



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα Κυψελωτά Δίκτυα με Υπηρεσίες Πολυμέσων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

Τιμόθεου Ι. Καστρινογιάννη

Αθήνα, Δεκέμβριος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα Κυψελωτά Δίκτυα με Υπηρεσίες Πολυμέσων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

Τιμόθεου Ι. Καστρινογιάννη

Συμβουλευτική Επιτροπή : Συμεών Παπαβασιλείου

Βασίλειος Μάγκλαρης

Μιχαήλ Θεολόγου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 17^η Δεκεμβρίου 2009.

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Βασίλειος Μάγκλαρης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Μιχαήλ Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Μιλτιάδης Αναγνώστου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Νικόλαος Μήτρου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Σταυρακάκης
Καθηγητής ΕΚΠΑ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2009

.....
Τιμόθεος Ι. Καστρινογιάννης

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

Copyright © Τιμόθεος Ι. Καστρινογιάννης, 2009.

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.

Περίληψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων σε χρήστες ασύρματων κυψελωτών δικτύων πολυπλεξίας διαίρεσης κώδικα (CDMA cellular networks), τα οποία υποστηρίζουν υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου με πολλαπλά και συχνά αλληλοσυγκρουόμενα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας, μέσω της υιοθέτησης «ευκαιριακών» πολιτικών διαχείρισης πόρων δικτύου. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στην ικανοποίηση των κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, οι οποίες απαιτούν την τήρηση αυστηρών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων καθυστέρησης και ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω ιδιαιτερότητες, πραγματοποιείται θεωρητική μελέτη του τρόπου εξυπηρέτησης υπηρεσιών πραγματικού χρόνου υπό ευκαιριακές πολιτικές CDMA δικτύων, καλύπτοντας το μέχρι τώρα ερευνητικό κενό στη διεθνή βιβλιογραφία.

Αρχικά εισάγεται ένα καινοτόμο αναλυτικό μαθηματικό μοντέλο, μέσω του οποίου αναλύονται τα βραχυπρόθεσμα κριτήρια καθυστέρησης μετάδοσης και αντίστοιχης ρυθμαπόδοσης των χρηστών πραγματικού χρόνου υπό το πρίσμα ευκαιριακών αλγορίθμων ανάθεσης πόρων ομογενούς CDMA δικτύου. Τα παραγόμενα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι τα έως τώρα ευρέως υιοθετούμενα πιθανοτικά κριτήρια καθυστέρησης μετάδοσης χρηστών δεν αποτελούν ικανοποιητικούς δείκτες κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας χρηστών πραγματικού χρόνου, ενώ αποδεικνύεται η καταλληλότητα των προτεινόμενων νέο-εισαχθέντων πιθανοτικών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης. Με βάση τα παραπάνω προτείνονται νέες πολιτικές ευκαιριακής κατανομής πόρων χρηστών, που υποστηρίζουν αποτελεσματικά υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου σε ομογενή ασύρματα CDMA δίκτυα, μέσω της χρήσης συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών.

Εν συνεχεία, θεωρώντας μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση του φυσικού (εναέριου) στρώματος, εξετάζεται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων ετερογενούς CDMA συστήματος στους χρήστες αυτού και κατά τη ζεύξη καθόδου και κατά τη ζεύξη ανόδου. Η παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνει, αναλύει, τεκμηριώνει θεωρητικά και επιβεβαιώνει μέσω προσομοίωσης, βέλτιστες λύσεις και αντίστοιχες ευκαιριακές πολιτικές διαχείρισης πόρων ασύρματου ετερογενούς CDMA δικτύου. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων υιοθετείται η θεωρία μεγιστοποίησης απόδοσης δικτύων μέσω συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών (Network Utility Maximization, NUM Theory) βάσει της οποίας μοντελοποιούνται τα προτεινόμενα προβλήματα βελτιστοποίησης, η λύση των οποίων πραγματοποιείται είτε μέσω μη τετριμμένων αναλυτικών μεθόδων (non-convex optimization), στην περίπτωση της ζεύξης καθόδου, είτε μέσω της θεωρίας παιγνίων (game theory), στην περίπτωση της ζεύξης ανόδου.

Παράλληλα, και στις δύο περιπτώσεις, προτείνονται κατάλληλα κριτήρια αποδοχής κλήσεων χρηστών και μελετάται η στοχαστική (μακροπρόθεσμη) συμπεριφορά του δικτύου, με σκοπό τη

βαθύτερη κατανόηση της σχέσης μεταξύ της μεγιστοποίησης της συνολικής απόδοσης/ρυθμαπόδοσης του συστήματος και της διασφάλισης των κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών σε αυτό.

Λέξεις Κλειδιά

Ασύρματα CDMA Κυψελωτά Δίκτυα, Βέλτιστη Κατανομή Πόρων Δικτύου, Κριτήρια Ποιότητας Υπηρεσίας Χρηστών, Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου Πολυμέσων, Θεωρία Βελτιστοποίησης, Θεωρία Παιγνίων

Abstract

With the growing demand for high data rate and support of multiple services with varied quality of service (QoS) requirements, efficient resource allocation plays key role in future wireless networks. This thesis addresses the problem of efficient resource allocation in CDMA cellular wireless networks supporting both real-time and non-real-time services with various and often diverse QoS prerequisites. Special emphasis is placed on real-time services' essential prerequisites satisfaction, i.e. short-term delay and throughput strict constraints. Thus, the above inner characteristics of real-time services motivated us to theoretically analyze their performance over opportunist resource allocation policies, which to the best of our knowledge has not been considered in this framework before.

Initially, we provide a novel analytical framework for studying real-time users' short-term delay and throughput properties under fundamental opportunistic scheduling policies in CDMA networks. The corresponding results demonstrate that probabilistic delay constraints are insufficient indicators of real-time services' QoS prerequisites, while the (newly) proposed probabilistic short-term throughput requirements are more appropriate in asserting their performance expectations. Based on these observations and results, we propose and develop optimal scheduling policies for efficiently supporting heterogeneous services that include delay-tolerant non-real-time and delay-sensitive real-time services, over a homogeneous wireless CDMA system under a common utility based framework.

Subsequently, we generalize our study via extending the adopted system model from homogeneous to heterogeneous, which expresses in a more realistic way CDMA network's physical layer characteristics. Upon that framework, we re-examine the problem of optimal resource allocation in heterogeneous wireless CDMA networks, both for the downlink and the uplink case. Optimal solutions and corresponding opportunistic scheduling policies that derive them are proposed, analyzed, theoretically justified and validated via simulation, for both links. Network utility maximization (NUM) theory has been adopted towards formulating and treating the proposed optimization problems, either via analytical methods (i.e. non-convex optimization) in the downlink case or via exploiting game-theoretic tools, in the uplink case. Moreover, proper QoS-aware call admission control criteria are derived. Finally, we place special emphasis on understanding the stochastic properties of the system under the proposed resource allocation algorithms towards revealing and quantifying the inherent trade-off between overall system performance maximization and user's QoS requirements satisfaction in CDMA access networks.

Key Words

Wireless CDMA cellular networks, Optimal resource allocation, Quality of service criteria, Real-time Multimedia Services, Non-convex optimization, Game theory.

Ευχαριστίες

Σε στιγμές αγωνίας και προβληματισμού μου για το αύριο, ο κ. Συμεών Παπαβασιλείου πάντα μου υπενθύμιζε, *“Υπομονή..., επιμονή στο τώρα και ο δρόμος είναι μπροστά σου, περπάτησέ τον...”*. Οι δύο παραπάνω αρετές που προσπάθησε να μου εμφυσήσει ο επιβλέπων της διατριβής μου με έκαναν να αγαπήσω την κάθε στιγμή του ταξιδιού, εύκολη ή δύσκολη, εξίσου με τον προορισμό. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Συμεών Παπαβασιλείου για τον εξαιρετικό τρόπο που με καθοδήγησε σε αυτό το τετραετές ταξίδι, καθώς και όλους όσους συνέβαλαν στο να εξελιχθεί σε μια υπέροχη εμπειρία ζωής.

Είμαι ευγνώμων στον κ. Παπαβασιλείου για τον ενθουσιασμό, την υπομονή και την αμέριστη υποστήριξή του καθ’ όλη τη διάρκεια της διδακτορικής μου διατριβής. Τον ευχαριστώ θερμά για την εμπιστοσύνη του στο πρόσωπο και τις ικανότητές μου, για το σεβασμό που έδειξε σε εμένα και τη δουλειά μου, καθώς και για το ότι με δίδαξε το πώς να θέτω στόχους και να τους επιτυγχάνω.

Αισθάνομαι ιδιαίτερα προνομιούχος που μαθήτευσα δίπλα σε ένα τόσο εξαιρετικό δάσκαλο και υπέροχο άνθρωπο. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Παπαβασιλείου για κάθε μια από τις συζητήσεις μας, ιδιαίτερα εκείνες που έγιναν στα κοινά μας ταξίδια, κατά τις οποίες μοιράστηκε μαζί μου απλόχερα το χρόνο, την πείρα και τις εμπειρίες του. Πήρα και διδάχτηκα τόσα πολλά, ευχαριστώ πολύ.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Μιχαήλ Θεολόγου γιατί η άψογη συνεργασία μας στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας, το πάθος του να με μνήσει σε ένα μεθοδικό τρόπο σκέψης και η εμπιστοσύνη του στις δυνατότητές μου, αποτέλεσαν τα κύρια εναύσματα της ερευνητικής μου πορείας. Τον ευχαριστώ για την αμέριστη συμπαράσταση και καλοσύνη του όλα αυτά τα χρόνια.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Βασίλη Μάγκλαρη για την αψεγάδιαστη και καρποφόρα συνεργασία μας καθ’ όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου, την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, καθώς και για την υπέροχη φιλοξενία του στο εργαστήριο NETMODE.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω του καθηγητές μου στο ΕΜΠ και όλους όσους συνεργάστηκα τα τελευταία χρόνια, οι οποίοι αποτέλεσαν αναπόσπαστο κομμάτι αυτού του ταξιδιού.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στο στενό μου συνεργάτη, πολύτιμο αρωγό και εξαίρετο φίλο μου Βασίλειο Καρυώτη, καθώς και τον αγαπητό μου φίλο και συνεργάτη Κώστα Τρούλο. Οι αμέτρητες κουβέντες μας, ο τρόπος σκέψης τους, καθώς και οι αγωνίες και οι στιγμές που μοιραστήκαμε αυτά

τα τέσσερα χρόνια, όχι μόνο οδήγησαν σε υπέροχες ερευνητικές στιγμές, αλλά αποτέλεσαν για μένα πολύτιμα στηρίγματα και αιτίες εξέλιξης του τρόπου σκέψης και αντιμετώπισης των πραγμάτων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το Γιώργο Αριστομενόπουλο και την Ειρήνη-Ελένη Τσιροπούλου για την άποψη συνεργασία μας, τις ιδέες, τις κουβέντες και τις αγωνίες που μοιραστήκαμε καθ' όλη τη διάρκεια της κοινής ερευνητικής πορείας μας, οι οποίες έπαιξαν καθοριστικό ρόλο όχι μόνο στην εξέλιξή μου ως ερευνητή αλλά και ως συνεργάτη και ως άνθρωπο. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους στενούς μου συνεργάτες και συνοδοιπόρους στο εργαστήριο NETMODE, τον Κώστα, το Γιώργο, τη Στέλλα, το Βασίλη, τη Βασιλική, τον Άγγελο, το Βασίλη, το Χρήστο, τη Μαίρη, καθώς και τους Χ. Μαλαβάζο, Β. Καλδάνη και Zhaojun Li (Alice). Σας ευχαριστώ θερμά για τις σκέψεις και τις κουβέντες που μοιραστήκατε μαζί μου καθώς και για όλα όσα έμαθα από εσάς.

Είμαι ιδιαίτερα τυχερός που είχα την ευκαιρία να συνεργαστώ κατά τη διάρκεια αυτών των τεσσάρων ετών με εξαιρετικούς διπλωματικούς φοιτητές, τον Κώστα, το Ζαχαρία, τον Ιωάννη, την Τέρψη, το Δημήτρη και την Ειρήνη. Σας ευχαριστώ όλους θερμά για τους προβληματισμούς, τις σκέψεις και τις στιγμές που περάσαμε μαζί. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον πολύ καλό μου φίλο Δημήτρη Σούλιο, οι σκέψεις του και η φιλία του με τιμούν ιδιαίτερα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Παύλο, τον Παύλο και το Χρήστο, για τη στήριξή τους, την υπομονή τους, την αγάπη τους και την πολύτιμη φιλία τους. Επίσης, ευχαριστώ τους Δημήτρη, Έφη, Νάντια, Αγάπιο, Κόμη, Ντίνο, Βαγγέλη, Βίκυ, Λάζαρο, Κατερίνα, Λίνα, Όλγα, Κώστα, Γεωργία και την Ελένη για την αγάπη τους και για όλες τις υπέροχες στιγμές που ήρθαν και που θα έρθουν.

Τέλος, δεν υπάρχουν λόγια για να εκφράσω την ευγνωμοσύνη και την αγάπη μου για την οικογένειά μου. Τον αδερφό μου Κώστα, τον οποίο θαυμάζω και εκτιμώ απεριόριστα, για την στήριξή του, την πολύτιμη αγάπη του, τις συμβουλές του και την ικανότητά του να με κάνει να βλέπω με καθαρό μυαλό την όποια περίσταση. Κάθε στιγμή μαζί σου με κάνει καλλίτερο και πιο ολοκληρωμένο άνθρωπο. Τους γονείς μου, Ιδομενέα και Μαρίκα, στους οποίους οφείλω αυτό που είμαι και τον τρόπο που πορεύομαι. Υπήρξατε πάντα αρωγοί και καλοί σύμβουλοι σε κάθε μου προσπάθεια και όνειρο. Σας ευχαριστώ θερμά και σας αφιερώνω τη διδακτορική μου διατριβή.

Στην οικογένειά μου...

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	Εισαγωγή	17
1.1	Συμβολή της Διατριβής.....	18
1.2	Διάρθρωση της Διατριβής.....	21
2	Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα CDMA Κυψελωτά Δίκτυα Κινητών Τηλεπικοινωνιών	24
2.1	Μοντέλο Συστήματος	26
2.2	Ευκαιριακός Χρονοπρογραμματισμός Χρηστών – Ομογενές Σύστημα.....	30
2.3	Μακροπρόθεσμα Κριτήρια Ποιότητας Υπηρεσίας Χρηστών με Υπηρεσίες Μη Πραγματικού Χρόνου	32
2.4	Συμπεράσματα και Σκιαγράφηση των Προβλημάτων που Μελετήθηκαν στην Παρούσα Διδακτορική Διατριβή	36
3	Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου Πολυμέσων σε Ασύρματα CDMA Κυψελωτά Δίκτυα – Η Περίπτωση Ομογενούς Μοντέλου Συστήματος.....	38
3.1	Πολιτικές Διασφάλισης Βραχυπρόθεσμων Κριτηρίων Καθυστέρηση Χρηστών με Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου	39
3.2	Ευκαιριακή Πολιτική ΔΠΔ Ελαστικής Βραχυπρόθεσμης Δικαιοσύνης (Elastic Short-term Fairness based opportunistic Scheduling – ESFS).....	43
3.3	Αναποτελεσματικότητα των Πολιτικών Διασφάλισης Πιθανοτικών Βραχυπρόθεσμων Κριτηρίων Καθυστέρησης Χρηστών με Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου	48
4	Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου υπό Ευκαιριακούς Αλγορίθμους ΔΠΔ	52
4.1	Διατύπωση Προβλήματος & Μεθοδολογία Επίλυσης.....	52
4.2	Αναλυτικό Μοντέλο Υπολογισμού Βραχυπρόθεσμων Στατιστικών Ιδιοτήτων Χρηστών Υπηρεσιών Πραγματικού Χρόνου & Βραχυπρόθεσμα Κριτήρια Ρυθμαπόδοσης.....	53
4.3	Βραχυπρόθεσμες Ιδιότητες Καθυστέρησης και Ρυθμαπόδοσης Χρηστών με Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου υπό Θεμελιώδεις Ευκαιριακούς Αλγορίθμους ΔΠΔ - Θεωρητική Επιβεβαίωση Προβλήματος και Τεκμηρίωση Προτεινόμενης Λύσης	55
4.4	Προτεινόμενος Ευκαιριακός Αλγόριθμος Ικανοποίησης Βραχυπρόθεσμων Κριτηρίων Ρυθμαπόδοσης Υπηρεσιών Πραγματικού Χρόνου.....	63
4.5	Αξιολόγηση Επίδοσης Προτεινόμενου Αλγορίθμου	69
5	Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα CDMA Κυψελωτά Δίκτυα – Η Περίπτωση Ετερογενούς Μοντέλου Συστήματος	78
5.1	Θεμελιώδες Πρόβλημα Βέλτιστης Κατανομής Πόρων Ασύρματου CDMA Συστήματος υπό Ετερογενές Περιβάλλον.....	80

5.2	Μεθοδολογία Ανάλυσης Μη-Κυρτών Προβλημάτων Βέλτιστης Κατανομής Πόρων Ασύρματου CDMA Συστήματος υπό Ετερογενές Περιβάλλον.....	82
6	Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε CDMA Δίκτυα με Υπηρεσίες Μη Πραγματικού και Πραγματικού Χρόνου υπό Ετερογενές Μοντέλο Συστήματος – Η Ζεύξη Καθόδου.....	87
6.1	Ερευνητικός Στόχος, Αναγκαιότητα Επίτευξής του & Ανακύπτον Πρόβλημα Βελτιστοποίησης.....	88
6.2	Μεθοδολογία Ανάλυσης και Επίλυσης του Προβλήματος.....	89
6.3	Πλαίσιο Δυναμικής Μεταβολής Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Χρηστών	93
6.4	Δυναμική Προσαρμογή Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Χρηστών με Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου	96
6.5	Επίλυση Προβλήματος Βέλτιστης Κατανομής Πόρων CDMA Ασύρματου Συστήματος με Υπηρεσίες μη Πραγματικού και Πραγματικού Χρόνου υπό Ετερογενές Μοντέλο Συστήματος κατά τη Ζεύξη Καθόδου	100
6.6	Συσχέτιση Δυναμικού Πλαισίου Μεταβολής Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Χρηστών και Προτεραιότητας Εξυπηρέτησής τους.....	104
6.7	Περιορισμοί Ελέγχου ΚΠΥ Χρηστών Πραγματικού Χρόνου υπό το Προτεινόμενο Δυναμικό Πλαίσιο Μεταβολής Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Χρηστών.....	106
6.8	Προτεινόμενη Ευκαιριακή Πολιτική ΔΠΔ – Οδεύοντας προς την Υλοποίηση Αυτόνομων Ασύρματων Κόμβων.....	111
6.9	Αξιολόγηση Επίδοσης Προτεινόμενης Ευκαιριακής Πολιτικής ΔΠΔ.....	113
7	Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε CDMA Δίκτυα με Υπηρεσίες Μη Πραγματικού και Πραγματικού Χρόνου υπό Ετερογενές Μοντέλο Συστήματος – Η Ζεύξη Ανόδου.....	122
7.1	Ερευνητικός Στόχος, Αναγκαιότητα Επίτευξής του & Ανακύπτον Πρόβλημα Βελτιστοποίησης.....	124
7.2	Μεθοδολογία Ανάλυσης και Επίλυσης του Προβλήματος.....	126
7.3	Ορισμός και Μελέτη Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Πραγματικής Ρυθμαπόδοσης και Ολικών Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Χρηστών.....	129
7.4	Επίλυση του Μη-Συνεταιριστικού Παιγνίου Κατανομής Πόρων Ασύρματου CDMA Δικτύου (UPC) κατά τη Ζεύξη Ανόδου (UPC)	133
7.5	Προτεινόμενη Ευκαιριακή Πολιτική ΔΠΔ μέσω του Ελέγχου Ισχύος Ασύρματων Κόμβων.....	136
7.6	Μελέτη Ιδιοτήτων Σημείου Ισορροπίας κατά Nash Χρηστών με Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου - Οδεύοντας προς το Σχεδιασμό Αυτόνομων Ασύρματων Κόμβων	139

7.7	Αξιολόγηση της Επίδοσης της Προτεινόμενης Ευκαιριακής Πολιτικής ΔΠΔ	143
8	Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα.....	152
8.1	Μελλοντική Έρευνα	159
9	Παραρτήματα	164
	Βιβλιογραφία.....	187
	Κατάλογος Δημοσιευμένων Εργασιών	196

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Διάγραμμα χρονισμού μεταδόσεων σταθμού βάσης	27
Σχήμα 2. Συναρτήσεις ευχαρίστησης χρηστών υπηρεσιών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων	30
Σχήμα 3. Παράδειγμα μορφής συνάρτησης $F(x)$, όταν $H_1 < H_2$ και $T_1 < T_2$	46
Σχήμα 4. Στιγμιαία και μέση ρυθμαπόδοση χρηστών πραγματικού χρόνου υπό τις πολιτικές MAX, ESFS και STMF, καθώς το σύστημα εξελίσσεται.	47
Σχήμα 5. Βραχυπρόθεσμες πιθανότητες καθυστέρησης χρηστών υπό τις πολιτικές MAX και PF, καθώς και τις πολιτικές RB και PF στην περίπτωση α) χρηστών με καλό κανάλι, β) χρηστών με κακό κανάλι.....	61
Σχήμα 6. Βραχυπρόθεσμες πιθανότητες ρυθμαπόδοσης χρηστών υπό τις πολιτικές MAX και PF, καθώς και τις πολιτικές RB και PF στην περίπτωση α) χρηστών με καλό κανάλι, β) χρηστών με κακό κανάλι.....	62
Σχήμα 7. Πιθανότητες αποτυχίας τήρησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης χρηστών πραγματικού χρόνου, για διάφορες τιμές παραθύρου παρατήρησης υπό τους αλγορίθμους USTF και MAX στο SC-I.	71
Σχήμα 8. Μέση ρυθμαπόδοση χρηστών πραγματικού χρόνου, για διάφορες τιμές παραθύρου παρατήρησης υπό τους αλγορίθμους USTF και MAX στο SC-I.....	71
Σχήμα 9. Πιθανότητες αποτυχίας τήρησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης χρηστών πραγματικού χρόνου υπό το σενάριο SC-II.	74
Σχήμα 10. Πιθανότητες αποτυχίας τήρησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων καθυστέρησης χρηστών πραγματικού χρόνου υπό το σενάριο SC-II.	74
Σχήμα 11. Μέση ρυθμαπόδοση χρηστών πραγματικού χρόνου υπό το σενάριο SC-II.	75
Σχήμα 12. Μέση ρυθμαπόδοση χρηστών μη πραγματικού χρόνου υπό το σενάριο SC-II.	75
Σχήμα 13. Μέση ρυθμαπόδοση συστήματος υπό το σενάριο SC-II.	75
Σχήμα 14. Συνάρτηση απόδοσης f_i για διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης (BPSK, DPSK, FSK). 82	
Σχήμα 15. Σχηματική απεικόνιση της συνάρτησης $\lambda_i^{\max}(\hat{b}_{RT,i})$ όταν $A_i=1.5$	106
Σχήμα 16. Ολική μέση ρυθμαπόδοση συστήματος συναρτήσει του πλήθους των χρηστών πραγματικού χρόνου στο σύστημα, κατά το σενάριο SC1.....	116
Σχήμα 17. Πιθανότητες μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης χρηστών πραγματικού χρόνου συναρτήσει του πλήθους των χρηστών πραγματικού χρόνου στο σύστημα, κατά το σενάριο SC1.....	116
Σχήμα 18. Μέση πραγματική ρυθμαπόδοση χρηστών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου υπό την πολιτική DUA_UPRA συναρτήσει του πλήθους των χρηστών πραγματικού χρόνου στο σύστημα, κατά το σενάριο SC1.....	116
Σχήμα 19. Μέση πραγματική ρυθμαπόδοση χρηστών πραγματικού χρόνου υπό τις πολιτικές UPRA και DUA_UPRA στο σενάριο SC1 (όταν $N=NRT=30$).....	118
Σχήμα 20. Πιθανότητες μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης χρηστών υπό τις πολιτικές UPRA και DUA_UPRA στο σενάριο SC1 (όταν $N=NRT=30$).....	118
Σχήμα 21. Πιθανότητες μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης χρηστών συναρτήσει του πλήθους των χρηστών πραγματικού χρόνου στο σύστημα υπό το σενάριο SC2... 120	
Σχήμα 22. Μέση πραγματική ρυθμαπόδοση χρηστών συναρτήσει του πλήθους των χρηστών πραγματικού χρόνου στο σύστημα υπό το σενάριο SC2.	120

Σχήμα 23. Συνάρτηση ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου.	130
Σχήμα 24. Ισχύς μετάδοσης χρηστών κατά τη σύγκλισή τους (ανά επανάληψη - iteration) για δεδομένη χρονοσχισμή, συναρτήσει του διακριτικού τους (ID).	145
Σχήμα 25. Ολική συνάρτηση ευχαρίστησης χρηστών ανά επανάληψη (iteration) για δεδομένη χρονοσχισμή, συναρτήσει του διακριτικού τους (ID).	146
Σχήμα 26. Πραγματική ρυθμαπόδοση (goodput) χρηστών ανά επανάληψη (iteration) για δεδομένη χρονοσχισμή, συναρτήσει του διακριτικού τους (ID).	146
Σχήμα 27. Μέση ισχύς κατανάλωσης, μέση ολική συνάρτηση ευχαρίστησης και μέση πραγματική ρυθμαπόδοση χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.	148
Σχήμα 28. Μέση ολική (συνάρτηση) ευχαρίστησης χρηστών συναρτήσει του διακριτικού τους (ID).	150
Σχήμα 29. Μέση ισχύς μετάδοσης δεδομένων χρηστών συναρτήσει του διακριτικού τους (ID)...	150
Σχήμα 30. Μέσος πραγματικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων χρηστών συναρτήσει του διακριτικού τους (ID).	151
Σχήμα 31. Συνάρτηση ευχαρίστησης χρήστη και τα σημεία καμπής και διαχωρισμού αυτής για διαφορετικές τιμές της μεταβλητής b	180
Σχήμα 32. Συνάρτηση ευχαρίστησης χρήστη και τα σημεία καμπής και διαχωρισμού στην περίπτωση όπου $\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^*$	181
Σχήμα 33. Γραφική απεικόνιση της συνάρτησης $h(P)$ και της ασυνέχειας αυτής στην περίπτωση όπου $\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^{**}$	183

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΚΑΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Ρυθμοί Μετάδοσης σε HDR Σύστημα [1].....	27
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Ρυθμοί Μετάδοσης (Kbps) Συναρτήσει του Στιγμιαίου SINR (dB).....	70
ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Παραμετροποίηση Συστήματος Ζεύξης Ανόδου	144
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. ΚΠΥ Χρηστών Πραγματικού Χρόνου ανά Κλάση.....	144

1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων καθώς και για την εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών, με διαφορετικά και πολλές φορές αντικρουόμενα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας (ΚΠΥ) μέσω ασύρματων κυψελωτών δικτύων βασισμένων σε πολυπλεξία διαίρεσης κώδικα (CDMA-based cellular networks), οδήγησε πληθώρα ερευνητών στη μελέτη του προβλήματος της βέλτιστης κατανομής των πόρων του συστήματος (κυψέλης) στους χρήστες που εξυπηρετούνται από αυτό. Κύριο ρόλο στην επίτευξη του παραπάνω στόχου διαδραματίζει η πολιτική διαχείρισης πόρων δικτύου (ΔΠΔ), η πολιτική δηλαδή εκείνη η οποία καθορίζει το πότε και ποιοί χρήστες θα εξυπηρετηθούν την εκάστοτε στιγμή, καθώς και το πλήθος των πόρων του συστήματος που θα λάβουν, όπως η ισχύς μετάδοσης, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων καθώς και το είδος διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί.

Με στόχο τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης/ρυθμαπόδοσης του συστήματος, η εκμετάλλευση των ραγδαίως μεταβαλλόμενων καναλιών των χρηστών, λόγω σκίασης και διαλείψεων, προτάθηκε και υιοθετήθηκε ευρέως από την ερευνητική κοινότητα, οδηγώντας σε μια νέα κατηγορία πολιτικών ΔΠΔ, εκείνη των «ευκαιριακών» πολιτικών ΔΠΔ (opportunistic schedulers). Θεμελιώδες γνώρισμα μιας ευκαιριακής πολιτικής ΔΠΔ αποτελεί η εισαγωγή της πληροφορίας της στιγμιαίας ποιότητας των καναλιών των χρηστών στη διαδικασία περιοδικής επιλογής, εξυπηρέτησης και ανάθεσης πόρων του συστήματος σε αυτούς. Με απλά λόγια, ένας ευκαιριακός ΔΠΔ επωφελείται της ύπαρξης συνεχώς μεταβαλλόμενων και ασυσχέτιστων καναλιών χρηστών (multiusers diversity effect) ώστε να μεγιστοποιήσει τη συνολική απόδοση του συστήματος δίδοντας, ανά χρονοσχισμή, μεγαλύτερη προτεραιότητα εξυπηρέτησης στους χρήστες με στιγμιαία καλύτερη ποιότητα καναλιού, συγκριτικά με τους υπολοίπους.

Εξελίσσοντας την παραπάνω σχεδιαστική επιλογή, πληθώρα ευκαιριακών πολιτικών ΔΠΔ προτάθηκε τα τελευταία χρόνια με στόχο την ταυτόχρονη και αποτελεσματική εξυπηρέτηση διαφόρων υπηρεσιών χρηστών καθώς και τη διασφάλιση των αντίστοιχων ΚΠΥ αυτών. Βασικό αντικείμενο μελέτης αποτέλεσαν οι υπηρεσίες δεδομένων μη πραγματικού χρόνου, κύρια χαρακτηριστικά των οποίων αποτελούν η ανάγκη για επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης και η ανεκτικότητα τους σε καθυστερήσεις μετάδοσης ή λήψης δεδομένων. Εν αντιθέσει, η ανάγκη για αποτελεσματική εξυπηρέτηση υπηρεσιών πολυμέσων πραγματικού χρόνου, οι οποίες χαρακτηρίζονται κυρίως από αυστηρούς περιορισμούς καθυστέρησης μετάδοσης ή λήψης δεδομένων και την απαίτηση για σταθερούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, καλύφθηκε μέσω ευρηστικών τεχνικών, παραλλαγές αντίστοιχων αλγορίθμων από το ενσύρματο περιβάλλον, καθιστώντας αναγκαία την περαιτέρω μελέτη και θεωρητική θεμελίωσή τους.

1.1 Συμβολή της Διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων ενός ασύρματου CDMA κυψελωτού δικτύου με στόχο όχι μόνο τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος αλλά ταυτόχρονα την αποτελεσματική διασφάλιση των ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού και πραγματικού χρόνου, και κατά τη ζεύξη ανόδου και κατά τη ζεύξη καθόδου. Έμφαση δίδεται στην εξυπηρέτηση υπηρεσιών πολυμέσων πραγματικού χρόνου, ευαίσθητων ως προς την καθυστέρηση μετάδοσης δεδομένων, καθώς τα ΚΠΥ τους χαρακτηρίζονται κατά κύριο λόγο από αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης και σταθερούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. *Η παρούσα μελέτη προτείνει, αναλύει, τεκμηριώνει θεωρητικά, και επιβεβαιώνει πειραματικά, βέλτιστες λύσεις και αντίστοιχους ευκαιριακούς αλγορίθμους ΔΠΔ ασύρματου CDMA δικτύου για την επίτευξη του παραπάνω στόχου και επίσης ασχολείται με τη μελέτη και ομογενούς και ετερογενούς μοντέλου συστήματος. Το σύνολο της μελέτης μας επικεντρώνεται σε τρεις βασικούς συμπληρωματικούς ερευνητικούς άξονες, με τον ένα να αποτελεί λογική συνέχεια του άλλου, καθώς και στην επίλυση των αντίστοιχων προβλημάτων βελτιστοποίησης που ανακύπτουν.*

Συγκεκριμένα, στοχεύοντας στη μελέτη και βελτιστοποίηση της απόδοσης χρηστών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου πολυμέσων υπό το πρίσμα ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ, αρχικά μελετώνται οι βραχυπρόθεσμες στατιστικές ιδιότητες αυτών υπό τη θεώρηση ομογενούς μοντέλου συστήματος. Το θεωρητικό μοντέλο ενός ασύρματου CDMA κυψελωτού συστήματος χαρακτηρίζεται ως ομογενές όταν ισχύουν οι ακόλουθες απλουστεύσεις: α) δεν λαμβάνεται υπόψη άνω φράγμα ρυθμού μετάδοσης δεδομένων για τους χρήστες, β) θεωρείται διακριτή σχέση μεταξύ του λόγου ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές και του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που επιτυγχάνεται για κάθε χρήστη (και όχι συνεχής γραμμική σχέση) και γ) δεν λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα λανθασμένης μετάδοσης δεδομένων (πακέτων δεδομένων) χρήστη, η οποία σχετίζεται άμεσα με το είδος της διαμόρφωσης (modulation) που χρησιμοποιείται. Η ανάλυση της συμπεριφοράς και της απόδοσης του συστήματος υπό τη θεώρηση ομογενούς μοντέλου, παρ' όλες τις απλοποιήσεις που το συνοδεύουν, έχει μεγάλη πρακτική και θεωρητική σημασία, για αυτό και μονοπώλησε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας το πρώτο μισό της τρέχουσας δεκαετίας. Από πρακτικής πλευράς, τα αναλυτικά αποτελέσματα που εξάγονται προσεγγίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την πραγματική συμπεριφορά του συστήματος, ενώ από θεωρητικής πλευράς, εξάγονται με αναλυτικό τρόπο χρήσιμα συμπεράσματα, τεχνικές επιλογές και σχεδιαστικές ιδιότητες ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ, αρκετές από τις οποίες υιοθετήθηκαν και αποτέλεσαν τη βάση των περεταίρω ερευνητικών μας προσπαθειών στην περίπτωση ετερογενούς μοντέλου συστήματος.

Προς αυτήν την κατεύθυνση, προτείνεται και τεκμηριώνεται ένα *αναλυτικό μοντέλο προσδιορισμού των βραχυπρόθεσμων στατιστικών ιδιοτήτων χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου* σε ομογενές μοντέλο συστήματος υπό ευκαιριακούς αλγορίθμους ΔΠΔ, καλύπτοντας το κενό που υπάρχει στη διεθνή βιβλιογραφία. Μέσω αυτού, αναδεικνύεται και τεκμηριώνεται

θεωρητικά η αναποτελεσματικότητα των μέχρι τώρα ευρέως χρησιμοποιούμενων στην διεθνή βιβλιογραφία περιορισμών διασφάλισης των ΚΠΥ υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, τα πιθανοτικά βραχυπρόθεσμα κριτήρια καθυστέρησης. Ως λογικό επακόλουθο τίθεται το ερώτημα:

Υπάρχουν καταλληλότερα κριτήρια/περιορισμοί μέσω της τήρησης των οποίων να εξασφαλίζεται η διασφάλιση και η ικανοποίηση των ΚΥΠ υπηρεσιών πραγματικού χρόνου υπό ευκαιριακούς ΔΠΔ; και αν ναι, ποια είναι αυτά;

Απαντώντας στο παραπάνω ερώτημα, προτείνονται νέα κριτήρια απόδοσης υπηρεσίας χρηστών πραγματικού χρόνου, τα πιθανοτικά βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσης, των οποίων η χρηστικότητα και η ορθότητα αποδεικνύεται αναλυτικά και επιβεβαιώνεται πειραματικά. Βασικές καινοτομίες που εισάγονται μέσω των προτεινόμενων κριτηρίων είναι:

- α) Η χρήση κυλιόμενων βραχυπρόθεσμων παραθύρων παρατήρησης εντός των οποίων προσμετράται η διασπορά των δεδομένων των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, ώστε να επιτευχθεί η αποτελεσματική απεικόνιση των βραχυπρόθεσμων απαιτήσεών τους σε πόρους συστήματος στη πολιτική ΔΠΔ.
- β) Η θεωρητική συσχέτιση των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων με αντίστοιχα επιθυμητά μακροπρόθεσμα.
- γ) Η διαφοροποίηση του τρόπου που ενεργεί ένας αλγόριθμος ΔΠΔ για τη διασφάλιση των μακροπρόθεσμων και των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ των χρηστών, με στόχο την αποτελεσματική και ταυτόχρονη εξυπηρέτηση υπηρεσιών πραγματικού χρόνου πολυμέσων καθώς και μη πραγματικού χρόνου δεδομένων.

Ακολουθώς, προτείνεται ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ η οποία υιοθετεί τα νεοεισαχθέντα κριτήρια και επιδιώκει τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος παράλληλα με την εξυπηρέτηση υπηρεσιών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου. Τέλος, δίδεται η συγκριτική μελέτη της προτεινόμενης πολιτικής με τους σημαντικότερους ευκαιριακούς αλγορίθμους ΔΠΔ, όμοιων στόχων, της διεθνούς βιβλιογραφίας και αναδεικνύεται η αποτελεσματικότητά της σε σχέση με την επίτευξη των στόχων που τέθηκαν.

Εν συνεχεία, γενικεύοντας τη μελέτη μας μέσω της διεύρυνσης του προς εξέταση μοντέλου συστήματος από ομογενές σε ετερογενές, πραγματευόμαστε το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής των πόρων ετερογενούς CDMA συστήματος στους χρήστες αυτού κατά τη ζεύξη καθόδου, όταν εξυπηρετούνται ταυτόχρονα χρήστες με υπηρεσίες δεδομένων μη πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες πολυμέσων πραγματικού χρόνου. Κύριο στόχο αποτελεί η εύρεση εκείνων των διανυσμάτων ισχύος μετάδοσης και ρυθμού μετάδοσης δεδομένων των χρηστών του συστήματος, ώστε να επιτύχουμε τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσής του ταυτόχρονα με τη διασφάλιση των ΚΠΥ των χρηστών. Συγκεκριμένα, επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της συνολικής πραγματικής ρυθμαπόδοσης των χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου και η διασφάλιση των αυστηρών

πιθανοτικών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης των χρηστών πραγματικού χρόνου. Θεωρητική πλατφόρμα για τη μοντελοποίηση και αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος αποτέλεσε η θεωρία μεγιστοποίησης απόδοσης δικτύων μέσω συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών (Network Utility Maximization, NUM Theory). Η συνάρτηση ευχαρίστησης ενός χρήστη αντικατοπτρίζει την ευχαρίστησή του σε σχέση με την απόδοση της υπηρεσίας του και την επίτευξη των ΚΠΥ αυτής, βάσει των πόρων του δικτύου που λαμβάνει. Ακολουθώντας, χρήστες με διαφορετικού τύπου υπηρεσίες (δηλαδή με διαφορετικά και πολλές φορές αντικρουόμενα ΚΥΠ) μπορούν να τεθούν υπό την αιγίδα ενός κοινού προβλήματος βελτιστοποίησης πόρων δικτύου.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, προτείνεται κατάλληλο *θεωρητικό πλαίσιο δυναμικά μεταβαλλόμενων συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών πραγματικού χρόνου* μέσω του οποίου μοντελοποιείται το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η καινοτομία του παραπάνω πλαισίου έγκειται στο γεγονός ότι επιτρέπει τη δυναμική (χρονικά) μεταβολή των συναντήσεων ευχαρίστησης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου σε σχέση με τη βραχυπρόθεσμη απόδοσή τους, με στόχο, την αποτελεσματική απεικόνιση των ΚΠΥ τους στο πρόβλημα βελτιστοποίησης του συστήματος, στον ΔΠΔ αυτού και τελικά, την επιτυχή διασφάλισή τους. Η μη-κυρτότητα του προβλήματος που ανακύπτει (non-convex optimization) μας οδηγεί στην *χρήση αναλυτικών (μη τετριμμένων) μεθόδων Lagrange και δυικού προβλήματος για την επίλυσή του*. Τέλος, προτείνεται κατάλληλος κατανεμημένος ευκαιριακός αλγόριθμος ΔΠΔ για την εύρεση της βέλτιστης λύσης του προς εξέταση προβλήματος, μελετάται η πολυπλοκότητά του και τεκμηριώνεται η αποτελεσματικότητά του διαμέσου της συγκριτικής μελέτης αυτού με υπάρχοντες αλγόριθμους της διεθνούς βιβλιογραφίας, υπό περιβάλλον προσομοίωσης.

Στο τελευταίο σκέλος της παρούσας διδακτορικής διατριβής, μελετάται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής των πόρων ετερογενούς CDMA συστήματος στους χρήστες αυτού κατά την ζεύξη ανόδου, δίδοντας έμφαση στην διασφάλιση και ικανοποίηση των ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Συγκεκριμένα, θέτουμε ως στόχο την εύρεση εκείνου του διανύσματος ισχύος μετάδοσης των χρηστών ώστε να επιτύχουμε τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσής τους ταυτόχρονα με τη διασφάλιση των ΚΠΥ τους. Βάσει της θεωρίας παιγνίων, το πρόβλημα μοντελοποιείται και αναλύεται ως ένα *μη-συνεταιριστικό παίγνιο μη κυρτών συναρτήσεων* κατά το οποίο κάθε χρήστης/παίκτης επιλέγει κατάλληλη ισχύ μετάδοσης δεδομένων από το πεδίο στρατηγικών του ώστε να επιτύχει τη μεγιστοποίηση της ολικής ευχαρίστησής του.

Συγκεκριμένα, *προτείνουμε και ορίζουμε ένα καινοτόμο γενικευμένο πλαίσιο συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών μέσω του οποίου μπορεί να μοντελοποιηθεί το πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης πόρων CDMA συστήματος ζεύξης ανόδου* κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιδιώκεται όχι μόνο η μεγιστοποίηση της συνολικής πραγματικής ρυθμαπόδοσής των χρηστών αυτού, σε σχέση με την αντίστοιχη ισχύ που καταναλώνουν για την επίτευξή της, αλλά και η ταυτόχρονη ικανοποίηση των ΚΠΥ χρηστών διαφόρων υπηρεσιών, με έμφαση στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Η επίλυση

του μη συνεταιριστικού παιγνίου ελέγχου ισχύος χρηστών κατά τη ζεύξη ανόδου γίνεται μέσω της εύρεσης του σημείου ισορροπίας κατά Nash αυτού (Nash equilibrium) ακολουθώντας την εξής μεθοδολογία:

- i) Αποδεικνύεται η ύπαρξη και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου.
- ii) Δίδεται ο αναλυτικός προσδιορισμός του σημείου ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου και προτείνεται κατανεμημένος αλγόριθμος εύρεσής του, αποδεικνύεται η σύγκλιση αυτού και μελετάται η πολυπλοκότητά του.
- iii) Μελετώνται οι ιδιότητες του σημείου ισορροπίας κατά Nash του προς εξέταση προτεινόμενου παιγνίου και προσδιορίζονται αναλυτικά κατάλληλα κριτήρια αποδοχής κλήσεων/χρηστών.

1.2 Διάρθρωση της Διατριβής

Το υπόλοιπο της παρούσας διδακτορικής διατριβής δομείται ως εξής.

Στο κεφάλαιο 2, αναλύεται το μοντέλο του συστήματος που εξετάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής τόσο σε τεχνικό επίπεδο (πρότυπα, αρχιτεκτονικές και εξελικτική πορεία αυτών την τελευταία δεκαετία) όσο και σε θεωρητικό επίπεδο (θεωρητική μοντελοποίηση εναέριας ζεύξης, σχημάτων διαμόρφωσης, πολυπλεξίας και κωδικοποίησης, αλλά και του θορύβου κυψέλης). Εν συνεχεία, θέτοντας τις βάσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη της μελέτης μας, παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιείται μια ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ μέσω ενός βασικού προβλήματος βελτιστοποίησης. Τέλος, δίδοντας έμφαση στις υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, αναλύεται η μεθοδολογία μέσω της οποίας μπορούν να ενταχθούν τα μακροπρόθεσμα ΚΠΥ τους στο παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης, παρουσιάζονται οι ευκαιριακές πολιτικές ΔΠΔ που ανακύπτουν και αναδεικνύονται οι εγγενείς περιορισμοί και οι αδυναμίες τους.

Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται και μελετώνται τα ΚΠΥ υπηρεσιών πολυμέσων πραγματικού χρόνου, αναλύονται ευκαιριακοί αλγόριθμοι ΔΠΔ που στοχεύουν στην ικανοποίηση τους, και παρουσιάζονται οι αρχικές ερευνητικές μας προσπάθειες για τη βελτίωση και εξέλιξή τους. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στα πιθανοτικά κριτήρια καθυστέρησης χρηστών, κριτήρια τα οποία μονοπωλούσαν τη διεθνή βιβλιογραφία την περίοδο έναρξης της διατριβής, ως οι καταλληλότεροι δείκτες εξασφάλισης των ΚΠΥ υπηρεσιών πραγματικού χρόνου υπό ευκαιριακούς αλγορίθμους ΔΠΔ. Μέσω της μελέτης μας, αναδεικνύεται πειραματικά η μη καταλληλότητα των παραπάνω κριτηρίων και η ανάγκη εξέλιξης ή ακόμα και αντικατάστασής τους.

Στο κεφάλαιο 4, αρχικά εισάγεται κατάλληλο αναλυτικό μοντέλο μέσω του οποίου μπορούν να προσδιοριστούν οι βραχυπρόθεσμες ιδιότητες χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου όταν εξυπηρετούνται υπό ευκαιριακούς ΔΠΔ. Εν συνεχεία, μέσω του παραπάνω μοντέλου αναλύουμε θεωρητικά την απόδοση θεμελιωδών αλγορίθμων ΔΠΔ και αποδεικνύουμε την μη

αποτελεσματικότητα των πιθανοτικών κριτηρίων καθυστέρησης χρηστών πραγματικού χρόνου. Παράλληλα, εισάγονται νέα κριτήρια υπηρεσίας χρηστών πραγματικού χρόνου, τα πιθανοτικά βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσης και αποδεικνύεται θεωρητικά και πειραματικά η καταλληλότητά τους ως προς την εξασφάλιση των ΚΠΥ των χρηστών αυτών, μέσω του προτεινόμενου αναλυτικού μοντέλου. Τέλος, προτείνεται ευκαιριακός αλγόριθμος ΔΠΔ για την επίτευξη των εισαχθέντων ΚΠΥ χρηστών πραγματικού χρόνου, αναλύονται οι σχεδιαστικές επιλογές του, και παρουσιάζεται η συγκριτική του μελέτη με υπάρχοντες αλγορίθμους της διεθνούς βιβλιογραφίας, μέσω προσομοίωσης.

