί να προσεγγιστεί από την υπέρθεση πολλών πηγών MMFP 2-καταστάσεων. Στο παράρτημα (παράγραφος 6.7.1) παρουσιάζεται αναλυτικά το μοντέλο Con, όπως προκύπτει από το [1].

Ορίζουμε τη συνάρτηση Συνδιασποράς (covariance function) να εκφράζεται από τη σχέση  $\text{cov}(k) = \psi_{\text{cov}} k^{-\beta}$ . Στη σχέση αυτή, το  $\psi_{\text{cov}}$  είναι ένας θετικός σταθερός αριθμός και είναι ένα απόλυτο μέτρο της διασποράς,  $k$  είναι το βήμα (lag) και  $\beta = 2 - 2H$  είναι η κλίση της καμπύλης και δίνεται από την παράμετρο  $H$ .

Σε αναλογία με το [1], θεωρούμε ότι για τις πηγές MMFP 2-καταστάσεων οι πίνακες ρυθμών ροής και μετάβασης δίνονται από τα ακόλουθα:

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{1i} & 0 \\ 0 & r_{2i} \end{pmatrix} \text{ και } M_i = \begin{pmatrix} -m_{1i} & m_{1i} \\ m_{2i} & -m_{2i} \end{pmatrix} \quad (6-16)$$

Προφανώς, με βάση όσα έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 6.2 για τα χαρακτηριστικά των πηγών MMFP, το μοντέλο που προκύπτει από την υπέρθεση των ανεξάρτητων MMFP πηγών ακολουθεί πάλι τα χαρακτηριστικά των MMFP μοντέλων, ενώ οι πίνακες ρυθμών ροής και μετάβασης για το συνολικό μοντέλο εκφράζονται με βάση το άθροισμα του Kronecker από τις εξισώσεις (6-13), με τη διαφορά ότι στον συνολικό πίνακα των ρυθμών ροής συνεισφέρει και η κίνηση Poisson ( $R = R_1 \oplus R_2 \oplus \dots \oplus R_n \oplus R_{\text{Poisson}}$ ).

Η χρονική καμπύλη της διασποράς του αριθμού των αφίξεων πακέτων από την  $i$  πηγή στο χρονικό διάστημα  $(0,t)$ , και η συνάρτηση Συνδιασποράς του ρυθμού αφίξεων για την  $i$  πηγή δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις (6-24), (6-25). Συνεπώς, οι πρώτης και δευτέρας τάξεως ιδιότητες της ακολουθίας αφίξεων πακέτων μπορούν να προσδιοριστούν από τις τρεις παραμέτρους, δηλαδή  $\bar{r}_i$ ,  $k_{1i}$  και  $k_{2i}$ . Όμως μια MMFP διαδικασία 2 καταστάσεων καθορίζεται από τέσσερις παραμέτρους, άρα απομένει ένας βαθμός ελευθερίας, ο οποίος μπορεί να καθορίσει ένα σύνολο από διαφορετικά MMFP μοντέλα, τα οποία, όμως, έχουν πανομοιότυπες πρώτης και δευτέρας τάξεως ιδιότητες.

Σύμφωνα με το [16], κάθε μεταβλητή  $f_i \geq \frac{k_{1i}k_{2i}}{r_i}$  μπορεί να ορίσει ένα διαφορετικό μοντέλο

MMFP, ως προς  $f_i$ , σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} r_1(f_i) &= \bar{r}_i + \sqrt{k_{1i}k_{2i}f_i} \\ r_2(f_i) &= \bar{r}_i - \sqrt{\frac{k_{1i}k_{2i}}{f_i}} \\ m_{1i}(f_i) &= \frac{k_{2i}f_i}{1+f_i} \\ m_{2i}(f_i) &= \frac{k_{2i}}{1+f_i} \end{aligned} \quad (6-17)$$

Όπως και στο παράρτημα 6.7.1, ο σκοπός είναι να επιτευχθεί η προσέγγιση της δομής της συνάρτησης Συνδιασποράς που παράγεται από την υπέρθεση ανεξάρτητων MMFP πηγών με την ασυμπτωτική καμπύλη, δηλαδή:

$$\gamma(k) = \sum_{i=1}^d \gamma_i(k) = \psi_{\text{cov}} k^{-\beta}, \quad 1 \leq k \leq 10^n \quad (6-18)$$

για τον αριθμό  $n$  των χρονικών κλιμάκων, για τις οποίες επιθυμούμε να μοντελοποιήσουμε την κίνηση.

Ο λόγος της διασποράς προς τη μέση τιμή της κατανομής του αριθμού των αφίξεων κατασκευάζει την καμπύλη του δείκτη της διασποράς των αριθμήσεων (Index of Dispersion of Counts – IDC). Για το μοντέλο MMFP 2-καταστάσεων, η χρονική IDC καμπύλη μπορεί να υπολογιστεί από τις παραμέτρους της, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση [7]:

$$IDC(t) = IDC(\infty) - \frac{IDC(\infty) - 1}{m_c t} (1 - e^{-m_c t}) \quad (6-19)$$

Σε αυτήν την εξίσωση  $m_c = m_1 + m_2$  και  $IDC(\infty)$  είναι η τιμή της καμπύλης IDC καθώς  $t \rightarrow \infty$ . Επίσης, είναι γνωστό ότι η IDC καμπύλη ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση [17]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} IDC(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{Var(N(0, t))}{M_1(t)} = \frac{Var(X)}{E^2(X)} \quad (6-20)$$

Αυτό σημαίνει ότι η μακροπρόθεσμη τιμή της IDC καμπύλης είναι ίση με το λόγο της διασποράς προς το τετράγωνο της μέσης τιμής για την κατανομή της μεταβλητής  $X$ , που περιγράφει την ακολουθία των interarrival χρόνων. Ο τελευταίος αυτός λόγος συχνά καλείται τετραγωνικός συντελεστής της διασποράς (squared coefficient of variation) της κατανομής των interarrival χρόνων.

Ο στόχος είναι να προσεγγιστούν οι τιμές των ιδιοτήτων πρώτης και δεύτερης τάξης της συνολικής διαδικασίας, που προκύπτει από την άθροιση των  $N_i(0, t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, d$  και των interarrival χρόνων, με τις αντίστοιχες τιμές που μετρώνται από την ανάλυση των δειγμάτων. Η διαδικασία συναρμολόγησης βασίζεται σε δύο στάδια προσέγγισης. Αρχικά, η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στον προσδιορισμό της κατάλληλης τιμής για το  $k_{2i}$  και υπολογίζεται από την προσέγγιση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης των υπερτιθέμενων πηγών με την ασυμπτωτική καμπύλη  $r(k) = r_0 k^{-\beta}$  για όλες τις τιμές βημάτων  $k$ . Κατόπιν, γίνεται προσέγγιση της καμπύλης IDC με την τιμή του τετραγωνικού συντελεστή της μεταβολής της κατανομής των interarrival χρόνων, που μετράται από τα δείγματα, ώστε να προκύψει η κατάλληλη τιμή του

$m_{pi} = \frac{m_{2i}}{m_{1i} + m_{2i}}$ . Πρέπει να τονιστεί εδώ, ότι αυτό το δεύτερο στάδιο προσέγγισης

πραγματοποιείται για μεγάλες τιμές του χρόνου, καθώς, όπως προκύπτει και από τον ορισμό (6-20), η IDC καμπύλη και ο τετραγωνικός συντελεστής της μεταβολής της κατανομής των interarrival χρόνων συγκλίνουν για  $t \rightarrow \infty$ .

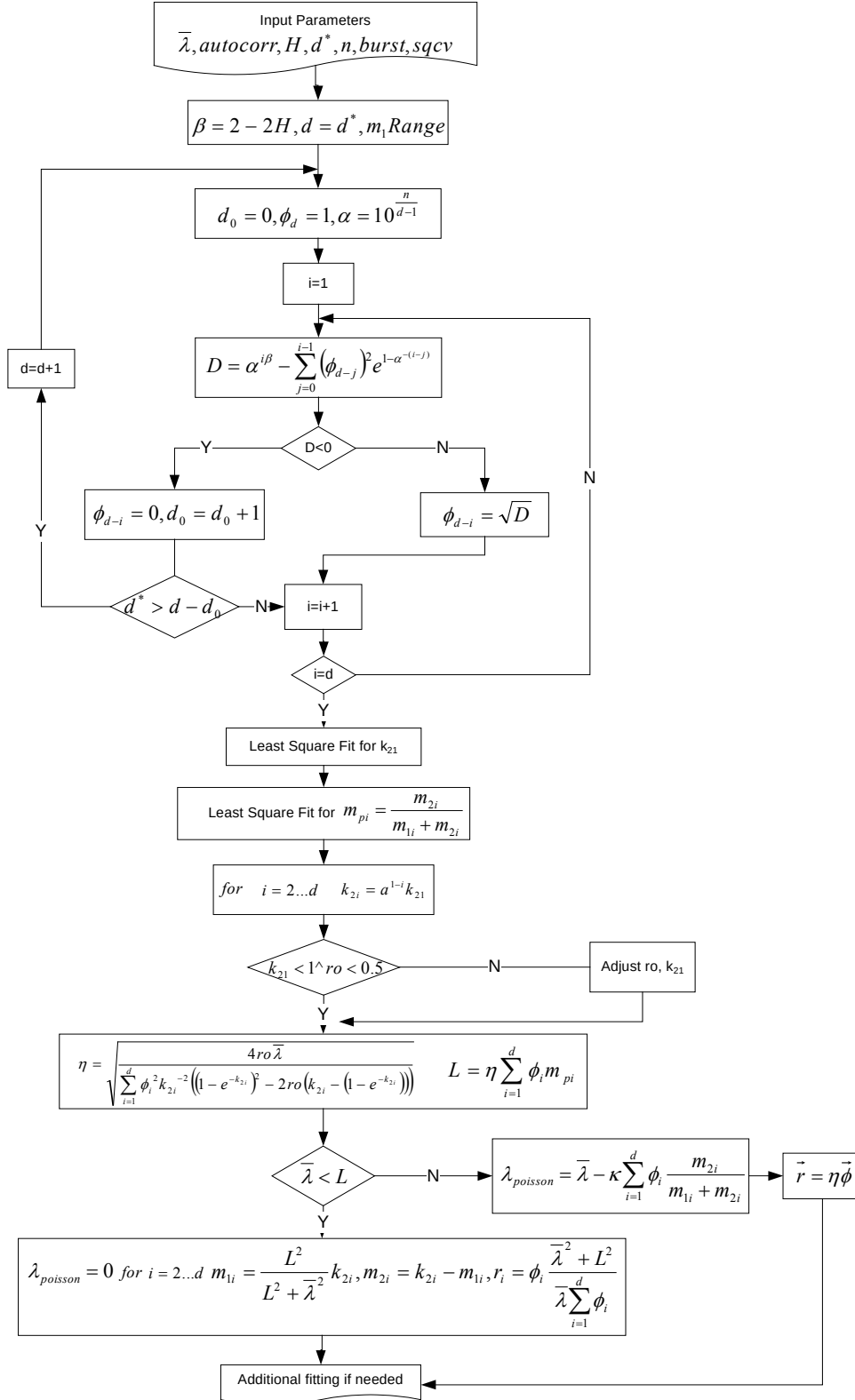
Η διαδικασία προσέγγισης βασίζεται στις ακόλουθες παραμέτρους εισόδου, οι οποίες προκύπτουν από την ανάλυση της πραγματικής ακολουθίας δειγμάτων:

- Το μέσο ρυθμό άφιξης πακέτων  $\bar{\lambda}$
- Τις τιμές της αυτοσυσχέτισης  $r_k$  για όλα τα βήματα
- Την τιμή της παραμέτρου  $H$ , που προσδιορίζει την αυτό-ομοιότητα της κίνησης
- Τον αριθμό των ανεξάρτητων πηγών MMFP  $d$  που υπερτίθενται
- Τον αριθμό των χρονικών κλιμάκων  $n$  για τη μοντελοποίηση
- Την εκτίμηση της εκρηκτικότητας  $b$  της κίνησης (ή του λόγου του μέσου προς το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης)
- Τον τετραγωνικό συντελεστή της διασποράς της κατανομής των interarrival χρόνων  $scI$

Όπως παρατηρούμε, η διαφορά με το μοντέλο Con έγκειται σε δύο επιπλέον παραμέτρους εισόδου, τον τετραγωνικό συντελεστή της μεταβολής της κατανομής των interarrival χρόνων, ο οποίος συνδυάζει τις πληροφορίες για την κατανομή του χρόνου αφίξεων πακέτων, και την εκρηκτικότητα κίνησης, ώστε να χρησιμοποιηθεί ως παράγοντας ασυμμετρίας μεταξύ των χρόνων παραμονής στις καταστάσεις ON και OFF.

Η διαδικασία προσέγγισης πραγματοποιείται με βάση τα βήματα που απεικονίζει το σχεδιάγραμμα του αλγορίθμου, που φαίνεται στο Σχήμα 6-2. Όπως παρατηρούμε από το σχήμα αυτό, η διαφορά με το Con μοντέλο έγκειται στην υλοποίηση του βήματος προσέγγισης της καμπύλης IDC με την τιμή του τετραγωνικού συντελεστή της μεταβολής της κατανομής των interarrival χρόνων, που μετράται από τα δείγματα. Κατά τα άλλα, ο αλγόριθμος ακολουθεί τα βήματα, που περιγράφονται στο παράρτημα 6.7.1.





Σχήμα 6-2. Σχεδιάγραμμα αλγορίθμου για την προσέγγιση της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας με Μαρκοβιανά μοντέλα MMFP.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθούμε στις επιλογές για την επίλυση του αλγορίθμου, σε αναλογία με εκείνες που περιγράφονται στο παράρτημα 6.7.1. Ορίζουμε σαν  $L = \eta \sum_{i=1}^d \phi_i m_{pi}$ , όπου τα διανύσματα  $\phi_i$  αντιπροσωπεύουν τους κανονικοποιημένους ρυθμούς των IFP πηγών ( $\vec{r} = \kappa \vec{\phi}$ , όπου  $\kappa$  μία σταθερά) και το  $\eta$  δίνεται από τη σχέση (6-31) του παραρτήματος 6.7.1. Αν  $\bar{\lambda} \geq L$ , τότε μπορούμε να πάρουμε μια απευθείας λύση του προβλήματος για τον προσδιορισμό του ρυθμού της κίνησης Poisson. Στην περίπτωση αυτή,  $\kappa = \eta$  και οι ρυθμοί αφίξεων των  $d$  IFP πηγών προκύπτουν από την  $\vec{r} = \kappa \vec{\phi}$ , ενώ ο αντίστοιχος ρυθμός της κίνησης Poisson είναι:

$$\lambda_{poisson} = \bar{\lambda} - \kappa \sum_{i=1}^d \phi_i \frac{m_{2i}}{m_{1i} + m_{2i}} \quad (6-21)$$

Αν  $\bar{\lambda} < L$ , τότε δεν έχουμε απευθείας λύση. Στην περίπτωση αυτή, δεδομένου ότι  $\lambda_{poisson} = 0$ ,

χρειάζεται να αναπροσαρμόσουμε τις τιμές των  $k_{1i} = \frac{(\eta \phi_i m_{pi})^2}{k_{2i}}$  και  $k_{2i} = m_{1i} + m_{2i}$ . Με απλή

ανάλυση, ανάλογη με εκείνη που παρουσιάζεται στο [1], καταλήγουμε στο ακόλουθο σύνολο εξισώσεων:

$$\begin{aligned} m_{1i} &= \frac{L^2}{L^2 + \bar{\lambda}^2} k_{2i} \\ m_{2i} &= k_{2i} - m_{1i} \\ r_i &= \phi_i \frac{\bar{\lambda}^2 + L^2}{\bar{\lambda} \sum_{i=1}^d \phi_i} \end{aligned} \quad (6-22)$$

Τέλος με κατάλληλη επιλογή του  $f_i$  στις εξισώσεις (6-17) προκύπτουν οι τελικές τιμές για τις τέσσερις παραμέτρους καθεμιάς από τις  $d$  MMFP πηγές. Για τους δικούς μας σκοπούς επιλέγουμε  $f_i = \frac{m_{1i}}{m_{2i}}$ , με τις τιμές των  $m_{1i}$  και  $m_{2i}$  όπως αυτές έχουν υπολογιστεί στο τρίτο βήμα. Αυτό συνεπάγεται ότι οι τελικές πηγές που υπερτίθενται μαζί με την κίνηση Poisson έχουν  $r_{2i} = 0$  για κάθε  $i = 1, 2, \dots, d$  και άρα είναι IFP.

Αυτό που πρέπει να τονιστεί εδώ είναι το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά της κίνησης, που προκύπτει από την υπέρθεση ανεξάρτητων Μαρκοβιανών μοντέλων και με την κίνηση Poisson, τείνουν ασυμπτωτικά προς τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της κίνησης που συντίθεται από τα πραγματικά δείγματα. Οι μεθοδολογίες προσέγγισης που χρησιμοποιούνται εδώ είναι βασισμένες

στα μοντέλα παλινδρόμησης, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στη θεωρία εκτίμησης για να προσεγγίσουν ένα τυχαίο φαινόμενο με απλές μορφές συναρτήσεων ή για να περιγράψουν το βαθμό συσχέτισης μεταξύ δύο ανεξάρτητων μεταβλητών. Η συνηθέστερα χρησιμοποιημένη μέθοδος παλινδρόμησης είναι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Least Square Fit) και είναι αυτή που έχει επιλεγεί για τη διαδικασία της προσέγγισης των δύο σταδίων του αλγορίθμου, ώστε να προσδιοριστούν οι κατάλληλες τιμές του συνόλου των τεσσάρων παραμέτρων καθεμιάς από τις ανεξάρτητες MMFP πηγές.

### 6.3.3. Επιλογή της κατάλληλης κλίμακας χρόνου παρατήρησης

Έχοντας παρουσιάσει ένα μοντέλο προσομοίωσης των χαρακτηριστικών αυτό-ομοιότητας της κίνησης IP, στην παράγραφο αυτή προσπαθούμε να δώσουμε μερικά συμπεράσματα για την επιλογή της κατάλληλης κλίμακας χρόνου για την παρατήρηση τέτοιων φαινομένων στα δίκτυα.

Η διαδικασία παρακολούθησης των δειγμάτων που παράγονται από την πραγματική κίνηση υπόκειται στην χρονική περίοδο, για την οποία συλλέγονται τα δείγματα. Η περίοδος αυτή είναι κρίσιμη, γιατί πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να μπορεί να συλλαμβάνει τα χαρακτηριστικά της κίνησης. Από την άλλη, το διάστημα παρακολούθησης πρέπει να είναι μικρό, ώστε να επιτρέπει την πραγματοποίηση μετρήσεων και της επεξεργασίας αυτών για την εκμετάλλευσή τους σε διαδικασίες πραγματικού χρόνου, όπως ο έλεγχος αποδοχής ροών. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η χρονική περίοδος παρακολούθησης των δειγμάτων συνδέεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου, πάνω από το οποίο διέρχεται η υπό εξέταση κίνηση [18].

Όπως δείχνουν τα αποτελέσματα στο [1], για το μοντέλο που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η εξέταση τεσσάρων με πέντε κλίμακες χρόνου αρκεί για τη μοντελοποίηση της εισερχόμενης στο δίκτυο κίνησης με την υπέρθεση τεσσάρων πηγών MMFP και μίας κίνησης Poisson. Αυτό σημαίνει ότι, ξεκινώντας από την ελάχιστη χρονική κλίμακα παρατήρησης, η οποία αντιστοιχεί στο επίπεδο πακέτου, μπορούμε να προσδιορίσουμε το διάστημα παρακολούθησης της κίνησης, ώστε να συλλάβουμε όλα τα χαρακτηριστικά της κίνησης, τα οποία και διαμορφώνουν τη συμπεριφορά της στο δίκτυο. Έτσι, για τις περιπτώσεις που θα εξετάσουμε στη συνέχεια, η παρακολούθηση της κίνησης πραγματοποιείται σε διαστήματα των 10-15 λεπτών της ώρας. Μία τέτοια επιλογή σαφώς καλύπτει την απαίτηση για την εξέταση των φαινομένων αυτό-ομοιότητας σε τουλάχιστον τέσσερις κλίμακες χρόνου, ενώ από την άλλη αποτελεί ένα λογικό διάστημα για την επεξεργασία των στατιστικών δεδομένων της κίνησης σε πραγματικό χρόνο.

Βέβαια, αυτή η κλίμακα χρόνου παρατήρησης εξαρτάται και από την ύπαρξη άλλων ανεξάρτητων ροών κίνησης, όπως και από τα ιδιαίτερα γνωρίσματα του ασύρματου μέσου, που καλείται να την εξυπηρετήσει. Πάντως, το θέμα της επιλογής της κατάλληλης κλίμακας χρόνου για την παρατήρηση των δεδομένων της κίνησης αποτελεί ένα μεγάλο ανοιχτό θέμα για την ερευνητική κοινότητα. Πολλές προσπάθειες έχουν καταγραφεί για τον προσδιορισμό τέτοιων περιόδων χρόνου, όπως στα [6][19]. Όπως θα δούμε και σε επόμενο κεφάλαιο, το εκτιμώμενο

διάστημα παρακολούθησης της κίνησης μπορεί να προκύψει από την εκμετάλλευση των ρυθμών άφιξης και αναχώρησης ροών από το υπό εξέταση σύστημα.

## **6.4. Αποτελέσματα**

Έχοντας παρουσιάσει το βελτιωμένο μοντέλο Adv για την προσομοίωση των χαρακτηριστικών αυτό-ομοιότητας της κίνησης, στην παράγραφο αυτή, παραθέτουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του για την μελέτη της ουράς αναμονής ενός δικτύου.

### **6.4.1. Επίδραση των παραμέτρων προσέγγισης της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας**

Οι παράμετροι που επιδρούν στη διαδικασία προσέγγισης της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας με μοντέλα MMFP είναι η μέτρηση της τιμής της Hurst παραμέτρου  $H$ , η κατάλληλη επιλογή του αριθμού των υπερτιθέμενων MMFP πηγών, η ομοιογένεια των ανεξάρτητων ροών που πολυπλέκονται μέσα από το ίδιο στοιχείο δικτύου, καθώς και ο αριθμός των ανεξάρτητων ροών που συνθέτουν τη συνολική κίνηση. Στην παράγραφο αυτή, μελετάμε την επίδραση αυτών των παραμέτρων στη διαδικασία προσέγγισης της κίνησης αυτής και, κατά συνέπεια, στην επίδοση των υποκείμενων δικτύων.

#### **6.4.1.1. Επίδραση της Hurst παραμέτρου**

Όπως φαίνεται από την περιγραφή του αλγορίθμου προσέγγισης της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας που παρατέθηκε στο Σχήμα 6-2, μια παράμετρος που επηρεάζει την συμπεριφορά των αποτελεσμάτων είναι ο υπολογισμός της Hurst παραμέτρου για την εκτίμηση του βαθμού αυτό-ομοιότητας της κίνησης. Όπως, ήδη, έχει αναφερθεί στην παράγραφο 5.6.2, η παράμετρος  $H$  μπορεί να μετρηθεί με ένα σύνολο μεθόδων, καθεμιά από τις οποίες μπορεί να δώσει ένα συγκεκριμένο βαθμό απόκλισης στη μετρούμενη τιμή του  $H$ . Μια μελέτη σχετικά με τις αποκλίσεις που παρουσιάζονται μεταξύ των διαφόρων αυτών μεθόδων σε ένα δίκτυο GPRS παρουσιάζεται στο [20]. Έτσι, στην παράγραφο αυτή μελετάμε την επίδραση του σφάλματος από τον υπολογισμό του  $H$  στη συμπεριφορά της ουράς αναμονής του κόμβου δικτύου που φιλοξενεί την υπό μελέτη κίνηση IP.

Προς τον σκοπό αυτό, θεωρούμε τη χρονική ακολουθία των δειγμάτων που προκύπτει από τη συγκέντρωση της συνολικής κίνησης στον κόμβο δικτύου, ο οποίος έστω ότι παρουσιάζει μέγιστη χωρητικότητα της τάξης του 1Mbps. Έστω, ότι η συνολική κίνηση παρουσιάζει ένα μέσο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων  $\bar{r} = 800kbps$  και μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων  $r_{peak} = 1.2Mbps$ . Χρησιμοποιούμε τη μέθοδο Variance για τον υπολογισμό της αυτό-ομοιότητας της κίνησης αυτής, η οποία δίνει μια τιμή  $H=0.65$ . Η κίνηση αυτή προκαλεί την υπερχειλίση του ταμιευτήρα του κόμβου του δικτύου. Αναλύουμε τα λαμβανόμενα δείγματα και υπολογίζουμε τις παραμέτρους του μοντέλου για κάθε μία πηγή IFP.

Όπως παρατηρείται από εμπειρικές μετρήσεις του  $H$  σε διάφορες χρονικές ακολουθίες δειγμάτων, οι διάφορες μέθοδοι υπολογισμού του  $H$  έχουν μια απόκλιση, η οποία μπορεί να οφείλεται σε πολλούς λόγους. Η απόκλιση αυτή συνήθως δεν ξεπερνά τη μισή μονάδα (0.5) [20]. Έτσι, εδώ, θεωρούμε ότι το  $H$  κυμαίνεται από 0.6 έως 0.7 και βλέπουμε πώς μεταβάλλεται θεωρητικά η καμπύλη της πιθανότητας υπερχειλίσης του ταμιευτήρα. Σε κάθε περίπτωση, υπολογίζουμε τις παραμέτρους των IFP πηγών. Αυτές συμβολίζονται με  $\lambda_{on/off}$  για τον ρυθμό άφιξης στην ενεργό ON περίοδο,  $\mu_{on}$  και  $\mu_{off}$  για τους ρυθμούς μετάβασης στην ON και OFF περίοδο αντίστοιχα και  $\lambda_{Poisson}$  το ρυθμό άφιξης πακέτων από τη διαδικασία Poisson. Οι τιμές των IFP παραμέτρων για  $H=0.6$ , 0.65 και 0.7 φαίνονται, αντίστοιχα, στους Πίνακες 6-1, Πίνακας 6-2 και Πίνακας 6-3.

**Πίνακας 6-1. Παράμετροι των υπερτιθέμενων IFP πηγών για  $H=0.6$**

| D                       | $\lambda_{on/off}$ (packets/10ms) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|-------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|
| 1                       | 16.6287                           | 0.16627    | 0.073733    |
| 2                       | 3.584                             | 0.0035821  | 0.0015885   |
| 3                       | 0.76804                           | 7.7174e-5  | 3.4224e-5   |
| 4                       | 0.17674                           | 1.6627e-6  | 7.3733e-7   |
| $\lambda_{Poisson} = 0$ |                                   |            |             |

**Πίνακας 6-2. Παράμετροι των υπερτιθέμενων IFP πηγών για  $H=0.65$**

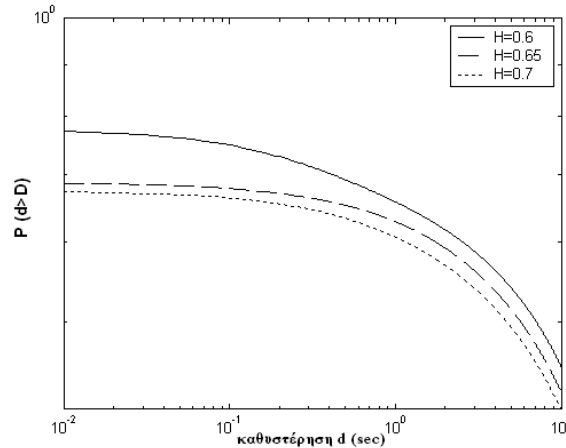
| D                       | $\lambda_{on/off}$ (packets/10ms) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|-------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|
| 1                       | 14.867                            | 0.16217    | 0.077829    |
| 2                       | 3.886                             | 0.0034939  | 0.0016768   |
| 3                       | 1.002                             | 7.5273e-5  | 3.6125e-5   |
| 4                       | 0.289                             | 1.6217e-6  | 7.7829e-7   |
| $\lambda_{Poisson} = 0$ |                                   |            |             |

**Πίνακας 6-3. Παράμετροι των υπερτιθέμενων IFP πηγών για  $H=0.7$**

| D                       | $\lambda_{on/off}$ (packets/10ms) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|-------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|
| 1                       | 12.938                            | 0.14385    | 0.076155    |
| 2                       | 4.110                             | 0.003099   | 0.0016407   |
| 3                       | 1.263                             | 6.6767e-5  | 3.5348e-5   |
| 4                       | 0.466                             | 1.4385e-6  | 7.6155e-7   |
| $\lambda_{Poisson} = 0$ |                                   |            |             |

Όπως φαίνεται και από τους πίνακες αυτούς, η διαφορά στον υπολογισμό της Hurst παραμέτρου επιδρά, κυρίως, στις τιμές των ρυθμών μετάδοσης για κάθε πηγή IFP. Όσο μεγαλύτερη προκύπτει η τιμή του  $H$ , τόσο περισσότερο ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μοιράζεται μεταξύ των IFP πηγών. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ως αύξηση της επιρροής των ανεξάρτητων IFP πηγών στη συνολική κίνηση για μεγάλες κλίμακες χρόνου και τη δημιουργία περισσότερο

εκρηκτικής κίνησης με χαρακτηριστικά LRD από τη σύνθεση των ανεξάρτητων πηγών. Αυτό συμβαίνει, γιατί οι πηγές που αντιστοιχούν σε μεγάλα  $D$ , όπου  $D$  είναι ο αύξων αριθμός της IFP πηγής, είναι εκείνες, που επιδρούν σημαντικά στη συνολική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και όσο πιο «ισχυρές» είναι τόσο πιο έντονα τα φαινόμενα LRD.



**Σχήμα 6-3. Πιθανότητα υπέρβασης του ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα σαν συνάρτηση της καθυστέρησης για τις διάφορες τιμές του  $H$**

Το Σχήμα 6-3 δείχνει τη μεταβολή της καμπύλης της ουράς αναμονής, δηλαδή την πιθανότητα υπερχείλισης του ταμιευτήρα, συναρτήσει της καθυστέρησης που επιτυγχάνεται μέσα στον ταμιευτήρα για τις παραπάνω τιμές του  $H$ . Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό, για δεδομένες τιμές των χαρακτηριστικών κίνησης, που προκύπτουν από την παρακολούθησή της σε διάφορες χρονικές περιόδους, η υποτίμηση ή αντίστοιχα η υπερτίμηση της τιμής του  $H$  οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα για την ποιοτική συμπεριφορά της κίνησης. Έτσι, για συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας της κίνησης, η παράμετρος  $H$  που διαμορφώνεται από την ίδια την κίνηση, όταν αυτή υπερτεθεί στον ίδιο κόμβο δικτύου με άλλες κινήσεις, επηρεάζει την πιθανότητα καθυστέρησης στον ταμιευτήρα του κόμβου. Μια απόκλιση της τάξης του 14% στον υπολογισμό του  $H$ , η οποία αντιστοιχεί σε μέγιστη απόκλιση μίας μονάδας, οδηγεί σε κατακόρυφη μετατόπιση της καμπύλης της πιθανότητας υπερχείλισης κατά σχεδόν ενός δεκάτου της τάξης μεγέθους. Αυτό είναι λογικό, καθώς η μεταβολή του  $H$  σημαίνει και αλλαγή των χαρακτηριστικών μεγεθών κίνησης.

Αντιθέτως, είναι φανερό ότι μια αντίστοιχη εκλογή λαθεμένης τιμής του  $H$  με απόκλιση από την πραγματική κατά 5%, η οποία αντιστοιχεί σε 0.25 μονάδες της τιμής του  $H$  (υπενθυμίζουμε ότι  $0.5 \leq H \leq 1$ ), δεν αλλάζει δραστικά τη συμπεριφορά της κίνησης εντός του ταμιευτήρα. Το σημαντικότερο είναι ότι η μορφή της καμπύλης δεν αλλάζει, αλλά μετατοπίζεται κατακόρυφα με ρυθμό ενός δεκάτου τάξης μεγέθους ανά μονάδα τιμής του  $H$ . Πάντως, μία απόκλιση στον υπολογισμό του  $H$  θεωρείται δεδομένη και αυτή οφείλεται στο λάθος που επεισέχρεται από τις ίδιες τις μετρήσεις.

#### 6.4.1.2. Επίδραση του αριθμού των υπερτιθέμενων IFP πηγών

Στην ενότητα αυτή αναλύουμε την συμπεριφορά του αλγορίθμου προσέγγισης της κίνησης, εάν επέμβουμε στον αριθμό των υπερτιθέμενων IFP πηγών. Όπως θα φανεί παρακάτω, για τους σκοπούς αυτής της εργασίας κάνουμε χρήση των συμπερασμάτων που προκύπτουν από το [1], όπου αποδεικνύεται ότι η υπέρθεση τεσσάρων πηγών IFP, μαζί με μία κίνηση Poisson, αρκεί για την περιγραφή της κίνησης IP. Εντούτοις, παραθέτουμε ένα απλό παράδειγμα χρήσης του αλγορίθμου που πιστοποιεί την καταλληλότητα στην επιλογή αυτού του αριθμού.

Υποθέτουμε πάλι ότι μία ροή IP φορτίζει ένα κόμβο δικτύου χωρητικότητας 1Mbps. Σκοπός μας είναι να δείξουμε τη μεταβολή στη μορφή της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης, η οποία οφείλεται στην αλλαγή του αριθμού των IFP υπερτιθέμενων πηγών. Έτσι, επιλέγουμε να εκτελέσουμε τη διαδικασία προσέγγισης τρεις φορές. Σε κάθε μία περίπτωση, χρησιμοποιούμε αντίστοιχα τρεις, τέσσερις και πέντε IFP υπερτιθέμενες πηγές. Οι τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για τις περιπτώσεις αυτές φαίνονται στους Πίνακες 6-4, Πίνακας 6-5 και Πίνακας 6-6.

**Πίνακας 6-4. Παράμετροι των υπερτιθέμενων IFP πηγών για D=3**

| D                            | $\lambda_{on/off}$ (packets/10ms) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|------------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|
| 1                            | 13.0729                           | 0.14       | 0.06        |
| 2                            | 1.7420                            | 4.4272e-4  | 1.8974e-4   |
| 3                            | 0.2381                            | 1.4e-6     | 6e-7        |
| $\lambda_{Poisson} = 8.4841$ |                                   |            |             |

**Πίνακας 6-5. Παράμετροι των υπερτιθέμενων IFP πηγών για D=4**

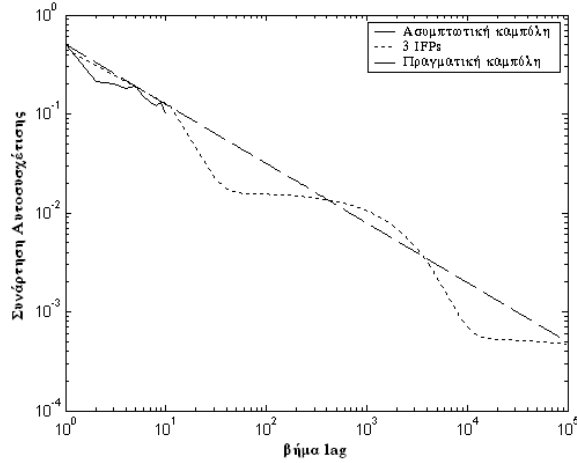
| D                            | $\lambda_{on/off}$ (packets/10ms) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|------------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|
| 1                            | 12.6058                           | 0.14       | 0.06        |
| 2                            | 3.2947                            | 0.0030162  | 0.0012927   |
| 3                            | 0.8495                            | 6.4982e-5  | 2.785e-5    |
| 4                            | 0.2451                            | 1.4e-6     | 6e-7        |
| $\lambda_{Poisson} = 7.9014$ |                                   |            |             |

**Πίνακας 6-6. Παράμετροι των υπερτιθέμενων IFP πηγών για D=5**

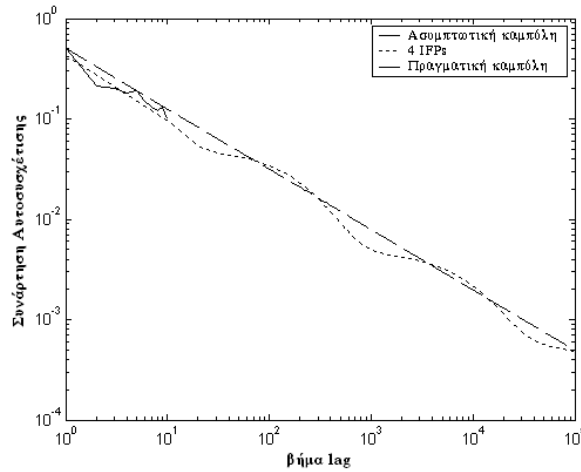
| D                            | $\lambda_{on/off}$ (packets/10ms) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|------------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|
| 1                            | 14.0389                           | 0.28       | 0.12        |
| 2                            | 5.1170                            | 0.015746   | 0.0067481   |
| 3                            | 1.8864                            | 8.8544e-4  | 3.7947e-4   |
| 4                            | 0.6552                            | 4.9792e-5  | 2.1339e-5   |
| 5                            | 0.2951                            | 2.8e-6     | 1.2e-6      |
| $\lambda_{Poisson} = 6.4022$ |                                   |            |             |

Στο Σχήμα 6-4 έχει σχεδιαστεί η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης για τις περιπτώσεις υπερτιθέμενων πηγών που εξετάζουμε. Πιο συγκεκριμένα, το Σχήμα 6-4α παρουσιάζει τη συνάρτηση

αυτοσυσχέτισης που προκύπτει από την υπέρθεση τριών ανεξάρτητων IFP πηγών, το Σχήμα 6-4β παρουσιάζει τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης που προκύπτει από την υπέρθεση τεσσάρων ανεξάρτητων IFP πηγών και το Σχήμα 6-4γ παρουσιάζει τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης που προκύπτει από την υπέρθεση πέντε ανεξάρτητων IFP πηγών. Σε κάθε σχήμα έχει, επίσης, σχεδιαστεί η συνάρτηση που προκύπτει από την επεξεργασία των πραγματικών δειγμάτων (συνεχής γραμμή), όπως και η ασυμπτωτική καμπύλη  $r(k) = \rho k^{-\beta}$ , η οποία χρησιμοποιείται σαν βάση για την προσέγγιση της IP κίνησης με υπερτιθέμενες IFP πηγές.

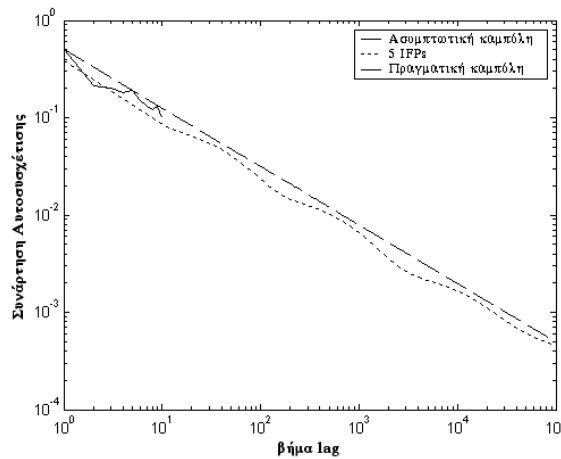


(α)



(β)



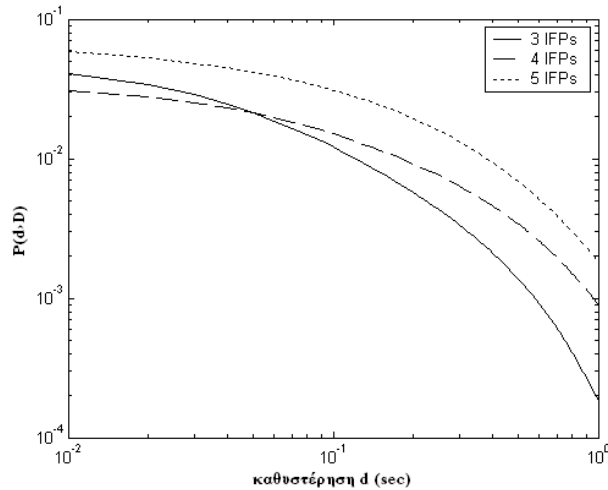


(γ)

**Σχήμα 6-4. Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της ακολουθίας των δειγμάτων της ροής IP για α) τρεις, β) τέσσερις και γ) πέντε υπερτιθέμενες IFP πηγές**

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6-4, η ασυμπτωτική καμπύλη  $r(k) = r_0 k^{-\beta}$  προσεγγίζεται ικανοποιητικά στην περίπτωση των τεσσάρων IFP πηγών για όλα τα lags. Αντιθέτως, στις άλλες δύο περιπτώσεις, η προσέγγιση δεν είναι τόσο καλή. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των τριών IFP πηγών, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση, η οποία είναι περισσότερο έντονη σε μεγάλα lags, οπότε τα χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας της κίνησης δεν μπορούν να συλληφθούν ικανοποιητικά, ενώ, στην περίπτωση των πέντε IFP πηγών, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης φαίνεται να «αγκαλιάζει» περισσότερο τη μέση τιμή της (δηλαδή παρουσιάζει μικρότερες σε μέγεθος διακυμάνσεις σε σχέση με την περίπτωση των τεσσάρων IFP πηγών), αλλά αποκλίνει από την ασυμπτωτική καμπύλη  $r(k) = r_0 k^{-\beta}$ . Εδώ, πρέπει να σημειώσουμε και το γεγονός της ανάγκης για περιορισμό του αριθμού των ενεργών IFP πηγών, καθώς όσο αυτός αυξάνεται, μεγαλώνει ο υπολογιστικός χρόνος και η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου.

Τελειώνουμε τις παρατηρήσεις μας σχετικά με την επίδραση του αριθμού των IFP πηγών με τη σχεδίαση της πιθανότητας υπερχείλισης του ταμιευτήρα του κόμβου δικτύου για τις τρεις αυτές περιπτώσεις. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 6-5, από το οποίο παρατηρούμε μια απόκλιση των υπολογιζόμενων καμπυλών, που, προφανώς οφείλεται στις προκύπτουσες από τον αλγόριθμο προσέγγισης τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών. Πάντως, η απόκλιση αυτή είναι μικρή, ειδικά στην περίπτωση των καμπυλών για τις τέσσερις και πέντε IFP πηγές. Σημειώνουμε, ότι για την περίπτωση των τριών IFP πηγών, η καμπύλη με την πιθανότητα υπερχείλισης του ταμιευτήρα φθίνει πιο γρήγορα σε σχέση με τις άλλες δύο, πράγμα το οποίο μπορεί να δικαιολογήσει και την προηγούμενη παρατήρησή μας ότι για τρεις IFP πηγές τα χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας της κίνησης δεν μπορούν να συλληφθούν ικανοποιητικά, οπότε και η ουρά φθίνει γρήγορα.



**Σχήμα 6-5. Πιθανότητα υπέρβασης του ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα σαν συνάρτηση της καθυστέρησης ανάλογα με τον αριθμό των υπερτιθέμενων IFP πηγών**

#### 6.4.1.3. Επίδραση της ομοιογένειας και του αριθμού των πηγών

Η παράγραφος αυτή αναλύει την επίδραση του βαθμού ομοιογένειας των πηγών στην συμπεριφορά της συνολικής κίνησης μέσα σε ένα ταμιευτήρα δικτύου. Προς το σκοπό αυτό, πραγματοποιούμε τα ακόλουθα πειράματα. Αρχικά, παρατηρούμε πως μεταβάλλεται η καμπύλη της πιθανότητας υπερχείλισης του ταμιευτήρα σε σχέση με τον αριθμό των ομοιογενών πηγών που πολυπλέκονται μέσα στον ταμιευτήρα. Στην συνέχεια, μεταβάλλουμε το μίγμα της κίνησης και εισάγουμε μία δεύτερη κατηγορία κίνησης με διαφορετικά χαρακτηριστικά από την πρώτη. Σε κάθε περίπτωση, φροντίζουμε ώστε η συνολική κίνηση να διατηρεί κατά το δυνατόν τα χαρακτηριστικά τουλάχιστον της πρώτης τάξης, δηλαδή το μέσο ρυθμό που εισάγεται στο δίκτυο.

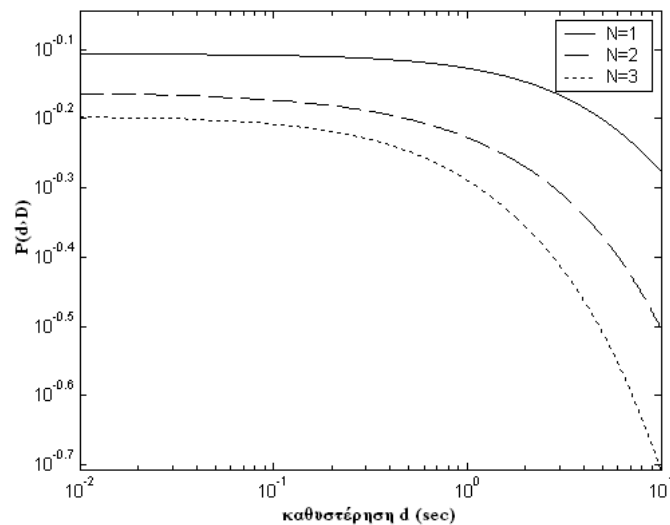
Θεωρούμε τη χρονική ακολουθία των δειγμάτων που προκύπτει από τη συγκέντρωση της συνολικής κίνησης στον κόμβο ενός δικτύου μέγιστης χωρητικότητας 1Mbps. Η συνολική κίνηση παρουσιάζει ένα μέσο ρυθμό  $\bar{r} = 800kbps$  και μέγιστο  $r_{peak} = 1.2Mbps$ , ενώ η μέθοδος Variance για τον υπολογισμό της αυτό-ομοιότητας, δίνει μια τιμή  $H=0.65$ . Η κίνηση αυτή προκαλεί την υπερχείλιση του ταμιευτήρα του κόμβου του δικτύου. Αναλύουμε τα λαμβανόμενα δείγματα και υπολογίζουμε τις παραμέτρους του μοντέλου μας για κάθε μία πηγή IFP.

Ο Πίνακας 6-7 περιγράφει τα χαρακτηριστικά της συνολικής κίνησης. Για τους σκοπούς μας, θεωρούμε ότι η κίνηση αυτή μπορεί να παραχθεί από  $N=1, 2$  και  $3$  ομοιογενείς πηγές, οπότε, λόγω της αθροιστικής ιδιότητας, οι ρυθμοί  $\lambda_{on/off}$  ανά IFP πηγή διαμορφώνονται ανάλογα. Για τις περιπτώσεις αυτές, σχεδιάζουμε την πιθανότητα υπερχείλισης του ταμιευτήρα, συναρτήσει της τιμής της καθυστέρησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-6. Εκεί παρατηρούμε ότι η αύξηση του αριθμού των πολυπλεκόμενων ομοιογενών πηγών οδηγεί σε βελτίωση της χρησιμοποίησης του

δικτύου, καθώς γίνεται εκμετάλλευση της στατιστικής πολυπλεξίας. Παρατηρούμε ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των χαρακτηριστικών της μίας πηγής τόσο η πολυπλεξία που επιτυγχάνεται αυξάνει. Τα συμπεράσματα αυτά είναι βέβαια γνωστά από τα ενσύρματα δίκτυα, όμως, εκείνο που πρέπει να τονιστεί εδώ είναι το γεγονός ότι με την αύξηση του αριθμού των πολυπλεκόμενων πηγών, το διαθέσιμο εύρος ζώνης συνεχώς μειώνεται, το οποίο οφείλεται στην αυξανόμενη παρεμβολή των ασύρματων σταθμών, και έτσι το κέρδος στατιστικής πολυπλεξίας περιορίζεται σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα. Αυτό θα φανεί στις επόμενες παραγράφους, όπου και το διαθέσιμο εύρος ζώνης μεταβάλλεται με τη μεταβολή του αριθμού των χρηστών στο ασύρματο δίκτυο.

**Πίνακας 6-7. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για την συνολική κίνηση**

| D                       | $\lambda_{on/off}$ (packets/10ms) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|-------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|
| 1                       | 14.867                            | 0.16217    | 0.077829    |
| 2                       | 3.886                             | 0.0034939  | 0.0016768   |
| 3                       | 1.002                             | 7.5273e-5  | 3.6125e-5   |
| 4                       | 0.289                             | 1.6217e-6  | 7.7829e-7   |
| $\lambda_{Poisson} = 0$ |                                   |            |             |

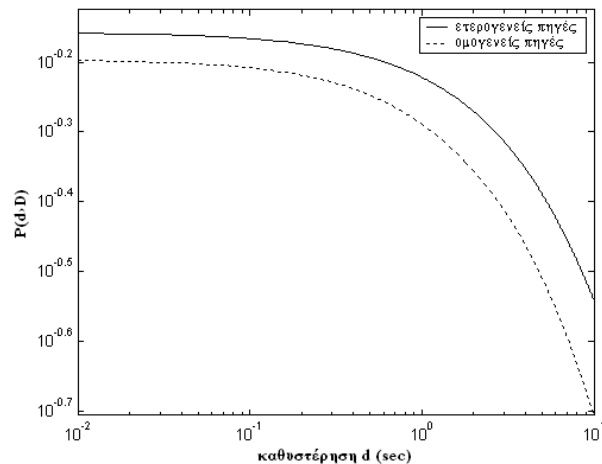


**Σχήμα 6-6. Πιθανότητα υπέρβασης του ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα σαν συνάρτηση της καθυστέρησης ανάλογα με τον αριθμό των πολυπλεκόμενων πηγών**

Προχωράμε τώρα στην περίπτωση της υπέρθεσης διαφορετικού τύπου πηγών, τα οποία συναγωνίζονται για τη λήψη πόρων στον ίδιο κόμβο δικτύου. Και πάλι υποθέτουμε ότι βρισκόμαστε σε κατάσταση κορεσμού, οπότε ο ταμιευτήρας του κόμβου αρχίζει να υπερχειλίζει. Τώρα, η συνολική κίνηση των 800kbps, αναλύεται σε δύο είδη πηγών. Έτσι, τα χαρακτηριστικά που περιγράφει ο Πίνακας 6-7 μοιράζονται σε δύο κατηγορίες ροών, εκ των οποίων η πρώτη έχει 2 ροές και η δεύτερη μία. Υποθέτουμε ότι η διαφορά των πηγών οφείλεται μόνο στο ρυθμό

μετάδοσης, οπότε, με τον τρόπο αυτό, αποφεύγουμε προβλήματα εισαγωγής σφαλμάτων στα αποτελέσματά μας λόγω διαφοράς της τιμής του  $H$  ή της διάρκειας των περιόδων ON και OFF. Συνεπώς, καθεμία από τις 2 ροές της πρώτης κατηγορίας μεταδίδει με ρυθμό 160kbps, ενώ ο αντίστοιχος ρυθμός μετάδοσης για την ροή της δεύτερης κατηγορίας είναι 480kbps.

Το Σχήμα 6-7 δίνει την πιθανότητα υπερχείλισης του ταμιευτήρα υπό τη φόρτιση ομοιογενούς και ετερογενούς κίνησης, με την προϋπόθεση ότι ο συνολικός αριθμός πηγών, όπως και τα χαρακτηριστικά μέσου ρυθμού της συνολικής κίνησης διατηρούνται σταθερά. Αυτό σημαίνει ότι και στις δύο περιπτώσεις η συνολική κίνηση που εισέρχεται στον ταμιευτήρα έχει ένα μέσο ρυθμό 800kbps, ενώ για την περίπτωση της καμπύλης που αντιστοιχεί στις ομοιογενείς πηγές (γραμμή με τελείες), οι πηγές που πολυπλέκονται είναι τρεις, όσες και οι πηγές για την περίπτωση της ανομοιογένειας (δύο από την πρώτη κατηγορία και μία από τη δεύτερη). Παρατηρώντας το σχήμα αυτό, συμπεραίνουμε ότι η υπέρθεση ετερογενών πηγών οδηγεί σε αύξηση της χρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου, όταν ο συνολικός αριθμός των πολυπλεκόμενων πηγών διατηρείται σταθερός. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ξεχωριστά χαρακτηριστικά των πηγών οδηγούν σε αύξηση της ανομοιογένειας στον ταμιευτήρα, με αποτέλεσμα η ουρά του συστήματος αναμονής να διατηρείται σε υψηλότερες τιμές πιθανότητας, σε σχέση με την περίπτωση των ομοιογενών πηγών.