Το κεφάλαιο 5, εισάγει τον αναγνώστη στο ετερογενές μοντέλο συστήματος, ένα διευρυμένο, πιο ρεαλιστικό και πιο ακριβές μοντέλο CDMA ασύρματων κυψελωτών συστημάτων σε σχέση με το ομογενές μοντέλο που εξετάστηκε στις προηγούμενες ενότητες. Συγκεκριμένα, δίδεται η θεωρητική μοντελοποίηση ενός ετερογενούς συστήματος και αναλύεται το βασικό πρόβλημα βελτιστοποίησης μέσω του οποίου μοντελοποιείται ένας ευκαιριακός ΔΠΔ. Λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος που ανακύπτει (non-convex optimization problems), η οποία θα μας συντροφεύει και στο υπόλοιπο της μελέτης μας, παρουσιάζεται συνοπτικά η βασική μεθοδολογία αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων. Στόχο μας αποτελεί η εξοικείωση του αναγνώστη με τις μαθηματικές έννοιες και τεχνικές που θα χρησιμοποιηθούν κατά κύριο λόγο στα επόμενα κεφάλαια, καθώς και στην καλλίτερη κατανόηση της μελέτης που ακολουθεί.

Το κεφάλαιο 6, πραγματεύεται το πρόβλημα της βέλτιστης ευκαιριακής κατανομής πόρων ασύρματου CDMA δικτύου κατά τη ζεύξη καθόδου υπό ετερογενές περιβάλλον συστήματος όταν εξυπηρετούνται ταυτόχρονα χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου. Συγκεκριμένα, αναπτύσσεται ένα διευρυμένο πλαίσιο δυναμικής μεταβολής συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών πραγματικού χρόνου, μοντελοποιείται και επιλύεται το ανακύπτον πρόβλημα βελτιστοποίησης, δίδονται αλγόριθμοι υπολογισμού της βέλτιστης λύσης και παρουσιάζεται μελέτη της απόδοσης του συστήματος υπό αυτούς μέσω προσομοίωσης.

Στο κεφάλαιο 7, μελετάται και πάλι το πρόβλημα της βέλτιστης ευκαιριακής κατανομής πόρων ασύρματου CDMA δικτύου υπό ετερογενές περιβάλλον συστήματος όταν εξυπηρετούνται ταυτόχρονα χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου, αλλά αυτή τη φορά κατά τη ζεύξη ανόδου. Παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήσαμε το ανακύπτον πρόβλημα βελτιστοποίησης ως ένα μη-συνεταιριστικό παίγνιο, η διαδικασία επίλυσής του μέσω της εύρεσης του σημείου ισορροπίας κατά Nash αυτού καθώς και προτεινόμενος αλγόριθμος ελέγχου ισχύος χρηστών. Τέλος, δίδονται αναλυτικά αποτελέσματα μέσω προσομοίωσης από τα οποία αναδεικνύεται η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης λύσης.

Το κεφάλαιο 8, συνοψίζει το σύνολο της διατριβής, αποκωδικοποιεί σχεδιαστικές επιλογές και συμπεριφορές συστήματος που διαπιστώθηκαν κατά τη διάρκεια της μελέτης μας και αναλύει τα

θεμελιώδη συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε μέσω της συνολικής τριβής μας με το συγκεκριμένο ερευνητικό χώρο. Παράλληλα, αναδεικνύεται μελλοντική ερευνητική θεματολογία, που αποτελεί λογική συνέχεια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, επισημαίνεται η κρισιμότητα και η επικαιρότητάς της και τέλος, γίνεται αναφορά σε τρέχουσες ερευνητικές προσπάθειες οι οποίες βασίστηκαν, υιοθέτησαν ή εξέλιξαν τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης.

Το κεφάλαιο 9, περιέχει σε μορφή παραρτημάτων τις αποδείξεις των θεωρημάτων και των λημμάτων στα οποία κατέληξε η μελέτη μας, καθώς, για λόγους καλύτερης παρουσίασης αποφύγαμε την αναλυτική περιγραφή τους στο κορμό του κειμένου.

2 Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα CDMA Κυψελωτά Δίκτυα Κινητών Τηλεπικοινωνιών

Στην αρχή του αιώνα, η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για την αποτελεσματική πρόσβαση στο Διαδίκτυο (Internet) και την επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης για την υποστήριξη υπηρεσιών δεδομένων των χρηστών ασύρματων κυψελωτών δικτύων κινητών τηλεπικοινωνιών, οδήγησαν την ακαδημαϊκή και τη βιομηχανική έρευνα στην ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου πρόσβασης στο εναέριο μέσο, εφικτού και συμβατού με τα τότε κυψελωτά δίκτυα υπηρεσιών φωνής. Τον Ιούλιο του 2000, η QUALCOMM πρότεινε το σύστημα EV-DO (Evolution-Data Optimized, υποστηρίζεται από το 3rd Generation Partnership Project 2 (3GPP2)) ως ένα νέο εναλλακτικό σύστημα πρόσβασης στο εναέριο μέσο για την εξυπηρέτηση χρηστών νομάδων (με μικρή κινητικότητα) με υπηρεσίες δεδομένων υψηλών ρυθμών μετάδοσης, το οποίο γνώρισε ευρεία αποδοχή και υιοθετήθηκε από ένα μεγάλο πλήθος παρόχων κινητής τηλεφωνίας.

Το μοντέλο EV-DO, συχνά αναφέρεται ως HDR (High Data Rate, ITU - TIA-856) [1], χρησιμοποιεί πολυπλεξία διαίρεσης κώδικα (code division multiple access (CDMA)) και πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (time division multiple access (TDMA)), απαιτεί εύρος ζώνης 1.25 MHz , και υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως 2.4 Mbps στη ζεύξη καθόδου (downlink) και έως 153 kbps στη ζεύξη ανόδου. Ακολουθώντας μια ραγδαία εξελικτική πορεία την τελευταία δεκαετία, το αρχικό πρότυπο EV-DO εξελίχθηκε στο EV-DO rev. A το 2005 [2], το οποίο παράλληλα με την επίτευξη ρυθμών μετάδοσης έως 3.1 Mbps και 1.8 Mbps στη ζεύξη καθόδου και ανόδου αντίστοιχα, υποστηρίζει κατάλληλη σηματοδότηση για την αποτελεσματική ικανοποίηση διαφόρων κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service, QoS) όχι μόνο υπηρεσιών δεδομένων μη πραγματικού χρόνου, όπως ο προκάτοχός του, αλλά και υπηρεσιών πολυμέσων πραγματικού χρόνου (VoIP). Τέλος, η έκδοση EV-DO rev. B το 2006 [3], επιτρέπει τη χρήση πολλαπλών φερόντων σημάτων (multi-carrier evolution of EV-DO rev. A), επιτυγχάνοντας μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων καθόδου 14.7 Mbps .

Παρά τις διαφοροποιήσεις του αρχικού μοντέλου από έκδοση σε έκδοση, όσον αφορά τη σηματοδότηση, το σχεδιασμό του δικτύου κορμού και τις επιμέρους λειτουργίες και διεργασίες, το HDR στηρίχθηκε και θεμελίωσε τις τρεις παρακάτω βασικές αρχές σχεδιασμού ασύρματων δικτύων υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων, οι οποίες έφεραν επανάσταση στο χώρο των τηλεπικοινωνιών και υιοθετήθηκαν όχι μόνο από το 3GPP2 αλλά και από το 3GPP (LTE, Long Term Evolution), το οποίο εξελίσσεται παράλληλα:

- Μέτρηση της στιγμιαίας ποιότητας του καναλιού (εναέριου διαύλου) μεταξύ κινητού τερματικού και σταθμού βάσης.

- Δυναμικός έλεγχος του καναλιού, και του τρόπου κατανομής των διαθέσιμων πόρων του δικτύου στους χρήστες αυτού.
- Ελαχιστοποίηση της παρεμβολής στην πολλαπλή πρόσβαση (ενδο-κυψελικών και διακυψελικών παρεμβολών), η οποία λόγω της επαναχρησιμοποίησης της ίδιας ζώνης συχνοτήτων σε όλες τις κυψέλες ενός CDMA δικτύου καθώς και των ταυτόχρονων μεταδόσεων των χρηστών αποτελεί βασική τροχοπέδη στη μεγιστοποίηση της επίδοσης του συστήματος.

Βασικό ρόλο στην επίτευξη των παραπάνω στόχων διαδραματίζει η εκάστοτε πολιτική χρονοπρογραμματισμού χρηστών και διευθέτησης πόρων συστήματος που υιοθετείται. Ο μηχανισμός δηλαδή εκείνος, που αποφασίζει το πόσοι και ποιοί χρήστες θα λάβουν πόρους συστήματος (π.χ. ισχύς μετάδοσης, ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης δεδομένων) καθώς και το αντίστοιχο ποσό αυτών, την εκάστοτε χρονική στιγμή και για κάθε κυψέλη του δικτύου. Η τεράστια σημασία του παραπάνω μηχανισμού, στον οποίο θα αναφερόμαστε εφ' εξής με το όρο αλγόριθμος/πολιτική Διαχείρισης εναέριων Πόρων Δικτύου (ΔΠΔ), οδήγησε την παγκόσμια ερευνητική κοινότητα σε μια πληθώρα δημοσιεύσεων τα τελευταία χρόνια, στις οποίες προτείνονται διάφοροι ευέλικτοι, αποδοτικοί και χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμοι ΔΠΔ που έχουν ως στόχο από την απλή μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του δικτύου έως και την ταυτόχρονη εξασφάλιση πολλαπλών και συνήθως αντικρουόμενων Κριτηρίων Ποιότητας Υπηρεσία (ΚΠΥ - QoS) χρηστών; και από απλούς ευρηστικούς αλγορίθμους έως και πιο σύνθετους που λύνουν προσεγγιστικά ή αναλυτικά συγκεκριμένα προβλήματα βελτιστοποίησης [4]-[16]. Παρ' όλες τις διαφοροποιήσεις τους, κοινό χαρακτηριστικό όλων των προτεινόμενων ΔΠΔ αποτελεί η εκμετάλλευση της πληροφορίας της ποιότητας του εναέριου περιβάλλοντος (π.χ. στιγμιαία ποιότητα καναλιού χρηστών και χωρητικότητα κυψέλης) ώστε να επιτύχουν την αποτελεσματική και δυναμική κατανομή των πόρων του συστήματος στους χρήστες αυτού. Η παραπάνω ιδιότητα οδήγησε στο χαρακτηρισμό των αλγορίθμων αυτών ως “ευκαιριακών” [17]-[18] (opportunistic schedulers), γιατί επωφελούνται της ύπαρξης συνεχώς μεταβαλλόμενων και ασυσχέτιστων καναλιών χρηστών (multiuser diversity) ώστε να μεγιστοποιήσουν τη συνολική απόδοση του συστήματος [19]-[30].

Κατά τη χρονική στιγμή έναρξης της εκπόνησης της παρούσας διδακτορικής διατριβής (κατά το τέλος 2005), οι τότε ερευνητικές προσπάθειες είχαν επικεντρωθεί στη διασφάλιση διαφόρων κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας και δικαιοσύνης για χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου δεδομένων (non-real-time data services) μέσω ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ, καλύπτοντας τις τότε ανάγκες για υποστήριξη, κυρίως υπηρεσιών δεδομένων. Η ολοένα όμως αυξανόμενη ανάγκη για υποστήριξη και υπηρεσιών πολυμέσων πραγματικού χρόνου (real-time services) από CDMA κυψελωτά δίκτυα, καθώς και η αναγνώριση των πολλαπλών πλεονεκτημάτων που απορρέουν από μια τέτοια θεώρηση, έκανε επιτακτική τη μελέτη και δημιουργία ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ οι

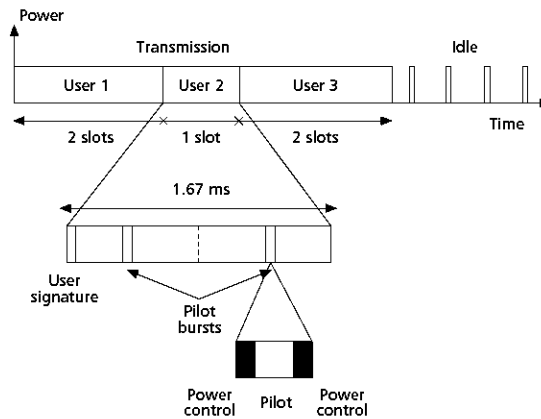
οποίοι στοχεύουν στη διασφάλιση των ΚΠΥ των υπηρεσιών αυτών, καθώς οι περιορισμένες ερευνητικές προσπάθειες εκείνης της περιόδου σε αυτή τη περιοχή, προσπαθούσαν να υιοθετήσουν κατά κύριο λόγο τεχνικές από το ενσύρματο περιβάλλον με μη ενθαρρυντικά πολλές φορές αποτελέσματα.

Καθώς η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων CDMA συστήματος και της ταυτόχρονης αποτελεσματικής διασφάλισης των ΚΠΥ ετερογενών υπηρεσιών (πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου) υπό το πρίσμα ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ, στην συνέχεια αυτού του κεφαλαίου αρχικά παρατίθεται μια αναλυτική περιγραφή και μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος που εξετάστηκε (υποενότητα 2.1). Εν συνεχεία, παρουσιάζεται αναλυτική περιγραφή των βασικών αρχών και του τρόπου λειτουργίας ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ καθώς και των αντίστοιχων προβλημάτων βελτιστοποίησης που τη μοντελοποιούν (υποενότητα 2.2). Ακολουθεί ανάλυση των ΚΠΥ υπηρεσιών δεδομένων μη πραγματικού χρόνου, καθώς και των αντίστοιχων ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ που στοχεύουν στη διασφάλισή τους (υποενότητα 2.3). Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται και μελετώνται τα ΚΠΥ υπηρεσιών πολυμέσων πραγματικού χρόνου, αναλύονται ευκαιριακοί αλγόριθμοι ΔΠΔ που στοχεύουν στην ικανοποίησή τους, και παρουσιάζονται οι αρχικές ερευνητικές μας προσπάθειες προς τη βελτίωση και εξέλιξή τους.

2.1 Μοντέλο Συστήματος

Κατά τη μελέτη μας θεωρήθηκε μοντέλο συστήματος βασισμένο στο πρότυπο HDR/EV-DO και τις αναθεωρήσεις αυτού. Το ενδιαφέρον μας επικεντρώνεται σε μια κυψέλη του συστήματος και στο τρόπο ανάθεσης των διαθέσιμων πόρων της στους χρήστες που είναι προσδεμένοι με τον σταθμό βάσης αυτής και κατά τη ζεύξη ανόδου και κατά τη ζεύξη καθόδου, οι οποίες αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο, λόγω των εγγενών διαφορών τους οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια. Θεωρούμε την ύπαρξη ενός συνόλου S, N χρηστών προσδεμένων στη κυψέλη οι οποίοι υποθέτουμε ότι έχουν πάντα δεδομένα προς μετάδοση (continuously backlogged users) στους αντίστοιχους καταχωρητές δεδομένων τους είτε στο σταθμό βάσης (για τη ζεύξη καθόδου) είτε στο κινητό τερματικό (για τη ζεύξη ανόδου). Η παραπάνω υπόθεση ισχύει κατά το μεγαλύτερο μέρος της μελέτης μας, εκτός και αν η απόρριψή της αναφέρεται ρητά εντός του κειμένου.

Τα δεδομένα των χρηστών πολυπλέκονται ξεχωριστά κατά τις δύο ζεύξης ακολουθώντας και πολυπλεξία χρόνου (TDMA) και διαίρεσης κώδικα (CDMA). Συνεπώς, ο χρόνος είναι διαιρεμένος σε χρονοσχισμές (timeslots) διάρκειας 1.67 msec και σε κάθε χρονοσχισμή, ένας ή περισσότεροι χρήστες λαμβάνουν μέρος των διαθέσιμων πόρων του συστήματος μέσω πολυπλεξίας διαίρεσης κώδικα (Σχήμα 1). Θεωρούμε ότι το εύρος ζώνης εξάπλωσης του CDMA ασύρματου δικτύου είναι ίσο με (spreading bandwidth) W . Το πόσοι και ποιοί χρήστες θα εξυπηρετηθούν την εκάστοτε χρονοσχισμή, καθώς και το μέγεθος των πόρων που τους αναλογούν (δηλαδή ισχύς μετάδοσης,



Σχήμα 1. Διάγραμμα χρονισμού μεταδόσεων σταθμού βάσης

ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης) καθορίζεται κατά βάση από το ΔΠΔ του συστήματος ο οποίος εδρεύει στο σταθμό βάσης της κυψέλης.

Κάθε χρονοσχιμή, ο σταθμός βάσης ενημερώνεται για την ποιότητα του καναλιού των χρηστών μέσω της ανταλλαγής μηνυμάτων σηματοδότησης με αυτούς, ως εξής. Κάθε χρήστης, κάθε χρονοσχιμή, μετρά την ισχύ ενός πιλοτικού σήματος (pilot signal) που εκπέμπει ο σταθμός βάσης με σταθερή προκαθορισμένη ισχύ εκπομπής. Στην συνέχεια το κινητό τερματικό υπολογίζει το σηματοθορυβικό λόγο (signal to interference and noise ration, SINR) κατά τη λήψη του πιλοτικού σήματος και μέσω αυτού το κέρδος καναλιού $G_i(t)$ και τον αναμενόμενο εφικτό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων κατά την επόμενη χρονοσχιμή t (Πίνακας 1). Η παραπάνω πληροφορία αποστέλλεται στο σταθμό βάσης μέσω ενός μηνύματος Ελέγχου Ρυθμού Μετάδοσης (Data Rate Control - DRC). Εν συνεχεία, χρησιμοποιείται από το σταθμό βάσης και τον εκάστοτε αλγόριθμο ΔΠΔ αυτού, ώστε να καθορισθεί το πλήθος των χρηστών που θα εξυπηρετηθούν, η ισχύς μετάδοσής τους $\bar{P}(t) = (P_1(t), \dots, P_N(t))$ καθώς και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων $\bar{R}(t) = (R_1(t), \dots, R_N(t))$ τους την επόμενη χρονοσχιμή t , είτε από τον σταθμό βάσης προς του χρήστες για τη ζεύξη καθόδου, είτε από τους χρήστες προς το σταθμό βάσης, όσον αφορά τη ζεύξη ανόδου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Ρυθμοί Μετάδοσης σε HDR Σύστημα [1]

Data rate (kb/s)	Packet length (bytes)	FEC rate (b/sym)	Modulation	E_b/I_o (dB)
38.4	128	$\frac{1}{4}$	QPSK	-12.5
76.8	128	$\frac{1}{4}$	QPSK	-9.5
102.6	128	$\frac{1}{4}$	QPSK	-8.5
153.6	128	$\frac{1}{4}$	QPSK	-6.5
204.8	128	$\frac{1}{4}$	QPSK	-5.7
307.2	128	$\frac{1}{4}$	QPSK	-4.0
614.4	128	$\frac{1}{4}$	QPSK	-1.0
921.6	192	$\frac{3}{8}$	QPSK	1.3
1228.8	256	$\frac{1}{2}$	QPSK	3.0
1843.2	384	$\frac{1}{2}$	8PSK	7.2
2457.6	512	$\frac{1}{2}$	16QAM	9.5

Λόγω των εγγενών ιδιομορφιών του ασύρματου περιβάλλοντος, η ποιότητα του καναλιού των χρηστών επηρεάζεται όχι μόνο από απώλειες διαδρομής αλλά και από φαινόμενα σκίασης, διαλήψεις πολλαπλών διαδρομών και βραχυπρόθεσμες διαλήψεις περιβάλλοντος οι οποίες παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στον τρόπο επιλογής και εξυπηρέτησης των χρηστών του συστήματος καθώς ο ΔΠΔ λαμβάνει αποφάσεις κάθε χρονοσχισμή. Οι παραπάνω ιδιότητες μας οδηγούν στη θεώρηση του κέρδους των καναλιών των χρηστών $G_i(t)$ για κάθε $i \in S$, ως τυχαίες στοχαστικές διαδικασίες, ανεξάρτητες μεταξύ τους. Επιπλέον, θεωρούμε ότι η τιμή του κέρδους του καναλιού κάθε χρήστη παραμένει αμετάβλητη εντός της διάρκειας κάθε χρονοσχισμής, για αυτό στους ορισμούς και τις αναλύσεις που δίδονται στη συνέχεια του κειμένου παραλείπεται ο όρος t , που υποδηλώνει τη χρονική εξάρτηση της κάθε μεταβλητής. Εξαιρέση αποτελούν συγκεκριμένες περιπτώσεις οι οποίες αναφέρονται ευκρινώς.

Κατά την εκπομπή δεδομένων μέσω του εναέριου ραδιοδιάλυου, είτε από το σταθμό βάσης προς το χρήστη, είτε το αντίστροφο, καθοριστικό ρόλο στην ομαλή λήψη αυτών παίζει ο λόγος ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές (bit energy to inference density ratio) $\gamma_i \triangleq E_b / I_o \quad \forall i \in S$ που επιτυγχάνεται. Η τιμή του δεν επηρεάζεται μόνο από την ισχύ εκπομπής και την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων του ιδίου του χρήστη (ή προς τον εκάστοτε χρήστη κατά τη ζεύξη καθόδου) αλλά και από τις συνολικές παρεμβολές κατά τη λήψη οι οποίες είτε οφείλονται σε έξω-κυψελικούς παράγοντες και θεωρούνται ως λευκός θόρυβος, είτε σε ενδοκυψελικούς παράγοντες λόγω της ταυτόχρονης μετάδοσης των χρηστών. Η μορφή του ενδοκυψελικού θορύβου και συνεπώς ο τρόπος υπολογισμού του κατά την ζεύξη ανόδου και καθόδου διαφέρουν εγγενώς και αποτελούν ένα από τους βασικούς παράγοντες διαφοροποίησης και ξεχωριστής μελέτης των δύο ζεύξεων. Κατά τη ζεύξη καθόδου ο λόγος ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές για κάθε χρήστη i δίδεται από την σχέση:

$$\gamma_i(R_i, \bar{P}) = \frac{W}{R_i} \frac{G_i P_i}{\theta G_i \sum_{j=1}^N P_j - \theta G_i P_i + I_i} = \frac{W}{R_i} \frac{P_i}{\theta \sum_{j=1}^N P_j - \theta P_i + A_i} = \frac{W}{R_i} \frac{P_i}{\theta P_{Max} - \theta P_i + A_i} \quad (1)$$

όπου I_i ο λευκός θερμικός θόρυβος στο χρήστη i , A_i η ποιότητα περιβάλλοντος εκπομπής που ορίζεται σαν I_i/G_i , θ ο παράγοντας ορθογωνικότητας $0 \leq \theta \leq 1$ και P_{Max} η μέγιστη ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης, λόγω των φυσικών περιορισμών του συστήματος. Συνεπώς για τη ζεύξη καθόδου ισχύει ο ακόλουθος περιορισμός:

$$\sum_i^N P_i \leq P_{Max} \quad (2)$$

Κατά τη ζεύξη ανόδου ο αντίστοιχος λόγος ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές για κάθε χρήστη i δίδεται από την σχέση:

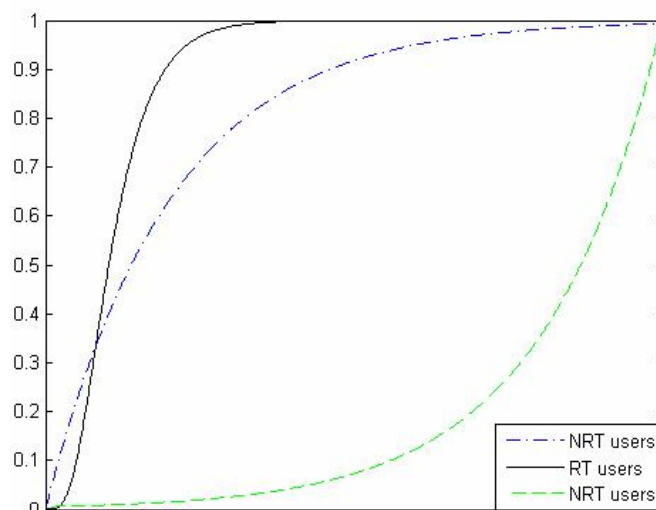
$$\gamma_i(R_i, P_i, \bar{P}_{-i}) = \frac{W}{R_i} \frac{G_i P_i}{\theta \sum_{j=1}^N G_j P_j - \theta G_i P_i + I_i} \quad (3)$$

και ο φυσικός περιορισμός ισχύος αφορά κάθε χρήστη ατομικά. Συνεπώς, ισχύει ο ακόλουθος περιορισμός:

$$P_i \leq P_i^{Max} \quad \forall i \in S \quad (4)$$

όπου P_i^{Max} η μέγιστη ισχύς μετάδοσης του χρήστη i κατά τη ζεύξη ανόδου. Βάσει του τύπου της υπηρεσίας που ζητούν οι χρήστες του συστήματος διακρίνονται σε δύο διακριτά σύνολα. Θεωρούμε το σύνολο S_{NRT} που αποτελείται από N_{NRT} χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, υψηλών ρυθμών μετάδοσης και ανεκτικών σε καθυστερήσεις, καθώς και το σύνολο S_{RT} που αποτελείται από N_{RT} χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, ευαίσθητων σε καθυστερήσεις, που επιδιώκουν σταθερούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (όπου $N_{NRT} + N_{RT} = N$). Λόγω της πληθώρας των διαφορετικών ΚΠΥ που χαρακτηρίζουν την υπηρεσία του εκάστοτε χρήστη, η ορθή και από κοινού απεικόνιση αυτών στη πολιτική ΔΠΔ του συστήματος αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα προς την αποτελεσματική διασφάλισή τους. Για το λόγο αυτό, κάθε χρήστης i σχετίζεται με μια συνάρτηση ευχαρίστησης U_i η οποία εκφράζει, με κανονικοποιημένο τρόπο, το βαθμό ικανοποίησής του με βάση την ποιότητα της υπηρεσίας που λαμβάνει.

Οι συναρτήσεις ευχαρίστησης χρηστών, που αποτελούν δάνειο από το χώρο των οικονομικών, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρύτατα τα τελευταία χρόνια στον τομέα της διαχείρισης πόρων ασυρμάτων δικτύων λόγω της δυνατότητας που παρέχουν για εύκολη και αποτελεσματική απεικόνιση στην πολιτική ΔΠΔ του συστήματος διάφορων μετρικών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών αποτελούν τα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας χρηστών, τα κριτήρια δικαιοσύνης μεταξύ αυτών, οι βραχυπρόθεσμες, οι μακροπρόθεσμες ή οι ελάχιστες απαιτήσεις της υπηρεσίας τους καθώς και, διαστρωματωμένη πληροφορία (cross layering information), φυσικοί περιορισμοί του συστήματος και διαφορετικά σχήματα κωδικοποίησης. Μέσω της χρήσης αυτών γίνεται εφικτή η μοντελοποίηση του συστήματος και των στόχων αυτού υπό κοινά προβλήματα βελτιστοποίησης (network utility maximization, NUM problems) των οποίων η λύση καθορίζει την πολιτική ΔΠΔ. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα συναρτήσεων ευχαρίστησης ευρέως χρησιμοποιούμενων στην παρούσα βιβλιογραφία, αναφέρουμε τη μοντελοποίηση μέσω αυτών της ποιότητας υπηρεσίας (κανονικοποιημένος δείκτης ικανοποίησης/ευχαρίστησης) ελαστικών (μη πραγματικού χρόνου – non real time (NRT)) και μη ελαστικών (πραγματικού χρόνου – real time (RT)) υπηρεσιών ως συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που επιτυγχάνεται [31], [32], όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Συναρτήσεις ευχαρίστησης χρηστών υπηρεσιών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.

Κατά την πορεία ανάλυσης της παρούσας διδακτορικής διατριβής, θα γίνει εκτεταμένη χρήση, μοντελοποίηση και επιλογή διαφόρων συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών αφού θα αποτελέσουν, ταυτόχρονα με τη θεωρία βελτιστοποίησης (NUM theory), την κοινή μαθηματική γλώσσα και την αντίστοιχη μαθηματική θεωρία βάσει της οποίας μοντελοποιούμε, αναλύουμε και επιλύουμε τα διάφορα προβλήματα διαχείρισης πόρων δικτύου που πραγματεύονται σε αυτή.

2.2 Ενκαιριακός Χρονοπρογραμματισμός Χρηστών – Ομογενές Σύστημα

Στις αρχές της δεκαετίας, που συνέπεσε με την απαρχή του επιστημονικού ενδιαφέροντος στο πεδίο της ευκαιριακής κατανομής πόρων ασυρμάτων CDMA κυψελωτών δικτύων, ως και τα μέσα αυτής, η υπόθεση για ομογενές σύστημα κυριαρχούσε και οδηγούσε τις αντίστοιχες ερευνητικές προσπάθειες. Η υπόθεση της ομογένειας, απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό το συνολικό πρόβλημα, χωρίς να υπονομεύει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που εξάγονται, και επιτρέπει την αναλυτική στοχαστική μελέτη αυτού μέσω της θεωρίας των στοχαστικών ανελίξεων. Επίσης, τα αναλυτικά μοντέλα που προκύπτουν καθώς και τα θεωρητικά αποτελέσματα συμβαδίζουν και επιβεβαιώνονται από τα πειραματικά. Όμως, η υπόθεση για ομογενές σύστημα αποτελεί τροχοπέδη για μια βαθύτερη ανάλυση του συστήματος, ιδίως όταν επιδιώκεται η τήρηση πολλαπλών ΚΠΥ χρηστών, η χρήση διαφορετικών τύπων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, και η μελέτη της πραγματικής χωρητικότητας του συστήματος. Κατά την παρούσα διδακτορική διατριβή μελετήθηκαν αλγόριθμοι ΔΠΔ και με την υπόθεση ομογενούς συστήματος αλλά και όταν αυτή αίρεται και το σύστημα θεωρείται ετερογενές. Ακολουθώντας τη λογική συνέχεια της ερευνητικής μας πορείας στην αρχή θα επικεντρωθούμε στη μελέτη ομογενούς συστήματος (κεφάλαια 3 και 4). Επίσης, θα επικεντρώσουμε τη μελέτη μας στη ζεύξη καθόδου, αφού με την υπόθεση ομογενούς συστήματος οι αναλύσεις των δύο ζεύξεων είναι παραπλήσιες.

Τι σημαίνει όμως πρακτικά η υπόθεση ομογενούς συστήματος και πώς αυτό μοντελοποιείται [33]-[35]; Αρχικά, η μέγιστη τιμή του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων των χρηστών αλλά και του σταθμού βάσης δεν θεωρείται φραγμένη, όπως συμβαίνει με την ισχύ εκπομπής. Αν κατά τη λύση του εκάστοτε προβλήματος προκύψουν μεγαλύτερες τιμές ρυθμού μετάδοσης από το μέγιστο επιτρεπτό, απλά επιλέγεται η μέγιστη. Εν γένει η σχέση μεταξύ λόγου ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές E_b/I_o και αντίστοιχου ρυθμού μετάδοσης που επιτυγχάνεται θεωρείται γραμμική, είτε συνεχής, είτε διακριτή (Πίνακας 1). Επίσης, η πιθανότητα σφαλμάτων μετάδοσης δεν λαμβάνεται υπόψη και συνεπώς ούτε το είδος της διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που ακολουθείται. Η τελευταία θεώρηση έχει ως αποτέλεσμα η σχέση μεταξύ των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών και του ρυθμού μετάδοσής τους να θεωρείται αυστηρά κοίλη η κυρτή (convex, concave ή linear) οδηγώντας σε αντίστοιχα προβλήματα βελτιστοποίησης (liner or convex optimization).

Πρωταρχικός και θεμελιώδης στόχος ενός ευκαιριακού αλγορίθμου ΔΠΔ όταν εξυπηρετεί χρήστες δεδομένων μη πραγματικού χρόνου είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής μακροπρόθεσμης ρυθμαπόδοσης (throughput) του συστήματος, παράλληλα με τη τήρηση των ΚΠΥ των χρηστών. Μέσω της χρήσης συναρτήσεων ευχαρίστησης, οι παραπάνω στόχοι μεταφράζονται ως μεγιστοποίηση της συνολικής μακροπρόθεσμης ευχαρίστησης στο σύστημα και το βασικό πρόβλημα βελτιστοποίησης περιγράφεται ακολούθως:

$$\begin{aligned} \max_{Q \in \Theta} & \sum_{i=1}^N E \left(U_{Q(\bar{v})} I_{Q(t)=i} \right) \\ \text{s.t.} & \sum_i P_i \leq P_{Max} \end{aligned} \quad (5)$$

όπου Q η πολιτική ΔΠΔ του συστήματος, βάσει της οποίας, από το σύνολο S των N χρηστών που είναι προσδεμένοι στην υπό εξέταση κυψέλη, επιλέγεται τη χρονοσχισμή t , εκείνος ο χρήστης i για τον οποίο ισχύει $i_Q^*(t) = i \quad \forall i \in S, \forall t, \Theta$ το σύνολο όλων των στατικών πολιτικών δρομολόγησης

και $I_{Q(k)=i} = \begin{cases} 1, & \text{όταν } Q(t) = i \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$ η συνάρτηση μοναδιαίου δείκτη.

Αποδεικνύεται [36], [37] ότι η λύση του βασικού προβλήματος ευκαιριακής ΔΠΔ (5), δίδεται μέσω της πολιτικής Q η οποία την εκάστοτε χρονοσχισμή t εξυπηρετεί εκείνο το χρήστη $i \in S$ του συστήματος με τη στιγμιαία καλλίτερη ποιότητα καναλιού $G_i(t)$, στον οποίο ο σταθμός βάσης μεταδίδει δεδομένα καθ' όλη τη διάρκεια της χρονοσχισμής και με μέγιστη ισχύ μετάδοσης (P_{Max}). Συνεπώς, ο σηματοθορυβικός λόγος ($SINR$) που επιτυγχάνεται στο δέκτη του εκάστοτε χρήστη i από την εκπομπή του πομπού στο σταθμό βάσης δίδεται από σχέση:

$$\rho_i(t) = G_i(t) \frac{P_{max}}{I_0 + Wn_0} \quad (6)$$

όπου n_o η μονόπλευρη φασματική πυκνότητα ισχύος λευκού θερμικού θορύβου (one-side power spectrum density of AWGN), I_0 ο εξωκυψελικός θόρυβος και η πολιτική $Q(t)$, η οποία θα αναφέρεται εφ' εξής ως MAX ή άπληστη (greedy), εκφράζεται ως:

$$i_Q^*(t) = i_{MAX}^*(t) = \arg \max_{i \in S} \{U_i(t)\} = \arg \max_{i \in S} \{\rho_i(t)\} \quad (7)$$

λόγω της γραμμικής σχέσης μεταξύ σηματοθορυβικού λόγου και ρυθμού μετάδοσης ενός χρήστη, από τη σχέση (1) ισχύει:

$$R_i(t) = \rho_i(t) \cdot W / \gamma_i \quad (8)$$

Η πολιτική MAX, (7), αποτελεί θεμέλιο λίθο για την περεταίρω μελέτη και το σχεδιασμό ευκαιριακών ΔΠΔ, καθώς και σημαντικό μέτρο σύγκρισης, αφού η συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος που επιτυγχάνεται μέσω αυτής είναι η μέγιστη δυνατή που μπορεί να επιτευχθεί.

Ολοκληρώνοντας την υποενότητα αυτή, επισημαίνουμε ότι το σύνολο των τυχαίων μεταβλητών $\rho_i(t)$ συνιστούν μια στατική και εργοδική στοχαστική ανέλιξη $\mathbf{P}_i(t)$ για κάθε $i \in S$. Υποθέτουμε ότι οι περιβάλλουσες του σήματος των καναλιών των χρηστών ακολουθούν *Rayleigh κατανομή* και τα ίδια τα κανάλια (τ.μ. σήματος) είναι ανεξάρτητες και ταυτόνομες τ.μ. ($\rho_i(t) \equiv \rho_i$), οι οποίες ακολουθούν εκθετική κατανομή με σταθερή μέση τιμή $E[\rho_i(t)] = \bar{\rho}_i$, συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που δίνεται από την σχέση $f_{\rho_i}(\rho_i) = e^{-\rho_i/\bar{\rho}_i} / \bar{\rho}_i$ και συνάρτηση κατανομής που συμβολίζεται ως $F_{\rho_i}(\rho_i)$.

2.3 Μακροπρόθεσμα Κριτήρια Ποιότητας Υπηρεσίας Χρηστών με Υπηρεσίες Μη Πραγματικού Χρόνου

Παρά το γεγονός ότι η πολιτική (7) επιτυγχάνει τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου, μεγιστοποιώντας τη συνολική μέση απόδοση/ρυθμαπόδοσή του, καταλήγει σε άνιση μεταχείριση των χρηστών όσον αφορά το ποσοστό των διαθέσιμων πόρων του συστήματος που ανατίθενται σε αυτούς, καθώς και σε αδυναμία τήρησης των ΚΠΥ τους. Για το λόγο αυτό, μια πληθώρα ερευνητικών προσπαθειών επικεντρώνει το ενδιαφέρον της στην αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, τις σημαντικότερες εκ' των οποίων αναφέρουμε στην συνέχεια.

Η υποενότητα αυτή μελετά τη διασφάλιση διάφορων μακροπρόθεσμων κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας ελαστικών υπηρεσιών μη πραγματικού χρόνου, ταυτόχρονα με τη μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος, μέσω ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ. Ο όρος “μακροπρόθεσμα” υποδηλώνει την απαίτηση για διασφάλιση των κριτηρίων που θα εξετάσουμε σε βάθος χρόνου. Η παραπάνω απαίτηση οδηγεί στην στοχαστική ανάλυση του συστήματος και των ασυμπτωτικών ιδιοτήτων αυτού και των χρηστών. Αιτιολογείται δε, λόγω της φύσης των υπηρεσιών

αυτών, αφού η ελαστικότητά τους ερμηνεύεται μέσω της ανοχής τους σε καθυστερήσεις λήψης ή αποστολής δεδομένων. Στην συνέχεια, για κάθε μια από τις πολιτικές που θα εξεταστούν αναφέρουμε συνοπτικά το στόχο της, τη θεωρητική μοντελοποίησή του ως προβλήματος βελτιστοποίησης, καθώς και την πολιτική ΔΠΔ που λύνει το εκάστοτε πρόβλημα.

▪ *Πολιτική Αναλογικής Δικαιοσύνης (Proportional Fairness – PF [1],[38],[39])*

Η πολιτική αναλογικής δικαιοσύνης, η οποία υιοθετήθηκε από το πρότυπο HDR, προσπαθεί να μετριάσει την αδικία ως προς τα ποσοστά διαθέσιμων πόρων συστήματος (μέσης ρυθμαπόδοσης) που εξασφαλίζει η MAX πολιτική μεταξύ των χρηστών με καλή και κακή ποιότητα καναλιού. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εξυπηρέτησης σε κάθε χρονοσχισμή όχι του χρήστη με το καλύτερο στιγμιαίο κανάλι, αλλά εκείνου με την καλύτερη συγκριτικά ποιότητα καναλιού, σε σχέση με τη μέση τιμή αυτού. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που μοντελοποιεί τον παραπάνω στόχο υποθέτει την ύπαρξη λογαριθμικών συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών ως προς τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \max_{Q \in \Theta} & \left\{ E \left[\sum_{i \in S} \log(R_i(t)) I_{i_Q(t)=i} \right] \right\} \\ \text{s.t.} & \sum_i^N P_i \leq P_{Max} \end{aligned} \quad (9)$$

Η αντίστοιχη ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ, που επιτυγχάνει το στόχο της αναλογικής δικαιοσύνης και αποτελεί τη λύση του προβλήματος (9), εκφράζεται ως:

$$i_{PF}^*(t) = \arg \max_{i \in S} \{ \rho_i(t) / \bar{\rho}_i(t) \} \quad (10)$$

όπου $\rho_i^*(t+1) = (1-\beta)\rho_i^*(t) + \beta\rho_i'(t)$, η μεταβλητή $\rho_i'(t)$ παίρνει την τιμή μηδέν όταν ο χρήστης δεν εξυπηρετείται στη χρονοσχισμή t και η μεταβλητή $\beta > 0$ είναι μια μικρή σταθερή μεταβλητή. Ο αλγόριθμος αναλογικής δικαιοσύνης PF, ανήκει και αποτελεί το βασικό εκπρόσωπο μιας γενικότερης κατηγορίας ευκαιριακών αλγορίθμων οι οποίοι κάθε χρονοσχισμή επιλέγουν εκείνο το χρήστη με την αναλογικά καλλίτερη ποιότητα καναλιού όταν αυτή συγκρίνεται με ένα κατάλληλα επιλεγμένο στατιστικό μέγεθος.

▪ *Πολιτική Αναλογικά Καλλίτερου Χρήστη (Relatively Best user – RB [40])*

Η πολιτική αναλογικά καλλίτερου χρήστη αποτελεί παραλλαγή της προηγούμενης πολιτικής PF, καθώς έχουν κοινό στόχο (9), αλλά υποθέτει την ακριβή γνώση της μέσης τιμής της ποιότητας του καναλιού των χρηστών. Υπό την RB πολιτική η επιλογή ενός χρήστη i γίνεται ως εξής:

$$i_{RB}^*(t) = \arg \max_{i \in S} \{ \rho_i(t) - \bar{\rho}_i(t) / c_i \} \quad (11)$$

όπου c_i είναι μια θετική σταθερά ελέγχου. Το πλεονέκτημα της πολιτικής αναλογικά καλλίτερου χρήστη (RB), σε σχέση με την πολιτική αναλογικής δικαιοσύνης (PF), είναι ότι η σύγκλιση του συστήματος στον επιθυμητό στόχο επιτυγχάνεται ταχύτερα, όμως η υπόθεση της γνώσης της μέσης τιμής της ποιότητας του καναλιού των χρηστών είναι πολλές φορές μη διαθέσιμη.

- *Πολιτική Μακροπρόθεσμης Χρονικής Δικαιοσύνης (Temporal Fairness Scheduling - TF [41],[42])*

Στόχο της πολιτικής μακροπρόθεσμης χρονικής δικαιοσύνης, παράλληλα με τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος, αποτελεί η διασφάλιση ενός ελάχιστου ποσοστού χρόνου πρόσβασης στο σύστημα ϕ_i , μετρούμενο σε χρονοσχισμές, για κάθε χρήστη $i \in S$. Το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης εκφράζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \max_{Q \in \Theta} E \left[\sum_{i \in S} U_i(t) I_{i_{TF}(t)=i} \right] \\ s.t. P\{Q(\vec{U})=i\} \geq \phi_i \quad \forall i \in S \\ \sum_i^N P_i \leq P_{Max}, \quad \sum_{i=1}^N \phi_i \leq 1 \quad \text{και} \quad \phi_i \geq 0 \quad \forall i \in S \end{aligned} \quad (12)$$

Η βέλτιστη λύση στο παραπάνω πρόβλημα δίδεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} i_{TF}^*(t) = \arg \max_{i \in S} \{U_i(t) + w_i^{TF}(t)\} \\ w_i^{TF}(t+1) = w_i^{TF}(t) - a(t)(1_{i_{TF}(t)=i} - \phi_i) \quad \forall i \in S(t) \end{aligned} \quad (13)$$

όπου $a(t)=1/t$. Θέτοντας $U_i(t)=R_i(t)$ τότε παράλληλα με την μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος επιτυγχάνεται και μακροπρόθεσμη δικαιοσύνη χρόνου πρόσβασης σε αυτό για όλους τους χρήστες.

- *Πολιτική Μακροπρόθεσμης Δικαιοσύνης (Utilitarian Fairness Scheduling Scheme - UF [41])*

Η συγκεκριμένη πολιτική έχει σκοπό να εξασφαλίσει πως όλοι οι χρήστες του συστήματος λαμβάνουν ένα ελάχιστο συγκεκριμένο ποσοστό g_i επί της συνολικής μακροπρόθεσμης απόδοσης αυτού. Το ανακύπτον πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίζεται ως:

$$\begin{aligned}
& \max_{Q \in \Theta} E \left[\sum_{i \in S} U_i(t) I_{i_{UF}^*(t)=i}^* \right] \\
& s.t. \quad E \left[U_i(t) I_{i_{UF}^*(t)=i}^* \right] \geq g_i E \left[\sum_{j \in S} U_j(t) I_{i_{UF}^*(t)=j}^* \right] \quad \forall i \in S \\
& \sum_i^N P_i \leq P_{Max}, \quad \sum_{i=1}^N g_i \leq 1 \quad \text{και} \quad g_i \geq 0 \quad \forall i \in S
\end{aligned} \tag{14}$$

Η ευκαιριακή πολιτική που δίδει τη λύση του εκφράζεται ως:

$$i_{UF}^*(t) = \arg \max_{i \in S(t)} \{ (k + w_i^{UF}(t)) U_i(t) \} \tag{15}$$

$$w_i^{UF}(t+1) = w_i^{UF}(t) - a(t) \cdot (w_i^{UF}(t) - \min_{j \in S(t)} (w_j^{UF}(t))) \left[\frac{E[U_i(t) I_{i_{UF}^*(t)=i}^*]}{E[\sum_{j \in S} U_j(t) I_{i_{UF}^*(t)=j}^*]} - \frac{g_i}{\sum_{j \in S} g_j} \right], \quad i \in S(t)$$

όπου $k = 1 - \sum_{i \in S} g_i w_i^{UF}(t)$, $\min(w_i^{UF}(t)) = 0$ και $w_i^{UF}(t) = 0$ αν

$E[U_i(t) I_{i_{UF}^*(t)=i}^*] \geq g_i E[\sum_{j \in S} U_j(t) I_{i_{UF}^*(t)=j}^*]$. Επιπλέον, καθώς η ποσότητα $E[\sum_{j \in S} U_j(t) I_{i_{UF}^*(t)=j}^*]$ δεν είναι

γνωστή, υπολογίζεται μέσω της αναδρομικής σχέσης $\bar{U}(t+1) = \beta \cdot \bar{U}(t) + (1-\beta) \sum_{j \in S} U_j(t) I_{i_{UF}^*(t)=j}^*$ όπου

$0 < \beta < 1$. Θέτοντας $U_i(t) = R_i(t)$, παράλληλα με τη μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος επιτυγχάνεται και μακροπρόθεσμη δικαιοσύνη ρυθμαπόδοσης μεταξύ όλων των χρηστών στο σύστημα.

▪ *Πολιτική Εγγύησης Ελάχιστης Απόδοσης (Minimum Performance Guarantee - MP [41],[43])*

Στόχος της πολιτικής εγγύησης ελάχιστης απόδοσης είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος ταυτόχρονα με την εξασφάλιση ενός ελάχιστου επιπέδου απόδοσης για κάθε χρήστη, όπως αυτό ορίζεται από το προκαθορισμένο διάνυσμα $\vec{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$. Το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης τίθεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
& \max_{Q \in \Theta} E \left[\sum_{i \in S} U_i(t) I_{i_{MP}^*(t)=i}^* \right] \\
& s.t. \quad E[U_i(t) I_{i_{MP}^*(t)=i}^*] \geq C_i \quad \forall i \in S \\
& \sum_i^N P_i \leq P_{Max}
\end{aligned} \tag{16}$$

Υπό την προϋπόθεση ότι το διάνυσμα απαιτήσεων των χρηστών είναι εφικτό (feasible), δηλαδή ότι υπάρχει τουλάχιστον μια ή και περισσότερες πολιτικές Q οι οποίες καταλήγουν στην τήρηση των ελάχιστων απαιτήσεων των χρηστών, τότε η πολιτική που οδηγεί στη λύση του προβλήματος (14) δίδεται ως:

$$i_{MP}^*(t) = \arg \max_{i \in S} (\alpha_i^* U_i) \quad (17)$$

όπου τα α_i^* είναι πραγματικές παράμετροι που ικανοποιούν τις παρακάτω συνθήκες:

α) $\min_i (\alpha_i^*) = 1$

β) Για όλα τα i , $E \left(U_i I_{\{i_{MP}^*(\vec{U})=i\}} \right) \geq C_i$

γ) Για όλα τα i , αν $E \left(U_i I_{\{i_{MP}^*(\vec{U})=i\}} \right) > C_i$, τότε $\alpha_i^* = 1$.

Το ερώτημα του πότε και υπό ποιές προϋποθέσεις το σύστημα είναι εφικτό παραμένει ανοικτό.

2.4 Συμπεράσματα και Σκιαγράφηση των Προβλημάτων που Μελετήθηκαν στην Παρούσα Διδακτορική Διατριβή

Μελετώντας τις προηγούμενες πολιτικές, μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Τα ΚΠΥ των χρηστών εκφράζονται ως περιορισμοί στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, εξαρτώμενα από τη μεταβλητή του χρόνου, με αποτέλεσμα οι στοχαστικές ιδιότητες αυτών να επηρεάζουν τη λύση του. Συνεπώς οι λύσεις που ανακύπτουν βασίζονται στη χρήση χρονικά συσχετισμένων μεταβλητών, δηλαδή τα βάρη των χρηστών στις σχέσεις (10), (13), (15) και (17), οι διορθωτικές αλλαγές των οποίων ανά χρονοσχιμή οδηγούν στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Ο παραπάνω τρόπος επίλυσης στοχαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης ονομάζεται “διαδικασία στοχαστικής προσέγγισης” (stochastic approximation procedure), της οποίας η σύγκλιση στην εκάστοτε βέλτιστη λύση διασφαλίζεται κατά κύριο λόγο μέσω του παράγοντα $a(t)=1/t$ που εξαναγκάζει τη σύγκλιση των βαρών των χρηστών. Παρά την αποδεδειγμένη αποτελεσματικότητα του παραπάνω τρόπου επίλυσης, ανακύπτει πληθώρα προβλημάτων, η αντιμετώπιση των οποίων αποτέλεσε βασικό στόχο της παρούσας διδακτορικής διατριβής και τα οποία αναφέρονται επιγραμματικά στη συνέχεια.

Α. Κάθε διαδικασία “στοχαστικής προσέγγισης” απαιτεί χρόνο, ώστε να επιτευχθεί η σύγκλιση των βαρών των χρηστών και ακολούθως οι στόχοι του εκάστοτε προβλήματος βελτιστοποίησης, κάτι, που όχι μόνο είναι ανεκτό από τους χρήστες λόγω της φύσης των υπηρεσιών τους (ελαστικές υπηρεσίες, ανεκτικές στην καθυστέρηση λήψης δεδομένων), αλλά και σύμφωνο με τον ευκαιριακό χαρακτήρα των αλγορίθμων ΔΠΔ που εξετάζουμε (προτιμάται δηλαδή, η καθυστέρηση μετάδοσης δεδομένων χρηστών με στιγμιαία κακή ποιότητα καναλιού, προς χάρη της αύξησης της συνολικής

απόδοσης (ρυθμαπόδοσης) του συστήματος). Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι ανεκτό όταν οι χρήστες ζητούν υπηρεσίες πολυμέσων πραγματικού χρόνου, εξαιρετικά ευαίσθητων στην καθυστέρηση λήψης δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή, η πολιτική ΔΠΔ πρέπει να δρα άμεσα και αποτελεσματικά όταν τα ΚΠΥ τέτοιων υπηρεσιών δεν καλύπτονται. Η μελέτη και εξασφάλιση των ΚΠΥ υπηρεσιών πραγματικού χρόνου μέσω ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ αποτέλεσε βασικό ερευνητικό μας στόχο. Ο τρόπος αντιμετώπισής του, οι θεωρητικές μας μελέτες για την αναλυτική επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης που προκύπτουν και οι αντίστοιχες πολιτικές ΔΠΔ που προτάθηκαν, αναλύονται στα κεφάλαια 3 και 4.

Β. Ανεπάρκεια των προηγούμενων τεχνικών παρουσιάζεται επίσης και κατά την άρση της υπόθεσης σταθερού συστήματος και συγκεκριμένα των υποθέσεων για σταθερό και χρονικά αμετάβλητο αριθμό χρηστών στο σύστημα (static user population), καθώς και της διαρκούς ύπαρξης δεδομένων στους καταχωρητές τους. Ο τρόπος ανάδειξης και αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος περιγράφεται στο [44].

Γ. Βάσει της προηγούμενης ανάλυσης, παρατηρούμε επίσης ότι τα περισσότερα ΚΠΥ που περιγράφηκαν εκφράζουν κυρίως διαφορετικούς τύπους δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών του συστήματος και η διαφοροποίηση μεταξύ διαφορετικών υπηρεσιών γίνεται μέσω σταθερών προαποφασισμένων βαρών που εκφράζουν την προτεραιότητα του χρήστη και συνεπώς της υπηρεσίας του σε σχέση με του υπόλοιπους. Αυτού του τύπου η διαφοροποίηση περιορίζει κατά πολύ τη δυνατότητα του ΔΠΔ για αποτελεσματική εξυπηρέτηση των χρηστών και κυρίως τη διασφάλιση των εκάστοτε διαφορετικών και πολλές φορές αντικρουόμενων ΚΠΥ αυτών, όπως αυτά μπορούν να εκφραστούν αναλυτικά μέσω κατάλληλων συναρτήσεων ευχαρίστησής (όπως αυτές του Σχήματος 2). Η χρήση όμως τέτοιων πολύπλοκων συναρτήσεων, καθιστά το μοντέλο του συστήματος μη ομογενές, το πρόβλημα βελτιστοποίησης μη-κυρτό (non-convex optimization) και τη λύση του αρκετά πιο πολύπλοκη. Με τέτοια προβλήματα θα καταπιαστούμε στα επόμενα κεφάλαια (Κεφάλαια 5, 6 και 7).

3 Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου Πολυμέσων σε Ασύρματα CDMA Κυψελωτά Δίκτυα – Η Περίπτωση Ομογενούς Μοντέλου Συστήματος.

Η αποτελεσματικότητα ενός αλγορίθμου κατανομής και διευθέτησης πόρων ενός ασύρματου δικτύου το οποίο υποστηρίζει χρήστες με ανόμοιες υπηρεσίες, πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου, κρίνεται με βάση την ικανότητά του να ικανοποιεί επιτυχώς τα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας και των δύο τύπων υπηρεσιών ταυτόχρονα [45]. Βασικός σχεδιαστικός παράγοντας που συντελεί καθοριστικά στην επίτευξη του παραπάνω στόχου, και χρίζει ιδιαίτερης προσοχής κατά το σχεδιασμό ενός ευκαιριακού αλγορίθμου ΔΠΔ, είναι ο χρόνος αντίδρασης και αυτό-παραμετροποίησης αυτού όταν τα ΚΠΥ κάποιων χρηστών δεν ικανοποιούνται ή παραβιάζονται. Όσον αφορά χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, η αξίωσή τους για ικανοποίηση των κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας τους σε μακροπρόθεσμα διαστήματα, οδηγεί το χρονοπρογραμματιστή σε ήπιες αντιδράσεις κατά την παραβίαση τους, κάτι το οποίο όπως επεξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο εναρμονίζεται πλήρως με τις βασικές αρχές λειτουργίας ενός ευκαιριακού ΔΠΔ και ευνοεί παράλληλα την εύρυθμη και αποτελεσματική λειτουργία του. Αντιθέτως, η παραβίαση των κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου απαιτεί την άμεση αντίδραση του χρονοπρογραμματιστή χρηστών λόγω της ευαίσθητης φύσης τους σε καθυστερήσεις λήψης δεδομένων.

Θεμελιώδη ΚΠΥ μιας υπηρεσίας πολυμέσων πραγματικού χρόνου αποτελούν η διασφάλιση ενός σταθερού χρονικού ανωφλιού καθυστέρησης λήψης ή μετάδοσης δεδομένων, κατά τη ζεύξη καθόδου ή τη ζεύξη ανόδου αντίστοιχα, καθώς και η διασφάλιση ενός σταθερού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Οι πρώτες ερευνητικές προσπάθειες, στο τομέα της εξυπηρέτησης υπηρεσιών πραγματικού χρόνου μέσω ευκαιριακών ΔΠΔ, επικεντρώθηκε στη διασφάλιση του πρώτου κριτηρίου και οι λύσεις που προτάθηκαν επηρεάστηκαν από τις αντίστοιχες στον τομέα των ενσύρματων δικτύων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν παραλλαγές της τεχνικής κυκλικής εξυπηρέτησης (round robin) [46], ώστε να εκμεταλλεύεται τον ευκαιριακό χαρακτήρα του συστήματος κατά το δυνατό εφικτό.

Εν συνεχεία, με στόχο την επιτυχή έκφραση, και εν τέλει ικανοποίηση, των χρονικά ευαίσθητων ΚΠΥ χρηστών πραγματικού χρόνου από ένα ευκαιριακό αλγόριθμο ΔΠΔ ασύρματου CDMA συστήματος, η εφαρμογή και τήρηση *πιθανοτικών κριτηρίων καθυστέρησης* για τους χρήστες αυτούς προτάθηκε και θεμελιώθηκε στη σύγχρονη βιβλιογραφία [47],[48]. Η βασική αρχή ενός πιθανοτικού κριτηρίου καθυστέρησης είναι η τήρηση και διασφάλιση ενός άνω φράγματος της πιθανότητας της καθυστέρησης λήψης δεδομένων ενός χρήστη υπηρεσίας πραγματικού χρόνου, μετρούμενη σε αριθμό χρονοσχισμών (timeslots), να είναι μεγαλύτερη από ένα προεπιλεγμένο κατώφλι

καθυστερήσης (επίσης εκφρασμένο σε χρονοσχισμές). Ο τυπικός μαθηματικός ορισμός ενός πιθανοτικού κριτηρίου καθυστέρησης δίδεται ακολούθως:

$$\Pr[\hat{d}_{RT,i}(t) \geq T_i] \leq q_i \quad \forall i \in S_{RT} \quad (18)$$

όπου η μεταβλητή $\hat{d}_{RT,i}(t)$ υποδηλώνει τον αριθμό των διαδοχικών χρονοσχισμών έως την χρονοσχισμή t , συμπεριλαμβανομένης της χρονοσχισμής $(t-1)$, κατά τις οποίες ο χρήστης i δεν εξυπηρετήθηκε, δηλαδή δεν έλαβε πόρους συστήματος, και η μεταβλητή q_i υποδηλώνει το άνω κατώφλι του πιθανοτικού κριτηρίου¹. Η χρήση του παραπάνω κριτηρίου ποιότητας υπηρεσίας μονοπωλούσε μέχρι πρότινος τη σύγχρονη βιβλιογραφία, αφού υιοθετείτο κατά κόρον από τους σχεδιαστές ευκαιριακών αλγορίθμων. Τα πλεονεκτήματά του είναι ότι συνδυάζει κριτήρια καθυστέρησης, κάτι αναγκαίο για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, μέσω της πιθανοτικής διασφάλισής τους, σε αντίθεση με μια πιο αυστηρή προσέγγιση (όπως οι τεχνικές κυκλικής εξυπηρέτησης), κάτι το οποίο ευνοεί την εκμετάλλευση των ραγδαία μεταβαλλόμενων καναλιών των χρηστών, βασική αρχή των ευκαιριακών αλγορίθμων.

Σε αυτό το κεφάλαιο, αρχικά θα αναλύσουμε τους σημαντικότερους ευκαιριακούς αλγόριθμους ΔΠΔ που έχουν ως στόχο τη διασφάλιση των ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου παράλληλα με τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Εν συνεχεία, θα παρουσιαστούν δύο πολιτικές που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της μελέτης μας και αποτελούν την απαρχή της προσπάθειάς μας να εξελίξουμε και να βελτιστοποιήσουμε τις προτεινόμενες εναλλακτικές της βιβλιογραφίας. Μέσω της όλης αυτής διαδικασίας διαφάνηκε η ανάγκη αλλαγής των έως τώρα υπαρχόντων ΚΠΥ υπηρεσιών πραγματικού χρόνου όταν αυτές εξυπηρετούνται από ευκαιριακούς αλγόριθμους CDMA συστημάτων. Η μαθηματική τεκμηρίωση της παραπάνω ανάγκης, ο ορισμός και η απόδειξη της καταλληλότητας των νέων ΚΠΥ που προτάθηκαν, καθώς και κατάλληλοι αλγόριθμοι που δίδουν τη λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που προκύπτει από την υιοθέτησή τους παρουσιάζεται στον κεφάλαιο 4.

3.1 Πολιτικές Διασφάλισης Βραχυπρόθεσμων Κριτηρίων Καθυστερήσης Χρηστών με Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου

Οι πολιτικές που θα εξεταστούν στη συνέχεια υποθέτουν την ύπαρξη μόνο χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου στο σύστημα για αυτό σε αυτή και μόνο αυτή την υπό-ενότητα, χωρίς να περιορίζεται η γενικότητα της μελέτης μας, υποθέτουμε ότι $S = S_{RT}$ και συνεπώς $N = N_{RT}$.

¹ Συνήθως τιμές της μεταβλητής q_i είναι ίσες ή μικρότερες του 0.05.

- Πολιτική Βραχυπρόθεσμης Δικαιοσύνης με Παράθυρο M (Sort-Term Fairness with window of size M - STFM [46])

Η πολιτική βραχυπρόθεσμης δικαιοσύνης με παράθυρο M , αποτελεί παραλλαγή του γνωστού σχήματος κυκλικής εξυπηρέτησης round robin, αφού έχει ως στόχο κάθε χρήστη να λαμβάνει πόρους δικτύου τουλάχιστον μία φορά, δηλαδή να εξυπηρετείται σε μια χρονοσχισμή, εντός διαδοχικών μη επικαλυπτόμενων χρονικών παραθύρων διάρκειας M διαδοχικών χρονοσχισμών. Για να εκμεταλλευτεί τη γνώση της στιγμιαίας ποιότητας του καναλιού των χρηστών και να αυξήσει τη συνολική απόδοση του συστήματος, η πολιτική επιλέγει κάθε φορά το χρήστη με την καλλίτερη ποιότητα καναλιού από το σύνολο εκείνο των χρηστών που δεν έχουν εξυπηρετηθεί έως τότε, εντός του χρονικού παραθύρου που ανήκει η προς εξέταση χρονοσχισμή. Το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & \max_{Q \in \Theta} \sum_{t=0, i \in S_{RT}}^{N-1} \left[U_i(t) I_{i_{STFM}(t)=i}^* \right] \\
 & s.t. \sum_{t=0}^{N-1} \left[I_{i_{STFM}(t)=i}^* \right] \geq \phi_i \quad \forall i \in S \\
 & \sum_i^N P_i \leq P_{Max}, \sum_{i=1}^N \phi_i \leq I \quad \text{και} \quad \phi_i \geq 0 \quad \forall i \in S
 \end{aligned} \tag{19}$$

υπό την προϋπόθεση ότι το γινόμενο $\phi_i M$ είναι θετικός ακέραιος αριθμός $\forall i \in S$. Ο ευρηστικός αλγόριθμος που οδηγεί στη λύση του προβλήματος (19) περιγράφεται από την ακόλουθη πολιτική:

$$\forall t = \{0, \dots, M-1\}, \quad i_{STFM}^*(t) = \arg \max_{i \in A(t)} (U_i(t) + \lambda_i) \tag{20}$$

όπου η μεταβλητή λ_i αποτελεί εκείνο το βάρος του χρήστη i που οδηγείται από τα μακροπρόθεσμα κριτήρια που επιβάλλονται, αν υπάρχουν, βάσει των μεθόδων στοχαστικής σύγκλισης που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, και $A(t)$ ορίζεται ένα υποσύνολο του συνόλου των χρηστών του συστήματος που περιέχει εκείνους τους χρήστες που δεν έχουν εξυπηρετηθεί ακόμα την χρονοσχισμή t , εντός του προς εξέταση χρονικού παραθύρου M χρονοσχισμών. Το σύνολο $A(t)$ ορίζεται ως $A(t) = A(t-1) - i_{STFM}^*(t) I_{a_i(t)=M\phi_i}$ όπου $A(0)=S$, και $a_i(t) = a_i(t-1) + I_{i_{STFM}(t)=i}^*$, $a_i(0)=0$.

Παρά τη δυνατότητα της παραπάνω πολιτικής να διασφαλίζει τα βραχυπρόθεσμα ΚΠΥ των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, καθώς και την απλότητα υλοποίησής της, η συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος που επιτυγχάνεται είναι εξαιρετικά χαμηλή λόγω του περιορισμού του ευκαιριακού χαρακτήρα της. Έχοντας ως στόχο τη μετρίαση του παραπάνω περιοριστικού φαινομένου, οι ακόλουθοι αλγόριθμοι στοχεύουν στη διασφάλιση πιθανοτικών κριτηρίων καθυστέρησης για τους χρήστες.

- *Πολιτική Προτεραιότητας Βάσει της Τροποποιημένης Μέγιστης Σταθμισμένης Καθυστέρησης (Modified Largest Weighted Delay First – M-LWDF [47])*

Η ακόλουθη πολιτική είναι και αυτή άμεσα επηρεασμένη από αντίστοιχες προσπάθειες στο χώρο των ενσύρματων δικτύων και συγκεκριμένα πολιτικές διαχείρισης των ουρών ενός δρομολογητή δικτύου. Συγκεκριμένα, η πολιτική M-LWDF επιλέγει τον επόμενο προς εξυπηρέτηση χρήστη τη κάθε χρονοσχιμή λαμβάνοντας υπόψη, παράλληλα με την κατάσταση του διαύλου του, τη συνολική καθυστέρηση μετάδοσης του πρώτου προς αποστολή πακέτου στην ουρά δεδομένων του χρήστη μέχρι την παρούσα χρονοσχιμή. Η παραπάνω πολιτική εκφράζεται ως:

$$i_{MLWDF}^*(t) = \max_{i \in S} \{ \delta_i d_i(t) \rho_i(t) \} \quad (21)$$

όπου η θετική σταθερά δ_i χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των υπηρεσιών με βάση την προτεραιότητά τους και η μεταβλητή $d_i(t)$ δηλώνει την καθυστέρηση (μετρούμενη σε ακέραιο αριθμό διαδοχικών χρονοσχιμών) του πρώτου προς μετάδοση πακέτου του χρήστη i έως τη χρονοσχιμή t . Αποδεικνύεται ότι η παραπάνω πολιτική είναι βέλτιστη, υπό την έννοια ότι διατηρεί το μέγεθος όλων των ουρών των χρηστών σταθερό, εάν το σύστημα είναι εφικτό (feasible), και ταυτόχρονα επιτυγχάνει συνολική ρυθμαπόδοσή συστήματος κοντά στη βέλτιστη (near optimal). Επιπροσθέτως η διασφάλιση των πιθανοτικών κριτηρίων καθυστέρησης των χρηστών (18),

επιτυγχάνεται όταν τεθεί $\delta_i = a_i / \bar{\rho}_i$, όπου $a_i = -\log g_i / T_i \quad \forall i \in S$.

- *Πολιτική Προτεραιότητας Βάσει του Εκθετικού Κανόνα (The Exponential Rule – EXP – [49], [50])*

Υπάρχουν δύο εκδοχές της συγκεκριμένης πολιτικής, η πολιτική εκθετικού μήκους ουράς (Exponential Queue Length Rule – EXP-Q) και η πολιτική εκθετικού χρόνου αναμονής (Exponential Waiting Time Rule – EXP-W), οι οποίες διαχωρίζονται με βάση το είδος των δεδομένων που χρησιμοποιούν για να προσμετρήσουν την διαθέσιμη χωρητικότητα των συσσωρευτών των ουρών δεδομένων των χρηστών. Συγκεκριμένα, η πολιτική EXP-Q χρησιμοποιείται για την περίπτωση που είναι γνωστό το μέγεθος της ουράς (αριθμός πακέτων ή δεδομένων) $Q_i(t)$ του εκάστοτε χρήστη i , ενώ η πολιτική EXP-W χρησιμοποιείται για την περίπτωση που είναι γνωστή η καθυστέρηση $d_i(t)$ (μετρούμενη σε ακέραιο αριθμό διαδοχικών χρονοσχιμών) του πρώτου προς μετάδοση πακέτου του χρήστη i στο συσσωρευτή δεδομένων του έως τη χρονοσχιμή t . Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται μέσω της πολιτικής EXP, περιγράφεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
& \max_{Q \in \Theta} \sum_{i \in S}^{N-1} E \left[U_i(t) I_{i_{EXP}(t)=i}^* \right] \\
& s.t. \ Pr \left[d_i(t) \geq T_i \right] \leq q_i \quad \forall i \in S \\
& \sum_i^N P_i \leq P_{Max}
\end{aligned} \tag{22}$$

Οι αντίστοιχες μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν τις προς εξέταση πολιτικές δίδονται από τις σχέσεις:

$$i_{EXP-Q}^*(t) = \arg \max_{i \in S} \left\{ \delta_i \cdot \rho_i(t) \cdot \exp \left(\frac{a_i Q_i(t)}{\beta + [\bar{Q}_i(t)]^\eta} \right) \right\} \quad (\text{EXP-Q}) \tag{23}$$

$$i_{EXP-W}^*(t) = \arg \max_{i \in S} \left\{ \delta_i \cdot \rho_i(t) \cdot \exp \left(\frac{a_i d_i(t)}{\beta + [\bar{d}_i(t)]^\eta} \right) \right\} \quad (\text{EXP-W}) \tag{24}$$

όπου δ_i , a_i , β και $n \in (0,1)$ είναι θετικές σταθερές, $\bar{Q}_i(t) = \frac{I}{N} \sum_{i=1}^N a_i Q_i(t)$ και $\bar{d}_i(t) = \frac{I}{N} \sum_{i=1}^N a_i d_i(t)$.

Αν η επιλογή των παραμέτρων δ_i και a_i γίνει με βάση τη σχέση (18), όπως και στην περίπτωση της πολιτικής M-LWDF, τότε αποδεικνύεται ότι όχι μόνο τηρούνται τα βραχυπρόθεσμα κριτήρια καθυστέρησης όλων των χρηστών, αλλά και η συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος που επιτυγχάνεται είναι η βέλτιστη, υπό την έννοια ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί από οιαδήποτε άλλη πολιτική μεγαλύτερη συνολική ρυθμαπόδοση, για τις δεδομένες συνθήκες συστήματος και τις δεδομένες τιμές του άνω φράγματος των πιθανοτικών άνω-φραγμάτων καθυστέρησης των χρηστών.

Κοινό χαρακτηριστικό των προηγούμενων πολιτικών, εκτός του στόχου της διασφάλισης των πιθανοτικών ή μη, βραχυπρόθεσμων κριτηρίων των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, αποτελεί η μη λήψη κριτηρίων δικαιοσύνης όσον αφορά τους συνολικούς πόρους του συστήματος που κατανέμονται στους χρήστες αυτού. Ως αποτέλεσμα, οι χρήστες των οποίων οι απαιτήσεις καθυστέρησης ικανοποιούνται ανταγωνίζονται για τους υπολειπόμενους πόρους του δικτύου μόνο με βάση τη στιγμιαία ποιότητα του καναλιού τους, εκφυλίζοντας τις πολιτικές σε άπληστες ευκαιριακές. Ως εκ τούτου, χρήστες με καλλίτερες συνθήκες διαύλου μονοπωλούν τους λοιπούς πόρους του συστήματος, πέραν εκείνων που καταναλώνονται για τη διασφάλιση των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων καθυστέρησης των χρηστών πραγματικού χρόνου. Όπως θα γίνει εμφανές στην συνέχεια, η διασφάλιση των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων καθυστέρησης των χρηστών δεν συνεπάγεται και την επίτευξη των αντίστοιχων μακροπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης.

3.2 Ευκαιριακή Πολιτική ΔΠΔ Ελαστικής Βραχυπρόθεσμης Δικαιοσύνης (Elastic Short-term Fairness based opportunistic Scheduling – ESFS)

Στην υποενότητα αυτή, θα εστιάσουμε το ενδιαφέρον μας στο πρόβλημα της διασφάλισης ελαστικής βραχυπρόθεσμης δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου υπό ευκαιριακές πολιτικές ΔΠΔ, [51]. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε συνοψίζεται ως εξής:

Διατύπωση Προβλήματος:

Εύρεση της βέλτιστης ευκαιριακής πολιτικής ΔΠΔ σε CDMA κυψελωτά δίκτυα η οποία μεγιστοποιεί την συνολική απόδοση του συστήματος, διασφαλίζει τα πιθανοτικά βραχυπρόθεσμα κριτήρια καθυστέρησης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, και ταυτόχρονα εξασφαλίζει πιθανοτικά βραχυπρόθεσμα κριτήρια δικαιοσύνης μεταξύ αυτών, η τήρηση των οποίων οδηγεί και στην τήρηση των αντίστοιχων μακροπρόθεσμων κριτηρίων. ■

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, εισήχθησαν δύο καινοτομίες στον τομέα των ευκαιριακών πολιτικών ΔΠΔ, οι οποίες θα μας συνοδεύσουν στο μεγαλύτερο μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Καινοτομία. Η χρήση βραχυπρόθεσμων, κυλιόμενων και επικαλυπτόμενων χρονικών παραθύρων παρατήρησης εντός των οποίων παρατηρούνται και προσμετρώνται οι πόροι που έλαβε ο εκάστοτε χρήστης υπηρεσίας πραγματικού χρόνου. Ειδικότερα, βάση της διασποράς, της ποσότητας και της καταλληλότητάς (για την επίτευξη των αναγκαίων ΚΠΥ) των δεδομένων που προσμετρήθηκαν, η πολιτική ΔΠΔ του συστήματος καθορίζει ή επηρεάζει την προτεραιότητα εξυπηρέτησής του εκάστοτε χρήστη έναντι των υπολοίπων.

Αιτιολόγηση: Η προηγούμενη επιλογή δίνει τη δυνατότητα στον ευκαιριακό ΔΠΔ του συστήματος μιας πιο πλήρους εικόνας των πόρων που έλαβε ο εκάστοτε χρήστης εντός βραχυπρόθεσμων διαστημάτων, σε σχέση με την απλουστευμένη πληροφορία της καθυστέρησης λήψης δεδομένων από την τελευταία χρονοσχισμή εξυπηρέτησης. Επιπροσθέτως, η κατάλληλη αξιολόγηση και επεξεργασία της παραπάνω πληροφορίας (κυρίως της διασποράς των πόρων του χρήστη εντός βραχυπρόθεσμων κυλιόμενων χρονικών παραθύρων) παρέχει στο ΔΠΔ τη δυνατότητα πρόβλεψης των αναγκών σε πόρους δικτύου του εκάστοτε χρήστη στο άμεσο μέλλον, αυξάνοντας την ικανότητά αντίδρασής του για την αποφυγή της μη τήρησης των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ των χρηστών, μια ικανότητα θεμελιώδους σημασίας όταν επιδιώκεται η αποτελεσματική εξυπηρέτηση υπηρεσιών πραγματικού χρόνου. ■

Καινοτομία. Ο σχεδιασμός βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας, των οποίων η τήρηση να οδηγεί στη διασφάλιση και απαιτούμενων μακροπρόθεσμων κριτηρίων.

Αιτιολόγηση: Οι αυστηρές βραχυπρόθεσμες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας χρηστών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, και η ανάγκη τήρησής τους, δεν εξαλείφουν την εξίσου σημαντική ανάγκη διασφάλισης μακροπρόθεσμων κριτηρίων, είτε προς χάρη δικαιοσύνης κατανομής πόρων, είτε λόγω της ανάγκης πρόσθετων ΚΠΥ (όπως σταθεροί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων). Για το λόγο αυτό, είναι σημαντική η επιλογή και ο σχεδιασμός κατάλληλων βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ, των οποίων η τήρηση να οδηγεί, αποδεδειγμένα, στην επίτευξη και των δύο παραπάνω στόχων. ■

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που καλούμαστε να επιλύσουμε με βάση τους παραπάνω στόχους δίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & \max_{Q \in \Theta} \sum_{i \in S}^{N-1} E \left[U_i(t) I_{I_{ESFS}(t)=i}^* \right] \\
 & s.t. \ Pr(S_i(t, W_i) < \phi_i W_i) \leq q_i \quad \forall i \in S \\
 & \sum_i^N P_i \leq P_{Max}, \quad \sum_{i=1}^N \phi_i \leq 1 \quad \text{και} \quad \phi_i \geq 0 \quad \forall i \in S
 \end{aligned} \tag{25}$$

όπου $S_i(t, W_i)$ είναι ο αριθμός των χρονοσχισμών στις οποίες εξυπηρετήθηκε ο χρήστης i κατά το χρονικό διάστημα από τη χρονοσχισμή $t - W_i + 1$ μέχρι τη χρονοσχισμή t , W_i είναι το χρονικό παράθυρο παρατήρησης στο οποίο επιβάλλονται οι βραχυπρόθεσμες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας και εξαρτάται από την εκάστοτε υπηρεσία (πραγματικού χρόνου), ϕ_i είναι το κατάλληλο βάρος που ανατίθεται στον εκάστοτε χρήστη i και παίζει ρόλο στο καθορισμό όχι μόνο των βραχυπρόθεσμων αλλά και των μακροπρόθεσμων ΚΠΥ του, και η σταθερά q_i καθορίζει το άνω όριο της αντίστοιχης πιθανότητας αστοχίας των πιθανοτικών περιορισμών βραχυπρόθεσμης δικαιοσύνης.

Ουσιαστικά, το πιθανοτικό κριτήριο του προβλήματος (25) εκφράζει την απαίτηση του χρήστη i να λαμβάνει πόρους συστήματος σε τουλάχιστον $\phi_i W_i$ χρονοσχισμές εντός κάθε χρονικού παραθύρου παρατήρησης W_i χρονοσχισμών. Η πιθανότητα αυτή αναφέρεται ως *πιθανότητα βραχυπρόθεσμης χρονικής δικαιοσύνης*. Ακολούθως, αποδεικνύεται ότι η τήρηση των πιθανοτικών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων χρονικής δικαιοσύνης χρηστών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου οδηγεί όχι μόνο στην τήρηση συγκεκριμένων πιθανοτικών κριτηρίων καθυστέρησης για κάθε ένα από αυτούς, αλλά και στη διασφάλιση της μεταξύ τους μακροπρόθεσμης χρονικής δικαιοσύνης.

Θεώρημα 1. Το άνω όριο της πιθανότητας βραχυπρόθεσμης χρονικής δικαιοσύνης ενός χρήστη i , q_i , αποτελεί επίσης το άνω όριο της πιθανότητας καθυστέρησης εξυπηρέτησής του περισσότερο από $W_i - \phi_i W_i$ διαδοχικές χρονοσχισμές. Αναλυτικά:

$$\text{Αν } \Pr[S_i(t, W_i) < \phi_i W_i] \leq q_i \quad \text{τότε} \quad \Pr[d_i > W_i - \phi_i W_i] \leq q_i \tag{26}$$

Απόδειξη: Η απόδειξη του θεωρήματος δίδεται στο Παράρτημα I. ■

Η κατάλληλη επιλογή του χρονικού παραθύρου παρατήρησης W_i του εκάστοτε χρήστη i , οδηγεί στην επίτευξη της επιθυμητής βραχυπρόθεσμης πιθανότητας καθυστέρησης.

Θεώρημα 2. Αν η πιθανότητα αστοχίας (q_i) βραχυπρόθεσμης χρονικής δικαιοσύνης κάθε χρήστη είναι μηδενική, τότε επιτυγχάνεται απόλυτη μακροπρόθεσμη δικαιοσύνη χρόνου μεταξύ όλων των χρηστών του συστήματος, για κάθε χρονικό διάστημα T (χρονοσχισμές) μεγαλύτερο από το μέγιστο παράθυρο παρατήρησης $W_{max} = \max_{i \in S} \{W_i\}$. Αναλυτικά:

$$\text{Αν } Pr[S_i(t, W_i) < \phi_i W_i] = 0, \text{ τότε } \forall i, j \left| \frac{\hat{S}_i(t, t+T)}{\phi_i} - \frac{\hat{S}_j(t, t+T)}{\phi_j} \right| = 0 \quad (27)$$

όπου $\hat{S}_i(t, t+T)$ η υπηρεσία σε χρονοθυρίδες που έλαβε ο χρήστης i κατά το διάστημα από τη χρονοθυρίδα t μέχρι τη χρονοθυρίδα $t + T$ και η συνθήκη $|\hat{S}_i(t, t+T)/\phi_i - \hat{S}_j(t, t+T)/\phi_j| = 0$ εκφράζει τη μακροπρόθεσμη δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών, όταν εφαρμόζεται για κάθε ζεύγος χρηστών i, j και για κάθε χρονοθυρίδα t , κατ' αντιστοιχία του προβλήματος (12).

Απόδειξη: Η απόδειξη του θεωρήματος δίδεται στο Παράρτημα II. ■

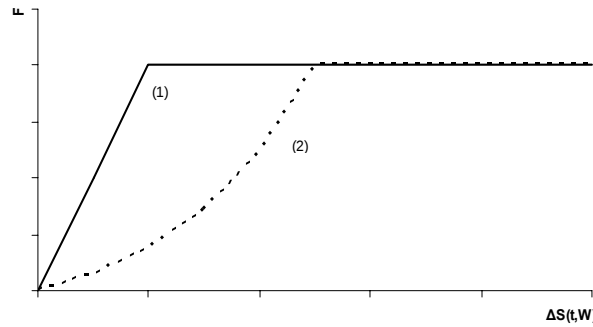
Η προτεινόμενη ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ, που αποσκοπεί στην επίλυση του προβλήματος (25), καλείται πολιτική ελαστικής βραχυπρόθεσμης δικαιοσύνης και εκφράζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\begin{aligned} i_{ESFS}^*(t) &= \arg \min_{i \in S} \hat{U}_i(t) \\ \hat{U}_i(t) &= \max \{U_i^*(t) - F_i(\Delta S_i(t, W_i)), 0\} \end{aligned} \quad (28)$$

όπου η συνάρτηση $U_i^*(t)$ για κάθε χρήστη i , προκύπτει από την απλή αναστροφή της συνάρτησης ευχαρίστησής του $U_i(t)$, έτσι ώστε όσο μεγαλύτερη είναι η “ευχαρίστησή” του από την ποιότητα της υπηρεσίας του τόσο μικρότερη είναι η τιμή της (παραδείγματος χάρη, $U_i^*(t) = U_{max}^* - \rho_i(t)$) και η μεταβλητή $\Delta S_i(t, W_i) = I - S_i(t, W_i)/W_i \phi_i$ εκφράζει την κανονικοποιημένη (ως προς $W_i \phi_i$) απόκλιση των χρονοσχισμών εξυπηρέτησης του χρήστη i κατά το διάστημα $t - W_i + 1$ έως t , σε σχέση τον αντίστοιχο αριθμό χρονοσχισμών που πρέπει να λάβει σύμφωνα με τις απαιτήσεις της υπηρεσίας του. Τέλος, η συνάρτηση $F_i(x)$ (Σχήμα 3) καθορίζεται με βάση τα ΚΠΥ κάθε χρήστη και ειδικότερα την ευαισθησία της υπηρεσίας του ως προς την καθυστέρηση λήψης δεδομένων. Η συνάρτηση $F_i(x)$ ορίζεται ως εξής:

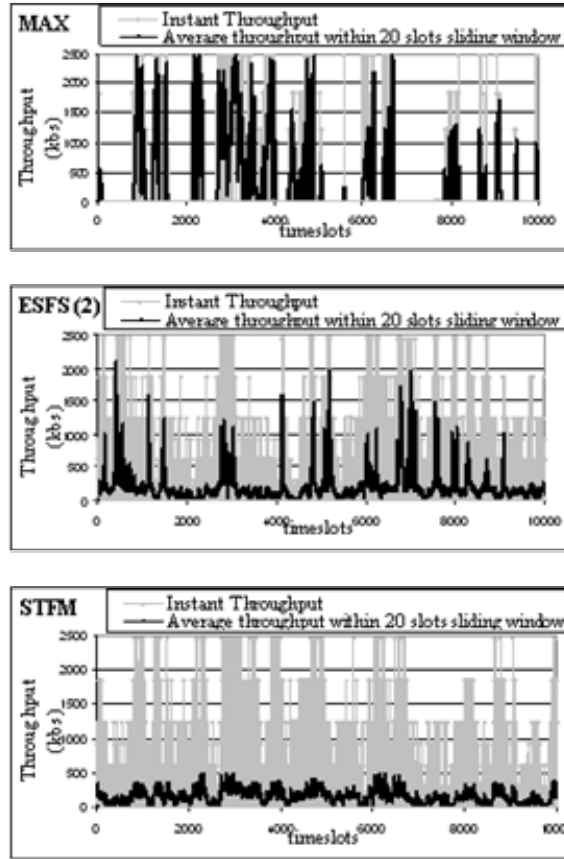
$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ \frac{U_{max}^*}{e^{TH} - 1} (e^{Tx} - 1) & 0 \leq x \leq H \\ U_{max}^* & x > H \end{cases} \quad (29)$$

όπου $0 < H < 1$, $T > 0$ και U_{max}^* η μέγιστη τιμή της συνάρτησης κόστους $U_i^*(k)$. Οι παράμετροι H , T καθορίζουν τη οξύτητα των διακυμάνσεων της $F(x)$ σε σχέση με τις διακυμάνσεις τις μεταβλητής $\Delta S_i(t, W_i)$, και τα συνέπεια ρυθμίζουν το χρόνο αντίδρασης της πολιτικής για την αποφυγή μη τήρησης των ΚΠΥ των χρηστών. Γενικά, μεγάλες τιμές αυτών των παραμέτρων ενισχύουν τον ευκαιριακό χαρακτήρα της πολιτικής ESFS, ενώ μικρότερες τιμές αυτών, οδηγούν την πολιτική ESFS σε συμπεριφορά αντίστοιχη αυτής της *βραχυπρόθεσμης δικαιοσύνης με παράθυρο M* (round robin), προκειμένου να τηρηθούν οι απαιτήσεις σε καθυστέρηση και δικαιοσύνη των χρηστών.



Σχήμα 3. Παράδειγμα μορφής συνάρτησης $F(x)$, όταν $H_1 < H_2$ και $T_1 < T_2$.

Η πολιτική δρομολόγησης (28), στοχεύει στην εκμετάλλευση της πληροφορίας εξυπηρέτησης κάθε χρήστη i εντός του χρονικού παραθύρου παρατήρησης W_i , μέσω της εισαγωγής αυτής στη νέα συνάρτηση κόστους $\hat{U}_i(t)$ και κατ' επέκταση στον ευκαιριακό ΔΠΔ. Γι' αυτό, η $\hat{U}_i(t)$ αποτελείται εκτός από τη συνάρτηση κόστους U_i^* , που εξαρτάται εν γένει από τις συνθήκες του διαύλου του χρήστη, και από τη συνάρτηση $F(x)$ που εξαρτάται από την παράμετρο $\Delta S_i(t, W_i)$, η οποία εισάγει τη δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών όσον αφορά τον αριθμό των χρονοσχισμών εξυπηρέτησης εντός του W_i . Συνεπώς, όταν ο χρήστης i δεν εξυπηρετείται, η παράμετρος $\Delta S_i(t, W_i)$ αυξάνεται, οπότε ο αντίστοιχος όρος $F_i(\Delta S_i(t, W_i))$ αναιρεί σταδιακά την επίδραση της ποιότητας του διαύλου του χρήστη, αυξάνοντας το βαθμό προτεραιότητας εξυπηρέτησής του. Στην ακραία περίπτωση κατά την οποία $U_i^*(t) = F_i(\Delta S_i(t, W_i))$, ο χρήστης i εξυπηρετείται ανεξάρτητα από τις συνθήκες του διαύλου του. Ο αναγνώστης παραπέμπεται στο [51], για της εύρεση αναλυτικής περιγραφής της πολιτικής ESFS καθώς και τη μελέτη της απόδοσης του συστήματος υπό αυτή.



Σχήμα 4. Στιγμιαία και μέση ρυθμαπόδοση χρηστών πραγματικού χρόνου υπό τις πολιτικές MAX, ESFS και STFM, καθώς το σύστημα εξελίσσεται.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα μέσω των οποίων θα αναδειχθούν σημαντικές ιδιότητες σχετικά με τον τρόπο εξυπηρέτησης υπηρεσιών πραγματικού χρόνου υπό ευκαιριακούς ΔΠΔ οι οποίοι στοχεύουν στη διασφάλιση πιθανοτικών ή μη, βραχυπρόθεσμων χρονικών ΚΠΥ. Επιπροσθέτως, μέσω της μελέτης τους θα οδηγηθούμε στην αποκάλυψη σημαντικών εγγενών προβλημάτων των παραπάνω πολιτικών με την αντιμετώπιση των οποίων θα καταπιαστούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Στο Σχήμα 4, παρουσιάζεται η στιγμιαία (ανά χρονοσχισμή) και η μέση ρυθμαπόδοση (μέση τιμή ρυθμαπόδοσης εντός χρονικών διαστημάτων 20 χρονοσχισμών) ενός χρήστη υπηρεσίας πραγματικού χρόνου καθώς το σύστημα εξελίσσεται χρονικά, υπό τις ευκαιριακές πολιτικές MAX, ESFS και STFM ($M=20$). Το σύστημα εξυπηρετεί ταυτόχρονα οκτώ χρήστες υπηρεσιών πραγματικού χρόνου των οποίων τα πιθανοτικά κριτήρια καθυστέρησης απαιτούν μέγιστη καθυστέρηση εξυπηρέτησης 20 χρονοσχισμές και αντίστοιχη πιθανότητα αστοχίας 0.001, δηλαδή $\Pr[\hat{d}_{RT,i}(t) \geq 20] \leq 0.001 \quad \forall i \in S_{RT}$. Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε τον τρόπο με τον οποίο η πολιτική MAX εκμεταλλεύεται τις περιόδους κατά τις οποίες η ποιότητα του καναλιού του χρήστη είναι πολύ καλή, καθώς τότε, όχι μόνο η στιγμιαία ρυθμαπόδοσή του είναι υψηλή αλλά και η αντίστοιχη μέση, αφού ο χρήστης μονοπωλεί τους πόρους του συστήματος σε διαδοχικές

χρονοσχισμές. Από την άλλη, υπάρχουν μεγάλα χρονικά διαστήματα εντός των οποίων δεν λαμβάνει καθόλου πόρους κάτι το οποίο οδηγεί στην πλήρη υποβάθμιση μιας υπηρεσίας πραγματικού χρόνου. Στην αντίθετη πλευρά, ο αλγόριθμος STFM, διασφαλίζει τα ΚΠΥ του χρήστη, αφού εξαναγκάζει την εξυπηρέτησή του σε 2 χρονοσχισμές ανά χρονικό παράθυρο 20 χρονοσχισμών, αλλά λόγω του παραπάνω εξαναγκασμού περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό ο ευκαιριακός χαρακτήρας της πολιτικής ΔΠΔ με αποτέλεσμα τη μειωμένη μέση ρυθμαπόδοση του χρήστη. Μέσω της πολιτικής ESFS, όχι μόνο διασφαλίζονται τα πιθανοτικά κριτήρια καθυστέρησης των χρηστών, αλλά και επιτυγχάνεται δικαιοσύνη (βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη) χρόνου πρόσβασης στο μέσο ανάμεσά τους, και η μέση ρυθμαπόδοση του εκάστοτε χρήστη είναι υψηλότερη από την πολιτική STFM.