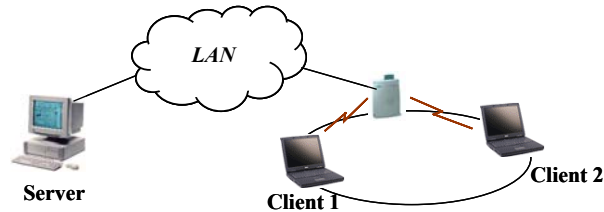
**Σχήμα 6-7. Πιθανότητα υπέρβασης του ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα σαν συνάρτηση της καθυστέρησης για διαφορετικό βαθμό ομοιογένειας των πολυπλεκόμενων πηγών**

## 6.4.2. Πειράματα

### 6.4.2.1. Διαδικασία πειραμάτων

Η παράγραφος αυτή περιγράφει τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και τη λήψη των απαραίτητων αποτελεσμάτων. Η πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε, όπως και η αντίστοιχη τοπολογία δικτύου, φαίνεται στο Σχήμα 6-8. Όπως φαίνεται εκεί, η

πλατφόρμα αποτελείται από δύο τερματικά *Client 1* και *Client 2* με ασύρματη σύνδεση μέσω ενός δικτύου WLAN. Το δίκτυο αυτό είναι συνδεδεμένο στο τοπικό IP δίκτυο LAN. Για την περιγραφή της διαθέσιμης χωρητικότητας του δικτύου WLAN, χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα του [21] και των παραγράφων 3.6 και 3.7 του κεφαλαίου 3. Επίσης, θεωρούμε έναν εξυπηρετητή *Server*, ο οποίος παρέχει διαφόρων ειδών υπηρεσίες στα ασύρματα τερματικά. Για να έχουν μια γενικότερη ισχύ τα πειράματά μας, οι υπηρεσίες αυτές στηρίζονται και στα δύο συνήθη πρωτόκολλα μεταφοράς TCP και UDP. Στη συνέχεια, αναφερόμαστε στις υπηρεσίες αυτές ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο σαν *Serv1* και *Serv2* αντίστοιχα.



**Σχήμα 6-8. Πλατφόρμα και τοπολογία δικτύου για τη διεξαγωγή πειραμάτων**

Η πρώτη υπηρεσία *Serv1* στηρίζεται στο πρωτόκολλο TCP και αναφέρεται σε πολλαπλές συνδέσεις μεταφοράς αρχείων, μέσω του πρωτοκόλλου FTP, από τον εξυπηρετητή προς τους ασύρματους χρήστες. Η κίνηση αυτή μπορεί να παραχθεί μέσω ενός προγράμματος, το οποίο είναι διαθέσιμο στο διαδίκτυο και ονομάζεται Self-similar Network Traffic Generator (ssgenerator) [22]. Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να εξομοιώσει έναν αριθμό συνδέσεων μεταφοράς αρχείων από ένα τερματικό, βάσει μιας συγκεκριμένης κατανομής για το μέγεθος των πακέτων που παράγονται και του χρόνου αποστολής διαδοχικών πακέτων. Έτσι, το μέγεθος των παραγόμενων πακέτων ακολουθεί την κατανομή Pareto, η οποία χαρακτηρίζεται από 2 παραμέτρους  $a$  και  $b$ . Ο χρόνος άφιξης διαδοχικών πακέτων ακολουθεί την εκθετική κατανομή και, συνεπώς, χαρακτηρίζεται από την τιμή μιας μόνο παραμέτρου  $\mu$ . Με την κατάλληλη επιλογή τιμών για όλες αυτές τις παραμέτρους μπορούμε να επιτύχουμε τη δημιουργία διαφόρων διαμορφώσεων της υπηρεσίας *Serv1*.

Η δεύτερη υπηρεσία *Serv2* που χρησιμοποιείται στα πειράματα αυτά βασίζεται στο πρωτόκολλο UDP και αφορά στη μεταφορά πραγματικού χρόνου βίντεο, μέσω του πρωτοκόλλου RTP, από τον εξυπηρετητή στους χρήστες (video streaming). Για το σκοπό αυτό, έχει χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα Video-LAN, το οποίο είναι, επίσης, διαθέσιμο στο διαδίκτυο [23]. Το πρόγραμμα αυτό λαμβάνει σαν είσοδο ένα αρχείο ή μία πηγή βίντεο, το οποίο έχει κωδικοποιηθεί κατά κάποιο πρότυπο, όπως το MPEG-4, και με την κατάλληλη διαμόρφωση των παραμέτρων του προγράμματος μπορεί να το στείλει σε συγκεκριμένες IP διευθύνσεις.

Ο σκοπός των πειραμάτων που διεξήχθησαν είναι η αποτίμηση της επίδοσης του δικτύου WLAN, υπό τη φόρτιση συνδυασμών των προαναφερθέντων υπηρεσιών με συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας. Η επίδοση αφορά στην αξιολόγηση των μηχανισμών αποδοχής ροών, οι οποίοι θα πρέπει να λειτουργούν σε ένα τέτοιο δίκτυο για να παρέχουν τη ζητούμενη ποιότητα

στους χρήστες. Μια σημαντική διαδικασία που πρέπει να εκτελείται για το σκοπό αυτό είναι η παρακολούθηση της κίνησης που παράγεται στον αποστολέα και τελικά καταφθάνει στον παραλήπτη. Η παρακολούθηση αφορά στην εκτίμηση του ρυθμού μετάδοσης πακέτων και την καθυστέρηση που υφίστανται τα πακέτα κατά τη μεταφορά τους μέσα από το δίκτυο.

Προς αυτήν την κατεύθυνση, ένα ιδιαίτερα δημοφιλές εργαλείο παρακολούθησης της κίνησης έχει χρησιμοποιηθεί, το οποίο ονομάζεται windump και είναι ελεύθερα διαθέσιμο στο διαδίκτυο [24], σε εκδόσεις τόσο για το λειτουργικό σύστημα Windows όσο και για Linux. Το πρόγραμμα αυτό παρακολουθεί τις διεπαφές δικτύου και καταγράφει τα πακέτα που διέρχονται από αυτές. Επίσης, διαθέτει ένα σύνολο εντολών για το φιλτράρισμα των εισερχόμενων πακέτων, ώστε μόνο αυτά που συμμορφώνονται με τις εντολές του προγράμματος να καταγράφονται και, κατ' απαίτηση, να αποθηκεύονται σε αρχεία για παραπέρα επεξεργασία.

Το Σχήμα 6-9 δείχνει ένα αρχείο κειμένου, το οποίο παράγεται από το windump. Κάθε γραμμή αναφέρεται σε ένα πακέτο που καταφθάνει στη διεπαφή της κάρτας δικτύου. Το πρώτο πεδίο είναι ο χρόνος που εκπέμψαμε ή λάβαμε το πακέτο. Στο δεύτερο πεδίο αναφέρονται κάποια χαρακτηριστικά του πακέτου, όπως time-to-live, αριθμός ID, μήκος πακέτου μαζί με επικεφαλίδες. Το επόμενο πεδίο είναι η θύρα του αποστολέα, από την οποία ξεκινά το κάθε πακέτο, ενώ το αμέσως επόμενο πεδίο είναι η θύρα του παραλήπτη, στην οποία φθάνει το κάθε πακέτο. Τέλος, το τελευταίο πεδίο είναι το μέγεθος των δεδομένων που περιλαμβάνει το κάθε πακέτο (στην περίπτωση του σχήματος έχουμε πακέτα RTP/UDP).

```
1101292504.596744 IP (tos 0x0, ttl 128, id 41572, offset 0, flags [none], length: 1356) vtounto.1830 > 147.102.39.15.1234: UDP,
length: 1328
1101292504.604524 IP (tos 0x0, ttl 128, id 41573, offset 0, flags [none], length: 1356) vtounto.1830 > 147.102.39.15.1234: UDP,
length: 1328
1101292504.606527 IP (tos 0x0, ttl 128, id 41574, offset 0, flags [none], length: 1356) vtounto.1830 > 147.102.39.15.1234: UDP,
length: 1328
1101292504.617229 IP (tos 0x0, ttl 128, id 41575, offset 0, flags [none], length: 1356) vtounto.1830 > 147.102.39.15.1234: UDP,
length: 1328
1101292504.637749 IP (tos 0x0, ttl 128, id 41576, offset 0, flags [none], length: 1356) vtounto.1830 > 147.102.39.15.1234: UDP,
length: 1328
1101292504.637928 IP (tos 0x0, ttl 128, id 41577, offset 0, flags [none], length: 1356) vtounto.1830 > 147.102.39.15.1234: UDP,
length: 1328
```

#### **Σχήμα 6-9. Παράδειγμα αρχείου κειμένου με τη διαθέσιμη από το πρόγραμμα windump πληροφορία**

Τέτοιου είδους αρχεία χρησιμοποιήθηκαν για να εξάγουμε όλα τα απαραίτητα αποτελέσματα για την κίνηση που παρατηρείται στις διεπαφές δικτύου της πλατφόρμας μας. Η επεξεργασία αυτή αφορά στον υπολογισμό του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης πακέτων από τον εξυπηρετητή, της διέλευσης που επιτυγχάνεται στον παραλήπτη, της καθυστέρησης που υφίστανται τα πακέτα κατά την μεταφορά και τον ρυθμό απώλειας πακέτων στο δίκτυο. Εδώ, πρέπει να τονιστεί ότι εστιάζουμε μόνο στην καθυστέρηση, η οποία οφείλεται στην αποθήκευση των πακέτων στον ταμιευτήρα του δικτυακού κόμβου, ενώ η καθυστέρηση μετάδοσης, λόγω του ασύρματου μέσου (propagation delay), θεωρείται ότι είναι αμελητέα.

Για την επεξεργασία των παραγόμενων αρχείων, χρησιμοποιήθηκε λογισμικό που έχει αναπτυχθεί με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού Perl, η οποία παρέχει πολλές ευκολίες σε σχέση με την επεξεργασία και την ανάλυση δεδομένων (parsing), και του προγραμματιστικού πακέτου Tk [25]. Με τη βοήθεια αυτού του προγράμματος, ο χρήστης επιλέγει το μέγεθος του χρονικού παραθύρου δειγματοληψίας που επιθυμεί. Τα πακέτα που βρίσκονται εντός αυτού του παραθύρου, αναλύονται από το πρόγραμμα και υπολογίζεται ο μέσος ρυθμός διέλευσης.

Για τον υπολογισμό της καθυστέρησης και των χαμένων πακέτων χρησιμοποιήθηκε και πάλι η γλώσσα προγραμματισμού Perl. Για να υπολογίσουμε την καθυστέρηση του κάθε πακέτου, υπολογίσαμε την διαφορά των χρόνων αποστολής του πακέτου από τον εξυπηρετητή και λήψης του πακέτου από τον παραλήπτη, αναλύοντας τα αρχεία που προέκυψαν από το πρόγραμμα windump. Επειδή είναι προγραμματιστικά επώδυνο, όσο και ανώφελο, να υπολογιστεί η καθυστέρηση για κάθε πακέτο, ο υπολογισμός αυτός έγινε με βάση ένα μικρό παράθυρο δειγματοληψίας. Επίσης, λάβαμε υπόψη το γεγονός ότι οι απόλυτοι χρόνοι των μηχανημάτων που χρησιμοποιήθηκαν δεν ήταν συγχρονισμένοι, οπότε έπρεπε να γίνει μια εκτίμηση της καθυστέρησης με βάση σχετικούς χρόνους.

Τέλος, ένα ακόμα ελεύθερα διαθέσιμο πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της τιμής της παραμέτρου Hurst για την περιγραφή της κίνησης αυτό-ομοιότητας. Το πρόγραμμα αυτό ονομάζεται Selfis tool [26] και επιτρέπει τον υπολογισμό αυτό με βάση πολλές διαθέσιμες τεχνικές. Για τους σκοπούς μας, εμείς εστίασαμε στη μέθοδο Variance που έχει χρησιμοποιηθεί πολλές φορές στη βιβλιογραφία. Εξάλλου ο αντικειμενικός σκοπός αυτής της εργασίας δεν είναι η αποτίμηση αυτών των μεθόδων υπολογισμού του  $H$ , αλλά η εκμετάλλευσή τους, ώστε να αποτιμηθεί η κίνηση αυτό-ομοιότητας πάνω από ασύρματα δίκτυα και να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά της στις διαδικασίες ελέγχου αποδοχής.

#### ***6.4.2.2. Μελέτη του αλγορίθμου προσέγγισης της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας***

Η παράγραφος αυτή παραθέτει τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήχθησαν για την αποτίμηση της μεθόδου προσέγγισης της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας, η οποία παρουσιάστηκε παραπάνω. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών πρώτης και δεύτερης τάξης για τον αριθμό των εισερχόμενων πακέτων και τον χρόνο μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι ο μέσος ρυθμός μετάδοσης πακέτων, η διασπορά του ρυθμού μετάδοσης, η μέση τιμή και η διασπορά του χρόνου άφιξης διαδοχικών πακέτων. Οι δύο τελευταίες παράμετροι μπορούν να περιγραφούν, όπως παρουσιάστηκε, από τον τετραγωνικό συντελεστή της διασποράς του χρόνου διαδοχικών αφίξεων πακέτων (squared coefficient of variation for the interarrival times). Εκτός από αυτά τα χαρακτηριστικά, η ανάλυση περιλαμβάνει τον υπολογισμό της  $H$  παραμέτρου και την ακολουθία της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης των δειγμάτων που λαμβάνονται κατά το διάστημα παρατήρησης.

Η ανάλυσή μας στηρίζεται στην κατάλληλη επιλογή του αριθμού των ανεξάρτητων IFP πηγών που υπερτίθενται για την προσομοίωση της πραγματικής κίνησης και του αριθμού των κλιμάκων χρόνου, για τις οποίες μας ενδιαφέρει να παρατηρήσουμε την εισερχόμενη κίνηση. Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο [1] αλλά και στα συμπεράσματα της παραγράφου 6.4.1.2, επιλέγουμε να παρατηρήσουμε την κίνηση σε πέντε κλίμακες χρόνου, ενώ ένας αριθμός από τέσσερις IFP πηγές κρίνεται ικανοποιητικός για τη μοντελοποίηση της πραγματικής κίνησης και την προσομοίωση των χαρακτηριστικών πρώτης και δεύτερης τάξης.

#### Πρώτο πείραμα

Σε ένα πρώτο πείραμα, επιλέγουμε τον *Client 1* να είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο WLAN και να ζητά μια υπηρεσία *Serv1* από τον εξυπηρετητή *Server*. Η υπηρεσία αυτή διαμορφώνεται, ώστε η Pareto κατανομή για τον αριθμό των αφίξεων πακέτων να έχει παραμέτρους  $a=1.5$  και  $b=1500$ , ενώ η εκθετική κατανομή για το χρόνο μεταξύ διαδοχικών αφίξεων έχει παράμετρο  $\mu=0.002\text{sec}$ .

Η ανάλυση των δειγμάτων, που συλλέγονται και αναλύονται και στις δύο άκρες της σύνδεσης, δείχνει ότι η εισερχόμενη στο δίκτυο κίνηση παρουσιάζει ένα μέσο ρυθμό άφιξης πακέτων  $\overline{pr} = 4.93$  σε ένα παράθυρο χρόνου 10msec, ο τετραγωνικός συντελεστής της διασποράς του χρόνου διαδοχικών αφίξεων πακέτων υπολογίζεται σε  $scI = 3.38$ , η εκρηκτικότητα είναι  $b = 0.29$  και η ανάλυση των δειγμάτων πραγματικής κίνησης δίνει μια τιμή  $H=0.58$  για την Hurst παράμετρο. Επίσης, σημειώνουμε ότι κατά μέσο όρο κάθε πακέτο περιέχει 10.04kbits. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές ως είσοδο, ο αλγόριθμος του Adv μοντέλου υπολογίζει τις κατάλληλες τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν καθεμιά από τις τέσσερις IFP πηγές. Αυτές συμβολίζονται με  $\lambda_{on/off}$  για το ρυθμό άφιξης στην ενεργό ON περίοδο,  $\mu_{on}$  και  $\mu_{off}$  για τους ρυθμούς μετάβασης στην ON και OFF περίοδο αντίστοιχα και  $\lambda_{Poisson}$  το ρυθμό άφιξης πακέτων από τη διαδικασία Poisson. Ο Πίνακας 6-8 συνοψίζει τις τιμές των παραμέτρων που υπολογίζονται από την επιβολή του αλγορίθμου για την προσέγγιση της κίνησης που παράγεται από την ύπαρξη μόνο της υπηρεσίας *Serv1* στο δίκτυο.

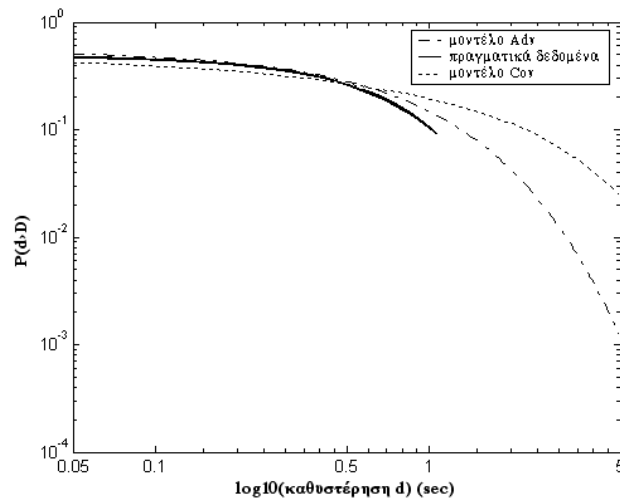
**Πίνακας 6-8. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για την υπηρεσία *Serv1* για το πρώτο πείραμα**

| D                            | $\lambda_{on/off}$ (packets/10ms) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|------------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|
| 1                            | 2.3593                            | 0.21296    | 0.087038    |
| 2                            | 0.47086                           | 0.0045881  | 0.0018752   |
| 3                            | 0.093588                          | 9.8848e-5  | 4.04e-5     |
| 4                            | 0.019748                          | 2.1296e-6  | 8.7038e-7   |
| $\lambda_{Poisson} = 4.0782$ |                                   |            |             |

Έχοντας υπολογίσει τις τιμές των IFP παραμέτρων, ο σκοπός μας είναι να μελετήσουμε την επίδραση της κίνησης στην ουρά του ταμιευτήρα του δικτύου. Για το λόγο αυτό, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι τιμές που λαμβάνονται, σχετικά με το διαθέσιμο εύρος ζώνης του ασύρματου



καναλιού για το διάστημα παρακολούθησης της κίνησης. Για το συγκεκριμένο πείραμα, στο οποίο έχουμε ένα μόνο σταθμό, η τελική τιμή της διαθέσιμης χωρητικότητας για την υποστήριξη της υπηρεσίας *ServI* προκύπτει να είναι  $C_{av} = 5.39Mbps$ . Με βάση αυτήν την τιμή και με τις παραμέτρους που δίνει ο Πίνακας 6-8, μπορούμε να υπολογίσουμε αναλυτικά την κατανομή της ουράς αναμονής στο στοιχείο δικτύου και, επομένως, και την πιθανότητα υπερχείλισης του ταμιευτήρα πέρα από ένα συγκεκριμένο κατώφλι για την καθυστέρηση.



**Σχήμα 6-10. Πιθανότητα υπέρβασης ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα συναρτήσει της καθυστέρησης για την υπηρεσία *ServI* για το πρώτο πείραμα**

Το Σχήμα 6-10 απεικονίζει σε λογαριθμική κλίμακα την πιθανότητα υπέρβασης της καθυστέρησης στον ταμιευτήρα του κόμβου δικτύου πέρα από ένα συγκεκριμένο όριο καθυστέρησης  $D$ . Στο σχήμα αυτό, προσπαθούμε να δείξουμε τη βελτίωση που εισέρχεται στην περιγραφή της επίδοσης του δικτύου από την μελέτη των χαρακτηριστικών της κίνησης, τόσο για το μέγεθος των πακέτων όσο και για το χρόνο μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων. Συνεπώς, στο σχήμα αυτό συγκρίνουμε τον αλγόριθμο προσέγγισης που οφείλεται στο Adv μοντέλο, με τα αποτελέσματα που προέρχονται από το Con μοντέλο και τα παραλληλίζουμε με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των πραγματικών μετρήσεων. Ειδικότερα, στο Σχήμα 6-10, η γραμμή με τις τελείες προκύπτει από την ανάλυση με βάση το Con μοντέλο, η συνεχής γραμμή είναι η μετρούμενη, ενώ η καμπύλη γραμμή-τελεία προκύπτει από την ανάλυση που παρουσιάζεται από το Adv μοντέλο. Από το σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι το μοντέλο μας προσφέρει μια καλύτερη προσέγγιση σε σχέση με το Con μοντέλο. Επίσης, το μοντέλο αυτό ακολουθεί την καμπύλη που προκύπτει από τα πραγματικά δείγματα για το διάστημα, στο οποίο ενδιαφερόμαστε, ενώ αρχίζει να αποκλίνει για μεγάλες τιμές της καθυστέρησης στην ουρά αναμονής.

### Δεύτερο πείραμα

Σε αυτό το δεύτερο πείραμα, επιλέγουμε τον *Client 2* να συνδεθεί στο WLAN και να ζητήσει την υπηρεσία *Serv2* από τον εξυπηρετητή *Server*. Η υπηρεσία αυτή αφορά στη σε πραγματικό χρόνο μεταφορά ενός βίντεο, το οποίο έχει κωδικοποιηθεί κατά MPEG-4 και παρουσιάζει ένα μέσο ρυθμό μετάδοσης 2.5Mbps.

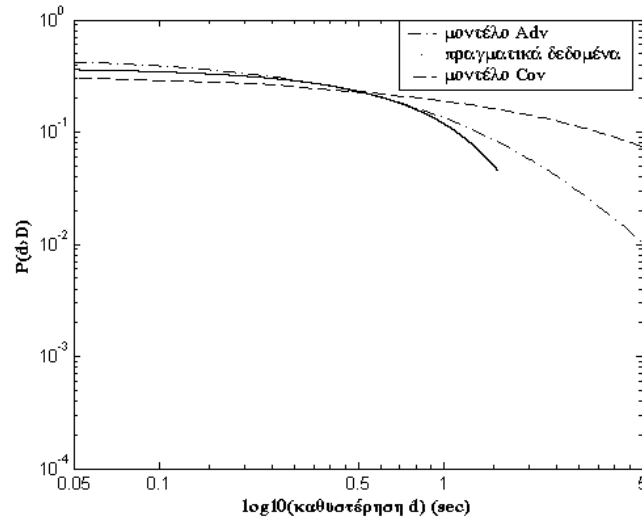
Η ανάλυση των δειγμάτων που συλλέγονται και στις δύο άκρες της σύνδεσης δείχνει ότι η εισερχόμενη στο δίκτυο κίνηση παρουσιάζει ένα μέσο ρυθμό άφιξης πακέτων  $\overline{pr} = 3.066$  σε ένα παράθυρο χρόνου 10msec, ο τετραγωνικός συντελεστής της διασποράς του χρόνου διαδοχικών αφίξεων πακέτων υπολογίζεται σε  $scI = 1.09$ , η εκρηκτικότητα είναι  $b = 0.20$  και η ανάλυση των δειγμάτων πραγματικής κίνησης δίνει μια τιμή  $H=0.84$  για την Hurst παράμετρο. Επίσης, κατά μέσο όρο κάθε πακέτο περιέχει 10.5kbits. Κατ' αναλογία προς το πρώτο πείραμα, υπολογίζουμε τις παραμέτρους των τεσσάρων IFP πηγών και της κίνησης Poisson. Ο Πίνακας 6-9 συνοψίζει τις τιμές των παραμέτρων που υπολογίζονται.

**Πίνακας 6-9. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για την υπηρεσία *Serv2* για το δεύτερο πείραμα.**

| D                          | $\lambda_{on/off}$ (packets/10ms) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|----------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|
| 1                          | 5.9495                            | 0.4        | 0.094686    |
| 2                          | 3.8466                            | 0.0086177  | 0.0020399   |
| 3                          | 1.2685                            | 1.8566e-4  | 4.3949e-5   |
| 4                          | 1.4606                            | 4e-6       | 9.4686e-7   |
| $\lambda_{Poisson} = 0.67$ |                                   |            |             |

Συνεχίζουμε τώρα στον υπολογισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας για την υποστήριξη αυτής της υπηρεσίας για την υποστήριξη της υπηρεσίας *Serv2*, η οποία προκύπτει να είναι  $C_{av} = 5.45Mbps$ .

Η παραγόμενη κίνηση UDP φορτίζει το δίκτυο και προκαλεί την αποθήκευση της πλεονάζουσας κίνησης στον ταμιευτήρα. Σαν αποτέλεσμα, ένα μέρος της εισερχόμενης κίνησης καθυστερεί στον ταμιευτήρα και το μήκος της ουράς διακυμαίνεται, συναρτήσει της καθυστέρησης, σύμφωνα με το Σχήμα 6-11. Εκεί φαίνεται η λογαριθμική απεικόνιση της πιθανότητας υπέρβασης της καθυστέρησης στον ταμιευτήρα του κόμβου δικτύου πέρα από ένα συγκεκριμένο όριο καθυστέρησης D. Ειδικότερα, η διακεκομμένη γραμμή προκύπτει από την ανάλυση με βάση το Con μοντέλο, η γραμμή με τις τελείες είναι η μετρούμενη, ενώ η καμπύλη γραμμή-τελεία προκύπτει από την ανάλυση του μοντέλου Adv. Από το σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι το μοντέλο μας προσφέρει μια καλύτερη προσέγγιση προς τα πραγματικά αποτελέσματα για όλες τις επιθυμητές τιμές καθυστέρησης.



**Σχήμα 6-11. Πιθανότητα υπέρβασης ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα συναρτήσει της καθυστέρησης για την υπηρεσία *Serv2* για το δεύτερο πείραμα.**

#### *Τρίτο πείραμα*

Σε αυτό το τρίτο πείραμα, προσπαθούμε να δούμε την επίδοση του δικτύου και ειδικότερα τη συμπεριφορά της ουράς στον ταμιευτήρα, εάν αναμίξουμε την κίνηση που χρησιμοποιήσαμε στα δύο προηγούμενα πειράματα. Αυτό το πείραμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς στην πραγματικότητα ένα δίκτυο θα κληθεί να εξυπηρετήσει χρήστες διαφορετικών υπηρεσιών. Από την άλλη, είναι πολύ σημαντικό να εξεταστεί η επίδραση στο μήκος της ουράς στον ταμιευτήρα και, συνεπώς, η υφιστάμενη καθυστέρηση των εισερχόμενων πακέτων, όταν μια κίνηση ελαστική, όπως είναι η κίνηση TCP, υπερτεθεί πάνω από το ίδιο τηλεπικοινωνιακό κανάλι, με μία κίνηση πραγματικού χρόνου με αυστηρές απαιτήσεις, όπως είναι η ροή βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Υπενθυμίζουμε ότι η κίνηση που φθάνει στον ταμιευτήρα δικτύου μεταχειρίζεται, σύμφωνα με τη λογική FIFO.

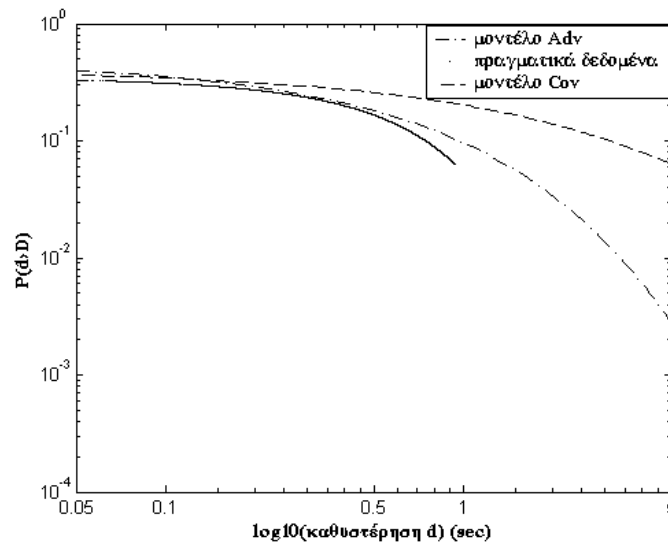
Η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι τα χαρακτηριστικά της κίνησης που προέρχεται από την υπηρεσία *Serv2* παραμένουν αμετάβλητα. Αυτό, βέβαια, είναι αναμενόμενο, αφού η σε πραγματικό χρόνο αποστολή βίντεο, που στηρίζεται στο πρωτόκολλο UDP, αγνοεί την κατάσταση του δικτύου και αποστέλλει πακέτα συνεχώς, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται. Έτσι, έχουμε πάλι ότι ο μέσος ρυθμός άφιξης πακέτων είναι  $\overline{pr} = 3.066$  σε ένα παράθυρο χρόνου 10msec, ο τετραγωνικός συντελεστής της διασποράς του χρόνου διαδοχικών αφίξεων πακέτων υπολογίζεται σε  $scI = 1.09$ , η εκρηκτικότητα είναι  $b = 0.20$  και η ανάλυση των δειγμάτων πραγματικής κίνησης δίνει μια τιμή  $H = 0.84$  για την Hurst παράμετρο. Επομένως, δε χρειάζεται ο επαναπροσδιορισμός των παραμέτρων του μοντέλου μας, αλλά χρησιμοποιούνται οι τιμές που δείχνει ο Πίνακας 6-8.

Όμως, το προφίλ της υπηρεσίας *Serv1* αλλάζει ανάλογα με τη μορφοποίηση που υφίσταται αυτή η κίνηση από τη συνύπαρξή της με την «άπληστη» κίνηση από την υπηρεσία *Serv2*. Έτσι, οι τιμές των χαρακτηριστικών που προκύπτουν από την ανάλυση των δειγμάτων είναι οι ακόλουθες: ο μέσος ρυθμός άφιξης πακέτων είναι  $\overline{pr} = 5.611$  σε ένα παράθυρο χρόνου 10msec, ο τετραγωνικός συντελεστής της διασποράς του χρόνου διαδοχικών αφίξεων πακέτων υπολογίζεται σε  $scI = 29.13$ , η εκρηκτικότητα είναι  $b = 0.34$  και η ανάλυση των δειγμάτων πραγματικής κίνησης δίνει μια τιμή  $H=0.565$  για την Hurst παράμετρο. Ο Πίνακας 6-10 συνοψίζει τις τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών που υπολογίζονται με βάση το μοντέλο Adv.

**Πίνακας 6-10. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για την υπηρεσία *Serv1* για το τρίτο πείραμα**

| D                           | $\lambda_{on/off}$ (packets/10ms) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|-----------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|
| 1                           | 2.7001                            | 0.15       | 0.073898    |
| 2                           | 0.50869                           | 0.0032317  | 0.0015921   |
| 3                           | 0.09553                           | 6.96e-5    | 3.43e-5     |
| 4                           | 0.018909                          | 1.5e-6     | 7.39e-7     |
| $\lambda_{Poisson} = 4.514$ |                                   |            |             |

Συνεχίζουμε τώρα στην εκτίμηση της διαθέσιμης χωρητικότητας για την υποστήριξη του συνδυασμού αυτών των υπηρεσιών. Συνδυάζοντας τις πληροφορίες, που λαμβάνονται από την ανάλυση του [21] και τη διόρθωση της τιμής, με βάση το μοντέλο Gilbert Elliott, παίρνουμε για την τελική τιμή της διαθέσιμης χωρητικότητας ότι είναι  $C_{av} = 5.74Mbps$ .



**Σχήμα 6-12. Πιθανότητα υπέρβασης ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα συναρτήσει της καθυστέρησης για την συνδυασμένη κίνηση του τρίτου πειράματος.**

Το Σχήμα 6-12 απεικονίζει σε λογαριθμική κλίμακα την πιθανότητα υπέρβασης της καθυστέρησης στον ταμιευτήρα του κόμβου δικτύου πέρα από ένα συγκεκριμένο όριο καθυστέρησης D. Ειδικότερα, η διακεκομμένη γραμμή προκύπτει από την ανάλυση με βάση το Con μοντέλο, η γραμμή με τις τελείες είναι η μετρούμενη, ενώ η καμπύλη γραμμή-τελεία προκύπτει από το Adv μοντέλο. Από το σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι το Adv μοντέλο και πάλι προσφέρει μια καλύτερη προσέγγιση.

#### Τέταρτο Πείραμα

Σε αυτό το τέταρτο πείραμα, επιλέγουμε τον *Client 1* να είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο WLAN και να ζητά την υπηρεσία *Serv1* από τον εξυπηρετητή *Server*. Η διαφορά με το πρώτο πείραμα είναι ότι τώρα η υπηρεσία αυτή διαμορφώνεται, ώστε η Pareto κατανομή για τον αριθμό των αφίξεων πακέτων να έχει παραμέτρους  $a=1.5$  και  $b=3000$ , ενώ η εκθετική κατανομή για το χρόνο μεταξύ διαδοχικών αφίξεων έχει παράμετρο  $\mu=0.002\text{sec}$ .

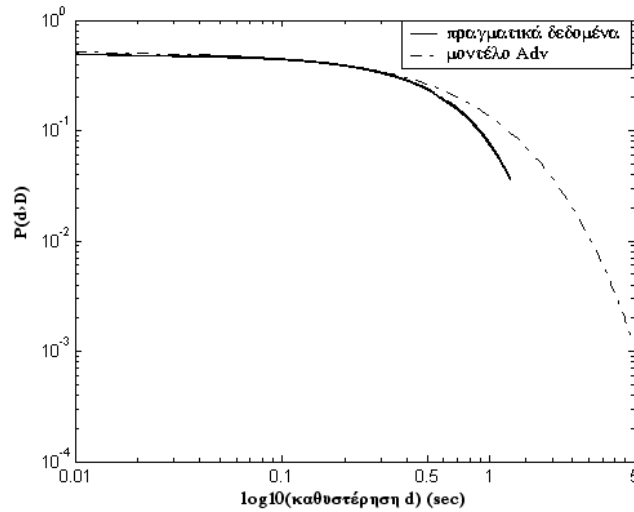
Η ανάλυση των δειγμάτων που συλλέγονται και στις δύο άκρες της σύνδεσης δείχνει ότι η εισερχόμενη στο δίκτυο κίνηση παρουσιάζει ένα μέσο ρυθμό άφιξης πακέτων  $\overline{pr} = 6.56$  σε ένα παράθυρο χρόνου 10msec, ο τετραγωνικός συντελεστής της διασποράς του χρόνου διαδοχικών αφίξεων πακέτων υπολογίζεται σε  $scI = 3.62$ , η εκρηκτικότητα είναι  $b = 0.39$  και η ανάλυση των δειγμάτων πραγματικής κίνησης δίνει μια τιμή  $H=0.61$  για την Hurst παράμετρο. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές ως είσοδο, ο αλγόριθμος υπολογίζει τις κατάλληλες τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν καθεμιά από τις τέσσερις IFP πηγές. Αυτές συμβολίζονται και πάλι με  $\lambda_{on/off}$  για το ρυθμό άφιξης στην ενεργό ON περίοδο,  $\mu_{on}$  και  $\mu_{off}$  για τους ρυθμούς μετάβασης στην ON και OFF περίοδο αντίστοιχα και  $\lambda_{Poisson}$  το ρυθμό άφιξης πακέτων από τη διαδικασία Poisson. Ο Πίνακας 6-11 συνοψίζει τις τιμές των παραμέτρων που υπολογίζονται.

**Πίνακας 6-11. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για την υπηρεσία *Serv1* για το τέταρτο πείραμα**

| D                            | $\lambda_{on/off}$ (packets/10ms) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|------------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|
| 1                            | 3.4029                            | 0.17708    | 0.12292     |
| 2                            | 0.7622                            | 0.003815   | 0.0026483   |
| 3                            | 0.16957                           | 8.2191e-5  | 5.7056e-5   |
| 4                            | 0.040777                          | 1.7708e-6  | 1.2292e-6   |
| $\lambda_{Poisson} = 4.7631$ |                                   |            |             |

Επίσης, η τελική τιμή της διαθέσιμης χωρητικότητας για την υποστήριξη της υπηρεσίας *Serv1* προκύπτει να είναι  $C_{av} = 5.39\text{Mbps}$ . Το Σχήμα 6-13 απεικονίζει σε λογαριθμική κλίμακα την πιθανότητα υπέρβασης της καθυστέρησης στον ταμιευτήρα του κόμβου δικτύου πέρα από ένα συγκεκριμένο όριο καθυστέρησης D. Ειδικότερα, η συμπαγής γραμμή είναι η μετρούμενη, ενώ η καμπύλη γραμμή-τελεία προκύπτει από την ανάλυση του μοντέλου Adv, που παρουσιάζεται σε αυτήν την εργασία. Από το σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι το μοντέλο μας προσφέρει μια αρκετά

καλή προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς της κίνησης που προκύπτει από την υπηρεσία *Serv1*.



**Σχήμα 6-13. Πιθανότητα υπέρβασης ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα συναρτήσει της καθυστέρησης για την υπηρεσία *Serv1* για το τέταρτο πείραμα**

#### Πέμπτο Πείραμα

Σε αυτό το πέμπτο πείραμα, προσπαθούμε να δούμε την επίδοση του δικτύου και ειδικότερα τη συμπεριφορά της ουράς στον ταμιευτήρα, εάν αναμείξουμε την κίνηση που προκύπτει από δύο χρήστες, οι οποίοι ζητούν δύο διαφορετικές διαμορφώσεις της υπηρεσίας *Serv1*. Έτσι, θεωρούμε ότι ο *Client 1* ζητά από τον εξυπηρετητή *Server* την υπηρεσία, διαμορφωμένη ώστε η Pareto κατανομή για τον αριθμό των αφίξεων πακέτων να έχει παραμέτρους  $a=1.5$  και  $b=1500$ , ενώ η εκθετική κατανομή για τον χρόνο μεταξύ διαδοχικών αφίξεων έχει παράμετρο  $\mu=0.002\text{sec}$ . Έστω  $P1$  η ροή κίνησης που παράγεται από τον *Client 1*. Αντιστοίχως, ο *Client 2* ζητά από τον εξυπηρετητή *Server* την υπηρεσία, διαμορφωμένη ώστε η Pareto κατανομή για τον αριθμό των αφίξεων πακέτων να έχει παραμέτρους  $a=1.5$  και  $b=3000$ , ενώ πάλι η εκθετική κατανομή για τον χρόνο μεταξύ διαδοχικών αφίξεων έχει παράμετρο  $\mu=0.002\text{sec}$ . Η δεύτερη αυτή ροή κίνησης συμβολίζεται με  $P2$ . Όπως έχει δειχθεί στα παραπάνω πειράματα, οι δύο αυτές ανεξάρτητες διαμορφώσεις της ίδιας υπηρεσίας παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Το σημαντικό σε αυτήν την περίπτωση είναι να μελετήσουμε την αλλοίωση στη συμπεριφορά της FTP κίνησης, υπό τη συνύπαρξή της με άλλη FTP κίνηση. Από την άλλη είναι πολύ σημαντικό να εξεταστεί η επίδραση στο μήκος της ουράς στον ταμιευτήρα και, συνεπώς, η υφιστάμενη καθυστέρηση των εισερχόμενων πακέτων, όταν οι δύο αυτές ανεξάρτητες ροές υπερτεθούν πάνω από το ίδιο τηλεπικοινωνιακό κανάλι.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η κίνηση των ανεξάρτητων ροών παρουσιάζει αλλαγές στα χαρακτηριστικά τους σε σχέση με την περίπτωση που καθεμιά από αυτές υπάρχει μόνη της στο δίκτυο ή υπερτίθεται με την κίνηση που παράγεται από την υπηρεσία *Serv2*.

Επίσης, παρατηρείται μια εξισορρόπηση του μέσου φορτίου που παράγεται από καθεμιά ροή. Το συμπέρασμα αυτό είναι αναμενόμενο, λόγω των συμπερασμάτων του κεφαλαίου 5 και της φύσης του πρωτοκόλλου μεταφοράς TCP, το οποίο προσπαθεί να αποδίδει το διαθέσιμο εύρος ζώνης με τον πιο δίκαιο τρόπο σε όλες τις ροές που ανταγωνίζονται πάνω στο ίδιο κανάλι.

Οι τιμές των χαρακτηριστικών που προκύπτουν από την ανάλυση των δειγμάτων της πρώτης ροής P1 είναι οι ακόλουθες: ο μέσος ρυθμός άφιξης πακέτων είναι  $\overline{pr} = 5.41$  σε ένα παράθυρο χρόνου 10msec, ο τετραγωνικός συντελεστής της διασποράς του χρόνου διαδοχικών αφίξεων πακέτων υπολογίζεται σε  $scI = 4.63$ , η εκρηκτικότητα είναι  $b = 0.37$  και η ανάλυση των δειγμάτων πραγματικής κίνησης δίνει μια τιμή  $H=0.52$  για την Hurst παράμετρο. Ο Πίνακας 6-12 συνοψίζει τις τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών που υπολογίζονται με βάση το μοντέλο μας.

**Πίνακας 6-12. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για την ροή P1 της υπηρεσίας *ServI* για το πέμπτο πείραμα**

| D                            | $\lambda_{on/off}$ (packets/10ms) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|------------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|
| 1                            | 2.4442                            | 0.19177    | 0.10823     |
| 2                            | 0.3874                            | 0.0041315  | 0.0023318   |
| 3                            | 0.061309                          | 8.901e-5   | 5.0237e-5   |
| 4                            | 0.010059                          | 1.9177e-6  | 1.0823e-6   |
| $\lambda_{Poisson} = 4.3643$ |                                   |            |             |

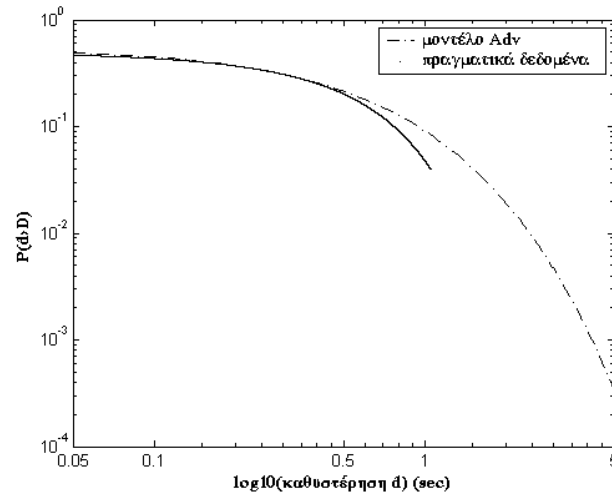
Οι αντίστοιχες τιμές των δειγμάτων της ροής P2 είναι οι ακόλουθες: ο μέσος ρυθμός άφιξης πακέτων είναι  $\overline{pr} = 4.79$  σε ένα παράθυρο χρόνου 10msec, ο τετραγωνικός συντελεστής της διασποράς του χρόνου διαδοχικών αφίξεων πακέτων υπολογίζεται σε  $scI = 3.89$ , η εκρηκτικότητα είναι  $b = 0.29$  και η ανάλυση των δειγμάτων πραγματικής κίνησης δίνει μια τιμή  $H=0.51$  για την Hurst παράμετρο. Ο Πίνακας 6-13 συνοψίζει τις τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών που υπολογίζονται με βάση το μοντέλο μας.

**Πίνακας 6-13. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών για την ροή P2 της υπηρεσίας *ServI* για το πέμπτο πείραμα**

| D                            | $\lambda_{on/off}$ (packets/10ms) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|------------------------------|-----------------------------------|------------|-------------|
| 1                            | 2.7954                            | 0.2101     | 0.089896    |
| 2                            | 0.44306                           | 0.0045265  | 0.0019368   |
| 3                            | 0.070117                          | 9.7522e-5  | 4.1726e-5   |
| 4                            | 0.011504                          | 2.101e-6   | 8.9896e-7   |
| $\lambda_{Poisson} = 3.7996$ |                                   |            |             |

Έχοντας υπολογίσει τις τιμές των IFP παραμέτρων και για τις δύο ανεξάρτητες ροές της υπηρεσίας *ServI*, ο σκοπός μας είναι να μελετήσουμε την επίδραση της συνολικής κίνησης στην ουρά του ταμειυτήρα του δικτύου. Έτσι, υπολογίζουμε την τελική τιμή της διαθέσιμης χωρητικότητας για την υποστήριξη και των δύο ροών της υπηρεσίας *ServI*, η οποία και είναι

$C_{av} = 5.73Mbps$ . Συνεπώς, μπορούμε να υπολογίσουμε αναλυτικά την κατανομή της ουράς αναμονής στο στοιχείο δικτύου και την πιθανότητα υπερχείλισης του ταμιευτήρα πέρα από ένα συγκεκριμένο κατώφλι για την καθυστέρηση.



**Σχήμα 6-14. Πιθανότητα υπέρβασης ορίου καθυστέρησης στον ταμιευτήρα συναρτήσει της καθυστέρησης για την συνολική κίνηση για το πέμπτο πείραμα**

Το Σχήμα 6-14 απεικονίζει σε λογαριθμική κλίμακα την πιθανότητα υπέρβασης της καθυστέρησης στον ταμιευτήρα του κόμβου δικτύου πέρα από ένα συγκεκριμένο όριο καθυστέρησης  $D$  για την συνολική κίνηση. Ειδικότερα, η γραμμή με τις τελείες είναι η μετρούμενη πιθανότητα υπέρβασης της καθυστέρησης, ενώ η καμπύλη γραμμή-τελεία προκύπτει από την ανάλυση που παρουσιάζεται σε αυτήν την εργασία και το μοντέλο Adv. Από το σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι το μοντέλο μας και πάλι προσφέρει μια ασφαλή προσέγγιση της πραγματικής καθυστέρησης που υφίστανται τα πακέτα στον ταμιευτήρα.

#### 6.4.2.3. Παρατηρήσεις για το σύνολο των πειραμάτων

Στην παράγραφο αυτή αναλύουμε τα χαρακτηριστικά της προσφερόμενης κίνησης και δίνουμε μερικές παρατηρήσεις σχετικά με τη συμπεριφορά της ουράς αναμονής υπό την φόρτιση με την κίνηση αυτή. Όπως φαίνεται και από τα σχήματα, τα οποία παρουσιάζονται στις προηγούμενες παραγράφους, το μοντέλο Adv προσεγγίζει τη συμπεριφορά της ουράς αναμονής του υπό εξέταση δικτύου υπό τη φόρτιση διαφορετικής προσφερόμενης κίνησης. Η συμπεριφορά του μοντέλου είναι καλή για τις περιοχές που μας ενδιαφέρουν. Δηλαδή, οι καμπύλες που περιγράφουν την ουρά αναμονής για το σύστημα με βάση το μοντέλο Adv ακολουθούν εκείνες που προκύπτουν από την ανάλυση των πραγματικών δειγμάτων για μία περιοχή τιμών καθυστέρησης που εκτείνεται μέχρι μερικά δευτερόλεπτα. Η προσέγγιση αυτή, μάλιστα, πραγματοποιείται, ώστε το μοντέλο μας να παρουσιάζεται ελαφρώς πιο συντηρητικό από την πραγματικότητα.



Συνεπώς, η χρήση αυτού του προσεγγιστικού μοντέλου για την περιγραφή των ποιοτικών χαρακτηριστικών της κίνησης, που εξετάζουμε εδώ και αφορά σε αλληλοδραστικές υπηρεσίες και εφαρμογές πολυμέσων, αρκεί για την περιοχή των ποιοτικών κριτηρίων που τίθενται από αυτές τις υπηρεσίες. Επίσης, η υπέρθεση των Μαρκοβιανών μοντέλων MMFP με κίνηση Poisson, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξέταση της συμπεριφοράς ενός συστήματος αναμονής, το οποίο φορτίζεται με ένα μίγμα υπηρεσιών πραγματικού χρόνου και κίνησης TCP μη-πραγματικού χρόνου. Επομένως, στη συνέχεια αυτής της εργασίας, ασχολούμαστε με τέτοιες υπηρεσίες, οι οποίες διακρίνονται από ρεαλιστικά κριτήρια ποιότητας, που αντιστοιχίζονται σε αυτήν την περιοχή της ουράς αναμονής ενός δικτύου, και μπορούμε να θεωρήσουμε κατάλληλο το μοντέλο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο αυτό.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η κίνηση TCP, η οποία υπερτίθεται σε ένα κόμβο δικτύου με άλλα είδη κίνησης, του ιδίου ή διαφορετικού πρωτοκόλλου μεταφοράς, και πρέπει να διαμορφώσει την συμπεριφορά της, ανάλογα με την κατάσταση και τα επίπεδα συμφόρησης του δικτύου. Η σημασία αυτής της παρατήρησης έγκειται στο γεγονός ότι το πρωτόκολλο TCP είναι κλειστού βρόχου και, συνεπώς, η κίνηση TCP έχει ανάδραση. Ο παράγοντας επίδρασης της ανάδρασης στη συμπεριφορά μιας τέτοιας κίνησης δεν εξαρτάται γραμμικά από τη συμφόρηση του δικτύου, όπως έχει δείχτει και από το κεφάλαιο 5, ενώ η κατάσταση χειροτερεύει για την περίπτωση μας, στην οποία εξετάζουμε ασύρματα δίκτυα, και από τη διακύμανση της διαθέσιμης χωρητικότητας για την υποστήριξη των υπηρεσιών που βασίζονται στο TCP, οπότε και η εκάστοτε πηγή κίνησης πρέπει να προσαρμόζει τα χαρακτηριστικά του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων εκ νέου, με αποτέλεσμα την επέκταση πακέτων μεγάλου μεγέθους στο χρόνο.

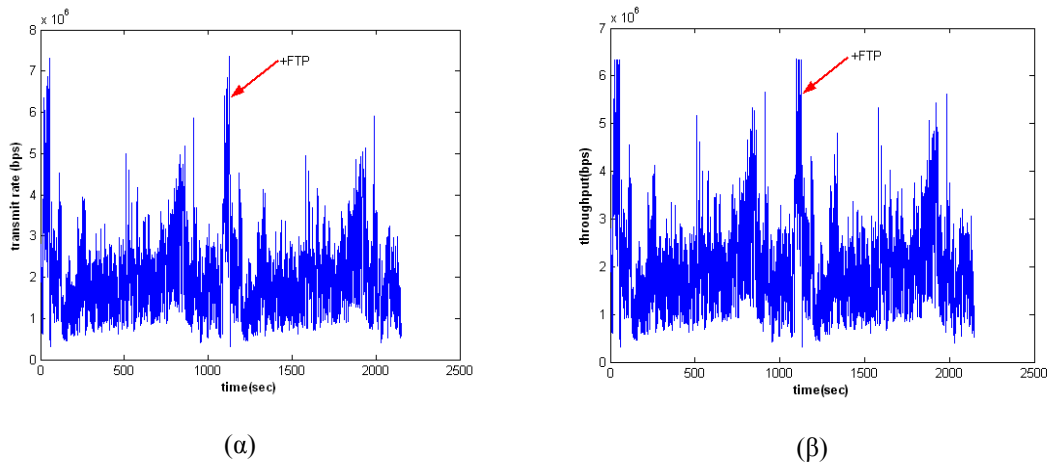
**Πίνακας 6-14. Χαρακτηριστικά πρώτης τάξης για τις παραμέτρους κίνησης των πέντε πειραμάτων.**

| Πείραμα                                  | Χρόνος μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων (sec) |            |             | Ρυθμός Μετάδοσης (Mbps) |            |             |
|------------------------------------------|------------------------------------------------|------------|-------------|-------------------------|------------|-------------|
|                                          | <i>Min</i>                                     | <i>Max</i> | <i>Mean</i> | <i>Min</i>              | <i>Max</i> | <i>Mean</i> |
| <i>1</i>                                 | 0,000                                          | 0,116      | 0,003       | 2,291                   | 5,561      | 3,171       |
| <i>2</i>                                 | 0,000                                          | 0,047      | 0,005       | 0,316                   | 7,349      | 2,112       |
| <i>3</i><br><i>Serv1</i><br><i>Serv2</i> | 0,000                                          | 4,404      | 0,004       | 0,059                   | 4,121      | 2,638       |
|                                          | 0,000                                          | 0,047      | 0,005       | 0,316                   | 7,349      | 2,112       |
| <i>4</i>                                 | 0,000                                          | 0,130      | 0,002       | 3,278                   | 5,871      | 4,488       |
| <i>5</i><br><i>P1</i><br><i>P2</i>       | 0,000                                          | 0,143      | 0,005       | 1,748                   | 3,107      | 2,328       |
|                                          | 0,000                                          | 0,149      | 0,005       | 1,641                   | 4,269      | 2,142       |

Για το σκοπό αυτό, εξετάζουμε τη μεταβολή που υφίστανται οι ροές TCP στα προηγούμενα πειράματα και προσπαθούμε να βγάλουμε μερικά ενδεικτικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά αυτών των ροών σε περιπτώσεις συμφόρησης. Σημειώνουμε ότι τώρα μας ενδιαφέρουν τα χαρακτηριστικά της κίνησης σε επίπεδο second, οπότε οι μετρήσεις αναφέρονται σε αυτήν την

κλίμακα χρόνου. Ο Πίνακας 6-14 συνοψίζει για τα πέντε πειράματα που προαναφέρθηκαν τις τιμές των χαρακτηριστικών της κίνησης που εισέρχεται μέσα στον ταμιευτήρα του κόμβου δικτύου. Συγκεκριμένα, δίνονται οι ελάχιστες, μέσες και μέγιστες τιμές που αντιστοιχούν στο χρόνο μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων και στο ρυθμό μετάδοσης στον εξυπηρετητή.