3.3 Αναποτελεσματικότητα των Πολιτικών Διασφάλισης Πιθανοτικών Βραχυπρόθεσμων Κριτηρίων Καθυστερήσης Χρηστών με Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου

Με βάση τα αποτελέσματα του Σχήματος 4, μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει ότι και για τις δύο ευκαιριακές πολιτικές ΔΠΔ που εξετάστηκαν (ESFS και STMF), οι οποίες έχουν ως στόχο την διασφάλιση βραχυπρόθεσμων κριτηρίων καθυστέρησης για χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, η μέση βραχυπρόθεσμη ρυθμαπόδοση των χρηστών παρουσιάζει συνεχείς διακυμάνσεις, οι οποίες είναι αρκετά έντονες ανά περιόδους. Αντίστοιχες παρατηρήσεις έγιναν και για τις υπόλοιπες πολιτικές που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο (π.χ. EXP και M-LWDF), αφού η πολιτική ESFS επιτυγχάνει (εκτός των επιπρόσθετων που τέθηκαν) και τους στόχους των πολιτικών EXP και M-LWDF, που αναφέρονται στη σχέση (18). Η παραπάνω αρνητική ιδιότητα έχει ως αποτέλεσμα τις ακόλουθες συνέπειες, όταν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης του συστήματος ως περιορισμοί χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου τίθενται μόνο **βραχυπρόθεσμα χρονικά** κριτήρια καθυστέρησης:

Συνέπεια Α. Η συνολική μέση ρυθμαπόδοση του χρήστη δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες του συστήματος και συνεπώς, η διασφάλιση συγκεκριμένης απαιτούμενης μέσης ρυθμαπόδοσης (ρυθμού μετάδοσης δεδομένων) για χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου δεν είναι ελέγξιμη και πολλές φορές είναι μη εφικτή.

Συνέπεια Β. Ακόμα και αν τηρούνται πλήρως τα βραχυπρόθεσμα χρονικά κριτήρια καθυστέρησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, η ποσότητα των δεδομένων που λαμβάνει εντός σύντομων χρονικών παραθύρων δεν λαμβάνεται υπόψη, με αποτέλεσμα πολλές φορές να είναι κατά πολύ μικρότερη της απαιτούμενης. Με το όρο απαιτούμενη ποσότητα δεδομένων, καλούμε εκείνη της οποίας η μέση χρονική άθροιση, δηλαδή ο επιτευξιμος ρυθμός μετάδοσης, είναι ίσος ή μεγαλύτερος από την απαιτούμενη σταθερή ρυθμαπόδοση της εκάστοτε υπηρεσίας πραγματικού

χρόνου. Η αιτιολόγηση του παραπάνω φαινομένου, βασίζεται στο ότι ο εξαναγκασμός του χρήστη να εξυπηρετηθεί σε κάποια χρονική στιγμή προς χάρη διασφάλισης του πιθανοτικού κριτηρίου καθυστέρησης του, μπορεί να συμπέσει με την κακή στιγμιαία ποιότητα του καναλιού του εκείνη τη χρονική στιγμή. Ως αποτέλεσμα, τα δεδομένα που θα λάβει ο χρήστης να είναι ελάχιστα. Αν αυτό επαναλαμβάνεται διαρκώς εντός μεγάλων χρονικών διαστημάτων, τότε μπορεί μεν τα ΚΠΥ του ως προς την καθυστέρηση μετάδοσης ή λήψης δεδομένων να ικανοποιούνται, αλλά η στιγμιαία και ταυτόχρονα η μέση ρυθμαπόδοσή του χρήστη να παραμένει μικρή σε σχέση με την προσδοκώμενη.

Οι αρχικές ερευνητικές μας προσπάθειες προς την αντιμετώπιση των παραπάνω συνεπειών είχαν ως κατευθυντήρια αρχή την ακόλουθη θεώρηση.

“Θεωρούμε ως πόρους του συστήματος όχι τις χρονοσχισμές που κατανέμονται στους χρήστες αυτού, αλλά, την πιθανότητα εξυπηρέτησής τους την εκάστοτε χρονοσχισμή (που διασφαλίζει η εκάστοτε ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ) και κατ’ επέκταση τα δεδομένα που λαμβάνουν από την εξυπηρέτησή τους την εκάστοτε χρονοσχισμή”.

Μέσω της προηγούμενης θεώρησης επιτυγχάνονται τα ακόλουθα:

- I) Ο άμεσος συσχετισμός των πιθανοτικών κριτηρίων των χρηστών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου με τους πόρους του συστήματος και συνεπώς, η άμεση και συνεχής διασφάλισή τους.
- II) Η ταυτόχρονη μεταχείριση υπηρεσιών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου, αφού τα διάφορα και αντικρουόμενα πολλές φορές κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας τους ανάγονται σε ένα κοινά μετρούμενο πόρο συστήματος (δηλαδή, τις πιθανότητες εξυπηρέτησής τους).
- III) Ένα ισχυρό κριτήριο αποδοχής κλήσεων, βάσει της απαίτησής το άθροισμα των πιθανοτήτων εξυπηρέτησης όλων των χρηστών να είναι μικρότερο της μονάδος. Με αυτό τον τρόπο αντιμετωπίζεται το πρόβλημα διασφάλισης εφικτού συστήματος (system feasibility), κάτι που διαφαίνονταν ότι αποτελεί το βασικό αίτιο των παραπάνω συνεπειών (Α και Β). Επισημαίνουμε δε ότι για όλους τους προηγούμενους ευκαιριακούς αλγορίθμους ΔΠΔ, η ύπαρξη εφικτού συστήματος εισάγονταν ως υπόθεση και συνεπώς δεν αποδεικνύονταν, ούτε δίδονταν συγκεκριμένα κριτήρια αποδοχής κλήσεων.

Η μεθοδολογία που ακολουθήσαμε συνοψίζεται στα εξής βήματα:

- 1) Θέσαμε τα βραχυπρόθεσμα πιθανοτικά κριτήρια καθυστέρησης των χρηστών πραγματικού χρόνου και τα μακροπρόθεσμα ΚΠΥ των χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου.
- 2) Υπολογίσαμε τις απαιτούμενες πιθανότητες εξυπηρέτησής ανά χρονοσχισμή για κάθε χρήστη, τις οποίες αν οιαδήποτε ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ τηρεί, τότε εξασφαλίζει και την τήρηση των εκάστοτε ΚΠΥ των χρηστών.
- 3) Μέσω των παραπάνω πιθανοτήτων προσδιορίσαμε σταθερά βάρη χρηστών $B_i \quad \forall i \in S$.

4) Εισάγαμε τα βάρη αυτά σε μια νέα προτεινόμενη ευκαιριακή πολιτική ονόματι APAOS (Access Probability based Assignment Opportunistic Scheduling), διασφαλίζουν το επιθυμητό αποτέλεσμα (δηλαδή τα ΚΠΥ των χρηστών):

$$i_{APAOS}^*(t) = \arg \max_{i \in S} \left(\frac{\rho_i(t)}{\bar{\rho}_i} + \ln(B_i) \right) \quad (30)$$

όπου οι σταθερές B_i δίδονται μέσω της επίλυσης του παρακάτω συστήματος εξισώσεων:

$$\begin{aligned} -p_{RT,i} + \int_0^\infty \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \left(1 - \frac{B_k}{B_i} e^{-\rho_k/\bar{\rho}_i}\right) \frac{e^{-\rho_i/\bar{\rho}_i}}{\bar{\rho}_i} d\rho_i &= 0 \quad \forall i \in S_{RT} \\ -p_{NRT,j} + \int_0^\infty \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^N \left(1 - \frac{B_k}{B_j} e^{-\rho_k/\bar{\rho}_j}\right) \frac{e^{-\rho_j/\bar{\rho}_j}}{\bar{\rho}_j} d\rho_j &= 0 \quad \forall j \in S_{NRT} \end{aligned} \quad (31)$$

και $p_{RT,i} = 1 - \sqrt[T_i]{q_i} \quad \forall i \in S_{RT}$ βάσει του πιθανοτικού κριτηρίου καθυστέρησης του εκάστοτε χρήστη

υπηρεσία πραγματικού χρόνου από τη σχέση (18), $P_{RT} = \sum_{i=1, i \in S_{RT}}^{N_{RT}} p_{RT,i} = \sum_{i=1, i \in S_{RT}}^{N_{RT}} (1 - \sqrt[T_i]{q_i}) \leq 1$ για την

διασφάλιση εφικτού συστήματος, και $p_{NRT,j} = P_{NRT}/N_{NRT} \quad \forall j \in S_{NRT}$, αν στόχος της πολιτικής ΔΠΔ είναι η διασφάλιση μακροπρόθεσμης δικαιοσύνης χρόνου πρόσβασης στο μέσο (long term access time fairness) μεταξύ των χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, ή

$p_{NRT,j} = \bar{\rho}_j \cdot P_{NRT} / \sum_{j=1, j \in S_{NRT}}^{N_{NRT}} \bar{\rho}_j \quad \forall j \in S_{NRT}$ αν στόχος της πολιτικής ΔΠΔ είναι η διασφάλιση

αναλογικής δικαιοσύνης (proportional fairness) μεταξύ αυτών. Αναλυτική περιγραφή της παραπάνω διαδικασίας, του αντίστοιχου αλγορίθμου ΔΠΔ που προτάθηκε και μελέτη της επίδοσής του, παρατίθενται στο [52].

Καταλήγοντας, τα πλεονεκτήματα της πολιτικής APAOS σε σχέση με τις προηγούμενες πολιτικές που εξετάστηκαν και αποσκοπούσαν στη διασφάλιση των πιθανοτικών κριτηρίων καθυστέρησης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, είναι τα: α) η εξ' αρχής διασφάλιση των πιθανοτικών κριτηρίων των χρηστών, β) η μειωμένη πολυπλοκότητα λόγω του εφάπαξ υπολογισμού των βαρών των χρηστών αλλά κυρίως γ) η διασφάλιση εφικτού συστήματος (system's feasibility). Παρά ταύτα, οι αρχικές αρνητικές συνέπειες Α και Β στην απόδοση των υπηρεσιών των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, όταν ως μοναδική επιδίωξη θεωρείται η διασφάλιση των **πιθανοτικών χρονικών κριτηρίων καθυστέρησής** τους ή παραλλαγές αυτών, συνέχισαν να υπάρχουν.

Η εξέλιξη αυτή, μας οδήγησε στην αμφισβήτηση της αποτελεσματικότητας και της καταλληλότητας των ίδιων των πιθανοτικών κριτηρίων καθυστέρησης ως μοναδικών κριτηρίων διασφάλισης της ποιότητας της υπηρεσίας χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου υπό ευκαιριακούς αλγόριθμους ΔΠΔ. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η θεωρητική επιβεβαίωση του παραπάνω ισχυρισμού και εισάγονται νέα πιθανοτικά κριτήρια χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, που ονομάζουμε πιθανοτικά βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσης. Επιπροσθέτως, αποδεικνύεται η καταλληλότητά τους ως προς την εξασφάλιση των ΚΠΥ των χρηστών αυτών (δηλαδή, τη διασφάλιση μέγιστης καθυστέρησης μετάδοσης δεδομένων αλλά και την επίτευξη σταθερού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων εντός βραχυπρόθεσμων (και συνεπώς μακροπρόθεσμων) χρονικών διαστημάτων).

4 Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου υπό Ευκαιριακούς Αλγορίθμους ΔΠΔ

4.1 Διατύπωση Προβλήματος & Μεθοδολογία Επίλυσης

Διατύπωση Προβλήματος:

Εύρεση της βέλτιστης ευκαιριακής πολιτικής ΔΠΔ σε CDMA κυψελωτά δίκτυα η οποία μεγιστοποιεί τη συνολική απόδοση του συστήματος, και παράλληλα διασφαλίζει τα ΚΠΥ υπηρεσιών μη πραγματικού (μεγιστοποίηση του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης και εξασφάλιση μακροπρόθεσμων ΚΠΥ) και πραγματικού χρόνου (διασφάλιση ελάχιστων πιθανοτήτων κριτηρίων καθυστέρησης και ταυτόχρονα ενός σταθερού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων). ■

Επιδιώκοντας την εύρεση λύσης στο παραπάνω πρόβλημα [53], [54] στη παρούσα μελέτη επιχειρηματολογούμε υπέρ της καταλληλότητας και της ευελιξίας των πιθανοτικών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης στο να αντικατοπτρίζουν με αποτελεσματικό τρόπο τα ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (τα οποία συνοψίζονται στα εξής, μέγιστη καθυστέρηση μετάδοσης δεδομένων και σταθερός συνεχής ρυθμός μετάδοσης αυτών) σε ευκαιριακούς αλγορίθμους ΔΠΔ. Με στόχο τη θεωρητική τεκμηρίωση του παραπάνω επιχειρήματος, αρχικά παρουσιάζεται ένα νέο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού των βραχυπρόθεσμων ιδιοτήτων καθυστέρησης λήψης δεδομένων και των βραχυπρόθεσμων ιδιοτήτων ρυθμαπόδοσης χρηστών, των οποίων οι πόροι καθορίζονται από ευκαιριακούς αλγορίθμους ΔΠΔ. Εν συνεχεία, με βάση το μαθηματικό αυτό υπόβαθρο, προσδιορίζονται αναλυτικές εκφράσεις για τον υπολογισμό των παραπάνω βραχυπρόθεσμων στατιστικών ιδιοτήτων των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, υπό το πρίσμα τριών εκ των σημαντικότερων ευκαιριακών αλγορίθμων που έχουν προταθεί στην διεθνή βιβλιογραφία. Η παραπάνω μελέτη καταλήγει στην θεωρητική πιστοποίηση της καταλληλότητας των κριτηρίων βραχυπρόθεσμης ρυθμαπόδοσης, και στην ανάδειξή τους ως γνήσιους εκφραστές των ΚΠΥ των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, υπό ευκαιριακούς αλγορίθμους ΔΠΔ, σε αντιδιαστολή με τα μέχρι τώρα καθολικώς χρησιμοποιούμενα κριτήρια πιθανοτικής βραχυπρόθεσμης καθυστέρησης.

Εν συνεχεία, με κίνητρο τα παραπάνω ευρήματα, εξετάζεται το πρόβλημα του ταυτόχρονου χρονοπρογραμματισμού χρηστών με ανομοιογενείς υπηρεσίες δηλαδή, πραγματικού χρόνου και μη πραγματικού χρόνου, υπό το πρίσμα ενός ευκαιριακού αλγορίθμου ΔΠΔ σε CDMA ασύρματα κυψελωτά δίκτυα. Για την πραγμάτωση του παραπάνω σύνθετου στόχου γίνεται χρήση ενός ήδη

ευρέως αναγνωρισμένου, προσφάτως εξελεγμένου μαθηματικού πλαισίου, αυτού των συναρτήσεων ευχάριστης χρηστών, το οποίο διευρύνεται και εξελίσσεται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στην διασφάλιση της τήρησης των κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, για τους οποίους υιοθετούνται τα νεοεισαχθέντα πιθανοτικά κριτήρια βραχυπρόθεσμης ρυθμαπόδοσης. Για το σκοπό αυτό, ένας νέος μηχανισμός πραγματικού χρόνου (on-line) προτείνεται και αναλύεται, ο οποίος στοχεύει στη δυναμική προσαρμογή των προτεραιοτήτων πρόσβασης στους πόρους του συστήματος των χρηστών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, με στόχο την ικανοποίηση των απώτερων κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας αυτών. Αποτέλεσμα της όλης προσπάθειας αποτελεί η πρόταση ενός νέου ευκαιριακού αλγορίθμου ΔΠΔ μέσω του οποίου επιτυγχάνονται οι παραπάνω στόχοι και ο οποίος καλείται ευκαιριακός αλγόριθμος ικανοποίησης βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης υπηρεσιών μη πραγματικού χρόνου, USTF (Utility based Short-term Throughput driven Framework).

4.2 Αναλυτικό Μοντέλο Υπολογισμού Βραχυπρόθεσμων Στατιστικών Ιδιοτήτων Χρηστών Υπηρεσιών Πραγματικού Χρόνου & Βραχυπρόθεσμα Κριτήρια Ρυθμαπόδοσης

Βασική αρχή ενός πιθανοτικού κριτηρίου καθυστέρησης είναι η τήρηση και διασφάλιση ενός άνω φράγματος της πιθανότητας η καθυστέρηση λήψης δεδομένων ενός χρήστη υπηρεσίας πραγματικού χρόνου, μετρούμενης σε αριθμό χρονοσχισμών (timeslots), να είναι μεγαλύτερη από ένα προεπιλεγμένο κατώφλι καθυστέρησης (επίσης εκφρασμένο σε χρονοσχισμές), όπως επεξηγήθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο τυπικός μαθηματικός ορισμός ενός πιθανοτικού κριτηρίου καθυστέρησης επαναλαμβάνεται για λόγους πληρότητας ακολούθως:

$$\Pr\left[\hat{d}_{RT,i}(t) \geq T_i\right] \leq q_i \quad \forall i \in S_{RT} \quad (32)$$

Πρώτο σημείο ανάλυσης και βασική διαφοροποίηση της παρούσας μελέτης σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες στο συγκεκριμένο πεδίο, αποτελεί ο ισχυρισμός ότι τα πιθανοτικά κριτήρια καθυστέρησης δεν μπορούν από μόνα τους να εκφράσουν πλήρως και ορθώς τα βασικά ΚΠΥ (QoS prerequisites) χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι δεν λαμβάνουν καθόλου υπόψη την απαίτηση για σταθερό, προκαθορισμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων των υπηρεσιών αυτών (για παράδειγμα, τα ΚΠΥ υπηρεσιών φωνής είναι α) η απαίτηση για μονόδρομη καθυστέρηση μικρότερη από 100-150 msec και ταυτόχρονα β) η συνεχής μετάδοση δεδομένων με σταθερό ρυθμό 64 Kbps). Επιπλέον, ακόμα και αν τα πιθανοτικά κριτήρια καθυστέρησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου ικανοποιούνται πλήρως, ο απαιτούμενος σταθερός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων πολύ συχνά δεν μπορεί να επιτευχθεί, κυρίως εντός βραχυπρόθεσμων χρονικών διαστημάτων κατά τη διάρκεια της εξυπηρέτησής του, λόγω των αναπόφευκτων και συνεχώς ραγδαίων πτώσεων της ποιότητας του καναλιού του εντός αυτών των

χρονικών διαστημάτων. Συνεπώς, η υποβάθμιση της ποιότητας της υπηρεσίας ενός χρήστη είναι δεδομένη και πολλές φορές μπορεί να οδηγήσει στον ακούσιο τερματισμό της, όπως θα αποδειχθεί στη συνέχεια της παρούσας μελέτης.

Βασιζόμενοι στις παραπάνω παρατηρήσεις, προτείνονται εναλλακτικά κριτήρια διασφάλισης της ποιότητας υπηρεσίας ενός χρήστη με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, τα οποία καλούμε *βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσης*. Ως βραχυπρόθεσμο κριτήριο ρυθμαπόδοσης ορίζουμε την πιθανότητα ένας χρήστης με υπηρεσία πραγματικού χρόνου να λάβει ποσό δεδομένων, μετρούμενο σε μονάδες δεδομένων (π.χ. *bit*, *kbit*), εντός προκαθορισμένου αριθμού διαδοχικών χρονοσχισμών, που καλούμε παραθύρο παρατήρησης, μικρότερο από ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Το νεοεισαχθέν κριτήριο ορίζεται ως εξής:

$$\Pr[\hat{\beta}_{RT,i}(t) \leq B_{RT,i}]_{L_i} \quad \forall i \in S_{RT} \quad (33)$$

όπου η μεταβλητή L_i υποδηλώνει το μέγεθος του παραθύρου παρατήρησης του χρήστη i , η μεταβλητή $B_{RT,i}$ υποδηλώνει το προκαθορισμένο κατώφλι δεδομένων και $\hat{\beta}_{RT,i}(t)$ το ποσό των δεδομένων που έλαβε ο χρήστης i εντός του παραθύρου παρατήρησης, από την χρονοσχισμή $(t - L_i + 1)$ έως την χρονοσχισμή t . Όσο μικρότερη είναι η τιμή της πιθανότητας βραχυπρόθεσμης ρυθμαπόδοσης (33) που επιτυγχάνεται για ένα χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός ευχαρίστησής του από την ποιότητα αυτής. Δεδομένου του επιθυμητού ρυθμού ρυθμαπόδοσης ενός χρήστη i , $R_{RT,i}$, το προκαθορισμένο κατώφλι δεδομένων του μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$B_{RT,i} = R_{RT,i} \cdot L_i \cdot t_s \quad (34)$$

όπου η μεταβλητή t_s υποδηλώνει χρονική διάρκεια μιας χρονοσχισμής του συστήματος. Ικανοποιώντας τα πιθανοτικά βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου ικανοποιούνται ταυτόχρονα και οι περιορισμοί καθυστέρησης της υπηρεσίας αλλά και ο απαιτούμενος σταθερός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων.

Στην συνέχεια αναπτύσσεται ένα αναλυτικό θεωρητικό μοντέλο μέσω του οποίου μπορούμε να υπολογίσουμε τις βραχυπρόθεσμες στατιστικές ιδιότητες καθυστέρησης και ρυθμαπόδοσης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, όταν αυτός εξυπηρετείται από κυψέλη η οποία ακολουθεί μια γενικευμένη ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ συστήματος Q , βάσει της οποίας, από το σύνολο S των N χρηστών που είναι προσδεμένοι στην υπό εξέταση κυψέλη επιλέγεται την χρονοσχισμή t εκείνος ο χρήστης i για τον οποίο ισχύει $i_Q^*(t) = i \quad \forall i \in S, \forall t$. Ορίζουμε ως $\Pr[i_Q^*(t) = i]$ την πιθανότητα ένας χρήστης $i \in S$ να επιλεγεί από την πολιτική Q μια οιαδήποτε τυχαία χρονική στιγμή. Θεωρώντας ότι τα κανάλια των χρηστών είναι ανεξάρτητες τυχαίες στοχαστικές μεταβλητές και υποθέτοντας ότι ο σταθμός βάσης και κατ' επέκταση ο αλγόριθμος ΔΠΔ χρηστών, ο οποίος εφαρμόζει την πολιτική Q ,

έχει πλήρη γνώση της στιγμιαίας τιμής του καναλιού του κάθε χρήστη, πριν πάρει την απόφαση για το ποιος θα εξυπηρετηθεί την χρονοσχιμή t , η πιθανότητα εξυπηρέτησης ενός χρήστη i την χρονοσχιμή t , ισούται με την πιθανότητα εξυπηρέτησής του οιαδήποτε τυχαία χρονική στιγμή. Επιπλέον, αν η πιθανότητα εξυπηρέτησης ενός χρήστη οιαδήποτε χρονική στιγμή, για ένα δεδομένο τυχαίο σενάριο χρηστών, είναι σταθερή και χρονικά ανεξάρτητη, όπως θα αποδειχθεί στην συνέχεια της μελέτη μας για τους βασικούς τύπους ομοιογενών πολιτικών χρονοπρογραμματισμού χρηστών που εξετάζονται (υποενότητα 4.3), η τυχαία μεταβλητή που εκφράζει την καθυστέρηση εξυπηρέτησης ενός χρήστη i του συστήματος ακολουθεί γεωμετρική κατανομή και συνεπώς ισχύει ότι:

$$\Pr[d_i \geq T_i] = \left[1 - \Pr[i_Q^*(t) = i]\right]^{T_i} \quad \forall i \in S_{RT} \quad (35)$$

όπου με d_i συμβολίζεται η τυχαία μεταβλητή (τ.μ.) καθυστέρησης εξυπηρέτησης του χρήστη i , η οποία εκφράζει τον αριθμό των διαδοχικών χρονοσχιμών κατά τις οποίες ο χρήστης δεν έχει πρόσβαση στους πόρους του συστήματος.

Επιπροσθέτως, εάν θεωρήσουμε ότι η τ.μ. β_i ορίζει το γεγονός κατά το οποίο ο χρήστης $i \in S_{RT}$ λαμβάνει μια συγκεκριμένη ποσότητα δεδομένων εντός χρονικού παραθύρου παρατήρησης L_i διαδοχικών χρονοσχιμών, και υπό την υπόθεση ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ενός χρήστη παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια της εκάστοτε χρονοσχιμής και ίσος με τη μέση ρυθμαπόδοσή του υπό την πολιτική Q , η οποία συμβολίζεται ως $\bar{R}_{Q,i}$, μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι η πιθανότητα να μην τηρηθούν τα βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσής τους μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\Pr[\beta_i < B_i(k, \bar{R}_{Q,i})]_{L_i} = \sum_{k'=0}^{k-1} \binom{L_i}{k'} (\Pr[i_Q^*(t) = i])^{k'} (1 - \Pr[i_Q^*(t) = i])^{L_i - k'} \quad (36)$$

όπου $k = 0, 1, \dots, L_i$ και $B_i(k, \bar{R}_{Q,i}) = k \cdot \bar{R}_{Q,i} \cdot t_s$. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημάνουμε, ότι λόγω της παραπάνω υπόθεσης, τα αναλυτικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τη σχέση (36) είναι πιθανό να υπερεκτιμούν την επίδοση της εκάστοτε υπό εξέταση πολιτικής Q , σε σχέση με τα πραγματικά πιθανοτικά βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσης που αυτή μπορεί να εξασφαλίσει σε ένα χρήστη i .

4.3 Βραχυπρόθεσμες Ιδιότητες Καθυστέρησης και Ρυθμαπόδοσης Χρηστών με Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου υπό Θεμελιώδεις Ευκαιριακούς Αλγορίθμους ΔΠΑ - Θεωρητική Επιβεβαίωση Προβλήματος και Τεκμηρίωση Προτεινόμενης Λύσης

Σε αυτή την ενότητα, βασισμένοι στο παραπάνω θεωρητικό μοντέλο, προσδιορίζουμε και αποδεικνύουμε αναλυτικές μαθηματικές εκφράσεις υπολογισμού των βραχυπρόθεσμων πιθανοτικών

ιδιοτήτων των χρηστών ενός ασύρματου CDMA δικτύου, υπό το πρίσμα τριών θεμελιωδών ευκαιριακών πολιτικών ΔΠΔ, [53]. Η πρώτη προς εξέταση πολιτική είναι ο *Απληστος αλγόριθμος* ή MAX (υποενότητα 2.2), ο θεμελιώδης εκείνος ευκαιριακός αλγόριθμος, που στοχεύει στη μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος, επιλέγοντας για εξυπηρέτηση και ανάθεση του συνόλου των πόρων του συστήματος κάθε χρονοσχιμή, το χρήστη με τη καλλίτερη ποιότητα καναλιού. Η δεύτερη προς εξέταση πολιτική είναι ο αλγόριθμος *Αναλογικής Δικαιοσύνης* ή PF (υποενότητα 2.3) (Proportional Fairness), ένας από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους αλγορίθμους και πρότυπο για το σύστημα HDR, ο οποίος επιτυγχάνει αναλογική μακροπρόθεσμη δικαιοσύνη ρυθμαπόδοσης μεταξύ των χρηστών του δικτύου, υπό την έννοια του ότι μακροπρόθεσμα ο κάθε χρήστης λαμβάνει πόρους συστήματος (μέση ρυθμαπόδοση) αναλογικά με την ποιότητα του καναλιού του. Επιπροσθέτως, αν θεωρήσουμε τα κανάλια των χρηστών ως ανεξάρτητες και ταυτόσημες τυχαίες μεταβλητές (independent and identical random variables (i.i.d. r.v.)) τότε, μέσω του αλγορίθμου PF, επιτυγχάνεται μακροπρόθεσμη ισοκατανομή του χρόνου πρόσβασης στο σύστημα για όλους τους χρήστες. Η τελευταία πολιτική που εξετάζεται είναι ο αλγόριθμος *Αναλογικά Καλύτερου Χρήστη* ή RB (Relatively Best) (υποενότητα 2.3), ο οποίος σε κάθε χρονοσχιμή επιλέγει προς εξυπηρέτηση εκείνο το χρήστη, με την αναλογικά καλλίτερη ποιότητα καναλιού σε σχέση με την μέση τιμή αυτού. Με αυτό τον τρόπο, ο RB αλγόριθμος επιτυγχάνει να ισορροπεί ανάμεσα σε δύο αντικρουόμενους στόχους, να παρέχει μακροπρόθεσμη δικαιοσύνη χρόνου πρόσβασης στους πόρους του συστήματος σε όλους τους χρήστες και ταυτόχρονα τη μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος.

4.3.1 Πολιτική άπληστου ευκαιριακού αλγορίθμου (MAX)

Η πολιτική διευθέτησης πόρων δικτύου και χρονοδρομολόγησης χρηστών που οδηγεί στη μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του δικτύου, βάσει της σχέσης (7) εκφράζεται ως $i_{MAX}^*(t) = \arg \max_{i \in S} \{\rho_i(t)\}$, όπου σε περίπτωση ισότητας μεταξύ δύο χρηστών η επιλογή γίνεται με τυχαίο τρόπο. Ο υπολογισμός της τιμής της πιθανότητας εξυπηρέτησης ενός χρήστη i οποιαδήποτε τυχαία χρονική στιγμή (όπως, στην αρχή κάποιας χρονοσχιμής t) υπό την πολιτική MAX, η οποία ισούται με το ποσοστό του χρόνου που θα λάβει αυτός ο χρήστης πρόσβαση στους πόρους του συστήματος μακροπρόθεσμα, μπορεί να γίνει μέσω της σχέσης:

$$\Pr[i_{MAX}^*(t) = i] = \int_0^\infty \prod_{j=1, j \neq i}^N (1 - e^{-\rho_j/\bar{\rho}_j}) \frac{e^{-\rho_i/\bar{\rho}_i}}{\bar{\rho}_i} d\rho_i \quad (37)$$

Επίσης, η μέση ρυθμαπόδοση ενός χρήστη μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\bar{R}_{MAX,i} = \frac{W}{\gamma_i} \int_0^\infty \rho_i \prod_{j=1, j \neq i}^N (1 - e^{-\rho_j/\bar{\rho}_j}) \frac{e^{-\rho_i/\bar{\rho}_i}}{\bar{\rho}_i} d\rho_i \quad (38)$$

Εν συνεχεία θεωρούμε την ύπαρξη δύο διαφορετικών τύπων χρηστών στο σύστημα που μελετάμε με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, οι οποίοι διαχωρίζονται και διαφέρουν ως προς την ποιότητα του καναλιού τους και συγκεκριμένα ως προς την μέση τιμή του καναλιού τους. Υποθέτουμε την ύπαρξη N_g χρηστών με καλές συνθήκες καναλιού και μέσο $SINR$ $\bar{\rho}_g$ (εν συνεχεία αναφερόμαστε σε αυτούς τους χρήστες με το όρο «χρήστες καλού καναλιού») και την ύπαρξη $N_b=N-N_g$ χρηστών με κακές συνθήκες καναλιού και μέσο $SINR$ $\bar{\rho}_b$ (εν συνεχεία αναφερόμαστε σε αυτούς τους χρήστες με το όρο «χρήστες κακού καναλιού»). Επίσης, ως S_g και S_b υποδηλώνουμε το σύνολο των χρηστών καλού και κακού καναλιού αντίστοιχα. Θεωρούμε επίσης ότι $\bar{\rho}_g = a \cdot \bar{\rho}_b$, όπου $a \geq 1$. Η πιθανότητα ένας χρήστης καλού καναλιού να επιλεγεί από την πολιτική MAX ώστε να λάβει πόρους συστήματος οποιαδήποτε χρονική στιγμή μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης (37) και ύστερα από χρήση του διωνυμικού θεωρήματος (binomial theorem) και του νόμου κατανεμημένων προϊόντων (distributed law of products), ως εξής:

$$\Pr[i_{MAX}^*(t) = i]_{i \in S_g} = \sum_{k=0}^{N_g-1} \sum_{t=0}^{N-N_g} \binom{N_g-1}{k} \binom{N-N_g}{t} \frac{(-1)^{k+t}}{k+at+1} \quad (39)$$

Επίσης, μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε, με χρήση της σχέσης (38), ότι η μέση ρυθμαπόδοση ενός χρήστη καλού καναλιού δίδεται από την σχέση:

$$\bar{R}_{MAX, i \in S_g} = \sum_{k=0}^{N_g-1} \sum_{t=0}^{N-N_g} \binom{N_g-1}{k} \binom{N-N_g}{t} \frac{(-1)^{k+t}}{(k+at+1)^2} \frac{W \bar{\rho}_g}{\gamma_i} \quad (40)$$

Εξετάζοντας τη σχέση (39) μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για σταθερό αριθμό χρηστών στο σύστημα και σταθερό λόγο πλήθους χρηστών με καλό και κακό κανάλι (δηλαδή εξετάζοντας ένα συγκεκριμένο σενάριο), η πιθανότητα ένας χρήστης καλού καναλιού να επιλεγεί από την πολιτική MAX και να λάβει πόρους συστήματος είναι επίσης σταθερή. Συνεπώς, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις σχέσεις (35) και (36) ώστε να υπολογίσουμε τις βραχυπρόθεσμες στατιστικές ιδιότητες ενός χρήστη υπηρεσίας πραγματικού χρόνου, όσον αφορά την πιθανότητα φραγής της καθυστέρησης του υπό ένα συγκεκριμένο κατώφλι χρονοσχισμών, ως εξής:

$$\Pr[d_i \geq T_i]_{i \in S_g} = \left[1 - \Pr[i_{MAX}^*(t) = i]_{i \in S_g} \right]^{T_i} \quad (41)$$

και επίσης την πιθανότητα λήψης ποσότητας δεδομένων μικρότερη από ένα συγκεκριμένο κατώφλι εντός ενός συγκεκριμένου παραθύρου παρατήρησης L_i , ως εξής:

$$\Pr[\beta_i < B_i(k, \bar{R}_{MAX,i})]_{L_i} = \sum_{k'=0}^{k-1} \binom{L_i}{k'} (\Pr[i_{MAX}^*(t) = i]_{i \in S_g})^{k'} (1 - \Pr[i_{MAX}^*(t) = i]_{i \in S_g})^{L_i - k'} \quad (42).$$

Ανάλογες σχέσεις και συμπεράσματα με αυτά των (41) και (42) μπορούμε εύκολα να εξάγουμε και στην περίπτωση χρηστών κακού καναλιού.

4.3.2 Πολιτική Αναλογικής Δικαιοσύνης

Ο αλγόριθμος αναλογικής δικαιοσύνης, PF, ανήκει και αποτελεί το βασικό εκπρόσωπο μιας γενικότερης κατηγορίας ομορπουνιστικών αλγορίθμων οι οποίοι κάθε χρονοσχιμή επιλέγουν εκείνο το χρήστη με την αναλογικά καλύτερη ποιότητα καναλιού όταν αυτή συγκρίνεται με ένα κατάλληλα επιλεγμένο στατιστικό μέγεθος. Με βάση το μοντέλο συστήματος που ακολουθούμε στη παρούσα μελέτη και της σχέσης (10), η πολιτική PF εκφράζεται ως $i_{PF}^*(t) = \arg \max_{i \in S} \{\rho_i(t) / \bar{\rho}_i(t)\}$, όπου

$\rho_i^*(t+1) = (1-k)\rho_i^*(t) + k\rho_i^*(t)$, η μεταβλητή $\rho_i^*(t)$ παίρνει την τιμή μηδέν όταν ο χρήστης δεν εξυπηρετείται στη χρονοσχιμή t και η μεταβλητή $0 < k < 1$ είναι μια μικρή θετική σταθερά. Στην εργασία [39] αποδεικνύεται ότι, αν θεωρήσουμε κανάλια χρηστών με διαλήψεις Rayleigh, η μέση πραγματική ρυθμαπόδοση ενός χρήστης ($\bar{R}_{PF,i}$) σχετίζεται άμεσα και μέσω σταθερής αναλογίας, με το μέσο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων προς αυτόν. Ειδικότερα, το κέρδος ευκαιριακού χρονοπρογραμματισμού του κάθε χρήστη είναι σταθερό για δεδομένο σταθερό αριθμό χρηστών στο σύστημα και αποδεικνύεται ότι ισχύει:

$$\bar{R}_{PF,i} = \frac{G(N)}{N} \frac{W}{\gamma_i} \bar{\rho}_i \quad (43)$$

όπου $G(N) = \sum_{j=1}^N 1/j$. Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να ισχυριστούμε ότι όταν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας (steady state), δηλαδή μετά την σύγκλιση του $\rho^*(t)$, η πολιτική PF, μπορεί να εκφραστεί ως:

$$i_{PF}^*(t) = \arg \max_{i \in S} \left\{ \frac{\rho_i(t)}{G(N)\bar{\rho}_i/N} \right\} \quad (44)$$

Με βάση τη σχέση (44), η πιθανότητα ένας χρήστης i να εξυπηρετηθεί την εκάστοτε χρονοσχιμή δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Pr[i_{PF}^*(t) = i] = \int_0^\infty \prod_{j=1, j \neq i}^N F_{\rho_j} \left(\frac{\bar{\rho}_j}{\bar{\rho}_i} \rho_i \right) \frac{e^{-\rho_i/\bar{\rho}_i}}{\bar{\rho}_i} d\rho_i \quad (45)$$

μέσω της οποίας μπορούμε εύκολα να αποδείξουμε ότι:

$$\Pr[i_{PF}^*(t) = i] = \sum_{k=1}^N \binom{N}{k} \frac{(-1)^{k+1}}{N} = \frac{1}{N} \quad \forall i \in S \quad (46)$$

Από τη σχέση (46) μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η πιθανότητα εξυπηρέτησης ενός χρήστη οποιαδήποτε χρονική στιγμή υπό την πολιτική PF, όχι μόνο είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται αποκλειστικά από το πλήθος των χρηστών του συστήματος. Συνεπώς, μέσω του μαθηματικού αναλυτικού μοντέλου που αναπτύξαμε μπορούμε να επιβεβαιώσουμε ότι η πολιτική PF εξασφαλίζει μακροπρόθεσμη δικαιοσύνη χρόνου πρόσβασης στο μέσο για όλους του χρήστες του συστήματος. Παράλληλα, δεδομένου ότι οι πιθανότητες εξυπηρέτησης όλων το χρηστών είναι σταθερές, για δεδομένο σενάριο χρηστών, μπορούμε εύκολα να κάνουμε χρήση των σχέσεων (35) και (36) ώστε να υπολογίσουμε τις βραχυπρόθεσμες στατιστικές ιδιότητες ενός χρήστη υπηρεσίας πραγματικού χρόνου κάνοντας χρήση των σχέσεων (46) και (43), αντίστοιχα.

4.3.3 Πολιτική Αναλογικά Καλλίτερου Χρήστη (RB)

Βάσει της σχέσης (11), υπό την πολιτική RB η επιλογή ενός χρήστη i γίνεται ως $i_{RB}^*(t) = \arg \max_{i \in S} \{ \rho_i(t) - \bar{\rho}_i(t) / c_i \}$, όπου c_i είναι μια θετική σταθερά ελέγχου. Η πιθανότητα επιλογής ενός χρήστη i οποιαδήποτε χρονική στιγμή υπό την πολιτική RB, δίδεται από την σχέση:

$$\Pr[i_{RB}^*(t) = i] = \int_{\rho_{0,i}}^{\infty} \prod_{j=1, j \neq i}^N (1 - e^{-((c_j/c_i)(\rho_i - \bar{\rho}_i) + \bar{\rho}_j) / \bar{\rho}_j}) \frac{e^{-\rho_i / \bar{\rho}_i}}{\bar{\rho}_i} d\rho_i \quad (47)$$

όπου $\rho_{0,i} = \max_{i \neq j} \{0, \bar{\rho}_i - c_j / c_i \bar{\rho}_j\}$, καθώς επίσης, η αντίστοιχη μέση πραγματική ρυθμαπόδοσή του προκύπτει βάσει της σχέσης:

$$\bar{R}_{RB,i} = \frac{W}{\gamma_i} \int_{\rho_{0,i}}^{\infty} \rho_i \prod_{j=1, j \neq i}^N (1 - e^{-((c_j/c_i)(\rho_i - \bar{\rho}_i) + \bar{\rho}_j) / \bar{\rho}_j}) \frac{e^{-\rho_i / \bar{\rho}_i}}{\bar{\rho}_i} d\rho_i \quad (48)$$

Σε σχέση με το σενάριο αυτό, βάσει του οποίου υποθέτουμε την ύπαρξη N_g χρηστών με καλό κανάλι και N_b χρηστών με κακό κανάλι, εξετάζεται η πιθανότητα εξυπηρέτησης ενός χρήστη με καλό κανάλι, η οποία ισούται με το ποσοστό του χρόνου που αυτός θα δεχτεί πόρους συστήματος, υπολογίζεται με βάση τη σχέση (47), ως εξής:

$$\Pr[i_{RB}^*(t) = i]_{i \in S_g} = \int_{\rho_{0,g}}^{\infty} \prod_{j=1, j \neq i}^N (1 - e^{-((\rho_i / \bar{\rho}_j - \bar{\rho}_g / \bar{\rho}_j + 1) / \bar{\rho}_j)}) \frac{e^{-\rho_i / \bar{\rho}_g}}{\bar{\rho}_g} d\rho_i$$

όπου $\rho_{0,g} = \bar{\rho}_g - \bar{\rho}_b$ και $c_i = c_j \quad \forall i, j \in S$. Εξετάζουμε στη συνέχεια την περίπτωση κατά την οποία όλοι οι χρήστες έχουν σταθερές ελέγχου με την ίδια τιμή, γιατί σε αυτή τη περίπτωση ο αλγόριθμος RB ισορροπεί μεταξύ του στόχου μεγιστοποίησης της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος (που επιτυγχάνει ο MAX) και της μακροπρόθεσμης δικαιοσύνης χρόνου πρόσβασης στους πόρους του συστήματος (που επιτυγχάνει ο PF). Θέτοντας $\bar{\rho}_g = a \cdot \bar{\rho}_b$ η πιθανότητα εξυπηρέτησης ενός

χρήστη με καλό κανάλι δίδεται από την σχέση:

$$\Pr[i_{RB}^*(t) = i]_{i \in S_g} = \sum_{k=0}^{N_g-1} \sum_{t=0}^{N-N_g} \binom{N_g-1}{k} \binom{N-N_g}{t} \frac{(-1)^{k+t} e^{(\frac{1}{\alpha}-1)(k+1)}}{k+at+1} \quad (49)$$

Παρομοίως με την περίπτωση του MAX αλγορίθμου, παρατηρούμε ότι υπό την πολιτική RB, για σταθερό αριθμό χρηστών στο σύστημα και σταθερό λόγο πλήθους χρηστών με καλό και κακό κανάλι (δηλαδή εξετάζοντας ένα συγκεκριμένο σενάριο), η πιθανότητα ένας χρήστης καλού καναλιού να επιλεγεί είναι σταθερή. Συνεπώς, από την σχέση (35) υπολογίζουμε τη βραχυπρόθεσμη πιθανότητα καθυστέρησης ενός χρήστη με καλό κανάλι ως:

$$\Pr[d_i \geq T]_{i \in S_g} = \left[1 - \Pr[i_{RB}^*(t) = i]_{i \in S_g} \right]^T \quad (50)$$

Τέλος, η μέση ρυθμαπόδοση ενός χρήστη με καλό κανάλι εκφράζεται ως:

$$\bar{R}_{RB, i \in S_g} = \sum_{k=0}^{N_g-1} \sum_{t=0}^{N-N_g} \binom{N_g-1}{k} \binom{N-N_g}{t} \frac{(-1)^{k+t} e^{(1+k)(\frac{1}{\alpha}-1)}}{k+at+1} \left(1 - \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{1+k+at} \right) \frac{W \bar{\rho}_g}{\gamma_i} \quad (51)$$

και η αντίστοιχη πιθανότητα λήψης ποσότητας δεδομένων μικρότερης από ένα συγκεκριμένο κατώφλι εντός ενός συγκεκριμένου παραθύρου παρατήρησης L_i , έχει ως εξής:

$$\Pr[\beta_i < B_i(k, \bar{R}_{RB, i})]_{L_i} = \sum_{k'=0}^{k-1} \binom{L_i}{k'} (\Pr[i_{RB}^*(t) = i]_{i \in S_g})^{k'} (1 - \Pr[i_{RB}^*(t) = i]_{i \in S_g})^{L_i - k'} \quad (52)$$

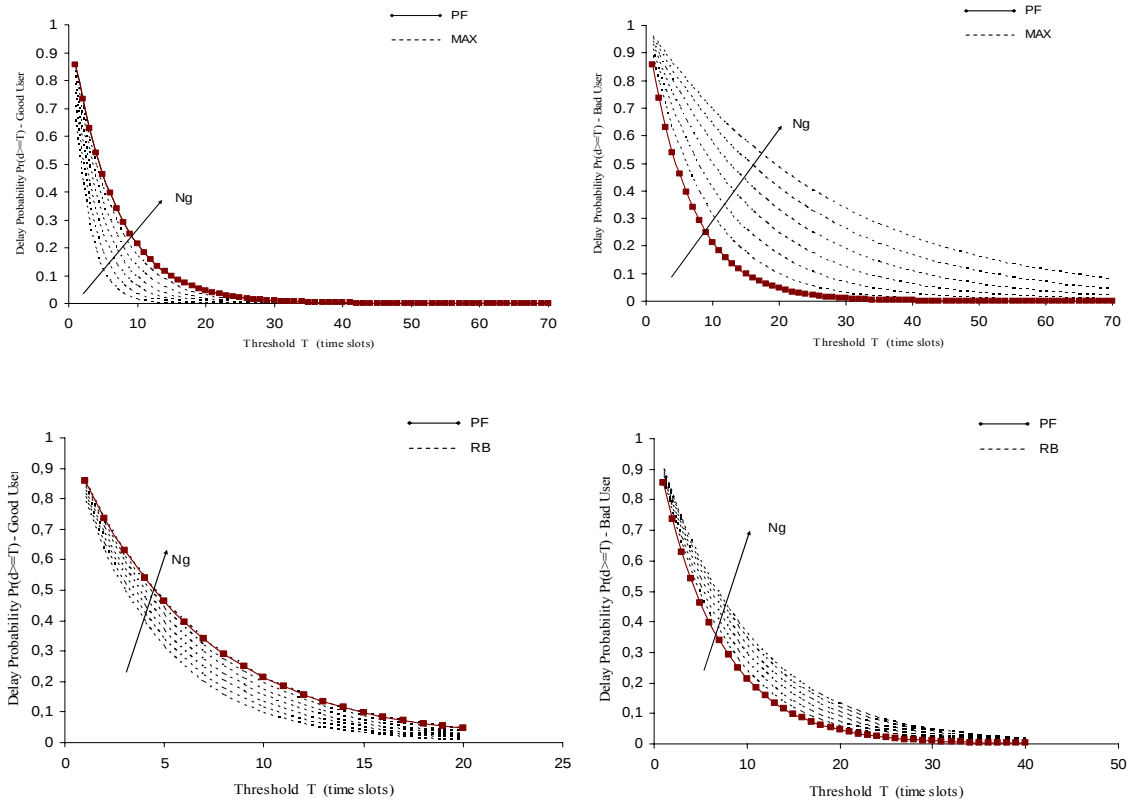
Ανάλογες σχέσεις και συμπεράσματα με αυτά των (50) και (52) μπορούμε εύκολα να εξάγουμε και στην περίπτωση χρηστών κακού καναλιού.

4.3.4 Ανάλυση και Συμπεράσματα

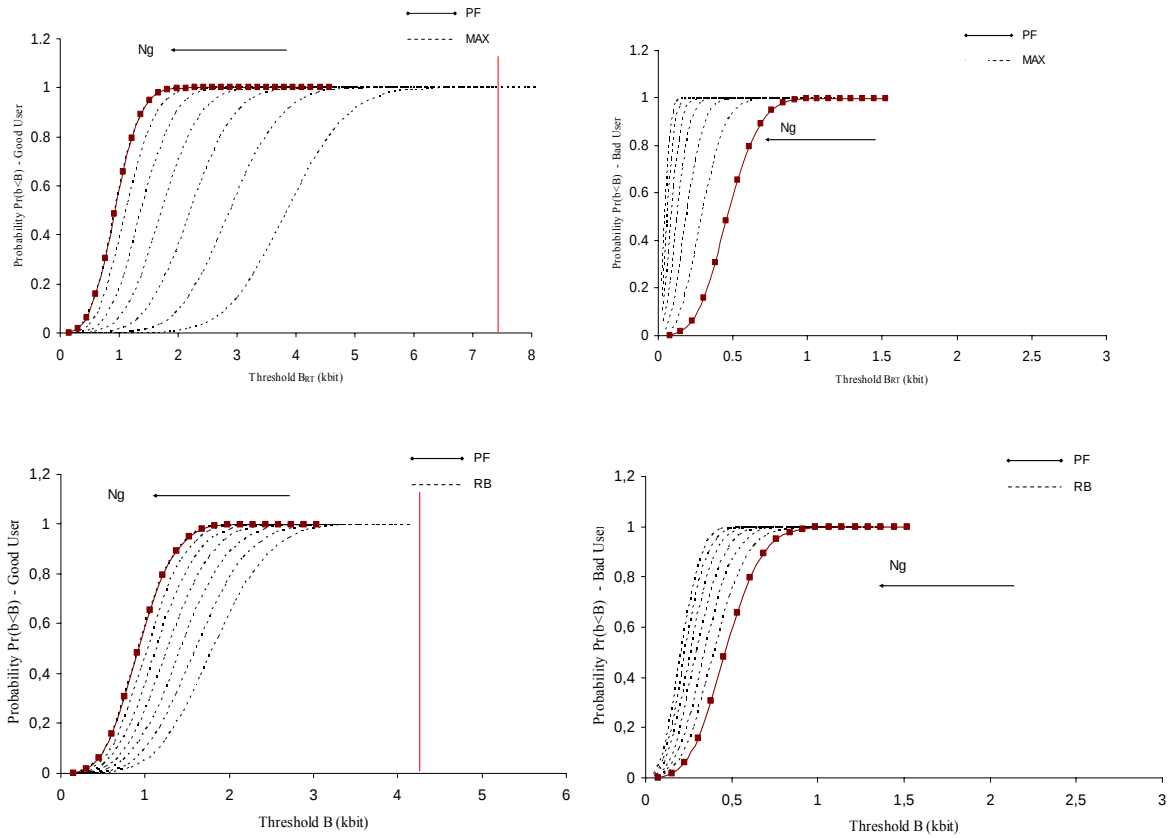
Ως συνέχεια της προηγούμενης θεωρητικής ανάλυσης, σε αυτή την υποενότητα, παρουσιάζουμε αριθμητικά αποτελέσματα μέσω των οποίων αναδεικνύονται οι βραχυπρόθεσμες πιθανοτικές ιδιότητες καθυστέρησης (Σχήμα 5) και ρυθμαπόδοσης (Σχήμα 6) χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου υπό τις πολιτικές MAX και PF και υπό τις πολιτικές RB και PF, για χρήστες με καλή μέση ποιότητα καναλιού στα Σχήματα 5α και 6α (αριστερές στήλες), και κακή μέση ποιότητα καναλιού στα Σχήματα 5β και 6β (δεξιές στήλες), αντίστοιχα. Για την ανάλυσή μας θεωρήσαμε ένα σενάριο με $N_{RT}=7$ χρήστες με υπηρεσίες φωνής και εξετάστηκαν ποικίλες αναλογίες αριθμού χρηστών με καλό και κακό κανάλι ($N_g = 1, \dots, 7$). Τα βέλη στα σχήματα υποδηλώνουν αυξανόμενο αριθμό χρηστών με καλό κανάλι, δηλαδή αυξανόμενο αριθμό N_g . Για λόγους παρουσίασης αποτελεσμάτων, η μέση τιμή της ποιότητας του καναλιού των χρηστών με καλό (κακό) κανάλι τέθηκε $\bar{\rho}_g = 6dB$ ($\bar{\rho}_b = 3dB$).

Από τη μελέτη των γραφημάτων που αφορούν τις βραχυπρόθεσμες ιδιότητες των χρηστών μπορούμε να καταλήξουμε στα εξής συμπεράσματα. Υπό την πολιτική PF, όλοι οι χρήστες έχουν τις ίδιες σταθερές πιθανότητες ανά χρονοσχισμή να λάβουν πρόσβαση στους πόρους του συστήματος και συνεπώς επιτυγχάνεται μακροπρόθεσμη δικαιοσύνη χρόνου πρόσβασης στο μέσο. Αντιθέτως, και ο MAX και ο RB αλγόριθμος ωφελούν τους χρήστες με καλό κανάλι, αφού η πιθανότητες καθυστέρησης εξυπηρέτησής τους για δεδομένο κατώφλι καθυστέρησης είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με αυτές των χρηστών με κακό κανάλι, ειδικά στην περίπτωση που ο αριθμός των χρηστών με καλό κανάλι στο σύστημα είναι μεγάλος (Σχήμα 5). Αντίστοιχες, γενικευμένες παρατηρήσεις σε σχέση με τη συμπεριφορά όλων των αλγορίθμων προκύπτουν και για τις ιδιότητες βραχυπρόθεσμης ρυθμιζόμενης των χρηστών, ανάλογα με τη μέση ποιότητα του καναλιού τους.

Στην συνέχεια της μελέτης μας επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας στα βραχυπρόθεσμα κριτήρια χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου φωνής. Παρατηρείται ότι όταν το κατώφλι καθυστέρησης (T) χρηστών υπηρεσιών φωνής είναι μεγαλύτερο από 70 χρονοσχισμές, το οποίο αντιστοιχεί σε κατώφλι καθυστέρησης περίπου 120 msec, που είναι ικανοποιητικό κριτήριο για υπηρεσίες φωνής, τότε οι πιθανότητες καθυστέρησης λήψης δεδομένων των χρηστών αυτών είναι εξαιρετικά μικρές και συνεπώς τα κριτήρια καθυστέρησης τους ικανοποιούνται ($\Pr[\hat{d}_{RT,i}(t) \geq 70(\text{timeslots})] \leq 0.00001 \quad \forall i \in S_g$ και $\Pr[\hat{d}_{RT,i}(t) \geq 70(\text{timeslots})] \leq 0.1 \quad \forall i \in S_b$), ιδιαίτερα όσον αφορά τους χρήστες με καλό κανάλι (Σχήμα 5).



Σχήμα 5. Βραχυπρόθεσμες πιθανότητες καθυστέρησης χρηστών υπό τις πολιτικές MAX και PF, καθώς και τις πολιτικές RB και PF στην περίπτωση α) χρηστών με καλό κανάλι, β) χρηστών με κακό κανάλι.



Σχήμα 6. Βραχυπρόθεσμες πιθανότητες ρυθμαπόδοσης χρηστών υπό τις πολιτικές MAX και PF, καθώς και τις πολιτικές RB και PF στην περίπτωση α) χρηστών με καλό κανάλι, β) χρηστών με κακό κανάλι.

Αντίθετα αποτελέσματα όμως προκύπτουν από την εξέταση των αποτελεσμάτων ως προς την επίτευξη του κριτηρίου σταθερού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων των χρηστών αυτών (Σχήμα 6). Ειδικότερα, οι χρήστες υπηρεσιών φωνής απαιτούν σταθερό ρυθμό μετάδοσης $64 Kbps$, ο οποίος αντιστοιχεί σε κατώφλι δεδομένων $7481.6 bits$ εντός παραθύρου παρατήρησης 70 χρονοσχισμών, τα οποία διαφαίνονται στα Σχήματα 6α και 6β με κάθετες κόκκινες γραμμές. Παρατηρούμε ότι τα απαιτούμενα κριτήρια ρυθμαπόδοσης των χρηστών με υπηρεσία πραγματικού χρόνου φωνής δεν ικανοποιούνται, ούτε καν στην περίπτωση χρηστών με καλό κανάλι σε όλα τα υπό εξέταση σενάρια (δηλαδή ισχύει $\Pr[\beta_i < 7481.6 (bits)]_{L_i=70(timeslots)} \approx 1 \quad \forall i \in S$). Καταλήγουμε συνεπώς στο συμπέρασμα ότι ακόμα και υπό την πολιτική MAX, μέσω της οποίας μεγιστοποιείται η συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος και κατ' επέκταση των χρηστών αυτού (κυρίως αυτών με καλό κανάλι), ακόμα και όταν ικανοποιούνται τα πιθανοτικά βραχυπρόθεσμα κριτήρια καθυστέρησης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, δεν ικανοποιούνται τα βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσης τους. Ακόμη χειρότερα, οι πιθανότητες μη επίτευξής τους είναι τόσο μεγάλες που θα οδηγούσαν στη διακοπή της υπηρεσίας.

4.4 Προτεινόμενος Ευκαιριακός Αλγόριθμος Ικανοποίησης Βραχυπρόθεσμων Κριτηρίων Ρυθμαπόδοσης Υπηρεσιών Πραγματικού Χρόνου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται και αναλύεται ένα νέο μαθηματικό πλαίσιο το οποίο υιοθετεί τα βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσης ως δείκτες ποιότητας υπηρεσίας για χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, βασίζεται σε συναρτήσεις ευχαρίστησης χρηστών, και έχει ως στόχο την αποτελεσματική διευθέτηση των πόρων της ζεύξης καθόδου ενός συστήματος CDMA όταν εξυπηρετούνται ταυτόχρονα χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου [54]. Το μαθηματικό πλαίσιο και ο αντίστοιχος ευκαιριακός αλγόριθμος που προτείνεται για την πραγμάτωσή του καλείται USTF (*Utility based Short-term Throughput driven Framework*). Αρχικά ορίζονται κατάλληλες συναρτήσεις ευχαρίστησης χρηστών, ανάλογα με τον τύπο της υπηρεσίας τους και τα αντίστοιχα κριτήρια ποιότητας αυτής, και αναλύονται τα πλεονεκτήματα της χρήσης τους.

Εν συνεχεία, επικεντρώνουμε την προσοχή μας στην εξασφάλιση ΚΠΥ για χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου μέσω του προτεινόμενου πλαισίου. Μέσω της χρήσης του προτεινόμενου γενικευμένου μαθηματικού πλαισίου συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών, οι οποίες εκφράζουν με κανονικοποιημένο/ανοιγμένο τρόπο τον αντικειμενικό βαθμό ευχαρίστησης ενός χρήστη με βάση την τελική ποιότητα και επίδοση της ζητούμενης από αυτό υπηρεσίας, στοχεύουμε στην αποσύνδεση, και σε πρακτικό αλλά και θεωρητικό επίπεδο, των μηχανισμών μέσω των οποίων οι ευκαιριακοί αλγόριθμοι κατανομής πόρων συστήματος επιτυγχάνουν την ικανοποίηση των ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και μη πραγματικού χρόνου, αντίστοιχα. Η παραπάνω προσέγγιση, όχι μόνο ευνοεί την αποτελεσματική εκμετάλλευση του ευκαιριακού χαρακτήρα του προτεινόμενου αλγορίθμου ξεχωριστά για κάθε είδος υπηρεσίας, αλλά και συνολικά. Με αυτόν τον τρόπο, ξεπερνάμε το πρόβλημα που δημιουργείται όταν η βελτιστοποίηση της απόδοσης των υπηρεσιών μιας κατηγορίας χρηστών (π.χ. πραγματικού χρόνου) οδηγεί στην ταυτόχρονη υποβάθμιση της ποιότητας της υπηρεσιών χρηστών που ανήκουν σε διαφορετική κατηγορία (π.χ. μη πραγματικού χρόνου). Τέλος, πραγματοποιείται αναλυτική παρουσίαση του προτεινόμενου αλγορίθμου USTF και αιτιολόγηση των σχεδιαστικών επιλογών μας.

4.4.1 Συναρτήσεις Ευχαρίστησης Χρηστών και Κριτήρια Ποιότητας Υπηρεσίας

Εξετάζοντας τη ζεύξη καθόδου μιας κυψέλης ενός CDMA συστήματος, για κάθε χρήστη i ο οποίος είναι προσκολλημένος σε αυτή και ζητεί πόρους αντιστοιχεί μια κατάλληλα ορισμένη συνάρτηση ευχαρίστησης $U_i(t)$. Η συνάρτηση ευχαρίστησης ενός χρήστη εκφράζει με κανονικοποιημένο τρόπο την αντικειμενική ευχαρίστησή του με βάση τη επιτεύξιμη ποιότητα υπηρεσίας του και την τήρηση των αντίστοιχων κριτηρίων ποιότητας αυτής. Επίσης, έχει ως όρισμα το πλήθος των πόρων του συστήματος που δέχτηκε ο εκάστοτε χρήστης την κάθε χρονική στιγμή t .

Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων, η χρήση των συναρτήσεων ευχαρίστησης είναι ευρέως διαδεδομένη στο σχεδιασμό πολιτικών ανάθεσης πόρων ενσύρματων και ασύρματων δικτύων, καθώς αποτελεί ένα εύχρηστο και ευπροσάρμοστο τρόπο αντικατοπτρισμού των διαφόρων ΚΠΥ διαφορετικών υπηρεσιών με ενιαίο και κανονικοποιημένο τρόπο όχι μόνο στο πρόβλημα βελτιστοποίησης των πόρων του συστήματος αλλά και στον αλγόριθμο ανάθεσης αυτών. Στην περίπτωση ενός ασύρματου CDMA δικτύου, η χρήση συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών ευνοεί το στόχο της ταυτόχρονης υποστήριξης χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου, για αυτό και υιοθετήθηκε στην παρούσα μελέτη.

Όσον αφορά χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου διάφοροι τύποι συναρτήσεων ευχαρίστησης έχουν προταθεί για να εκφράσουν τα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας τους σε σχέση με τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που τελικά επιτυγχάνεται. Οι συναρτήσεις αυτές εκφράζουν κατά κύριο λόγο την επιθυμία τους για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης [55] ταυτόχρονα με την επίτευξη ελάχιστων κριτηρίων μακροπρόθεσμης κατανομής πόρων ή δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών [41]. Στην παρούσα μελέτη, στοχεύουμε στην αποτελεσματική διευθέτηση των πόρων του συστήματος σε χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες δεδομένων μη πραγματικού χρόνου, καθώς, και στην διασφάλιση των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων ΚΠΥ τους αντίστοιχα. Συνεπώς, χωρίς να επηρεάζεται η γενικότητα της μεθοδολογίας μας, θεωρούμε ως μοναδικό στόχο για ένα χρήστη με υπηρεσία μη πραγματικού χρόνου την επίτευξη του κατά το δυνατό μεγαλύτερου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων του (ο οποίος εκφράζεται και μέσω των συναρτήσεων ευχαρίστησης αυτών). Όπως θα διαφανεί και τεκμηριωθεί στη συνέχεια, η προτεινόμενη μεθοδολογία ισχύει και μπορεί να εφαρμοστεί για οποιοδήποτε μακροπρόθεσμο κριτήριο ποιότητας υπηρεσίας και αν επιλεγεί για χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου.

Για τον παραπάνω σκοπό, όσον αφορά στους χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, υιοθετούμε συναρτήσεις ευχαρίστησης οι οποίες αποτελούν συνάρτηση της στιγμιαίας ποιότητας του καναλιού τους, εκμεταλλευόμενοι πληροφορία διαθέσιμη από το φυσικό στρώμα. Συνεπώς, θεωρούμε ότι η συνάρτηση ευχαρίστησης ενός χρήστη είναι αντιστρόφως ανάλογη της ποιότητας του καναλιού του και λαμβάνει μη αρνητικές τιμές. Για παράδειγμα, ένας χρήστης με στιγμιαία κακή ποιότητα καναλιού έχει υψηλές τιμές συνάρτησης ευχαρίστησης, υποδηλώνοντας στον ευκαιριακό αλγόριθμο ΔΠΔ του συστήματος ότι η εξυπηρέτηση του συγκεκριμένου χρήστη τη συγκεκριμένη χρονοσχισμή απαιτεί μεγάλη σπατάλη πόρων αυτού και κατ' επέκταση υποδηλώνει την επίτευξη μειωμένης ρυθμαπόδοσης. Είναι φανερό ότι χρησιμοποιούμε τις ίδιες συναρτήσεις ευχαρίστησης χρηστών με αυτές που ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 2, αλλά ανεστραμμένες κατά τέτοιο τρόπο, ώστε όταν η τιμή της συνάρτησης ευχαρίστησης είναι ελάχιστη, αυτό να υποδηλώνει μέγιστη ποιότητα υπηρεσίας (ικανοποίηση των ΚΠΥ) και κατ' επέκταση ευχαρίστηση χρήστη. Θεωρούμε ότι οι συναρτήσεις ευχαρίστησης των χρηστών είναι άνω φραγμένες (i.e. $\max U_i(t) = U_{max}$). Συνεπώς, αν στόχος ήταν η μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος (δηλαδή πολιτική

MAX), και μόνο χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου ήταν προσδεμένοι σε αυτό, τότε η βέλτιστη πολιτική ΔΠΔ είναι η εξής:

$$i_{MAX}^*(t) = \arg \min_{i \in S} \{U_i(t)\} \quad (53)$$

Με στόχο την ταυτόχρονη ικανοποίηση και των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (δηλαδή, την επίτευξη ελάχιστων τιμών για τις πιθανότητες της σχέσης (33), $\min Pr[\hat{\beta}_{RT,i}(t) \leq B_{RT,i}]_{L_i}, B_{RT,i} = R_{RT,i} \cdot L_i \cdot t_s \quad \forall i \in S_{RT}$), ο οποίος εκφράζεται μέσω του ακόλουθου προβλήματος βελτιστοποίησης:

$$\begin{aligned} & \max_{Q \in \Theta} \sum_{i \in S}^{N-I} E \left[U_i(t) I_{i_{USTP}(t)=i}^* \right] \\ & s.t. \sum_i^N P_i \leq P_{Max} \quad \forall i \in S \end{aligned}$$

στοχεύουμε στη σχεδίαση ενός ευκαιριακού ΔΠΔ με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει την ικανότητα και την ευελιξία να μεταβάλλει την τελική τιμή της συνάρτησης ευχαρίστησής τους, και εν τέλει την πιθανότητα να επιλεχθούν προς εξυπηρέτηση, σύμφωνα με τη τήρηση των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων εξυπηρέτησής τους.

Σχεδιαστική Επιλογή: Ειδικότερα, όταν ένας χρήστης με υπηρεσία πραγματικού χρόνου έχει λάβει λιγότερα δεδομένα από τον προκαθορισμένο κατώφλι των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης του $B_{RT,i}$ στην αρχή της προς εξέταση χρονοσχιμής, τότε πρέπει η προτεραιότητα επιλογής και εξυπηρέτησής του να αυξηθεί ώστε να εξασφαλιστεί η διασφάλιση του κριτηρίου. Οι αντίθετες ενέργειες πρέπει να γίνουν όταν ο χρήστης έχει λάβει περισσότερα δεδομένα από το προκαθορισμένο κατώφλι, ώστε να μειωθεί η προτεραιότητα εξυπηρέτησής του. Η παραπάνω διαδικασία, αποτελεί μια από της καινοτομίες της παρούσας μελέτης, αφού η μέχρι πρότινος τακτική που ακολουθείτο στο σχεδιασμό ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ επεδίωκε μόνο την αύξηση της προτεραιότητας χρηστών που τα ΚΠΥ τους παραβιάζονται και όχι τη μείωσής της όταν το σύστημα κατασπαταλά πόρους σε χρήστες των οποίων τα ΚΠΥ ικανοποιούνται.

Αιτιολόγηση: Όταν ένας χρήστης i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου λάβει εντός του χρονικού παραθύρου παρατήρησής του L_i , ποσότητα δεδομένων μεγαλύτερη από αυτή του προκαθορισμένου κατωφλίου του $B_{RT,i}$, τότε και η ρυθμαπόδοσή του θα είναι μεγαλύτερη της απαιτούμενης $R_{RT,i}$. Από την στιγμή όμως που τα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας του χρήστη ικανοποιούνται όταν ο συγκεκριμένος σταθερός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων επιτυγχάνεται, επιπλέον αύξηση αυτού (δηλαδή μέση ρυθμαπόδοση μεγαλύτερη από $R_{RT,i}$) δεν θα αυξήσει και την ευχαρίστησή του. Επιπροσθέτως, με το να μειωθεί η προτεραιότητα εξυπηρέτησης χρηστών, για τους οποίους λόγω της βραχυπρόθεσμα καλής ποιότητας των καναλιών τους λαμβάνουν περισσότερους πόρους συστήματος από αυτούς που απαιτούν, αποκτούμε το πλεονέκτημα της ανακατανομής των

επιπρόσθετων αποδεδειγμένων πόρων προς όφελος των “αδικημένων” χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, των οποίων τα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας δεν πληρούνται. Επίσης, οι επιπλέον πόροι μπορούν να ανατεθούν και σε χρήστες με υπηρεσίες δεδομένων μη πραγματικού χρόνου, συμβάλλοντας στην επιθυμητή αύξηση της συνολικής ρυθμαπόδοσής τους.

4.4.2 Προσαρμογή των Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Χρηστών με Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, η επίτευξη της δυναμικής προσαρμογής των προτεραιοτήτων εξυπηρέτησης των χρηστών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, γίνεται μέσω της ένταξης της πληροφορίας για την βραχυπρόθεσμη ρυθμαπόδοσή τους στον υπολογισμό των συναρτήσεων ευχαρίστησης τους. Για το λόγο αυτό, προτείνεται μια νέα πολιτική διευθέτησης πόρων συστήματος και χρονοπρογραμματισμού χρηστών κατά την οποία στην αρχή κάθε χρονοσχισμής, επιλέγεται εκείνος ο χρήστης με την μικρότερη τιμή για την συνάρτηση ευχαρίστησής του, η οποία στην περίπτωση των χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου δίδεται από τη σχέση:

$$i_{USTF}^*(t) = \arg \min_{i \in S} \{U_i^*(t)\}$$

$$U_i^*(t) = U_i(t) + \begin{cases} (-1)I_{RT,i}(t) U_i(t) & \text{αν } \beta_{RT,i}(t) \leq (Tr+1)B_{RT,i} \\ G_{RT,i}(t) (U_{\max}(t) - U_i(t)) & \text{αν } \beta_{RT,i}(t) > (Tr+1)B_{RT,i} \end{cases} \quad (54)$$

όπου η μεταβλητή $\beta_{RT,i}(t)$ υποδηλώνει την ποσότητα δεδομένων που έλαβε ο χρήστης i στο διάστημα από τη χρονοσχισμή $(t-L_i+1)$ έως την $(t-1)$, ενώ οι μεταβλητές $I_{RT,i}(t) \in [0,1]$ και $G_{RT,i}(t) \in [0,1] \quad \forall i \in S_{RT}$ αποτελούν δύο κανονικοποιημένους δείκτες που “αντικατοπτρίζουν” την ανάγκη ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου να λάβει πόρους συστήματος τη χρονοσχισμή t , στις περιπτώσεις που αυτός έχει έλλειψη ή περίσσεια πόρων (ποσότητα δεδομένων) εντός του παραθύρου παρατήρησής του. Η μεταβλητή Tr ($Tr \geq 0$), η οποία ορίζεται ως μεταβλητή ευαισθησίας του συστήματος, καθορίζει το βαθμό πρόληψης με τον οποίο εξυπηρετεί τους χρήστες και ο ακριβής ρόλος της αναλύεται αργότερα σε αυτή την ενότητα.

Με βάση τη σχέση (54), όταν ένα χρήστης i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου έχει λάβει έως τη χρονική στιγμή $(t-1)$ λιγότερα δεδομένα από το προκαθορισμένο κατώφλι $B_{RT,i}$ (πολλαπλασιασμένο με το λόγο $(Tr+1)$) εντός του αντίστοιχου χρονικού παραθύρου παρατήρησης L_i), τότε για να αποφευχθεί η παραβίαση των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσής του η τιμή της συνάρτησης ευχαρίστησης του μειώνεται και συνεπώς, η πιθανότητα να εξυπηρετηθεί την επόμενη χρονοσχισμή t αυξάνεται. Η μείωση της τιμής της συνάρτησης ευχαρίστησης του χρήστη, σε σχέση με την τιμή που θα λάμβανε αν μόνο η στιγμιαία ποιότητα του καναλιού του λαμβάνονταν υπόψη,

$U_i(t)$, καθορίζεται από την τιμή του κανονικοποιημένου δείκτη $I_{RT,i}(t)$ εκείνη τη χρονοσχισμή. Ο δείκτης $I_{RT,i}(t)$ ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου αντικατοπτρίζει με ανοιγμένο τρόπο την ανάγκη του να λάβει πόρους συστήματος, με βάση την κατανομή των ληφθέντων δεδομένων εντός προκαθορισμένου παραθύρου παρατήρησης, και για αυτό ορίζεται ως:

$$I_{RT,i}(t) = 1 - \sum_{k=1}^{L_i-1} \frac{\hat{w}_{RT,i}(k, L_i) \beta'_{RT,i}(t-k)}{(Tr+1)B_{RT,i}} \quad \text{αν} \quad \beta_{RT,i}(t) \leq (Tr+1)B_{RT,i} \quad (55)$$

$$\text{όπου} \quad \hat{w}_{RT,i}(k, L_i) = \frac{L_i - k}{L_i - 1} \quad \text{για} \quad k = 1, \dots, L_i \quad \forall i \in S_{RT}$$

όπου η μεταβλητή $\beta'_{RT,i}(t)$ υποδηλώνει την πραγματική ποσότητα δεδομένων που έλαβε ο χρήστης

τη χρονοσχισμή t (συνεπώς $\beta_{RT,i}(t) = \sum_{k=1}^{L_i-1} \beta'_{RT,i}(t-k) \quad \forall i \in S_{RT}$), και η μεταβλητή $\hat{w}_{RT,i}(k, L_i)$ ορίζεται

ως ο συντελεστής βαρύτητας της κάθε χρονοσχισμής εντός του χρονικού παραθύρου παρατήρησης L_i , ο οποίος έχει ως ρόλο να καθορίζει τη σπουδαιότητα των δεδομένων, ως προς την ποσότητά τους και μόνο, που έλαβε ο χρήστης την αντίστοιχη χρονοσχισμή (δηλαδή την $t-k$ χρονοσχισμή) κατά τον υπολογισμό του κανονικοποιημένου δείκτη $I_{RT,i}(t)$. Οι τιμές των βαρών των χρονοσχισμών, καθώς και η αντίστοιχη σπουδαιότητα του ποσού των δεδομένων που ελήφθησαν από τον χρήστη εντός αυτών, καθορίζονται από μια σχέση γραμμική και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασής τους k από την επόμενη χρονοσχισμή t , με στόχο η ποσότητα των δεδομένων που έλαβε ο χρήστης κατά τις πιο απομακρυσμένες χρονοσχισμές να παίζουν πιο σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της προτεραιότητας εξυπηρέτησής του. Το προηγούμενο επιχείρημα βασίζεται στο γεγονός ότι καθώς το σύστημα εξελίσσεται, και συνεπώς το χρονικό παράθυρο παρατήρησης του εκάστοτε χρήστη ολισθαίνει ανά χρονοσχισμή, τότε οι διακυμάνσεις της ποσότητας δεδομένων που έχει λάβει εντός αυτού, οι οποίες επηρεάζουν την προτεραιότητα εξυπηρέτησης του, καθορίζονται κυρίως από την ποσότητα δεδομένων που έλαβε κατά τις πιο απομακρυσμένες σχισμές εντός του παραθύρου παρατήρησής του σε σχέση με την επόμενη χρονοσχισμή. Ως παράδειγμα αναφέρουμε το εξής; ακόμα και αν δύο χρήστες i, j , με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου έχουν λάβει την ίδια ποσότητα δεδομένων εντός του ίδιου παραθύρου εξυπηρέτησης (δηλαδή ισχύει ότι $\beta_{RT,i}(t) = \beta_{RT,j}(t)$ όταν $L_i = L_j$, $B_{RT,i} = B_{RT,j}$ και $U_i(t) = U_j(t)$), αλλά ο χρήστης i έχει εξυπηρετηθεί σε πιο πρόσφατες χρονοσχισμές σε σχέση με την τωρινή σε σχέση με το χρήστη j , τότε η τιμή του κανονικοποιημένου δείκτη $I_{RT,i}(t)$ για το χρήστη i θα είναι μικρότερη από αυτή του χρήστη j , $I_{RT,j}(t)$, λόγω της επίδρασης των βαρών των χρονοσχισμών κατά τον υπολογισμό του, αφού η ανοχή λήψης δεδομένων από το χρήστη i είναι μεγαλύτερη από αυτή του χρήστη j . Ως αποτέλεσμα η συνάρτηση ευχαρίστησης του χρήστη j , $U_j^*(t)$ έχει τιμή μικρότερη αυτής του χρήστη i και συνεπώς η προτεραιότητα εξυπηρέτησής του είναι μεγαλύτερη.

Στην αντίθετη περίπτωση, όταν ένας χρήσης i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου έχει λάβει περισσότερους πόρους από το προκαθορισμένο κατώφλι δεδομένων του εντός των (L_i-1) τελευταίων διαδοχικών χρονοσχισμών του παραθύρου παρατήρησής L_i , τότε η τιμή της συνάρτησης ευχαρίστησής του αυξάνεται σύμφωνα με την σχέση (54). Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσό των δεδομένων που έχει λάβει εντός του παραθύρου παρατήρησης L_i , τόσο μικρότερη θα πρέπει να είναι η προτεραιότητα επιλογής του και για αυτό, ο κανονικοποιημένος δείκτης δίδεται σε αυτή την περίπτωση από την ακόλουθη σχέση:

$$G_{RT,i}(t) = \frac{\sum_{k=1}^{L_i-1} \hat{w}_{RT,i}(k, L_i) \beta'_{RT,i}(t-k)}{\sum_{k=1}^{L_i-1} \hat{w}_{RT,i}(k, L_i) R_i^{\max} \cdot t_s} \text{ if } \beta_{RT,i}(t) > (Tr+1)B_{RT,i} \quad (56)$$

όπου η μεταβλητή $R_i^{\max}$ υποδηλώνει τη μεγαλύτερη εφικτή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων που μπορεί να πετύχει ο χρήστης i λόγω των περιορισμών που επιβάλλουν οι φυσικές δυνατότητές του. Ο παρανομαστής $\sum_{k=1}^{L_i-1} \hat{w}_{RT,i}(k, L_i) R_i^{\max} t_s$ συμβάλει στην κανονικοποίηση των τιμών του δείκτη G .

Η παραπάνω διαδικασία προσαρμογής των τιμών των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου επηρεάζεται επίσης και από την παράμετρο ευαισθησίας του συστήματος Tr , η τιμή της οποίας καθορίζει το βαθμό πρόληψής του. Μεγάλες τιμές της παραμέτρου Tr έχουν ως αποτέλεσμα ο αλγόριθμος USTF να δρα πιο προληπτικά και πιο επιθετικά σε περίπτωση παραβίασης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης ή έντονων διακυμάνσεων επίδοσης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η αύξηση της παραμέτρου Tr έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του τηρούμενου κατωφλιού δεδομένων των χρηστών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου $(Tr+1)B_{RT,i}$. Έτσι, οι “φαινομενικές” απαιτήσεις ρυθμαπόδοσης των χρηστών αυτών αυξάνονται και κατ’ επέκταση η πιθανότητα μη τήρησης των πραγματικών κριτηρίων ρυθμαπόδοσής τους μειώνεται.

Τέλος, πρέπει να επισημάνουμε ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία διασφάλισης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου υπό το πρίσμα ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ, όπως αυτή διατυπώνεται από την σχέση (54), αποσυνδέει τον τρόπο που ενεργεί ο αλγόριθμος για τη διασφάλιση των μακροπρόθεσμων και των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ των χρηστών, καθώς διαχωρίζει τον τρόπο που παίρνει (ανεξάρτητες) αποφάσεις και συνεπώς ενεργεί όταν κάποια από αυτά παραβιάζονται. Για αυτό το λόγο, η επίτευξη διαφόρων μακροπρόθεσμων ΚΠΥ χρηστών μέσω του προτεινόμενου αναλυτικού μαθηματικού πλαισίου και της πολιτικής USTF γίνεται εύκολα με τον καθορισμό κατάλληλων συναρτήσεων U_i , κάτι το οποίο δεν επηρεάζει τη λειτουργικότητα και αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης πολιτικής αρκεί οι χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις ευχαρίστησης να είναι άνω και κάτω φραγμένες.

4.5 Αξιολόγηση Επίδοσης Προτεινόμενου Αλγορίθμου

Στην ενότητα αυτή, η λειτουργία του προτεινόμενου αλγορίθμου USTF αξιολογείται μέσω μοντελοποίησης και προσομοίωσης. Με στόχο την καλλίτερη παρουσίαση της εύρυθμης λειτουργίας και αποτελεσματικότητάς του, κυρίως ως προς τη συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος που επιτυγχάνεται, αλλά και την ικανοποίηση των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων καθυστέρησης και ρυθμαπόδοσης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου που εξασφαλίζεται από την πολιτική USTF, πραγματοποιείται συγκριτική μελέτη αυτού σε σχέση με τέσσερεις άλλους αλγορίθμους: α) τον αλγόριθμο MAX [37], που στόχο έχει τη μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος; β) δύο αλγορίθμους που στοχεύουν στη διασφάλιση πιθανοτικών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων καθυστέρησης λήψης δεδομένων για χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (κριτήρια που περιγράφονται μέσω της σχέσης (1)), τον M-LWDF [47] (Modified Largest Weighted Delay First rule) και τον EXP [49] (Exponential rule); και γ) τον αλγόριθμο ESFS [51] (Elastic Short-term Fairness), που έχει ως στόχο την ικανοποίηση ελαστικών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών του συστήματος.

4.5.1. Μοντέλο Προσομοίωσης & Υποθέσεις

Κατά τη μελέτη μας θεωρήσαμε και προσομοιώσαμε τη λειτουργία μιας μόνο κυψέλης ενός CDMA συστήματος. Καθώς στο σύστημα ακολουθείται πολυπλεξία χρόνου, η διάρκεια κάθε χρονοσχιμής θεωρήθηκε 1.67 msec σύμφωνα με το πρότυπο HDR [1], και η διάρκεια κάθε προσομοίωσης ήταν 100.000 χρονοσχισμές. Θεωρήσαμε την ύπαρξη $N=7$ χρηστών στο σύστημα και ότι όλοι οι χρήστες έχουν συνέχεια δεδομένα προς αποστολή στις ουρές αναμονής τους στο σταθμό βάσης. Οι χρήστες μπορεί να ζητούν είτε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (RT, real time) είτε μη πραγματικού χρόνου (NRT, non real time). Τα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου καθορίστηκαν με βάση τα ΚΠΥ υπηρεσιών φωνής, δηλαδή σταθερός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων $R_{RT,i}=64 \text{ kbps} \quad \forall i \in S_{RT}$ και μέγιστη καθυστέρηση $T_i = 20$ χρονοσχισμές. Συνεπώς, θεωρώντας ότι το χρονικό παράθυρο παρατήρησης αυτών των χρηστών είναι $L_i=20$ χρονοσχισμές το κατώφλι δεδομένων τους είναι ίσο με $B_{RT,i}=2137.6 \text{ bits}$. Τα παραπάνω ισχύουν για κάθε χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου και για κάθε σενάριο προσομοίωσης, εκτός και αν αναφέρεται ρητά εντός του κειμένου κάποια διαφοροποίηση για συγκεκριμένα σενάρια που παρουσιάζονται. Κατά τον τρόπο αυτό, τα πιθανοτικά βραχυπρόθεσμα κριτήρια καθυστέρησης χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου είναι τα ίδια υπό όλες τις πολιτικές και αλγορίθμους που εξετάστηκαν και συνεπώς μπορεί να πραγματοποιηθεί η αντικειμενική σύγκρισή τους. Η παράμετρος ευαισθησίας για τον αλγόριθμο USTF τέθηκε ίση με $Tr=0.3$.

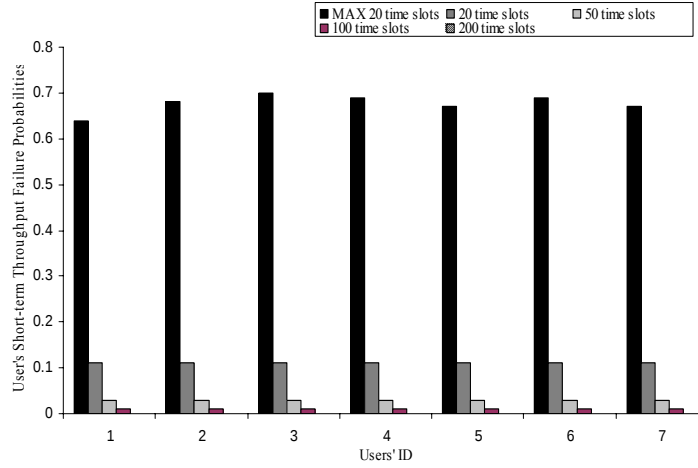
Για να μελετηθεί η επίδραση των βραχυπρόθεσμων διαλείψεων και των μακροπρόθεσμων μεταβολών της ποιότητας των καναλιών των χρηστών στη συνολική απόδοση του συστήματος υπό τους παραπάνω αλγορίθμους, τα κανάλια των χρηστών μοντελοποιήθηκαν ως Μαρκοβιανές

διαδικασίες οκτώ-καταστάσεων με βάση το μοντέλο προσομοίωσης Rayleigh καναλιών χρηστών που προτείνεται στο [56]. Η μέση τιμή του σηματοθορυβικού λόγου των καναλιών των χρηστών τέθηκε ίση με $\bar{\rho}_i = 4$ (6dB). Επίσης, οι συναρτήσεις ευχαρίστησης των χρηστών ορίστηκαν ως $U_i(t) = U_{\max} - \min(\rho_i(t), U_{\max})$. Με βάση την τιμή του στιγμιαίου σηματοθορυβικού λόγου που επιτυγχάνει ο εκάστοτε χρήστης την κάθε χρονοσχισμή καθορίζεται και ο αντίστοιχος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που επιτυγχάνει σύμφωνα με τον πίνακα 2 που χρησιμοποιείται στα CDMA 1xEV-DO συστήματα [1].

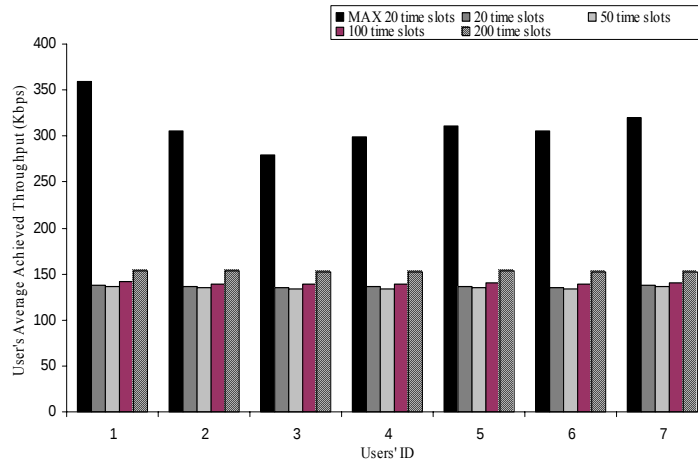
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Ρυθμοί Μετάδοσης (Kbps) Συναρτήσει του Στιγμιαίου SINR (dB)

SNR ≥	-12.5	-9.5	-8.5	-6.5	-5.7	-4.0
Rate (Kbs)	38.4	76.8	102.6	153.6	204.8	307.2
SNR ≥	-1.0	1.3	3.0	7.2	9.5	
Rate (Kbs)	614.4	921.6	1228.8	1843.2	2457.6	

Με στόχο την καλλίτερη παρουσίαση και αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος υπό την προτεινόμενη πολιτική USTF, παρουσιάζονται αποτελέσματα για δύο διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης. Με το πρώτο σενάριο, SC-I (scheduling scenario I), στοχεύουμε στην ανάδειξη των δυνατοτήτων του προτεινόμενου αλγορίθμου στο να ικανοποιεί και να διατηρεί τα πιθανοτικά κριτήρια βραχυπρόθεσμης ρυθμαπόδοσης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου για διαφορετικές τιμές παραθύρων παρατήρησης και κατ' επέκταση για διαφορετικά κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών αυτών. Κατά το δεύτερο σενάριο, SC-II (scheduling scenario II), παρουσιάζουμε μια αναλυτική, συγκριτική μελέτη της επίδοσης του συστήματος που επιτυγχάνεται από τον προτεινόμενο αλγόριθμο USTF, σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνεται από τους αλγορίθμους MAX, M-LWDF, EXP και ESFS, όχι μόνο όσον αφορά στην τήρηση των πιθανοτικών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης των χρηστών πραγματικού χρόνου αλλά και σε σχέση με τη συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος για κάθε κλάση χρηστών ξεχωριστά.



Σχήμα 7. Πιθανότητες αποτυχίας τήρησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης χρηστών πραγματικού χρόνου, για διάφορες τιμές παραθύρου παρατήρησης υπό τους αλγορίθμους USTF και MAX στο SC-I.



Σχήμα 8. Μέση ρυθμαπόδοση χρηστών πραγματικού χρόνου, για διάφορες τιμές παραθύρου παρατήρησης υπό τους αλγορίθμους USTF και MAX στο SC-I.

4.5.2. 1ο Σενάριο Προσομοίωσης (SC-I)

Σε αυτό το σενάριο θεωρήσαμε ότι όλοι οι χρήστες ζητούν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου ($N_{RT} = N = 7$) καθώς στοχεύουμε στη μελέτη και ανάλυση της απόδοσης του συστήματος υπό τον αλγόριθμο USTF για διάφορες τιμές παραθύρων παρατήρησης χρηστών (αναλυτικότερα τέθηκε $L_i = 20, 50, 100, 200$ χρονοσχισμές και συνεπώς $B_{RT,i} = 2137.6, 5344, 10688, 21376$ bits αντιστοίχως). Ειδικότερα, στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται οι πιθανότητες αποτυχίας τήρησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης των χρηστών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, δηλαδή οι πιθανότητες μη τήρησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσής τους για διαφορετικές τιμές παραθύρων

παρατήρησης ($\Pr[\hat{\beta}_{RT,i}(t) \leq B_{RT,i}]_{L_i}$), ενώ το Σχήμα 8 παρουσιάζει τη μέση ρυθμαπόδοση (μέσος επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ανά χρήστη) υπό τους αλγόριθμους USTF και MAX (στήλες μαύρου χρώματος). Η παρουσίαση της απόδοσης του συστήματος υπό τον αλγόριθμο MAX έχει ως μόνο στόχο την καλλίτερη διαστασιολόγηση και καταγραφή των δυνατοτήτων του συστήματος για τα συγκεκριμένα σενάρια που εξετάστηκαν, υπό έναν αμιγώς ευκαιριακό αλγόριθμο ΔΠΔ, και συνεπώς θα αποτελέσει ένα σταθερό μέτρο σύγκρισης. Πρέπει επίσης να τονίσουμε ότι η πολιτική MAX επιδιώκει τη μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος και των χρηστών αυτού χωρίς να λαμβάνει υπόψη τα βραχυπρόθεσμα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Για το λόγο αυτό, κατά τη μέτρηση των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης των χρηστών υπό τον αλγόριθμο MAX, το παράθυρο παρατήρησής τους τέθηκε ίσο με 20 χρονοσχισμές, που αποτελεί και το πιο απαιτητικό κριτήριο από αυτά που θέσαμε.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε (Σχήμα 7) ότι οι πιθανότητες μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου είναι εξαιρετικά μικρές υπό τον αλγόριθμο USTF, ακόμα και για πολύ αυστηρά κριτήρια ρυθμαπόδοσης ($L_i=20$ χρονοσχισμές). Επίσης, οι πιθανότητες καθυστέρησης των χρηστών (δηλαδή, η πιθανότητα να μην εξυπηρετηθεί ένας χρήστης εντός χρονικού διαστήματος μεγαλύτερου από το παράθυρο παρατήρησής του) είναι πάντα μηδενικές για όλες τις περιπτώσεις βραχυπρόθεσμων κριτηρίων που μελετήθηκαν (δηλαδή ισχύει $\Pr[\hat{d}_{RT,i}(t) \geq L_i] = 0$ για $L_i = 20, \dots, 200 \ \forall i \in S_{RT}$). Επίσης, οι ρυθμοί μετάδοσης των χρηστών είναι σχεδόν ίδιοι και σταθεροί σε όλες τις εκδοχές που μελετήσαμε υπό τον USTF (Σχήμα 8) και ταυτόχρονα είναι επαρκώς μεγάλοι, ώστε να μεγιστοποιείται η ικανοποίησή τους από την ποιότητα υπηρεσίας που λαμβάνουν. Κατά αυτό τον τρόπο, ταυτόχρονα με την ικανοποίηση των κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, ο προτεινόμενος αλγόριθμος αυξάνει τον αριθμό των διαθέσιμων πόρων του συστήματος, οι οποίοι μπορούν περεταίρω να διατεθούν είτε σε επιπλέον χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, είτε σε χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, όπως θα διαφανεί στο επόμενο σενάριο (κατά το οποίο χρήστες και από τα δύο είδη υπηρεσιών συνυπάρχουν και ανταγωνίζονται για τους πόρους του συστήματος).