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση της κίνησης TCP, τονίζουμε το γεγονός ότι τα μεγέθη σχετικά με τη συμπεριφορά της UDP κίνησης αποδεικνύουν κάτι το αναμενόμενο. Αυτό είναι ότι ο Εξυπηρετητής αποστέλλει με τον ίδιο ρυθμό την κίνηση UDP, ανεξάρτητα από το είδος της κίνησης, με την οποία αυτή αργότερα πολυπλέκεται στο δίκτυο. Στο Σχήμα 6-15 έχουμε σχεδιάσει τη χρονική μεταβολή του ρυθμού μετάδοσης (α) και τη διέλευση (β) πριν και μετά την εισαγωγή της κίνησης FTP που παράγεται από την υπηρεσία *Serv1*, όπως αυτά προκύπτουν από την ανάλυση των δειγμάτων που συλλέγονται στη διάρκεια των πειραμάτων. Βέβαια, εμείς ενδιαφερόμαστε περισσότερο για το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ο οποίος δίνει μια αίσθηση του ρυθμού εισερχόμενων πακέτων στον κόμβο του δικτύου που εξετάζουμε.

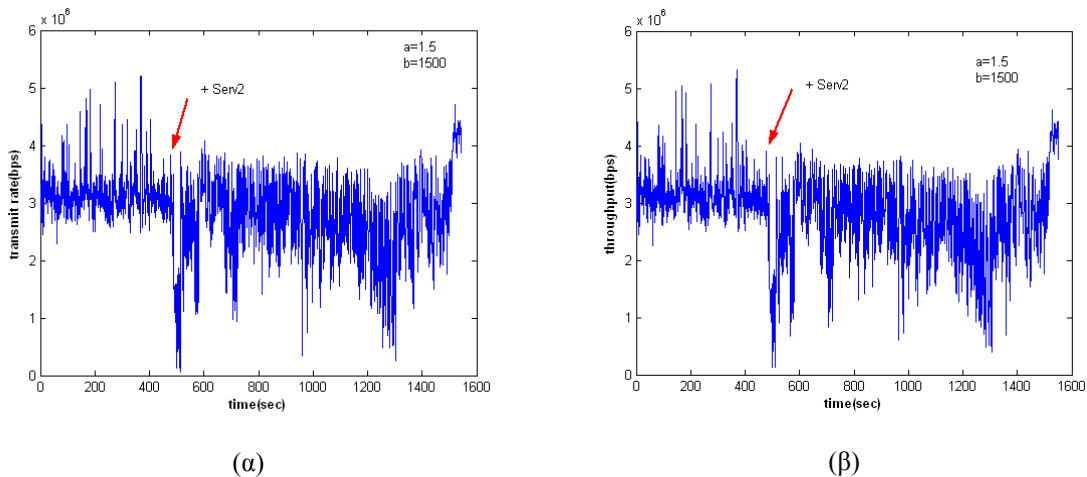


**Σχήμα 6-15. Ρυθμός μετάδοσης (α) και διέλευση (β) για την υπηρεσία *Serv2***

Προχωρώντας τώρα στην ανάλυση της κίνησης TCP, όπως δείχνει και ο Πίνακας 6-14, παρατηρούμε ότι τα χαρακτηριστικά μεγέθη για το ρυθμό μετάδοσης στον εξυπηρετητή και το χρόνο μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων αλλάζουν σημαντικά. Οι μεγαλύτερες αλλαγές, όμως, συμβαίνουν στον αριθμό και το μέγεθος των πακέτων (άρα στον ρυθμό μετάδοσης) που μεταφέρονται μέσω του δικτύου, παρά στο χρόνο μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων. Αυτό σημαίνει ότι βραχυπρόθεσμα παρατηρείται αλλαγή των χαρακτηριστικών πρώτης τάξης στο μέγεθος των πακέτων που μεταφέρονται αλλά και στο χρόνο μεταξύ διαδοχικών αφίξεων, ενώ μακροπρόθεσμα οι τιμές αυτές μπορούν να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά δεύτερης ή μεγαλύτερης τάξης, όπως είναι η διασπορά του μεγέθους των πακέτων. Αυτό δικαιολογεί το γεγονός ότι ένα αποτελεσματικό σύστημα ελέγχου αποδοχής θα πρέπει να λαμβάνει μέριμνα, ώστε να παρακολουθεί το μέσο ρυθμό σε μικρότερα χρονικά παράθυρα, ενώ τα χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης (π.χ. διασπορά) απαιτούν μεγαλύτερης διάρκειας χρονικές περιόδους παρατήρησης, καθώς μεταβάλλονται πιο αργά σε σχέση με το μέσο ρυθμό.

Το ενδιαφέρον ζήτημα στην περίπτωση της κίνησης TCP είναι η εκτίμηση του ποσοστού της μείωσης των χαρακτηριστικών μεγεθών πρώτης τάξης από την υπέρθεση της κίνησης με οποιαδήποτε άλλη ανεξάρτητη ή συνολική ροή στο δίκτυο. Προς το σκοπό αυτό, στα επόμενα σχήματα παρουσιάζουμε τη συμπεριφορά των ανεξάρτητων ροών TCP που χρησιμοποιήθηκαν στα προηγούμενα πειράματα και παρατηρούμε την μεταβολή που αυτές οι ροές υφίστανται από τη συνύπαρξή τους με άλλες ροές. Στα σχήματα αυτά, έχουν σχεδιαστεί οι χρονικές συναρτήσεις του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και της επιτυγχάνομενης στην πλευρά του τελικού χρήστη διέλευσης. Όπως παρατηρούμε από τα σχήματα αυτά, οι ροές TCP, λόγω του φαινομένου της ανάδρασης που παρουσιάζουν, διαμορφώνουν το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ώστε να χρησιμοποιήσουν τη διαθέσιμη χωρητικότητα με το δικαιότερο τρόπο.

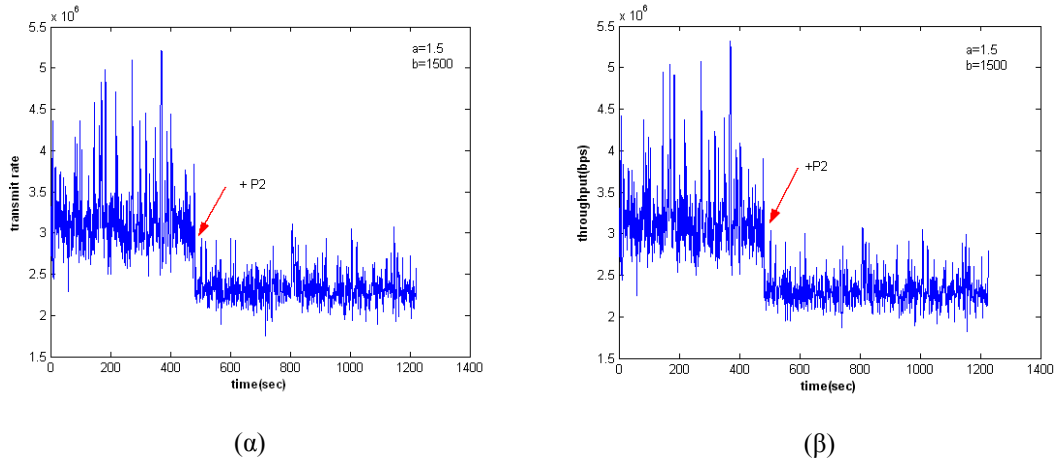
Πιο αναλυτικά, στην περίπτωση υπέρθεσης της μίας ροής TCP με την άπληστη ροή UDP (βλέπε Σχήμα 6-16), η TCP κίνηση ανιχνεύει την ύπαρξη απωλειών λόγω συμφόρησης ή και αύξησης του χρόνου πλήρους διαδρομής και μειώνει το ρυθμό μετάδοσης (βάσει του μηχανισμού που έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 5), ώστε να αποφύγει φαινόμενα καταγιστικών απωλειών. Σε κάθε περίπτωση, όμως, ο ρυθμός μετάδοσης παρουσιάζει ένα ελάχιστο και ποτέ δε μηδενίζεται, ώστε να επιτρέψει την αποκλειστική χρήση των πόρων του δικτύου από την κίνηση UDP. Η ελάχιστη αυτή τιμή καθορίζεται από πολλούς παράγοντες, όπως φανερώνει και η σχέση (5-3) που παρατίθεται στο κεφάλαιο 5. Αυτό έχει σημαντική επίδραση στο ποσοστό των απωλειών που παρουσιάζουν όλες οι ροές του δικτύου και για το λόγο αυτό, ένας αξιόπιστος μηχανισμός ελέγχου αποδοχής κλήσεων, θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του αυτό το γεγονός.



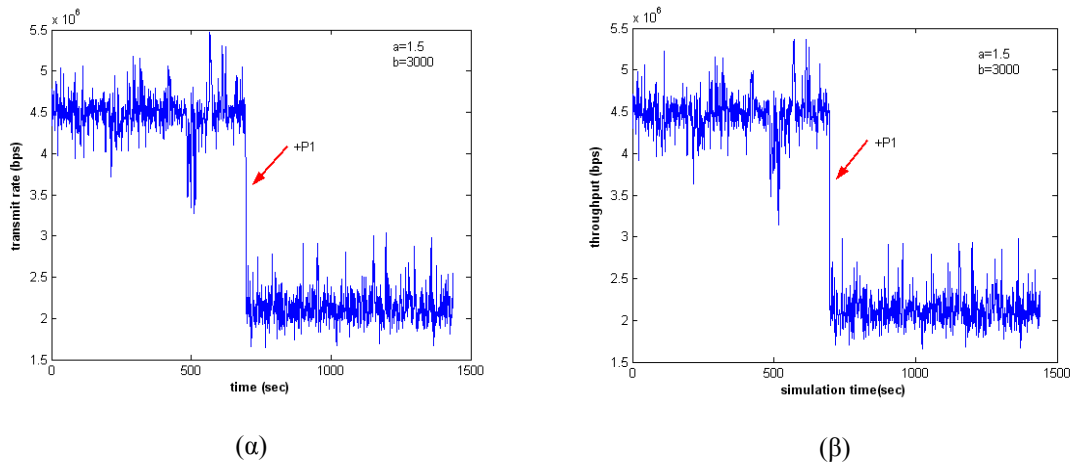
**Σχήμα 6-16. Μελέτη της κίνησης που παράγεται από την υπηρεσία *Serv1* για το πρώτο και το τρίτο πείραμα: (α) ρυθμός μετάδοσης και (β) διέλευση**

Στην περίπτωση τώρα που έχουμε υπέρθεση δύο διαφορετικών ροών TCP, όπως στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 6-17 και Σχήμα 6-18), οι ανεξάρτητες ροές ανιχνεύουν και πάλι την ύπαρξη συμφόρησης στο δίκτυο και δρουν αναλόγως. Έτσι, προσαρμόζουν το μέσο ρυθμό μετάδοσης σε μικρότερες τιμές, ώστε οι πόροι που δικτύου περίπου να ισοκατανεμηθούν. Αυτό σημαίνει ότι η γνώση της τρέχουσας τιμής της διαθέσιμης χωρητικότητας είναι κρίσιμη για την

περίπτωση που μια νέα κλήση εισέλθει στο σύστημα. Ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι οι μέσες τιμές σχετικά με το χρόνο μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων για τις δύο ανεξάρτητες ροές προσαρμόζονται στα ίδια επίπεδα (όπως δείχνει και ο Πίνακας 6-14). Αυτό συνεπάγεται μια ισοκατανομή στον χρόνο προσπέλασης του μέσου μετάδοσης, που προέρχεται από τη φύση του πρωτοκόλλου μεταφοράς TCP, ο οποίος, με τη σειρά του, επιδρά στο ρυθμό μετάδοσης.



**Σχήμα 6-17 Μελέτη της κίνησης που παράγεται από την ροή P1 της υπηρεσίας *Serv1* για το πρώτο και το πέμπτο πείραμα: (α) ρυθμός μετάδοσης και (β) διέλευση**



**Σχήμα 6-18. Μελέτη της κίνησης που παράγεται από την υπηρεσία *Serv1* για το πρώτο και το τρίτο πείραμα: (α) ρυθμός μετάδοσης και (β) διέλευση**

Σαν μια δεύτερη παρατήρηση, μπορούμε να αναφέρουμε το γεγονός ότι η ροή, η οποία παρουσιάζει μεγάλος εύρος διακύμανσης και, συνεπώς, η κατανομή του μεγέθους των πακέτων έχει μεγάλη διασπορά, αναγκάζεται να περιορίσει το μέγεθος αυτών των διακυμάνσεων σε βάθος χρόνου, οπότε μακροπρόθεσμα απαιτείται το καλιμπράρισμα των χαρακτηριστικών μεγεθών δευτέρας τάξης για την κίνηση αυτή.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών, είναι φανερό ότι η συμπεριφορά της κίνησης TCP παίζει κρίσιμο ρόλο στην εξέλιξη της συνολικής κίνησης. Δεδομένου ότι ένας μεγάλος αριθμός εφαρμογών σήμερα στηρίζεται σε αυτό το πρωτόκολλο μεταφοράς, η εξασφάλιση και η διατήρηση του επιπέδου ποιότητας, σε επίπεδο καθυστέρησης, των απαιτητικών υπηρεσιών πραγματικού κυρίως χρόνου, οι οποίες στηρίζονται στο πρωτόκολλο UDP, αποτελεί ένα κρίσιμο όσο και προκλητικό παράγοντα διαμόρφωσης των μηχανισμών ελέγχου αποδοχής ροών κίνησης. Επίσης, είναι σημαντικό να μπορεί το δίκτυο να προσφέρει ένα ελάχιστο κατώφλι ρυθμού μετάδοσης και για τις TCP υπηρεσίες, οπότε η πρόκληση ενός μηχανισμού ελέγχου είναι να εξασφαλίσει ότι οι εισερχόμενες TCP υπηρεσίες μπορούν να επιτύχουν στην εξασφάλιση του ελάχιστου αυτού ρυθμού μετάδοσης.

### **6.5. Συμπεράσματα**

Μια σημαντική παράμετρος για την επίτευξη της λειτουργικής διασύνδεσης των μελλοντικών ασύρματων συστημάτων είναι η προδιαγραφή αξιόπιστων μηχανισμών ελέγχου αποδοχής των ανεξάρτητων ροών κίνησης και παροχής ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών. Για το λόγο αυτό, η παρακολούθηση της κίνησης και η ανάπτυξη μοντέλων προσέγγισής της αποτελεί ένα βασικό κομμάτι έρευνας. Στα πλαίσια αυτά, το παρόν κεφάλαιο εστίασε στην ανάπτυξη μοντέλων κίνησης, τα οποία στηρίζονται στα Μαρκοβιανά Μοντέλα Ροής Ρευστού MMFP. Έτσι, περιγράφηκαν τα χαρακτηριστικά των πηγών MMFP και δόθηκε η θεωρία για την αναλυτική εκτίμηση της επίδοσης των δικτυακών κόμβων, με βάση αυτά τα μοντέλα, μέσα από την παράθεση των εξισώσεων περιγραφής για τη συμπεριφορά της ουράς αναμονής. Επίσης, περιγράφηκε αναλυτικά ένα μοντέλο υπέρθεσης Μαρκοβιανών πηγών MMFP με κίνηση Poisson για την προσέγγιση της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας και εξαρτήσεις μεγάλης κλίμακας χρόνου. Δεδομένης της ανάλυσης αυτής, το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώθηκε με την παράθεση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του προσεγγιστικού αυτού μοντέλου, το οποίο λειτουργεί ικανοποιητικά στην περιοχή της ουράς αναμονής ενός συστήματος που προκύπτει από την ανάλυση των ποιοτικών κριτηρίων των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου.

### **6.6. Αναφορές**

- [1] Allan T. Andersen and Bo Friis Nielsen, “A Markovian Approach for Modeling Packet Traffic with Long-Range Dependence”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 16, No. 5, June 1998, pp 719-732.
- [2] S. Robert and J.-Y. Le Boudec, “On a Markov modulated chain exhibiting self-similarities over finite timescale,” Perf. Eval., vols. 27, 28, 1996, pp. 159–173.
- [3] Tadafumi Yoshihar, Shoji Kasahara and Yutaka Takahashi, “Practical Time-Scale Fitting of Self-Similar Traffic with Markov-Modulated Poisson Process”, Telecommunication Systems, Springer pub., Vol 17, No 1-2, May 2001, pp. 185–211.

- [4] S. Kasahara, “Internet Traffic Modeling: Markovian Approach to Self-Similar Traffic and Prediction of Loss Probability for Finite Queues”, IEICE Transactions on Communications, Vol. E84-B, No 8, August 2001, pp.2134-2141.
- [5] T. C. Yu and J. A. Silvester, “A four-state DMMPP for characterization multimedia traffic with short-term and long-term correlation,” Proc. Of IEEE ICC’99, vol. 2, September 1999, pp.880-885.
- [6] Antonio Nogueira, Paulo Salvador, Rui Valadas, and Antonio Pacheco, “Modeling Self-similar Traffic through Markov Modulated Poisson Processes over Multiple Time Scales”, Springer-Verlag, HSNMC 2003, LNCS 2720, 2003, pp. 550–560.
- [7] Shahram, Shah-Heydari and Tho Le-Ngoc, “MMPP models for multimedia traffic”, Telecommunication Systems, Springer pub., Vol. 15, No 3-4, September 2000 pp. 273–293.
- [8] Luca Muscariello, Marco Mellia, Michela Meo, Marco Ajmone Marsan and Renato Lo Cigno, “An MMPP-based hierarchical model of Internet traffic”, In IEEE international conference on communications (ICC) 2004 proceedings, 2004.
- [9] A. I. Elwalid and D. Mitra, “Effective bandwidth of general Markovian traffic sources and admission control of high speed networks”, IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 1, 1993, pp. 329–343.
- [10] Κίμων Κοντοβασίλης, «Συστήματα αναμονής με φορτίο εκρηκτικής κίνησης: Στοιχεία θεωρίας Μαρκοβιανών μοντέλων ροής ρευστού», Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος Έλεγχος Κίνησης και Διαχείριση Πόρων σε Δίκτυα Ολοκληρωμένων Υπηρεσιών, Νοέμβριος 1999.
- [11] Credo consortium, “Specification of generic experiment components”, Deliverable 6b, IST 2001-33093 Credo, February 2003.
- [12] W. Fischer and K. Meier-Hellstern, “The Markov-modulated Poisson process (MMPP) cookbook,” Perf. Eval., vol. 18, 1992, pp. 149–171.
- [13] Toni Janevski, “Traffic Analysis and Design of Wireless IP Networks”, Artech House, 2003, ISBN 1-58053-331-0.
- [14] Allan T. Andersen and Bo Friis Nielsen, “An Application of Superpositions of two state Markovian Sources to the Modelling of Self-similar Behaviour”, Proceedings of the INFOCOM '97- Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, pp.195-203.
- [15] F. Geerts and C. Blondia, “Superposition of Markov Sources and Long Range Dependence”, Proc. of the 4th International Conference on Broadband Communications (BC '98), 1998, pp. 550-562.

- [16] A. W. Berger, “On the index of dispersion for counts for user demand modeling,” presented at ITU, Madrid, Spain, June 27–29, 1994, AT&T Study Group 2, Question 17/2.
- [17] H. Heffes and D. M. Lucantoni, “A Markov Modulated Characterization of Packetized Voice and Data Traffic and Related Statistical Multiplexer Performance”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. SAC-4, No. 6, September 1986, pp. 856-868.
- [18] D. P. Heyman and T. V. Lakshman, “What are the Implications of Long-Range Dependence for VBR-Video Traffic Engineering?” IEEE Trans. Networking, vol. 4, no. 3, June 1996, pp. 301–17.
- [19] M. Grossglauser, D. N. C. Tse, “Time-scale decomposition approach to Measurement-Based Admission Control”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 11, Issue 4, August 2003, pp. 550-563
- [20] Roger Kalden and Sami Ibrahim, “Searching for Self-Similarity in GPRS”, Proc. of the 5th annual Passive & Active Measurement Workshop PAM2004, Antibes Juan-les-Pins, France, April 19-20, 2004.
- [21] Giuseppe Bianchi, “Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 18, No. 3, March 2000, pp.535-547.
- [22] Raul Murillo Garcia, Self-similar Network Traffic Generator tool, web site: <http://www.sesd.gcal.ac.uk/raulm/St-rtl.htm#SSTrafficGenerator>
- [23] [www.videolan.org](http://www.videolan.org)
- [24] <http://windump.polito.it/>
- [25] [www.perl.com](http://www.perl.com)
- [26] SELFIS (SELF-similarity analysis) tool web site: <http://www.cs.ucr.edu/~tkarag/Selfis/Selfis.html>

## 6.7. Παράρτημα

### 6.7.1. Περιγραφή μοντέλου Con για την προσέγγιση της κίνησης με εξαρτήσεις από μεγάλες κλίμακες χρόνου

Διάφορες μελέτες σχετικά με τη μεταβαλλόμενη κίνηση IP έχουν δείξει ότι η κατανομή του αριθμού των πακέτων που φθάνουν σε ένα κόμβο δικτύου έχει χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης όμοια με εκείνα μιας ασυμπτωτικής κίνησης αυτό-ομοιότητας. Μια τέτοια κίνηση μπορεί να περιγραφεί από τη συνάρτηση Συνδιασποράς του αριθμού των πακέτων που παράγονται από την κίνηση αυτή και φθάνουν σε μια τυχαία χρονοσχιμή του δικτύου. Η συνάρτηση αυτή συμπεριφέρεται ασυμπτωτικά, σύμφωνα με το νόμο της δύναμης που εκφράζεται από τη σχέση

$\text{cov}(k) = \psi_{\text{cov}} k^{-\beta}$ . Στη σχέση αυτή, το  $\psi_{\text{cov}}$  είναι ένας θετικός σταθερός αριθμός και είναι ένα απόλυτο μέτρο της διασποράς,  $k$  είναι το βήμα (lag) και  $\beta = 2 - 2H$  είναι η κλίση της καμπύλης και δίνεται από την παράμετρο  $H$ .

Έστω ότι για τις πηγές MMPP 2-καταστάσεων οι πίνακες ρυθμών ροής και μετάβασης δίνονται από τα ακόλουθα:

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{1i} & 0 \\ 0 & r_{2i} \end{pmatrix} \text{ και } M_i = \begin{pmatrix} -m_{1i} & m_{1i} \\ m_{2i} & -m_{2i} \end{pmatrix} \quad (6-23)$$

Έστω  $N_i(0, t)$  είναι ο αριθμός των αφίξεων των πακέτων από την  $i$  πηγή στο χρονικό διάστημα  $(0, t)$ . Η μεταβολή του αριθμού των αφίξεων (διασπορά) σε συνάρτηση με το χρόνο είναι η ακόλουθη:

$$\text{Var}\{N_i(0, t)\} = (\bar{r}_i + 2k_{1i})t - 2 \frac{k_{1i}}{k_{2i}} (1 - e^{-k_{2i}t}) \quad (6-24)$$

$$\text{όπου } \bar{r}_i = \frac{m_{2i}r_{1i} + m_{1i}r_{2i}}{m_{1i} + m_{2i}}, \quad k_{1i} = (r_{1i} - r_{2i})^2 \frac{m_{1i}m_{2i}}{(m_{1i} + m_{2i})^3} \text{ και } k_{2i} = m_{1i} + m_{2i}$$

Εξετάζουμε τώρα τη συνάρτηση Συνδιασποράς (covariance function) του ρυθμού αφίξεων για την  $i$  πηγή. Σε ένα χρονικό διάστημα  $\Delta t$ , ο αριθμός των πακέτων που παράγονται μεταξύ δύο χρονοσχισμών, δεδομένου ότι μεταξύ τους υπάρχουν  $k-1$  χρονοσχισμές, παρουσιάζει συνάρτηση Συνδιασποράς που δίνεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$\gamma_i(k) = \frac{(r_{1i} - r_{2i})^2 m_{1i} m_{2i} e^{-((m_{1i} + m_{2i})(k-1)\Delta t)}}{(m_{1i} + m_{2i})^4} (1 - 2e^{-((m_{1i} + m_{2i})\Delta t)} + e^{-((m_{1i} + m_{2i})2\Delta t)}) \quad (6-25)$$

Κάνοντας την υπόθεση ότι  $(m_{1i} + m_{2i})\Delta t \ll 1$ , το δεξί σκέλος της παραπάνω εξίσωσης αναλύεται κατά Taylor, οπότε προκύπτει η ακόλουθη μορφή:

$$\gamma_i(k) \approx (\Delta t)^2 k_{1i} k_{2i} e^{-(k_{2i}(k-1)\Delta t)} \quad (6-26)$$

Συνεπώς, οι πρώτης και δευτέρας τάξεως ιδιότητες της ακολουθίας αφίξεων πακέτων μπορούν να προσδιοριστούν από τις τρεις παραμέτρους, δηλαδή  $\bar{r}_i$ ,  $k_{1i}$  και  $k_{2i}$ . Όμως μια MMPP διαδικασία 2 καταστάσεων καθορίζεται από τέσσερις παραμέτρους, άρα απομένει ένας βαθμός ελευθερίας, ο οποίος μπορεί να καθορίσει ένα σύνολο από διαφορετικά MMPP μοντέλα, τα οποία, όμως, έχουν πανομοιότυπες πρώτης και δευτέρας τάξεως ιδιότητες.

Για την αποφυγή των φαινομένων θορύβου κατά τον υπολογισμό της συνάρτησης Συνδιασποράς από τα πραγματικά δείγματα, υιοθετείται η ασυμπτωτική καμπύλη  $\text{cov}(k) = \psi_{\text{cov}} k^{-\beta}$ , η οποία προσεγγίζει τη δομή της συνάρτησης Συνδιασποράς. Βέβαια, η χρήση της πραγματικής καμπύλης



είναι θεμιτή, αρκεί αυτή να είναι μια μονότονη συνάρτηση, η οποία φθίνει πιο αργά από την εκθετική καμπύλη. Ο σκοπός είναι να επιτευχθεί η προσέγγιση της δομής της συνάρτησης Συνδιασποράς που παράγεται από την υπέρθεση ανεξάρτητων MMPP πηγών με την ασυμπτωτική καμπύλη, δηλαδή:

$$\gamma(k) = \sum_{i=1}^d \gamma_i(k) = \psi_{\text{cov}} k^{-\beta}, \quad 1 \leq k \leq 10^n \quad (6-27)$$

όπου το  $n$  δείχνει τον αριθμό χρονικών κλιμάκων για τις οποίες επιθυμούμε να μοντελοποιήσουμε την κίνηση.

Με βάση τα παραπάνω, η διαδικασία προσέγγισης βασίζεται στις ακόλουθες παραμέτρους εισόδου, οι οποίες προκύπτουν από την ανάλυση της πραγματικής ακολουθίας δειγμάτων:

- Το μέσο ρυθμό άφιξης πακέτων
- Τις τιμές της αυτοσυσχέτισης για όλα τα βήματα
- Την τιμή της παραμέτρου  $H$ , που προσδιορίζει την αυτό-ομοιότητα της κίνησης
- Τον αριθμό των ανεξάρτητων πηγών MMPP που υπερτίθενται
- Τον αριθμό των χρονικών κλιμάκων για τη μοντελοποίηση

Θέλουμε να επιτύχουμε τη μεταβλητότητα σε διάφορες κλίμακες χρόνου, κάτι το οποίο θα πρέπει να απεικονιστεί στις επιλογές των χρονικών σταθερών για κάθε ένα μεμονωμένο μοντέλο MMPP, δηλαδή στην επιλογή των ρυθμών μετάβασης  $m_{1i}$  και  $m_{2i}$ . Επιλέγουμε τις παραμέτρους αυτές, ώστε να διαμορφώνονται λογαριθμικά, σύμφωνα με ένα παράγοντα  $\alpha$ , όπως δείχνει η σχέση:  $m_{ji} = \alpha^{1-i} m_{j1}$ ,  $j=1,2$ . Οι παράμετροι εισόδου αφορούν στη μικρότερη κλίμακα χρόνου, η οποία μας ενδιαφέρει και η οποία είναι το επίπεδο πακέτου. Συνεπώς, όλες οι παράμετροι εισόδου παίρνουν τιμές ως προς αυτήν την κλίμακα. Μέσα από τη διαδικασία αυτή, σκοπεύουμε να βρούμε τμηματικά τους ρυθμούς αφίξεων ανά κατάσταση  $r_{1i}$  και  $r_{2i}$  και τον λογαριθμικό παράγοντα χώρου  $\alpha$ , διατηρώντας, όμως σταθερό το αρχικά εκτιμώμενο άθροισμα ( $k_{2i}$ ) των χρονικών παραμέτρων διαμόρφωσης  $m_{1i}$  και  $m_{2i}$ .

Η διαδικασία υπολογισμού της δομής της συνάρτησης Συνδιασποράς για την προσέγγιση της κίνησης αυτό-ομοιότητας ακολουθεί τα παρακάτω στάδια:

*Βήμα 1:* Το πρώτο βήμα είναι να βρεθεί ο λογαριθμικός παράγοντας χώρου  $\alpha$ . Προς αυτήν την κατεύθυνση, απαιτείται η χρήση του αριθμού  $d$  των ανεξάρτητων MMPP πηγών, οι οποίες υπερτίθενται για τη μοντελοποίηση της πραγματικής κίνησης, και ο αριθμός  $n$  των χρονικών κλιμάκων για τις οποίες επιθυμούμε να μοντελοποιήσουμε την κίνηση. Η παράμετρος  $\alpha$  δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha = 10^{\frac{n}{d-1}}, \quad d > 1 \quad (6-28)$$

Οι παράμετροι  $d$  και  $n$  πρέπει να επιλεγούν, έτσι ώστε  $\alpha > 5$ , λόγω μιας θεμελιώδους υπόθεσης που γίνεται στο επόμενο στάδιο. Με βάση την  $m_{ji} = \alpha^{1-i} m_{j1}$ , μπορούμε από αυτό το βήμα να υπολογίσουμε τις τιμές των χρονικών παραμέτρων διαμόρφωσης  $m_{1i}$  και  $m_{2i}$ .

*Βήμα 2:* Το δεύτερο βήμα καθορίζει τους ρυθμούς αφίξεων πακέτων για κάθε κατάσταση των  $d$  MMPP μοντέλων. Οι παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιούνται, εδώ, είναι ο αριθμός  $d$  των ανεξάρτητων MMPP πηγών, ο αριθμός  $n$  των χρονικών κλιμάκων για τις οποίες επιθυμούμε να μοντελοποιήσουμε την κίνηση, ο λογαριθμικός παράγοντας χώρου  $a$  και η παράμετρος Hurst  $H$ .

Χωρίς απώλεια της γενικότητας, εργαζόμαστε μόνο με τιμές  $r_{1i} > r_{2i}$ . Όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις (6-24) και (6-25), οι συναρτήσεις χρόνου της διασποράς και Συνδιασποράς του αριθμού των αφικνούμενων πακέτων από κάθε MMPP εξαρτώνται από τον παράγοντα  $(r_{1i} - r_{2i})^2$ , το οποίο είναι αναμενόμενο, καθώς η υπέρθεση των MMPP πηγών μπορεί να ερμηνευθεί ως υπέρθεση IPP πηγών και μιας Poisson διαδικασίας. Σε μια τέτοια περίπτωση, ο ρυθμός άφιξης των IPP μοντέλων είναι  $r_i = r_{1i} - r_{2i}$ , ενώ για τη διαδικασία Poisson

$$\lambda_{poisson} = \sum_{i=1}^d r_{2i}. \text{ Έτσι, μπορούμε να υπολογίσουμε τις παραμέτρους } r_i \text{ μέχρι μια σταθερά } \kappa,$$

ενώ το διάνυσμα του ρυθμού αφίξεων ανά IPP διαδικασία είναι  $\vec{r} = \kappa \vec{\phi}$ . Εάν θέσουμε  $\Delta t = 1$  και με την υπόθεση που έχουμε κάνει ότι  $(m_{1i} + m_{2i})\Delta t \ll 1$ , η δομή της συνολικής συνάρτησης Συνδιασποράς που προκύπτει από την υπέρθεση  $d$  ανεξάρτητων IPP διαδικασιών γίνεται:

$$\gamma_i(k) = \frac{(\kappa\phi)^2 m_{2i}^2 e^{-((m_{1i}+m_{2i})(k-1)\Delta t)}}{(m_{1i} + m_{2i})^2} \quad (6-29)$$

Ένα βασικό στοιχείο σε αυτό το μέρος της διαδικασίας είναι ότι η συνάρτηση Συνδιασποράς δε μεταβάλλεται λογαριθμικά με την αύξηση του αριθμού των βημάτων lags μέχρι μία τιμή του  $k$ , για την οποία  $(m_{1i} + m_{2i})k \approx 1$ . Από εκεί και μετά η συνάρτηση αυτή φθίνει απότομα. Αυτό μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τα σχετικά πλάτη του διανύσματος  $\phi$ , τα οποία και μπορούμε να κανονικοποιήσουμε ως προς την τιμή που αντιστοιχεί στη  $d$  πηγή ( $\phi_d^2 = 1$ ).

Ο σκοπός αυτού του σταδίου είναι η προσέγγιση της συνολικής συνάρτησης Συνδιασποράς προς την ασυμπτωτική συνάρτηση  $\text{cov}(k) = \psi_{\text{cov}} k^{-\beta}$ . Η προσέγγιση αυτή πραγματοποιείται σε  $d$  σημεία, τα οποία χαρακτηρίζονται από την σχέση  $(m_{1i} + m_{2i})k \approx 1$  (υπενθυμίζουμε ότι

$i = 1, 2, \dots, d$ ). Με βάση αυτή τη διαδικασία εκτιμούνται τα σχετικά πλάτη του διανύσματος  $\phi$  για καθεμιά από τις  $d$  IPP πηγές.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονιστεί ότι δεν είναι δυνατή η προσαρμογή σε όλα τα  $d$  σημεία, επομένως η αντίστοιχη τιμή του πλάτους για την αντίστοιχη συνιστώσα του διανύσματος  $\phi$  είναι μηδέν. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η τιμή της παραμέτρου Hurst είναι σχετικά υψηλή ( $H > 0.8$ ). Οι πηγές, στις οποίες αντιστοιχούν αυτά τα μηδενικά πλάτη καλούνται ανενεργές. Έστω  $d_0$  ο αριθμός τους, τότε ο αριθμός των ενεργών IPP πηγών είναι  $d - d_0$ . Επειδή η μία από τις παραμέτρους εισόδου είναι ο αριθμός των ενεργών IPP πηγών, συνεπάγεται ότι εάν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου προκύψει  $d_0 > 0$ , προσαυξάνουμε τον αριθμό των υπερτιθέμενων IPP πηγών, ώστε τελικά να προκύψει μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου αριθμός ενεργών πηγών ίσος με  $d$ .

**Βήμα 3:** Το τρίτο βήμα είναι να καθοριστεί η σταθερά  $\kappa$  από το προηγούμενο βήμα και ο ρυθμός αφίξεων πακέτων από την κίνηση Poisson. Για τον σκοπό αυτό, απαιτείται η τιμή της αυτοσυσχέτισης ενός βήματος  $ro$ , ο μέσος ρυθμός της πραγματικής κίνησης  $\bar{\lambda}$  και τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται στα προηγούμενα βήματα. Έστω πάλι ότι  $\Delta t = 1$  και έστω  $\eta^2$  είναι ο απαραίτητος βαθμός κλιμάκωσης για τη συνολική συνάρτηση Συνδιασποράς, που προκύπτει από τις  $d$  υπερτιθέμενες πηγές με ρυθμό κίνησης που ορίζεται από το διάνυσμα  $\phi$ . Η τιμή της αυτοσυσχέτισης ενός βήματος και για τις  $d$  υπερτιθέμενες πηγές, η οποία πρέπει να ικανοποιεί την τιμή που προκύπτει από την ανάλυση των πραγματικών δειγμάτων, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$ro = \frac{\sum_{i=1}^d \gamma_i(1)}{\sum_{i=1}^d Var\{N_i(0, t)\}} = \frac{\eta^2 \left( \sum_{i=1}^d \phi_i^2 m_{1i} m_{2i} (m_{1i} + m_{2i})^{-4} (1 - e^{-(m_{1i} + m_{2i})})^2 \right)}{\bar{\lambda} + \eta^2 \left( \sum_{i=1}^d 2\phi_i^2 m_{1i} m_{2i} (m_{1i} + m_{2i})^{-4} ((m_{1i} + m_{2i}) - (1 - e^{-(m_{1i} + m_{2i})})) \right)} \quad (6-30)$$

από την οποία καταλήγουμε στον υπολογισμό του  $\eta$ :

$$\eta = \sqrt{\frac{4ro \bar{\lambda}}{\sum_{i=1}^d \phi_i^2 k_{2i}^{-2} \left( (1 - e^{-k_{2i}})^2 - 2ro (k_{2i} - (1 - e^{-k_{2i}})) \right)}} \quad (6-31)$$

Από την παραπάνω σχέση γίνεται φανερό πως η διαδικασία αυτή ισχύει για τιμές του  $ro$ , οι οποίες ικανοποιούν την συνθήκη:

$$2ro \left( \sum_{i=1}^d \phi_i^2 m_{1i} m_{2i} (m_{1i} + m_{2i})^{-4} ((m_{1i} + m_{2i}) - (1 - e^{-(m_{1i} + m_{2i})})) \right) > \sum_{i=1}^d \phi_i^2 m_{1i} m_{2i} (m_{1i} + m_{2i})^{-4} (1 - e^{-(m_{1i} + m_{2i})})^2 \quad (6-32)$$

Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να βρεθεί η κατάλληλη τιμή του  $ro$  ή να επαναληφθεί η όλη διαδικασία για χαμηλότερες αρχικές τιμές των  $m_{1i}$  και  $m_{2i}$ .

Ορίζουμε σαν  $L = \eta \sum_{i=1}^d \phi_i / 2$ . Αν  $\bar{\lambda} \geq L$ , τότε μπορούμε να πάρουμε μια απευθείας λύση του προβλήματος για τον προσδιορισμό του ρυθμού της κίνησης Poisson. Στην περίπτωση αυτή  $\kappa = \eta$  και οι ρυθμοί αφίξεων των  $d$  IPP πηγών προκύπτουν από  $\vec{r} = \kappa \vec{\phi}$ , ενώ ο αντίστοιχος ρυθμός της κίνησης Poisson είναι:

$$\lambda_{poisson} = \bar{\lambda} - \kappa \sum_{i=1}^d \phi_i / 2 \quad (6-33)$$

Αν  $\bar{\lambda} < L$ , τότε δεν έχουμε απευθείας λύση. Στην περίπτωση αυτή, δεδομένου ότι  $\lambda_{poisson} = 0$ , χρειάζεται να αναπροσαρμόσουμε τις τιμές των  $k_{1i} = \frac{(\eta \phi_i / 2)^2}{k_{2i}}$  και  $k_{2i} = m_{1i} + m_{2i}$ . Με απλή ανάλυση, που παρουσιάζεται στο [1], καταλήγουμε στο ακόλουθο σύνολο εξισώσεων:

$$\begin{aligned} m_{1i} &= \frac{L^2}{L^2 + \bar{\lambda}^2} k_{2i} \\ m_{2i} &= k_{2i} - m_{1i} \\ r_i &= \phi_i \frac{\bar{\lambda}^2 + L^2}{\bar{\lambda} \sum_{i=1}^d \phi_i} \end{aligned} \quad (6-34)$$

## Κεφάλαιο 7

### Έλεγχος Αποδοχής Ροών

#### 7.1. Εισαγωγή

Με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε για την προσέγγιση των χαρακτηριστικών της κίνησης διαδικτύου, η οποία παρουσιάζει χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας και την εξέταση του ασύρματου καναλιού, το κεφάλαιο αυτό εισάγει την έννοια του Ελέγχου Αποδοχής των ανεξάρτητων ροών κίνησης, που παράγονται από την πρόσβαση των κινητών χρηστών στις προσφερόμενες υπηρεσίες μέσα από ασύρματα δίκτυα IP. Η απαίτηση για την εξασφάλιση των κριτηρίων ποιότητας μπορεί να ικανοποιηθεί μέσα από το σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός ευέλικτου και αποδοτικού μηχανισμού Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Ένα τέτοιο σύστημα θα μπορεί να παρακάμπτει τα προβλήματα των παραδοσιακών μηχανισμών που διέπονται από τη στατικότητα των παραμέτρων ή την πολυπλοκότητα εφαρμογής και την αστοχία τους στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της κίνησης και του ασύρματου δικτύου.

Η παροχή ποιότητας υπηρεσίας μέσα από τον έλεγχο των εισερχόμενων ροών έχει αναπτυχθεί σε πολλά τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Όμως, η εισαγωγή της τεχνολογίας διαδικτύου κατέστησε τους μηχανισμούς αυτούς καταρχήν ανεφάρμοστους λόγω της ίδιας της φύσης του πρωτοκόλλου IP. Έτσι, στα ενσύρματα δίκτυα IP, για την παροχή υπηρεσιών με συγκεκριμένες απαιτήσεις σε επίπεδο ποιότητας, εφαρμόστηκαν τεχνικές επιβολής προτεραιοτήτων, όπως για παράδειγμα οι μηχανισμοί DiffServ και RSVP, οι οποίοι έχουν εφαρμογή και στα ασύρματα δίκτυα (π.χ. στο σύστημα UMTS), μέσω της προσάρτησης τέτοιων τεχνικών στη στοίβα πρωτοκόλλων του ασύρματου κομματιού επικοινωνίας [1]. Ωστόσο, λόγω της εκρηκτικότητας των πηγών κίνησης και της στατιστικής τους πολυπλεξίας μέσα στα ασύρματα δίκτυα, για την εξασφάλιση των ποιοτικών κριτηρίων του συνόλου των υπηρεσιών, που αφορούν, κυρίως, στην εγγύηση του ρυθμού μετάδοσης και της καθυστέρησης, η ιδέα της υλοποίησης αλγορίθμων αποδοχής των ροών IP συνεχίζει να απασχολεί την επιστημονική κοινότητα.

Όπως ειπώθηκε παραπάνω, τα παραδοσιακά συστήματα ελέγχου αποδοχής διακρίνονται από στατικότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, αρχικά, η κίνηση στα παραδοσιακά δίκτυα ήταν σταθερή (Constant Bit Rate - CBR) και, συνεπώς, οι περιγραφείς κίνησης που καθορίζονταν από τις πηγές επαρκούσαν. Η εισαγωγή μεταβλητής κίνησης (Variable Bit Rate – VBR) αλλά και η

υιοθέτηση του πρωτοκόλλου IP οδήγησε τους ερευνητές στην ανάπτυξη μηχανισμών παρακολούθησης και μέτρησης της κίνησης και στην υλοποίηση αλγορίθμων αποδοχής που βασίζονταν στις μετρήσεις αυτές. Αυτό, όμως, συνεπάγεται την ανάπτυξη μεθόδων πρόβλεψης της κίνησης.

Έτσι, στα [2][3] πραγματοποιείται μία ανασκόπηση των αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής, οι οποίοι στηρίζονται στις μετρήσεις κίνησης για να εγγυηθούν τα κριτήρια ποιότητας. Τα κριτήρια αυτά αφορούν στην καθυστέρηση, την απώλεια δεδομένων και το μήκος της ουράς στους ταμειευτές των δικτύων. Το [4] παρουσιάζει έναν αλγόριθμο για την εξασφάλιση πολλαπλών ποιοτικών κριτηρίων ρυθμού μετάδοσης και καθυστέρησης. Όμως, η ανάλυση αυτή στηρίζεται στην ανίχνευση της σχέσης μεταξύ της καμπύλης άφιξης και της καμπύλης του ρυθμού εξυπηρέτησης και, επομένως, η ανάλυση αυτή απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό κόστος και είναι ασύμφορη. Επίσης, το [5] χρησιμοποιεί τα στατιστικά στοιχεία που υπολογίζονται από τα πραγματικά δείγματα που συλλέγονται από το δίκτυο και εκτιμά την κατανομή της ουράς αναμονής. Έπειτα, συγκρίνει αυτήν την κατανομή με μία προεπιλεγμένη κατανομή της ουράς αναμονής, ώστε να υπολογίσει την απαιτούμενη προσαρμογή του εύρους ζώνης. Αυτό συνεπάγεται ότι μία τέτοια μέθοδος υπόκειται σε λάθη που οφείλονται στην εκτίμηση της γνώσης της πραγματικής κατανομής της ουράς αναμονής του συστήματος.

Προχωρώντας περισσότερο στην εξέταση των υπαρχόντων μηχανισμών ελέγχου, το [6] υλοποιεί έναν αλγόριθμο αποδοχής για ανομοιογενείς υπηρεσίες με βάση τη δέσμευση πόρων. Ο αλγόριθμος αυτός εξαρτάται από το μοντέλο κινητικότητας των χρηστών. Ακόμα, το [7] στηρίζεται στην ανάπτυξη ενός μηχανισμού fuzzy τεχνικής για να κάνει μία πρόβλεψη της επίδρασης της μελλοντικής κίνησης. Η ανάλυση που παρατίθεται εκεί είναι λίγο πολύπλοκη και εισάγει μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Το [8] περιγράφει έναν αλγόριθμο αποδοχής για ροές TCP, ο οποίος στηρίζεται σε κίνηση Poisson. Η βασική ιδέα επικεντρώνεται στο να προβλεφθεί το εύρος ζώνης ανά σύνδεση σε μία δεδομένη χρονική στιγμή, με βάση την αντίστοιχη τιμή του εύρους ζώνης την προηγούμενη χρονική στιγμή. Η πρόβλεψη αυτή στηρίζεται στην εύρεση των κατάλληλων τιμών για ένα εκθετικό παράγοντα, με βάση τον οποίο πραγματοποιείται η διόρθωση του εύρους ζώνης.

Γενικότερα, το [9] παρουσιάζει ένα εύκολα υλοποιήσιμο αλγόριθμο, ο οποίος στηρίζεται στην εύρεση του εύρους ζώνης, με βάση μία Gaussian συνάρτηση για την πρόβλεψη του ρυθμού μετάδοσης. Το μειονέκτημα αυτού του αλγορίθμου είναι ότι δε λαμβάνει υπόψη του την παρουσία ταμειευτήρων στους κόμβους των δικτύων και, έτσι, προϋποθέτει την υπερεκτίμηση των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης των εκρηκτικών πηγών. Την εκμετάλλευση των φαινομένων αποθήκευσης εκρήξεων παραλείπει και η ανάλυση που παρουσιάζεται [10]. Τέλος, τα [11] και [12] παρουσιάζουν μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής, οι οποίοι στηρίζονται στην Fractional Brownian Motion κίνηση και την ανάλυση μήκους κύματος. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι μηχανισμοί αυτοί δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι και παρουσιάζουν αυξημένη πολυπλοκότητα.

Με αναφορά στην παραπάνω βιβλιογραφία, το κεφάλαιο αυτό προδιαγράφει την αρχιτεκτονική και τα βασικά δομικά κομμάτια ενός αποτελεσματικού, ευέλικτου και δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών κίνησης που παράγονται από πολλαπλές IP υπηρεσίες. Ο σκοπός αυτού του συστήματος είναι να ενσωματώσει σε ένα σύστημα τη στατιστική ανάλυση με τους μηχανισμούς παρακολούθησης των πηγών κίνησης και να τις ολοκληρώσει με τις διαδικασίες παρακολούθησης της χρονικά μεταβαλλόμενης διαθέσιμης χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων. Αν και ανάλογα συστήματα έχουν παρουσιαστεί στα [13][14], το σύστημα αυτό αποτελεί μία καινοτομία, καθώς χρησιμοποιεί μηχανισμούς παρακολούθησης τόσο της προσφερόμενης κίνησης, η οποία συνοδεύεται από τους αντίστοιχους περιγραφείς κίνησης και τα ζητούμενα επίπεδα ποιότητας, όσο και της διαθέσιμης χωρητικότητας, η οποία διαμορφώνεται χρονικά ανάλογα την ποιότητα του ασύρματου μέσου, όπως έχει, ήδη, αναλυθεί στο κεφάλαιο 3. Αντιθέτως, το σύστημα που παρουσιάζεται στο [13] εστιάζει μόνο στην αξιοποίηση των δεδομένων του ασύρματου καναλιού, ενώ το [14] μένει στην αποδοχή των συνδέσεων και δεν υπεισέρχεται στα χαρακτηριστικά των ροών, με αποτέλεσμα να υπολείπεται στην αξιόπιστη αποδοχή ροών που απαιτούν εγγυήσεις ποιότητας σε επίπεδο πακέτων.

Η επιτυχία του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών έγκειται στην απλότητα των μεθόδων που χρησιμοποιεί για τη μοντελοποίηση τόσο της κίνησης όσο και της διαθέσιμης χωρητικότητας του ασύρματου δικτύου, οι οποίες πραγματοποιούνται σε χωριστές παράλληλες λειτουργίες. Αντίθετα, σε άλλες εργασίες στη βιβλιογραφία γίνεται προσπάθεια ενοποίησης των στατιστικών χαρακτηριστικών των πηγών κίνησης και του ασύρματου καναλιού, με αποτέλεσμα την πολυπλοκότητα του τελικού μοντέλου [15][16][17]. Επίσης, είναι σημαντικό οι προδιαγραφές ενός τέτοιου συστήματος να έχουν ευρεία εφαρμογή και να μην περιορίζονται στα χαρακτηριστικά ενός μόνο δικτύου, όπως συμβαίνει με τον αλγόριθμο αποδοχής που παρουσιάζεται στο [18] και αναφέρεται μόνο σε ένα δίκτυο WLAN και την υποστήριξη των υπηρεσιών VoIP (Voice over IP).

Το παρόν κεφάλαιο κάνει μία εισαγωγή στις απαιτήσεις των μηχανισμών ελέγχου αποδοχής, με ιδιαίτερη έμφαση στα χαρακτηριστικά της κίνησης IP και τη μορφολογία του ασύρματου καναλιού, τα οποία επιδρούν σημαντικά στην επίδοση τέτοιων μηχανισμών. Έπειτα, παρουσιάζει τη γενική θεωρία της Συνάρτησης του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης και αναπτύσσει την καταλληλότητα αυτής της μεθόδου στο να αντιμετωπίζει τις απαιτήσεις ενός συστήματος ελέγχου αποδοχής με απλούς μηχανισμούς. Επίσης, οριοθετεί το πεδίο εφαρμογής του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών και ορίζει το πρόβλημα της διαχείρισης του μεγέθους των ταμειυτήρων στα ασύρματα δίκτυα IP για την εξυπηρέτηση του προσφερόμενου φορτίου. Το πρόβλημα αυτό έγκειται στον έλεγχο της αποδοχής των ροών κίνησης που μπορούν να γίνουν δεκτές στον υπό εξέταση κόμβο δικτύου, ώστε να εγγυηθεί η ποιότητα των ζητούμενων υπηρεσιών, με κριτήρια την καθυστέρηση και το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Σημειώνεται ότι το πρόβλημα αυτό αφορά στην περίπτωση των συνδέσεων κάτω ζεύξη (downlink).

Έχοντας παρουσιάσει το γενικό πλαίσιο του εξεταζόμενου προβλήματος, το κεφάλαιο προχωρά σε μία αναλυτική περιγραφή της αρχιτεκτονικής του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Η περιγραφή αυτή περιλαμβάνει την ανάλυση των βασικών διαχειριστικών οντοτήτων του συστήματος και την οριοθέτηση των λειτουργιών που επιτελούνται από κάθε ένα από αυτά ξεχωριστά. Το σύστημα αυτό διακρίνεται για την ευελιξία του στο να αντιμετωπίζει τα προβλήματα της σύγχρονης εποχής, σχετικά με την εγκυρότητα των αποφάσεων των μηχανισμών αποδοχής, και λαμβάνει υπόψη του τη φύση του ασύρματου περιβάλλοντος, μέσα από την ανατροφοδότηση στον αλγόριθμο αποδοχής των νέων τιμών των παραμέτρων που συμβάλλουν στη λήψη των συγκεκριμένων αποφάσεων.

## 7.2. Απαιτήσεις Ελέγχου Αποδοχής

Ο κύριος στόχος του ελέγχου αποδοχής κλήσεων (Call Admission Control – CAC) για τα δίκτυα επόμενης γενιάς, τα οποία περιλαμβάνουν τα ασύρματα δίκτυα ως δίκτυα πρόσβασης και το δίκτυο IP σαν δίκτυο πυρήνα, είναι η εγκατάσταση και υποστήριξη ποικίλων υπηρεσιών με διαφορετικά χαρακτηριστικά κίνησης και απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Το CAC χρησιμοποιείται στους σταθμούς βάσης των ασύρματων δικτύων για να προβλέψει την επίδοσή τους υπό την φόρτωση με ετερογενείς ροές κίνησης. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται η περιγραφή ενός συνόλου των χαρακτηριστικών της εισερχόμενης κίνησης, ώστε οι αποφάσεις αποδοχής που λαμβάνονται από τους μηχανισμούς να είναι κατά το δυνατόν έγκυροι.

Σε γενικές γραμμές, ένας αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής στα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιείται για [19][20]:

- ❑ Να εξασφαλίσει έναν αποδεκτό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.
- ❑ Να εγγυηθεί την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας σε επίπεδο πακέτου.
- ❑ Να μεγιστοποιήσει το κέρδος του Παρόχου Δικτυακών Πόρων, ο οποίος υλοποιεί ένα τέτοιο μηχανισμό.
- ❑ Να μοιράσει τους δικτυακούς πόρους με δίκαιο τρόπο.
- ❑ Να εγγυηθεί ένα συγκεκριμένο ποσοστό της πιθανότητας απόρριψης κλήσεων σε εξέλιξη (dropping rate).
- ❑ Να δώσει προτεραιότητα σε ορισμένες κλάσεις χρηστών.
- ❑ Να εξασφαλίσει την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος ( $SIR$ ,  $E_b/I_o$ , ή  $BER$ ).

Ο στόχος των μελλοντικών ασύρματων συστημάτων είναι η ολοκλήρωση των διαδικασιών ελέγχου αποδοχής με την κατάλληλη διαχείριση του ραδιοφάσματος αλλά και γενικότερα των ασύρματων πόρων (Radio Resource Management - RRM) [21]. Οι λειτουργίες RRM περιλαμβάνουν:

- ❑ Την ανάθεση καναλιών (χρονοσχιμές ή συχνότητες).



- ❑ Την ανάθεση χρηστών σε σταθμούς βάσης.
- ❑ Τη διαχείριση των ταμιευτήρων και τον προγραμματισμό των πακέτων.
- ❑ Τον έλεγχο της εκπεμπόμενης ισχύος σήματος.
- ❑ Τη δέσμευση εύρους ζώνης για την ικανοποίηση των αναγκών των εισερχόμενων υπηρεσιών.

Ο αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής αποτελεί ένα μηχανισμό για την εξασφάλιση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών. Η επιλογή του κατάλληλου μηχανισμού υποστήριξης του QoS είναι άμεσα συνδεδεμένη με τις απαιτήσεις που ορίζονται για την παρεχόμενη ποιότητα. Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας, ο αλγόριθμος αποδοχής θα πρέπει να μπορεί να εξασφαλίσει έναν αποδεκτό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για όλες τις υπηρεσίες που πρέπει να υποστηριχθούν από το συγκεκριμένο δίκτυο (ακόμα και για τις ροές TCP [22][23], οι οποίες θεωρούνται και αντιμετωπίζονται σαν υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας) και να εγγυηθεί την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας σε επίπεδο πακέτου, όσον αφορά στην καθυστέρηση που αυτά υφίστανται κατά τη δρομολόγησή τους μέσα από τον ταμιευτήρα του δικτύου. Το [24] αναφέρει μία περίπτωση αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής, με βάση την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος. Αυτές οι απαιτήσεις του μηχανισμού παροχής QoS εξυπηρετούν τις ανάγκες ενός σύνθετου ασύρματου περιβάλλοντος, όπως περιγράφεται στο [25]. Παράλληλα, στα [26][27] δίνεται η περιγραφή της αρχιτεκτονικής QoS για το ασύρματο σύστημα του [25] και ορίζεται η ανάγκη υλοποίησης ενός μηχανισμού ελέγχου αποδοχής, ο οποίος θα προσανατολίζεται στην εγγύηση της παροχής του στατιστικού QoS. Επίσης, στο [26] δίνεται μία σύγκριση της αρχιτεκτονικής αυτής με άλλες παρόμοιες που έχουν αναπτυχθεί και οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικότερα στα [28][29][30][31][32].

Κατά καιρούς στην παγκόσμια βιβλιογραφία έχει προταθεί η έννοια του ισοδύναμου εύρους ζώνης ως η καταλληλότερη μορφή περιγραφής του εύρους ζώνης που απαιτείται από μια ροή, η οποία εμπερικλείει τα αναγκαία χαρακτηριστικά της ροής για την αξιοποίησή τους από τους μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής. Η λήψη αποφάσεων σχετικά με τον εάν μια εισερχόμενη κίνηση μπορεί να υποστηριχθεί από μια συγκεκριμένη δικτυακή τεχνολογία, η οποία έχει ήδη εγκατεστημένο ένα δεδομένο φορτίο κίνησης, πραγματοποιείται με τη σύγκριση του συνολικού ποσού του απαιτούμενου εύρους ζώνης της ήδη εγκατεστημένης κίνησης και της νεοεισερχόμενης με τη διαθέσιμη ικανότητα συνδέσεων (χωρητικότητα) του συγκεκριμένου ασύρματου δικτύου. Εδώ, πρέπει να τονιστεί η διαφορά μεταξύ της διαθέσιμης ικανότητας συνδέσεων στα ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα. Ενώ, στην πρώτη περίπτωση, η χωρητικότητα του δικτύου εκφράζει και τη μέγιστη ικανότητά του να μεταφέρει δεδομένα, στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων κάτι τέτοιο δεν υφίσταται, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του ασύρματου καναλιού, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 3-7 του κεφαλαίου 3.

Στα [33][34][35], περιγράφονται οι δύο βασικές ιδιότητες που αποδίδονται στο ισοδύναμο εύρος ζώνης. Αυτές είναι ότι το ισοδύναμο εύρος ζώνης μιας ροής είναι ανεξάρτητο από τις άλλες ροές, με τις οποίες αναμιγνύεται, και η τιμή του ισοδύναμου εύρους ζώνης δύο ανεξάρτητων ροών

κίνησης ισούται με το άθροισμα των ισοδύναμων εύρων ζώνης των ανεξάρτητων ροών που υπερτίθενται για να δώσουν τη συνολική κίνηση.

Ωστόσο, το μεγάλο πρόβλημα που υπεισέρχεται αφορά στον αποτελεσματικό υπολογισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου εύρους ζώνης και στο γεγονός ότι οι μέθοδοι προσέγγισής των δεν πρέπει να είναι σύνθετοι, αλλά απλοί, καθώς πραγματοποιούνται σε πραγματικό χρόνο. Η ακρίβεια και η δυνατότητα εφαρμογής των διαφόρων μεθόδων υπολογισμού του ισοδύναμου εύρους ζώνης εξαρτώνται πολύ από τις υποθέσεις που γίνονται στη διαμόρφωση των μοντέλων αναμονής. Δεδομένου ότι συνήθως γίνονται απλουστευμένες υποθέσεις, ώστε η ανάλυση των συστημάτων αναμονής να είναι εύκολη, αυτές οι υποθέσεις μπορούν να οδηγήσουν σε μικρότερες ή μεγαλύτερες ανακρίβειες των αποτελεσμάτων.

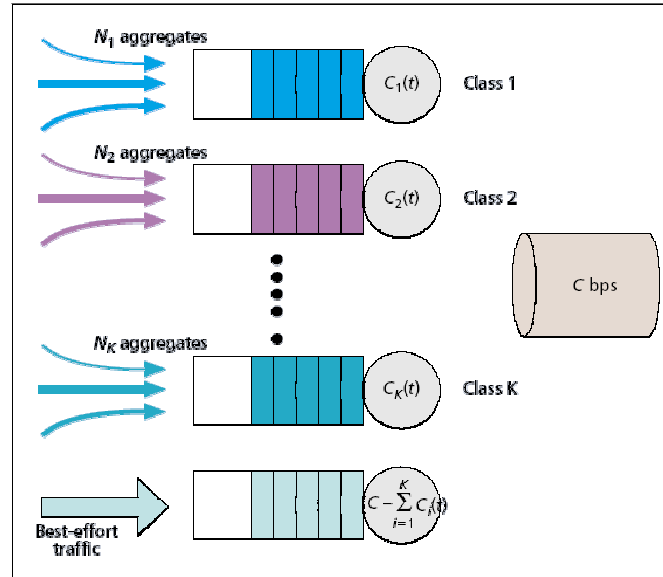
### **7.3. Ορισμός του προβλήματος**

Πολλές νέες εφαρμογές, ειδικά στον τομέα των πολυμέσων, απαιτούν την εγγύηση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι προσδοκίες και οι απαιτήσεις των χρηστών. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι οι διαλογικές εφαρμογές μέσω ροής, η τηλεφωνία IP και τα παιχνίδια μέσω διαδικτύου. Οι εφαρμογές αυτές παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις, όσον αφορά στην ευελιξία τους στις διάφορες παραμέτρους ποιότητας. Για παράδειγμα, κάποιες υπηρεσίες πραγματικού χρόνου είναι ελαστικές σε απαιτήσεις απώλειας πακέτων, αλλά εξαιρετικά αυστηρές σε απαιτήσεις καθυστέρησης μετάδοσης. Από την πλευρά αυτών των εφαρμογών, οι εγγυήσεις που παρέχονται ανά ροή είναι εξαιρετικά επιθυμητές. Αφ' ετέρου, από την πλευρά του δικτύου, είναι κοινά αποδεκτό ότι η διαχείριση της κίνησης ανά ροή δεν εξυπηρετεί την απαιτούμενη στα δίκτυα διαστασιολόγηση.

Μια απλή λύση είναι οι ροές να αθροιστούν μέσα στο δίκτυο, με τρόπο ώστε οι μεμονωμένες εγγυήσεις να μπορούν ακόμα να πραγματοποιηθούν. Στην περίπτωση εγγύησης του στατιστικού QoS, η άθροιση αυτή επιτρέπει την εξοικονόμηση πόρων, η οποία οφείλεται στη στατιστική πολυπλεξία των μεμονωμένων ροών. Έτσι, το σύνολο των ανεξάρτητων ροών κατηγοριοποιείται σε κλάσεις, ανάλογα με τη ζητούμενη υπηρεσία και τις αντίστοιχες απαιτήσεις σε QoS, και η αθροιστική κίνηση διέρχεται μέσα από το ίδιο κανάλι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7-1 [2][36].

Είναι σημαντικό να σημειωθεί, στο σημείο αυτό, η διαφορά μεταξύ της άθροισης και της πολυπλεξίας ροών. Η άθροιση σημαίνει την ομαδοποίηση των ροών πάνω από ένα δίκτυο, στο οποίο οι ροές αντιμετωπίζονται συνολικά. Η πολυπλεξία αφορά στην υπέρθεση των χαρακτηριστικών ενός συνόλου ροών, οι οποίες εξυπηρετούνται πάνω από το ίδιο τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Κατά συνέπεια, η άθροιση μπορεί να θεωρηθεί ως η πολυπλεξία πάνω από μια σύνδεση, η οποία αντιπροσωπεύει την πορεία ενός συνόλου ροών σε ένα δίκτυο και που μπορεί να διαστασιολογηθεί δυναμικά. Αν και η διαφορά τους είναι φαινομενικά ασήμαντη, ωστόσο αποσκοπεί σε διαφορετικούς στόχους. Έτσι, ενώ η στατιστική πολυπλεξία στοχεύει μόνο στην αποδοτική χρήση των πόρων ενός δικτύου, η άθροιση στοχεύει επιπλέον στο να μειώσει τον

αριθμό των διαφορετικών συνόλων ροών, προκειμένου να βελτιωθεί η εξελξιμότητα των δικτύων.



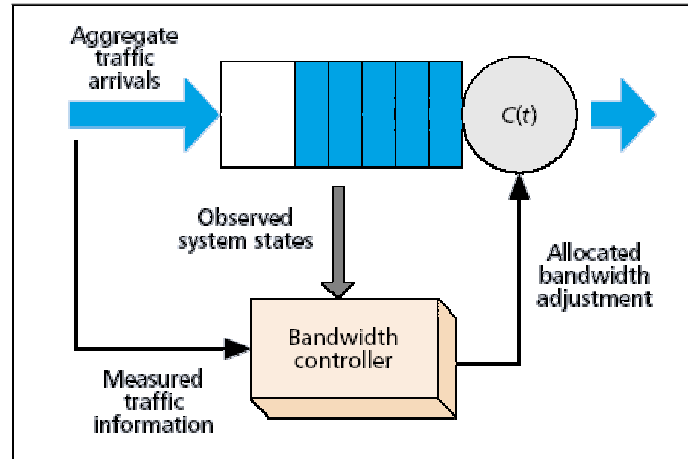
Σχήμα 7-1. Αθροιση κίνησης που διέρχεται από ένα κανάλι επικοινωνίας

Η ανάγκη ύπαρξης ενός μηχανισμού ελέγχου αποδοχής, ο οποίος θα στηρίζεται στην στατιστική ανάλυση των εισερχόμενων ροών αλλά και στην τρέχουσα κατάσταση του υπό εξέταση δικτύου υπαγορεύεται από τα ακόλουθα [2]:

- ❑ Τα μοντέλα κίνησης δεν μπορούν επακριβώς να συλλάβουν όλα τα χαρακτηριστικά της στατιστικής συμπεριφοράς της κίνησης λόγω των απλουστεύσεων και των προσεγγίσεων που γίνονται κατά την επίλυση των συστημάτων αναμονής.
- ❑ Οι παράμετροι της κίνησης που δηλώνονται από τους χρήστες κατά τη διαδικασία αίτησης εγκατάστασης νέων υπηρεσιών ή εφαρμογών δεν μπορούν ακριβώς να αντιπροσωπεύσουν την πραγματική κίνηση που θα δημιουργηθεί, αφού δεν υπάρχει απόλυτος έλεγχος της συμπεριφοράς των χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων (π.χ. το TCP χρησιμοποιεί μηχανισμούς ανάδρασης, ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου)
- ❑ Οι μετρήσεις που λαμβάνονται μια δεδομένη χρονική στιγμή δεν αντιπροσωπεύουν την κίνηση, η οποία θα δημιουργηθεί στο μέλλον, καθώς η πρόβλεψη των χαρακτηριστικών κίνησης δεν είναι εφικτή.

Έτσι, είναι ανάγκη να αναπτυχθούν ενιαίοι μηχανισμοί ελέγχου, οι οποίοι θα συνδυάζουν τις παραμέτρους κίνησης και τις απαιτήσεις των χρηστών, ώστε να είναι πιο ακριβείς οι υπολογισμοί του απαιτούμενου εύρους ζώνης μια δεδομένη χρονική στιγμή. Η στατιστική επεξεργασία των μετρούμενων πληροφοριών της κίνησης μπορεί να οδηγήσει σε μια διορθωτική εκτίμηση της συνάρτησης του ισοδύναμου εύρους ζώνης, σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που προκύπτει από τις παραμέτρους που δηλώνονται από τους χρήστες. Το Σχήμα 7-2 παρουσιάζει το μοντέλο

αναφοράς ενός αποδοτικού μηχανισμού Ελέγχου Αποδοχής Ροών, το οποίο βρίσκει εφαρμογή στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα τηλεπικοινωνιών [2].



**Σχήμα 7-2. Μοντέλο αναφοράς ενός αποδοτικού μηχανισμού Ελέγχου Αποδοχής Ροών**

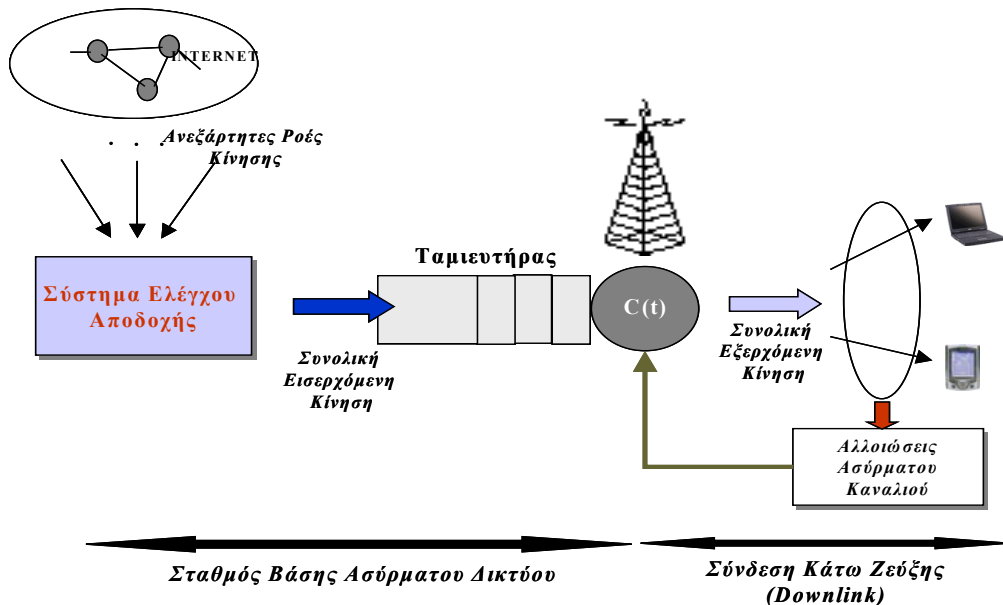
Επειδή τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα διαθέτουν ταμιευτήρες με μεγάλο μέγεθος και, λόγω της φύσης της κίνησης IP, η οποία μπορεί να είναι σε πολλές περιόδους εκρηκτική, η διατριβή αυτή εστιάζει μόνο στο πρόβλημα της επίδοσης των ασύρματων δικτύων για την υποστήριξη των βασικών παραμέτρων ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το δίκτυο πυρήνα που βασίζεται στο πρωτόκολλο διαδικτύου δεν αποτελεί σημείο συμφόρησης (bottleneck) για τη δρομολόγηση των πακέτων των ανεξάρτητων ροών και η διαθέσιμη χωρητικότητα των ενσύρματων δικτύων μπορεί να προσφέρει εγγυήσεις, σχετικά με το ζητούμενο επίπεδο ποιότητας των υπηρεσιών.

Από την άλλη, η έλλειψη των πόρων των ασύρματων δικτύων αφορά, κυρίως, στη διαδρομή κάτω ζεύξης (downlink), όπου παρατηρείται η κίνηση μεγαλύτερου όγκου δεδομένων. Επίσης, η πρόκληση των σύγχρονων συστημάτων είναι η εξεύρεση πόρων σε επίπεδο ροών και συνόδων παρά σε μεμονωμένες συνδέσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοποίηση των πόρων, αφού η ίδια η φύση του IP διακρίνεται σε ροές και συνόδους, ενώ σημειώνεται ότι μία σύνδεση μπορεί να περιέχει περισσότερες της μίας ροής δεδομένων.

Επίσης, τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα διατηρούν έναν ταμιευτήρα και δεν κάνουν διαχωρισμό μεταξύ των ανεξάρτητων ροών, με σκοπό την διατήρηση ξεχωριστών ταμιευτήρων ανά κλάση χρηστών. Οι έρευνες σχετικά με τον προγραμματισμό (scheduling) των εισερχόμενων πακέτων δεν είναι ακόμα σε ώριμο στάδιο και, επομένως, η εργασία αυτή περιορίζεται στην εξέταση των ασύρματων δικτύων με έναν ταμιευτήρα, στον οποίο αθροίζονται όλες οι εισερχόμενες ροές. Πάντως, μία προσπάθεια υιοθέτησης και περιγραφής της κίνησης μέσω Μαρκοβιανών Μοντέλων Ροής Ρευστού, για την περίπτωση του προγραμματισμού των εισερχόμενων πακέτων με την μέθοδο Generalized Processor Sharing, δίνεται στο [37].

Συνεπώς, το πρόβλημα της ανάπτυξης και της υλοποίησης ενός αποδοτικού μηχανισμού ελέγχου αποδοχής για την υποστήριξη των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας συνοψίζεται στο Σχήμα 7-3. Όπως παρατηρούμε εκεί, ένας κόμβος δικτύου θα πρέπει να υλοποιεί ένα σύστημα ελέγχου αποδοχής των ανεξάρτητων ροών κίνησης που αιτούνται εξυπηρέτηση από το συγκεκριμένο κόμβο δικτύου. Οι παράμετροι του συστήματος ελέγχου αποδοχής καθορίζονται από τους περιγραφείς της κίνησης που προκαλείται από τις ροές και από την ανάλυση της συμπεριφοράς της κίνησης, όταν αυτή εισέρχεται μέσα στο δίκτυο για να εξυπηρετηθεί. Ο σκοπός είναι να συνδυαστούν οι παράμετροι αυτές και να κάνουν μία εκτίμηση της επίδρασης της εισερχόμενης κίνησης στην ουρά αναμονής του κόμβου δικτύου, που απεικονίζεται στο Σχήμα 7-3.

Ένα σημαντικό γεγονός που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7-3 είναι ότι οι αλλοιώσεις του ασύρματου μέσου, οι οποίες έχουν περιγραφεί στο κεφάλαιο 3, έχουν σαν αποτέλεσμα η συνολικά διαθέσιμη χωρητικότητα που ανατίθεται στις συνδέσεις κάτω ζεύξης να μεταβάλλεται χρονικά και συγκεκριμένα να μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των ενεργών χρηστών, οι οποίοι αυξάνουν τις παρεμβολές και, συνεπώς, και τα λάθη μετάδοσης μέσα στο σύστημα. Αυτή η μεταβολή έχει επίπτωση στη συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου αποδοχής, το οποίο πρέπει να ενημερώνεται για την τρέχουσα τιμή της διαθέσιμης χωρητικότητας και να μπορεί να πραγματοποιεί με ασφάλεια τον αλγόριθμο αποδοχής ή απόρριψης των ροών. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον στην περίπτωση των ασύρματων συστημάτων 4<sup>ης</sup> Γενιάς, οπότε και τα δίκτυα καλούνται να συνεργαστούν, ώστε να εξασφαλίσουν την αδιάλειπτη παροχή εγγυημένων υπηρεσιών στους κινητούς χρήστες. Το [38] παρουσιάζει την επίδραση της συνεργασίας ασύρματων δικτύων B3G, η οποία βασίζεται στην παρακολούθηση της διαθέσιμης χωρητικότητας των υποκείμενων δικτύων και την ενεργοποίηση μηχανισμών κάθετης μεταγωγής, σε περίπτωση συμφόρησης.



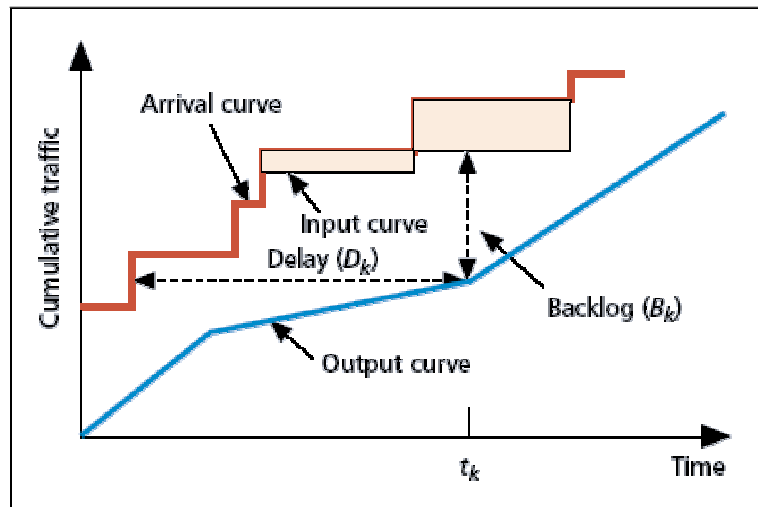
Σχήμα 7-3. Περιγραφή του προβλήματος σχεδιασμού ενός συστήματος ελέγχου αποδοχής

Με βάση το Σχήμα 7-3, σε επόμενη παράγραφο θα ορίσουμε το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών και θα αναλύσουμε τη συμπεριφορά του και τις λειτουργίες του, στα πλαίσια του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων.

### 7.3.1. Παράμετροι του προβλήματος

#### 7.3.1.1. Εγγύηση Καθυστέρησης

Μια σημαντική μέτρηση της επίδοσης ενός δικτύου είναι η ρύθμιση της διαθέσιμης χωρητικότητας για την εγγύηση της καθυστέρησης που υφίσταται ένας χρήστης με μια συγκεκριμένη πιθανότητα. Ένα τέτοιο μέτρο εκφράζει την πιθανότητα υπέρβασης ενός καθορισμένου ορίου καθυστέρησης από ένα πακέτο και μεταφράζεται σε υπερχείλιση του ταμιευτήρα του κόμβου δικτύου πέρα από ένα κατώφλι. Ο υπολογισμός της πιθανότητας υπέρβασης της καθυστέρησης μπορεί να γίνει με απευθείας μετρήσεις, ώστε να προσδιοριστεί η κατάλληλη τιμή του ρυθμού εξυπηρέτησης, με βάση το ζητούμενο QoS. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι δύο σταδίων. Έτσι, σε ένα πρώτο στάδιο, υπολογίζεται το μήκος της ουράς των πακέτων που παράγεται από την άφιξη των πακέτων των ανεξάρτητων ροών που συνθέτουν την εισερχόμενη στο δίκτυο κίνηση, με βάση τα χαρακτηριστικά τους, τα οποία υπολογίζονται από την ανάλυση του ίχνους της κίνησης. Ένα επιπλέον στάδιο περιλαμβάνει την εκτίμηση της συμπεριφοράς της ουράς, εάν το εύρος ζώνης που ανατίθεται σε κάθε ροή αυξηθεί κατά ένα μικρό ποσοστό και εξετάζεται η επίδραση στην πιθανότητα υπερχείλισης του ταμιευτήρα.



Σχήμα 7-4. Καμπύλες άφιξης πακέτων, εισόδου στον ταμιευτήρα και εξυπηρέτησης

Με τη δειγματοληψία της διαδικασίας αφίξεων πακέτων και την παρακολούθηση της αντίστοιχης συνάρτησης εξυπηρέτησης ή της χωρητικότητας που διατίθεται από το δίκτυο σε μια δεδομένη χρονική περίοδο, τα μέτρα επίδοσης καθορίζονται άμεσα από την καμπύλη άφιξης (που προκύπτει από τις αφίξεις πακέτων), την καμπύλη εισόδου στον ταμιευτήρα (που προκύπτει από τα πακέτα που εισέρχονται στην ουρά αναμονής) και την καμπύλη εξυπηρέτησης (που προκύπτει από τις αναχωρήσεις πακέτων). Ένα τυπικό παράδειγμα αυτών των καμπυλών φαίνεται στο

Σχήμα 7-4, στο οποίο δείχνεται, επίσης, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή  $t_k$ , η καθυστέρηση  $d_k$ , η οποία είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ της καμπύλης εισόδου του ταμειευτήρα και της καμπύλης εξυπηρέτησης, η ανεκτέλεστη παραγγελία  $b_k$ , η οποία είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ της καμπύλης εισόδου του ταμειευτήρα και της καμπύλης εξυπηρέτησης, και το ποσοστό απωλειών, που ισούται με την σκιασμένη περιοχή [2].

Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς στην καθυστέρηση και το ρυθμό μετάδοσης, ο ρυθμός εξυπηρέτησης για κάθε άφιξη πακέτων στην ουρά αναμονής ρυθμίζεται, έτσι ώστε όλοι οι περιορισμοί να ικανοποιούνται. Η απόλυτη καθυστέρηση είναι εγγυημένη αν εξασφαλιστεί ότι όλη η κίνηση θα σταλεί μέσα στα δεδομένα όρια καθυστέρησης. Δηλαδή, η απαιτούμενη χωρητικότητα του δικτύου την χρονική στιγμή  $t_k$  για να επιτευχθεί καθυστέρηση εντός του ορίου  $d$  είναι:

$$C_k \geq \frac{b_k}{d - d_k} \quad (7-1)$$

Δεδομένης και της απαίτησης για εγγύηση του ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης, η ελάχιστη απαιτούμενη χωρητικότητα για την εγγύηση και του ρυθμού μετάδοσης και της καθυστέρησης είναι το μέγιστο μεταξύ των δύο.

Για μια ανάλογη διαφοροποίηση της καθυστέρησης μεταξύ της κίνησης που δημιουργείται από  $N$  κλάσεις [2], θέλουμε να έχουμε  $d_k(i) = \tau_{i-1} d_k(i-1)$ , όπου  $\tau_i$  είναι η αναλογία διαφοροποίησης μεταξύ της κατηγορίας  $i$  και  $i+1$  και  $d_k(i)$  είναι η καθυστέρηση που υφίσταται η κλάση  $i$  την

χρονική στιγμή  $t_k$ , με  $i=1,2,\dots,N-1$ . Έστω  $m_i = \prod_{j=1}^{i-1} \tau_j$  και  $d_k^*(i) = d_k(i) \prod_{j=1, j \neq i}^N m_j$ .

Αποδεικνύεται ότι η διαφοροποίηση καθυστέρησης επιτυγχάνεται εάν μπορεί να διατηρηθεί μια ποσότητα καθυστέρησης  $d_k^* = N^{-1} \sum_{i=1}^N d_k^*(i)$ . Το λάθος  $e_k(i) = d_k^* - d_k^*(i)$  χρησιμοποιείται

για να ρυθμίσει το ρυθμό εξυπηρέτησης της κλάσης  $i$  την χρονική στιγμή  $t_k$ . Το ποσό της ρύθμισης είναι  $G_k e_k(i)$ , όπου  $G_k$  είναι το κέρδος ανάδρασης. Με μερικές απλουστευμένες υποθέσεις, μπορεί να διαμορφωθεί το σύστημα ως ένα γραμμικό σύστημα ελέγχου διακριτού χρόνου και να υπολογιστεί το εύρος τιμών για το  $G_k$  για να έχουμε σταθερότητα. Όμως, είναι αποδεδειγμένο ότι οι εγγυήσεις της καθυστέρησης και του ρυθμού μετάδοσης δεν ικανοποιούνται ταυτόχρονα, κάτι το οποίο είναι ασήμαντο, αφού σπάνια απαιτείται η ταυτόχρονη ικανοποίηση πολλαπλάσιων παραμέτρων QoS, ενώ η επίτευξη των εγγυήσεων διαφόρων παραμέτρων ποιότητας για κάθε δείγμα κίνησης απαιτεί χρονοβόρες διαδικασίες και πολυδάπανους υπολογισμούς.

### **7.3.1.2. Έλεγχος Αποδοχής**

Ο σκοπός των μελλοντικών συστημάτων για την υποστήριξη διαδικασιών ελέγχου αποδοχής είναι να προβλέπουν τη χρονικά δυναμική αλλαγή της διατιθέμενης χωρητικότητας και να παίρνουν γρήγορες αποφάσεις σχετικά με την αποδοχή ή απόρριψη των εισερχόμενων ροών. Λόγω της ιδιομορφίας της IP κίνησης και των αντίστοιχων πρωτοκόλλων μεταφοράς, μερικά από τα οποία προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου, ο έλεγχος αποδοχής γίνεται ένα σημαντικό πρόβλημα, επειδή είναι ασαφές εάν η νεοεισερχόμενη κίνηση μπορεί να αντιμετωπιστεί από τη δεδομένη τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Αν υποθέσουμε ότι μια πολύ μεγάλη κίνηση γίνεται δεκτή, τότε θα υπάρξει μια περίοδος, κατά τη διάρκεια της οποίας ο ρυθμός εξυπηρέτησης δε θα μπορεί να διατεθεί με βάση τις απαιτήσεις του αλγορίθμου που έχει υιοθετηθεί, με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε φαινόμενα υποβάθμισης της ποιότητας QoS για εκείνες τις περιόδους.

Το πρόβλημα του ελέγχου της κίνησης με βελτιωμένους μηχανισμούς αποδοχής μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες [2]. Η πρώτη κατηγορία αφορά στη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ του βαθμού υποβάθμισης του QoS και της παραβίασης του απαιτούμενου εύρους ζώνης. Αν μια τέτοια γνώση είναι διαθέσιμη, μπορούμε να υπολογίσουμε την ποσότητα κατά την οποία μπορούμε να παραβιάσουμε τις απαιτήσεις εύρους ζώνης, διατηρώντας, παράλληλα ένα αποδεκτό επίπεδο του QoS. Η δεύτερη κατηγορία αφορά στη μελέτη της επίδρασης της αποδοχής νέων ροών στην παραβίαση του εύρους ζώνης. Για την επιτυχία των βελτιωμένων μηχανισμών αποδοχής κλήσεων απαιτείται η συνδυασμένη επίλυση των δύο αυτών κατηγοριών.

### **7.3.1.3. Χρονικό Διάστημα Ελέγχου**

Ιδιαίτερη σημασία στους αλγορίθμους ελέγχου αποδοχής καταλαμβάνει το πρόβλημα του υπολογισμού του εύρους του κατάλληλου χρονικού διαστήματος που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την ρύθμιση της διαθέσιμης χωρητικότητας [2]. Το διάστημα αυτό ονομάζεται χρονικό διάστημα ελέγχου. Οι περισσότερες εργασίες, που αφορούν στους μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής στηρίζονται στην επιλογή αυτού του διαστήματος, βάσει δοκιμών και μετρήσεων λαθών, ενώ γενικά η έρευνα σε αυτό το πεδίο δεν είναι σχετικά ώριμη ακόμα. Η πάρα πολύ συχνή ρύθμιση του εύρους ζώνης δεν είναι σκόπιμη, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε υψηλό κόστος των απαιτούμενων μηχανισμών αλλά και μεγάλες ανακρίβειες στα χαρακτηριστικά της κίνησης, λόγω του μικρού χρονικού διαστήματος παρατήρησης.

Από την άλλη, η μη συχνή ρύθμιση οδηγεί σε ανεπαρκή επίδοση του δικτύου, όσον αφορά τον υπολογισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας, ειδικά σε περιπτώσεις φόρτισης του δικτύου με εξαιρετικά μεταβλητή (και εκρηκτική) κίνηση. Επίσης, η απώλεια πακέτων μπορεί να είναι υπερβολικά μεγάλη, επειδή το χρονικό διάστημα, κατά το οποίο η καμπύλη του ρυθμού εξυπηρέτησης προσαρμόζεται στην αντίστοιχη του ρυθμού αφίξεων κίνησης, είναι μεγάλο. Αν και ο υπολογισμός του χρονικού διαστήματος ελέγχου για τους μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής, που στηρίζονται σε μεθόδους ελέγχου ανάδρασης, δεν είναι ακόμα κατανοητός, ωστόσο μερικές



ιδέες μπορούν να εξαχθούν από τους αντίστοιχους μηχανισμούς χωρίς ανάδραση που ισχύουν σήμερα. Κάτι τέτοιο ισχύει στα Μαρκοβιανά μοντέλα, τα οποία έχουμε περιγράψει σε προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συμπεριφορά της κίνησης σε ένα σύστημα αναμονής εξουσιάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη λιγότερο αρνητική ιδιοτιμή του συστήματος επίλυσης (όπως θα δούμε στην συνέχεια, αυτό ισχύει στην περίπτωση της θεωρίας του ισοδύναμου εύρους ζώνης, όπου η προσεγγιστική λύση οφείλεται στην υπόθεση περί ύπαρξης μίας επικρατούσας ιδιοτιμής). Συνεπώς, το χρονικό διάστημα ελέγχου καθορίζεται από τη συχνότητα αλλαγής των χαρακτηριστικών κίνησης, που οφείλονται σε αυτήν την ιδιοτιμή, και τα οποία με τη σειρά τους διαμορφώνονται από την άφιξη και αναχώρηση ροών από το σύστημα. Σε επόμενη παράγραφο, παρατίθενται κάποιες σχετικές έρευνες, που αφορούν στη ρύθμιση του χρονικού διαστήματος ελέγχου, ώστε ο προκύπτον μηχανισμός ελέγχου αποδοχής να είναι αξιόπιστος.

#### **7.4. Εισαγωγικά στη Θεωρία Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης**

Η θεωρία του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης αποτελεί τη βάση για την ανάλυση του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών, το οποίο θα περιγραφεί στην επόμενη παράγραφο. Για το λόγο αυτό, στην παράγραφο αυτή συνοψίζουμε τα γενικά χαρακτηριστικά αυτής της θεωρίας και εστιάζουμε σε εκείνες τις σχέσεις, οι οποίες μας είναι χρήσιμες σε αυτήν την εργασία.

Η εκτίμηση της επίδοσης ενός δικτύου είναι ένα δύσκολο πρόβλημα και ιδιαίτερα στα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα φαινόμενα συμφόρησης διέπονται από δύο θεμελιώδεις μηχανισμούς [39], οι οποίοι αντανakλούν διαφορετικές πτυχές του τρόπου, με τον οποίο η αποδοτική χρήση των πόρων του τηλεπικοινωνιακού συστήματος επιδρά στην άμβλυνση των φαινομένων συμφόρησης και, κατά συνέπεια, στη βελτίωση της επίδοσης του υπό εξέταση συστήματος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε αυτήν την εργασία, ένα μέτρο της επίδοσης της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας είναι η ποσοτικοποίηση της πιθανότητας να παρουσιαστεί απώλεια πληροφορίας στο υπό εξέταση σύστημα.

Ο πρώτος από τους μηχανισμούς αυτούς ονομάζεται στατιστική πολυπλεξία (statistical multiplexing) και συνίσταται στην κοινή χρήση των πόρων ενός δικτύου από πολλαπλές ανεξάρτητες ροές δεδομένων. Λόγω της εκρηκτικότητας (burstiness) που μπορεί να παρουσιάσει η κίνηση, η υπέρθεση των ανεξάρτητων ροών οδηγεί στην εμφάνιση αλληλοαναιρέσεων των αιχμών του ρυθμού ροής (rate cancellations) και συνακόλουθα, στην απαίτηση για τηλεπικοινωνιακά συστήματα μικρότερης χωρητικότητας, σε σύγκριση με αυτήν που θα χρειαζόταν αν οι ροές δεν μοιράζονταν το κοινό κανάλι. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται κέρδος στατιστικής πολυπλεξίας (statistical multiplexing gain).

Εστιάζουμε, τώρα, στο δεύτερο θεμελιώδη μηχανισμό αποφυγής συμφόρησης. Αυτός βασίζεται στην παρατήρηση ότι τηλεπικοινωνιακά συστήματα με ταμιευτήρα αποθήκευσης δεδομένων (buffer) παρουσιάζουν μειωμένη πιθανότητα απωλειών πληροφορίας, άρα βελτιωμένο QoS. Αυτό συμβαίνει γιατί, κατά τις περιόδους εκρηκτικής κίνησης, όταν δηλαδή ο συνολικός ρυθμός

παραγωγής δεδομένων υπερβαίνει τη χωρητικότητα του καναλιού, η επιπλέον ποσότητα δεδομένων αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα αντί να χάνεται. Επομένως, για δεδομένο QoS, αύξηση του μεγέθους του ταμιευτήρα οδηγεί σε μείωση των απαιτήσεων χωρητικότητας του καναλιού. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται κέρδος από την αποθήκευση εκρήξεων (buffering gain).

Συνεπώς, η επίδοση ενός συστήματος πολυπλεξίας ροών με εκρηκτική φόρτιση διέπεται από τον συνδυασμό των φαινομένων της στατιστικής πολυπλεξίας και του κέρδους από την αποθήκευση εκρήξεων. Αν ο ταμιευτήρας έχει μεγάλο μέγεθος, τότε το κέρδος από την αποθήκευση εκρήξεων επικρατεί και η επίδοση του συστήματος καθορίζεται κυρίως από αυτόν τον παράγοντα. Αντίθετα, αν ο ταμιευτήρας είναι πολύ μικρός, ή το σύστημα δεν έχει ταμιευτήρα, τότε η δυναμική του συστήματος διέπεται κυρίως, ή αποκλειστικά αντίστοιχα, από το φαινόμενο της στατιστικής πολυπλεξίας.

Για καθένα από τα δύο θεμελιώδη φαινόμενα υπάρχει μια αντίστοιχη ασυμπτωτική θεωρία, η οποία επιτρέπει τον σχετικά απλό υπολογισμό της εξάρτησης που υπάρχει μεταξύ των δικτυακών πόρων, των χαρακτηριστικών της κίνησης και της επίδοσης που επιτυγχάνεται. Η διατριβή αυτή εστιάζει στην περίπτωση συστημάτων με μεγάλα μεγέθη ταμιευτήρα και στο κέρδος από την αποθήκευση εκρήξεων, επομένως ενδιαφερόμαστε για την ασυμπτωτική θεωρία του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης, η οποία έχει ισχύ για πολύ μεγάλα μεγέθη ταμιευτήρα και πολύ μικρές πιθανότητες απωλειών λόγω αποθήκευσης. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να εφαρμοστεί μία μέθοδος που επιτρέπει την προσεγγιστική εκτίμηση του βαθμού ποιότητας υπηρεσίας με μικρό υπολογιστικό κόστος, κάνοντας, έτσι, εφικτή τη χρήση αναλυτικών μεθόδων σε διεργασίες ελέγχου αποδοχής, οι οποίες απαιτούν την απόκριση σε πραγματικό χρόνο.

#### 7.4.1. Ορισμός

Η τηλεπικοινωνιακή κίνηση που διέρχεται μέσα από τους κόμβους των δικτύων και οι αντίστοιχες στοχαστικές ιδιότητες που αυτή παρουσιάζει μπορούν να περιγραφούν, σύμφωνα με την αντίστοιχη λογαριθμική ροπογεννήτρια (ΛΡΓ), η χρονική συνάρτηση της οποίας συμβολίζεται ως  $\phi(\theta, t)$ . Το  $\theta$  εκφράζει τα κριτήρια ποιότητας της διαδικασίας που περιγράφει την πραγματική κίνηση.

Η συνάρτηση ισοδύναμου εύρους ζώνης ΣΙΕΖ (equivalent bandwidth function, ή effective bandwidth function) της κίνησης αυτής ορίζεται ως [39]:

$$a(\theta) = \frac{\phi_{\infty}(\theta)}{\theta}, \quad \theta \geq 0. \quad (7-2)$$

Στην σχέση αυτή, χρησιμοποιείται η οριακή συμπεριφορά της ΛΡΓ  $\phi(\theta, t)$  για μεγάλες τιμές του χρόνου, όταν  $t \rightarrow \infty$ . Ως γνωστό, για τη συνάρτηση του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης ισχύει ότι:

$$\bar{r} \leq a(\theta) \leq \hat{r} \quad (7-3)$$

όπου  $E[r(t)] = \bar{r}$  είναι ο μέσος ρυθμός ροής και  $\hat{r}$  είναι ο ρυθμός ροής αιχμής.

Για την καλύτερη κατανόηση της έννοιας της θεωρίας αυτής, θεωρούμε ότι ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, ρυθμού εξυπηρέτησης  $c$ , διαθέτει ένα ταμιευτήρα μεγάλου μεγέθους  $B \gg 0$  και έστω ότι, προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα υπηρεσίας, απαιτείται η υπερχειλίση του ταμιευτήρα να είναι σπάνια, συγκεκριμένα να συμβαίνει με πιθανότητα μικρότερη της μονάδας ( $p \ll 1$ ). Επιθυμούμε να υπολογίσουμε την τιμή της χωρητικότητας του τηλεπικοινωνιακού συστήματος προκειμένου να ικανοποιούνται οι περιορισμοί του προβλήματος. Εφόσον το μέγεθος του ταμιευτήρα είναι αρκετά μεγάλο, η παράμετρος  $\theta$ , που εκφράζει τα ποιοτικά κριτήρια της συγκεκριμένης υπηρεσίας, θα πρέπει να επιλεγεί, έτσι ώστε το περιεχόμενο του ταμιευτήρα  $Q(t)$ , καθώς το  $t \rightarrow \infty$ , να ικανοποιεί την ακόλουθη σχέση [40]:

$$p = \Pr\{Q(\infty) > B\} \approx e^{-\theta B} \quad (7-4)$$

επομένως πρέπει  $\theta = -\log p / B$ . Με βάση την ανάλυση που παρουσιάζεται στο [39], θα πρέπει  $\theta = a^{-1}(c)$ , οπότε η απαιτούμενη τιμή της χωρητικότητας για την εγγύηση των ποιοτικών κριτηρίων της κίνησης είναι ίση προς:

$$c = a(-\log p / B) \quad (7-5)$$

Ωστόσο, η έκφραση του προβλήματος στους παραπάνω όρους μεταθέτει το πρόβλημα στον υπολογισμό της ΣΙΕΖ  $a(\cdot)$  για τη συνολική κίνηση. Κατά τον υπολογισμό αυτό, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά όλων των πηγών κίνησης, που πολυπλέκονται στο εξεταζόμενο σύστημα. Ευτυχώς, εγγενείς ιδιότητες της συνάρτησης ισοδύναμου εύρους ζώνης απλοποιούν ιδιαίτερα την κατάσταση [41]. Συγκεκριμένα, έστω ότι πολυπλέκονται  $N$  ανεξάρτητες πηγές κίνησης, με, εν γένει, διαφορετικά χαρακτηριστικά. Τότε προκύπτει [40]:

$$a(\theta) = \sum_{j=1}^N a_j(\theta) \quad (7-6)$$

δηλαδή ότι η ΣΙΕΖ ενός αθροίσματος ανεξάρτητων ροών κίνησης είναι απλά ίση προς το άθροισμα των επιμέρους ΣΙΕΖ. Προφανώς, κάθε προσθετέος μπορεί να υπολογιστεί, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα χαρακτηριστικά της αντίστοιχης πηγής κίνησης, χωρίς εξάρτηση από τις υπόλοιπες πηγές, με τις οποίες πολυπλέκεται η τελευταία.

Λαμβάνοντας υπόψη την ιδιότητα της αθροιστικότητας, η λύση του προβλήματος ελέγχου αποδοχής ροών συνοψίζεται σε ένα ιδιαίτερα απλό αποτέλεσμα. Έτσι, ένα σύνολο  $N$  ανεξάρτητων πηγών κίνησης είναι δυνατόν να γίνει αποδεκτό σε ένα κόμβο δικτύου με ταμιευτήρα μεγέθους  $B$  και ρυθμού εξυπηρέτησης  $c$ , διατηρώντας ταυτόχρονα ένα επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας καλύτερο από ή ίσο προς  $\varepsilon = -\log p$ , εάν και μόνο εάν ισχύει η συνθήκη:

$$\sum_{j=1}^N a_j(\varepsilon/B) \leq c \quad (7-7)$$

Με βάση τα παραπάνω, ο αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής ροών σε ένα κόμβο είναι ιδιαίτερα απλός και η μόνη δομή δεδομένων που απαιτείται είναι ένας αθροιστής με τιμή ίση προς το συνολικό ισοδύναμο εύρος ζώνης της κίνησης που φορτίζει τον κόμβο. Σε κάθε νέα αίτηση εγκατάστασης μίας ροής, υπολογίζεται η τιμή της ΣΙΕΖ της νέας κίνησης για παράμετρο  $\theta = \varepsilon/B$  και η τιμή του αθροιστή προσαυξάνεται κατ' αυτήν την ποσότητα. Εφόσον το προσαυξημένο άθροισμα διατηρείται μικρότερο ή ίσο προς τη διαθέσιμη χωρητικότητα του συστήματος, η νέα ροή γίνεται αποδεκτή, αλλιώς η κλήση απορρίπτεται (οπότε το ισοδύναμο εύρος ζώνης της υπό δοκιμή ροής αφαιρείται από την τιμή του αθροιστή). Αντίστοιχα, όταν μια ροή εγκαταλείπει το σύστημα, η τιμή του αθροιστή αναπροσαρμόζεται, αφαιρώντας το ισοδύναμο εύρος ζώνης που αντιστοιχεί στην αποχωρούσα ροή. Με βάση τα παραπάνω, αν είναι γνωστή η ΣΙΕΖ για μια αιτούσα ροή υπηρεσίας, δεν απαιτείται καμία επιπλέον πληροφορία για τη διεξαγωγή του ελέγχου αποδοχής. Όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο, η ΣΙΕΖ μιας ροής κίνησης εξαρτάται από τα στατιστικά χαρακτηριστικά αυτής και μπορεί να υπολογιστεί από αυτά. Αν όμως η ΣΙΕΖ δοθεί κατευθείαν, δεν χρειάζεται κανένας άλλος στατιστικός χαρακτηρισμός της ροής κίνησης.

Η συνθήκη αποδοχής μιας νέας σύνδεσης επεκτείνεται και στην περίπτωση του διαχωρισμού των ροών κίνησης σε κλάσεις. Έτσι, έστω ότι οι  $N$  πηγές που φορτίζουν τον κόμβο δικτύου χωρίζονται σε  $K$  κλάσεις κίνησης, έτσι ώστε οι πηγές σε κάθε κλάση να είναι ανεξάρτητες μεν, αλλά με στατιστικά όμοια χαρακτηριστικά.. Έστω, επίσης, ότι σε κάθε κλάση  $j = 1, \dots, K$  αντιστοιχούν  $n_j$  στατιστικά όμοιες πηγές. Προφανώς, οι πηγές μιας κλάσης έχουν ίδια ΣΙΕΖ και η σχέση (7-7) μπορεί να γραφεί ισοδύναμα ως [40]:

$$\sum_{j=1}^K n_j a_j(\varepsilon/B) \leq c \quad (7-8)$$

όπου οι δείκτες στο άθροισμα υποδηλώνουν τώρα κλάσεις, αντί για μεμονωμένες πηγές.

Η τελευταία αυτή διατύπωση παραπέμπει άμεσα στην έννοια του χωρίου αποδοχής (admission region) ροών, το οποίο είναι ένα υποσύνολο των δυνατών συνδυασμών  $(n_1, \dots, n_K)$  των αριθμών πηγών που ανήκουν στις διάφορες κλάσεις. Συγκεκριμένα, ένας συνδυασμός  $(n_1, \dots, n_K)$  ανήκει στο χωρίο αποδοχής, όταν η φόρτιση που αντιστοιχεί σε αυτόν τον συνδυασμό πηγών μπορεί να γίνει αποδεκτή από ένα σύστημα πολυπλεξίας με πόρους  $B$  και  $c$ , διατηρώντας επίπεδο ποιότητας καλύτερο από ή ίσο προς  $\varepsilon$ . Συνεπώς, η σχέση αυτή δηλώνει ότι το όριο του χωρίου αποδοχής που βασίζεται στην έννοια του ισοδύναμου εύρους ζώνης είναι γραμμικό. Αυτή ακριβώς η γραμμικότητα είναι ο λόγος που ο συναφής αλγόριθμος αποδοχής ροών είναι τόσο απλός. Η επόμενη παράγραφος υπολογίζει τη ΣΙΕΖ για τα Μαρκοβιανά μοντέλα, με τα οποία ασχολείται η

εργασία αυτή. Ωστόσο, μία μελέτη σχετικά με τη διαμόρφωση της συνάρτησης αυτής για μη-Μαρκοβιανές πηγές κίνησης παρουσιάζεται στο [42].

#### 7.4.2. Υπολογισμός της συνάρτησης ισοδύναμου εύρους ζώνης

Με δεδομένη τη σημασία της ΣΙΕΖ, ανακύπτει η ανάγκη προσδιορισμού της για διάφορους τύπους κίνησης. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 6, η εργασία αυτή εστιάζει σε Μαρκοβιανά Μοντέλα Ροής Ρευστού (MMFP). Τα μοντέλα αυτά εμφανίζουν στοχαστικά μεταβαλλόμενο ρυθμό ροής σε κάθε κατάσταση, ο οποίος καθορίζεται από τις μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων αυτών, οι οποίες με τη σειρά τους διέπονται από μια αλυσίδα Markov συνεχούς χρόνου, με πίνακα ρυθμών μετάβασης  $M=[m_{ij}]$  και πίνακα ρυθμών ροής  $R=diag\{r_1, \dots, r_n\}$ . Συμβολίζουμε το διάνυσμα πιθανοτήτων μόνιμης κατάστασης της αλυσίδας Markov ως  $\pi$ , το οποίο ικανοποιεί τις σχέσεις  $\pi M=0$  και  $\pi 1=1$ . Η οριακή ΛΡΓ της ποσότητας των δεδομένων που παράγονται από το εν λόγω μοντέλο δίνεται από την σχέση:

$$\phi_{\infty}(\theta) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\phi(\theta, t)}{t} = \lambda_{\max}(R\theta + M) \quad (7-9)$$

όπου  $\lambda_{\max}(A)$  συμβολίζει την ιδιοτιμή με μέγιστο πραγματικό μέρος του πίνακα  $A$ . Δεδομένου ότι  $\theta \geq 0$ , από τη σχέση ορισμού της ΣΙΕΖ προκύπτει ότι για τα Μαρκοβιανά μοντέλα ροής ρευστού, η ΣΙΕΖ ισούται προς:

$$a(\theta) = \lambda_{\max}\left(R + \frac{1}{\theta}M\right). \quad (7-10)$$

Έτσι, η συνάρτηση του ισοδύναμου εύρους ζώνης έχει καθοριστεί σε κλειστή μορφή για γενικά Μαρκοβιανά μοντέλα ροής ρευστού. Για την ειδική περίπτωση πηγών MMFP 2 καταστάσεων και εκθετικών χρόνων παραμονής σε κάθε κατάσταση, παραθέτουμε τον τύπο που δίνει το ισοδύναμο εύρος ζώνης [40]:

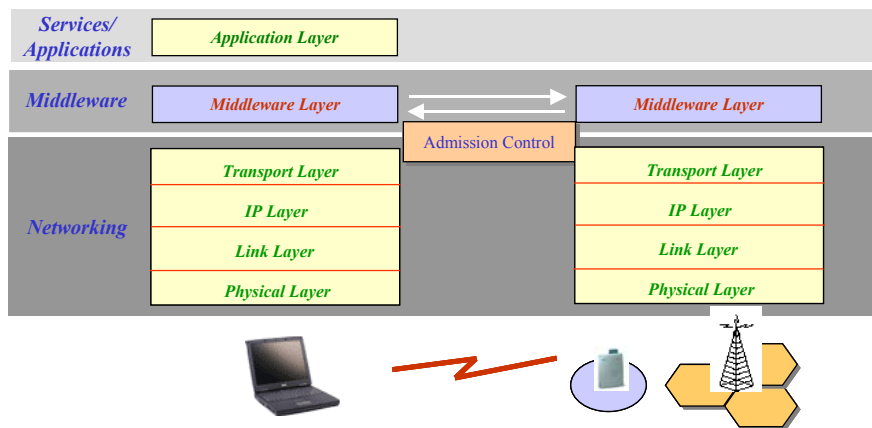
$$\alpha(\theta) = \frac{r_p}{2} \left( 1 - \frac{r_p}{(r_p - r_m)u\theta} + \sqrt{\left( 1 - \frac{r_p}{(r_p - r_m)u\theta} \right)^2 + \frac{4r_m}{(r_p - r_m)u\theta}} \right) \quad (7-11)$$

Στη σχέση αυτή, τα χαρακτηριστικά της πηγής περιγράφονται από το μέσο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων  $r_m$ , το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων  $r_p$  και το μέγεθος έκρηξης  $u$ . Το  $\theta$  είναι ο παράγοντας ποιότητας, ο οποίος εξαρτάται από το ζεύγος των παραμέτρων  $(p, T)$ , όπου οι απαιτήσεις των ποιοτικών χαρακτηριστικών της πηγής καθορίζονται από την πιθανότητα  $p$  υπέρβασης ενός κατωφλίου για την καθυστέρηση  $T$ , και για ένα σύστημα χωρητικότητας  $C$  δίνεται από τη σχέση  $\theta = \frac{-\log p}{CT}$ .