4.5.3. 2ο Σενάριο Προσομοίωσης (SC-II)

Το δεύτερο σενάριο παρουσιάζει συγκριτική μελέτη της απόδοσης του συστήματος υπό τους αλγόριθμους MAX, M-LWDF, EXP, ESFS και USTF για διαφορετικές συνθέσεις τύπου υπηρεσίας χρηστών στο σύστημα ($N_{RT}=1,3,5,7$). Αρχικά, υπενθυμίζουμε ότι οι αλγόριθμοι M-LWDF και EXP έχουν ως στόχο την εξασφάλιση πιθανοτικών κριτηρίων ρυθμαπόδοσης χρηστών με υπηρεσίες

πραγματικού χρόνου τα οποία δίδονται από την σχέση:

$$\Pr\left[\hat{d}_{RT,i}(t) \geq T_i\right] \quad (57)$$

το άνω φράγμα των οποίων τέθηκε ίσο με 0.05, ενώ ο ESFS αλγόριθμος στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των ελαστικών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων δικαιοσύνης χρόνου πρόσβασης στο μέσο των χρηστών, τα οποία ορίζονται ως:

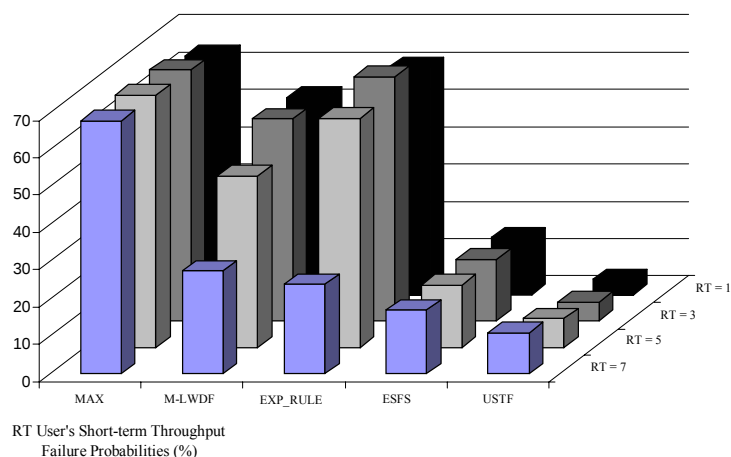
$$\Pr\left(S_i(t, L_i) < \phi_i L_i\right) \quad (58)$$

όπου η μεταβλητή $S_i(t, L_i)$ υποδηλώνει τον αριθμό των χρονοσχισμών κατά τις οποίες ο χρήστης i έλαβε πόρους συστήματος εντός παραθύρου παρατήρησης L_i χρονοσχισμών (από την χρονοσχισμή $(t-L_i+1)$ έως τη χρονοσχισμή t). Για λόγους αντικειμενικής σύγκρισης των αλγορίθμων τέθηκε $\phi_i = 1/N$. Τέλος, η πιθανότητα καθυστέρησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου υπό τον αλγόριθμο USTF θεωρείται ως η πιθανότητα να μη λάβει πόρους συστήματος για διάστημα μεγαλύτερο από το παράθυρο παρατήρησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσής του:

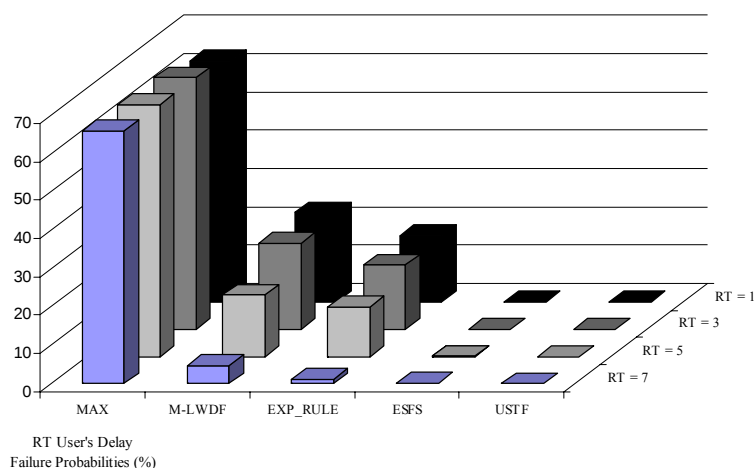
$$\Pr\left[\hat{d}_{RT,i}(t) \geq L_i\right] \quad (59)$$

Για λόγους δικαιοσύνης και αντικειμενικότητας κατά τη σύγκριση των παραπάνω αλγορίθμων θεωρήσαμε ότι $T_i=L_i$ και συνεπώς, τα πιθανοτικά κριτήρια καθυστέρησης των χρηστών είναι ίδια υπό όλες τις πολιτικές. Στο υπόλοιπο αυτής της μελέτης, με το όρο πιθανότητα αποτυχίας καθυστέρησης για χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου δηλώνεται η μη επίτευξη των παραπάνω κριτηρίων πιθανοτικής καθυστέρησης, όπως αυτά ορίζονται μέσω των σχέσεων (57), (58) και (59), αντίστοιχα.

Στα Σχήματα 9 και 10, παρουσιάζονται οι πιθανότητες αποτυχίας ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης και καθυστέρησης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, για όλες τις συνθέσεις (σενάρια) τύπου υπηρεσίας χρηστών που εξετάστηκαν και για όλους τους προς εξέταση αλγορίθμους. Επιπλέον, τα Σχήματα 11 και 12 δείχνουν τη μέση ρυθμαπόδοση ζεύξης καθόδου που επιτυγχάνεται για τους χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου αντίστοιχα, ενώ στο Σχήμα 13 διαφαίνεται η συνολική μέση ρυθμαπόδοση του συστήματος.

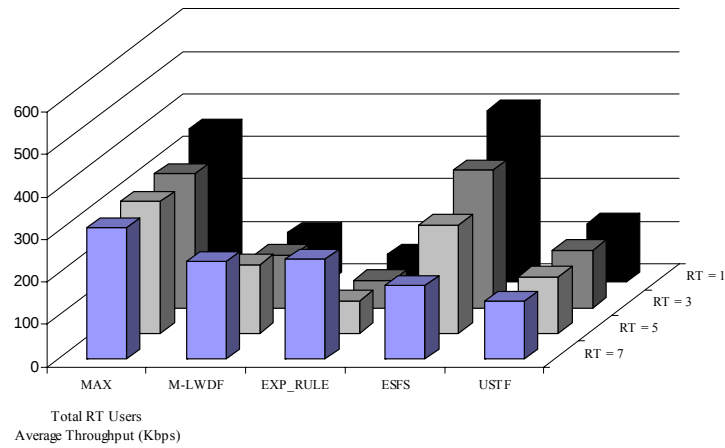


Σχήμα 9. Πιθανότητες αποτυχίας τήρησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης χρηστών πραγματικού χρόνου υπό το σενάριο SC-II.

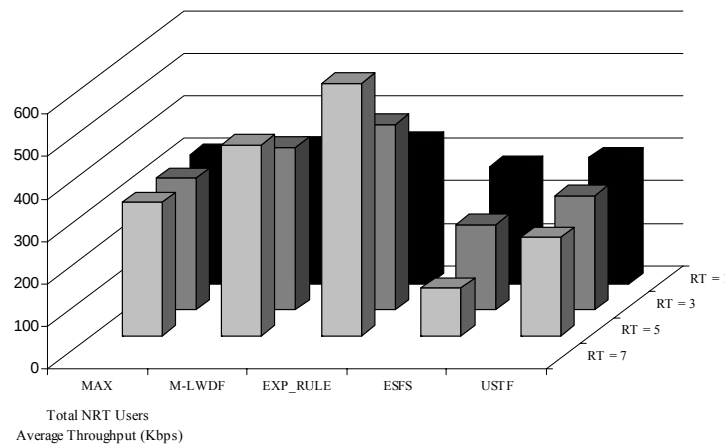


Σχήμα 10. Πιθανότητες αποτυχίας τήρησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων καθυστέρησης χρηστών πραγματικού χρόνου υπό το σενάριο SC-II.

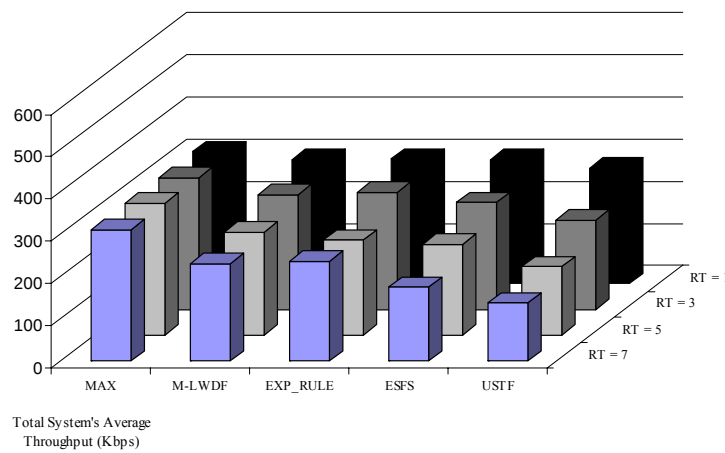
Μελετώντας αρχικά την επίτευξη των ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, παρατηρούμε με βάση τα αποτελέσματα του Σχήματος 9, ότι υπό την προτεινόμενη πολιτική USTF, η πιθανότητα οι χρήστες να μην ικανοποιούν τα βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσής τους είναι τουλάχιστον υποδεκαπλάσια σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνεται υπό τις υπόλοιπες πολιτικές και για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν. Παράλληλα, οι αντίστοιχες πιθανότητες αποτυχίας καθυστέρησής τους είναι πάντα μικρότερες από 0.005 (δηλαδή ισχύει $\Pr[\hat{d}_{RT,i}(t) \geq 20 \text{ (slots)}] \leq 0.005$), όπως διαφαίνεται από το Σχήμα 10. Τέλος, η διατήρηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου σε τιμές πάντα άνω του επιθυμητού (Σχήμα 11), επιβεβαιώνει την πλήρη εξασφάλιση των κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας τους υπό την προτεινόμενη πολιτική.



Σχήμα 11. Μέση ρυθμαπόδοση χρηστών πραγματικού χρόνου υπό το σενάριο SC-II.



Σχήμα 12. Μέση ρυθμαπόδοση χρηστών μη πραγματικού χρόνου υπό το σενάριο SC-II.



Σχήμα 13. Μέση ρυθμαπόδοση συστήματος υπό το σενάριο SC-II.

Με βάση τα δεδομένα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 11 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η ρυθμαπόδοση των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου είναι σχεδόν σταθερή, ανεξαρτήτως του μεγέθους του πληθυσμού τους στο σύστημα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η πολιτική USTF αναθέτει πόρους συστήματος σε χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου μόνο όταν η διασφάλιση των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσής τους το απαιτεί, ενώ, σε αντίθετη περίπτωση, μειώνει την πιθανότητα εξυπηρέτησής τους ακόμα και αν η στιγμιαία ποιότητα των καναλιών τους είναι καλύτερη από των υπολοίπων. Επιπροσθέτως, το πλεόνασμα των πόρων συστήματος που προκύπτει από την παραπάνω πολιτική, δεν αναδιανέμεται μόνο σε χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου οι οποίοι υποφέρουν από στιγμιαία κακή ποιότητα καναλιού, με στόχο την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας μη εξασφάλισης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσής τους, όπως διαφαίνεται στο Σχήμα 9, αλλά και στους χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου με στόχο τη μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσής τους. Η τελευταία παρατήρηση επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα του Σχήματος 12, βάσει των οποίων η ρυθμαπόδοση των χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου είναι ελάχιστα μικρότερη υπό την πολιτική USTF σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνεται υπό την πολιτική MAX, ειδικά όταν ο αριθμός των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου στο σύστημα είναι μικρός.

Επικεντρώνοντας την προσοχή μας στις επιδόσεις των αλγορίθμων M-LWDF και EXP, οι οποίοι θέτουν τα ίδια πιθανοτικά κριτήρια καθυστέρησης για χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, παρατηρούμε ότι η ανάθεση πόρων συστήματος (ρυθμός μετάδοσης δεδομένων) σε αυτή την κατηγορία χρηστών είναι πολύ περιορισμένη. Έτσι, ακόμα και αν και οι δύο πολιτικές επιτυγχάνουν τη διασφάλιση των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων καθυστέρησης των χρηστών, αφού κατάλληλοι χρόνοι πρόσβασης στο μέσο διασφαλίζονται για αυτούς, αποτυγχάνουν στην ικανοποίηση των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσής τους. Το παραπάνω μη επιθυμητό αποτέλεσμα οφείλεται στην αδυναμία των παραπάνω αλγορίθμων να λάβουν υπόψη κατά τον χρονισμό των χρηστών, και ιδιαίτερα των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, τη διασπορά των δεδομένων που αυτοί έλαβαν εντός βραχυπρόθεσμων παραθύρων παρατήρησης. Συνεπώς, από την στιγμή που η ικανοποίηση ενός χρήστη μεγιστοποιείται όταν τα κριτήρια καθυστέρησής του πληρούνται, ο ευκαιριακός χαρακτήρας των αλγορίθμων, εντός βραχυπρόθεσμων χρονικών διαστημάτων, δεν αναδεικνύεται με αποτέλεσμα, την μη διασφάλιση του σταθερού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που απαιτούν οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Επιπλέον, λόγω των παραπάνω επιλογών, υπό τις πολιτικές M-LWDF και EXP οι χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου ευνοούνται σε υπέρμετρο βαθμό, καταλαμβάνοντας το μεγαλύτερο ποσοστό των διαθέσιμων πόρων του συστήματος (Σχήμα 12).

Στην αντίθετη πλευρά, ο αλγόριθμος ESFS, λόγω του στόχου που θέτει για δίκαιη κατανομή χρόνου πρόσβασης στο μέσο σε χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου εντός βραχυπρόθεσμων χρονικών διαστημάτων, παράλληλα με την ικανοποίηση των περιορισμών καθυστέρησής τους,

οδηγείται στην πολύ συχνή ανάθεση πόρων συστήματος σε αυτούς (αριθμό χρονοσχισμών εξυπηρέτησης), όπως αυτό παρατηρείται από το Σχήμα 10. Αυτό, προκαλεί με τη σειρά του πολύ μεγάλους ανεπιθύμητους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων για τους χρήστες αυτούς (Σχήμα 11), το ακριβώς αντίθετο δηλαδή, από ότι στην περίπτωση των αλγορίθμων M-LWDF και EXP. Παρόλα αυτά, καθώς κατά την κατανομή των πόρων του συστήματος, όπως αυτό εξελίσσεται υπό τον αλγόριθμο ESFS, δεν λαμβάνονται υπόψη τα κριτήρια ρυθμαπόδοσης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου εντός βραχέων χρονικών διαστημάτων, τα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίες τους δεν ικανοποιούνται. Επιπροσθέτως, η ρυθμαπόδοση των χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου είναι εξαιρετικά μικρή καθώς οι διαθέσιμοι πόροι του συστήματος που κατανέμονται μεταξύ αυτών είναι περιορισμένοι (Σχήμα 12).

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη μας, εν συνεχεία αναλύουμε τα αποτελέσματα του Σχήματος 13, στο οποίο παρουσιάζεται η μέση συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος υπό όλες τις πολιτικές που εξετάστηκαν. Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι πολιτικές που εξετάστηκαν και είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση μετάδοσης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (i.e. M-LWDF, EXP, ESFS), παρότι επιτυγχάνουν μεγαλύτερες τιμές συνολικής μέσης ρυθμαπόδοσης σε σχέση με την προτεινόμενη πολιτική USTF, το παραπάνω μέγεθος δεν αποτελεί κατάλληλο δείκτη της συνολικής απόδοσης του συστήματος, ιδιαίτερα όταν καλείται να εξυπηρετήσει χρήστες με πολλαπλά κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας. Ο λόγος είναι ότι η μεγάλη συνολική μέση ρυθμαπόδοση συστήματος που επιτυγχάνεται μέσω αυτών των αλγορίθμων, γίνεται εις βάρος των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, καθώς οι πιθανότητες μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας τους είναι μεγάλες (Σχήμα 9). Αυτό συμβαίνει διότι η διασπορά των πόρων του συστήματος που λαμβάνουν οι χρήστες εντός βραχυπρόθεσμων χρονικών διαστημάτων είναι αναποτελεσματική. Συνεπώς, η υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας τους είναι αναπόφευκτη.

5 Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε Ασύρματα CDMA Κυψελωτά Δίκτυα – Η Περίπτωση Ετερογενούς Μοντέλου Συστήματος

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύσαμε τον τρόπο λειτουργίας και σχεδιασμού ευκαιριακών αλγορίθμων διαχείρισης πόρων δικτύου ενός ασύρματου CDMA κυψελωτού δικτύου και μελετήσαμε την απόδοση αυτού όταν επιδιώκεται η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου, υπό τη θεώρηση ομογενούς μοντέλου συστήματος. Στα επόμενα κεφάλαια η παραπάνω θεώρηση θα καταρριφθεί, το μοντέλο του συστήματος θα διευρυνθεί σε ετερογενές, ενώ ο αρχικός μας στόχος θα παραμείνει ο ίδιος, δηλαδή η εύρεση βέλτιστων αλγορίθμων ΔΠΔ CDMA δικτύου μέσω των οποίων επιτυγχάνεται όχι μόνο η μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος αλλά και η ταυτόχρονη ικανοποίηση πολλαπλών και πολλές φορές αντικρουόμενων ΚΠΥ διαφόρων τύπων υπηρεσίας χρηστών.

Οι θεμελιώδεις διαφοροποιήσεις που επιτρέπουν το χαρακτηρισμό ενός μοντέλου συστήματος κυψέλης CDMA ασύρματου δικτύου ως ετερογενές [57] σε σχέση με το ομογενές, είναι οι ακόλουθες:

α) Λαμβάνεται υπόψη άνω φράγμα ρυθμού μετάδοσης δεδομένων για όλους τους χρήστες είτε κατά τη ζεύξη ανόδου είτε κατά τη ζεύξη καθόδου, λόγω των εγγενών φυσικών περιορισμών και δυνατοτήτων μετάδοσης δεδομένων είτε του πομπού στο σταθμό βάσης της κυψέλης είτε στις συσκευές των ασύρματων χρηστών αντίστοιχα.

β) Δεν θεωρείται πλέον διακριτή σχέση μεταξύ του λόγου ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές (E_b/I_o) και του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που επιτυγχάνεται για κάθε χρήστη (όπως αυτή που περιγράφεται στο πίνακα 1), αλλά συνεχής γραμμική σχέση βάσει των σχέσεων (1) και (3).

γ) Λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα λανθασμένης μετάδοσης δεδομένων (πακέτων δεδομένων) χρήστη η οποία σχετίζεται άμεσα με το είδος της διαμόρφωσης (modulation) που χρησιμοποιείται. Συνεπώς, αντί να θεωρείται απλά ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων των χρηστών ως πόρος του συστήματος που κατανέμεται σε αυτούς, στοχεύοντας είτε στη μεγιστοποίησή του είτε στη διασφάλιση των ΚΠΥ που σχετίζονται έμμεσα ή άμεσα με αυτό το μέγεθος, λαμβάνεται υπόψη ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (goodput) που επιτυγχάνεται για τον εκάστοτε χρήστη είτε στο σταθμό βάσης (κατά τη ζεύξη ανόδου) είτε στο κινητό τερματικό (κατά τη ζεύξη καθόδου).

Η ανάλυση της συμπεριφοράς και της απόδοσης του συστήματος υπό τη θεώρηση ομογενούς μοντέλου, παρόλη την απλότητά του, έχει μεγάλη πρακτική και θεωρητική σημασία, για αυτό και μονοπώλησε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας το πρώτο μισό της τρέχουσας δεκαετίας. Από πρακτικής πλευράς, η μελέτη ενός ευκαιριακού αλγορίθμου ΔΠΔ σε ομογενές σύστημα και τα

αναλυτικά αποτελέσματα που εξάγονται προσεγγίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την πραγματική συμπεριφορά του συστήματος λόγω των εγγενών περιορισμών που επέβαλαν οι αρχικές εκδόσεις του μοντέλου EV-DO (HDR). Αναλυτικότερα, οι τότε προδιαγραφές του συστήματος καθόριζαν την εξυπηρέτηση ενός μόνο χρήστη ανά χρονοσχισμή και θεωρούσαν διακριτές τιμές αντιστοίχισης μεταξύ του λόγου E_b/I_o κάθε χρήστη και του αντίστοιχου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων του. Από θεωρητικής πλευράς, παρά την ευκολία διαχείρισης των προβλημάτων βελτιστοποίησης που ανέκυπταν, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα, τεχνικές επιλογές και σχεδιαστικές ιδιότητες ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ, αρκετές από τις οποίες υιοθετήθηκαν και στην περίπτωση ετερογενούς μοντέλου συστήματος, όπως θα γίνει φανερό στη συνέχεια.

Πρακτικά, η θεώρηση ετερογενούς μοντέλου συστήματος έχει ως αποτέλεσμα τις ακόλουθες διαφοροποιήσεις ως προς τον τρόπο που μελετάται, αναλύεται και σχεδιάζεται μια ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ:

i) Η αποδεδειγμένα βέλτιστη λύση της εξυπηρέτησης ενός μόνο χρήστη ανά χρονοσχισμή, και μάλιστα με μέγιστη ισχύ εκπομπής κατά τη ζεύξη καθόδου, δεν ισχύει στην περίπτωση ετερογενούς μοντέλου συστήματος. Συνεπώς, το ερώτημα “ποιός χρήστης πρέπει να εξυπηρετηθεί την επόμενη χρονοσχισμή;” μετατρέπεται στο “ποιοί χρήστες πρέπει να εξυπηρετηθούν την επόμενη χρονοσχισμή;”, από το σύνολο των ενεργών χρηστών στο σύστημα.

ii) Ως αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος ΔΠΔ πρέπει να καθορίζει και την ισχύ μετάδοσης και το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων του εκάστοτε χρήστη που τελικά εξυπηρετείται την εκάστοτε χρονοσχισμή. Έτσι, οι πόροι του συστήματος που πρέπει ανά χρονοσχισμή να κατανεμηθούν με βέλτιστο τρόπο δεν είναι μόνο ο ρυθμός μετάδοσης των χρηστών, αλλά και η ισχύς και ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων τους.

iii) Τα προβλήματα βέλτιστης κατανομής πόρων του συστήματος διαφοροποιούνται πλήρως (βλέπε σχέσεις (1) και (3)), κάτι που δεν συνέβαινε στην περίπτωση ομογενούς μοντέλου συστήματος.

iv) Τέλος, η διαδικασία επίλυσης των προβλημάτων βελτιστοποίησης που προκύπτουν αυξάνεται, καθώς περνάμε από την περίπτωση γραμμικών ή κυρτών προβλημάτων βελτιστοποίησης [58], [59] (linear or convex optimization problems) στην περίπτωση μη-κυρτών προβλημάτων [60]-[67] (non-convex optimization problems).

Θεμελιώδης στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι ο καθορισμός κατάλληλων ευκαιριακών πολιτικών ΔΠΔ ασύρματων CDMA δικτύων υπό τη θεώρηση ετερογενούς μοντέλου συστήματος, με στόχο όχι μόνο τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης αυτού αλλά και την ταυτόχρονη αποτελεσματική διασφάλιση των ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού και πραγματικού χρόνου, και για τη ζεύξη ανόδου και για τη ζεύξη καθόδου. Αναφέρεται, ότι κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας, η ερευνητική κοινότητα είχε ενασχοληθεί και είχε καλύψει μέρος μόνο του παραπάνω προβλήματος καθώς οι έως τώρα προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί σε

προβλήματα βέλτιστης κατανομής πόρων δικτύου σε χρήστες με υπηρεσίες δεδομένων μη πραγματικού χρόνου. Η παρούσα μελέτη προτείνει, αναλύει θεωρητικά και επιβεβαιώνει πειραματικά, βέλτιστες λύσεις και αντίστοιχους αλγορίθμους ΔΠΔ, όταν στο σύστημα συνυπάρχουν μαζί με τους χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου και χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, παρουσιάζεται αρχικά η μοντελοποίηση ενός βασικού προβλήματος βέλτιστης κατανομής πόρων συστήματος υπό τη θεώρηση ετερογενούς μοντέλου συστήματος. Εν συνεχεία, σκιαγραφείται συνοπτικά η μεθοδολογία επίλυσής του, καθώς λόγω της μη-κυρτότητας των προβλημάτων βελτιστοποίησης που πραγματευόμαστε, απαιτείται εξειδικευμένη διαδικασία ανάλυσης για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης. Μέσω της ακόλουθης προ-μελέτης επιδιώκεται η εισαγωγή μη εξοικειωμένων αναγνωστών στην επίλυση τέτοιου τύπου μη-κυρτών προβλημάτων βελτιστοποίησης, με στόχο την καλλίτερη και πιο περιεκτική παρουσίαση των προβλημάτων που πραγματεύεται η παρούσα διδακτορική διατριβή καθώς και της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την επίλυσή τους, όπως αυτή παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια.

5.1 Θεμελιώδες Πρόβλημα Βέλτιστης Κατανομής Πόρων Ασύρματου CDMA Συστήματος υπό Ετερογενές Περιβάλλον

Βασισμένοι στην περιγραφή του βασικού προβλήματος βέλτιστης κατανομής πόρων CDMA δικτύου κατά τη ζεύξη καθόδου, όταν σκοπός είναι η επίτευξη μέγιστης συνολικής ρυθμαπόδοσης (πολιτική MAX, σχέση (5)), το παρακάτω πρόβλημα:

$$\begin{aligned} \max_{Q \in \Theta} \quad & \sum_{i=1}^N E \left(U_{Q(\vec{U})} I_{Q(t)=i} \right) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_i P_i \leq P_{\max} \end{aligned}$$

μπορεί να μετασχηματιστεί στο ακόλουθο, ανά χρονοσχιμή, πρόβλημα:

$$\begin{aligned} \max_{R(t)} \quad & \sum_{i=1}^N U_i(R_i(t)) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^N P_i(t) \leq P_{\max} \\ & 0 \leq P_i(t) \leq P_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

λαμβάνοντας υπόψη α) την κυρτή ή γραμμική σχέση ανάμεσα στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων του κάθε χρήστη και τη συνάρτηση ευχαρίστησής του καθώς και β) την ανεξαρτησία των καναλιών των χρηστών ως τυχαίες ανεξάρτητες μεταβλητές, που συντελούν στην τεκμηρίωση του επιχειρήματος, ότι το πρόβλημα της μεγιστοποίησης της συνολικής μέσης ικανοποίησης (ρυθμαπόδοσης) του

εκάστοτε χρήστη και κατ' επέκταση του συστήματος, ισοδυναμεί² με το πρόβλημα της μεγιστοποίησης των παραπάνω στόχων βελτιστοποίησης (objective functions) ανά χρονοσχισμή [57]. Στην περίπτωση ετερογενούς μοντέλου συστήματος το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίζεται [57] ως εξής:

$$\begin{aligned} \max_{\bar{R}(t), \bar{P}(t)} \quad & \sum_{i=1}^N U_i^*(R_i(t), \bar{P}(t)) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^N P_i(t) \leq P_{\max} \\ & 0 \leq P_i(t) \leq P_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \\ & 0 \leq R_i(t) \leq R_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (60)$$

όπου η συνάρτηση ευχαρίστησης ενός χρήστη i ορίζεται ως:

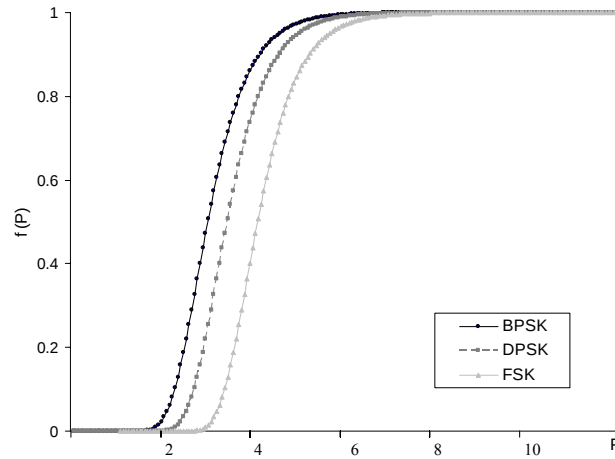
$$U_i^*(R_i(t), \bar{P}(t)) = R_i(t) f_i(\gamma_i(t)) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (61)$$

Η παραπάνω συνάρτηση εκφράζει πλέον την ευχαρίστηση του χρήστη, και κατ' επέκταση της υπηρεσίας του, ως προς την πραγματική ρυθμαπόδοση (goodput) που επιτυγχάνεται και όχι μόνο ως προς το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ανά χρονοσχισμή $R(t)$. Η συνάρτηση απόδοσης $f_i()$ (efficiency function) εκφράζει την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης ενός πακέτου δεδομένων από το σταθμό βάσης στο χρήστη i , στην περίπτωση ζεύξης καθόδου ή αντίστροφα, κατά τη ζεύξη ανόδου. Η f είναι αύξουσα συνάρτηση ως προς το λόγο ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές γ . Η συνάρτηση απόδοσης εξαρτάται από το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται (modulation and coding scheme) για τη μετάδοση των δεδομένων, όταν ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρονται/μεταφέρει δεδομένα στο/ο χρήστης, διατηρείται σταθερός κατά τη διάρκεια μίας χρονοσχισμής. Σύμφωνα με το [57] η συνάρτηση απόδοσης ενός χρήστη i αποτελεί σιγμοειδή συνάρτηση ως προς γ_i και κατ' επέκταση ως προς την ισχύ μετάδοσής του (ή προς αυτόν), όταν ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων του παραμένει σταθερός (δηλαδή εντός κάθε χρονοσχισμής) και έχει τις ακόλουθες ιδιότητες (Σχήμα 14).

1. η συνάρτηση απόδοσης είναι αύξουσα συνάρτηση ως προς γ_i
2. η συνάρτηση απόδοσης είναι συνεχής και διπλά παραγωγίσιμη ως προς γ_i ,
3. ισχύει $f_i(0)=0$, έτσι ώστε όταν η ισχύς εκπομπής του χρήστη ή μετάδοσης προς το χρήστη είναι μηδενική ($P_i = 0$), η ευχαρίστησή του να μηδενίζεται $U_i^*(0) = 0$.
4. ισχύει $f_i(\infty) = 1$.

Η ισχύς των παραπάνω ιδιοτήτων έχει ελεγχθεί και αποδειχθεί για διάφορα πρακτικά σενάρια προσομοίωσης με μεγέθη πακέτων M , όπου $M \geq 100 \text{bits}$, σε διάφορες ερευνητικές μελέτες ([68],[69]).

² Με το όρο «ισοδυναμεί» αναφερόμαστε στην επίτευξη των ακριβώς ίδιων λύσεων υπό τα δύο προβλήματα για δεδομένη χρονοσχισμή.



Σχήμα 14. Συνάρτηση απόδοσης f_i για διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης (BPSK, DPSK, FSK).

Λόγω του σιγμοειδούς³ σχήματός της, η μορφή της συνάρτησης απόδοσης $f_i(\gamma_i) = f_i(\gamma_i, a_i, b_i)$ καθορίζεται από δύο παραμέτρους, τις a_i , b_i οι οποίες καθορίζουν το βαθμό κλίσης της (steepness) και το σημείο καμπής αυτής (inflection point), δηλαδή το μοναδικό σημείο στο πεδίο ορισμού μιας σιγμοειδούς συνάρτησης κατά το οποίο αλλάζει το πρόσημο της δεύτερης παραγώγου της (από θετικό σε αρνητικό).

Εφ' εξής, ως μοντέλο συστήματος θα θεωρούμε μόνο την περίπτωση ετερογενούς μοντέλου.

5.2 Μεθοδολογία Ανάλυσης Μη-Κυρτών Προβλημάτων Βέλτιστης Κατανομής Πόρων Ασύρματου CDMA Συστήματος υπό Ετερογενές Περιβάλλον

Η ύπαρξη της σιγμοειδούς συνάρτησης απόδοσης f καθώς και η δυνατότητα επιλογής κυρτών, κοίλων ή μη-κυρτών (π.χ. σιγμοειδών) συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών U^* (Σχήμα 2), καθιστούν το πρόβλημα βελτιστοποίησης (60) καθώς και τις παραλλαγές αυτού, ως ένα μη-κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης του οποίου η μελέτη και επίλυση απαιτεί αναλυτική διερεύνηση, πέραν των τετριμμένων μεθοδολογιών [58], [59]. Συγκεκριμένα, η περίπτωση μη-κυρτών προβλημάτων (non-convex optimization problems) ευκαιριακής κατανομής πόρων ασύρματων CDMA συστημάτων διερευνήθηκε στα μέσα της τρέχουσας δεκαετίας, κατά τα πρώτα χρόνια πραγμάτωσης της παρούσας διδακτορικής διατριβής, από την ερευνητική ομάδα των Lee, Mazumdar και Shroff [80], [82], οι οποίοι πρότειναν κατάλληλους δυναμικούς (χρονικά) αλγορίθμους για την εύρεση της Pareto-βέλτιστης λύσης τέτοιων προβλημάτων και επέδειξαν την ασυμπτωτική βελτιστότητά τους

³ Γενικευμένος ορισμός $f(\gamma, a, b) = c \left\{ \frac{1}{1 + e^{-a(\gamma - b)}} - d \right\}$ όπου $c = (1 + e^{ab})/e^{ab}$ και $d = 1/(1 + e^{ab})$ για λόγους κανονικοποίησης.

σε σχέση με το συνολικό αριθμό των χρηστών στο σύστημα. Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι βασίζονται στη διαρκή διαπραγμάτευση μεταξύ της κυψέλης και των χρηστών της εικονικής τιμής κόστους με την οποία η κυψέλη “πουλά” πόρους του συστήματος στους χρήστες αυτού, ώστε να καθοριστεί η βέλτιστη επιλογή των χρηστών που θα εξυπηρετηθούν την εκάστοτε χρονοσχισμή καθώς και των πόρων που θα λάβουν (dynamic pricing-based algorithms).

Στη συνέχεια ακολουθεί η σκιαγράφηση της μεθοδολογίας επίλυσης ενός γενικευμένου μη-κυρτού προβλήματος κατανομής πόρων CDMA δικτύου, όταν ως πόρος συστήματος ανά χρονοσχισμή θεωρείται η ποσότητα X , η οποία κατανέμεται στους N χρήστες αυτού και είναι άνω φραγμένη από μια μέγιστη δυνατή τιμή X_{max} . Ως εκ τούτου, το γενικευμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης που καλούμαστε να επιλύσουμε δίδεται ως εξής:

$$\begin{aligned} & \max_{\bar{X}} \sum_{i=1}^N U_i(X_i) \\ & s.t. \quad \sum_{i=1}^N X_i \leq X_{max}, \quad 0 \leq X_i \leq X_{max} \quad i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (62)$$

όπου $\bar{X} = \{X_1, \dots, X_N\}$ θεωρείται το διάνυσμα κατανομής πόρων του συστήματος και η συνάρτηση ευχαρίστησης για κάθε χρήστη U_i είναι κοίλη, κυρτή ή σιγμοειδής συνάρτηση ως προς X_i .

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εύρεσης της βέλτιστης λύσης του προβλήματος (62), ο οποίος αποτελείται από δύο διακριτά μέρη, προκύπτει από την αναλυτική μελέτη και επίλυση της πρώτης και της δεύτερης συνθήκης βελτιστοποίησης του προς εξέταση προβλήματος (δηλαδή τη διερεύνηση των Karush–Kuhn–Tucker συνθηκών του προβλήματος (KKT conditions)). Κατά τη πρώτη φάση, η οποία καλείται “διαδικασία επιλογής χρηστών”, επιλέγονται εκείνοι οι χρήστες από το σύνολο των χρηστών του συστήματος, στους οποίους θα ανατεθούν πόροι με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιηθεί η συνολική ευχαρίστηση που θα επιτευχθεί. Κατά τη δεύτερη φάση, η οποία καλείται “διαδικασία βέλτιστης ανάθεσης πόρων”, κατανέμονται οι πόροι του συστήματος στους χρήστες που επιλέχθηκαν, με τέτοιο τρόπο, ώστε να μεγιστοποιηθεί η συνολική ευχαρίστηση του συστήματος.

Αναλυτικότερα, αποδεικνύεται αρχικά ότι η βέλτιστη λύση του προβλήματος (62) επιτυγχάνεται μόνο όταν ο σταθμός βάσης κατανείμει το σύνολο των πόρων του, X_{max} , στους χρήστες του συστήματος [80], [82]. Δηλαδή, βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται όταν ισχύει η παρακάτω ισότητα:

$$\sum_{i=1}^N X_i = X_{max} . \quad (63)$$

Λόγω της ιδιότητας (63), η Λαγκρασιανή του προβλήματος (62) είναι διαχωρίσιμη,

$$L(\bar{X}, \lambda) = \sum_{i=1}^N U_i(X_i) - \lambda(X_{max} - \sum_{i=1}^N X_i)$$

δηλαδή η μεγιστοποίησή της, η οποία απαιτείται για τη λύση του δυικού προβλήματος του αρχικού «πρωτεύοντος» προβλήματος (62), δηλαδή

$$\begin{aligned}
& \min_{\lambda} \{X_{\max} - \sum_{i=1}^N X_i(\lambda)\} \\
& s.t. \quad \bar{X}(\lambda) = \arg \max_{\bar{0} \leq \bar{X} \leq \bar{X}_{\max}} \{L(\bar{X}, \lambda)\} \\
& \sum_{i=1}^N X_i(\lambda) \leq X_{\max}
\end{aligned}$$

προκύπτει από τη μεγιστοποίηση ανά χρήστη των επιμέρους συναρτήσεων «δικτύου» (net utility functions) των χρηστών:

$$X_i(\lambda) \in \left\{ 0 \leq x_i \leq X_{\max} \mid L_i(x_i, \lambda) = \arg \max_{0 \leq X \leq X_{\max}} L_i(x_i, \lambda) = \arg \max_{0 \leq X \leq X_{\max}} \{U_i(X) - \lambda X\} \right\}. \quad (64)$$

- Διαδικασία Επιλογής Χρηστών.

Ο ευκαιριακός αλγόριθμος ΔΠΔ επιλέγει τους χρήστες εκείνους που θα λάβουν μη-μηδενικούς πόρους βάσει της τιμής της παραμέτρου $\lambda_i^{\max}$ που ανακύπτει για κάθε χρήστη i . Η παράμετρος $\lambda_i^{\max}$ αναπαριστά τη μέγιστη τιμή κόστους ανά μονάδα πόρων συστήματος που είναι διατεθειμένος ο κάθε χρήστης i να “πληρώσει” (maximum willingness to pay) ώστε να μεγιστοποιήσει τη δική του συνάρτηση δικτύου $X_i(\lambda) = \arg \max_{0 \leq X \leq X_{\max}} \{U_i(X) - \lambda X\}$, δηλαδή να μεγιστοποιήσει την δική του συνάρτηση ευχαρίστησης μείον το “κόστος” των πόρων του συστήματος που θα καταναλωθούν για να επιτευχθεί η ζητούμενη μεγιστοποίηση:

$$\lambda_i^{\max} = \min \left\{ \lambda \geq 0 \mid \max_{0 \leq X \leq X_{\max}} \{U_i(X) - \lambda X\} = 0 \right\} \quad (65)$$

Λόγω της διαχωρισιμότητας της Λαγκρασιανής του προς εξέταση προβλήματος ως προς X_i $i=1, \dots, N$, κάθε χρήστης i μπορεί να υπολογίσει ατομικά και ανεξάρτητα τη “βέλτιστη τιμή του κόστους” $\lambda_i^{\max}$ ως εξής:

$$\lambda_i^{\max} = \begin{cases} \left. \frac{\partial U_i(X_i)}{\partial X_i} \right|_{X=0} & \text{αν η } U_i \text{ είναι κοίλη} \\ \left. \frac{\partial U_i(X_i)}{\partial X_i} \right|_{X=X^*} & \text{αν η } U_i \text{ είναι σιγμοειδής} \\ \frac{U_i(X_{\max})}{X_{\max}} & \text{συνάρτηση και υπάρχει η } X^* \\ & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (66)$$

όπου X_i^* είναι η μοναδική λύση της εξίσωσης:

$$U_i(X_i) - X_i \frac{\partial U_i(X_i)}{\partial X_i} = 0 \quad \text{για } 0 \leq X_i \leq X_{\max} \quad (67)$$

Ο ευκαιριακός αλγόριθμος ΔΠΔ κατατάσσει τους χρήστες κατά φθίνουσα σειρά με βάση την ατομική τιμή του βέλτιστου κόστους τους και στην συνέχεια επιλέγει εκείνους τους T πρώτους για τους οποίους ισχύει ότι:

$$T = \arg \max_{1 \leq t \leq N} \left\{ \sum_{i=1}^t X_i(\lambda_t^{\max}) \leq X_{\max} \right\} \quad (68).$$

Αναλυτικά ο αλγόριθμος επιλογής χρηστών δίδεται στο Παράρτημα III.A.

- *Διαδικασία Βέλτιστης Ανάθεσης Πόρων.*

Για τους χρήστες που επιλέχθηκαν γίνεται η τελική ανάθεση πόρων του συστήματος μέσω ενός αλγορίθμου δυαδικής αναζήτησης, που έχει ως στόχο τον καθορισμό των βέλτιστων τιμών $X_i(\lambda)$ ώστε να μεγιστοποιηθεί η συνολική απόδοση του συστήματος. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται μέσω της εύρεσης της “βέλτιστης τιμής πόρων δικτύου” λ^* , δηλαδή της τιμής λ για την οποία ισχύει ότι $\sum_{i=1}^T X_i(\lambda^*) = X_{\max}$, αφού βάσει της (63), μόνο και μόνο τότε η ανακύπτουσα λύση είναι η βέλτιστη. Γνωρίζοντας την τιμή της βέλτιστης τιμής πόρων δικτύου λ^* μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τους πόρους κάθε χρήστη βάσει της (64). Αναλυτικά ο αλγόριθμος βέλτιστης ανάθεσης πόρων δίδεται στο Παράρτημα III.B.

Ολοκληρώνοντας την ανάλυσή μας, είναι σημαντικό να επισημανθεί ο ρόλος και η σπουδαιότητα των παραμέτρων $\lambda_i^{\max}$ και λ^* . Σύμφωνα με τα παραπάνω, η τιμή της *βέλτιστης τιμής κόστους* $\lambda_i^{\max}$ ενός χρήστη i ανά χρονοσχισμή παίζει πρωτεύοντα ρόλο όχι μόνο στην προτεραιότητα επιλογής του, αφού όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητά του να επιλεγεί στο να λάβει πόρους του δικτύου, αλλά και στο ποσοστό των τελικών πόρων που θα του ανατεθούν. Τέλος, η τιμή της παραμέτρου *βέλτιστης τιμής πόρων δικτύου* λ^* μπορεί διαισθητικά να χαρακτηριστεί ως ιδανικός δείκτης του συνολικού φόρτου του συστήματος (δηλαδή, μικρότερες τιμές της παραμέτρου λ^* υποδηλώνουν έμμεσα κυψέλη με ελαφρύ φορτίο και συνεπώς υψηλή διαθεσιμότητα πόρων).

Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται αναλυτικά το σύνολο των ερευνητικών προσπαθειών που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής και είχαν ως στόχο τη μελέτη του προβλήματος της βέλτιστης κατανομής πόρων συστήματος σε CDMA ασύρματα δίκτυα με υπηρεσίες μη πραγματικού και πραγματικού χρόνου, υπό ετερογενές μοντέλο συστήματος, κατά τη ζεύξη καθόδου και τη ζεύξη ανόδου, αντίστοιχα. Η πορεία ανάλυσης κάθε κεφαλαίου δομείται ως εξής:

A. Αρχικά, παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες ερευνητικές προσπάθειες της διεθνούς βιβλιογραφίας στους προς εξέταση ερευνητικούς τομείς.

B. Εν συνεχεία, επισημαίνονται τα ερευνητικά κενά και οι αδυναμίες που παρατηρήθηκαν, αναλύονται οι στόχοι τους οποίους θέσαμε και αναδεικνύεται η αναγκαιότητα επίτευξής τους.

Γ. Ακολούθως, περιγράφονται τα προβλήματα βελτιστοποίησης που τέθηκαν για την επίτευξη των στόχων μας και προδιαγράφεται συνοπτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επίλυσή τους.

Δ. Τέλος, κάθε ένα από τα παραπάνω βήμα της μεθοδολογίας που προδιαγράφηκαν αναπτύσσεται αναλυτικά σε ξεχωριστά αυτοτελή υποκεφάλαια, ώστε να δίνεται η δυνατότητα είτε της συγκεντρωτικής παρουσίασης είτε της επιλεκτικής εξειδικευμένης ανάλυσης ανά περιοχή ενδιαφέροντος.