## 7.5. Δυναμικό Σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών

### 7.5.1. Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική

Με βάση την προαναφερθείσα θεωρία, αλλά και όσα έχουν, ήδη, περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια, η παράγραφος αυτή επιχειρεί να προδιαγράψει την αρχιτεκτονική ενός δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής για τα σύγχρονα και μελλοντικά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών. Η μεγάλη πρόκληση αυτών των συστημάτων είναι η ανάπτυξη μηχανισμών ελέγχου αποδοχής των ανεξάρτητων ροών κίνησης που παράγονται από πολλαπλές υπηρεσίες, οι οποίες υποστηρίζονται από τα ασύρματα δίκτυα IP. Με αναφορά αυτό, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 7-5, το προτεινόμενο σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών δρα ανεξάρτητα και πάνω από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δικτύου και μεταφοράς και προσπαθεί να συνδυάσει τις απαιτήσεις σε QoS που επιθυμούν οι χρήστες για την εγκατάσταση ροών υπηρεσιών με την τρέχουσα κατάσταση που ανιχνεύεται στο δίκτυο, όσον αφορά τόσο στην αθροιστική κίνηση, η οποία εισέρχεται στον κόμβο δικτύου, όσο και στην ποιότητα του ασύρματου καναλιού.



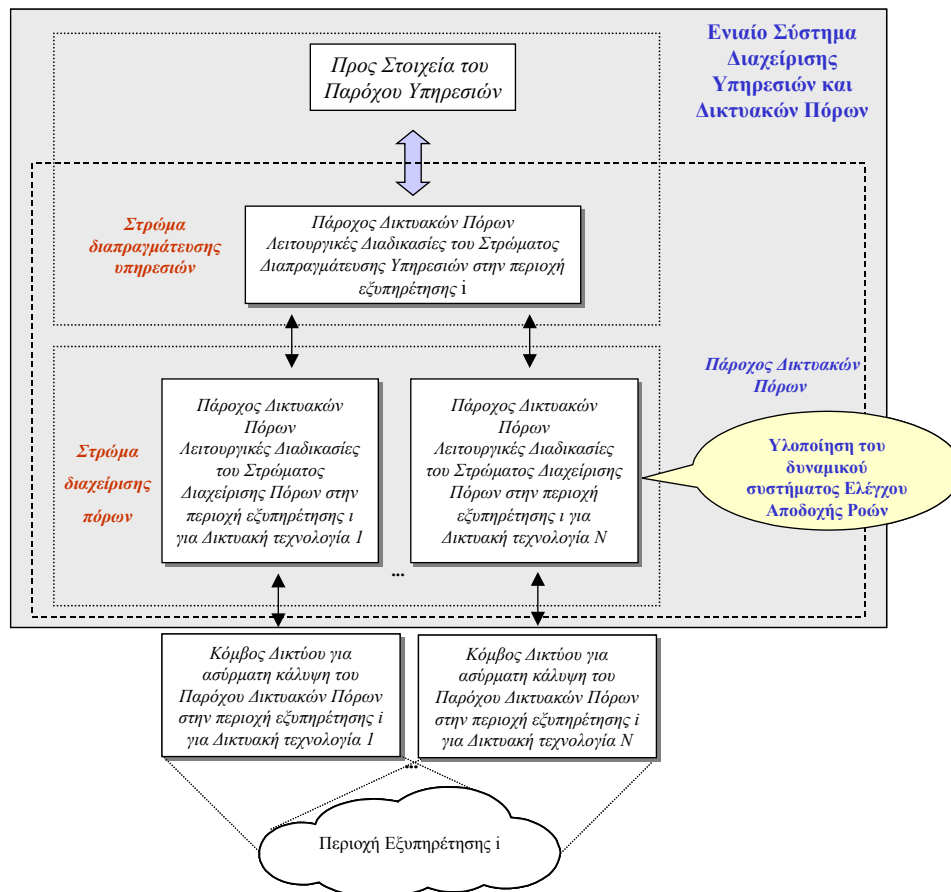
**Σχήμα 7-5. Λογική απεικόνιση των διαδικασιών Ελέγχου Αποδοχής Υπηρεσιών IP στην στοίβα πρωτοκόλλων.**

Όπως παρατηρούμε και από το Σχήμα 7-5, ο τερματικός σταθμός, που επιθυμεί να λάβει μία υπηρεσία, επικοινωνεί με το αντίστοιχο σύστημα διαχείρισης, το οποίο αναλαμβάνει να βρει το κατάλληλο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης. Για την εξασφάλιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών της κίνησης που ζητά ο νέος χρήστης, το σύστημα θα πρέπει να παρακολουθεί την, ήδη, υπάρχουσα κίνηση και τη διαθέσιμη ανά πάσα στιγμή χωρητικότητα και να αποφασίζει για την ικανότητα ή όχι του συγκεκριμένου κόμβου του ασύρματου δικτύου στο να εγκαταστήσει την αιτούσα ροή υπηρεσίας με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας.

Έτσι, η παράγραφος αυτή αναλύει τις λειτουργίες του στρώματος διαχείρισης πόρων που επικουρούν τις αντίστοιχες λειτουργίες του στρώματος διαπραγμάτευσης υπηρεσιών στα πλαίσια λειτουργίας του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων, που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4. Το Σχήμα 7-6 δείχνει την αρχιτεκτονική ενός Παρόχου

Δικτυακών Πόρων σε μία περιοχή εξυπηρέτησης. Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται ο λογικός διαχωρισμός των λειτουργιών που επιτελούνται εντός ενός Παρόχου Δικτυακών Πόρων. Έτσι, διακρίνουμε μεταξύ των στρωμάτων διαπραγμάτευσης υπηρεσιών και διαχείρισης πόρων.

Το στρώμα διαπραγμάτευσης υπηρεσιών αποτελεί το συνδετικό κρίκο με το υπόλοιπο τμήμα του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων, το οποίο και αφορά στους Παρόχους Υπηρεσιών. Όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 4, το στρώμα αυτό διατηρεί την απαραίτητη πληροφορία για τη διαμόρφωση του συνόλου των υπηρεσιών που καλείται να εξυπηρετήσει ο συγκεκριμένος Πάροχος. Η πληροφορία αυτή αναφέρεται στα διαθέσιμα επίπεδα ποιότητας των υπηρεσιών και στην κοστολόγησή τους από τους Παρόχους Δικτυακών Πόρων, ανάλογα με την εκάστοτε οικονομική πολιτική που εφαρμόζεται.



**Σχήμα 7-6. Στρώμα διαχείρισης πόρων των Παρόχων Δικτυακών Πόρων στα πλαίσια του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων.**

Το κυρίαρχο κομμάτι της λειτουργίας των Παρόχων Δικτυακών Πόρων στο Ενιαίο Σύστημα Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων είναι το Στρώμα Διαχείρισης Πόρων. Σε αυτό το σημείο, ένας Πάροχος Δικτυακών Πόρων αποφασίζει για την καλύτερη χρησιμοποίηση της διαθέσιμης χωρητικότητας σε ένα κόμβο δικτύου. Πέρα από τις διαδικασίες που πρέπει να επιτελούνται εντός ενός συγκεκριμένου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, οι οποίες μπορούν να

περιλαμβάνουν την ανακατανομή των χρηστών του Παρόχου π.χ. σε διάφορες κυψέλες, προκειμένου για κυψελωτά ασύρματα δίκτυα, το στρώμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα πλαίσια των ασύρματων συστημάτων 4<sup>ης</sup> Γενιάς, όπου και οι χρήστες μπορούν να μετακινηθούν μεταξύ διαφορετικών δικτύων που καλύπτουν την περιοχή εξυπηρέτησής τους.

Συνεπώς, το Στρώμα Διαχείρισης Πόρων πρέπει να υπεισέρχεται σε περισσότερο τεχνικές λεπτομέρειες των ροών υπηρεσιών και των δικτυακών τεχνολογιών. Με τον τρόπο αυτό, το Ενιαίο Σύστημα Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων μπορεί να επιτύχει την εγγύηση υψηλών κριτηρίων ποιότητας όλων των υπηρεσιών και να αποφύγει την υποβάθμιση του επιπέδου ποιότητας, η οποία, όπως φάνηκε και στα αποτελέσματα του κεφαλαίου 4, έχει αντίκτυπο τόσο στον ίδιο το χρήστη όσο και τους Παρόχους Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 7-6, η σημαντικότερη λειτουργία του Παρόχου Δικτυακών Πόρων στα πλαίσια του Στρώματος Διαχείρισης Πόρων, μέσα στο Ενιαίο Σύστημα Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων, είναι η υλοποίηση ενός αποδοτικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής του προσφερόμενου φορτίου. Τα επόμενα αφιερώνονται στην προδιαγραφή και την περιγραφή του προτεινόμενου δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Επίσης, αναλύονται οι μηχανισμοί που συντελούνται σε κάθε στοιχείο αυτού του συστήματος προκειμένου να επιτελεστεί η βασική λειτουργία του Στρώματος Διαχείρισης Πόρων του συγκεκριμένου Παρόχου Δικτυακών Πόρων.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 7.3, ο σκοπός των διαδικασιών ελέγχου αποδοχής που καλείται να εξυπηρετήσει το σύστημα αυτό είναι να συνεργαστεί με τα υπόλοιπα στοιχεία του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων και να συνεισφέρει στην υλοποίηση των λειτουργιών που συνοψίζονται στα ακόλουθα [26][27][43]:

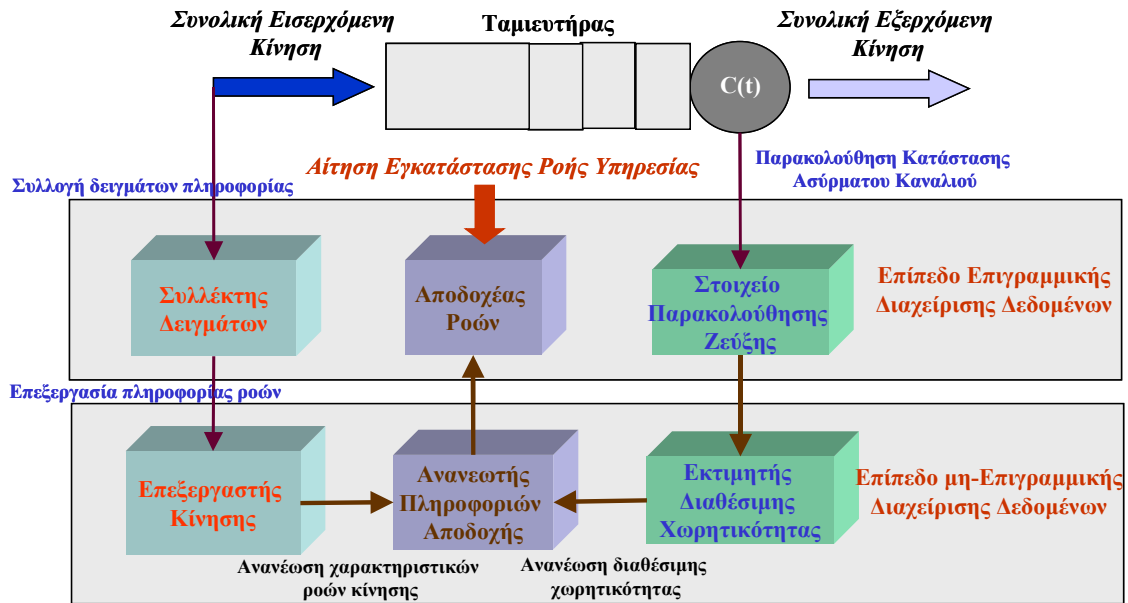
- ❑ Να εγγυηθεί την παροχή του στατιστικού QoS, με βάση τις ανάγκες των επιμέρους ροών κίνησης.
- ❑ Να δρομολογήσει τις αιτήσεις των διαφόρων χρηστών για εγκατάσταση μίας νέας ροής υπηρεσίας προς το βέλτιστο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης.
- ❑ Να επιτελέσει λειτουργίες εξισορρόπησης φορτίου μεταξύ των συνεργαζόμενων δικτύων.

Η ανάγκη για αξιόπιστους μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής ροών οφείλεται στο γεγονός ότι τα συστήματα αυτά καλούνται να λειτουργήσουν σε απαιτητικά περιβάλλοντα και να διασφαλίσουν τις ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας που τίθενται από τους χρήστες. Η ανομοιογένεια των ασύρματων συστημάτων και η επιλογή της διαλειτουργικότητας των συστημάτων 4<sup>ης</sup> Γενιάς για την αδιάλειπτη επικοινωνία των χρηστών επηρεάζει σημαντικά τις προδιαγραφές των συστημάτων ελέγχου αποδοχής. Από την άλλη, οι παραδοσιακοί μηχανισμοί στηρίζονται σε ένα σύνολο ελάχιστων παραμέτρων, το οποίο κρίνεται ανεπαρκές για να περιγράψει τις απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής. Όπως είδαμε, προς το σκοπό αυτό, εισάγονται νέες παράμετροι, οι οποίες, όμως, με τη σειρά τους μπορούν να αυξήσουν την πολυπλοκότητα των λειτουργιών των αλγορίθμων αποδοχής.



Σαν αποτέλεσμα όλων αυτών, ένα σύγχρονο σύστημα ελέγχου αποδοχής πρέπει να μπορεί να συνδυάζει τις παραμέτρους που δίνονται από τους περιγραφείς της εισερχόμενης κίνησης με τα στοιχεία που συλλέγονται για την τρέχουσα κατάσταση των δικτύων [44], η οποία, προφανώς, δεν αντικατοπτρίζεται από τις παραμέτρους αυτές. Μια τέτοια δυναμική συμπεριφορά των αλγορίθμων, όμως, εισάγει και ένα σύνολο προβλημάτων, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν για την επίτευξη της αξιοπιστίας των προτεινόμενων λύσεων όσο και για την ευστάθεια των ιδίων των μηχανισμών.

Με αναφορά στη θεωρία που έχει περιγραφεί παραπάνω, οι γενικές αρχές της αρχιτεκτονικής του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών φαίνονται στο Σχήμα 7-7. Πιο συγκεκριμένα, δίνονται τα βασικά δομικά στοιχεία αυτής της αρχιτεκτονικής, μαζί με τους δυνατούς συνδυασμούς αλληλεπιδράσεων μεταξύ αυτών.



**Σχήμα 7-7. Αρχιτεκτονική και βασικά δομικά στοιχεία του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών.**

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 7-7, τα δομικά κομμάτια του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών χωρίζονται σε δύο επίπεδα. Τα επίπεδα αυτά περιγράφονται ακολούθως:

- ❑ **Επίπεδο Επιγραμμικής Διαχείρισης Δεδομένων:** το επίπεδο αυτό είναι υπεύθυνο για τη συγκέντρωση και διαχείριση όλης της πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο. Τα στοιχεία που συλλέγονται σε αυτό το επίπεδο αξιοποιούνται σε βάθος χρόνου, ο οποίος εξαρτάται από τα επιμέρους δομικά στοιχεία που ανήκουν σε αυτό το επίπεδο.
- ❑ **Επίπεδο μη-Επιγραμμικής Διαχείρισης Δεδομένων:** σε αυτό το επίπεδο, τα δομικά στοιχεία που συλλέγονται στο πιο πάνω επίπεδο επεξεργάζονται σε μη-πραγματικό χρόνο, με σκοπό την ανανέωση των πληροφοριών για τη λήψη των αποφάσεων αποδοχής.

Η ειδοποιός διαφορά του προτεινόμενου συστήματος σε σχέση με τους παραδοσιακούς μηχανισμούς έγκειται στην έννοια της αναπροσαρμογής των παραμέτρων που περιγράφουν την εισερχόμενη στον κόμβο δικτύου κίνηση, με στόχο την εξασφάλιση του QoS των υπηρεσιών. Επίσης, τα δομικά στοιχεία που αναλαμβάνουν τη λειτουργία του ελέγχου αποδοχής χρειάζεται να μαθαίνουν από τις ραγδαίες αλλαγές του ασύρματου, κυρίως, περιβάλλοντος και να ανταποκρίνονται με όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερο τρόπο.

Στο Επίπεδο Επιγραμμικής Διαχείρισης Δεδομένων (Online Data Management Layer) μπορούμε να διακρίνουμε τα ακόλουθα δομικά στοιχεία:

- ❑ Ο Συλλέκτης Δειγμάτων: το στοιχείο αυτό αναλαμβάνει να συγκεντρώνει τα εισερχόμενα δείγματα και να τα διαχωρίζει σε κατηγορίες ροών, που διέρχονται από τον συγκεκριμένο κόμβο του δικτύου. Ήδη, είναι γνωστοί πολλοί μηχανισμοί για την παρακολούθηση της εισερχόμενης σε ένα κόμβο δικτύου κίνησης. Ενδεικτικά αναφέρουμε το [45]. Η συλλογή των δειγμάτων πραγματοποιείται, λοιπόν, σε επίπεδο αθροισμένων ροών, οι οποίες διακρίνονται από παρόμοια στατιστικά χαρακτηριστικά κίνησης. Η περίοδος συλλογής δειγμάτων είναι έγκυρη, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εισερχόμενης κίνησης για το κατάλληλο χρονικό διάστημα περιγραφής αυτής. Έτσι, όπως έχει δειχθεί στο κεφάλαιο 6, τα χαρακτηριστικά μιας κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας μπορούν να προσδιοριστούν, με βάση τον αλγόριθμο προσέγγισης που αναλύθηκε στο κεφάλαιο εκείνο, από τη συλλογή δειγμάτων σε βάθος χρόνου που καλύπτει πέντε κλίμακες χρόνου .
- ❑ Αποδοχέας Ροών: το στοιχείο αυτό αποτελεί το βασικό κομμάτι του προτεινόμενου συστήματος. Είναι ο πυρήνας των αποφάσεων για την αποδοχή ή απόρριψη των εισερχόμενων ροών, είτε αυτές αφορούν στην εγκατάσταση νέων ροών είτε στη μεταγωγή ροών, οι οποίες βρίσκονται σε εξέλιξη. Οι παράμετροι του στοιχείου αυτού ανανεώνονται από τα στοιχεία του Επιπέδου μη-Επιγραμμικής Διαχείρισης Δεδομένων σε χρόνους, οι οποίοι εξαρτώνται από την εσωτερική λειτουργία του στοιχείου, στο οποίο αναφέρονται. Το θεωρητικό υπόβαθρο για τη λειτουργία αυτού του στοιχείου έχει δοθεί στην παράγραφο 7.4, ενώ η λειτουργία του αναλύεται περισσότερο σε επόμενη παράγραφο.
- ❑ Στοιχείο Παρακολούθησης Ζεύξης: το στοιχείο αυτό παρακολουθεί την κατάσταση του ασύρματου περιβάλλοντος και ανά τακτά χρονικά διαστήματα ενημερώνει για την κατάσταση της ποιότητας της ασύρματης ζεύξης, στο τρέχον διάστημα παρατήρησης. Η κατάσταση αυτή αφορά στην τιμή του λόγου Σήματος προς Θόρυβο, το ρυθμό λαθεμένων πακέτων στο δίκτυο, την πιθανότητα επαναμετάδοσης κλπ. Οι παράμετροι αυτοί μπορούν αργότερα να αξιοποιηθούν από τα δομικά στοιχεία του Επιπέδου μη-Επιγραμμικής Διαχείρισης Δεδομένων για την πρόβλεψη της διαθέσιμης χωρητικότητας του ασύρματου δικτύου. Στα πλαίσια λειτουργίας αυτού του στοιχείου είναι η εκμετάλλευση των συλλεγόμενων τιμών από το ασύρματο μέσο και η υλοποίηση του μοντέλου του Gilbert Elliott, το οποίο περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 και την παράγραφο 3.7.2, προκειμένου να υπολογιστεί η χρησιμοποίηση του ασύρματου καναλιού. Εναλλακτικά, αν είναι διαθέσιμη η

πληροφορία σχετικά με το βαθμό χρησιμοποίησης του καναλιού, τότε η διαθέσιμη χωρητικότητα μπορεί άμεσα να υπολογιστεί. Σε κάθε περίπτωση, το στοιχείο αυτό μπορεί να τροφοδοτήσει το αντίστοιχο στοιχείο του Επιπέδου μη-Επιγραμμικής Διαχείρισης Δεδομένων με την κατάλληλη τιμή για τη διόρθωση της διαθέσιμης χωρητικότητας στον υποκείμενο κόμβο δικτύου.

Στο Επίπεδο μη-Επιγραμμικής Διαχείρισης Δεδομένων (Offline Data Management Layer) μπορούμε να διακρίνουμε τα ακόλουθα δομικά στοιχεία:

- ❑ **Επεξεργαστής Κίνησης:** το στοιχείο αυτό αναλαμβάνει την επεξεργασία των δειγμάτων που έχουν συλλεχθεί στον Συλλέκτη Δειγμάτων. Ο σκοπός του είναι η επεξεργασία των δειγμάτων για τον υπολογισμό των στατιστικών δεδομένων της κίνησης που διέρχεται μέσα από τον κόμβο δικτύου, με βάση τον αλγόριθμο προσέγγισης των χαρακτηριστικών αυτομοιότητας της κίνησης που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 6. Όταν η επεξεργασία ολοκληρωθεί, οι νέες τιμές των στατιστικών δεδομένων προωθούνται προς χρήση σε κάθε ενδιαφερόμενο στοιχείο του Επιπέδου Επιγραμμικής και μη Διαχείρισης Δεδομένων. Αυτομάτως, τα ιστορικά δεδομένα της κίνησης που είναι αποθηκευμένα στον Συλλέκτη Δειγμάτων σβήνονται, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία συλλογής δειγμάτων για την επόμενη περίοδο παρατήρησης. Σε χρονικά διαστήματα, τα οποία ορίζονται από την κρίσιμη κλίμακα χρόνου, που καθορίζεται από την ανάλυση που παρατίθεται στην παράγραφο 7.7 παρακάτω, το στοιχείο αυτό καλείται να υπολογίσει το μέσο ρυθμό μετάδοσης των ροών κίνησης, ώστε η παράμετρος αυτή να χρησιμοποιηθεί από τον Αποδοχέα Ροών.
- ❑ **Ανανεωτής Πληροφοριών Αποδοχής:** το στοιχείο αυτό έχει ορισθεί μόνο για λόγους συμπλήρωσης. Ουσιαστικά, αποτελεί τον εκπρόσωπο του Αποδοχέα Ροών στο Επίπεδο μη-Επιγραμμικής Διαχείρισης Δεδομένων και αναλαμβάνει να ανανεώσει τις τιμές των παραμέτρων που συμβάλλουν στη λήψη των αποφάσεων αποδοχής. Συνεπώς, ζητά από τον Επεξεργαστή Κίνησης για τις νέες τιμές των περιγραφέων, που χαρακτηρίζουν την υπάρχουσα στο δίκτυο κίνηση, και από τον Εκτιμητή Διαθέσιμης Χωρητικότητας, που αναφέρεται αμέσως μετά, για την κατάσταση της τρέχουσας τιμής της διαθέσιμης χωρητικότητας του κόμβου δικτύου.
- ❑ **Εκτιμητής Διαθέσιμης Χωρητικότητας:** το στοιχείο αυτό αναλαμβάνει να κάνει μια εκτίμηση της διαθέσιμης χωρητικότητας του δικτυακού κόμβου για να χρησιμοποιηθεί από τον Αποδοχέα Ροών. Στην πραγματικότητα, το στοιχείο αυτό εξαρτάται άμεσα από την υποκείμενη δικτυακή τεχνολογία, καθώς χρησιμοποιεί μοντέλα προσέγγισης της χωρητικότητας κάτω ζεύξης και διορθώνει την προκύπτουσα τιμή, με βάση την ενημέρωση που λαμβάνει από το Στοιχείο Παρακολούθησης Ζεύξης για την κατάσταση της ποιότητας του ασύρματου μέσου. Σαν παράδειγμα λειτουργίας αυτού του στοιχείου, μπορούμε να αναφέρουμε την υλοποίηση του μοντέλου υπολογισμού της χωρητικότητας του δικτύου WLAN, με βάση τον αριθμό των χρηστών που υπάρχουν στο σύστημα, όπως αυτό αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.6.1 του κεφαλαίου 3.

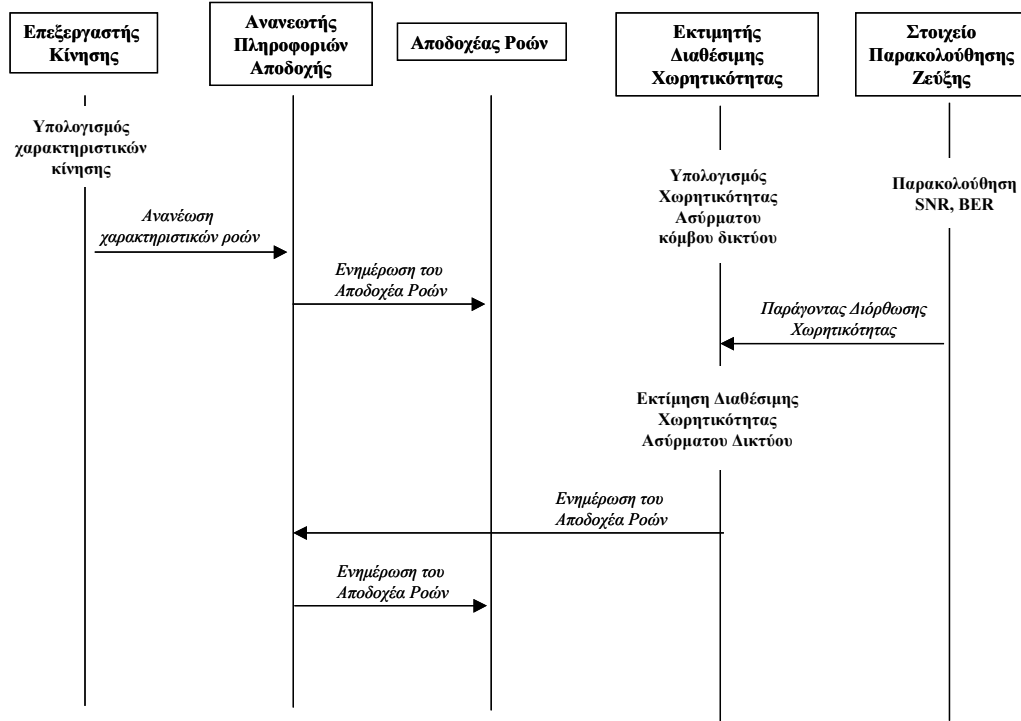
Οι λειτουργίες που συντελούνται σε αυτά τα δύο επίπεδα είναι φανερό ότι διαφέρουν κατά βάση στο χρόνο απόκρισης και ανανέωσης της πληροφορίας τους. Έτσι, τα στοιχεία του Επιπέδου Επιγραμμικής Διαχείρισης Δεδομένων αντιδρούν αμέσως στην επιβολή εξωτερικών ερεθισμάτων. Αντιθέτως, τα στοιχεία του Επιπέδου μη-Επιγραμμικής Διαχείρισης Δεδομένων εκτελούν τις λειτουργίες τους, όταν ολοκληρωθεί η αντίστοιχη λειτουργία των στοιχείων του πιο πάνω επιπέδου. Ο χρόνος ανανέωσης της πληροφορίας κάθε στοιχείου του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών θα περιγραφεί στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου.

Εδώ, πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι ο Επεξεργαστής Κίνησης έχει θεωρηθεί στη γενική περίπτωση, στην οποία οι υπηρεσίες που προσφέρονται από τους Παρόχους Υπηρεσιών διαθέτουν μηχανισμούς παρακολούθησης και πρωτόκολλα ανίχνευσης συμφόρησης (όπως το TCP) στην πλευρά του εξυπηρετητή υπηρεσίας. Αυτό σημαίνει ότι ο Συλλέκτης Δειγμάτων συλλέγει τα εισερχόμενα δείγματα για όλες τις ροές, είτε αυτές υλοποιούν το πρωτόκολλο μεταφοράς TCP είτε το UDP. Πάντως, πρέπει να τονίσουμε το γεγονός ότι η αίτηση εξυπηρέτησης που φθάνει από το στρώμα διαπραγμάτευσης υπηρεσιών, μπορεί να περιλαμβάνει, για την περίπτωση των μη προσαρμοστικών UDP ροών, σαν περιγραφείς κίνησης το σύνολο των παραμέτρων μοντελοποίησης των πηγών IFP και της κίνησης Poisson, οι οποίες διατηρούνται αναλλοίωτες από την κατάσταση συμφόρησης του δικτύου.

Ο απώτερος στόχος του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών είναι να μπορεί να διαμορφώνει γρήγορα αποφάσεις, σχετικά με την αποδοχή ή απόρριψη των ροών που επιθυμούν να εγκατασταθούν σε ένα δίκτυο. Τονίζουμε ότι οι λειτουργίες που επιτελούνται από τον Αποδοχέα Ροών είναι ανεξάρτητες από τις αντίστοιχες λειτουργίες όλων των άλλων στοιχείων του συστήματος και, κατά συνέπεια, ο χρόνος απόκρισης αυτού του στοιχείου παραμένει αμετάβλητος από το χρόνο απόκρισης των υπόλοιπων στοιχείων. Η επόμενη παράγραφος κάνει μία ανάλυση των χαρακτηριστικών λειτουργίας του Αποδοχέα Ροών, ο οποίος αποτελεί τον πυρήνα του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών, που παρουσιάστηκε στην παρούσα παράγραφο.

## **7.6. Αποδοχέας Ροών**

Η παράγραφος αυτή αναλύει τη λειτουργία του Αποδοχέα Ροών, η οποία επιτελείται στα πλαίσια αποδοχής ή απόρριψης της αίτησης εγκατάστασης νέων ροών σε ένα κόμβο δικτύου ασύρματης πρόσβασης. Όπως μπορούμε να διακρίνουμε και από το Σχήμα 7-7, ο Αποδοχέας Ροών είναι το μοναδικό στοιχείο του συστήματος που διατηρεί διεπαφή με στοιχεία του Στρώματος Διαπραγμάτευσης Υπηρεσιών. Παράλληλα, το Στοιχείο Παρακολούθησης Ζεύξης και ο Συλλέκτης Δειγμάτων διατηρούν μία διεπαφή με τον κόμβο του υποκείμενου δικτύου που ελέγχεται από τον συγκεκριμένο Πάροχο Δικτυακών Πόρων, ώστε να λαμβάνουν τις απαιτούμενες πληροφορίες από τα αντίστοιχα στοιχεία του κόμβου αυτού.



**Σχήμα 7-8. Διάγραμμα ροής για την ανανέωση των πληροφοριών του Αποδοχέα Ροών.**

Προτού αναφερθούμε στη συμπεριφορά αυτού του στοιχείου, όταν λάβει μία αίτηση για την εγκατάσταση μίας νέας ροής κίνησης, θα δούμε με λεπτομέρεια τον τρόπο ανανέωσης της απαιτούμενης πληροφορίας από τα υπόλοιπα στοιχεία αυτού του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Το Σχήμα 7-8 δείχνει το διάγραμμα ροής για την ανανέωση των πληροφοριών που πρέπει να διατηρεί ο Αποδοχέας Ροών προκειμένου να εφαρμόσει τον αλγόριθμο αποδοχής.

Όπως παρατηρούμε και από το σχήμα αυτό, οι λειτουργίες που επιτελούνται από κάθε στοιχείο είναι ανεξάρτητες. Αυτό σημαίνει ότι οι διαδικασίες υπολογισμού των παραμέτρων των IFP πηγών και της κίνησης Poisson πραγματοποιούνται σε παράλληλα επίπεδα με τις διαδικασίες παρακολούθησης της κατάστασης του ασύρματου καναλιού και της εκτίμησης της διαθέσιμης χωρητικότητας του κόμβου του ασύρματου δικτύου. Πρέπει, εδώ, να αναφέρουμε ότι στο Σχήμα 7-8 αυτό έχει παραληφθεί ο Συλλέκτης Δειγμάτων, ο οποίος αναλαμβάνει μόνο να συγκεντρώσει τα δείγματα της κίνησης που εισέρχεται στον συγκεκριμένο κόμβο δικτύου που φιλοξενεί το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών.

Ο Επεξεργαστής Κίνησης αναλύει τα δείγματα που λαμβάνονται από τον Συλλέκτη Δειγμάτων για να υπολογίσει τόσο το μέσο ρυθμό της κίνησης που εισέρχεται στον ταμιευτήρα του κόμβου του δικτύου όσο και τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων του μοντέλου Adv για την προσέγγιση των χαρακτηριστικών αυτό-ομοιότητας της κίνησης που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 6. Η διάκριση μεταξύ των χαρακτηριστικών αυτών γίνεται, γιατί όπως περιγράφεται και στα [46][47][48], τα χαρακτηριστικά πρώτης τάξης, όπως είναι ο μέσος ρυθμός μετάδοσης πακέτων, μεταβάλλονται πιο γρήγορα από τα χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης, με βάση τα οποία

προκύπτουν οι παράμετροι του μοντέλου αυτού. Αυτό σημαίνει ότι ο Επεξεργαστής Κίνησης επεξεργάζεται τα δεδομένα σε δύο χρόνους και ενημερώνει αντίστοιχα τον Ανανεωτή Πληροφοριών Αποδοχής.

Το Στοιχείο Παρακολούθησης Ζεύξης με τη σειρά του διατηρεί ένα μετρητή χρόνου, μέσα στον οποίο παρακολουθεί το κανάλι και στο τέλος του οποίου συλλέγει την πληροφορία σχετικά με τη μέση τιμή του SNR και του BER. Με βάση αυτά τα δεδομένα, το στοιχείο αυτό υλοποιεί το μοντέλο του Gilbert Elliott, που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3, και δίνει μία εκτίμηση για την απαιτούμενη διόρθωση που πρέπει να γίνει στον υπολογισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας. Η τιμή του παράγοντα διόρθωσης πρέπει κατόπιν να κοινοποιηθεί στον Εκτιμητή Διαθέσιμης Χωρητικότητας, ο οποίος έχει υπολογίσει, για ιδανικές συνθήκες καναλιού τη μέγιστη χωρητικότητα που διατίθεται για την εξυπηρέτηση της σύνδεσης κάτω ζεύξης του συνόλου των χρηστών που είναι παρόντες στην περιοχή κάλυψης του κόμβου ασύρματου δικτύου.

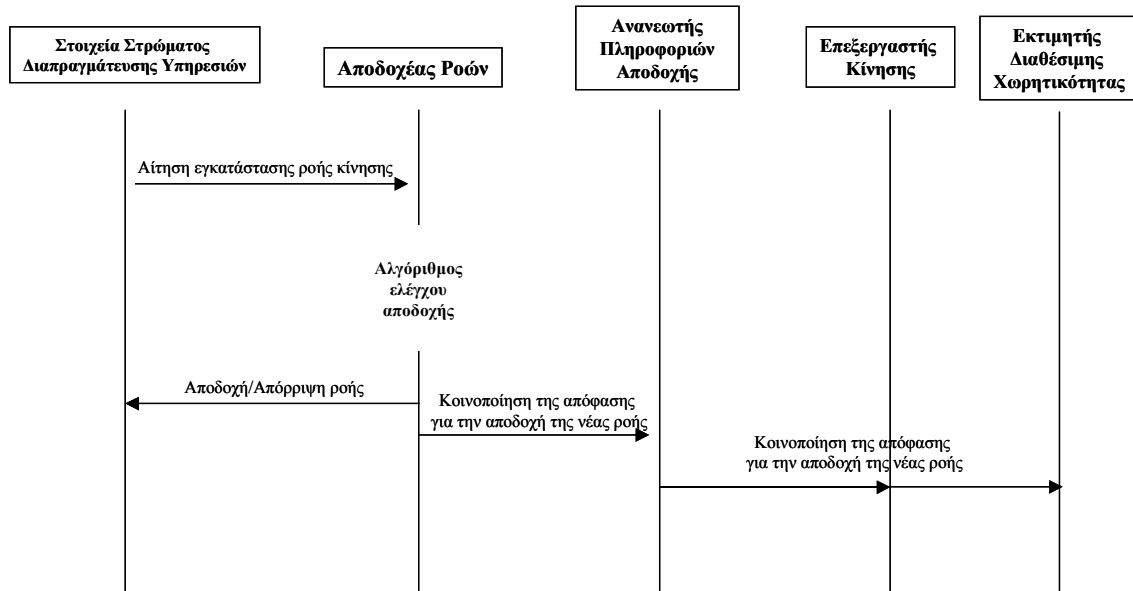
Με τον τρόπο αυτό, ο συνδυασμός των πληροφοριών, που παρέχονται από τα δύο αυτά στοιχεία, μπορεί να δώσει μία βελτιωμένη και πιο κοντά στην πραγματικότητα τιμή της διαθέσιμης χωρητικότητας ή, ισοδύναμα, του ρυθμού εξυπηρέτησης που απολαμβάνουν, τη δεδομένη χρονική στιγμή, οι ροές των χρηστών που εισέρχονται στον κόμβο δικτύου. Σε ένα τελευταίο στάδιο, η εκτίμηση της διαθέσιμης χωρητικότητας πρέπει να προωθηθεί στον Αποδοχέα Ροών, μέσω του Ανανεωτή Πληροφοριών Αποδοχής, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7-8.

Έχοντας ως βάση τις τελευταίες τιμές για τις παραμέτρους που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά των διαφόρων ροών, που, ήδη, είναι εγκατεστημένες στο δίκτυο, και εκείνες που περιγράφουν τη διαθέσιμη χωρητικότητα, σε μία δεδομένη χρονική περίοδο, ο Αποδοχέας Ροών μπορεί να πραγματοποιήσει τη βασική του λειτουργία, δηλαδή την απόκριση για την αποδοχή ή απόρριψη μίας νέας αίτησης ροής κίνησης από ένα χρήστη ή του συνόλου της προσφερόμενης κίνησης στο δίκτυο. Η λειτουργία αυτή διαγραμματικά φαίνεται στο Σχήμα 7-9.

Όπως παρατηρούμε από το σχήμα αυτό, ο Αποδοχέας Ροών λαμβάνει μία αίτηση εγκατάστασης μίας νέας ροής για μία συγκεκριμένη υπηρεσία. Η αίτηση εγκατάστασης συνοδεύεται από ένα σύνολο χαρακτηριστικών περιγραφών της κίνησης. Οι περιγραφείς αυτοί αναφέρονται στο είδος της υπηρεσίας που ζητείται να εγκατασταθεί, το μέσο ρυθμό μετάδοσης και την κλάση της υπηρεσίας, η οποία προδιαγράφει και το αντίστοιχο επίπεδο ποιότητας, στο οποίο επιθυμεί ο χρήστης να εγκαταστήσει την υπηρεσία [26]. Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά, ο Αποδοχέας Ροών μπορεί να εφαρμόσει τον αλγόριθμο ελέγχου αποδοχής, ο οποίος συνοψίζεται στην σχέση (7-8) που περιγράφεται στην παράγραφο 7.4.1. Η σχέση αυτή αναφέρει ότι το εύρος ζώνης που ανατίθεται σε κάθε ροή κίνησης εκφράζεται από την Συνάρτηση του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης και για την περίπτωση μας, επειδή προσομοιώνουμε τις ροές με μοντέλα MMFP, αυτό δίνεται από την σχέση (7-11).

Επίσης, όπως παρατηρείται και από το Σχήμα 7-9, η απόφαση του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής για την αποδοχή της νέας αίτησης εγκατάστασης ροής από μία υπηρεσία έχει σαν αποτέλεσμα

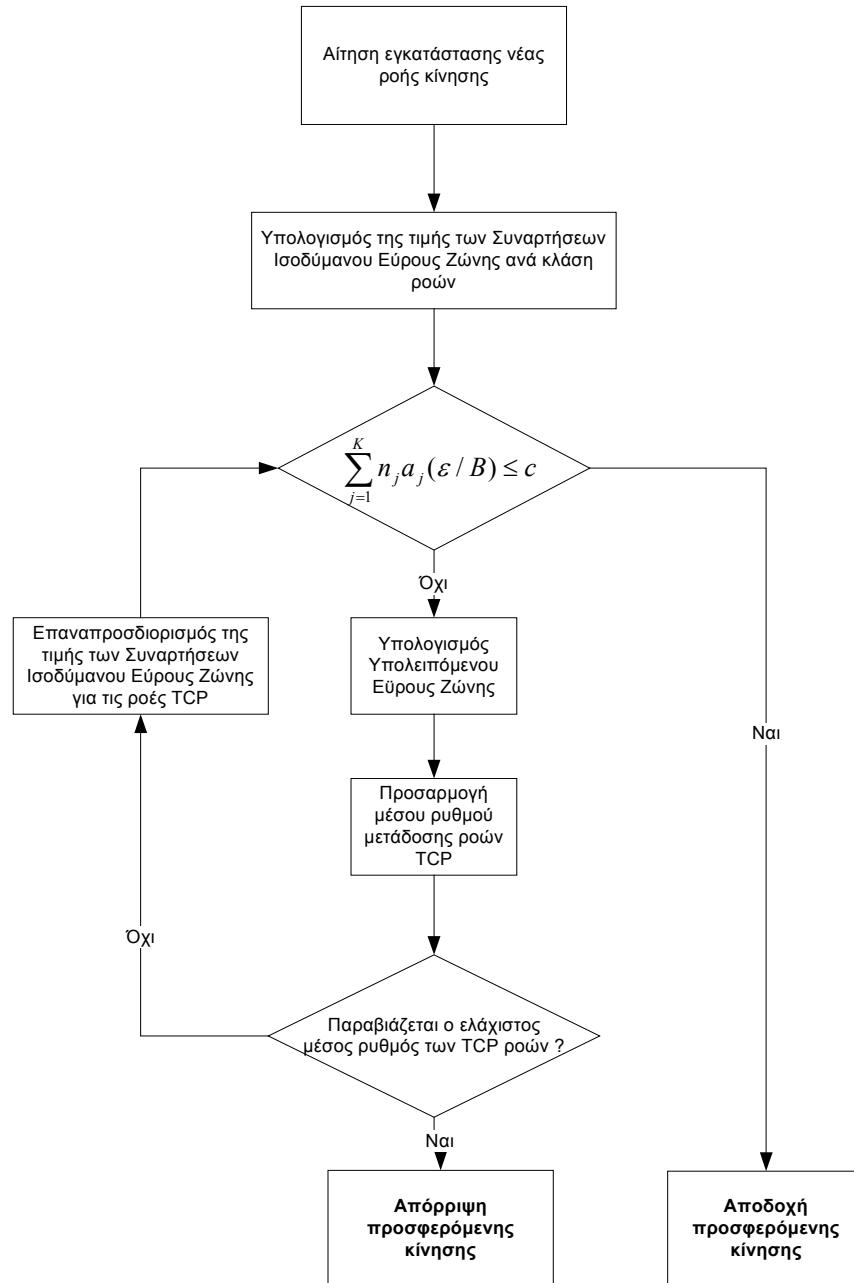
την κοινοποίηση αυτής της απόφασης στον Επεξεργαστή Κίνησης και στον Εκτιμητή Διαθέσιμης Χωρητικότητας, μέσω του Ανανεωτή Πληροφοριών Αποδοχής.



**Σχήμα 7-9. Λειτουργία ελέγχου αποδοχής του Αποδοχέα Ροών.**

Ειδικεύοντας στη λειτουργία του Αποδοχέα Ροών και με γνώμονα τα δύο βασικά είδη κίνησης που παρατηρούμε στα σύρματα δίκτυα IP (ανάλογα με το πρωτόκολλο του στρώματος μεταφοράς), μπορούμε να πούμε ότι ο Αποδοχέας Ροών αναλαμβάνει, σε περιπτώσεις συμφόρησης, να προβλέψει τη διαμόρφωση του εύρους ζώνης των TCP ροών, με βάση όσα έχουν αναφερθεί στην παράγραφο 5.5 του κεφαλαίου 5. Αυτό σημαίνει ότι, ενώ για τις κλάσεις χρηστών UDP διατηρούνται οι τιμές των παραμέτρων μοντελοποίησης, οι οποίες έχουν προκύψει από την ανάλυση του Επεξεργαστή Κίνησης, για τους χρήστες TCP πραγματοποιείται μία προσαρμογή του εύρους ζώνης ανά ροή, η οποία έχει να κάνει με τον προβλεπόμενο επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης. Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 5.5, εάν θεωρήσουμε πλήρη δικαιοσύνη του πρωτοκόλλου TCP, τότε ο αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής θα πρέπει να εκτιμήσει την απαιτούμενη μείωση του μέσου ρυθμού μετάδοσης των ροών αυτών, ώστε να καταλάβουν το υπολειπόμενο εύρος ζώνης. Το υπολειπόμενο εύρος ζώνης ορίζεται από τη διαθέσιμη χωρητικότητα του κόμβου του ασύρματου δικτύου, με βάση την τιμή που προκύπτει από την ενημέρωση του Αποδοχέα Ροών από τον Εκτιμητή Διαθέσιμης Χωρητικότητας, μείον το άθροισμα των Ισοδυνάμων Εύρων Ζώνης όλων των παρουσών ροών UDP, οι οποίες δεν έχουν ανάδραση και, συνεπώς, δεν προβλέπεται αλλαγή των χαρακτηριστικών μετάδοσης αυτών. Σημειώνουμε ότι η εκτίμηση της συμπεριφοράς των ροών TCP που αναλαμβάνει να κάνει ο αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής, η οποία προκύπτει από την αποδοχή μίας επιπλέον ροής κίνησης στον κόμβο δικτύου, είναι εκείνη που καθορίζεται από την έννοια Bulk-Transfer-Capacity (BTC), η οποία χρησιμοποιείται στα [49][50]. Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του

αλγόριθμου ελέγχου αποδοχής, παραθέτουμε το διάγραμμα ροής του, το οποίο υλοποιείται από τον Αποδοχέα Ροών. Το διάγραμμα αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 7-10.



**Σχήμα 7-10. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής του Αποδοχέα Ροών.**

Το γεγονός ότι ο αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής που περιγράφεται στο Σχήμα 7-10 θεωρεί ότι σε περίπτωση συμφόρησης απαιτείται η μείωση του μέσου ρυθμού μετάδοσης όλων των TCP ροών, ώστε αυτές να καταλάβουν όλο το υπολειπόμενο εύρος ζώνης, δεν παραβιάζει σε καμία περίπτωση τη φύση αυτού του πρωτοκόλλου. Ο αλγόριθμος αυτός κάνει μία εκτίμηση του ρυθμού μετάδοσης των TCP ροών, αλλά, προφανώς, δεν υιοθετεί την τιμή αυτή για μελλοντική



της χρήση. Αυτό σημαίνει ότι η πραγματική μείωση που υφίσταται ο μέσος ρυθμός των ροών αυτών καθορίζεται την αμέσως επόμενη χρονική περίοδο, κατά την οποία ο Επεξεργαστής Κίνησης αναλαμβάνει να υπολογίσει το μέσο ρυθμό μετάδοσης όλων των ροών που εισέρχονται στον κόμβο δικτύου. Αφού υπολογιστεί η τιμή αυτή, ο Επεξεργαστής Κίνησης ενημερώνει τον Αποδοχέα Ροών για την πραγματική τιμή του μέσου ρυθμού μετάδοσης, η οποία και χρησιμοποιείται καθ' όλη τη διάρκεια του επόμενου διαστήματος παρατήρησης.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι η συμπεριφορά του Αποδοχέα Ροών στο δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών είναι σημαντική και εξαρτάται από τις πολιτικές των Παρόχων Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων. Για τις απαιτήσεις αυτής της εργασίας, οι απαιτήσεις ποιότητας ανά υπηρεσία εξαρτώνται από το υποκείμενο πρωτόκολλο του στρώματος μεταφοράς. Αυτό σημαίνει ότι, προκειμένου για UDP υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, τα κριτήρια ποιότητας που τίθενται είναι ενδεικτικά της ανοχής τέτοιων υπηρεσιών σε μία μέγιστη τιμή καθυστέρησης μετάδοσης πακέτων ανά ροή μέσα από τον ταμιευτήρα του κόμβου δικτύου, η οποία επιτρέπεται να παραβιάζεται με μία συγκεκριμένη πιθανότητα. Αντιθέτως, για το σύνολο των TCP ροών, ο στόχος των κριτηρίων ποιότητας είναι η εξασφάλιση ενός ελάχιστου μέσου ρυθμού μετάδοσης, ο οποίος αντιστοιχίζεται ευθέως σε μία μέση χρονική διάρκεια λήψης της υπηρεσίας.

Η επιβολή απαιτήσεων ποιότητας στις TCP ροές είναι αναγκαία, γιατί επηρεάζει τις αντίστοιχες απαιτήσεις και των υπόλοιπων ροών μέσα σε ένα κόμβο δικτύου [22]. Αυτό οφείλεται, πρωτίτως, στο γεγονός ότι τα φαινόμενα ανάδρασης, που παρουσιάζει η συμπεριφορά αυτού του πρωτοκόλλου, έχουν σαν αποτέλεσμα την ελάττωση του ρυθμού μετάδοσης των TCP ροών. Κάτι τέτοιο, όμως, συνεπάγεται και την αύξηση της πιθανότητας απωλειών στο δίκτυο, το οποίο έχει άμεση επίδραση στη διαθέσιμη χωρητικότητα. Παράλληλα, η ελάττωση του ρυθμού μετάδοσης των TCP ροών πέρα από ένα κατώφλι σημαίνει ότι οι αντίστοιχοι χρήστες χρειάζεται να περιμένουν περισσότερη ώρα από την αναμενόμενη για να λάβουν το περιεχόμενο της υπηρεσίας. Σαν αποτέλεσμα, οι χρήστες εγκαταλείπουν την πρόσβαση στην υπηρεσία και, με τον τρόπο αυτό, αυξάνουν τόσο την πιθανότητα τερματισμού (dropping rate) όσο και την αναξιοπιστία του υποκείμενου Παρόχου Δικτυακών Πόρων.

### **7.7. Κλίμακα Χρόνου Παρατήρησης των Πραγματικών Δεδομένων**

Ένας παραδοσιακός μηχανισμός ελέγχου αποδοχής υποθέτει ότι οι περιγραφείς κίνησης παρέχονται από τον ίδιο τον τελικό χρήστη ή από την εφαρμογή κατά τη διάρκεια εγκατάστασης μίας ροής κίνησης. Μια τέτοια λογική, όπως αποδείχθηκε παραπάνω, υπόκειται σε ένα σύνολο προβλημάτων. Το σημαντικότερο είναι ότι η κάθε εφαρμογή παράγει κίνηση, της οποίας τα χαρακτηριστικά δεν μπορούν να προβλεφθούν, γιατί τόσο το ασύρματο κανάλι μετάδοσης όσο και η υπέρθεση διαφορετικών ειδών κίνησης στο ίδιο κανάλι διαφοροποιούν σημαντικά τους περιγραφείς μιας συγκεκριμένης ροής κίνησης. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η ύπαρξη μηχανισμών μάθησης της κατάστασης της κίνησης, όταν αυτή εισέρχεται σε ένα συγκεκριμένο κομμάτι

δικτύου και αθροίζεται με άλλες ροές. Αυτό έχει σαν συνέπεια την κατά το δυνατόν καλύτερη απεικόνιση της προσφερόμενης κίνησης σε μια δεδομένη χρονική στιγμή και την κατάλληλη από τον μηχανισμό ελέγχου λήψη απόφασης, σχετικά με τη δυνατότητα εγκατάστασης ή όχι της εισερχόμενης κίνησης.

Επειδή το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών στηρίζεται στη γνώση της κατάστασης του δικτύου και της κίνησης που εισέρχεται σε αυτό, αντιμετωπίζει τέτοια προβλήματα και μεταφέρει το πρόβλημα ανάθεσης των κατάλληλων τιμών για την περιγραφή της κίνησης από την εφαρμογή στο δίκτυο. Μέσα από διαδικασίες παρακολούθησης και μέτρησης των κατάλληλων στατιστικών δεδομένων κίνησης, ο μηχανισμός αυτός επιτρέπει στα δίκτυα να έχουν γνώση της κατάστασης τόσο της ίδιας της κίνησης όσο και του δικτύου, πάνω από το οποίο αυτή εξυπηρετείται. Με ένα τέτοιο τρόπο, αποφεύγονται προβλήματα ανεπαρκούς περιγραφής της κίνησης από τη μεριά του τελικού χρήστη, όπως είναι η περιγραφή μιας εφαρμογής, με βάση το μέγιστο δυνατό ρυθμό παραγωγής και μετάδοσης δεδομένων. Επίσης, είναι εφικτή η καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου για όλη την πιθανή διάρκεια μιας συνόδου πακέτων δεδομένων. Τέλος, με βάση τα συμπεράσματα της θεωρίας των μεγάλων αριθμών, είναι προφανές ότι, υπό την παρουσία πλήθους ροών σε ένα κόμβο δικτύου, είναι ευκολότερος ο προσδιορισμός των στατιστικών χαρακτηριστικών της συνολικής αθροιστικής κίνησης των κλάσεων χρηστών, παρά των ανεξάρτητων ροών. Κάτι τέτοιο, άλλωστε, είναι θεμιτό, αφού σε περιπτώσεις υπέρθεσης ροών, η συμπεριφορά της συνολικής αθροιστικής κίνησης καθορίζει την ποιότητα που παρέχεται σε μια μεμονωμένη ροή.

Μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να μετρηθεί κατά τη διαδικασία των λειτουργιών που επιτελούνται από το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής είναι ο χρόνος, για τον οποίο το καλιμπράρισμα των παραμέτρων που συμβάλλουν στην απόφαση του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής ισχύει. Αυτό σημαίνει ότι οι περιγραφείς κίνησης έχουν μια ορισμένη διάρκεια ζωής, η οποία εξαρτάται από τη δυναμική των ανεξάρτητων ροών, από την αντίστοιχη διακύμανση της δυναμικής συμπεριφοράς της συνολικής κίνησης και από το μηχανισμό ελέγχου.

Ο καθορισμός της τιμής του χρόνου παρακολούθησης της κίνησης εξαρτάται από δύο σημαντικούς παράγοντες [46][51]. Από τα χαρακτηριστικά των αφίξεων γεγονότων στο δίκτυο και από τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της αποχώρησης γεγονότων από το δίκτυο. Ο ρυθμός εξυπηρέτησης που διατίθεται για να εξυπηρετήσει ένα σύνολο ανεξάρτητων ροών παρουσιάζει διακυμάνσεις γύρω από μια μέση τιμή. Τέτοιες διακυμάνσεις, μπορούν να οφείλονται στη χρονική διακύμανση του αριθμού των ροών στο σύστημα και, προφανώς, στην αντίστοιχη διακύμανση της διαθέσιμης από το δίκτυο χωρητικότητας, λόγω της ιδιαιτερότητας του ασύρματου καναλιού.

Δίνοντας έμφαση στην προστασία των, ήδη, εγκατεστημένων υπηρεσιών που βρίσκονται σε εξέλιξη και συνεπώς κρατώντας την πιθανότητα τερματισμού των υπηρεσιών αυτών χαμηλή (κάτι, το οποίο είναι επιθυμητό, σύμφωνα με το [52]), ο σκοπός είναι να εξοικονομηθεί μέρος των πόρων από τις ροές, οι οποίες εγκαταλείπουν την περιοχή εποπτείας του μηχανισμού

ελέγχου. Τέτοιες ροές κίνησης μπορεί είτε να τερματίζονται είτε να υπάγονται σε διαδικασίες μεταγωγής σε άλλη περιοχή εξυπηρέτησης. Ο ρυθμός, με τον οποίο οι ροές εγκαταλείπουν την περιοχή εποπτείας, είναι ευθέως ανάλογος του αριθμού των χρηστών, έστω  $n$ , μέσα στην περιοχή αυτή και διαστασιολογείται από το μέσο χρόνο κράτησης καναλιού  $T_h$  όλων των υπαρχόντων ροών. Αυτός είναι ο μέγιστος ρυθμός, με τον οποίο μειώνονται οι χρήστες του δικτύου, και συμβολίζεται με  $T_d \approx n\bar{r} / T_h$ , όπου  $\bar{r}$  είναι ο μέσος ρυθμός ροής ανά χρήστη.

Υποθέτουμε ότι η διαθέσιμη χωρητικότητα παρουσιάζει διακυμάνσεις σε μία ορισμένη κλίμακα χρόνου  $T_a$  και, όπως αποδεικνύεται στο [46], οι διακυμάνσεις αυτές είναι ανάλογες του  $n\bar{r}$  και της τάξης του  $\sqrt{n}$ . Εάν  $T_d \ll T_a$ , ο ρυθμός διακύμανσης της διαθέσιμης χωρητικότητας είναι πολύ πιο γρήγορος από τον αντίστοιχο ρυθμό αναχώρησης ροών από το δίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση, απαιτείται η ανάθεση επιπλέον εύρους ζώνης ή αποθηκευτικού χώρου στους ταμιευτήρες, το οποίο θα εξυπηρετήσει τις περιόδους εκρηκτικότητας της κίνησης. Συνεπώς, η πλήρης αξιοποίηση των πόρων του δικτύου δεν είναι εφικτή.

Στην περίπτωση, όμως, που  $T_d \gg T_a$ , τότε ο ρυθμός διακύμανσης της διαθέσιμης χωρητικότητας είναι πολύ πιο αργός από τον αντίστοιχο ρυθμό αναχώρησης ροών από το δίκτυο και δεν απαιτείται η ανάθεση επιπλέον εύρους ζώνης. Αντίθετα, οι διακυμάνσεις αυτές μπορούν να απορροφηθούν, ελέγχοντας τον αριθμό των ροών που μένουν στο σύστημα, επιτρέποντας μόνο όσες οδηγούν σε συνολικό εύρος ζώνης που δεν υπερβαίνει τη διαθέσιμη χωρητικότητα του δικτύου. Σύμφωνα με το [46], η παράμετρος  $T_{cr} = \frac{T_h}{\sqrt{n}}$  ονομάζεται κρίσιμη κλίμακα χρόνου και

διαμορφώνει το ρυθμό ανανέωσης των δεδομένων του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών.

Γενικά, η διακύμανση της διαθέσιμης χωρητικότητας πραγματοποιείται σε πολλές κλίμακες χρόνου, το οποίο σημαίνει ότι χρειάζεται να γίνει σαφής διαχωρισμός μεταξύ των περιοχών υψηλής και χαμηλής διακύμανσης σε σχέση με τον ρυθμό αναχώρησης ροών από το δίκτυο. Έτσι, εκείνες οι ροές κίνησης που έχουν κλίμακα χρόνου πολύ μικρότερη από την κρίσιμη χρονική κλίμακα μπορούν να αντισταθμιστούν από την αποδοχή και αναχώρηση ροών από το σύστημα. Αντιθέτως, οι ροές κίνησης που έχουν κλίμακα χρόνου πολύ μεγαλύτερη από την κρίσιμη κλίμακα χρόνου  $T_{cr}$  πρέπει να αντιμετωπιστούν με ανάθεση πλεονάζοντος εύρους ζώνης από το δίκτυο ή αποθηκευτικού χώρου. Συμπερασματικά, οι διακυμάνσεις αργής χρονικής κλίμακας πρέπει να ανιχνεύονται, ώστε να μπορούν να αντισταθμιστούν, ενώ τα στατιστικά δεδομένα των διακυμάνσεων γρήγορης κλίμακας χρόνου πρέπει να μετρούνται, ώστε το κατάλληλο ποσό πλεονάζοντος εύρους ζώνης να μπορεί να διατεθεί ανά πάσα στιγμή.

Το γεγονός ότι η κρίσιμη κλίμακα χρόνου είναι ανάλογη του μέσου χρόνου κράτησης καναλιού είναι δεδομένο. Εκείνο, όμως, το οποίο είναι σημαντικό, είναι το ότι η κρίσιμη κλίμακα χρόνου

διαβαθμίζεται ανάλογα με τον παράγοντα  $1/\sqrt{n}$ . Αυτό συμβαίνει, γιατί ο συνολικός ρυθμός αναχώρησης ροών από το δίκτυο αυξάνει γραμμικά με το  $n$ , ενώ οι διακυμάνσεις αυξάνουν μόνο με  $\sqrt{n}$ . Συνεπώς, οι περισσότερες διακυμάνσεις μπορούν να αντισταθμιστούν από τις ροές που αποχωρούν από το σύστημα, οδηγώντας, με αυτόν τον τρόπο, σε μικρές τιμές για την κρίσιμη κλίμακα χρόνου.

Μια σημαντική διαπίστωση του [46] είναι το γεγονός ότι το συνολικό φορτίο που παράγεται από την υπέρθεση πλήθους ανεξάρτητων ροών, ανεξάρτητα από το βαθμό ομοιογένειας που παρουσιάζουν, είναι πιο ευαίσθητο στις διακυμάνσεις της μέσης τιμής, η οποία είναι ένα χαρακτηριστικό πρώτου βαθμού, σε σχέση με τις διακυμάνσεις του δεύτερης τάξης χαρακτηριστικού της διασποράς. Η ανάλυση της επίδοσης του αλγορίθμου, που παρουσιάζεται στο [46], δείχνει την καταλληλότητα στην επιλογή του  $T_{cr}$  σαν την κρίσιμη κλίμακα χρόνου για την ανίχνευση των διακυμάνσεων της μέσης τιμής, ενώ ένα πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ελέγχου  $T_s = KT_{cr}$ , με  $K \gg 1$ , είναι αρκετό για την εκτίμηση των διακυμάνσεων της διασποράς.

Γενικά, οι αλγόριθμοι αποδοχής κάνουν μια υπόθεση διαχωρισμού μεταξύ δύο κλιμάκων χρόνου, μίας για την περίοδο εκρηκτικής κίνησης και μία για την άφιξη και αναχώρηση ροών. Με αυτήν την υπόθεση, οι αλγόριθμοι αυτοί βασίζονται μόνο στα στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονικής κλίμακας της εκρηκτικής περιόδου για τη λήψη αποφάσεων, όπως είναι στην περίπτωση του ισοδύναμου εύρους ζώνης. Σε μία τέτοια περίπτωση, η διάρκεια ζωής των ανεξάρτητων ροών ή συνόδων δεν λαμβάνεται υπόψη και, συνεπώς, η ανάλυση του συστήματος απλοποιείται σε μία στατική διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει τον υπολογισμό του χωρίου αποδοχής ροών για δεδομένες απαιτήσεις ποιότητας, με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά της εκρηκτικής κίνησης.

Η ενσωμάτωση των δυναμικών χαρακτηριστικών των αφίξεων και αναχωρήσεων ροών στο δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών αναδεικνύει τη σπουδαιότητα ύπαρξης της κρίσιμης κλίμακας χρόνου. Οι διακυμάνσεις σε μικρές ή μεγάλες χρονικές κλίμακες σε σχέση με την κρίσιμη κλίμακα χρόνου μπορούν να αντιμετωπιστούν με τον διαχωρισμό των κλιμάκων χρόνου σε σχέση με το  $T_{cr}$ , όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Έτσι, ο διαχωρισμός αυτός οδηγεί σε ένα αντίστοιχο διαχωρισμό των χρονικών κλιμάκων για τις διακυμάνσεις της χωρητικότητας. Σε κάθε περίπτωση, η γνώση των χρονικών περιόδων ανανέωσης της πληροφορίας είναι ένα σημαντικό κεφάλαιο για την πλήρη περιγραφή ενός αποδοτικού και ευέλικτου συστήματος ελέγχου αποδοχής. Ωστόσο, η μέτρηση αυτής της παραμέτρου δεν αποτελεί αντικειμενικό σκοπό αυτής της εργασίας, αλλά, όπου απαιτείται, γίνεται χρήση των όσων έχουν, γενικά, αναφερθεί στη βιβλιογραφία και συνοψίστηκαν στην παράγραφο αυτή.

## 7.8. Συμπεράσματα

Το κεφάλαιο αυτό έδωσε τα γενικά γνωρίσματα των μηχανισμών ελέγχου αποδοχής και περιέγραψε τις βασικές απαιτήσεις τέτοιων μηχανισμών για την κάλυψη των απαιτήσεων για την εγγύηση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών. Επίσης, το κεφάλαιο αυτό οριοθέτησε το πρόβλημα της ανάπτυξης και υλοποίησης ενός αποδοτικού συστήματος ελέγχου αποδοχής για τη διαχείριση των δικτυακών πόρων στα ασύρματα δίκτυα IP και την εγγύηση των κριτηρίων ποιότητας του προσφερόμενου φορτίου, στην περίπτωση της σύνδεσης κάτω ζεύξης.

Με βάση τα συμπεράσματα των προηγούμενων κεφαλαίων, έκανε μια ανασκόπηση της θεωρίας της Συνάρτησης του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης, η οποία παρέχει ασυμπτωτική, αλλά αξιόπιστη, προσέγγιση της συμπεριφοράς της ουράς αναμονής σε ένα ταμειυτήρα δικτύου. Το βασικό της γνώρισμα είναι η έννοια της αθροιστικότητας και η ύπαρξη απλών εκφράσεων για την περίπτωση Μαρκοβιανών πηγών MMFP, βάσει των οποίων μπορούν να περιγραφούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ροών κίνησης που παράγονται από την υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών στα ασύρματα δίκτυα IP. Τέλος, το κεφάλαιο αυτό περιέγραψε την αρχιτεκτονική και τα βασικά δομικά στοιχεία ενός δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Το σύστημα αυτό ανταποκρίνεται στις αλλαγές των χαρακτηριστικών τόσο της κίνησης όσο και της διαθέσιμης χωρητικότητας της υποκείμενης δικτυακής τεχνολογίας και, κατά συνέπεια, μπορεί να λάβει αξιόπιστες αποφάσεις για την αποδοχή ή απόρριψη των εισερχόμενων αιτήσεων εγκατάστασης ροών κίνησης.

## 7.9. Αναφορές

- [1] Sudhir Dixit and Ramjee Prasad, “Wireless IP and Building the Mobile Internet”, Artech House, 2003, ISBN: 1-58053-354-X.
- [2] P. Siripongwutikorn, S. Banerjee and D. Tipper, “A Survey of Adaptive Bandwidth Control Algorithms”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Third Quarter 2003, pp 14-26.
- [3] Z. Turanyi, A. Veres and A. Olah, “A family of measurement-based admission control algorithms”, Proceedings of the IFIP TC6/WG6.3 Seventh International Conference on Performance of Information and Communication Systems, IFIP Conference Proceedings, Vol. 127, 1998, pp. 153 – 164, ISBN:0-412-83730-7
- [4] Nicolas Christin, Jorg Liebeherr, and Tarek F. Abdelzaher, “A Quantitative Assured Forwarding Service”, Proc. of IEEE INFOCOM 2002, New York, June 2002.
- [5] G. Kesidis, “Bandwidth adjustments using on-line packet measurements”, SPIE Conf. Performance and Control of Network Systems, Boston, MA, Sept. 1999
- [6] Dongmei Zhao, Xuemin Shen, and Jon W. Mark, “Efficient Call Admission Control for Heterogeneous Services in Wireless Mobile ATM Networks”, IEEE Communications Magazine, October 2000, pp 72-78

- [7] P. Siripongwutikorn, S. Banerjee and D. Tipper, “Adaptive Bandwidth Control for Efficient Aggregate QoS Provisioning”, Proc. IEEE GLOBECOM’02, Taipei, Taiwan, Nov. 2002.
- [8] N. Benameur, S. Ben Fredj, S. Oueslati-Boulahia and J. W. Roberts, “Quality of service and flow level admission control in the Internet”, Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, Vol. 40, Issue 1, September 2002, pp. 57–71, ISSN: 1389-1286
- [9] N. G. Duffield et al., “A Flexible Model for Resource Management in Virtual Private Networks,” Proc. ACM SIGCOMM’99, Cambridge, MA, Oct. 1999, pp. 95–108.
- [10] Daqing Gu and Jinyun Zhang, “A New Measurement-Based Admission Control Method for IEEE802.11 Wireless Local Area Networks” Technical Report, TR-2003-122, October 2003
- [11] N. L. S. Fonseca, G. S. Mayor and C. A. V. Neto, “On the Equivalent Bandwidth of Self-Similar Sources”, ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, Vol. 10, No. 2, April 2000, pp. 104–124.
- [12] Z. Sahinoglu and S. Tekinay, “A Novel Approach Bandwidth Allocation: Wavelet-Decomposed Signal Energy Approach”, Proc. IEEE GLOBECOM’01, San Antonio, TX, Dec. 2001.
- [13] Yeonwoo Lee and Steve McLaughlin, “Radio resource metric estimation for a TDD-CDMA system supporting wireless internet traffic” Wireless Communications and Mobile Computing, Vol. 4, John Wiley & Sons, 2004, pp. 513–528.
- [14] Christoph Lindemann, Marco Lohmann, and Axel Thümmmler, “Adaptive Call Admission Control for QoS/Revenue Optimization in CDMA Cellular Networks”, ACM Wireless Networks, Vol. 10, Issue 4, July 2004, pp. 457 – 472.
- [15] S. Wang, R. Nathuji, R. Bettati, and W. Zhao, “Providing Statistical delay Guarantees in Wireless Networks,” in Proc. IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), March 2004.
- [16] Jeong Geun Kim and Marwan Krunz, “Bandwidth Allocation in Wireless Networks with Guaranteed Packet-Loss Performance”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 8, No.3, June 2000.
- [17] Jeong Geun Kim and Marwan Krunz, “Fluid Analysis of Delay Performance for QoS Support in Wireless Networks”. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 19, No. 2, 2001.
- [18] Sachin Garg and Martin Kappes, “Admission Control for VoIP Traffic in IEEE 802.11 Networks”, Proc. Of the IEEE GLOBECOM 2003, N. York, Vol. 6, December 2003, pp. 3514-3518.

- [19] M.H. Ahmed, “Call Admission Control in Wireless Networks: A Comprehensive Survey”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, First Quarter 2005, Vol. 7, No. 1, pp 50-69.
- [20] K. Shiimoto, N. Yamanaka and T. Takahasi, “Overview of Measurement-Based Connection Admission Control Methods in ATM Networks”, IEEE Communications Surveys, <http://www.comsoc.org/pubs/surveys>, First Quarter 1999, pp. 2-13.
- [21] J. C. Chen and T. Zhang, “IP-Based Next-Generation Wireless Networks Systems, Architectures, and Protocols”, Wiley Interscience, John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2004, ISBN 0-471-23526-1.
- [22] L. Massoulié and J.W. Roberts, “Arguments in Favour of Admission Control for TCP Flows”, in Proc. of ITC 16, Edinbourg, June 1999.
- [23] Richard Mortier, Ian Pratt, Christopher Clark, and Simon Crosby, “Implicit Admission Control”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 18, No. 12, December 2000, pp. 1-12.
- [24] Raghuveer M. Rao, Cristina Comaniciu, T.V. Lakshman, and H. Vincent Poor, “Call Admission Control in Wireless Multimedia Networks”, IEEE Signal Processing Magazine, September 2004, pp. 51-58.
- [25] IST project CREDO (Composite Radio and Enhanced service Delivery for the Olympics) Web site, [credo.nal.motlabs.com](http://credo.nal.motlabs.com), Jan. 2002.
- [26] P.Stathopoulos, V.Tountopoulos, D.Kouis, P.Demestichas, K.Kontovasilis, N.Mitrou, “QoS Challenges in Beyond 3G Heterogeneous Networks and a Service based Approach”, 1st International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs '03), Ilkley, UK, July 2003.
- [27] D. Kouis, P.Stathopoulos, V.Tountopoulos, N.Mitrou, C.Skianis, “Composite Radio and Enhanced service Delivery for World Class Events: QoS Challenges and the CREDO approach”, World Class Events: Telecommunications Challenges Workshop of Networking 2005 Conference, Waterloo Ontario, Canada, May 2005.
- [28] Broadband Radio Access for IP-based Networks (BRAIN) Web Site, [www.ist-brain.org](http://www.ist-brain.org), January 2001.
- [29] BRAIN: deliverable D2.2 “BRAIN architecture specifications and models, BRAIN functionality and protocol specification”, <http://www.ist-brain.org/>, March 2001.
- [30] Millennium Research for Advanced Information Technology (MIRAI) Web Site, <http://www.miraipj.jp/>, January 2001.
- [31] Dynamic Radio for IP-Services in Vehicular Environments (DRIVE) project Web Site, <http://www.ist-drive.org/>, January 2000.

- [32] Wireless IP Network as a Generic Platform for Location Aware Service Support (WINEGLASS) Web Site, <http://wineglass.tilab.com/>, January 2001.
- [33] A. Petajisto, “An Empirical Time-Series Analysis of Internet Protocol Datatraffic. Special study for the Systems Analysis Laboratory”, Espoo, Finland: Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory, 1997.
- [34] F.P. Kelly, "Effective bandwidths at multi-class queues", Queueing Systems, Vol. 9, pp. 5-16, 1991
- [35] F. Kelly: “Notes on effective bandwidths.” In Stochastic Networks: Theory and Applications, Eds: F. P. Kelly, S.Zachary, I. Ziedins, Clarendon Press, Oxford, 1996, pp.141-168.
- [36] Toni Janevski, “Traffic Analysis and Design of Wireless IP Networks”, Artech House, 2003, ISBN 1-58053-331-0.
- [37] Shiwen Mao and Shivendra S. Panwar, “The Effective Bandwidth of Markov Modulated Fluid Process Sources with a Generalized Processor Sharing Server”, GLOBECOM 2001, IEEE Global Telecommunications Conference, No. 1, Novemebr 2001, pp. 2341 – 2346.
- [38] D. Kouis, V. Tountopoulos, N. Mitrou, M.E. Theologou, “Network Planning and Performance Evaluation for IP-Enabled DVB-T Networks”, WSEAS Transactions on Communications, Vol. 3, Issue 2, April 2004, pp 539-544.
- [39] Κίμων Κοντοβασίλης, «Ασυμπτωτικές θεωρίες για μεγάλα συστήματα πολυπλεξίας», Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος Έλεγχος Κίνησης και Διαχείριση Πόρων σε Δίκτυα Ολοκληρωμένων Υπηρεσιών, Δεκέμβριος 1999.
- [40] Credo consortium, “Specification of generic experiment components”, Deliverable 6b, IST 2001-33093 Credo, February 2003.
- [41] A. I. Elwalid and D. Mitra, “Effective bandwidth of general Markovian traffic sources and admission control of high speed networks”, IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 1, 1993, pp. 329–343.
- [42] Kimon Kontovasilis and Nikolas Mitrou, “Effective Bandwidths for a Class of Non Markovian Fluid Sources”
- [43] G. Koundourakis, N. Koutsouris, V. Stavroulaki, L. Papadopoulou, D. Kouis, V. Tountopoulos, P. Demestichas, N. Mitrou, “Network and Service Management System for Optimising Service Delivery and Traffic Distribution in Composite Radio Environments”, in Proc. IST Mobile & Wireless Telecommunications Summit 2003, Aveiro, Portugal, June 2003.



- [44] D. Kouis, V. Tountopoulos, P. Stathopoulos, K. Kontovasilis, N. Mitrou, “Measurement-Based QoS Management in Composite Radio Environment”, 7th WSEAS International Conference on Communications, Corfu Island, Greece, July 2003.
- [45] <http://windump.polito.it/>
- [46] M. Grossglauser, D. N. C. Tse, “Time-scale decomposition approach to Measurement-Based Admission Control”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 11, Issue 4, August 2003, pp. 550-563.
- [47] Tsunyi Tuan and Kihong Park, “Multiple Time Scale Redundancy Control for QoS-sensitive Transport of Real-time Traffic”, Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000, 26-30 March 2000, Tel Aviv, Israel, ISBN 0-7803-5880-5 pp. 1683-1692.
- [48] K. Park and T. Tuan, “Performance Evaluation of Multiple Time Scale TCP Under Self-Similar Traffic Conditions”, ACM Transactions on Modeling Computer Simulation, Vol. 10, No. 2, April 2000, pp. 152–177.
- [49] Constantinos Dovrolis, Ravi Prasad, Margaret Murray and K.C. Claffy, “Bandwidth estimation: metrics, measurement techniques, and tools”, in IEEE Network, November-December 2003.
- [50] M. Mathis and M. Allman, A Framework for Defining Empirical Bulk Transfer Capacity Metrics, July 2001, RFC 3148.
- [51] S. Jiang, D. H. K. Tsang and B. Li, “An Enhanced Distributed Call Admission Control for Wireless Systems”, Proceedings of the Third IEEE Symposium on Computers & Communications ISCC, 1998, pp. 695-699, ISBN:0-8186-8538-7.
- [52] I.C. Panoutsopoulos, S. Kotsopoulos and V. Tountopoulos, “Handover and New Call Admission Policy Optimization for G3G Systems”, Wireless Networks Kluwer Academic Publishers, Vol. 8, 2002, pp. 381–389.



## **Κεφάλαιο 8**

### **Αποτελέσματα**

#### **8.1. Εισαγωγή**

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής ροών κίνησης για την εξασφάλιση της απαιτούμενης ποιότητας, με γνώμονα τα διάφορα κριτήρια που θέτουν οι χρήστες και τα οποία αντιστοιχίζονται σε παραμέτρους των υποκείμενων δικτυακών τεχνολογιών. Προς το σκοπό αυτό, παρατίθεται ένα σύνολο εξομοιώσεων για την αποτίμηση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου αποδοχής με μεταβαλλόμενο προσφερόμενο φορτίο, το οποίο παράγεται από διάφορα είδη υπηρεσιών.

Τέλος, το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με την παράθεση ενός συνόλου από παραδείγματα της συνδυασμένης χρήσης του αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, με το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών, που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 7.

#### **8.2. Επίδοση του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών**

Έχοντας αναλύσει στο κεφάλαιο 6 τις μεθόδους που αποσκοπούν στην περιγραφή της κίνησης IP και την προσέγγιση των χαρακτηριστικών αυτό-ομοιότητάς της, προχωράμε στη μελέτη των μηχανισμών που εξασφαλίζουν την απαιτούμενη ποιότητα σε μία υπηρεσία ή σε ένα σύνολο υπηρεσιών. Έτσι, στην παράγραφο αυτή, εστιάζουμε στον αλγόριθμο αποδοχής ροών κίνησης, που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 7, στα πλαίσια λειτουργίας του Αποδοχέα Ροών του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών, για τον καθορισμό του χωρίου αποδοχής ενός ασύρματου δικτύου, δεδομένου του προσφερόμενου φορτίου και των αντίστοιχων απαιτήσεων ποιότητας ανά υπηρεσία ή ακόμα και ροή υπηρεσίας.

##### **8.2.1. Καθορισμός του χωρίου αποδοχής χρηστών**

Η παράγραφος αυτή κάνει μία εισαγωγή στην έννοια του χωρίου αποδοχής χρηστών. Προς το σκοπό αυτό, παρατίθεται το ακόλουθο απλό παράδειγμα. Χωρίς βλάβη της γενικότητας,

εξετάζουμε δύο τυχαίες ροές κίνησης, οι οποίες διακρίνονται από διαφορετικά χαρακτηριστικά. Υποθέτουμε ότι οι ροές αυτές στηρίζονται σε πρωτόκολλα χωρίς επιβεβαίωση λήψης, ώστε η κατάσταση συμφόρησης του δικτύου να μην μεταβάλλει τον ρυθμό μετάδοσης. Με άλλα λόγια, υποθέτουμε ότι οι ροές αυτές υλοποιούν ένα πρωτόκολλο παρόμοιο του UDP.

Έστω ότι η πρώτη ροή  $F1$  ακολουθεί την Pareto κατανομή για το μέγεθος των πακέτων, με παραμέτρους  $a = 1.25$  και  $b = 50$ . Ο μέσος ρυθμός μετάδοσης μετράται στα  $br1 = 150kbps$ . Η δεύτερη ροή  $F2$  παράγει πακέτα, το μέγεθος των οποίων μεταβάλλεται σύμφωνα με την Pareto κατανομή με παραμέτρους  $a = 1.2$  και  $b = 150$ . Ο μέσος ρυθμός μετάδοσης μετράται στα  $br2 = 275kbps$ . Εφαρμόζουμε την ανάλυση του κεφαλαίου 6 για να καθορίσουμε τις απαραίτητες παραμέτρους των IFP πηγών, καθώς και της κίνησης Poisson. Ο Πίνακας 8-1 συνοψίζει τις παραμέτρους του μοντέλου μας για τις δύο ροές  $F1$  και  $F2$ .

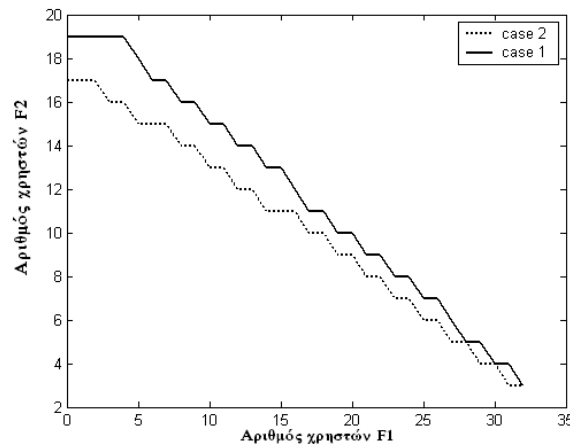
**Πίνακας 8-1. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών και της κίνησης Poisson για τις ροές κίνησης  $F1$  και  $F2$ .**

| D                            | F1                 |            |                              | F2                 |            |             |
|------------------------------|--------------------|------------|------------------------------|--------------------|------------|-------------|
|                              | $\lambda_{on/off}$ | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$                  | $\lambda_{on/off}$ | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
| 1                            | 7.0847             | 0.25       | 0.016725                     | 5.5726             | 0.2        | 0.015367    |
| 2                            | 1.6875             | 0.014059   | 0.0024809                    | 0.4420             | 0.0043089  | 0.00082074  |
| 3                            | 1.5056             | 0.00079057 | 0.00013951                   | 0.0784             | 9.2832e-5  | 1.7682e-5   |
| 4                            | 1.1357             | 4.4457e-5  | 7.8454e-6                    | 0.0146             | 2e-6       | 3.8095e-7   |
| $\lambda_{Poisson} = 0.7589$ |                    |            | $\lambda_{Poisson} = 1.6574$ |                    |            |             |

Αναφερόμαστε, τώρα, στα κριτήρια ποιότητας που τίθενται από καθεμία από τις ροές και πώς αυτά επηρεάζουν τις αποφάσεις του αλγορίθμου αποδοχής. Υποθέτουμε, λοιπόν, ότι η ροή  $F1$  ζητά ένα επίπεδο ποιότητας, το οποίο καθορίζεται από την πιθανότητα  $pr1 = 10^{-4}$  να υπερβεί η καθυστέρηση την τιμή  $d1 = 1.5sec$ . Με παρόμοιο τρόπο, ορίζουμε το επίπεδο ποιότητας για τη ροή  $F2$  από το ζεύγος των παραμέτρων  $d2 = 0.5sec$  και  $pr1 = 10^{-3}$ . Με βάση αυτές τις απαιτήσεις ποιότητας και για τις τιμές των χαρακτηριστικών κίνησης των ροών που δείχνει ο Πίνακας 8-1, σχεδιάζουμε το χωρίο αποδοχής για διάφορους συνδυασμούς χρηστών από τις δύο ροές. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-1, η συμπαγής γραμμή (case 1) δείχνει το ζητούμενο χωρίο για ένα δίκτυο WLAN, το οποίο καλείται να εξυπηρετήσει τους πιθανούς συνδυασμούς χρηστών από τις δύο αυτές ροές. Σημειώνουμε ότι η διαθέσιμη χωρητικότητα για την επιβολή του αλγορίθμου αποδοχής του κεφαλαίου 7, προκύπτει από την ανάλυση που έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 3.

Για να ολοκληρώσουμε την εισαγωγή μας στην εννοιολογική προσέγγιση του χωρίου αποδοχής χρηστών, συμπληρώνουμε το παράδειγμά μας με την ακόλουθη υπόθεση. Υποθέτουμε ότι τα χαρακτηριστικά κίνησης της ροής  $F2$  αλλάζουν έτσι ώστε η κίνηση να γίνει περισσότερο εκρηκτική. Αυτό μπορεί να γίνει, για παράδειγμα, εάν η ροή  $F2$  αφορά σε μία ροή βίντεο, η οποία παράγεται από έναν εξυπηρετητή. Υποθέτουμε, λοιπόν, ότι ο εξυπηρετητής παρέχει τη ροή

αυτή κωδικοποιημένη με ένα διαφορετικό πρότυπο. Σκοπός μας είναι να δούμε την επίδραση αυτής της μεταβολής στην συμπεριφορά του αλγορίθμου αποδοχής και πώς αυτό επηρεάζει το χωρίο αποδοχής χρηστών. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 8-1 με τη διακεκομμένη γραμμή. Παρατηρώντας το σχήμα αυτό, συμπεραίνουμε ότι αν το δίκτυο οφείλει να συμμορφωθεί προς τις απαιτήσεις ποιότητας που θέτουν οι χρήστες και να εφαρμοστούν οι συμφωνίες που έχουν γίνει μεταξύ των Παρόχων, θα πρέπει ο αλγόριθμος ελέγχου αποδοχής να αποδέχεται λιγότερες κλήσεις από την ροή  $F2$  κατά 10% περίπου (που αντιστοιχεί σε κλήσεις που παράγονται από 1-2 χρήστες), δεδομένου ότι ο αριθμός των κλήσεων/ χρηστών από την ροή  $F1$  που γίνονται δεκτοί παραμένει σταθερός.



**Σχήμα 8-1. Χωρίο αποδοχής χρηστών για διαφορετικές διαμορφώσεις των ροών κίνησης  $F1$  και  $F2$**

### 8.2.2. Εξομοιώσεις

Η παράγραφος αυτή αναλύει τη συμπεριφορά του αλγορίθμου αποδοχής ροών κίνησης, ο οποίος εφαρμόζεται από το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών για τον καθορισμό των απαιτούμενων ορίων λειτουργίας του συστήματος σε κατάσταση ευστάθειας και χωρίς την παραβίαση των κριτηρίων ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών. Οι εξομοιώσεις αυτές βασίζονται στη θεωρία της Συνάρτησης του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης, η οποία έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 7 και τις αποφάσεις που πρέπει να λαμβάνονται από τον Αποδοχέα Ροών του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Επειδή, θεωρούμε ότι οι εισερχόμενες υπηρεσίες προσομοιώνονται από την υπέρθεση πηγών IFP με πηγές Poisson, η περιγραφή της Συνάρτησης του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης για τις IFP πηγές προκύπτει άμεσα από εφαρμογή της σχέσης (7-8) του κεφαλαίου 7.

Το δίκτυο, στο οποίο αναφέρονται οι παρακάτω εξομοιώσεις, είναι ένα δίκτυο WLAN, ονομαστικής χωρητικότητας 11Mbps. Η διαθέσιμη, κάθε φορά, χωρητικότητα για την υποστήριξη των εισερχόμενων υπηρεσιών μεταβάλλεται με τον αριθμό των χρηστών, σύμφωνα

με το μοντέλο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 και την παράγραφο 3.6.1. Επίσης, για λόγους απλούστευσης, υποθέτουμε ιδανικές συνθήκες καναλιού, δηλαδή ότι δεν υπάρχει επιρροή από τις συστάσεις του Στοιχείου Παρακολούθησης Ζεύξης, αλλά ότι η διαθέσιμη χωρητικότητα εξαρτάται μόνο από το μοντέλο του Εκτιμητή Διαθέσιμου Εύρους Ζώνης. Προφανώς, τα αποτελέσματα, που θα προέκυπταν αν λαμβάναμε υπόψη το Στοιχείο Παρακολούθησης Ζεύξης, θα ήταν ανάλογα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω.

Για την αποτίμηση των μηχανισμών αποδοχής, υποθέτουμε τρεις ανεξάρτητες υπηρεσίες. Η πρώτη από αυτές είναι μία ροή βίντεο πραγματικού χρόνου. Στο εξής η υπηρεσία αυτή θα συμβολίζεται ως Y1. Η υπηρεσία αυτή στηρίζεται στο πρωτόκολλο UDP, άρα δεν υφίστανται μηχανισμοί ανάδρασης που προσαρμόζουν τον ρυθμό αποστολής δεδομένων ανάλογα με την συμφόρηση του δικτύου WLAN. Επίσης, η Y1 παρουσιάζει ένα μέσο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων  $\overline{r_{Y1}} = 2.1Mbps$ , ενώ τα δείγματα που προκύπτουν από την κίνηση αυτή αναλύονται από τον Επεξεργαστή κίνησης για τον καθορισμό των παραμέτρων των IFP πηγών και της κίνησης Poisson. Ο Πίνακας 8-2 δίνει τις τιμές των παραμέτρων για την υπηρεσία αυτή. Σημειώνουμε ότι τώρα οι τιμές των παραμέτρων  $\lambda_{on/off}$  και  $\lambda_{Poisson}$  αφορούν σε ρυθμό μετάδοσης Mbits/sec.

**Πίνακας 8-2. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών και της κίνησης Poisson για την υπηρεσία Y1.**

| D                          | $\lambda_{on/off}$ (Mbps) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|----------------------------|---------------------------|------------|-------------|
| 1                          | 1.30                      | 0.02       | 0.094686    |
| 2                          | 0.85                      | 0.00043089 | 0.0020399   |
| 3                          | 0.27                      | 9.283e-6   | 4.3949e-5   |
| 4                          | 0.32                      | 2e-7       | 9.4686e-7   |
| $\lambda_{Poisson} = 0.13$ |                           |            |             |

Η δεύτερη υπηρεσία που χρησιμοποιούμε στις εξομοιώσεις που ακολουθούν είναι μία υπηρεσία μεταφοράς αρχείων FTP. Η υπηρεσία αυτή στηρίζεται στο πρωτόκολλο TCP, άρα υπάρχει ανάδραση που διαμορφώνει το ρυθμό αποστολής δεδομένων, ανάλογα με τη συμφόρηση του δικτύου WLAN. Ο Πίνακας 8-3 συνοψίζει τις τιμές των παραμέτρων για την υπηρεσία αυτή, η οποία παρουσιάζει ένα μέσο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων  $\overline{r_{Y2}} = 2.6Mbps$ . Στο εξής η υπηρεσία αυτή θα συμβολίζεται ως Y2. Τονίζουμε ότι υποθέτουμε πλήρη δικαιοσύνη του πρωτοκόλλου TCP, οπότε η αύξηση του αριθμού των χρηστών που ζητούν την υπηρεσία Y2, σημαίνει ότι οι χρήστες μοιράζονται εξίσου τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου.

Η τρίτη υπηρεσία που χρησιμοποιούμε είναι μία παραλλαγή της Y1 και τη συμβολίζουμε με Y3. Δηλαδή, υποθέτουμε ότι η Y3 είναι η ροή βίντεο πραγματικού χρόνου Y1 διαμορφωμένη με μικρότερο μέσο και μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, σε σχέση με την Y1. Ο μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι  $\overline{r_{Y3}} = 490kbps$ , ενώ ο Πίνακας 8-4 συνοψίζει τις παραμέτρους των

IFP πηγών και της κίνησης Poisson για την υπηρεσία Y3 σε επίπεδο πακέτου, με βάση την ανάλυση του Επεξεργαστή Κίνησης.

**Πίνακας 8-3. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών και της κίνησης Poisson για την υπηρεσία Y2.**

| D                          | $\lambda_{on/off}$ (Mbps) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|----------------------------|---------------------------|------------|-------------|
| 1                          | 0.93                      | 0.0075     | 0.073898    |
| 2                          | 0.18                      | 0.00016159 | 0.0015921   |
| 3                          | 0.033                     | 3.4812e-6  | 3.43e-5     |
| 4                          | 6.5e-3                    | 7.5e-9     | 7.3898e-7   |
| $\lambda_{Poisson} = 1.56$ |                           |            |             |

**Πίνακας 8-4. Τιμές των παραμέτρων των IFP πηγών και της κίνησης Poisson για την υπηρεσία Y3.**

| D                           | $\lambda_{on/off}$ (Mbps) | $\mu_{on}$ | $\mu_{off}$ |
|-----------------------------|---------------------------|------------|-------------|
| 1                           | 0.27                      | 0.02       | 0.094686    |
| 2                           | 0.17                      | 0.00043089 | 0.0020399   |
| 3                           | 0.056                     | 9.283e-6   | 4.3949e-5   |
| 4                           | 0.064                     | 2e-7       | 9.4686e-7   |
| $\lambda_{Poisson} = 0.028$ |                           |            |             |

### 8.2.2.1. Μεταβολή της Συνάρτησης Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης

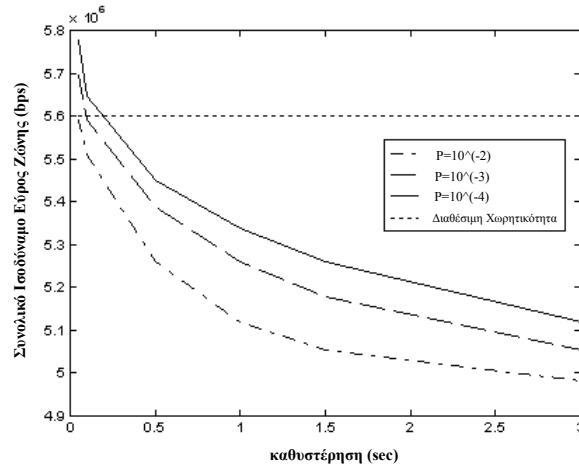
Η ενότητα αυτή δίνει μια εικόνα του πώς μεταβάλλεται η Συνάρτηση του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης σε συνάρτηση της μεταβολής των ποιοτικών χαρακτηριστικών που επιθυμούν οι χρήστες. Για τον σκοπό αυτό, υποθέτουμε ότι, στο δίκτυο WLAN, ένας αριθμός χρηστών επιθυμεί να λάβει την υπηρεσία Y3. Ρυθμίζουμε τον αριθμό των χρηστών να είναι 10 και, με βάση τις τιμές που δίνει ο Πίνακας 8-4, υπολογίζουμε για διάφορα ζεύγη των ποιοτικών κριτηρίων της πιθανότητας  $pr$  υπέρβασης της καθυστέρησης  $d$  την τιμή της συνολικής Συνάρτησης του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης. Το Σχήμα 8-2 απεικονίζει τη μεταβολή της Συνάρτησης του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης συναρτήσει των πιθανών ζευγών κριτηρίων ποιότητας για την υπηρεσία Y3.

Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό, καθώς η τιμή του κατωφλίου καθυστέρησης αυξάνει η Συνάρτηση Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης και για τους 10 χρήστες της υπηρεσίας Y3 μειώνεται. Αυτό είναι αναμενόμενο, σύμφωνα με τη μορφή της σχέσης (7-3) του κεφαλαίου 7, αφού αυτή η συνάρτηση φράσσεται από τον μέσο και μέγιστο ρυθμό μετάδοσης. Έτσι, για δεδομένη πιθανότητα  $pr$ , καθώς το  $d$  αυξάνει, η Συνάρτηση Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης μεταβάλλεται

και επηρεάζεται μόνο από το  $\theta = \frac{-\log pr}{Cd}$ , όπου η χωρητικότητα  $C$  παραμένει σταθερή, με

βάση τις υποθέσεις που έχουμε κάνει (αλλάζει μόνο με τον αριθμό των ενεργών χρηστών του

δικτύου). Τέλος από τη γραμμή με τις τελείες, η οποία αντιπροσωπεύει τη μέγιστη διαθέσιμη χωρητικότητα του δικτύου, παρατηρούμε ότι για πολύ μικρές τιμές της καθυστέρησης, το μίγμα αυτό της κίνησης δεν μπορεί να γίνει δεχτό. Βέβαια, αυτές οι μικρές τιμές καθυστέρησης δεν είναι καθόλου ρεαλιστικές, αφού είναι πιο αυστηρές ακόμα και για τα κριτήρια ποιότητας που τίθενται για τις αλληλοδραστικές υπηρεσίες.



**Σχήμα 8-2. Μεταβολή της Συνάρτησης του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης συναρτήσει των ποιοτικών χαρακτηριστικών της υπηρεσίας Υ3**

Στο Σχήμα 8-2 έχουμε, επίσης, σχεδιάσει τη Συνάρτηση Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης για τρεις διαφορετικές τιμές της πιθανότητας  $pr$ . Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι, δεδομένης της τιμής του κατωφλίου  $d$  για την καθυστέρηση, όσο πιο αυστηρό είναι το κριτήριο για την πιθανότητα (δηλαδή όσο πιο μικρή η τιμή του  $pr$ ), τόσο μεγαλύτερη η τιμή της συνάρτησης που προκύπτει.

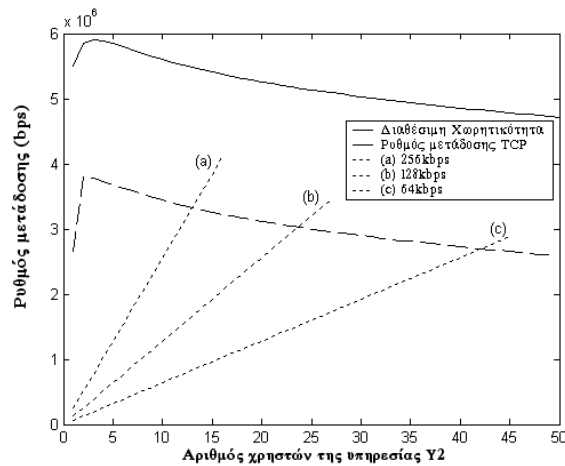
#### 8.2.2.2. Δυναμική αλλαγή φορτίου στο δίκτυο

Έχοντας δει την συμπεριφορά της Συνάρτησης του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης, θα μελετήσουμε, στη συνέχεια, την επίδραση της μίξης των υπηρεσιών στο ίδιο δίκτυο και στη συμπεριφορά του αλγορίθμου αποδοχής. Ο σκοπός μας είναι να κατανοήσουμε την επίδραση που έχει στο ρυθμό που επιτυγχάνεται από τους χρήστες TCP η αποδοχή υπηρεσιών UDP με διάφορα χαρακτηριστικά και να μελετήσουμε την επιβολή κριτηρίων ποιότητας στις ροές TCP. Σημειώνουμε ότι μελετάμε τα κριτήρια ποιότητας των TCP ροών μόνο με γνώμονα το μέσο ρυθμό μετάδοσης ανά ροή, ενώ για τις UDP ροές εξετάζουμε τις αλλαγές στα κριτήρια ποιότητας με γνώμονα την καθυστέρηση. Αυτό γίνεται, γιατί οι πραγματικού χρόνου υπηρεσίες Υ1 και Υ3 είναι εκ των πραγμάτων περισσότερο ευαίσθητες στην καθυστέρηση, όπου και η ποιότητα της λαμβανόμενης υπηρεσίας (π.χ. εναλλαγή εικόνων, ροή του βίντεο) αντιστοιχίζεται με υποκειμενικά κριτήρια των αισθητηρίων οργάνων των χρηστών (π.χ. η εικόνα είναι παραμορφωμένη, η ροή βίντεο είναι αργή).



Αντιθέτως, σε TCP ροές μη πραγματικού χρόνου, όπως η μεταφορά αρχείων, ενδιαφερόμαστε περισσότερο για την εξασφάλιση ενός κατώτερου ρυθμού μετάδοσης, πράγμα το οποίο αντικατοπτρίζεται στο χρόνο λήψης όλης της υπηρεσίας (π.χ. λήψη αρχείου μουσικής δεδομένου μεγέθους). Πάντως, η επιβολή κριτηρίων ποιότητας με βάση την καθυστέρηση και την πιθανότητα υπέρβασής έχει ευθεία αντιστοιχία στην εξασφάλιση ενός κατώτερου ρυθμού μετάδοσης, οπότε και πάλι καταλήγουμε στο επιθυμητό για τις μη πραγματικού χρόνου ροές αποτέλεσμα.

Υποθέτουμε, λοιπόν, ότι το δίκτυο αρχικά έχει εγκατεστημένη μία κλήση της υπηρεσίας Y1 που παράγεται από έναν χρήστη. Η υπηρεσία αυτή παρέχεται με κριτήρια ποιότητας που καθορίζονται από το ζεύγος  $(d, pr) = (1.5, 10^{-3})$ . Αρχίζουμε να φορτώνουμε το δίκτυο με χρήστες από την υπηρεσία Y2. Το δίκτυο φθάνει σε συμφόρηση και, επομένως, η αύξηση του αριθμού των χρηστών της υπηρεσίας Y2 οδηγεί σε μείωση του επιτυγχανόμενου από τους μεμονωμένους χρήστες Y2 ρυθμού μετάδοσης. Όμως, λόγω της φύσης της υπηρεσίας Y1, το απαιτούμενο ποσοστό πόρων που απαιτείται για τον ένα χρήστη αυτής της υπηρεσίας, δεδομένου του ζεύγους  $(d, pr)$ , είναι σταθερό και καθορίζεται από την αντίστοιχη τιμή της Συνάρτησης Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης.



**Σχήμα 8-3. Μεταβολή του αριθμού των χρηστών της υπηρεσίας Y2 σε συνδυασμό με χρήστες της υπηρεσίας Y1 για ποιότητα  $(d, pr) = (1.5, 10^{-3})$**

Καθώς ο αριθμός των χρηστών της Y2 μεταβάλλεται, σχεδιάζουμε στο Σχήμα 8-3 τις καμπύλες της διαθέσιμης χωρητικότητας (συνεχής γραμμή) και του συνολικού μέσου ρυθμού μετάδοσης που επιτυγχάνουν όλοι οι χρήστες της υπηρεσίας Y2 (διακεκομμένη γραμμή). Προφανώς, ο ρυθμός αυτός αντιστοιχεί στο άθροισμα των τιμών των επιμέρους Συναρτήσεων Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης. Όμως, επειδή θεωρούμε ίδια χαρακτηριστικά των ροών που παράγονται από τους χρήστες Y2, η τιμή αυτή υπολογίζεται μία μόνο φορά και έπειτα ο συνολικός ρυθμός υπολογίζεται με βάση την αθροιστική ιδιότητα της θεωρίας της Συνάρτησης του Ισοδύναμου

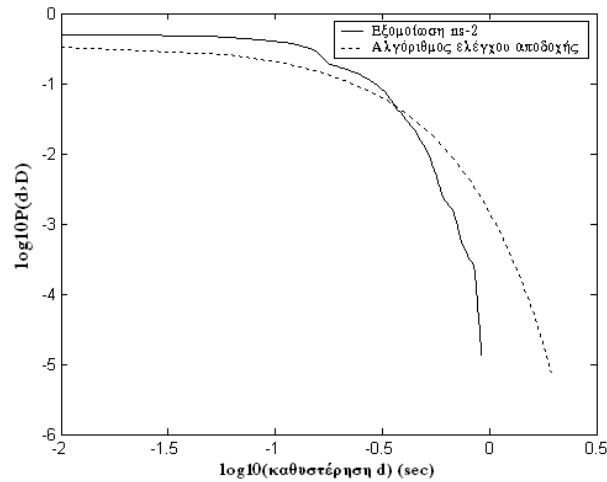
Εύρους Ζώνης. Υπενθυμίζεται ότι η καμπύλη της διαθέσιμης χωρητικότητας του δικτύου WLAN προκύπτει από την περιγραφή του μοντέλου, που δόθηκε στην παράγραφο 3.6.1 του κεφαλαίου 3, δηλαδή μεταβάλλεται, με βάση το συνολικό αριθμό των τερματικών σταθμών που είναι παρόντες στο δίκτυο.

Στο Σχήμα 8-3 έχουμε, επίσης, σχεδιάσει τρεις ευθείες γραμμές. Αυτές αντιστοιχούν στις απαιτήσεις για την εξασφάλιση του συνολικού ελάχιστου μέσου ρυθμού μετάδοσης των χρηστών της υπηρεσίας Y2, δεδομένου ότι εξασφαλίζεται ένας μέσος ρυθμός μετάδοσης ανά χρήστη. Έτσι, για τη γραμμή (a) υποθέτουμε ότι σε κάθε ένα χρήστη της υπηρεσίας Y2 αντιστοιχεί ένας μέσος ρυθμός 256kbps, για τη γραμμή (b) υποθέτουμε ότι σε κάθε ένα χρήστη αντιστοιχεί ένας μέσος ρυθμός 128kbps, ενώ για τη γραμμή (c) υποθέτουμε ότι σε κάθε ένα χρήστη αντιστοιχεί ένας μέσος ρυθμός 64kbps. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8-3, η τομή καθεμιάς ευθείας με τη διακεκομμένη γραμμή δίνει το μέγιστο αριθμό χρηστών της υπηρεσίας Y2 που μπορεί να γίνει δεκτός στο σύστημα, ώστε να εξασφαλιστεί ο ελάχιστος μέσος ρυθμός μετάδοσης.