6 Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε CDMA Δίκτυα με Υπηρεσίες Μη Πραγματικού και Πραγματικού Χρόνου υπό Ετερογενές Μοντέλο Συστήματος – Η Ζεύξη Καθόδου

Κατά τη διάρκεια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, πλήθος εξαιρετικών ερευνητικών προσπαθειών δημοσιεύθηκαν, προσπαθώντας να δώσουν λύση στο πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων δικτύου, δηλαδή της εύρεσης των βέλτιστων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων καθώς και των ισχύων μετάδοσης των χρηστών, για τη ζεύξη καθόδου ενός CDMA συστήματος [70]-[72]. Στόχος τους αποτελεί η βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος μέσω της εκμετάλλευσης του ευκαιριακού χαρακτήρα του (πρόβλημα (60)), καθώς και η διασφάλιση διαφόρων ΚΠΥ των χρηστών αυτού [41], [43], [73]. Κοινό χαρακτηριστικό της πλειονότητας αυτών αποτελεί η χρήση συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών, έννοια υιοθετημένη από το τομέα των οικονομικών επιστημών, με στόχο την αντιμετώπιση της ετερογένειας των χρηστών, καθώς και των πολλαπλών και πολλές φορές αντικρουόμενων ΚΠΥ των υπηρεσιών τους. Καθώς η συνάρτηση ευχαρίστησης ενός χρήστη αντικατοπτρίζει με κανονικοποιημένο τρόπο την ευχαρίστησή του από την ποιότητα υπηρεσίας που λαμβάνει, διαφορετικά ΚΠΥ χρηστών μπορούν να ενταχθούν σε ένα κοινό πρόβλημα βελτιστοποίησης [74]-[79].

Η πλειονότητα των ερευνητικών προσπαθειών στον παραπάνω τομέα αφορά την εξυπηρέτηση χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου. Συνεπώς, οι συναρτήσεις ευχαρίστησης των χρηστών που επιλέγονται U^* , εκφράζουν μια συνεχή κυρτή ή κοίλη σχέση μεταξύ της κανονικοποιημένης ικανοποίησής τους και του αντίστοιχου πραγματικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (goodput) που επιτυγχάνεται. Συγκεκριμένα, στο [57] υπολογίζεται το διάνυσμα βέλτιστης κατανομής ισχύος μετάδοσης $\bar{P}(t)$ των χρηστών του συστήματος υπό τη θεώρηση γραμμικών συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών ως προς τον πραγματικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων τους, όταν οι ρυθμοί μετάδοσης των χρηστών είναι σταθεροί. Δηλαδή, επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της πραγματικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος μέσω της λύσης του προβλήματος (60), όταν στη σχέση (61) το διάνυσμα $\bar{R}(t) = \bar{R}_{Fixed}$ είναι σταθερό και προαποφασισμένο. Γενικεύοντας την προηγούμενη μελέτη, στο [80] επιλύεται το πρόβλημα της ταυτόχρονης εύρεσης των βέλτιστων διανυσμάτων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων και των ισχύων μετάδοσης των χρηστών του συστήματος (υπολογισμός των διανυσμάτων $\bar{R}(t)$ και $\bar{P}(t)$ στο πρόβλημα (60)). Παράλληλα, το πρόβλημα επεκτείνεται από την απλή βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης μίας κυψέλης του συστήματος μέσω της βέλτιστης κατανομής των πόρων αυτής, στο πρόβλημα της

μεγιστοποίησης της απόδοσης του συνόλου των κυψελών στο δίκτυο και δίδεται κατανεμημένος αλγόριθμος ανάθεσης και αποδοχής χρηστών.

Οι συγγραφείς του [81], θέτουν τον επιπλέον περιορισμό της διασφάλισης ελαχίστων τιμών απόδοσης για χρήστες μη πραγματικού χρόνου, δηλαδή τίθεται στο πρόβλημα (60) και ο περιορισμός ενός ελάχιστου κατωφλίου συνάρτησης ευχαρίστησης (δηλαδή ελάχιστου πραγματικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων) για κάθε χρήστη στο σύστημα. Τέλος, στο [82] οι συγγραφείς προτείνουν και τεκμηριώνουν αναλυτικά μια γενικευμένη μεθοδολογία και αντίστοιχους αλγορίθμους ΔΠΔ, μέσω των οποίων εκτός από τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος διασφαλίζονται και διάφορα μακροπρόθεσμα ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου (όπως μακροπρόθεσμη δικαιοσύνη μέσης ευχαρίστησης ή μέσης πραγματικής ρυθμοαπόδοσης μεταξύ των χρηστών). Αξίζει να επισημάνουμε, ότι οι ερευνητικές προσπάθειες [81] και [82], επιλύουν το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων συστήματος υπό διάφορους περιορισμούς ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, αντίστοιχους με αυτούς που εξετάστηκαν στην υποενότητα 2.3 της παρούσας μελέτης, υπό το πρίσμα όμως ετερογενούς μοντέλου συστήματος.

6.1 Ερευνητικός Στόχος, Αναγκαιότητα Επίτευξης του & Ανακύπτων Πρόβλημα Βελτιστοποίησης

Με βάση την προηγούμενη ανασκόπηση στον ερευνητικό τομέα της βέλτιστης κατανομής πόρων CDMA δικτύου υπό το πρίσμα ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ κατά τη ζεύξη καθόδου, είναι εμφανής η έλλειψη αναλυτικών μοντέλων και αλγορίθμων με στόχο την υποστήριξη υπηρεσιών πραγματικού χρόνου και των αντίστοιχων ΚΠΥ αυτών. Επιπροσθέτως, η συνεχής μεταβολή της χωρητικότητας του συστήματος, λόγω των διαρκώς μεταβαλλόμενων καναλιών των χρηστών, κάνει επιτακτική την ανάγκη της μελέτης και εύρεσης βέλτιστων πολιτικών ΔΠΔ, οι οποίες θα εξυπηρετούν ταυτόχρονα χρήστες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου. Τέλος, μέσω της παραπάνω διαδικασίας μπορεί να επιτευχθεί η ποσοτικοποίηση του κόστους μεταξύ της μείωσης της συνολικής απόδοσης (ως προς τη χωρητικότητα) του συστήματος και των πόρων αυτού που σπαταλούνται για τη διασφάλιση και διατήρηση των ΚΠΥ των χρηστών διαφόρων υπηρεσιών.

Η παρούσα μελέτη πραγματεύεται το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής των πόρων ετερογενούς CDMA συστήματος στους χρήστες αυτού όταν εξυπηρετούνται ταυτόχρονα χρήστες με υπηρεσίες ανεκτικές ως προς την καθυστέρηση δεδομένων, υψηλών ρυθμών μετάδοσης, μη πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες ευαίσθητες ως προς την καθυστέρηση δεδομένων, πραγματικού χρόνου. Συγκεκριμένα, στόχος μας είναι η εύρεση εκείνων των διανυσμάτων ισχύος μετάδοσης και ρυθμού μετάδοσης δεδομένων των χρηστών του συστήματος, ώστε να επιτύχουμε τη μεγιστοποίηση της

συνολικής απόδοσης αυτού, ταυτόχρονα με τη διασφάλιση των ΚΠΥ των χρηστών. Το πρόβλημα που καλούμαστε να λύσουμε διατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
& \max_{\bar{R}(t), \bar{P}(t)} \sum_{i=1}^N U_i^*(R_i(t), \bar{P}(t)) \\
& s.t. \quad \sum_{i=1}^N P_i(t) \leq P_{\max} \\
& \quad 0 \leq P_i(t) \leq P_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \\
& \quad 0 \leq R_i(t) \leq R_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N
\end{aligned} \tag{69}$$

στοχεύοντας παράλληλα στη ελαχιστοποίηση $\min \Pr[\hat{\beta}_{RT,i}(t) \leq B_{RT,i}]_{L_i} \quad \forall i \in S_{RT}$, όπου

$$U_i^*(R_i(t), \bar{P}(t)) = U_i^*(R_i(t), \bar{P}(t), a_i, b_i) = R_i(t) f_i(\gamma_i(t), a_i, b_i) \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{70}$$

και από την σχέση (1) ισχύει:

$$\gamma_i(R_i(t), \bar{P}(t)) = \frac{W}{R_i(t)} \frac{P_i(t)}{\theta P_{\max} - \theta P_i(t) + A_i(t)} \tag{71}$$

Ως συνθήκες διασφάλισης των ΚΠΥ υπηρεσιών πραγματικού χρόνου θεωρήσαμε τα πιθανοτικά βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσής τους, η αποτελεσματικότητα των οποίων αναδείχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Παράλληλα, για τις υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου στόχο μας αποτελεί η μεγιστοποίηση της συνολικής πραγματικής ρυθμαπόδοσης που επιτυγχάνεται.

6.2 Μεθοδολογία Ανάλυσης και Επίλυσης του Προβλήματος

Στην συνέχεια ακολουθεί ανάλυση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε ώστε να μελετηθεί και να επιλυθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης (69).

A. Μετασχηματισμός του Προβλήματος

Η ύπαρξη ενός πιθανοτικού κριτηρίου στο πρόβλημα βελτιστοποίησης (69) έχει ως αποτέλεσμα την εμπλοκή χρονικά εξαρτώμενων μεγεθών στην ανά χρονοσχισμή επίλυσή του, δηλαδή στην ανά χρονοσχισμή εύρεση των βέλτιστων τιμών των πόρων του συστήματος $\bar{R}(t)$ και $\bar{P}(t)$. Η παραπάνω τροχοπέδη μας οδηγεί στο μετασχηματισμό του προς εξέταση προβλήματος, κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτρέπεται η δυναμική μεταβολή της πιθανότητας εξυπηρέτησης ανά χρονοσχισμή κάθε χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου από τον αλγόριθμο ΔΠΔ, βάσει της τήρησης ή μη των ΚΠΥ του, μέσω της ύπαρξης χρονικά εξαρτώμενων μεταβλητών στο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, αναθεωρούμε τον τρόπο ορισμού των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών και κατ' επέκταση του τρόπου με τον οποίον αυτές αντικατοπτρίζουν

την ευχαρίστηση του χρήστη. Συγκεκριμένα, για χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου θεωρούμε την ύπαρξη χρονικά ανεξάρτητων προκαθορισμένων συναρτήσεων ευχαρίστησης, όπως στη σχέση (70), οι οποίες εκφράζουν κατά κύριο λόγο την απαίτηση των χρηστών αυτών για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Από την άλλη, για χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου θεωρούμε την ύπαρξη δυναμικά προσαρμοζόμενων συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών, που η συνεχής αλλαγή και προσαρμογή του ρόλου και των ιδιοτήτων τους γίνεται με βάση τη διασφάλιση ή μη των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ τους. Η επιλογή αυτή μας επιτρέπει τη δυναμική επιρροή και αλλαγή των προτεραιοτήτων εξυπηρέτησης ανά χρονοσχισμή των χρηστών αυτών.

Η παραπάνω επιλογή αποτελεί καινοτομία στον τομέα της βέλτιστης κατανομής πόρων δικτύου μέσω της θεωρίας μεγιστοποίησης ευχαρίστησης δικτύου (network utility maximization – NUM theory), η οποία γνωρίζει ευρεία απήχηση και αποδοχή στο χώρο των τηλεπικοινωνιών [62], [83]. Τα προβλήματα που εξετάζουμε αποτελούν εξειδίκευση της θεωρίας αυτής στον τομέα της κατανομής πόρων CDMA ασυρμάτων δικτύων. Μέχρι πρότινος, οι συναρτήσεις ευχαρίστησης των χρηστών θεωρούνταν σταθερές, χρονικά ανεξάρτητες, ασχέτως με το σκοπό χρήσης τους. Τα τελευταία χρόνια η χρήση συναρτήσεων ευχαρίστησης με δυναμικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους υιοθετείται από την ερευνητική κοινότητα για την κάλυψη διαφόρων αναγκών, όπως αυτή της απεικόνισης της ευχαρίστησης των χρηστών βάσει της διαθεσιμότητας πόρων του δικτύου για την εξυπηρέτηση των υπηρεσιών τους [84]. Η παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνει την ύπαρξη δυναμικά μεταβαλλόμενων συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών με σκοπό την εύστοχη απεικόνιση της ραγδαία μεταβαλλόμενης ευχαρίστησής τους, βάσει της διασφάλισης ή μη των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ τους. Η παραπάνω θεώρηση δημιουργεί επιπλέον προβλήματα και ερωτήματα στον τρόπο επίλυσης των μη-κυρτών προβλημάτων βελτιστοποίησης που προκύπτουν, με τα οποία θα καταπιαστούμε κατά τη διάρκεια την μελέτης μας.

B. Δυναμική Προσαρμογή Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Χρηστών

Βάσει της προηγούμενης ανάλυσης, το προς εξέταση πρόβλημα (69) μετασχηματίζεται στο ακόλουθο:

$$\begin{aligned}
& \max_{\bar{R}(t), \bar{P}(t)} \sum_{i=1}^N U_i^*(R_i(t), \bar{P}(t), a, b_i(t)) \\
& s.t. \quad \sum_{i=1}^N P_i(t) \leq P_{\max} \\
& \quad 0 \leq P_i(t) \leq P_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \\
& \quad 0 \leq R_i(t) \leq R_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \\
& \quad b_i(t) = \hat{b}_{RT,i}(t) \forall i \in S_{RT}, \quad b_i(t) = b_{NRT,i} \forall i \in S_{NRT}
\end{aligned} \tag{72}$$

Παρατηρούμε ότι, η δυναμική προσαρμογή των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, με στόχο την αποτελεσματική απεικόνιση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της ικανοποίησής τους βάσει της ελαχιστοποίησης των πιθανοτήτων μη διασφάλισης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσής τους, επιτυγχάνεται μέσω του δυναμικού προσδιορισμού του σημείου καμπής (inflection point) αυτών $b(t)$. Καλούμε την παραπάνω διαδικασία ως “πλαίσιο δυναμικής μεταβολής συναρτήσεων ευχαρίστησης” (Dynamic Utility Adaptation (DUA) framework). Αναλυτική περιγραφή του παραπάνω πλαισίου δίδεται στην υποενότητα 6.3.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, δηλαδή την επίλυση του προβλήματος (72) και τη θεωρητική τεκμηρίωση της ορθότητας του προτεινόμενου πλαισίου δυναμικής μεταβολής συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών, καλούμαστε να απαντήσουμε στα ακόλουθα ερωτήματα:

I. Αν οι νέο-ορισμένες συναρτήσεις και ο προτεινόμενος τρόπος δυναμικής μεταβολής τους συμβάλει στην αλλαγή της προτεραιότητας εξυπηρέτησης των χρηστών και πως αυτά τα δύο μεγέθη συνδέονται αναλυτικά (δηλαδή η μεταβολή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη υπηρεσίας πραγματικού χρόνου με την αντίστοιχη προτεραιότητα εξυπηρέτησής του ανά χρονοσχισμή). Απάντηση στο παραπάνω ερώτημα δίδεται στην υποενότητα 6.6.

II. Ποια είναι τα επιτρεπτά όρια διακύμανσης των παραμέτρων $\hat{b}_{RT,i}(t)$ (άνω και κάτω όριο), πως καθορίζονται και τι συνεπάγεται η ύπαρξή τους σε σχέση με α) τη δυνατότητα του ΔΠΔ να εξασφαλίσει τα ΚΠΥ των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και β) την εύρεση συγκεκριμένων κριτηρίων αποδοχής κλήσεων; Παράλληλα, είναι αναγκαία η πρόταση αλγορίθμων για τον υπολογισμό των παραπάνω ορίων, η διερεύνηση της πολυπλοκότητάς τους καθώς και του ρυθμού σύγκλισής τους. Απάντηση στο παραπάνω ερώτημα δίδεται στην υποενότητα 6.7.

III. Απαιτείται λοιπόν προδιαγραφή και αιτιολόγηση της διαδικασίας και του αντίστοιχου αλγόριθμου υπολογισμού των μεταβολών των σημείων καμπής των συναρτήσεων ευχαρίστησης (το οποίο καθορίζεται έμμεσα από τη μεταβολή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$) των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, εντός των παραπάνω ορίων διακύμανσης. Απάντηση στο παραπάνω ερώτημα δίδεται στην υποενότητα 6.4

IV. Διασφάλιση, μέσω αναλυτικής θεωρητικής τεκμηρίωσης, ότι το προτεινόμενο πλαίσιο δυναμικής μεταβολής συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών δεν αλλοιώνει το στόχο βελτιστοποίησης που επιδιώκεται από το αρχικό πρόβλημα (69). Απάντηση στο παραπάνω ερώτημα δίδεται στις υποενότητες 6.5 και 6.6.

Γ. Μεθοδολογία Επίλυσης του Προβλήματος

Λόγω της μη-κυρτότητας του προβλήματος (72) η χρήση απλών, ευρέως διαδομένων τεχνικών επίλυσης γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης δεν είναι δυνατή. Τα βήματα και οι τεχνικές επίλυσης που ακολουθηθήκαν περιγράφονται αναλυτικά στην υποενότητα 6.5 και παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- I. Εύρεση του βέλτιστου διανύσματος ρυθμών μετάδοσης χρηστών συναρτήσει του διανύσματος ισχύος μετάδοσής τους, μέσω της απαίτησης για διασφάλιση των KKT συνθηκών στο πρόβλημα που εξετάζουμε. Έτσι, στο ανακύπτον πρόβλημα υπάρχουν πλέον μόνο δύο άγνωστοι, το βέλτιστο πλήθος (και ποιοι) και η αντίστοιχη ισχύς μετάδοσης των χρηστών του συστήματος που θα λάβουν πόρους του, την εκάστοτε χρονοσχιμή, σε σχέση με το σύνολο των χρηστών του συστήματος.
- II. Μετασχηματισμός του προβλήματος μέσω της συνάρτησης Lagrange αυτού.
- III. Καθορισμός του δυικού προβλήματος (dual problem).
- IV. Επίλυσή του δυικού προβλήματος μέσω αποσύνθεσής του (decomposition method) [85].
- V. Μελέτη του ανακύπτοντος δυικού κενού (duality gap, asymptotic optimality)
- VI. Πρόταση αλγορίθμων εύρεσης της καθορισμένης βέλτιστης λύσης.

Δ. Ενσωμάτωση των Προτεινόμενων Αλγορίθμων σε Υπάρχουσες Αρχιτεκτονικές Ασύρματων Κυβελωτών Δικτύων

Η ενσωμάτωση των προτεινόμενων αλγορίθμων στη συνολική αρχιτεκτονική ενός ασύρματου CDMA δικτύου και η εύρεση ή επέκταση ήδη υπάρχουσας κατάλληλης σηματοδοσίας για τη διασφάλιση της εύρυθμης λειτουργίας τους αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Τέλος, η μεθοδολογία επίλυσης του αρχικού μας προβλήματος μέσω μεθόδων διάσπασής του (σε μικρότερα προβλήματα βελτιστοποίησης, ανεξάρτητα μεταξύ τους, η επίλυση των οποίων μας οδηγεί στη λύση του αρχικού προβλήματος) αποσκοπεί στην εύρεση κατανεμημένων αλγορίθμων προσδιορισμού της βέλτιστης κατανομής πόρων του συστήματος. Αναλυτική περιγραφή των παραπάνω αλγορίθμων δίδεται στην υποενότητα 6.8.

Ε. Αξιολόγηση των Προτεινόμενων Αλγορίθμων μέσω Προσομοίωσης

Η μελέτη μας ολοκληρώνεται με την παρουσίαση, ανάλυση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση μοντέλου συστήματος υπό τους προτεινόμενους αλγορίθμους, όπως αυτή δίδεται στην υποενότητα 6.9, [86].

6.3 Πλαίσιο Δυναμικής Μεταβολής Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Χρηστών

Η παρούσα υποενότητα προτείνει και αναλύει ένα καινοτόμο θεωρητικό πλαίσιο μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η αποτελεσματική απεικόνιση των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ χρηστών στις αντίστοιχες συναρτήσεις ευχαρίστησής τους και κατ' επέκταση στην ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ του συστήματος. Ο παραπάνω στόχος επιτυγχάνεται διαμέσου της δυναμικής (ανά χρονοσχισμή) προσαρμογής των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών, μέσω της δυναμικής μεταβολής της μορφής και των ιδιοτήτων τους, συναρτήσει βραχυπρόθεσμων χρονικά-μεταβαλλόμενων μετρικών ποιότητας υπηρεσίας. Το παραπάνω καινοτόμο πλαίσιο καλείται “πλαίσιο δυναμικής μεταβολής συναρτήσεων ευχαρίστησης” (Dynamic Utility Adaptation (DUA) framework). Εν συνεχεία, αναλύεται η εφαρμογή του παραπάνω πλαισίου στην περίπτωση της ευκαιριακής κατανομής πόρων ασυρμάτου CDMA δικτύου και δίδεται μεθοδολογία δυναμικής προσαρμογής των συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών πραγματικού χρόνου, σε σχέση με την τήρηση ή μη των βραχυπρόθεσμων πιθανοτικών κριτηρίων ρυθμαπόδοσής τους.

Ανάλυση και Αιτιολόγηση Κινήτρου

Παρατηρώντας τις συναρτήσεις ευχαρίστησης των χρηστών όπως αυτές ορίζονται στις σχέσεις (70) και (71), η χρήση των οποίων μονοπωλούσε μέχρι πρότινος τη διεθνή βιβλιογραφία στον προς εξέταση ερευνητικό τομέα της βέλτιστης ανάθεσης πόρων ετερογενών CDMA συστημάτων, μπορούμε να επισημάνουμε ότι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την μορφή τους καθώς και τις τιμές ευχαρίστησης (απόδοσης) που δίδουν για τον εκάστοτε χρήστη i είναι α) η ποιότητα περιβάλλοντος εκπομπής (A_i), που εξαρτάται από τον θόρυβο και την ποιότητα του καναλιού του χρήστη I_i/G_i , β) ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στο σταθμό βάσης (R_i) και γ) το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης δεδομένων που εφαρμόζεται (μέσω των παραμέτρων a_i και b_i της συνάρτησης f_i). Στην περίπτωση χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, ανεκτικών στην καθυστέρηση μετάδοσης δεδομένων, η μεγιστοποίηση των συναρτήσεων ευχαρίστησής τους (70) έχει ως αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που επιτυγχάνεται (goodput), κάτι που είναι απόλυτα επιθυμητό και αποτελεί πρωτεύοντα στόχο ενός ευκαιριακού ΔΠΔ. Εν αντιθέσει με τα παραπάνω, στην περίπτωση χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, η ευχαρίστησή τους δεν αυξάνεται βάσει της μεγιστοποίησης του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων τους, αλλά, όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, τα ΚΠΥ τους απαιτούν την επίτευξη σταθερών προκαθορισμένων πραγματικών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων καθώς και βραχυπρόθεσμων κριτηρίων καθυστέρησης. Συνεπώς, στοχεύοντας στην αποτελεσματική εξυπηρέτηση χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου απαιτείται η εξεύρεση μεθοδολογίας απεικόνισης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας τους στις συναρτήσεις ευχαρίστησης αυτών.

Η δυναμική χρονικά μεταβολή και η βραχυπρόθεσμη φύση των ΚΠΥ υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, μας οδήγησε στην αντίστοιχη βραχυπρόθεσμη και δυναμική μεταβολή των συναρτήσεων ευχαρίστησής τους. Με αυτόν τον τρόπο ο ΔΠΔ έχει τη δυνατότητα άμεσης αντίδρασης, επέμβασης και πραγμάτωσης διορθωτικών αλλαγών όταν εξυπηρετεί χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και τα βραχυπρόθεσμα ΚΠΥ τους δεν ικανοποιούνται. Πόσο μάλλον, όταν αυτό γίνεται υπό το πρίσμα ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, η λύση του οποίου διασφαλίζει τη βελτιστότητα των λύσεων και των αποφάσεων του ΔΠΔ ανά χρονοσχισμή. Έτσι, στο πρόβλημα βελτιστοποίησης (72) συνυπάρχουν ταυτόχρονα στατικές και δυναμικά μεταβαλλόμενες συναρτήσεις ευχαρίστησης χρηστών, για χρήστες με υπηρεσίες μη-πραγματικού και πραγματικού χρόνου αντίστοιχα. Κάτι τέτοιο, μας δίδει την δυνατότητα i) της από κοινού μοντελοποίησης και έκφρασης πολλαπλών ΚΠΥ υπό ένα κοινό πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπως το (72), κάτι το οποίο αποτελεί καινοτομία της παρούσας διδακτορικής διατριβής, και ii) της εκμετάλλευσης του ευκαιριακού χαρακτήρα του ΔΠΔ όχι μόνο ανά τύπο υπηρεσίας χρηστών αλλά και συνεργατικά. Με αυτόν τον τρόπο, όπως θα αναδειχθεί και στην συνέχεια, αποφεύγεται το πρόβλημα που δημιουργείται όταν η βελτιστοποίηση των ΚΠΥ και των στόχων ενός συγκεκριμένου τύπου υπηρεσιών οδηγεί στην υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας και τη μη διασφάλιση των ΚΠΥ χρηστών ενός άλλου τύπου υπηρεσίας.

Δυναμική Μεταβολή Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Χρηστών

Με βάση τις αναλύσεις που προηγήθηκαν, εισαγάγουμε την έννοια της δυναμικής μεταβολής των συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου $U_i^*(R_i(t), \bar{P}(t), a, b_i) \quad \forall i \in S_{RT}$ επιτρέποντας την δυναμική μεταβολή και βραχυπρόθεσμη προσαρμογή της παραμέτρου $b_i \quad \forall i \in S_{RT}$, η οποία προσδιορίζει το σημείο καμπής της συνάρτησης. Η επιλογή της παραμέτρου b_i στηρίζεται στην ιδιότητα του σημείου καμπής μιας συνάρτησης να προσδιορίζει και να διαχωρίζει το κυρτό και το κοίλο μέρος της. Κατ' επέκταση η παράμετρος αυτή επηρεάζει το σημείο βέλτιστης λύσης πάνω στην συνάρτηση ευχαρίστησης, λόγω της απαίτησης για αρνητικό πρόσημο της δεύτερης παραγώγου αυτής, όπως ορίζεται από τις KKT συνθήκες βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης (αναλυτική διερεύνηση των παραπάνω δίδεται στην υποενότητα 6.6). Συνεχίζοντας την ανάλυσή μας, επαναπροσδιορίζουμε τον ορισμό των συναρτήσεων ευχαρίστησης υπηρεσιών πραγματικού χρόνου ως εξής:

$$U_i^*(R_i(t), \bar{P}(t), a, \hat{b}_{RT,i}(t)) \quad \forall i \in S_{RT} \quad (73)$$

όπου η παράμετρος $\hat{b}_{RT,i}(t)$ καθορίζει τη δυναμικά μεταβαλλόμενη φύση της παραμέτρου b_i της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i ανά χρονισχισμή t , και ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
\hat{b}_{RT,i}(t) &= b_{RT,i} + \tilde{b}_{RT,i}(t) \quad \forall i \in S_{RT} \\
\hat{b}_{RT,i}(t) &\in [b_{\min,i}(t), b_{\max,i}(t)] \\
\text{όπου} \quad 0 &\leq b_{\min,i}(t) \leq b_{RT,i} \leq b_{\max,i}(t) \leq \infty
\end{aligned} \tag{74}$$

Από της σχέση (74) διαφαίνεται ότι η παράμετρος $\hat{b}_{RT,i}(t)$ ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου (Real-Time (RT)) αποτελείται από ένα σταθερό και από ένα μεταβλητό μέρος. Το σταθερό μέρος, που εκφράζεται μέσω της σταθεράς $b_{RT,i}$, καθορίζεται από το σχήμα κωδικοποίησης και διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται και όπως και στις παραδοσιακά χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις ευχαρίστησης χρηστών, καθορίζει το κατάλληλο σημείο καμψής της συνάρτησης απόδοσης f_i του χρήστη i . Το μεταβλητό μέρος, όπως εκφράζεται μέσω της χρονικά εξαρτώμενης μεταβλητής $\tilde{b}_{RT,i}(t)$, αποτελεί εκείνο το δυναμικά μεταβαλλόμενο παράγοντα ο οποίος προσαρμόζει τη συνολική τιμή της παραμέτρου b_i , και συνεπώς τις ιδιότητες και τη μορφή της συνάρτησης ευχάριστης U_i^* , με βάση τη βραχυπρόθεσμη επίδοση και διασφάλιση των ΚΠΥ του χρήστη i . Η τιμή της παραμέτρου $\tilde{b}_{RT,i}(t)$ παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της εκάστοτε χρονοσχισμής t .

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να επισημάνουμε ότι η δυνατότητα δυναμικής μεταβολής της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$ ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου ανά χρονοσχισμή, δεν συνεπάγεται σε καμία περίπτωση τη δυνατότητα δυναμικής μεταβολής του σχήματος κωδικοποίησης και διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, το οποίο καθορίζεται και εισάγεται στην συνάρτηση ευχαρίστησής του *μονοσήμαντα* από το σταθερό μέρος της μεταβλητής $\hat{b}_{RT,i}(t)$ (δηλαδή τη σταθερά $b_{RT,i}$). Στόχος της δυναμικής μεταβολής της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$ ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου είναι η δυνατότητα ορθής απεικόνισης στην ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ (μέσω της συνάρτησης ευχαρίστησής του στο ανά χρονοσχισμή πρόβλημα βελτιστοποίησης (72)) των απαιτήσεών του για πόρους συστήματος, σε σχέση με την ικανοποίηση ή μη των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ του. Κατ' επέκταση δίδεται η περαιτέρω δυνατότητα δυναμικής επίδρασης και αλλαγής της προτεραιότητας επιλογής και εξυπηρέτησής του. Σε γενικές γραμμές, όπως θα αποδειχθεί θεωρητικά μέσω της επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης (72) στις υποενότητες 6.5 και 6.6, ο τρόπος επίδρασης της μεταβολής της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$ στο όλο πρόβλημα έχει ως εξής:

Όσο μικρότερες τιμές παίρνει η μεταβλητή $\hat{b}_{RT,i}(t)$ ενός χρήστη i , τόσο περισσότερο η βραχυπρόθεσμη έλλειψή του (της υπηρεσίας του) για πόρους συστήματος αντικατοπτρίζεται στη συνάρτηση ευχαρίστησής του και συνεπώς, αποκαλύπτεται στον ΔΠΔ η ανάγκη να αποκτήσει ο χρήστης i υψηλή προτεραιότητα επιλογής και ανάθεσης πόρων συστήματος, σε σχέση με τους υπόλοιπους χρήστες.

Οι χρονικά μεταβαλλόμενες παράμετροι $b_{min,i}(t)$ και $b_{max,i}(t)$ καθορίζουν τα επιτρεπόμενα όρια μεταβολής της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$ σε κάθε χρονοσχιμή, καθώς καθορίζουν ένα κάτω και ένα άνω φράγμα τιμών, αντίστοιχα. Είναι σημαντικό να επισημάνουμε ότι η ύπαρξη αυτών των ορίων, των οποίων η τιμή καθορίζεται αποκλειστικά από τους φυσικούς περιορισμούς του συστήματος, περιορίζει την δυνατότητα επίδρασης και προσαρμογής των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών. Με απλά λόγια, οι τιμές του άνω και κάτω φράγματος μεταβολής της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$ που αλλάζουν και καθορίζονται ανά χρονοσχιμή βάσει των συνθηκών που επικρατούν στο σύστημα (όπως, η στιγμιαία ποιότητα καναλιού χρήστη και ο στιγμιαίος συνολικός θόρυβος στο σύστημα) υπονοούν την ύπαρξη εγγενών περιορισμών στην διασφάλιση και επίτευξη των ΚΠΥ υπηρεσιών πραγματικού χρόνου υπό ευκαιριακούς αλγορίθμους ΔΠΔ. Η θεωρητική μελέτη και φυσική ερμηνεία των παραπάνω περιορισμών, όπως αυτή παρουσιάζεται στην υποενότητα 6.7, μας δίνει τη δυνατότητα της θεωρητικής ανάλυσης και ποσοτικοποίησης α) κριτηρίων αποδοχής κλήσεων υπό ευκαιριακούς αλγορίθμους ΔΠΔ σε CDMA δίκτυα και β) της δαπάνης των πόρων συστήματος που απαιτεί η διασφάλιση των αυστηρών ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου σε σχέση με τις υπηρεσίες δεδομένων μη πραγματικού χρόνου.

Συνεχίζοντας το βασικό κορμό της ανάλυσής μας, στην επόμενη ενότητα προσδιορίζουμε τον τρόπο μεταβολής της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$ ανά χρονοσχιμή εντός των επιτρεπτών ορίων μεταβολής της, με στόχο την επιτυχή απεικόνιση των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ υπηρεσιών πραγματικού χρόνου στις αντίστοιχες συναρτήσεις ευχαρίστησής τους. Επισημαίνουμε, ότι για λόγους ομαλής παρουσίασης και μόνο, στην επόμενη ενότητα η ύπαρξη των τιμών των ορίων αυτών, δηλαδή των παραμέτρων $b_{min,i}(t)$ και $b_{max,i}(t)$ θεωρείται δεδομένη. Αναλυτικός προσδιορισμός τους δίδεται στην υποενότητα 6.7.

6.4 Δυναμική Προσαρμογή Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Χρηστών με Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου

Η παρούσα ενότητα προδιαγράφει αναλυτική μεθοδολογία απεικόνισης της τήρησης ή μη των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης (69) χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου στις συναρτήσεις ευχαρίστησης αυτών και κατ' επέκταση α) στο ανακύπτον ανά χρονοσχιμή πρόβλημα βελτιστοποίησης (72) και β) στην ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ που θα προκύψει μέσω της επίλυσής του. Η καταλληλότητα των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης ως δείκτες διασφάλισης των ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Για λόγους παρουσίασης επαναλαμβάνουμε τον ορισμό ενός πιθανοτικού βραχυπρόθεσμου κριτηρίου ρυθμαπόδοσης:

$$\min \Pr[\hat{\beta}_{RT,i}(t) \leq B_{RT,i}]_{L_i} \quad \forall i \in S_{RT}$$

όπου η μεταβλητή L_i υποδηλώνει το μέγεθος του παραθύρου παρατήρησης του χρήστη i , η μεταβλητή $B_{RT,i} = R_{RT,i} \cdot L_i \cdot t_s$ υποδηλώνει το προκαθορισμένο κατώφλι δεδομένων και $\hat{\beta}_{RT,i}(t)$ το ποσό των δεδομένων που έλαβε ο χρήστης i εντός του παραθύρου παρατήρησης, από την χρονοσχισμή $(t-L_i+1)$ έως την χρονοσχισμή t . Η ελαχιστοποίηση της παραπάνω πιθανότητας οδηγεί στη διασφάλιση των ΚΠΥ και συνεπώς τη μεγιστοποίηση της ευχαρίστησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου.

Στοχεύοντας στην αποτελεσματική δυναμική προσαρμογή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t) \forall i \in S_{RT}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου στην αρχή κάθε χρονοσχισμής, σύμφωνα με τα βραχυπρόθεσμα ΚΠΥ του, κρίνεται απαραίτητη η εισαγωγή της πληροφορίας της βραχυπρόθεσμης ρυθμιζόμενης του χρήστη εντός της διαδικασίας ρυθμιστικής μεταβολής της. Για το λόγο αυτό, ορίζουμε μια νέα μεταβλητή που υποδηλώνει το μέγεθος των δεδομένων που έλαβε ο χρήστης i εντός του χρονικού παραθύρου παρατήρησής του L_i , από την χρονοσχισμή $(t-L_i+1)$ έως την χρονοσχισμή $(t-1)$, ως εξής:

$$B_{RT,i}^{L_i-1}(t) = \sum_{k=1}^{L_i-1} \beta_{RT,i}(t-k) \quad \forall i \in S_{RT} \quad (75)$$

όπου η μεταβλητή $\beta_{RT,i}(t) = U_i^*(R_i(t), P_i(t), a, b_{RT,i}) \cdot t_s$ υποδηλώνει την ποσότητα των πραγματικών δεδομένων (δηλαδή, δεδομένα χωρίς λάθη μετάδοσης) που έλαβε ο χρήστης υπηρεσίας πραγματικού χρόνου i κατά τη χρονοσχισμή t και $R_i(t), P_i(t)$ υποδηλώνουν το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και την ισχύ μετάδοσής του στον σταθμό βάσης, την προς εξέταση χρονοσχισμή. Η τιμή της μεταβλητής (75) προσμετράται εύκολα από τους χρήστες ανά χρονοσχισμή. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω πληροφορία και συγκρίνοντάς την τιμή των δεδομένων που έλαβε ο χρήστης i $B_{RT,i}^{L_i-1}(t)$, εντός του παραθύρου παρατήρησής του, με την προκαθορισμένη τιμή δεδομένων που έπρεπε να λάβει βάσει των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ του, η δυναμική προσαρμογή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$ της συνάρτησης ευχαρίστησης του χρήστη i μπορεί να επιτευχθεί ως εξής:

$$\hat{b}_{RT,i}(t) = \begin{cases} b_{RT,i} - I_{RT,i}(t)[b_{RT,i} - b_{\min,i}(t)] & \text{αν } B_{RT,i}^{L_i-1}(t) \leq (Tr+1)B_{RT,i} \\ b_{RT,i} + G_{RT,i}(t)[b_{\max,i}(t) - b_{RT,i}] & \text{αν } B_{RT,i}^{L_i-1}(t) > (Tr+1)B_{RT,i} \end{cases} \quad (76)$$

όπου οι μεταβλητές $I_{RT,i}(t) \in [0,1]$ και $G_{RT,i}(t) \in [0,1] \quad \forall i \in S_{RT}$ αποτελούν δύο κανονικοποιημένους δείκτες που “αντικατοπτρίζουν” την ανάγκη ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου να λάβει πόρους συστήματος τη χρονοσχισμή t , στις περιπτώσεις που αυτός έχει έλλειψη ή περίσσια πόρων (ποσότητα δεδομένων) εντός του παραθύρου παρατήρησής του. Η μεταβλητή Tr ($Tr \geq 0$), η οποία

ορίζεται ως μεταβλητή ευαισθησίας του συστήματος, καθορίζει το βαθμό πρόληψης με τον οποίο εξυπηρετεί τους χρήστες. Μεγάλες τιμές για τη μεταβλητή ευαισθησίας του συστήματος Tr κάνουν τον ευκαιριακό ΔΠΔ να δρα πιο προληπτικά στις διακυμάνσεις της βραχυπρόθεσμης ρυθμαπόδοσης χρηστών πραγματικού χρόνου. Για το λόγο αυτό, οι πιθανότητες μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων πιθανοτικών κριτηρίων ρυθμαπόδοσής τους μειώνονται. Παράλληλα όμως, μειώνεται και ο ευκαιριακός χαρακτήρας της πολιτικής ΔΠΔ.

Σύμφωνα με τη σχέση (76), όταν ένας χρήστης i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου έχει λάβει έως τη χρονοσχισμή $(t-1)$ μικρότερο ποσό δεδομένων σε σχέση με το προκαθορισμένο κατώφλι δεδομένων που έπρεπε να λάβει, τότε για να διασφαλιστεί η ικανοποίηση των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσής του η τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$ της συνάρτησης ευχαρίστησής του μειώνεται. Έτσι η πιθανότητα επιλογής του καθώς και το ποσοστών των πόρων του συστήματος που λαμβάνει κατά την επόμενη χρονοσχισμή t αυξάνεται (η παραπάνω ιδιότητα τεκμηριώνεται θεωρητικά στην υποενότητα 6.6). Η μείωση της τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$ σε σχέση με την προκαθορισμένη σταθερή τιμή της $b_{RT,i}$ καθορίζεται από την τιμή του κανονικοποιημένου δείκτη $I_{RT,i}(t)$ την προς εξέταση χρονοσχισμή. Ο δείκτης $I_{RT,i}(t)$ ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου αντικατοπτρίζει με ανοιγμένο τρόπο την ανάγκη του να λάβει πόρους συστήματος, με βάση την κατανομή των ληφθέντων δεδομένων κατά βάρη, εντός προκαθορισμένου παραθύρου παρατήρησης, και για αυτό ορίζεται ως:

$$I_{RT,i}(t) = 1 - \sum_{k=1}^{L_i-1} \frac{\hat{w}_{RT,i}(k, L_i) \beta_{RT,i}(t-k)}{(Tr+1)B_{RT,i}} \quad \alpha\nu \quad B_{RT,i}^{L_i-1}(t) \leq (Tr+1)B_{RT,i} \quad (77)$$

$$\acute{o}που \quad \hat{w}_{RT,i}(k, L_i) = \frac{L_i - k}{L_i - 1} \quad \gamma\alpha \quad k = 1, \dots, L_i \quad \forall i \in S_{RT}$$

Επισημαίνεται ότι, η μεταβλητή $\hat{w}_{RT,i}(k, L_i)$ καθορίζει την τιμή ενός βάρους που συνδέεται με κάθε μια από τις (L_i-1) διαδοχικές χρονοσχισμές εντός του χρονικού παραθύρου παρατήρησης L_i του χρήστη i , και στόχος της είναι να ρυθμίζει τη σπουδαιότητα και τη σημαντικότητα του ποσού των δεδομένων που έλαβε ο χρήστης i εκείνη τη χρονοσχισμή $(t-k)$, κατά τον υπολογισμό του κανονικοποιημένου δείκτη I_i . Επίσης, οι τιμές των βαρών των χρονοσχισμών καθώς και η αντίστοιχη σπουδαιότητα του ποσού των δεδομένων που ελήφθησαν από τον χρήστη εντός αυτών, καθορίζονται από μια σχέση γραμμική και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασής τους k από την επόμενη χρονοσχισμή t . Στόχος είναι η ποσότητα των δεδομένων που έλαβε ο χρήστης κατά τις πιο απομακρυσμένες χρονοσχισμές να παίζει πιο σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της προτεραιότητας εξυπηρέτησής του. Ο ρόλος και η σπουδαιότητα των παραπάνω βαρών διαφαίνεται στο ακόλουθο παράδειγμα. Έστω δύο χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου i, j , οι οποίοι έχουν λάβει την

ίδια ποσότητα δεδομένων εντός των ισομεγεθών χρονικών παραθύρων παρατήρησής τους (δηλαδή έστω ότι ισχύει $B_{RT,i}^{L_i-1}(t) = B_{RT,j}^{L_j-1}(t)$ όταν $L_i = L_j$, $B_{RT,i} = B_{RT,j}$, $b_{RT,i} = b_{RT,j}$ και $b_{min,i}(t) = b_{min,j}(t)$), αλλά ο χρήστης i έχει λάβει πόρους συστήματος σε πιο πρόσφατες χρονοσχισμές, σε σχέση με την επόμενη χρονοσχισμή, συγκριτικά με το χρήστη j . Σε αυτή την περίπτωση ο κανονικοποιημένος δείκτης $I_{RT,i}(t)$ του χρήστη i θα πάρει τιμή μικρότερη σε σχέση με αυτή του χρήστη j , $I_{RT,j}(t)$ λόγω της ύπαρξης των βαρών, κάτι το οποίο είναι απολύτως θεμιτό αφού η ανοχή του χρήστη i στην μη λήψη πόρων συστήματος κατά την επόμενη χρονοσχισμή είναι μεγαλύτερη από εκείνη του χρήστη j . Έτσι η τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,j}(t)$ της συνάρτησης ευχαρίστησης του χρήστη j θα είναι μικρότερη συγκριτικά με αυτή του χρήστη i και συνεπώς θα έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα εξυπηρέτησης και λήψης πόρων συστήματος κατά την επόμενη χρονοσχισμή.

Στην αντίθετη περίπτωση, όταν ένας χρήσης i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου έχει λάβει περισσότερους πόρους από το προκαθορισμένο κατώφλι δεδομένων του εντός των (L_i-1) τελευταίων διαδοχικών χρονοσχισμών του παραθύρου παρατήρησής L_i , τότε η τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$ της συνάρτησης ευχαρίστησης του αυξάνεται σύμφωνα με την σχέση (76). Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσό των δεδομένων που έχει λάβει εντός του παραθύρου παρατήρησης L_i , τόσο μικρότερη θα πρέπει να είναι η προτεραιότητα επιλογής του και για αυτό ο κανονικοποιημένος δείκτης δίδεται σε αυτή την περίπτωση από την ακόλουθη σχέση:

$$G_{RT,i}(t) = \frac{\sum_{k=1}^{L_i-1} \hat{w}_{RT,i}(k, L_i) \beta_{RT,i}(t-k)}{\sum_{k=1}^{W_i-1} \hat{w}_{RT,i}(k, L_i) R_i^{\max} t_s} \quad \alpha \nu \quad B_{RT,i}^{L_i-1}(t) > (Tr+1)B_{RT,i} \quad (78)$$

όπου ο παρανομαστής $\sum_{k=1}^{L_i-1} \hat{w}_{RT,i}(k, L_i) R_i^{\max} t_s$ συμβάλει στην κανονικοποίηση των τιμών του δείκτη G και η μεταβλητή $R_i^{\max}$ υποδηλώνει τη μεγαλύτερη εφικτή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων που μπορεί να πετύχει ο χρήστης i λόγω των περιορισμών που επιβάλλουν οι φυσικές δυνατότητες του συστήματος.

Στις προηγούμενες ενότητες περιγράφηκε και αναλύθηκε το προτεινόμενο πλαίσιο δυναμικής μεταβολής συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου μέσω του οποίου το αρχικό πρόβλημα βέλτιστης κατανομής πόρων CDMA δικτύων με χρήστες υπηρεσιών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου (69) μετασχηματίζεται στο ανά χρονοσχισμή πρόβλημα βελτιστοποίησης (72). Στην επόμενη υποενότητα επιλύεται το προκύπτον πρόβλημα βελτιστοποίησης.