Έτσι, δεδομένης της «άπληστης» υπηρεσίας Y1, εάν επιθυμούμε να εξασφαλίσουμε έναν ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 256kbps, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 13 χρήστες από την Y2. Αν επιθυμούμε να εξασφαλίσουμε έναν ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 128kbps, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 23 χρήστες από την Y2. Αν, τέλος, επιθυμούμε να εξασφαλίσουμε έναν ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 64kbps, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 42 χρήστες από την Y2.

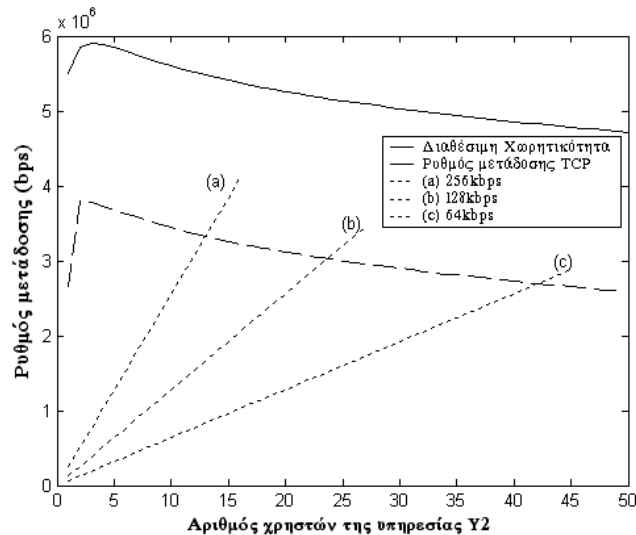
Στο ίδιο Σχήμα 8-3, έχουμε επιτρέψει στη διακεκομμένη γραμμή να συνεχίσει για όλο το φάσμα χρηστών της υπηρεσίας Y2. Με τον τρόπο αυτό, προσπαθούμε να συγκρίνουμε την απόδοση του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών που δρα στο στοιχείο δικτύου με την κατάσταση που επικρατεί σήμερα στα ασύρματα δίκτυα. Είναι φανερό ότι αν επιτρέψουμε την αποδοχή επιπλέον χρηστών στο δίκτυο αυτό έχει αρνητική επίδραση στην επίδοσή του, καθώς οι χρήστες θα αναγκαστούν να εκπέμπουν σε πολύ χαμηλούς ρυθμούς. Η κατάσταση, βέβαια, επιδεινώνεται με την παρουσία της κίνησης από τον χρήστη της Y1, η ποιότητα του οποίου, επίσης, επηρεάζεται, λόγω της αύξησης των χαμένων πακέτων στο ασύρματο περιβάλλον.

Προτού προχωρήσουμε στην περαιτέρω ανάλυση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής, εξετάζουμε την περίπτωση της φόρτισης του δικτύου με 13 χρήστες της υπηρεσίας Y2, δεδομένης της παρουσίας ενός χρήστη από την Y1. Για την περίπτωση αυτή, επιθυμούμε να σχεδιάσουμε την κατανομή της ουράς αναμονής στον ταμειευτήρα του κόμβου δικτύου. Προς το σκοπό αυτό, στο Σχήμα 8-4 φαίνεται η πιθανότητα υπέρβασης της καθυστέρησης, με βάση τις προβλεπόμενες από τον αλγόριθμο ελέγχου αποδοχής τιμές των IFP πηγών και της κίνησης Poisson. Η ίδια καμπύλη έχει σχεδιαστεί και με χρήση του εργαλείου Network Simulator ns-2 [1], όπως προκύπτει από την εξομοίωση του κόμβου δικτύου με τη χρήση αυτού του εργαλείου για το δεδομένο μίγμα κίνησης.



**Σχήμα 8-4. Επαλήθευση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής με χρήση εξομοίωσης.**

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 8-4, η κατανομή της ουράς αναμονής που προβλέπεται από τον αλγόριθμο ελέγχου αποδοχής πλησιάζει την αντίστοιχη καμπύλη που προκύπτει με τη χρήση εξομοίωσης. Μάλιστα, η προβλεπόμενη συμπεριφορά του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής είναι πιο συντηρητική σε τιμές των καθυστερήσεων και της αντίστοιχης πιθανότητας που μας ενδιαφέρουν. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να διασφαλίζεται ότι η χρήση των Μαρκοβιανών μοντέλων προσφέρει μία ικανοποιητική προσέγγιση της συμπεριφοράς της ουράς αναμονής των ταμειωτήρων στους κόμβους δικτύων.



**Σχήμα 8-5. Μεταβολή του αριθμού των χρηστών της υπηρεσίας Y2 σε συνδυασμό με χρήστες της υπηρεσίας Y1 για ποιότητα  $(d, pr) = (1.5, 10^{-4})$**

Μεταβάλλουμε, τώρα, τις απαιτήσεις ποιότητας της υπηρεσίας Y1, έτσι ώστε αυτές να γίνουν πιο αυστηρές. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγουμε στην περίπτωση αυτή το ζεύγος κριτηρίων  $(d, pr) = (1.5, 10^{-4})$ . Σκοπός μας είναι να δούμε πως επηρεάζονται οι αποφάσεις του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών, σχετικά με το μέγιστο αριθμό των χρηστών από την υπηρεσία Y2 που μπορούν να γίνουν δεχτοί. Σε αναλογία με το Σχήμα 8-3, το Σχήμα 8-5 δείχνει τη μεταβολή αυτή.

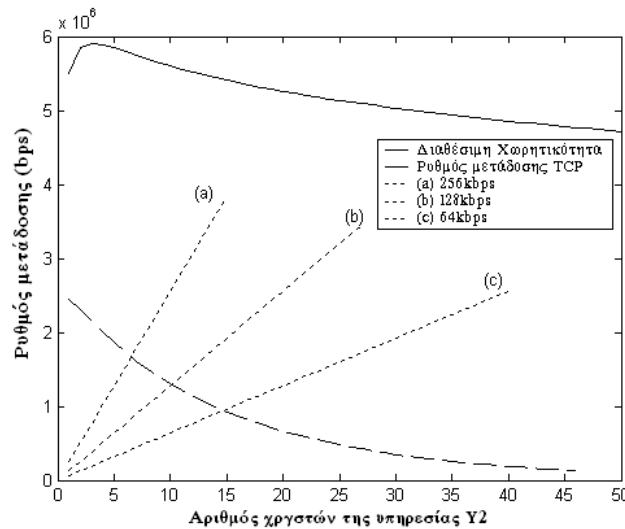
Επιχειρούμε τώρα να δώσουμε τις νέες τιμές για το μέγιστο αριθμό των χρηστών από την υπηρεσία Y2, βάσει του ελάχιστου μέσου ρυθμού μετάδοσης που πρέπει να επιτευχθεί. Πάλι, δεδομένης της υπηρεσίας Y1, εάν επιθυμούμε να εξασφαλίσουμε έναν ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 256kbps, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 12 χρήστες από την Y2. Αν επιθυμούμε να εξασφαλίσουμε έναν ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 128kbps, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 22 χρήστες από την Y2. Αν, τέλος, επιθυμούμε να εξασφαλίσουμε έναν ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 64kbps, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 42 χρήστες από την Y2. Παρατηρούμε ότι, σε κάθε περίπτωση, ο αλγόριθμος αποδοχής αναγκάζεται να απορρίψει έναν επιπλέον χρήστη από την υπηρεσία Y2, σε σχέση με αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 8-3, εκτός από την περίπτωση για τα 64kbps. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι διαφορές που προκύπτουν από την αύξηση των απαιτήσεων ποιότητας της υπηρεσίας Y1 δε συμβάλλουν αποφασιστικά στη μεταβολή της τιμής της Συνάρτησης Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης, σε σχέση με πριν. Αυτό, φυσικά, δεν ισχύει σε περίπτωση που απαιτούσαμε η υπηρεσία Y1 να ικανοποιεί πιο αυστηρά κριτήρια (π.χ.  $(d, pr) = (0.5, 10^{-6})$ ), οπότε και η μείωση του μέγιστου αριθμού των χρηστών από την υπηρεσία Y2 είναι ακόμα μεγαλύτερη, δεδομένης πάντα της υπηρεσίας Y1.

Στη συνέχεια, αυξάνουμε την ανομοιογένεια των ροών που υπάρχουν στο δίκτυο, προσθέτοντας έναν χρήστη από την υπηρεσία Y3. Ενδιαφερόμαστε, αρχικά, για την επίδραση της νέας αυτής ροής στην υπόλοιπη κίνηση και για το λόγο αυτό υποθέτουμε ότι τόσο οι χρήστες της υπηρεσίας Y1 όσο και εκείνοι της υπηρεσίας Y3 έχουν τα ίδια κριτήρια ποιότητας  $(d, pr) = (1.5, 10^{-3})$ . Όπως συμβαίνει για το απαιτούμενο εύρος ζώνης του χρήστη της Y1, έτσι και για εκείνο της Y3, η συμφόρηση του δικτύου δεν έχει επίδραση στον ρυθμό μετάδοσής του. Αντιθέτως, οι χρήστες της υπηρεσίας Y2 επηρεάζονται σημαντικά από την εισαγωγή του χρήστη της Y3 και αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 8-6.

Επιχειρούμε και πάλι να υπολογίσουμε το χωρίο αποδοχής χρηστών από την υπηρεσία Y2, βάσει του ελάχιστου μέσου ρυθμού μετάδοσης που πρέπει να επιτευχθεί, δεδομένης, όμως τώρα της σύνθετης κίνησης UDP, η οποία παράγεται από τους χρήστες των υπηρεσιών Y1 και Y3. Αν επιθυμούμε να εξασφαλίσουμε έναν ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 256kbps, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 6 χρήστες από την Y2. Αν επιθυμούμε να εξασφαλίσουμε έναν ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 128kbps, το

δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 10 χρήστες από την Y2. Αν, τέλος, επιθυμούμε να εξασφαλίσουμε έναν ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 64kbps, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 15 χρήστες από την Y2.

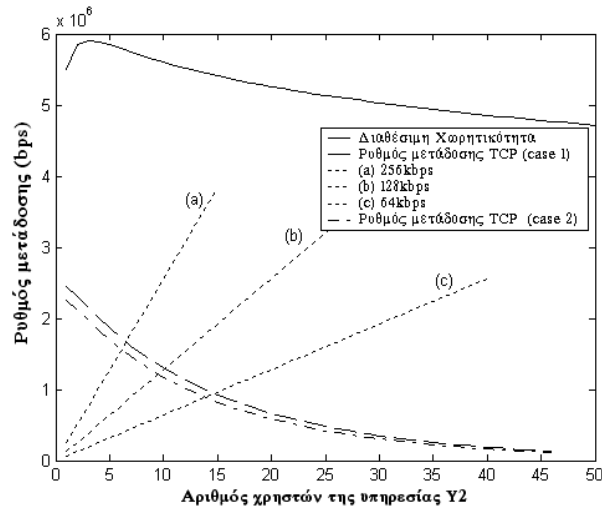
Είναι φανερό ότι η αποδοχή του χρήστη που ζητά την υπηρεσία Y3 είναι σημαντική στην εν γένει απόδοση των χρηστών, ιδιαίτερα της υπηρεσίας Y2. Αυτό που μπορεί να επισημανθεί είναι το γεγονός ότι η μείωση στον μέγιστο αριθμό των χρηστών Y2 ανά επιτρεπόμενο κατώφλι ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης δεν είναι αναλογική. Αυτό σημαίνει ότι δεδομένων των χρηστών των υπηρεσιών Y1 και Y3, η μείωση στον μέγιστο αριθμό των χρηστών Y2 ανά επιτρεπόμενο κατώφλι ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης 256kbps, 128kbps και 64kbps είναι, αντίστοιχα, 54%, 57% και 64%.



**Σχήμα 8-6. Μεταβολή του αριθμού των χρηστών της υπηρεσίας Y2 σε συνδυασμό με ένα χρήστη της υπηρεσίας Y1 και ένα της Y3 για  $(d_{Y1}, pr_{Y1}) = (1.5, 10^{-3})$ .**

Υποθέτουμε ότι η υπηρεσία Y1 μεταβάλλει τα κριτήρια ποιότητας, ώστε να ισχύει  $(d_{Y1}, pr_{Y1}) = (1.0, 10^{-3})$ , ενώ τα αντίστοιχα κριτήρια για την υπηρεσία Y3 διατηρούνται, όπως προηγουμένως  $(d_{Y3}, pr_{Y3}) = (1.5, 10^{-3})$ . Σκοπός μας είναι να δούμε κατά πόσο η μεταβολή αυτή επηρεάζει την κίνηση που παράγουν οι χρήστες της υπηρεσίας Y2, τώρα που το δίκτυο «φιλοξενεί» χρήστη και της υπηρεσίας Y3. Προφανώς, το κριτήριο ποιότητας που πρωτίστως πρέπει να διασφαλιστεί είναι εκείνο της υπηρεσίας Y1, το οποίο και είναι το πιο αυστηρό. Το Σχήμα 8-7 συνοψίζει τις αλλαγές στην απόφαση του αλγορίθμου αποδοχής. Στο ίδιο σχήμα έχουμε απεικονίσει τον συνολικό προβλεπόμενο μέσο ρυθμό μετάδοσης των χρηστών τόσο για την περίπτωση που φαίνεται στο Σχήμα 8-6 (διακεκομμένη γραμμή – case 1) όσο και για την περίπτωση που εξετάζουμε (γραμμή παύλα τελεία – case 2).

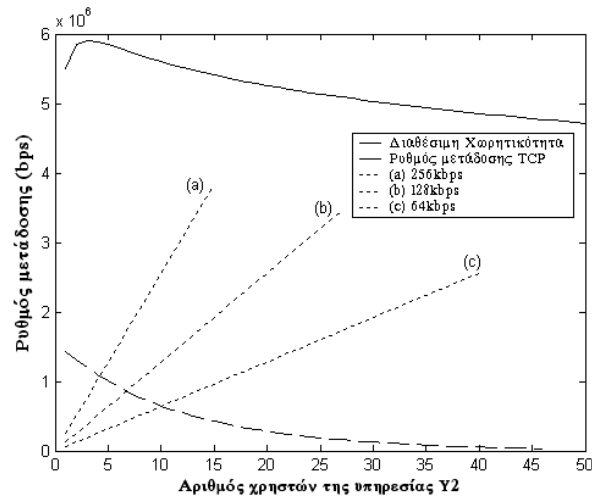
Στα επόμενα, δίνουμε μία αίσθηση της μεταβολής του χωρίου αποδοχής χρηστών με την μεταβολή των κριτηρίων ποιότητας της μεγάλης ροής Y1. Έτσι, για ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης 256kbps, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 6 χρήστες από την Y2. Για ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 128kbps, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 9 χρήστες από την Y2. Για ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 64kbps, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 13 χρήστες από την Y2.



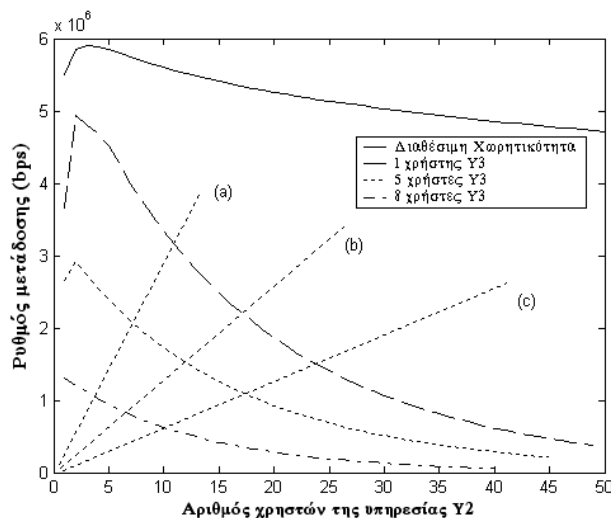
**Σχήμα 8-7. Μεταβολή του αριθμού των χρηστών της υπηρεσίας Y2 σε συνδυασμό με ένα χρήστη της υπηρεσίας Y1 και ένα της Y3 για διαφορετικούς συνδυασμούς κριτηρίων ποιότητας της Y1**

Μεταβάλλουμε, τώρα, τον αριθμό των χρηστών από την Y3 και παρατηρούμε πως αυτή η μεταβολή επηρεάζει την συνολική κίνηση που παράγεται από τους χρήστες της υπηρεσίας Y2. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 8-8, στο οποίο παρατηρούμε μία επιπλέον μείωση του συνολικού μέσου ρυθμού που επιτυγχάνεται από τους χρήστες της Y2.

Στην περίπτωση αυτή, το χωρίο αποδοχής χρηστών της υπηρεσίας Y2, δεδομένου ότι το δίκτυο είναι ήδη φορτισμένο με ένα χρήστη της υπηρεσίας Y1 και τρεις της Y3, διαμορφώνεται ως εξής: για ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης 256kbps, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 4 χρήστες από την Y2. Για ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 128kbps, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 6 χρήστες από την Y2. Για ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 64kbps, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών θα πρέπει να δεχτεί το πολύ 10 χρήστες από την Y2.



**Σχήμα 8-8.** Μεταβολή του αριθμού των χρηστών της υπηρεσίας Y2 σε συνδυασμό με ένα χρήστη της υπηρεσίας Y1 και τρεις της Y3



**Σχήμα 8-9.** Μεταβολή του αριθμού των χρηστών της υπηρεσίας Y2 για διάφορους χρήστες της υπηρεσίας Y3 μόνο

Τέλος, υποθέτουμε ότι ο χρήστης της υπηρεσίας Y1 αποσύρεται από το σύστημα, οπότε αυτό μπορεί να φορτιστεί από όλους τους πιθανούς συνδυασμούς χρηστών από τις υπηρεσίες Y2 και Y3. Στην περίπτωση αυτή θέλουμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά της κίνησης που παράγουν οι χρήστες της υπηρεσίας Y2, υπό την παρουσία μόνο της υπηρεσίας Y3, η οποία παρουσιάζει λιγότερο ρυθμό σε σχέση με την Y1. Όπως παρατηρούμε και από το Σχήμα 8-9, η επίδραση της υπηρεσίας Y3 είναι ανάλογη με αυτή της υπηρεσίας Y1, δηλαδή οι χρήστες της Y2 καταλαμβάνουν το υπολειπόμενο από τους χρήστες της Y3 εύρος ζώνης σε συνθήκες συμφόρησης. Σημειώνουμε ότι και πάλι στο Σχήμα 8-9 οι ευθείες γραμμές (a), (b) και (c) αντιστοιχούν στο απαιτούμενο κατώφλι για την επίτευξη ελάχιστου μέσου ρυθμού μετάδοσης

256kbps, 128kbps και 64kbps αντίστοιχα. Εύκολα από το σχήμα αυτό μπορούν να προκύψουν τα χωρία αποδοχής για κάθε περίπτωση φόρτισης με χρήστες από την υπηρεσία Y2.

### 8.3. Επίδραση του αλγορίθμου Ελέγχου Αποδοχής Ροών στη διαχείριση του ραδιοφάσματος

Στα προηγούμενα είδαμε πώς μεταβάλλεται η συμπεριφορά και οι αποφάσεις που λαμβάνονται από τον αλγόριθμο ελέγχου αποδοχής ροών κίνησης που πραγματοποιείται εντός του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Στην παράγραφο αυτή, θα μελετήσουμε το συνδυασμό των μηχανισμών ελέγχου αποδοχής με την απαραίτητη διαχείριση του ραδιοφάσματος, με βάση τον Αλγόριθμο Επιλογής βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων. Ο αλγόριθμος αυτός έχει θεωρητικά περιγραφεί και πρακτικά αποτιμηθεί στο κεφάλαιο 4, στο οποίο μελετήσαμε την συμπεριφορά του, ανάλογα με τις πολιτικές των Παρόχων Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων.

Στην παράγραφο αυτή, θα εξετάσουμε πώς επηρεάζονται οι αποφάσεις του αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, στα πλαίσια ενός σύνθετου ασύρματου περιβάλλοντος, αν οι πολιτικές διαχείρισης των ασύρματων πόρων συνδυαστούν με τους μηχανισμούς ελέγχου αποδοχής για την εξασφάλιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών της εισερχόμενης κίνησης.

#### 8.3.1. Πρώτο Σενάριο

Στην παράγραφο αυτή, θα δώσουμε ένα παράδειγμα ανάλογο με αυτό που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.5 του κεφαλαίου 4. Έτσι, θεωρούμε, πάλι μία περιοχή εξυπηρέτησης μικρότερης κλίμακας από αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-5 και η οποία καλύπτεται από δύο Παρόχους Δικτυακών Πόρων για τη δικτυακή τεχνολογία WLAN,  $np_1$  και  $np_2$  αντίστοιχα. Η χωρητικότητα του δικτύου WLAN καθορίζεται από αυτά που έχουν περιγραφεί στο κεφάλαιο 3, δηλαδή η διαθέσιμη χωρητικότητα μεταβάλλεται με την αύξηση του αριθμού των ενεργών σταθμών. Υποθέτουμε ότι μία υπηρεσία  $s_1$  που παρέχεται από τον Πάροχο Υπηρεσιών SP, η οποία είναι η ροή βίντεο πραγματικού χρόνου Y3 που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 8.2.2 με την ίδια εκρηκτικότητα κίνησης, αλλά κωδικοποιημένη με μικρότερο ρυθμό μετάδοσης. Συγκεκριμένα, η  $s_1$  παρέχεται σε δύο επίπεδα ποιότητας  $q_{s_1,1}$  και  $q_{s_1,2}$ . Τα επίπεδα αυτά αντιστοιχούν σε 0.5% πιθανότητα φραγής και σε μέσους ρυθμούς μετάδοσης 128 και 64 kbps αντίστοιχα. Για κάθε επίπεδο ποιότητας προδιαγράφονται τα αντίστοιχα επίπεδα καθυστέρησης σε  $(d_{s_1,1}, pr_{s_1,1}) = (1.5, 10^{-3})$  και  $(d_{s_1,2}, pr_{s_1,2}) = (4, 10^{-3})$ . Επίσης, η  $s_1$  προσφέρεται σε ένα σύνολο πελατών, οι οποίοι μοιράζονται εξίσου σε δύο κλάσεις  $uc_{s_1,1}$  και  $uc_{s_1,2}$ . Σε αναλογία με το κεφάλαιο 4, για την κλάση  $uc_{s_1,1}$ , το σύνολο των επιτρεπόμενων επιπέδων ποιότητας της  $s_1$  είναι  $Q_{s_1, uc_{s_1,1}} = \{q_{s_1,1}\}$ , ενώ για την κλάση  $uc_{s_1,2}$  έχουμε  $Q_{s_1, uc_{s_1,2}} = \{q_{s_1,1}, q_{s_1,2}\}$ .



Για τον Πάροχο  $np_1$ , οι τιμές κόστους είναι  $c_{s_1}(np_1, q_{s_1,1}) = 1.5$  και  $c_{s_1}(np_1, q_{s_1,2}) = 0.75$  αντίστοιχα. Ο Πίνακας 8-5 παρουσιάζει διάφορες οικονομικές πολιτικές για τον Πάροχο  $np_2$ . Επίσης, σύμφωνα με τις συστάσεις του Αποδοχέα Ροών του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής, κάθε Πάροχος μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι 36 χρήστες ανά υποπεριοχή στο υψηλό επίπεδο  $q_{s_1,1}$ .

**Πίνακας 8-5. Σενάρια οικονομικής πολιτικής του  $np_2$**

| <i>Οικονομική Πολιτική του Παρόχου <math>np_2</math></i> | <i>Τιμή χρέωσης για το επίπεδο <math>q_{s_1,1}</math></i> | <i>Τιμή χρέωσης για το επίπεδο <math>q_{s_1,2}</math></i> |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Περίπτωση 1                                              | 1.60                                                      | 0.800                                                     |
| Περίπτωση 2                                              | 1.75                                                      | 0.875                                                     |
| Περίπτωση 3                                              | 2.00                                                      | 1.000                                                     |
| Περίπτωση 4                                              | 2.25                                                      | 1.125                                                     |
| Περίπτωση 5                                              | 2.50                                                      | 1.250                                                     |
| Περίπτωση 6                                              | 2.75                                                      | 1.375                                                     |
| Περίπτωση 7                                              | 3.25                                                      | 1.625                                                     |
| Περίπτωση 8                                              | 3.75                                                      | 1.875                                                     |
| Περίπτωση 9                                              | 4.25                                                      | 2.125                                                     |

**Πίνακας 8-6. Διάνυσμα της προσφερόμενης κίνησης ανά κομμάτι της περιοχής εξυπηρέτησης**

| <i>Περιοχή Εξυπηρέτησης</i> | <i>Σύνολο συνδρομητών της κλάσης <math>uc_{s_1,1}</math></i> | <i>Σύνολο συνδρομητών της κλάσης <math>uc_{s_1,2}</math></i> |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1                           | 10                                                           | 10                                                           |
| 2                           | 10                                                           | 10                                                           |
| 3                           | 10                                                           | 10                                                           |
| 4                           | 10                                                           | 10                                                           |
| 5                           | 20                                                           | 20                                                           |

Θεωρούμε ότι σε μία χρονική στιγμή, το διάνυσμα της προσφερόμενης κίνησης ανά περιοχή εξυπηρέτησης διαμορφώνεται όπως δείχνει ο Πίνακας 8-6. Οι υποπεριοχές 1-4 υποστηρίζουν συνολικά 20 χρήστες (10 από κάθε κλάση της  $s_1$ ) και, επομένως, τόσο το είδος της προσφερόμενης κίνησης όσο και η χωρητικότητα των Παρόχων, επιτρέπουν και τις δύο κλάσεις χρηστών  $uc_{s_1,1}$  και  $uc_{s_1,2}$  να εξυπηρετούνται στο υψηλό επίπεδο ποιότητας  $q_{s_1,1}$ . Επίσης, επειδή ο  $np_1$  παρουσιάζεται πιο οικονομικός τη δεδομένη στιγμή, όλοι οι χρήστες ανατίθενται στο

συγκεκριμένο Πάροχο. Αντίθετα, η υποπεριοχή 5 παρουσιάζει υπερβολική κίνηση, αφού 40 χρήστες (20 από κάθε κλάση) ζητούν εξυπηρέτηση εκεί.

Για την επίλυση του προβλήματος εφαρμόζεται ο αλγόριθμος Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, σκοπός του οποίου είναι η μεγιστοποίηση της συνάρτησης αμεροληψίας, η έκφραση της οποίας δίνεται από τη σχέση (4-1) του κεφαλαίου 4. Έτσι, στην υποπεριοχή 5, το διάνυσμα της προσφερόμενης κίνησης αναλύεται σε δύο συνιστώσες, μία για κάθε κλάση χρηστών, δηλαδή  $d_{s_1, uc_{s_1,1}} = 20$  και  $d_{s_1, uc_{s_1,2}} = 20$ . Με βάση αυτό, οι δύο Πάροχοι Δικτυακών Πόρων προτείνουν την λύση  $l_{\min, s_1}(np_1) = l_{\min, s_1}(np_2) = 0$ ,  $l_{\max, s_1}(np_1) = l_{\max, s_1}(np_2) = 36$ , καθώς και τα αντίστοιχα κόστη.

Όπως και προηγουμένως στο κεφάλαιο 4, ο αλγόριθμος έχει να επιλέξει μεταξύ δύο λύσεων:

- Η πρώτη προτείνει τη διατήρηση των χρηστών και των δύο κλάσεων στο επίπεδο αναφοράς  $q_{s_1,1}$  με την εκμετάλλευση των προσφορών και των δύο Παρόχων. Έτσι, οι 36 χρήστες (20 από την  $uc_{s_1,1}$  και 16 από την  $uc_{s_1,2}$ ) θα υποστηριχθούν από τον  $np_1$ , ενώ οι υπόλοιποι 4 χρήστες της  $uc_{s_1,2}$  θα δρομολογηθούν στον Πάροχο  $np_2$ .
- Η δεύτερη συμβατική λύση περιλαμβάνει τη διατήρηση όλων των χρηστών στον αρχικό Πάροχο  $np_1$ , ο οποίος έχει τις καλύτερες τιμές. Αυτό, όμως, σημαίνει ότι οι χρήστες της κλάσης  $uc_{s_1,2}$  θα πρέπει να υποβιβασθούν σε χαμηλότερο επίπεδο ποιότητας, ώστε να εξευρεθούν πόροι για την εξυπηρέτηση του συνόλου της προσφερόμενης κίνησης.

Το Σχήμα 8-10 παραθέτει το σύνολο των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων για το πρώτο σενάριο που περιγράφηκε παραπάνω. Τα αποτελέσματα αυτά περιλαμβάνουν τέσσερις περιπτώσεις δοκιμών. Κάθε δοκιμή διακρίνεται από τις άλλες από τη διαφορετική τιμή του συντελεστή ικανοποίησης των χρηστών ανά επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας  $s_1$ . Ο Πίνακας 8-7 δίνει το σύνολο των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις απαιτήσεις του χρήστη για κάθε μία από τις τέσσερις δοκιμές. Εν γένει, το Σχήμα 8-10 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της συνάρτησης αμεροληψίας για διάφορους συντελεστές ικανοποίησης και για διάφορες οικονομικές πολιτικές εκτίμησης κόστους.

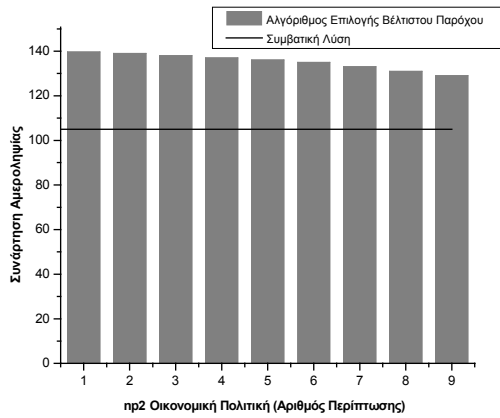
Για παράδειγμα, το Σχήμα 8-10α αντιπροσωπεύει τα αποτελέσματα από την πρώτη δοκιμή. Παρουσιάζει τις τιμές της συνάρτησης για  $u_{s_1, uc_{s_1,1}, q_{s_1,1}} = u_{s_1, uc_{s_1,2}, q_{s_1,1}} = 5$ ,  $u_{s_1, uc_{s_1,2}, q_{s_1,2}} = 2.5$  και για τις διάφορες οικονομικές πολιτικές του  $np_2$ , όπως δείχνει ο Πίνακας 8-7. Ομοίως, τα Σχήμα 8-10β, γ και δ δείχνουν τη συνάρτηση αμεροληψίας, όταν ο συντελεστής χρησιμοποίησης για την κλάση  $uc_{s_1,2}$  και για το επίπεδο ποιότητας  $q_{s_1,1}$  είναι, αντίστοιχα, 4.5, 4 και 3.5 (οι υπόλοιπες τιμές παραμένουν οι ίδιες).

**Πίνακας 8-7. Παράμετροι απαιτήσεων των χρηστών για τις τέσσερις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.**

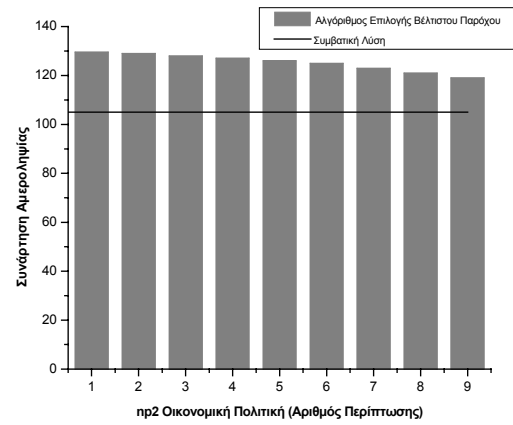
| Κλάση Χρηστών |              | Συντελεστής ικανοποίησης ανά επίπεδο ποιότητας |             | Μέγιστη τιμή χρέωσης ανά επίπεδο ποιότητας |             |
|---------------|--------------|------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------|-------------|
|               |              | $q_{s_1,1}$                                    | $q_{s_1,2}$ | $q_{s_1,1}$                                | $q_{s_1,2}$ |
| Δοκιμή 1      | $uc_{s_1,1}$ | 5                                              | —           | 10                                         | 5           |
|               | $uc_{s_1,2}$ | 5                                              | 2.5         | 10                                         | 5           |
| Δοκιμή 2      | $uc_{s_1,1}$ | 5                                              | —           | 10                                         | 5           |
|               | $uc_{s_1,2}$ | 4.5                                            | 2.5         | 10                                         | 5           |
| Δοκιμή 3      | $uc_{s_1,1}$ | 5                                              | —           | 10                                         | 5           |
|               | $uc_{s_1,2}$ | 4                                              | 2.5         | 10                                         | 5           |
| Δοκιμή 4      | $uc_{s_1,1}$ | 5                                              | —           | 10                                         | 5           |
|               | $uc_{s_1,2}$ | 3.5                                            | 2.5         | 10                                         | 5           |

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 8-10 με εκείνα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4, συμπεραίνουμε ότι τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν οδηγούν σε ανάλογα ποιοτικά συμπεράσματα. Έτσι, η επιρροή του συντελεστή ικανοποίησης για την εκδήλωση ενδιαφέροντος των χρηστών σε επίπεδα υπηρεσίας, όπως, επίσης, και οι διάφορες πολιτικές χρέωσης επηρεάζουν τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την επιλογή του Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων. Δηλαδή, όταν ο συντελεστής ικανοποίησης είναι μεγάλος, που μεταφράζεται σε έντονο ενδιαφέρον για το προσφερόμενο επίπεδο υπηρεσίας, ο αλγόριθμος οδηγεί στη βελτίωση της συμπεριφοράς και της απόδοσης του SP, ακόμα και σε ακραίες περιπτώσεις πολιτικών χρέωσης του  $np_2$ . Καθώς ο συντελεστής αυτός μειώνεται, ο αλγόριθμος δίνει καλά αποτελέσματα στις περιπτώσεις ρεαλιστικών σεναρίων, όσον αφορά στις πολιτικές χρέωσης του  $np_2$ .

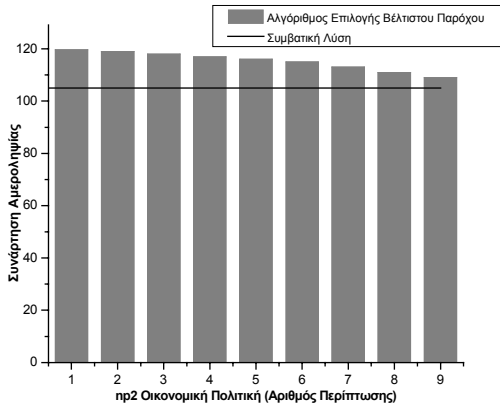
Εκείνο που πρέπει να τονιστεί, εδώ, είναι ότι οι αποφάσεις του αλγορίθμου που επιτελείται στα πλαίσια λειτουργίας του προτεινόμενου δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής αφορούν στην ικανότητα των δικτυακών τεχνολογιών (στην προκειμένη περίπτωση των δύο δικτύων WLAN) να υποστηρίξουν τον προσφερόμενο αριθμό χρηστών, με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις σε QoS. Αν, για παράδειγμα, η υπηρεσία  $s_1$  παρουσίαζε μικρότερη εκρηκτικότητα κίνησης ή τα επίπεδα ποιότητας αντιστοιχούσαν σε διαφορετικές τιμές κριτηρίων  $(d, pr)$ , τότε οι προτάσεις των Παρόχων Δικτυακών Πόρων για τη μέγιστη ικανότητα υποστήριξης χρηστών της  $s_1$  θα ήταν διαφορετική, όπως προκύπτει και από τα αποτελέσματα της παραγράφου 8.2.



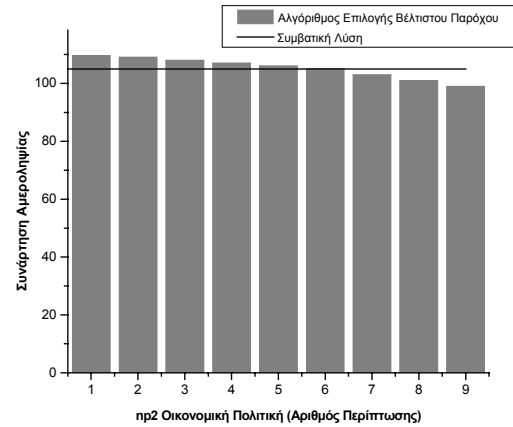
(α)



(β)



(γ)



(δ)

**Σχήμα 8-10. Σύνολο αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου για το πρώτο σενάριο.**

### 8.3.2. Δεύτερο Σενάριο

Συνεχίζουμε σε ένα δεύτερο σενάριο να δούμε την επίδραση της χωρητικότητας του Παρόχου  $nr_2$  στα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου. Υποθέτουμε, πάλι, ότι ο SP προσφέρει στην περιοχή κάλυψης των  $nr_1$  και  $nr_2$  την υπηρεσία  $s_1$  στις δύο προαναφερθείσες κλάσεις χρηστών. Οι ορισμοί των επιπέδων ποιότητας διατηρούνται, όπως στο πρώτο σενάριο. Για τις οικονομικές πολιτικές των Παρόχων Δικτυακών Πόρων, έχουμε ότι παραμένουν σταθερές και ίσες με  $c_{s_1}(nr_1, q_{s_1,1}) = 4.5$ ,  $c_{s_1}(nr_1, q_{s_1,2}) = 1.50$ ,  $c_{s_1}(nr_2, q_{s_1,1}) = 5.0$ ,  $c_{s_1}(nr_2, q_{s_1,2}) = 1.7$ .

Τέλος, οι συντελεστές ικανοποίησης καθορίζονται στα  $u_{s_1,uc_{s_1,1},q_{s_1,1}} = u_{s_1,uc_{s_1,2},q_{s_1,2}} = 7.5$ ,  $u_{s_1,uc_{s_1,2},q_{s_1,2}} = 2.5$ .

**Πίνακας 8-8. Διαθέσιμη και κατειλημμένη χωρητικότητα του  $np_2$  για τις τέσσερις περιπτώσεις του δευτέρου σεναρίου.**

| <i>Πολιτική του Παρόχου <math>np_2</math></i> | <i>Φορτίο που εξυπηρετείται από τον Πάροχο <math>np_2</math></i> | <i>Μέγιστο επιπλέον φορτίο που μπορεί να εξυπηρετηθεί από τον <math>np_2</math></i> |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Περίπτωση 1                                   | 10                                                               | 26                                                                                  |
| Περίπτωση 2                                   | 20                                                               | 16                                                                                  |
| Περίπτωση 3                                   | 30                                                               | 6                                                                                   |
| Περίπτωση 4                                   | 36                                                               | 0                                                                                   |

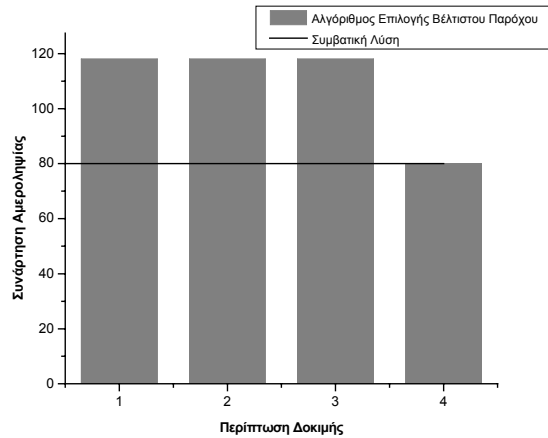
Υποθέτουμε ότι η υπηρεσία  $s_1$  προσφέρεται στο σύνολο των χρηστών που δείχνει ο Πίνακας 8-6, οι οποίοι είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι στις δύο κλάσεις  $uc_{s_1,1}$  και  $uc_{s_1,2}$ . Εκείνο που θέλουμε να εξετάσουμε είναι πως διαμορφώνεται η απόφαση του αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, αν η κίνηση του  $np_2$  είναι μεταβαλλόμενη. Ο Πίνακας 8-8 απεικονίζει τη μεταβολή αυτή στο φορτίο του  $np_2$ , για τις περιπτώσεις που εξετάζουμε. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι στις υποπεριοχές 1-4, τόσο το φορτίο όσο και η διαθέσιμη χωρητικότητα των δικτύων επιτρέπουν σε αμφότερες τις κλάσεις να έχουν σαν επίπεδο αναφοράς το  $q_{s_1,1}$ . Οι χρήστες αυτοί ανατίθενται στον  $np_1$ , ο οποίος είναι οικονομικά ο φθηνότερος και μπορεί να εξυπηρετήσει συνολικά μέχρι 36 χρήστες. Αντίθετα, στην υποπεριοχή 5 παρατηρείται μια υπέρβαση του ορίου της προσφερόμενης κίνησης (40 χρήστες αντί για 36), το οποίο αναλύεται σε συνιστώσες, ανάλογα με τις υπάρχουσες κλάσεις της υπηρεσίας. Έτσι, έχουμε:  $d_{s_2,uc_{s_2,1}} = d_{s_1,uc_{s_1,2}} = 20$ . Η προσφορά του  $np_1$  περιλαμβάνει το φορτίο που μπορεί να δεχτεί,  $l_{\min,s_2}(np_1) = 0$ ,  $l_{\max,s_2}(np_1) = 36$ , καθώς και τις προαναφερθείσες τιμές κόστους. Ομοίως, οι προσφορές του  $np_2$  περιλαμβάνουν την αντίστοιχη τιμή του μέγιστου επιπλέον φορτίου που μπορεί να δεχτεί και τις παραπάνω τιμές κόστους.

Επομένως, ο προτεινόμενος αλγόριθμος εκμεταλλεύεται τις πολιτικές του SP και τις προσφορές των Παρόχων Δικτυακών Πόρων για την πιο συμφέρουσα ανάθεση του διανύσματος της προσφερόμενης κίνησης σε Παρόχους Δικτυακών Πόρων και επίπεδα ποιότητας. Οι πιθανές λύσεις του αλγορίθμου είναι και πάλι οι ακόλουθες:

- Και οι δύο κλάσεις χρηστών αυτής της υπηρεσίας διατηρούνται στο υψηλό επίπεδο, σαν αποτέλεσμα του συνδυασμού των προσφορών των  $np_1$  και  $np_2$ . Έτσι, οι 40 χρήστες (20 από

την κλάση  $uc_{s_1,1}$  και 16 από την  $uc_{s_1,2}$ ) θα εξυπηρετηθούν από τον  $np_1$ , ενώ οι υπόλοιποι 4 χρήστες της  $uc_{s_1,2}$  θα μετακινηθούν στον  $np_2$ .

- Η δεύτερη συμβατική λύση περιλαμβάνει τη διατήρηση όλων των χρηστών στον ίδιο Πάροχο,  $np_1$ , και την υποβάθμιση της ποιότητας που προσφέρεται στην χαμηλής προτεραιότητας κλάση  $uc_{s_1,2}$ .



**Σχήμα 8-11. Σύνολο αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου για το δεύτερο σενάριο.**

Το Σχήμα 8-11 παρουσιάζει το σύνολο των αποτελεσμάτων για το δεύτερο αυτό σενάριο. Εκεί, δίνεται η τιμή της συνάρτησης αμεροληψίας για τους διάφορους συνδυασμούς της διαθέσιμης χωρητικότητας από τον  $np_2$ , που δείχνει ο Πίνακας 8-8. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, δεδομένου ότι ο  $np_2$  μπορεί να διαθέσει μέρος της χωρητικότητάς του για την υποστήριξη των υπόλοιπων 4 χρηστών της κλάσης  $uc_{s_1,2}$  στο υψηλό επίπεδο  $q_{s_1,1}$ , τότε ο αλγόριθμος Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων επιλέγει τη λύση της μεταφοράς των χρηστών αυτών στον  $np_2$ . Στην τελευταία, όμως, περίπτωση, ο  $np_2$  είναι, ήδη, φορτωμένος σε τέτοιο βαθμό, που η διαθέσιμη χωρητικότητα δεν επιτρέπει τη διατήρηση όλων των χρηστών στο  $q_{s_1,1}$ . Έτσι, η λύση του αλγορίθμου ισοδυναμεί με τη συμβατική λύση, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 8-11.

### 8.3.3. Τρίτο Σενάριο

Για το τρίτο σενάριο, θεωρούμε δύο ασύρματα δίκτυα, ένα WLAN και ένα δίκτυο Digital Video Broadcasting-Terrestrial (DVB-T) [2], τα οποία καλύπτουν μία περιοχή υψηλής συγκέντρωσης φορτίου. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, εστιάζουμε στην περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης

από κάθε δικτυακή τεχνολογία. Επίσης, η χωρητικότητα του δικτύου WLAN καθορίζεται και πάλι από αυτά που έχουν περιγραφεί στο κεφάλαιο 3 και την παράγραφο 3.6.1, δηλαδή ο ρυθμός εξυπηρέτησης μεταβάλλεται με την αύξηση του αριθμού των ενεργών σταθμών. Για την περίπτωση του δικτύου DVB-T, υποθέτουμε ότι στην περιοχή αυτή είναι διαθέσιμα μόνο 2 Process Identification Numbers (PIDs), συνολικής χωρητικότητας 2Mbps (δηλαδή 1Mbps ανά PID).

Υποθέτουμε ότι ένας Πάροχος Υπηρεσιών προσφέρει στην περιοχή αυτή δύο από τις προαναφερθείσες στις προηγούμενες παραγράφους υπηρεσίες, έστω τις Y2 και Y3 της παραγράφου 8.2, δηλαδή μία υπηρεσία βασισμένη στο TCP και μία στο UDP. Επίσης, οι χρήστες του συστήματος μπορούν να διακριθούν σε μία κλάση ανά υπηρεσία. Καθεμία από αυτές τις υπηρεσίες μπορεί να διατεθεί σε δύο επίπεδα ποιότητας, υψηλό (H) και χαμηλό (L). Η περιγραφή κάθε επιπέδου διαφέρει ανάλογα με την προσφερόμενη υπηρεσία. Έτσι, για την TCP υπηρεσία Y2, το υψηλό επίπεδο ποιότητας αντιστοιχεί στην εξασφάλιση ενός ελάχιστου επιτρεπόμενου μέσου ρυθμού μετάδοσης της τάξης των 64kbps, ενώ το χαμηλό επίπεδο ποιότητας αντιστοιχεί σε ένα ελάχιστο επιτρεπόμενο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 32kbps. Η προτίμηση των χρηστών σε σχέση με το επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας Y2 καθορίζεται από το συντελεστή ικανοποίησης  $u_{Y2}$ .

**Πίνακας 8-9. Παράμετροι απαιτήσεων των χρηστών και χρέωσης για τις πέντε δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.**

| Δοκιμή | Επίπεδο Ποιότητας | $u_{Y2}$ | $u_{Y3}$ | $C_{Y2,WLAN}$ | $C_{Y3,WLAN}$ | $C_{Y2,DVB-T}$ | $C_{Y3,DVB-T}$ |
|--------|-------------------|----------|----------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| 1      | H                 | 5        | 5        | 1             | 1             | 1              | 1              |
|        | L                 | 2.5      | 2.5      | 1             | 1             | 1              | 1              |
| 2      | H                 | 5        | 5        | 2             | 2             | 2              | 2              |
|        | L                 | 2.5      | 2.5      | 1             | 1             | 1              | 1              |
| 3      | H                 | 5        | 10       | 2             | 2             | 2              | 2              |
|        | L                 | 2.5      | 2.5      | 1             | 1             | 1              | 1              |
| 4      | H                 | 5        | 10       | 2             | 2             | 2              | 2              |
|        | L                 | 2.5      | 5        | 1             | 1             | 1              | 1              |
| 5      | H                 | 5        | 10       | 2             | 2             | 2              | 4              |
|        | L                 | 2.5      | 5        | 1             | 1             | 1              | 2              |

Η δεύτερη υπηρεσία Y3 παρέχεται και αυτή σε δύο επίπεδα ποιότητας. Στη περίπτωση αυτή, όμως, η διαμόρφωση του κατάλληλου επιπέδου ποιότητας καθορίζεται, με βάση το ζεύγος τιμών της καθυστέρησης στον ταμειευτήρα του δικτύου και της αντίστοιχης πιθανότητας υπέρβασης αυτής της καθυστέρησης. Έτσι, το υψηλό επίπεδο διαμορφώνεται από το ζεύγος τιμών  $(d^H_{Y3}, pr^H_{Y3}) = (1.5, 10^{-3})$ , ενώ το χαμηλό επίπεδο ποιότητας αντιστοιχεί στο ζεύγος  $(d^L_{Y3}, pr^L_{Y3}) = (4, 10^{-3})$ . Σε κάθε περίπτωση, ο μέσος ρυθμός μετάδοσης των 490kbps

διατηρείται. Και πάλι, η προτίμηση των χρηστών σε σχέση με το επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας Y3 καθορίζεται από το συντελεστή ικανοποίησης  $u_{Y3}$ .

Η τιμολογιακή πολιτική κάθε Παρόχου Δικτυακών Πόρων που αντιπροσωπεύει το δίκτυο WLAN ή το DVB-T διαφέρει. Έτσι, εμείς θεωρούμε ότι κάθε Πάροχος κοστολογεί διαφορετικά την κάθε υπηρεσία, όπως, επίσης, και το αντίστοιχο επίπεδο ποιότητας, με το οποίο η εκάστοτε υπηρεσία υποστηρίζεται από τον εκάστοτε Πάροχο. Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, πραγματοποιούμε μία σειρά από δοκιμές, οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους στις τιμές του συντελεστή ικανοποίησης και του κόστους που εφαρμόζεται ανά υπηρεσία από τον κάθε Πάροχο Δικτυακών Πόρων του WLAN και του DVB-T. Ο Πίνακας 8-9 δείχνει τις τιμές αυτών των παραμέτρων ανά δοκιμή που πραγματοποιήθηκε.

Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 4, ο σκοπός του αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων είναι η μεγιστοποίηση της συνάρτησης αμεροληψίας. Έτσι, ο αλγόριθμος αυτός, σε περίπτωση αίτησης εγκατάστασης νέας κλήσης υπηρεσίας και συμφόρησης του ενός δικτύου, εξετάζει μεταξύ δύο γενικών λύσεων. Είτε εγκαθιστά την εισερχόμενη υπηρεσία στο δίκτυο που έχει συμφόρηση, με ταυτόχρονη μείωση του επιπέδου ποιότητας κάποιων κλάσεων από τις, ήδη, εγκατεστημένες υπηρεσίες ή ακόμα και της εισερχόμενης, είτε επιλέγει να κρατήσει όλες τις υπηρεσίες στο υψηλότερο δυνατό επίπεδο ποιότητας μεταφέροντας συνδέσεις υπηρεσιών (εγκατεστημένων και νέων) σε άλλο δίκτυο.

Στην περίπτωση που εξετάζουμε, υποθέτουμε ότι το δίκτυο WLAN έχει ήδη εγκατεστημένες 15 συνδέσεις από την υπηρεσία Y2 και 5 συνδέσεις από την υπηρεσία Y3. Οι χρήστες έχουν πρόσβαση στην υπηρεσία Y3 με βάση το υψηλό επίπεδο ποιότητας. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 8-9, η συνύπαρξη των 15 χρηστών από την Y2 με τους 5 χρήστες από την Y3 διασφαλίζει ότι οι 15 χρήστες της Y2 έχουν πρόσβαση στο υψηλό επίπεδο ποιότητας της Y2, δηλαδή ο μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων τους είναι τουλάχιστον 64kbps. Επίσης, το δίκτυο DVB-T έχει ήδη εγκατεστημένη μία σύνδεση της υπηρεσίας Y3, η οποία καταλαμβάνει εύρος ζώνης από το ένα PID.

Επιθυμούμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, στην περίπτωση που το σύστημα δεχτεί μία νέα αίτηση για την εγκατάσταση ενός χρήστη, που επιθυμεί να έχει πρόσβαση στην Y3. Οι πιθανές γενικές λύσεις του αλγορίθμου, που προαναφέρθηκαν, μπορούν, εδώ, να συγκεκριμενοποιηθούν στα ακόλουθα:

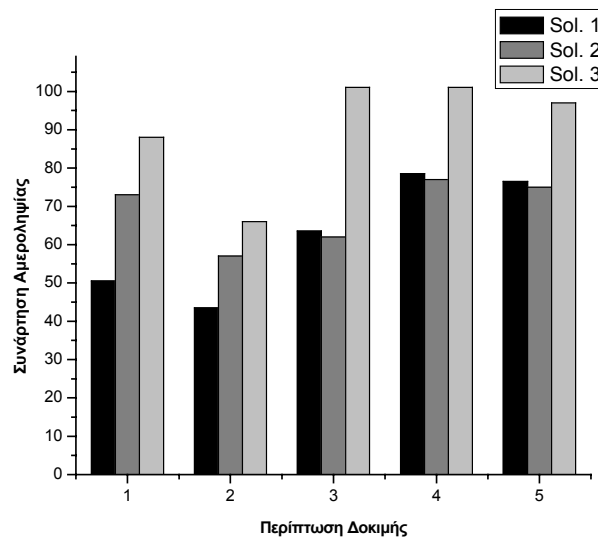
- ❑ Ο αλγόριθμος επιλέγει να εγκαταστήσει την νέα σύνδεση Y3 στο WLAN και να διατηρήσει όλους τους χρήστες της υπηρεσίας αυτής στο υψηλό επίπεδο. Σε μία τέτοια περίπτωση, θα πρέπει οι χρήστες της υπηρεσίας Y2 να μειώσουν το μέσο ρυθμό μετάδοσης σε κάποιο σημείο, ώστε όλοι οι χρήστες να υποβαθμιστούν στο χαμηλό επίπεδο ποιότητας. Η λύση αυτή του αλγορίθμου συμβολίζεται με Sol.1.
- ❑ Ο αλγόριθμος επιλέγει να εγκαταστήσει την νέα σύνδεση Y3 στο WLAN, αλλά ταυτόχρονα να ρίξει όλους τους χρήστες αυτής της υπηρεσίας (μαζί με τη νέα σύνδεση) στο χαμηλό



επίπεδο. Στην περίπτωση αυτή, οι χρήστες της Y2 θα αναγκαστούν, πάλι, να μειώσουν το ρυθμό μετάδοσης (αφού το TCP έχει ανάδραση), αλλά οι χρήστες αυτοί θα διατηρηθούν στο υψηλό επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας Y2. Η λύση αυτή του αλγορίθμου συμβολίζεται με Sol.2.

- Ο αλγόριθμος επιλέγει να εγκαταστήσει την νέα σύνδεση Y3 στο DVB-T και να διατηρήσει όλους τους χρήστες όλων των υπηρεσιών στο υψηλό επίπεδο ποιότητας. Σε αυτήν την περίπτωση, η κατάσταση στο WLAN παραμένει αμετάβλητη, ενώ η νέα σύνδεση θα καταλάβει εύρος ζώνης από το δεύτερο PID του δικτύου DVB-T. Η λύση αυτή του αλγορίθμου συμβολίζεται με Sol.3.

Με βάση αυτές τις πιθανές λύσεις που μπορεί να επιβάλλει ο αλγόριθμος Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, εξετάζουμε σε κάθε μία από τις δοκιμές, που παρουσιάζει ο Πίνακας 8-9, ποια είναι εκείνη η λύση, η οποία μεγιστοποιεί την τιμή της συνάρτησης αμεροληψίας. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 8-12.



**Σχήμα 8-12. Σύνολο αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου για το τρίτο σενάριο.**

Όπως παρατηρούμε από το σχήμα αυτό, σε κάθε δοκιμή η Sol.3 είναι εκείνη που επικρατεί, άρα ο αλγόριθμος επιλέγει την εγκατάσταση της νέας αίτησης υπηρεσίας στο δίκτυο DVB-T. Το συμπέρασμα αυτό είναι ανάλογο με τα συμπεράσματα του κεφαλαίου 4 και τις παρατηρήσεις των παραγράφων 8.3.1 και 8.3.2. Έτσι, για διαφορετικούς συνδυασμούς τιμών του συντελεστή ικανοποίησης ανά υπηρεσία και τιμών χρέωσης ανά υπηρεσία και Πάροχο Δικτυακών Πόρων, η συνεργασία των διαφόρων Παρόχων για την εξασφάλιση της ποιότητας αποτελεί την καλύτερη επιλογή σε ένα μελλοντικό σύστημα τηλεπικοινωνιακών δικτύων.

Εκείνο που θα μπορούσε να τονιστεί είναι το γεγονός ότι η πολιτική του εκάστοτε Παρόχου να προστατεύσει ή όχι τους χρήστες των TCP υπηρεσιών και να τους εξασφαλίσει έναν ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης μπορεί να παίξει αποφασιστικό ρόλο στην επίδοση και τη συμπεριφορά των αλγορίθμων Επιλογής του Βέλτιστου Παρόχου και των μηχανισμών Ελέγχου Αποδοχής Υπηρεσιών. Αυτό φαίνεται στις δοκιμές 1 και 2, στις οποίες οι τιμές των συντελεστών ικανοποίησης των χρηστών έχουν ορισθεί με τρόπο, ώστε να δείχνεται μία προτίμηση στη διαφύλαξη του ελάχιστου μέσου ρυθμού μετάδοσης των TCP υπηρεσιών (αφού υπάρχει ισορροπία μεταξύ των τιμών για τις υπηρεσίες Y2 και Y3). Συνεπώς, στο Σχήμα 8-12, για τις δοκιμές 1 και 2 αν αγνοήσουμε την Sol.3, τότε η τιμή της συνάρτησης αμεροληψίας υποδεικνύει ότι είναι προτιμότερο να μειώσουμε τα ποιοτικά κριτήρια της πραγματικού χρόνου υπηρεσίας Y3 από το να μειώσουμε ακόμα περισσότερο τον επιτεύξιμο από τους χρήστες της Y2 μέσο ρυθμό μετάδοσης.

#### 8.3.4. Τέταρτο Σενάριο

Σε ένα τέταρτο σενάριο, θεωρούμε δύο ασύρματα δίκτυα WLAN, τα οποία καλύπτουν μία περιοχή υψηλής συγκέντρωσης φορτίου, που καλύπτεται από ένα σταθμό βάσης ανά δίκτυο. Κάθε δίκτυο αντιπροσωπεύεται από έναν ξεχωριστό Πάροχο Δικτυακών Πόρων,  $np_{WLAN1}$  και  $np_{WLAN2}$ .

Υποθέτουμε ότι ο Πάροχος Υπηρεσιών της παραγράφου 8.3.3 προσφέρει στην περιοχή αυτή τις υπηρεσίες Y2 και Y3. Αυτές μπορεί να διατεθούν σε μία κλάση χρηστών ανά υπηρεσία και σε δύο επίπεδα ποιότητας, υψηλό (H) και χαμηλό (L). Και πάλι, θεωρούμε, ότι η περιγραφή κάθε επιπέδου διαφέρει ανάλογα με την προσφερόμενη υπηρεσία. Έτσι, για την TCP υπηρεσία Y2, το υψηλό επίπεδο ποιότητας αντιστοιχεί στην εξασφάλιση ενός ελάχιστου επιτρεπόμενου μέσου ρυθμού μετάδοσης της τάξης των 64kbps, ενώ το χαμηλό επίπεδο ποιότητας αντιστοιχεί σε ένα ελάχιστο επιτρεπόμενο μέσο ρυθμό μετάδοσης της τάξης των 32kbps. Η προτίμηση των χρηστών σε σχέση με το επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας Y2 καθορίζεται από τον συντελεστή ικανοποίησης  $u_{Y2}$ . Ειδικεύοντας, για την περίπτωση μας θεωρούμε ότι  $u_{Y2,H} = 10$  και  $u_{Y2,L} = 2.5$ .

Η δεύτερη υπηρεσία Y3 παρέχεται και αυτή σε δύο επίπεδα ποιότητας. Το υψηλό επίπεδο διαμορφώνεται από το ζεύγος τιμών  $(d^H_{Y3}, pr^H_{Y3}) = (1.5, 10^{-3})$ , ενώ το χαμηλό επίπεδο ποιότητας αντιστοιχεί στο ζεύγος  $(d^L_{Y3}, pr^L_{Y3}) = (4, 10^{-3})$ . Σε κάθε περίπτωση, ο μέσος ρυθμός μετάδοσης των 490kbps διατηρείται. Η προτίμηση των χρηστών σε σχέση με το επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας Y3 καθορίζεται από τον συντελεστή ικανοποίησης  $u_{Y3}$ . Ορίζουμε ότι  $u_{Y3,H} = 10$  και  $u_{Y3,L} = 5$ .

Η τιμολογιακή πολιτική κάθε Παρόχου Δικτυακών Πόρων που αντιπροσωπεύει τα δύο ξεχωριστά δίκτυα WLAN διαφέρει. Αυτό σημαίνει ότι κάθε Πάροχος Δικτυακών Πόρων κοστολογεί διαφορετικά την κάθε υπηρεσία, όπως, επίσης, και το αντίστοιχο επίπεδο ποιότητας, με το οποίο η εκάστοτε υπηρεσία υποστηρίζεται από τον εκάστοτε Πάροχο. Για το σενάριο αυτό υποθέτουμε τις εξής τιμές χρέωσης για τον  $np_{WLAN1}$ :  $c_{Y2}(np_{WLAN1,H})=3$ ,  $c_{Y2}(np_{WLAN1,L})=1.5$ ,  $c_{Y3}(np_{WLAN1,H})=3.5$  και  $c_{Y3}(np_{WLAN1,L})=1.5$ . Ομοίως, για τον  $np_{WLAN2}$  έχουμε:  $c_{Y2}(np_{WLAN2,H})=4.5$ ,  $c_{Y2}(np_{WLAN2,L})=1.5$ ,  $c_{Y3}(np_{WLAN2,H})=5.5$  και  $c_{Y3}(np_{WLAN2,L})=1.5$ .

Υποθέτουμε ότι το Πάροχος  $np_{WLAN1}$  έχει, ήδη, εγκατεστημένες 15 συνδέσεις από την υπηρεσία Y2 και 5 συνδέσεις από την υπηρεσία Y3. Τόσο οι χρήστες της Y2 όσο και εκείνοι της Y3 έχουν πρόσβαση στο υψηλό επίπεδο ποιότητας. Ο Πάροχος  $np_{WLAN2}$  θεωρούμε ότι έχει μεταβαλλόμενη διαθέσιμη χωρητικότητα. Ο Πίνακας 8-10 δείχνει τέσσερις περιπτώσεις για την κατειλημμένη και διαθέσιμη χωρητικότητα για τον Πάροχο  $np_{WLAN2}$ .

**Πίνακας 8-10. Διαθέσιμη και κατειλημμένη χωρητικότητα του  $np_{WLAN2}$  για τις τέσσερις περιπτώσεις του τετάρτου σεναρίου.**

| Πολιτική του Παρόχου $np_2$ | Φορτίο που εξυπηρετείται από τον Πάροχο $np_{WLAN2}$ ανά υπηρεσία |    | Μέγιστο επιπλέον φορτίο που μπορεί να εξυπηρετηθεί από τον $np_{WLAN2}$ για την Y3 |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|----|------------------------------------------------------------------------------------|
|                             | Y2                                                                | Y3 | Y3                                                                                 |
| Περίπτωση 1                 | 15                                                                | 2  | 3                                                                                  |
| Περίπτωση 2                 | 15                                                                | 3  | 2                                                                                  |
| Περίπτωση 3                 | 15                                                                | 4  | 1                                                                                  |
| Περίπτωση 4                 | 15                                                                | 5  | 0                                                                                  |

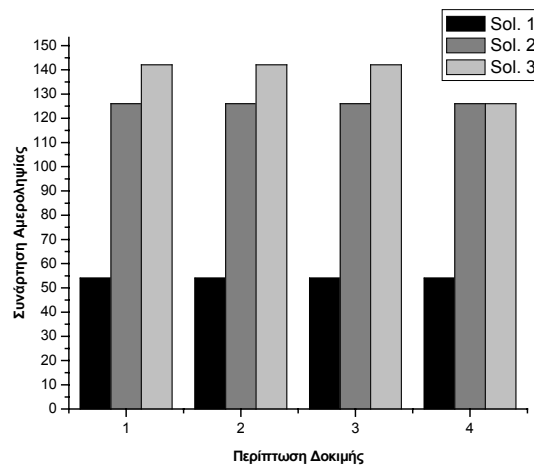
Θα μελετήσουμε, τώρα, τη συμπεριφορά του αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων στην περίπτωση που το προσφερόμενο φορτίο στον  $np_{WLAN1}$  αυξηθεί κατά ένα χρήστη, που επιθυμεί να έχει πρόσβαση στην Y3. Όπως και στην περίπτωση του τρίτου σεναρίου της παραγράφου 8.3.3, οι πιθανές γενικές λύσεις του αλγορίθμου είναι:

- ❑ Ο αλγόριθμος επιλέγει να εγκαταστήσει τη νέα σύνδεση Y3 στον  $np_{WLAN1}$  και να διατηρήσει όλους τους χρήστες της υπηρεσίας αυτής στο υψηλό επίπεδο. Σε μία τέτοια περίπτωση, θα πρέπει οι χρήστες της υπηρεσίας Y2 να μειώσουν το μέσο ρυθμό μετάδοσης σε τέτοιο σημείο, ώστε όλοι οι χρήστες να υποβαθμιστούν στο χαμηλό επίπεδο ποιότητας. Η λύση αυτή του αλγορίθμου συμβολίζεται με Sol.1.
- ❑ Ο αλγόριθμος επιλέγει να εγκαταστήσει τη νέα σύνδεση Y3 στον  $np_{WLAN1}$ , αλλά ταυτόχρονα να ρίξει όλους τους χρήστες αυτής της υπηρεσίας (μαζί με τη νέα σύνδεση) στο χαμηλό

επίπεδο. Στην περίπτωση αυτή, οι χρήστες της Y2 θα αναγκαστούν, πάλι, να μειώσουν το ρυθμό μετάδοσης (αφού το TCP έχει ανάδραση), αλλά οι χρήστες αυτοί θα διατηρηθούν στο υψηλό επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας Y2. Η λύση αυτή του αλγορίθμου συμβολίζεται με Sol.2.

- Ο αλγόριθμος εξετάζει αν μπορεί να εγκαταστήσει τη νέα σύνδεση Y3 στον  $np_{WLAN2}$  και να διατηρήσει όλους τους χρήστες όλων των υπηρεσιών στο υψηλό επίπεδο ποιότητας. Η λύση αυτή του αλγορίθμου συμβολίζεται με Sol.3.

Με βάση αυτές τις πιθανές λύσεις, το Σχήμα 8-13 περιγράφει τη συμπεριφορά του αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων για τις τρεις λύσεις που προαναφέρθηκαν. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι, σε κάθε περίπτωση που η διαθέσιμη χωρητικότητα επιτρέπει στον Πάροχο  $np_{WLAN2}$  να εγκαταστήσει την πλεονάζουσα ροή της Y3 στο υψηλό επίπεδο ποιότητας, τότε ο αλγόριθμος επιλέγει τη δρομολόγηση αυτής της ροής από τον  $np_{WLAN2}$ . Στην τελευταία, όμως, περίπτωση ο  $np_{WLAN2}$  φέρεται να μην μπορεί να εγκαταστήσει την ροή αυτή στο υψηλό επίπεδο ποιότητας. Έτσι, η απόφαση του αλγορίθμου είναι να εγκατασταθεί η νέα ροή της υπηρεσίας Y3 στον φθηνότερο Πάροχο  $np_{WLAN1}$ . Εκείνο, που πρέπει να τονίσουμε, εδώ, είναι το γεγονός ότι η τελική απόφαση του αλγορίθμου είναι ότι η νέα ροή της Y3 θα εγκατασταθεί στον  $np_{WLAN1}$  με ταυτόχρονη υποβάθμιση της ποιότητας των χρηστών αυτής της υπηρεσίας στο χαμηλό επίπεδο. Αυτό συμβαίνει, γιατί η διαμόρφωση των παραμέτρων του αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου είναι τέτοια, ώστε να μην προτιμάται η υποβάθμιση των ροών TCP κάτω από τον ελάχιστο μέσο ρυθμό μετάδοσης των 64kbps. Σε άλλη περίπτωση, φυσικά, το αποτέλεσμα θα ήταν διαφορετικό.



**Σχήμα 8-13. Σύνολο αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του αλγορίθμου για το τέταρτο σενάριο.**

## 8.4. Συμπεράσματα

Το κεφάλαιο αυτό περιέγραψε τα αποτελέσματα από την εφαρμογή ενός ευέλικτου και αποτελεσματικού δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών κίνησης στα σύγχρονα και μελλοντικά ασύρματα δίκτυα. Συγκεκριμένα, μέσα από ένα σύνολο ενδεικτικών εξομοιώσεων, παρουσίασε τα αποτελέσματα από τον αλγόριθμο που υλοποιείται στα πλαίσια λειτουργίας του Αποδοχέα Ροών. Με βάση αυτά, το κεφάλαιο αυτό έκανε μία αποτίμηση της συμπεριφοράς των μηχανισμών ελέγχου αποδοχής για την παροχή της απαιτούμενης από τους χρήστες ποιότητας, για την περίπτωση των αλληλοδραστικών υπηρεσιών και υπηρεσιών πολυμέσων, οι οποίες πολυπλέκονται πάνω από την ίδια δικτυακή τεχνολογία με TCP υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου. Όπως διαπιστώνεται και από τα αποτελέσματα αυτά, το χωρίο αποδοχής ροών σε ένα ασύρματο δίκτυο διαμορφώνεται, βέβαια, από τα χαρακτηριστικά της κίνησης που προκαλείται από τις υποστηριζόμενες υπηρεσίες, αλλά και από τις διακυμάνσεις της διαθέσιμης χωρητικότητας και τα ποιοτικά κριτήρια των κλάσεων υπηρεσιών.

Το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώθηκε με την παράθεση των αποτελεσμάτων που αποτιμούν τη συνδυασμένη χρήση του αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων με το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα αυτά, η επιλογή της κατάλληλης δικτυακής τεχνολογίας για την ασύρματη πρόσβαση των χρηστών στο σύνολο των προσφερόμενων υπηρεσιών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, που έχουν να κάνουν τόσο με τη διαμόρφωση της ίδιας της υπηρεσίας όσο και με την ικανότητα εγκατάστασης νέων ροών με συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας από τα υποκείμενα δίκτυα.

## 8.5. Αναφορές

- [1] Network Simulator ns-2 web site: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [2] ETSI, Jan.2001, “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television”, EN300-744



## Κεφάλαιο 9

### Γενικά Συμπεράσματα και Μελλοντικά Βήματα

#### 9.1. Σύνοψη της διατριβής και συμπεράσματα

Το κεφάλαιο αυτό συνοψίζει τα γενικά συμπεράσματα για το περιεχόμενο των κεφαλαίων που προηγήθηκαν και ανακεφαλαιώνει τα καινοτόμα στοιχεία, που πραγματεύτηκε αυτή η διατριβή.

Η παρούσα διατριβή ασχολήθηκε με τη σχεδίαση και την υλοποίηση του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων σε ασύρματα δίκτυα IP και εστίασε στην ανάπτυξη του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών κίνησης. Το προτεινόμενο σύστημα βασίζεται στη συνδυασμένη παρακολούθηση της εισερχόμενης στο δίκτυο κίνησης και των συνθηκών του ασύρματου μέσου, με σκοπό την υλοποίηση αποδοτικών μηχανισμών ελέγχου αποδοχής νέων χρηστών για την εγγύηση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας. Αντικειμενικός σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι να συμβάλλει στην επιλογή του βέλτιστου ασύρματου δικτύου πρόσβασης και την υποστήριξη λειτουργιών εξισορρόπησης φορτίου μεταξύ των συνεργαζόμενων δικτύων, στα πλαίσια λειτουργίας των ασύρματων συστημάτων 4<sup>ης</sup> Γενιάς.

Πιο συγκεκριμένα, η εργασία αυτή ανέλυσε τις απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής στην αγορά των τηλεπικοινωνιών για την ανάγκη υποστήριξης εκείνων των διαδικασιών, οι οποίες θα επιτρέψουν την επίτευξη των στόχων των παρόχων τηλεπικοινωνιών και την ικανοποίηση των αναγκών των χρηστών για την απρόσκοπτη και αδιάλειπτη σύνδεσή τους, χωρίς χρονικούς ή χωρικούς περιορισμούς. Έτσι, περιγράφηκε η αρχιτεκτονική και τα βασικά γνωρίσματα των συστημάτων 4<sup>ης</sup> Γενιάς, τα οποία συμβάλλουν στους στόχους των μελλοντικών ασύρματων δικτύων και συστημάτων, εμβαθύνοντας στα απαραίτητα δομικά στοιχεία, τα οποία αποτελούν τον κορμό υλοποίησης αυτών των συστημάτων.

Ένα κυρίαρχο σημείο των συστημάτων 4<sup>ης</sup> Γενιάς είναι ο λειτουργικός διαχωρισμός των διαδικασιών υποστήριξης μίας υπηρεσίας από τις αντίστοιχες διαδικασίες ανάθεσης των απαιτούμενων δικτυακών πόρων. Προς την κατεύθυνση αυτή, η υιοθέτηση του κατάλληλου επιχειρηματικού μοντέλου αποτελεί ένα απαραίτητο βήμα για την ικανοποίηση των αναγκών λειτουργίας αυτών των συστημάτων. Έτσι, η εργασία αυτή παρουσίασε ένα ευέλικτο επιχειρηματικό μοντέλο, στα πλαίσια λειτουργίας ενός αποδοτικού μεσισμικού συστήματος

διαχείρισης, και καθόρισε τους Παρόχους Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων ως τις κυρίαρχες οντότητες σε ένα μελλοντικό σύστημα 4<sup>ης</sup> γενιάς. Πέρα από τον καθορισμό του κατάλληλου επιχειρηματικού μοντέλου, η εργασία αυτή επεκτάθηκε και στους κανόνες συμπεριφοράς και αλληλεπίδρασης των οντοτήτων, που εμπλέκονται στη διαδικασία παροχής των απαιτούμενων δικτυακών πόρων και της υποστήριξης των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Η βασική απαίτηση της σύγχρονης εποχής είναι η εξασφάλιση και εγγύηση των κριτηρίων ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών. Έτσι, η εργασία αυτή αναφέρθηκε στην έννοια της Ποιότητας Υπηρεσίας και πώς αυτή μεταφράζεται στα διάφορα επίπεδα της στοιβάς πρωτοκόλλων. Η περιγραφή της έννοιας αυτής συμπεριέλαβε μαζί με τον ορισμό της τόσο τα βασικά χαρακτηριστικά της ποιότητας υπηρεσιών όσο και τις διαδικασίες υλοποίησης και υποστήριξης της ποιότητας υπηρεσιών στα σύγχρονα και μελλοντικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα ασύρματης πρόσβασης.

Μία σημαντική παράμετρος για την επιτυχία του προτεινόμενου συστήματος διαχείρισης είναι ο προσδιορισμός της διαθέσιμης χωρητικότητας των υποκείμενων ασύρματων δικτύων. Η παρούσα εργασία περιέγραψε μία μέθοδο για τον προσδιορισμό της πραγματικής χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων, η οποία διατίθεται σε κάθε χρονική στιγμή για την εξυπηρέτηση των συνδέσεων κάτω ζεύξης (downlink) ενός ασύρματου συστήματος. Η μέθοδος αυτή αφορά στην παρακολούθηση των παραμέτρων που συμβάλλουν στη διαμόρφωση της κατάστασης της ασύρματης σύνδεσης κάτω ζεύξης και στον προσδιορισμό της τιμής της διαθέσιμης χωρητικότητας, με βάση τις παραμέτρους που παρακολουθεί ο υπό εξέταση κόμβος δικτύου, όπως το SNR, το BER και ο ρυθμός των επαναμεταδόσεων.

Στα πλαίσια λειτουργίας του μεσισμικού συστήματος διαχείρισης για την ικανοποίηση των αναγκών των συστημάτων 4<sup>ης</sup> Γενιάς, η εργασία αυτή καινοτόμησε με την παρουσίαση του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων σε ένα σύνθετο ασύρματο περιβάλλον. Όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4, το σύστημα αυτό επιτρέπει την ανάπτυξη μεθόδων και αλγορίθμων που συμπληρώνουν τους, ήδη, υπάρχοντες μηχανισμούς και θα δρουν στα πιο υψηλά επίπεδα ή ακόμα και κατά μήκος όλης της στοιβάς πρωτοκόλλων, με σκοπό την ικανοποίηση των αναγκών των χρηστών για την υποστήριξη των προσφερόμενων υπηρεσιών, χωρίς περιορισμούς και συμβιβασμούς σε απαιτήσεις χαμηλότερες από τις πραγματικές τους ανάγκες. Έτσι, η εργασία αυτή ανέλυσε τις γενικές αρχές του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης, δίνοντας έμφαση στα καινοτόμα γνωρίσματα της αρχιτεκτονικής ενός τέτοιου συστήματος, τα οποία έχουν να κάνουν με την υιοθέτηση των μηχανισμών χρέωσης και παρακολούθησης της ικανοποίησης των χρηστών από το σύστημα διαχείρισης για το σύνολο των υπηρεσιών, που παρέχονται σε μία περιοχή εξυπηρέτησης.

Ένα σημαντικό κομμάτι της λειτουργίας του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων είναι η υλοποίηση του αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, στο Στρώμα Διαπραγμάτευσης Υπηρεσιών. Το Κεφάλαιο 4 παρουσίασε τόσο τη διατύπωση αυτού του αλγορίθμου όσο και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή



του σε ένα σύνθετο ασύρματο περιβάλλον δικτύων πολλαπλών παρόχων. Όπως φάνηκε και από τα αποτελέσματα, η καταγραφή του βαθμού ικανοποίησης των χρηστών αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για τους Παρόχους Υπηρεσιών, ώστε να αποτιμήσουν το πόσο καλά διαθέτουν την υπηρεσία ή τις υπηρεσίες τους στους χρήστες. Από την άλλη, η διαμόρφωση των κατάλληλων τιμών χρέωσης, που, πρωτίστως, επιβάλλονται από τους Παρόχους Δικτυακών Πόρων, αποτελεί μία κρίσιμη παράμετρο για την επιβίωση των παρόχων αυτών σε ένα μελλοντικό σύστημα τηλεπικοινωνιών, με έμφαση στην ασύρματη πρόσβαση.

Παράλληλα με την παρακολούθηση της ποιότητας του ασύρματου καναλιού και τον προσδιορισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων, η εργασία αυτή μελέτησε την κίνηση, η οποία διέρχεται από τα ασύρματα δίκτυα IP. Η συμπεριφορά μίας τέτοιας κίνησης καθορίζεται από το αντίστοιχο πρωτόκολλο του επιπέδου μεταφοράς, καθώς το TCP χρησιμοποιεί μηχανισμούς ανάδρασης, που διαμορφώνουν το ρυθμό μετάδοσης, ανάλογα με τη συμφόρηση δικτύου που αντιλαμβάνεται το πρωτόκολλο αυτό, ενώ η συμπεριφορά του UDP παραμένει αναλλοίωτη από την συμφόρηση δικτύου. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην περιγραφή των χαρακτηριστικών αυτό-ομοιότητας που παρουσιάζει η κίνηση IP. Όπως περιγράφηκε, οι εξαρτήσεις μεγάλης κλίμακας χρόνου διαμορφώνουν τη συμπεριφορά της κίνησης στα ασύρματα δίκτυα IP, με απώτερο αποτέλεσμα την επίδραση των φαινομένων αυτό-ομοιότητας στην επίδοση των υποκείμενων δικτύων.

Μία σημαντική συνεισφορά της παρούσας εργασίας είναι η προσέγγιση και μοντελοποίηση της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας μέσω Μαρκοβιανών μοντέλων Ροής Ρευστού MMFP. Προς το σκοπό αυτό, το Κεφάλαιο 6 αναλώθηκε στην επέκταση ενός ευέλικτου και αποδοτικού αλγορίθμου για την περιγραφή και προσέγγιση της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας, με βάση τα μοντέλα MMFP. Ο αλγόριθμος προσέγγισης της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας στηρίχθηκε στην κατασκευή ενός ιεραρχικού μοντέλου, που αποτελείται από την υπέρθεση ανεξάρτητων MMFP πηγών με κίνηση Poisson. Οι παράμετροι του ιεραρχικού μοντέλου υπολογίζονται από την ανάλυση των στατιστικών μεγεθών πρώτης και δεύτερης τάξης για την κατανομή του μεγέθους και του χρόνου αφίξεων διαδοχικών πακέτων, που συλλέγονται από την πραγματική κίνηση.

Από τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 6, φαίνεται ότι ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να προβλέψει την επίδραση της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας στην ουρά αναμονής ενός κόμβου ασύρματου δικτύου. Η σύγκλιση του αλγορίθμου με τα πραγματικά δεδομένα είναι ικανοποιητική για μία περιοχή τιμών αποθήκευσης της κίνησης στην ουρά αναμονής, η οποία καλύπτει τις απαιτήσεις των χρηστών ενός ασύρματου συστήματος για την εξασφάλιση των ποιοτικών κριτηρίων των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου. Με τον τρόπο αυτό, επιβεβαιώνεται η αναγκαιότητα αξιοποίησης των υπάρχουσών θεωριών που μοντελοποιούν την κίνηση δικτύων με Μαρκοβιανά μοντέλα. Αν και τα μοντέλα αυτά διακρίνονται από εξαρτήσεις σε μικρές κλίμακες χρόνου, εντούτοις αρκούν, όπως φαίνεται και από τα πειράματα που παρουσιάστηκαν στο

Κεφάλαιο 6, για να περιγράψουν την εξαρτημένη από μεγάλες κλίμακες χρόνου κίνηση, η οποία εισέρχεται στους ταμιευτήρες των δικτύων.

Πέρα από τις διαδικασίες διαπραγμάτευσης των προσφερόμενων υπηρεσιών, το Ενιαίο Σύστημα Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων υπόκειται σε ένα σύνολο μηχανισμών, οι οποίοι λειτουργούν σε επίπεδο διαχείρισης του ραδιοφάσματος και υλοποιούν τις κατάλληλες λειτουργίες για την ικανοποίηση της απαίτησης για την εξασφάλιση της ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας. Προς την κατεύθυνση αυτή, η παρούσα διατριβή πρότεινε στο Κεφάλαιο 7 τη σχεδίαση και υλοποίηση του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Ένα τέτοιο σύστημα συνδυάζει την παρακολούθηση των στατιστικών χαρακτηριστικών της εισερχόμενης κίνησης με την ποιότητα του ασύρματου μέσου μετάδοσης, με σκοπό την εφαρμογή αποδοτικών αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής νέων χρηστών για την εγγύηση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών.

Στο σύστημα αυτό, οι παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα υπηρεσίας εξαρτώνται από το είδος της προσφερόμενης υπηρεσίας. Έτσι, οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, οι οποίες βασίζονται στο πρωτόκολλο UDP, διακρίνονται από κριτήρια ποιότητας που αφορούν στην υπέρβαση των ορίων καθυστέρησης μέσα στον ταμιευτήρα του κόμβου δικτύου με κάποια συγκεκριμένη πιθανότητα. Αντίθετα, για τις TCP ροές, ο στόχος των κριτηρίων ποιότητας απλοποιείται στην εξασφάλιση ενός ελάχιστου μέσου ρυθμού μετάδοσης, με βάση τη δεδομένη κατάσταση του υποκείμενου δικτύου.

Η πρωτεύουσα λειτουργία του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών είναι η εφαρμογή του αλγορίθμου που υλοποιείται στα πλαίσια λειτουργίας του Αποδοχέα Ροών για τη σύγκριση του ρυθμού μετάδοσης, που παράγεται από την εισερχόμενη κίνηση, με τη διαθέσιμη χωρητικότητα του ασύρματου καναλιού. Ο αλγόριθμος αυτός στηρίζεται στη θεωρία του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης και πραγματοποιεί την σε πραγματικό χρόνο αποδοχή ή απόρριψη των εισερχόμενων ροών, ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων περιγραφής της εισερχόμενης κίνησης και της διαθέσιμης χωρητικότητας που λαμβάνει από τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Η απόφαση του αλγορίθμου εξαρτάται από τις επιμέρους απαιτήσεις ποιότητας, που τίθενται από τις ανεξάρτητες ροές κίνησης και οι οποίες μπορούν να διακριθούν, ανάλογα με το είδος της εισερχόμενης κίνησης, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Συνεπώς, τα ήδη γνωστά Μαρκοβιανά μοντέλα για την υποστήριξη των μηχανισμών παροχής ποιότητας σε ενσύρματα δίκτυα ορίστηκαν στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων IP, ώστε να συμπεριλάβουν τα χαρακτηριστικά τόσο της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας όσο και του ασύρματου περιβάλλοντος, το οποίο διαμορφώνει τη διαθέσιμη κάθε χρονική στιγμή χωρητικότητα, ανάλογα με ένα σύνολο παραμέτρων. Αυτό σημαίνει ότι πέρα από την κατάλληλη παρακολούθηση της κίνησης των δικτύων, ένας αποδοτικός μηχανισμός ελέγχου αποδοχής συνίσταται στο να παρακολουθεί και τις μεταβολές που υφίσταται η ποιότητα του ασύρματου μέσου.

Στην συνέχεια, στο Κεφάλαιο 8, δόθηκαν τα συμπεράσματα από την παρουσίαση και την αποτίμηση της επίδοσης των μηχανισμών ελέγχου αποδοχής υπηρεσιών, οι οποίοι επιτελούνται στα πλαίσια λειτουργίας του προτεινόμενου δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Τα συμπεράσματα αυτά αφορούν στην αναγκαιότητα υποστήριξης τέτοιων μηχανισμών στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα και πώς αυτοί οι μηχανισμοί συνεργάζονται με τα συστήματα διαχείρισης υπηρεσιών, ώστε η από άκρο σε άκρο σύνδεση να ικανοποιεί τόσο τις απαιτήσεις των χρηστών όσο και τη λειτουργική ικανότητα των υποκείμενων δικτυακών τεχνολογιών.

Μέσα από τις εξομοιώσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 8, δόθηκαν παραδείγματα λειτουργίας του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών. Οι περιπτώσεις λειτουργίας του συστήματος που εξετάσαμε, αποδεικνύουν ότι η παροχή της ζητούμενης ποιότητας υπηρεσιών αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα στη διαμόρφωση των ορίων λειτουργίας του εκάστοτε δικτύου, δηλαδή στον καθορισμό του χωρίου αποδοχής κίνησης. Ανάλογα με τις πολιτικές που εφαρμόζονται εσωτερικά στις ανεξάρτητες τηλεπικοινωνιακές οντότητες, ο διαχωρισμός των υπηρεσιών και η προσέγγιση της συμπεριφοράς, ανάλογα με το πρωτόκολλο του στρώματος μεταφοράς που υλοποιεί η συγκεκριμένη υπηρεσία, μπορεί να εγγυηθεί ένα ελάχιστο κριτήριο ποιότητας υπηρεσίας. Το συμπέρασμα αυτό αναλύθηκε περαιτέρω με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων από την χρήση του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων, στην περίπτωση ενός σύνθετου ασύρματου περιβάλλοντος. Όπως παρατηρήσαμε εκεί, σε κάθε περίπτωση, η δυνατότητα επιλογής εναλλακτικού δικτύου ασύρματης πρόσβασης σε συνθήκες συμφόρησης, προσφέρει τη δυνατότητα για τη μεγιστοποίηση του κέρδους τόσο των χρηστών όσο και των Παρόχων Υπηρεσιών και των Παρόχων Δικτυακών Πόρων.

## 9.2. Ανακεφαλαίωση των καινοτομικών στοιχείων της διατριβής

Στην παράγραφο αυτή συνοψίζονται τα καινοτομικά στοιχεία, τα οποία προέκυψαν από αυτή τη διατριβή. Τα στοιχεία αυτά αφορούν στην μελέτη των απαιτήσεων των συστημάτων 4<sup>ης</sup> Γενιάς για την ανάπτυξη ευέλικτων μεσισμικών συστημάτων διαχείρισης, τη μοντελοποίηση και προσέγγιση της κίνησης των ασύρματων δικτύων IP και την υλοποίηση των απαραίτητων μηχανισμών ελέγχου αποδοχής ροών που παράγονται από πολλαπλές υπηρεσίες. Τα στοιχεία αυτά αναλύονται στη συνέχεια:

- Η μελέτη, σχεδίαση και υλοποίηση ενός μεσισμικού συστήματος διαχείρισης, το οποίο αναλαμβάνει να γεφυρώσει τους ρόλους και τις επιμέρους λειτουργίες που επιτελούνται από τις διακριτές επιχειρηματικές οντότητες ενός σύγχρονου επιχειρηματικού μοντέλου, για την ικανοποίηση των αναγκών των ασύρματων δικτύων 4<sup>ης</sup> Γενιάς. Η διατριβή πρότεινε ένα καινοτόμο Ενιαίο Σύστημα Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων, το οποίο αντιλαμβάνεται τις απαιτήσεις της ανοιχτής αγοράς τηλεπικοινωνιών και διαχωρίζει τις διαδικασίες υποστήριξης των υπηρεσιών από την ανάθεση των απαιτούμενων δικτυακών πόρων. Ο σκοπός αυτού του συστήματος είναι να παρέχει το σύνολο των λειτουργιών που

απαιτούνται για την πρόσβαση των κινητών χρηστών στις προσφερόμενες υπηρεσίες, βάσει κριτηρίων ποιότητας, σε ένα σύνθετο ασύρματο περιβάλλον.

- Η εφαρμογή του «άπληστου» ευριστικού αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, με τεχνικά και οικονομικά κριτήρια. Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί μία πρωτότυπη ιδέα, καθώς συνδυάζει τις πολιτικές των Παρόχων Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων με τις απαιτήσεις των χρηστών προς όφελος όλων των εμπλεκόμενων οντοτήτων. Έτσι, αξιοποιεί τους μηχανισμούς χρέωσης των προσφερόμενων υπηρεσιών και παρακολούθησης της ικανοποίησης των χρηστών από την ανάθεσή τους σε συγκεκριμένα επίπεδα ποιότητας, ώστε να παρέχει λύσεις, σχετικά με τη χρονικά βέλτιστη επιλογή δικτύου ασύρματης πρόσβασης. Η διαφαινόμενη διαλειτουργικότητα των ασύρματων δικτύων, με στόχο τη συνεργασία για την εξασφάλιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υπηρεσιών αλλά και την αύξηση των ικανοτήτων των δικτύων για εγκατάσταση και εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών μέσα σε ένα σύνθετο ασύρματο περιβάλλον, στηρίζεται στην ικανοποιητική και αποδοτική λειτουργία τέτοιων αλγορίθμων επιλογής. Η αναγκαιότητα συντήρησης και υποστήριξης τέτοιων μεθόδων ενισχύεται από το γεγονός ότι η απελευθέρωση της αγοράς τηλεπικοινωνιών επιτρέπει τη δραστηριοποίηση πλήθους παρόχων, ο έλεγχος των οποίων και οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις μπορούν να ρυθμιστούν από την αποδοτικότερη διαχείριση του ραδιοφάσματος, για τη διασφάλιση του QoS των ζητούμενων υπηρεσιών.
- Η μελέτη και περιγραφή της κίνησης που διέρχεται από τα ασύρματα δίκτυα IP. Η κίνηση αυτή παρουσιάζει χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας και εξαρτήσεις μεγάλης κλίμακας χρόνου, τα οποία έχουν επίδραση στην επίδοση των υποκείμενων δικτύων. Η παρούσα διατριβή μελέτησε τα Μαρκοβιανά μοντέλα κίνησης και πρότεινε την επέκταση μίας μεθόδου για την ανάλυση και προσέγγιση της κίνησης με χαρακτηριστικά αυτό-ομοιότητας. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη συλλογή δειγμάτων από την πραγματική κίνηση και τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών πρώτης και δεύτερης τάξης για την κατανομή του μεγέθους και του χρόνου άφιξης μεταξύ διαδοχικών πακέτων. Με βάση αυτούς τους περιγραφείς για την εισερχόμενη κίνηση, η μέθοδος συνθέτει ένα ιεραρχικό μοντέλο, το οποίο αποτελείται από την υπέρθεση ανεξάρτητων Μαρκοβιανά διαμορφωμένων πηγών ροής ρευστού (MMFP) με κίνηση Poisson. Όπως διαπιστώθηκε και από τα αποτελέσματα, το προκύπτον ιεραρχικό μοντέλο μπορεί να περιγράψει την επίδραση της εισερχόμενης κίνησης στην ουρά αναμονής του υπό εξέταση κόμβου δικτύου για μία περιοχή τιμών αποθήκευσης στον ταμιευτήρα, η οποία καλύπτει τις απαιτήσεις των χρηστών ενός ασύρματου συστήματος για την εξασφάλιση των ποιοτικών κριτηρίων των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου.
- Η παρακολούθηση του επιπέδου ποιότητας του ασύρματου καναλιού για τον καθορισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας. Η παρούσα διατριβή αξιοποίησε απλά μοντέλα, που προσεγγίζουν τη χωρητικότητα κάτω ζεύξης των ασύρματων δικτύων. Επίσης, πρότεινε την παρακολούθηση των συνθηκών του ασύρματου περιβάλλοντος, μέσα από την αξιοποίηση

πληροφοριών, οι οποίες είναι διαθέσιμες στα κομβικά στοιχεία των δικτύων (όπως το SNR και το BER). Τέτοιες πληροφορίες μπορούν να ενσωματωθούν σε απλά μοντέλα για τον προσδιορισμό των συνθηκών του ασύρματου καναλιού, όπως αυτό του Gilbert Elliott, που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή για να προσφέρει μία εκτίμηση της διόρθωσης που απαιτείται στην εκάστοτε τιμή της χρονικά μεταβαλλόμενης χωρητικότητας κάτω ζεύξης. Η χρησιμοποίηση της βελτιωμένης τιμής της διαθέσιμης χωρητικότητας σε συνδυασμό με τα μοντέλα MMFP για την περιγραφή της ουράς αναμονής των κόμβων ασύρματων δικτύων καταδεικνύει την αναγκαιότητα ύπαρξης μηχανισμών αξιοποίησης των πληροφοριών για την ποιότητα του ασύρματου μέσου, η οποία επηρεάζει σημαντικά τη χωρητικότητα, που μπορεί να διατεθεί κάθε χρονική στιγμή στις συνδέσεις κάτω ζεύξης..

- Αναβάθμιση της λειτουργίας των δικτυακών κόμβων για τη υποστήριξη διαδικασιών εγγυημένης ποιότητας στις παρεχόμενες υπηρεσίες. Η βασικότερη συνεισφορά αυτής της διατριβής είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών κίνησης και η ενσωμάτωσή του στα πλαίσια ανάπτυξης και λειτουργίας του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων των ασύρματων δικτύων IP. Η πρωτεύουσα λειτουργία του συστήματος αυτού είναι η εφαρμογή του απαραίτητου μηχανισμού σύγκρισης του ρυθμού μετάδοσης που παράγεται από την εισερχόμενη κίνηση, η οποία συνοδεύεται από τις αντίστοιχες απαιτήσεις ποιότητας, με τη διαθέσιμη χωρητικότητα του ασύρματου καναλιού. Προς το σκοπό αυτό, το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών αποτελείται από ένα σύνολο διαχειριστικών οντοτήτων, κάθε μία από τις οποίες επιτελεί μία ξεχωριστή και κρίσιμη λειτουργία στη διαδικασία του ελέγχου αποδοχής των ανεξάρτητων ροών στους κόμβους των ασύρματων δικτύων. Έτσι, το προτεινόμενο σύστημα αποτελεί μία πρωτότυπη λύση για τη βελτίωση των μηχανισμών διαχείρισης του ραδιοφάσματος, η οποία συνδυάζει:
  - Την παρακολούθηση της εισερχόμενης κίνησης στα ασύρματα δίκτυα IP και την προσέγγιση των χαρακτηριστικών της, με βάση τα παραδοσιακά μοντέλα ανάλυσης κίνησης MMFP, όπως περιγράφηκε παραπάνω.
  - Την παρακολούθηση του επιπέδου ποιότητας του ασύρματου καναλιού για τον καθορισμό της διαθέσιμης, κάθε χρονική στιγμή, χωρητικότητας, όπως περιγράφηκε παραπάνω.
  - Την ανάπτυξη αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής, με βάση τα ποιοτικά κριτήρια των επιμέρους ανεξάρτητων ροών κίνησης. Αυτοί οι αλγόριθμοι βασίζονται στη θεωρία του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης, η οποία παρέχει ικανοποιητικής ακρίβειας ασυμπτωτική λύση για την προσέγγιση του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης των ροών. Η αποδοτικότητά της έγκειται στην αθροιστική της ιδιότητα και στην ευκολία εφαρμογής της για τέτοιου είδους μηχανισμούς, οι οποίοι διακρίνονται από ταχύτατους χρόνους απόκρισης.

Από τα αποτελέσματα που παρατίθενται στην παρούσα διατριβή καταδεικνύεται η σπουδαιότητα της υλοποίησης αποδοτικών μηχανισμών ελέγχου αποδοχής των ανεξάρτητων ροών κίνησης και της ενσωμάτωσής τους στο Ενιαίο Σύστημα Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων. Απώτερος στόχος του προτεινόμενου συστήματος αποτελεί η εγγύηση της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών και η επίτευξη της διαλειτουργικότητας για την αδιάλειπτη επικοινωνία των κινητών χρηστών.

### **9.3. Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση**

Έχοντας κατανοήσει τα βασικά συμπεράσματα και τους πρωτοποριακούς τομείς, στους οποίους συνεισφέρει αυτή η διατριβή, στην παράγραφο αυτή δίνουμε τα μελλοντικά βήματα συνέχισης αυτής της εργασίας.

Στα πλαίσια λειτουργίας του Ενιαίου Συστήματος Διαχείρισης Υπηρεσιών και Δικτυακών Πόρων και του αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, αυτό που μένει να γίνει είναι ο καθορισμός των κατάλληλων συναρτήσεων για την καταγραφή του βαθμού ικανοποίησης των χρηστών από την ανάθεση μίας υπηρεσίας σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας. Επίσης, η διαμόρφωση των συναρτήσεων για τον καθορισμό της τιμής χρέωσης ανά υπηρεσία αποτελεί μία μελλοντική κατεύθυνση. Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί ότι η αρχιτεκτονική των συστημάτων 4<sup>ης</sup> Γενιάς, όπως έχει προδιαγραφεί στο σχήμα 2-6 του Κεφαλαίου 2 προβλέπει την ύπαρξη ενός ανεξάρτητου ολοκληρωμένου συστήματος χρέωσης, το οποίο θα αναλαμβάνει τη διεκπεραίωση των οικονομικών εκκρεμοτήτων μεταξύ των διαφόρων παρόχων. Η υιοθέτηση αυτού του συστήματος μπορεί να διαμορφώσει ανάλογα και την έκφραση του αλγορίθμου Επιλογής Βέλτιστου Παρόχου Δικτυακών Πόρων, καθώς ο παράγοντας που αφορά στο κόστος των υπηρεσιών πρέπει να συμμορφώνεται ανάλογα με τις αλληλεπιδράσεις των εμπλεκόμενων οντοτήτων.

Το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής Ροών διανοίγει ένα σύνολο μελλοντικών κατευθύνσεων σχετικά με τον τρόπο προσέγγισης της κίνησης IP και τον υπολογισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων. Η παρούσα εργασία χρησιμοποίησε μοντέλα MMFP για να περιγράψει και να υπολογίσει τις στατιστικές παραμέτρους της εισερχόμενης κίνησης. Μία ανάλογη ανάλυση μπορεί να προκύψει με μοντέλα MMPP, η οποία, όμως, δε διαφέρει ποιοτικά από την ανάλυση που παρουσιάστηκε εδώ. Επίσης, η υιοθέτηση της θεωρίας του Ισοδύναμου Εύρους Ζώνης αποτελεί μία ασυμπτωτική επίλυση της κατανομής της ουράς αναμονής στον ταμιευτήρα των δικτύων. Εναλλακτικά μοντέλα για την προσέγγιση των χαρακτηριστικών αυτό-ομοιότητας της κίνησης IP έχουν αναλυθεί στη βιβλιογραφία και μπορούν να ενσωματωθούν στις επιμέρους λειτουργίες που επιτελούνται από το δυναμικό σύστημα Ελέγχου Αποδοχής. Τέτοια μοντέλα κάνουν χρήση της κίνησης FBM και χρησιμοποιούν την ανάλυση του μήκους κύματος με πιο πολύπλοκη περιγραφή.

Μία ακόμα σημαντική παράμετρος για την εξέλιξη της παρούσας εργασίας αποτελεί η εμπειρισματομένη μελέτη των χαρακτηριστικών της TCP κίνησης, η οποία παρουσιάζει ανάδραση και διαμορφώνει το ρυθμό μετάδοσης των πηγών, ανάλογα με το χρόνο πλήρους διαδρομής (Round Trip Time - RTT) και την απώλεια πακέτων (Packet Loss Rate - PLR), που οδηγεί σε επαναμετάδοση της κίνησης. Στην παρούσα εργασία, έγινε η υπόθεση πλήρους δικαιοσύνης του πρωτοκόλλου TCP, η οποία ισοδυναμεί σε ισομερή κατανομή του ρυθμού μετάδοσης όλων των ροών TCP σε περίπτωση συμφόρησης. Μία μελλοντική επέκταση αποτελεί ο διαχωρισμός των ροών TCP ανάλογα με τις τιμές των RTT και PLR. Έτσι, μπορεί να προκύψει ένας ακριβέστερος υπολογισμός της διέλευσης του TCP ανά ροή, ο οποίος έχει άμεση επίδραση στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των ανεξάρτητων χρηστών. Τονίζουμε, ωστόσο, ότι μία τέτοια πρακτική, μπορεί να απαιτεί την παρέμβαση των αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής στο δίκτυο, το οποίο θα σημαίνει την αύξηση των μηνυμάτων σηματοδότησης.

Επίσης, η επίδοση των δικτύων για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας αρκέστηκε στην περιγραφή και τον υπολογισμό της καθυστέρησης. Όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 2, η ποιότητα υπηρεσίας εκφράζεται με ένα σύνολο παραμέτρων. Έτσι, η παρούσα εργασία μπορεί να επεκταθεί, ώστε να συμπεριλάβει σαν κριτήρια ποιότητας των ροών τόσο το jitter όσο και το PLR. Εδώ, βέβαια, πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι, λόγω του ότι η επαναμετάδοση πακέτων επηρεάζει τόσο το TCP όσο και τη διαθέσιμη χωρητικότητα, πρέπει να μπορεί να γίνει διαχωρισμός των απωλειών σε εκείνες που οφείλονται στα ενσύρματα χαρακτηριστικά της σύνδεσης και σε εκείνες που οφείλονται στο ασύρματο εύρος ζώνης. Πολλές τεχνικές προς την κατεύθυνση αυτή έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία.

Πέρα από τις παραπάνω μελλοντικές κατευθύνσεις, η ενσωμάτωση μηχανισμών προγραμματισμού και σχεδιασμού της δρομολόγησης των πακέτων στους κόμβους των δικτύων είναι μία ακόμα επέκταση των θεμάτων που πραγματεύεται η εργασία αυτή. Έτσι, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, εδώ, αφορούν στην υπέρθεση των διαφόρων κατηγοριών κίνησης μέσα στο ίδιο στοιχείο δικτύου (ταμιευτήρα). Ωστόσο, οι διάφορες προεκτάσεις των πρωτοκόλλων για τα ασύρματα δίκτυα οραματίζονται την υιοθέτηση μηχανισμών προτεραιότητας στα εισερχόμενα πακέτα (όπως συμβαίνει με την περίπτωση του DiffServ και του IPv6) και την υλοποίηση διαφορετικών ταμιευτήρων δικτύων για την εξυπηρέτηση αυτών των ροών κίνησης. Σε μία τέτοια περίπτωση, οι αλγόριθμοι υποστήριξης της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών, που περιγράφηκαν εδώ, θα πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα, ώστε να συμπεριλάβουν το διαχωρισμό των πακέτων σε κατηγορίες ταμιευτήρων. Και, πάλι, αναφέρουμε ότι στη βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί και αναλυθεί Μαρκοβιανά μοντέλα, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τους τη διαίρεση της εισερχόμενης κίνησης σε κλάσεις χρηστών με προτεραιότητες. Επομένως, εκείνο που απαιτείται είναι η υιοθέτηση και υλοποίηση αυτών των μοντέλων από τις διαχειριστικές οντότητες του δυναμικού συστήματος Ελέγχου Αποδοχής Ροών.

Σε κάθε περίπτωση, η συνεισφορά αυτής της διατριβής μπορεί να αποτελέσει τη βάση των μηχανισμών παροχής ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών σε ένα σύνθετο ασύρματο

περιβάλλον, οι οποίοι συνοψίζονται στην κατάλληλη διαχείριση του ραδιοφάσματος και την αποτελεσματική εφαρμογή αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής ροών κίνησης. Με αναφορά στα επιμέρους κομμάτια αυτής της διατριβής, η επέκταση των υπάρχουσών μεθόδων και μηχανισμών είναι θεμιτή και αποσκοπεί στην ολοκληρωμένη λειτουργία ενός ευέλικτου και συμπαγούς συστήματος διαχείρισης υπηρεσιών και δικτυακών πόρων.