6.5 Επίλυση Προβλήματος Βέλτιστης Κατανομής Πόρων CDMA Ασύρματου Συστήματος με Υπηρεσίες μη Πραγματικού και Πραγματικού Χρόνου υπό Ετερογενές Μοντέλο Συστήματος κατά τη Ζεύξη Καθόδου

Ο στόχος μας σε αυτό το κεφάλαιο είναι η επίλυση του προβλήματος βέλτιστης κατανομής των πόρων ετερογενούς CDMA συστήματος στους χρήστες αυτού, όταν εξυπηρετούνται ταυτόχρονα χρήστες με υπηρεσίες α) ανεκτικές ως προς την καθυστέρηση δεδομένων, υψηλών ρυθμών μετάδοσης, μη πραγματικού χρόνου (για τους οποίους επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της συνολικής τους μέσης ρυθμαπόδοσης) και β) ευαίσθητες ως προς την καθυστέρηση δεδομένων, πραγματικού χρόνου (για τους οποίους επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση των πιθανοτικών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσής τους). Με βάση την παραπάνω ανάλυση, το αρχικό μας πρόβλημα μετασχηματίστηκε στο ακόλουθο μη-κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης ανά χρονοσχισμή, το οποίο και επαναλαμβάνεται για λόγους πληρότητας:

$$\begin{aligned}
 & \max_{\bar{R}(t), \bar{P}(t)} \sum_{i=1}^N U_i^*(R_i(t), \bar{P}(t), a, b_i(t)) \\
 & s.t. \quad \sum_{i=1}^N P_i(t) \leq P_{\max} \\
 & \quad 0 \leq P_i(t) \leq P_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \\
 & \quad 0 \leq R_i(t) \leq R_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \\
 & \quad b_i(t) = \hat{b}_{RT,i}(t) \forall i \in S_{RT}, \quad b_i(t) = b_{NRT,i} \forall i \in S_{NRT}
 \end{aligned} \tag{79}$$

Επισημαίνουμε ότι η δυναμική μεταβολή των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών γίνεται ανά χρονοσχισμή σύμφωνα με τις σχέσεις (74)-(78), κάτι το οποίο δεν επηρεάζει τη λύση του παραπάνω προβλήματος, καθώς κατά τη διάρκεια της εκάστοτε χρονοσχισμής η τιμή των μεταβλητών $b_i(t)$ καθώς και των καναλιών των χρηστών $G_i(t)$ θεωρείται σταθερή. Συνεπώς, για λόγους παρουσίας και μόνο, στο υπόλοιπο της συγκεκριμένης ενότητας παραλείπεται η χρονική εξάρτηση των μεταβλητών, δηλαδή ο όρος t .

Επιδιώκοντας τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος καθώς και την ευχαρίστηση των ενεργών χρηστών σε αυτό, ο ευκαιριακός ΔΠΔ πρέπει ανά χρονοσχισμή να επιλύει το πρόβλημα βελτιστοποίησης (79), δηλαδή να προσδιορίζει εκείνα τα διανύσματα ισχύος μετάδοσης $\bar{P}^* = \{P_1^*, \dots, P_N^*\}$ και ρυθμού μετάδοσης δεδομένων $\bar{R}^* = \{R_1^*, \dots, R_N^*\}$ των χρηστών του συστήματος ώστε να μεγιστοποιείται η συνάρτηση στόχος (objective function) του προβλήματος (79), υπό τους φυσικούς περιορισμούς που έχουν τεθεί.

Για την επίλυση του μη-κυρτού προβλήματος βελτιστοποίησης (79) ακολουθήθηκε η προσέγγιση στο [80], η οποία και σκιαγραφήθηκε στην ενότητα 5.2 για την περίπτωση μιας μεταβλητής. Πριν όμως φτάσουμε σε αυτό το σημείο απαιτείται ο κατάλληλος μετασχηματισμός του προβλήματος

(79). Αρχικά, μετατρέπουμε το πρόβλημα (79) από πρόβλημα δύο μεταβλητών $(\bar{P}, \bar{R})$ σε πρόβλημα μιας μεταβλητής $(\bar{P})$ μέσω της τήρησης της παρακάτω συνθήκης: “η βέλτιστη λύση δίδεται μόνο και μόνο όταν ο σταθμός βάσης εκπέμπει με μέγιστη ισχύ μετάδοσης $P_{\max}$ (δηλαδή όταν $\sum_{i=1}^N P_i = P_{\max}$, βάσει του θεωρήματος 1 στο [80]) και συνεπώς, διαμοιράζει το σύνολο των διαθέσιμων πόρων του στους χρήστες του συστήματος”. Σύμφωνα με τη παραπάνω συνθήκη, καθώς και τη σχέση (71), αποδεικνύεται σύμφωνα με το Θεώρημα 1 του [87] και το [88], ότι ο βέλτιστος ρυθμός μετάδοσης ενός χρήστη i , δεδομένου του διανύσματος ισχύος μετάδοσης χρηστών $\bar{P}$, δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_i^*(P_i) = \begin{cases} \frac{WP_i}{\gamma_i^*(\theta P_{\max} - \theta P_i + A_i)}, & \text{αν } P_i \leq \frac{R_i^{\max} \gamma_i^*(\theta P_{\max} + A_i)}{W + \theta R_i^{\max} \gamma_i^*} = P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) \\ R_i^{\max}, & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (80)$$

όπου $\gamma_i^* = \arg \max_{\gamma \geq 1} \{(1/\gamma) f_i(\gamma)\}$. Συνεπώς, βάσει των σχέσεων (70) και (73) και με αντικατάσταση της σχέσης (80), η συνάρτηση ευχαρίστησης ενός χρήστη i εξαρτάται πλέον μόνο από την ισχύ μετάδοσής του, όπως διαφαίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$U_i^{R_i^*}(R_i^*(P_i), P_i, a, b_i) = U_i^{R_i^*}(P_i, a, b_i) = \begin{cases} \frac{WP_i}{\gamma_i^*(\theta P_{\max} - \theta P_i + A_i)} f_i(\gamma_i^*), & \text{αν } P_i \leq \frac{R_i^{\max} \gamma_i^*(\theta P_{\max} + A_i)}{W + \theta R_i^{\max} \gamma_i^*} = P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) \\ R_i^{\max} f_i(\gamma_i(R_i^{\max}, P_i)), & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (81)$$

όπου ως $P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)$ ορίζουμε το οριακό (limit) σημείο διαχωρισμού της μορφής της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i , $U_i^{R_i^*}(P_i, a, b_i)$, στον άξονα της ισχύος μετάδοσής του, P_i , αφού $R_i^* = WP_i / \gamma_i^*(\theta P_{\max} - \theta P_i + A_i)$ όταν $P_i \leq P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)$ και $R_i^* = R_i^{\max}$ σε αντίθετη περίπτωση. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι η συνάρτηση ευχαρίστησης ενός χρήστη (81), η οποία εξαρτάται πλέον μόνο από την ισχύ του, είναι μια συνάρτηση με δύο κλάδους για την οποία ισχύει ότι όταν $P_i \leq P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)$, η $U_i^{R_i^*}$ είναι κυρτή συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή P_i και όταν $P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) < P_i \leq P_{\max}$ είναι σιγμοειδής συνάρτηση ως προς P_i (όπου ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι μέγιστος $R_i^{\max}$) με μοναδικό σημείο καμπής⁴ P_i^0 . Με απλά λόγια, η παραπάνω συνάρτηση ευχαρίστησης είναι κυρτή στο πρώτο μέρος της, μέχρι το σημείο διαχωρισμού

⁴ Για το P_i^0 ισχύει ότι $\partial^2 U_i^{R_i^*}(P_i, a_i, b_i) / \partial P_i^2 \Big|_{P_i=P_i^0} = 0$, $\partial^2 U_i^{R_i^*}(P_i, a_i, b_i) / \partial P_i^2 \Big|_{P_i < P_i^0} > 0$ και $\partial^2 U_i^{R_i^*}(P_i, a_i, b_i) / \partial P_i^2 \Big|_{P_i > P_i^0} < 0$.

$P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)$ και στην συνέχεια ακολουθεί τη μορφή της f . Με βάση αυτήν την παρατήρηση βλέπουμε ότι η $U_i^{R_i^*}(P_i, a, b_i)$ μπορεί να είναι είτε κυρτή είτε σιγμοειδής (καθώς αφού το πρώτο μέρος της είναι πάντα κυρτό δε μπορεί να είναι κοίλη).

Αντίστοιχα, το βασικό πρόβλημα βελτιστοποίησης (79) μετασχηματίζεται μέσω των σχέσεων (80) και (81) ως εξής:

$$\begin{aligned} \max_P \quad & \sum_{i=1}^N U_i^{R_i^*}(P_i, a, b_i) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^N P_i \leq P_{\max} \\ & 0 \leq P_i \leq P_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (82)$$

Παρατηρούμε ότι το παραπάνω πρόβλημα είναι ανάλογο του (62) που μελετήσαμε στην προηγούμενη ενότητα και επίσης ότι εξαρτάται μόνο από το διάνυσμα ισχύος των χρηστών (κινητών σταθμών), δηλαδή όταν $X=P$ και η U είναι μόνο κυρτή ή σιγμοειδής συνάρτηση ως προς P . Η αναγωγή αυτή μας επιτρέπει τη απευθείας χρήση της μεθοδολογίας επίλυσης του [82] και των αντίστοιχων αλγορίθμων εύρεσης βέλτιστης λύσης για μη-κυρτά προβλήματα βελτιστοποίησης μια μεταβλητής. Αναλυτικότερα ισχύουν τα ακόλουθα.

Για την επίλυση του προβλήματος (82) υιοθετείται ο αλγόριθμος που βασίζεται στη διαπραγμάτευση και τον προσδιορισμό του βέλτιστου κόστους ανά μονάδα πόρων συστήματος που προτάθηκε στο [82], για τον οποίο αποδείχθηκε η ασυμπτωτική βελτιστότητα της λύση που προσδιορίζει σε σχέση με τον αριθμό των χρηστών στο σύστημα. Ο αλγόριθμος αποτελείται από δύο διακριτά μέρη, η απεικόνιση και εφαρμογή των οποίων στα πλαίσια του προβλήματος (82) έχει ως εξής:

- *Διαδικασία Επιλογής Χρηστών.*

Αρχικά, ο ευκαιριακός ΔΠΔ επιλέγει εκείνους τους χρήστες στους οποίους θα ανατεθεί μη-μηδενική ισχύς μετάδοσης βάσει των τιμών των παραμέτρων $\lambda_i^{\max}$. Η παράμετρος $\lambda_i^{\max}$ αναπαριστά τη μέγιστη τιμή κόστους ανά μονάδα πόρων συστήματος που είναι διατεθειμένος ο κάθε χρήστης i να “πληρώσει” (maximum willingness to pay) και δίδεται από:

$$\lambda_i^{\max} = \min \left\{ \lambda \geq 0 \mid \max_{0 \leq P_i \leq P_{\max}} \left\{ U_i^{R_i^*}(P_i, a, b_i) - \lambda P_i \right\} = 0 \right\} \quad (83)$$

ώστε να μεγιστοποιήσει τη δική του συνάρτηση δικτύου $P_i(\lambda) = \arg \max_{0 \leq P_i \leq P_{\max}} \{U_i(P_i) - \lambda P_i\}$, δηλαδή να μεγιστοποιήσει τη δική του συνάρτηση ευχαρίστησης μείον το “κόστος” των πόρων του συστήματος που θα καταναλωθούν, δηλαδή:

$$P_i(\lambda) = \arg \max_{0 \leq P_i \leq P_{\max}} \{U_i^{R_i^*}(P_i, a, b_i) - \lambda P_i\} \quad (84)$$

Η τιμή της βέλτιστης τιμής κόστους $\lambda_i^{\max}$ ενός χρήστη i μπορεί να υπολογιστεί μονοσήμαντα για τον κάθε χρήστη μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\lambda_i^{\max} = \begin{cases} \left. \frac{\partial U_i^{R_i^*}(P_i, a, b_i)}{\partial P_i} \right|_{P=P^*} & \text{αν η } U_i^{R_i^*} \text{ είναι σιγμοειδής} \\ & \text{συνάρτηση και υπάρχει } P^* \\ \frac{U_i^{R_i^*}(P_{\max}, a, b_i)}{P_{\max}} & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (85)$$

όπου P_i^* προκύπτει από τη μοναδική (θετική) λύση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$U_i^{R_i^*}(P_i, a, b_i) - P_i \frac{\partial U_i^{R_i^*}(P_i, a, b_i)}{\partial P_i} = 0 \quad \text{για } P_i^0 \leq P_i \leq P_{\max} \quad (86)$$

Εν συνεχεία, ο ευκαιριακός ΔΠΔ κατατάσσει του χρήστες κατά φθίνουσα σειρά με βάση την ατομική τιμή βέλτιστου κόστους τους και επιλέγονται εκείνοι οι T πρώτοι για τους οποίους ισχύει ότι:

$$T = \max \left\{ 1 \leq j \leq N \mid \sum_{i=1}^j P_i(\lambda_j^{\max}) \leq P_T \right\} \quad (87)$$

Είναι σημαντικό για την περεταίρω ανάλυσή μας να επισημάνουμε ότι χαρακτηριστικό του παραπάνω αλγορίθμου βέλτιστης επιλογής χρηστών αποτελεί η ιδιότητα ότι για οιοσδήποτε δύο χρήστες i, j , για τους οποίους ισχύει ότι $U_i^{R_i^*} \geq U_j^{R_j^*}$ για κάθε $0 \leq P \leq P_{\max}$, τότε ισχύει ότι $\lambda_i^{\max} \geq \lambda_j^{\max}$ και συνεπώς ο χρήστης i είναι πιο πιθανό να επιλεγεί ώστε να λάβει πόρους του συστήματος σε σχέση με τον χρήστη j (Θεώρημα 3, [80]).

- Διαδικασία Βέλτιστης Ανάθεσης Πόρων.

Για τους χρήστες που επιλέχθηκαν γίνεται η τελική ανάθεση πόρων του συστήματος μέσω ενός αλγορίθμου δυαδικής αναζήτησης που στόχο έχει τον καθορισμό των βέλτιστων τιμών $P_i(\lambda)$ ώστε να μεγιστοποιηθεί η συνολική απόδοση του συστήματος. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται μέσω της εύρεσης της “βέλτιστης τιμής πόρων δικτύου” λ^* , δηλαδή της τιμής λ για την οποία ισχύει ότι $\sum_{i=1}^T P_i(\lambda^*) = P_{\max}$. Γνωρίζοντας την τιμή της βέλτιστης τιμής πόρων δικτύου λ^* μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τους πόρους κάθε χρήστη που επιλέχθηκε βάσει των σχέσεων (80) και (84).

Αναλυτικοί αλγόριθμοι υλοποίησης της παραπάνω διαδικασίας και στο σταθμό βάσης αλλά και στους χρήστες (κινητά τερματικά) δίδονται στην υποενότητα 6.8.

Η μέχρι τώρα ανάλυσή μας επικεντρώθηκε γύρω από δύο παράλληλους και κύριους άξονες στοχεύοντας πάντα στην επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης κατανομής των πόρων ενός ασύρματου CMDA δικτύου όταν εξυπηρετούνται ταυτόχρονα χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και δεδομένων μη πραγματικού χρόνου. Τον πρώτο άξονα αποτέλεσε η ανάλυση του προτεινόμενου δυναμικού πλαισίου ευχαρίστησης χρηστών, ενός καινοτόμου τρόπου απεικόνισης των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ χρηστών στις συναρτήσεις ευχαρίστησής τους και κατ' επέκταση στο ανακύπτον πρόβλημα βελτιστοποίησης, και εν συνεχεία η εφαρμογή του στην περίπτωση χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και τα πιθανοτικά βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσής τους. Ο δεύτερος άξονας επικεντρώθηκε γύρω από την επίλυση του προς εξέταση μη-κυρτού προβλήματος βελτιστοποίησης. Εν συνεχεία, και καθώς υπάρχει η κατάλληλη θεωρητική ανάλυση, δίδεται αναλυτική απάντηση στο ερώτημα: αν ο προτεινόμενος τρόπος δυναμικής μεταβολής των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών επιτυγχάνει το στόχο του. Με απλά λόγια, τεκμηριώνεται θεωρητικά το γιατί και το πώς η μεταβολή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i συμβάλει στην αλλαγή της προτεραιότητας εξυπηρέτησής του σε σχέση με τους υπόλοιπους ενεργούς χρήστες στο σύστημα.

6.6 Συσχέτιση Δυναμικού Πλαισίου Μεταβολής Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Χρηστών και Προτεραιότητας Εξυπηρέτησής τους.

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση (σχέση (87)), γίνεται φανερό ότι η τιμή της βέλτιστης τιμής κόστους $\lambda_i^{\max}$ ενός χρήστη i παίζει καταλυτικό ρόλο στην προτεραιότητα επιλογής του, αφού, όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μεγαλύτερη γίνεται και η πιθανότητά του να επιλεγεί στο να λάβει πόρους του δικτύου και τόσο αυξάνεται το ποσοστό των τελικών πόρων που θα του ανατεθούν την επόμενη χρονοσχισμή, αν αυτός επιλεγεί (σχέσεις (84) και (80)). Το ακόλουθο θεώρημα τεκμηριώνει το επιχείρημα ότι η δυναμική προσαρμογή της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου μέσω της μεταβολής της παραμέτρου b_i , συνεπάγεται και τη δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής και ελέγχου της προτεραιότητάς του να επιλεγεί προς εξυπηρέτηση κατά την επόμενη χρονοσχισμή, σε σχέση με τους υπόλοιπους χρήστες στο σύστημα, μέσω της επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης ανάθεσης πόρων συστήματος.

Θεώρημα 3. Αν ισχύει ότι $A_i = A_j$ και $R_i^{\max} = R_j^{\max}$, τότε αν $b_i < b_j$ ισχύει ότι $\lambda_i^{\max} > \lambda_j^{\max} \quad \forall i, j \in S$.

Απόδειξη: Η απόδειξη του θεωρήματος δίδεται στο Παράρτημα IV. ■

Το θεώρημα 3 τεκμηριώνει θεωρητικά το ότι αν οι λοιπές συνθήκες δικτύου είναι ισοδύναμες μεταξύ δύο χρηστών i, j , δηλαδή έχουν ίδια στιγμιαία ποιότητα περιβάλλοντος εκπομπής και μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, τότε ο χρήστης i με μικρότερη τιμή παραμέτρου b_i έχει

υψηλότερη προτεραιότητα στο να επιλεγεί και να λάβει πόρους συστήματος, κατά την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης (79), σε σχέση με τον χρήστη j ο οποίος έχει μεγαλύτερη τιμή παραμέτρου b_j . Το παραπάνω θεώρημα μπορεί εύκολα να γενικευθεί και στην περίπτωση περισσοτέρων των δύο χρηστών, αποκαλύπτοντας και τεκμηριώνοντας με αυτόν τον τρόπο τη σχέση που υπάρχει μεταξύ των δυναμικά μεταβαλλόμενων συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών και των πόρων που τους αναθέτει το σύστημα και ο ευκαιριακός ΔΠΔ, όταν η ανάθεση αυτή γίνεται μέσω της επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης (79). Συγκεκριμένα, γενικεύοντας το θεώρημα 3, ισχυριζόμαστε ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή της παραμέτρου b_i ενός χρήστη i , τόσο αυξάνεται η προτεραιότητα εξυπηρέτησής του.

Συνεπώς, όταν η ποσότητα των δεδομένων ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου εντός του χρονικού παραθύρου παρατήρησής του τείνει στο να γίνει μικρότερη της επιθυμητής, τότε, μειώνοντας την τιμή της παραμέτρου b_i της συνάρτησής ευχαρίστησης του αυξάνεται η πιθανότητα εξυπηρέτησής του την επόμενη κρίσιμη χρονοσχισμή. Ισχύει δε και το αντίστροφο, κάτι το οποίο επιβεβαιώνει την ισχύ της σχέσης (76) και του προτεινόμενου τρόπου δυναμικής προσαρμογής των συναντήσεων ευχαρίστησης των χρηστών με υπηρεσίας πραγματικού χρόνου με στόχο την διασφάλιση των βραχυπρόθεσμων πιθανοτικών κριτηρίων ρυθμαπόδοσής τους.

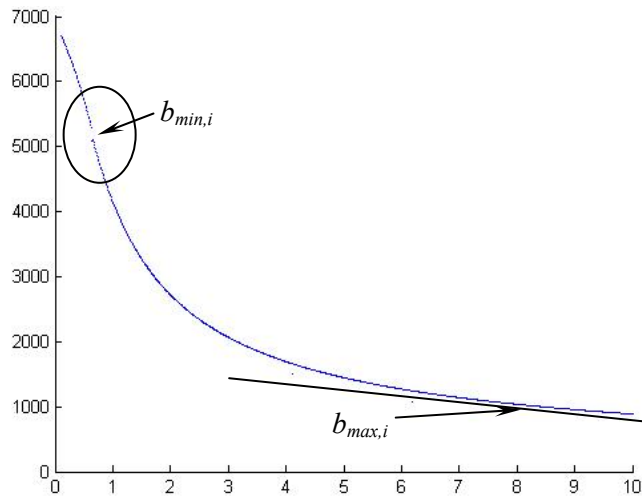
Στην ενότητα που ακολουθεί, ορίζουμε το άνω και κάτω όριο μεταβολής των τιμών της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i} \forall i \in S_{RT}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου (δηλαδή προσδιορίζουμε τις μεταβλητές $b_{i,min}$ και $b_{i,max}$ αντίστοιχα). Τα όρια αυτά προσδιορίζονται ανά χρονοσχισμή και οι τιμές τους παραμένουν αμετάβλητες καθ' όλη την διάρκειά της. Ο προσδιορισμός τους, ολοκληρώνει την περιγραφή της προτεινόμενης διαδικασίας δυναμικής μεταβολής της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$, καθώς προσδιορίζονται πλήρως το σύνολο των μεταβλητών της σχέσης (76). Επιπροσθέτως, αναλύεται ο ρόλος τους στην προτεινόμενη ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ καθώς και οι περιορισμοί που τίθενται λόγω της ύπαρξής τους, στη δυνατότητα διασφάλισης των ΚΠΥ των χρηστών πραγματικού χρόνου. Ειδικότερα, δείχνεται ότι παρόλη τη δυνατότητα αλλαγής της προτεραιότητας εξυπηρέτησης ενός χρήστη υπηρεσίας πραγματικού χρόνου βάσει των ΚΠΥ του μέσω της δυναμικά μεταβαλλόμενης συνάρτησης ευχαρίστησής του, η διασφάλιση των ΚΠΥ του μπορεί να μην είναι εφικτή. Οι λόγοι που μπορεί να συμβεί αυτό είναι α) οι φυσικοί περιορισμοί του συστήματος (του σταθμού βάσης και των κινητών τερματικών των χρηστών), β) η πιθανή στιγμιαία κακή ποιότητα καναλιού του χρήστη και γ) η πιθανή έλλειψη πόρων του συστήματος.

6.7 Περιορισμοί Ελέγχου ΚΠΥ Χρηστών Πραγματικού Χρόνου υπό το Προτεινόμενο Δυναμικό Πλαίσιο Μεταβολής Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Χρηστών

Με την ανάλυση που προηγήθηκε, τεκμηριώθηκε ότι η τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην προτεραιότητα επιλογής του και στο ποσοστό πόρων συστήματος που λαμβάνει ανά χρονοσχισμή. Αυτό συμβαίνει λόγω της επίδρασης που έχει στην τιμή της βέλτιστης τιμής κόστους $\lambda_i^{\max}$ για κάθε χρήστη στο πρόβλημα κατανομής πόρων δικτύου (79). Ωστόσο, η δυνατότητα μεταβολής της τιμής της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ περιορίζεται από ένα άνω $b_{max,i}$ και ένα κάτω $b_{min,i}$ όριο τιμών. Ο προσδιορισμός των παραπάνω ορίων προκύπτει μέσω κατάλληλης συνθήκης βάσει της οποίας καθορίζεται η μη περεταίρω επίδραση της μεταβολής της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ στην τιμή της βέλτιστης τιμής κόστους $\lambda_i^{\max}$ του χρήστη i . Η μη επίδραση της αλλαγής της τιμής μιας μεταβλητής ($\hat{b}_{RT,i}$) στις τιμές μιας άλλης ($\lambda_i^{\max}$), όταν αυτές συνδέονται μέσω δεδομένης συναρτησιακής σχέσης, προσδιορίζεται θεωρητικά από τον μηδενισμό της πρώτης παραγώγου της συνάρτησης αυτής. Συνεπώς, για τον αναλυτικό προσδιορισμό των ορίων μεταβολής της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ ενός χρήστη i χρησιμοποιούμε την ακόλουθη συνθήκη:

$$\left. \frac{\partial \lambda_i^{\max}(\hat{b}_{RT,i})}{\partial \hat{b}_{RT,i}} \right|_{\substack{\hat{b}_{RT,i} < b_{min,i} \\ \hat{b}_{RT,i} > b_{max,i}}} = 0 \quad (88)$$

όπου ως $\lambda_i^{\max} \equiv \lambda_i^{\max}(\hat{b}_{RT,i})$ ορίζουμε τη συναρτησιακή σχέση που συνδέει τις μεταβλητές $\lambda_i^{\max}$ και $\hat{b}_{RT,i}$ (Σχήμα 15). Αναλυτική έκφραση και μελέτη της παράνω συνάρτησης δίδεται στα Παραρτήματα V - XII.



Σχήμα 15. Σχηματική απεικόνιση της συνάρτησης $\lambda_i^{\max}(\hat{b}_{RT,i})$ όταν $A_i=1.5$.

Συνοπτικά, αναφέρουμε ότι βάσει της θεωρητικής ανάλυσής και της εξαγωγής της αναλυτικής μορφής και των ιδιοτήτων της $\lambda_i^{\max}(\hat{b}_{RT,i})$, όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 15, παρατηρούμε ότι για μια και μόνο μία μικρή τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ κοντά στο 0, εμφανίζεται ασυνέχεια στη γραφική παράστασή της. Η παραπάνω ασυνέχεια μπορεί να παρατηρηθεί για κάθε τιμή της παραμέτρου A_i και για κάθε χρήστη i . Η ασυνέχεια αυτή, όπως θα δούμε παρακάτω, αποδεικνύεται ότι υπάρχει πάντα και η θέση εμφάνισής της καθορίζει την τιμή της παραμέτρου $b_{min,i}$. Επίσης, παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της συνάρτησης $\lambda_i^{\max}(\hat{b}_{RT,i})$ για μεγάλες τιμές της $\hat{b}_{RT,i}$ στρέφει τα κοίλα άνω και άρα η παράγωγος της μπορεί να προσεγγίσει το μηδέν με οιαδήποτε μεγάλη ακρίβεια ε . Η ιδιότητα αυτή καθορίζει ότι για μεγάλες τιμές της παράμετρου $\hat{b}_{RT,i}$, όσο μεγάλες και αν είναι οι περεταίρω μεταβολές αυτής, θα παρατηρούμε μόνο μικρές μεταβολές της παραμέτρου $\lambda_i^{\max}$, αφού η παράγωγος της $\lambda_i^{\max}$ ως προς $\hat{b}_{RT,i}$ τείνει στο μηδέν για μεγάλες τιμές του $\hat{b}_{RT,i}$.

• **Ορισμός των Μεταβλητών $b_{min,i}$ και $b_{max,i} \forall i \in S_{RT}$**

Ακολουθώντας μια πλήρως συναρτησιακή ανάλυση βάσει της σχέσης (88), το κάτω όριο της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου ορίζεται ως εξής:

Θεώρημα 4. Ορισμός του Κάτω Ορίου $b_{min,i} \forall i \in S_{RT}$

Ορίζουμε ως $b_{min,i} \forall i \in S_{RT}$ τη μέγιστη από τις μικρότερες τιμές της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου την χρονοσχισμή t , για την οποία ισχύει ότι:

$$b_{min,i} = \max \{ \hat{b}_{RT,i} : P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) \Big|_{\hat{b}_{RT,i}} > P_i^0 \Big|_{\hat{b}_{RT,i}} \}$$

$$\text{όπου } \frac{\partial^2 U_i^{R_i^*}(P_i)}{\partial P_i^2} \Big|_{P=P_i^0 \Big|_{\hat{b}_{RT,i}}} = 0$$

$$\text{και } \left[U_i^{R_i^*}(P, \hat{b}_{RT,i}) - P \frac{\partial U_i^{R_i^*}(P, \hat{b}_{RT,i})}{\partial P} \right]_{P=P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) \Big|_{\hat{b}_{RT,i}}} > 0 \}$$

όπου $b_{min,i} \in [0, b_{RT,i})$. Επίσης, ισχύει ότι όταν $\hat{b}_{RT,i} < b_{min,i}$ τότε $\frac{\partial \lambda_i^{\max}(\hat{b}_{RT,i})}{\partial \hat{b}_{RT,i}} \Big|_{\hat{b}_{RT,i} < b_{min,i}} = 0$.

Απόδειξη: Η απόδειξη του θεωρήματος δίδεται στο Παράρτημα V. ■

Η ύπαρξη του παραπάνω κάτω ορίου αποκαλύπτει έναν εγγενή περιορισμού ελέγχου της απόδοσης και της διασφάλισης των ΚΠΥ ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, όταν αυτός εξυπηρετείται υπό ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ, εντός ενός διαρκώς μεταβαλλόμενου ασύρματου περιβάλλοντος. Ο λόγος ύπαρξης του παραπάνω φαινομένου είναι διπλός. Από την μία μεριά, λόγω της ευκαιριακής φύσης του, όταν ο ΔΠΔ αντιλαμβάνεται την ύπαρξη μειωμένων πόρων δικτύου μπορεί πιθανότατα να υποβιβάσει την ποιότητα υπηρεσίας κάποιων χρηστών, με στόχο τη μεγιστοποίηση της συνολικής ευχαρίστησης των χρηστών στο σύστημα. Αυτό μπορεί κάλλιστα να συμβεί και στην περίπτωση ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου. Από την άλλη, ακόμα και αν είναι διαθέσιμη πληθώρα πόρων συστήματος, τότε λόγω της στιγμιαίας κακής ποιότητας του καναλιού ενός χρήστη και των φυσικών περιορισμών του κινητού τερματικού του, μπορεί να μη γίνει εφικτός ο στόχος της διασφάλισης των ΚΠΥ του. Το παραπάνω διαφαίνεται από την ισχυρή εξάρτηση της τιμής της μεταβλητής $b_{\min,i}$ και κατ' επέκταση της δυνατότητας μεταβολής της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, από τη μεταβλητή A_i δηλαδή, τη στιγμιαία ποιότητα του ασύρματου περιβάλλοντος.

Το ακόλουθο θεώρημα ορίζει το άνω όριο της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου.

Θεώρημα 5. Ορισμός του Άνω Ορίου $b_{\max,i} \forall i \in S_{RT}$

Ορίζουμε ως $b_{\max,i} \forall i \in S_{RT}$ τη μέγιστη τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου τη χρονοσχισμή t , ως εξής:

$$b_{\max,i} = \left\{ \hat{b}_{RT,i} : \min \left(\frac{\partial \hat{b}_{RT,i}}{\partial \lambda_i^{\max}} \bigg|_{\hat{b}_{RT,i}=b_{\max,i}} \leq -L_{\max}, B_{MAX,i}(A_i) \right) \right\}$$

όπου $L_{\max}$ είναι μια μεγάλη θετική σταθερά $\hat{b}_{RT,i} \gg b_{RT,i}$. Επίσης,

$$B_{MAX,i}(A_i) = \frac{1}{a} \left\{ \ln \left(\frac{c_i}{1 + \frac{A_i}{aW(P_{\max} + A_i)} + c_i d_i} - 1 \right) + \frac{aWP_{\max}}{R_i^{\max} A_i} \right\}.$$

Απόδειξη: Η απόδειξη του θεωρήματος δίδεται στο Παράρτημα VI. ■

Από τον ορισμό της μεταβλητής $B_{MAX,i}(A_i)$ παρατηρούμε ότι όσο χειρότερες είναι οι συνθήκες καναλιού ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου (δηλαδή, όσο αυξάνει η τιμή της παραμέτρου A_i), τόσο μικρότερη είναι και η δυνατότητά που έχουμε στο να επηρεάσουμε την

προτεραιότητα επιλογής του, καθώς, μειώνεται το εύρος μεταβολής της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης του.

• **Αλγόριθμοι Υπολογισμού των Μεταβλητών $b_{min,i}$ και $b_{max,i}$ $\forall i \in S_{RT}$ ανά Χρονοσχισμή**

Ολοκληρώνουμε την ανάλυση της παρούσας ενότητας με την περιγραφή δύο προτεινόμενων αλγορίθμων χαμηλής πολυπλοκότητας, μέσω των οποίων γίνεται ο υπολογισμός του άνω και κάτω ορίου της μεταβλητής $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου. Αρχικά, βάσει του θεωρήματος 4, προτείνεται ο ακόλουθος αλγόριθμος για τον ανά χρονοσχισμή υπολογισμό του κάτω φράγματος της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$, $b_{min,i}$, ο οποίος βασίζεται στην τεχνική “διαίρει και βασίλευε”.

Αλγόριθμος υπολογισμού: $b_{min,i}$ $\forall i \in S_{RT}$.

Αρχικά επιτρέψτε μας την αναφορά στις ακόλουθες συνθήκες

$$P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) \Big|_{\hat{b}_{RT,i}(t)=b_{min,i}(t)^{(v)}} > P_i^0 \Big|_{\hat{b}_{RT,i}(t)=b_{min,i}(t)^{(v)}} \text{ και } \left[U_i^{R_i^*}(P, \hat{b}_{RT,i}) - P \frac{\partial U_i^{R_i^*}(P, \hat{b}_{RT,i})}{\partial P} \right]_{P=P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) \Big|_{\hat{b}_{RT,i}=b_{min,i}^{(v)}}} > 0$$

ως συνθήκες A και B αντίστοιχα.

Βήμα 1. Τίθενται $v = 1$, $l^{(v)} = 0$, $r^{(v)} = b_{RT,i}$ και $b_{min,i}^{(v)} = b_{RT,i}$.

Βήμα 2. Αν A και B είναι αληθείς τότε $l^{(v+1)} = (l^{(v)} + r^{(v)})/2$, $r^{(v+1)} = r^{(v)}$ και $b_{min,i}^{(v+1)} = l^{(v+1)}$
αλλιώς $l^{(v+1)} = l^{(v)}$, $r^{(v+1)} = (l^{(v)} + r^{(v)})/2$ και $b_{min,i}^{(v+1)} = r^{(v+1)}$.

Βήμα 3. Αν $|l^{(v+1)} - l^{(v)}| > \varepsilon$ ή $|r^{(v+1)} - r^{(v)}| > \varepsilon$ τότε $v = v + 1$, πηγαίνει στο Βήμα 2.

Βήμα 4. Αν (A και B) δεν είναι αληθείς τότε $b_{min,i}^{(v+1)} = b_{min,i}^{(v+1)} - \varepsilon$.

Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων του παραπάνω αλγορίθμου v^* , δίνεται από τη σχέση $v^* \leq \log_2(b_{RT,i}/\varepsilon) + 1$, όπου ε είναι μια μικρή θετική σταθερά, κάτι που καταδεικνύει και την πολυπλοκότητά του. Τέλος, μέσω της χρήσης του θεωρήματος 5, προτείνεται ο ακόλουθος αλγόριθμος για τον ανά χρονοσχισμή υπολογισμό του άνω φράγματος της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$, $b_{max,i}$.

Αλγόριθμος υπολογισμού: $b_{\max,i} \forall i \in S_{RT}$.

Βήμα 1. Έστω $L_{\max}$ μια μεγάλη θετική σταθερά.

Βήμα 2. Τίθεται $n = 0$, $b_{\max,i}^{(n=0)} = b_{RT,i}$.

Βήμα 3. Για $n > 0$ τότε $b_{\max,i}^{(n+1)} = b_{\max,i}^{(n)} + 10^{\lfloor D^{(n)} - 1 \rfloor}$ όπου: $D^{(n)} = \frac{\partial \hat{b}_{RT,i}}{\partial \lambda_i^{\max}} \bigg|_{\hat{b}_{RT,j} = b_{\max,j}^{(n)}}$

Βήμα 4. Αν $\frac{\partial \hat{b}_{RT,i}}{\partial \lambda_i^{\max}} \bigg|_{\hat{b}_{RT,j} = b_{\max,j}^{(n+1)}} < -L_{\max}$, πήγαινε στο **Βήμα 7**.

Βήμα 5. Αν $b_{\max,i}^{(n+1)} > B_{MAX,i}(A_i)$, πήγαινε στο **Βήμα 7**.

Βήμα 6. $n = n + 1$ και πήγαινε στο **Βήμα 3**.

Βήμα 7. Σταμάτα.

Ο παραπάνω αλγόριθμος ακολουθεί την τεχνική της “απότομης καθόδου” (steepest descend) βάσει της οποίας χρησιμοποιούμε την πληροφορία της τιμής της παραγώγου της συνάρτησης $\hat{b}_{RT,i}(\lambda_i^{\max})$ σε κάθε σημείο αναζήτησης, ώστε να αλλάξουμε κατάλληλα το βήμα αναζήτησης και άρα να επιτύχουμε γρηγορότερη σύγκλιση του αλγορίθμου και με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η μέχρι τώρα ανάλυσή μας ακολούθησε τα εξής βήματα; α) προτάθηκε πλαίσιο δυναμικής μεταβολής συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών, ένας καινοτόμος τρόπος απεικόνισης των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ χρηστών στις συναρτήσεις ευχαρίστησής τους και κατ’ επέκταση στο ανακύπτον πρόβλημα βελτιστοποίησης, β) έγινε η εφαρμογή του στην περίπτωση χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, γ) επιλύθηκε το προς εξέταση ανακύπτον μη-κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, δ) τεκμηριώθηκε θεωρητικά το γιατί και το πώς η μεταβολή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i πραγματικού χρόνου συμβάλει στην αλλαγή της προτεραιότητας εξυπηρέτησής του σε σχέση με τους υπόλοιπους ενεργούς χρήστες στο σύστημα και ε) ορίστηκαν τα όρια μεταβολής της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}(t)$ και προτάθηκαν αλγόριθμοι υπολογισμού τους ανά χρονοσχισμή. Υπενθυμίζεται, ότι όλα τα παραπάνω είχαν ως στόχο την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης κατανομής των πόρων ενός ασύρματου CMDA δικτύου όταν εξυπηρετούνται ταυτόχρονα χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και δεδομένων μη πραγματικού χρόνου. Πλέον, απομένουν ανοικτά τα εξής δύο ζητήματα, α) η περιγραφή κατάλληλης ευκαιριακή πολιτικής ΔΠΔ η οποία να υλοποιεί τα παραπάνω καθώς και β) η επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητάς της μέσω προσομοιώσεων. Στην επόμενη ενότητα δίδουμε απάντηση στο πρώτο ερώτημα, καλύπτοντας το αλγοριθμικό σκέλος.

6.8 Προτεινόμενη Ευκαιριακή Πολιτική ΔΠΔ – Οδεύοντας προς την Υλοποίηση Αυτόνομων Ασύρματων Κόμβων

Με τον όρο *αυτονομία* ενός ασύρματου κόμβου / χρήστη (node self-adaptation) – όσον αφορά τη διασφάλιση των ΚΠΥ των υπηρεσιών του μέσω αυτόνομων μηχανισμών προσαρμογής– αναφερόμαστε στην ικανότητα του κόμβου να διαισθάνεται και να αντιλαμβάνεται τις μεταβολές και τις διακυμάνσεις στην απόδοση της υπηρεσίας του, καθώς και τις αλλαγές του ασύρματου περιβάλλοντος (όπως είναι η ποιότητα καναλιού χρήστη και ο θόρυβος στο σύστημα) και εν συνεχεία, να αντιδρά αυτόνομα σε γεγονότα που επηρεάζουν την ομαλή διασφάλιση των ΚΠΥ της υπηρεσίας του και την απόδοση αυτής με στόχο τη διαρκή βελτιστοποίησή της. Μια τέτοια συμπεριφορά αναγνωρίστηκε κατά τη διάρκεια των προσπαθειών μας για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης κατανομής πόρων CDMA ασύρματου δικτύου (ρυθμού μετάδοσης και ισχύος μετάδοσης χρηστών) κατά τη ζεύξη καθόδου, η οποία αποκαλύπτεται στο παρόν κεφάλαιο.

Συγκεκριμένα, δίδουμε στους χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου τη δυνατότητα α) της συνεχούς παρακολούθησης της απόδοσης της υπηρεσίας τους, β) της περεταίρω ανάλυσής της πληροφορίας αυτής με στόχο τον υπολογισμό των πόρων του συστήματος που απαιτούν σύμφωνα με τα βραχυπρόθεσμα ΚΠΥ τους και στη συνέχεια, γ) της δυναμικής προσαρμογής της συνάρτησης ευχαρίστησής τους με σκοπό την επίδραση και αλλαγή, όταν αυτό απαιτείται, της προτεραιότητας εξυπηρέτησής τους ανά χρονοσχισμή, καθώς και του αντίστοιχου ποσοστού πόρων συστήματος που θα λάβουν. Με απλά λόγια, δίδουμε τη δυνατότητα στους ασύρματους κόμβους να υλοποιούν τοπικά (δηλαδή αυτόνομα ο κάθε χρήστης) το πλαίσιο δυναμικής μεταβολής των συναρτήσεων ευχαρίστησής τους, το οποίο προτάθηκε στις προηγούμενες ενότητες. Στην συνέχεια, οι χρήστες αλληλεπιδρούν ανά χρονοσχισμή με το σταθμό βάσης, ο οποίος αναλαμβάνει α) τη συλλογή των απαιτήσεων σε πόρους των χρηστών, μέσω της λήψης των συναρτήσεων ευχαρίστησής τους (της μορφής τους) ανά χρονοσχισμή, β) θέτει το ανακύπτον πρόβλημα βελτιστοποίησης (79), γ) το επιλύει και δ) υπολογίζει τα βέλτιστα διανύσματα ρυθμού και ισχύος μετάδοσης των χρηστών. Βάσει αυτών, οι χρήστες εξυπηρετούνται την επόμενη χρονοσχισμή.

Στην συνέχεια ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή της ευκαιριακής πολιτικής ΔΠΔ που σκιαγραφήθηκε προηγουμένως μέσω της πρότασης δύο αλγορίθμων που την υλοποιούν. Επί της ουσίας, οι αλγόριθμοι που προτείνονται υλοποιούν την αναλυτική επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης κατανομής πόρων δικτύου (79) και ο σχεδιασμός τους βασίζεται στην ανάλυση που προηγήθηκε.

Η προτεινόμενη ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ καλείται Ευκαιριακή Πολιτική Ελέγχου Ρυθμού και Ισχύος Μετάδοσης Χρηστών βασισμένη σε Πλαίσιο Δυναμικής Μεταβολής Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Χρηστών (Dynamic Utility Adaptation based Users' Power and Rate Allocation (DUA_UPRA) scheme) στην οποία από εδώ και στο εξής θα αναφερόμαστε με το συντομογραφικό

όρο DUA_UPRA. Η ευκαιριακή πολιτική DUA_UPRA υλοποιείται μέσω της αποτελεσματικής αλληλεπίδρασης δύο αλγορίθμων χαμηλής πολυπλοκότητας εκ των οποίων ο ένας εκτελείται στο σταθμό βάσης της κυψέλης και ο άλλος στο κάθε ενεργό χρήστη/ασύρματο κόμβο αυτής. Η αλληλεπίδραση και επικοινωνία των παραπάνω δύο αλγορίθμων γίνεται με σύγχρονο τρόπο ανά χρονοσχισμή. Από την πλευρά ενός ασύρματου κόμβου/χρήστη, η προτεινόμενη πολιτική DUA_UPRA εισαγάγει ένα βρόγχο ελέγχου μέσω του οποίου δίδεται η δυνατότητα στο χρήστη της αυτόνομης βελτιστοποίησης της υπηρεσίας του και της διασφάλισης των ΚΠΥ αυτής, ενώ στο σταθμό βάσης εισάγεται ένας ευέλικτος αλγόριθμος επίλυσης του ανακύπτοντος προβλήματος βελτιστοποίησης ανά χρονοσχισμή και ανάθεσης των πόρων του συστήματος στους χρήστες αυτού.

Ευκαιριακή Πολιτική ΔΠΔ - DUA UPRA

Αλγόριθμος στον Ασύρματου Κόμβου (Βρόγχος Ελέγχου)

Βήμα 1. Καταγραφή Πληροφορίας:

Ο χρήστης υπολογίζει το ποσό των δεδομένων που έλαβε εντός του τρέχοντος χρονικού παραθύρου παρατήρησης του σύμφωνα με την σχέση (75).

Βήμα 2. Επεξεργασία Πληροφορίας:

Ο χρήστης καθορίζει τις ανάγκες του για πόρους δικτύου σύμφωνα με τα ΚΠΥ του (βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσης), μέσω των σχέσεων (77) ή (78).

Βήμα 3. Λήψη Αποφάσεων με Στόχο την Αυτόνομη Βελτιστοποίηση:

Ο χρήστης ενημερώνει το ΔΠΔ στο σταθμό βάσης για την διασφάλιση ή μη των ΚΠΥ του καθώς και για τις απαιτήσεις του σε πόρους δικτύου, μέσω της δυναμικής μεταβολής της συνάρτησης ευχαρίστησης του, όπως αυτή ορίστηκε στη σχέση (76) και στην συνέχεια, μεταδίδει την παραπάνω πληροφορία (δηλαδή την νέα συνάρτηση ευχαρίστησής του) στο σταθμό βάσης μέσω της ενθυλάκωσής της στα πακέτα ελέγχου ρυθμού μετάδοσης (Data Rate Control - DRC) που αποστέλλει ανά χρονοσχισμή.

Αλγόριθμος στο Σταθμού Βάσης (Ευκαιριακός ΔΠΔ)

Βήμα 1. Ο ΔΠΔ συγκεντρώνει τις συναρτήσεις ευχαρίστησης των ενεργών χρηστών στο σύστημα.

Βήμα 2. Αναθεωρεί και διαμορφώνει το ανακύπτον μη-κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης πόρων (ρυθμού και ισχύος μετάδοσης χρηστών) συστήματος (79) σύμφωνα με τις στιγμιαίες συναρτήσεις ευχαρίστησης χρηστών (δηλαδή $U_{RT,i}^*(P,a,\hat{b}_{RT,i}) \quad \forall i \in S_{RT}$ και $U_{NRT,j}^*(P,a,b_{NRT,j}) \quad \forall j \in S_{NRT}$).

Βήμα 3. Γίνεται επιλογή εκείνου του συνόλου χρηστών που θα λάβουν πόρους συστήματος την επόμενη χρονοσχισμή και οι οποίοι βελτιστοποιούν τη συνολική απόδοση του συστήματος, σύμφωνα τη διαδικασία επιλογής ασύρματων κόμβων που περιγράφεται από τις σχέσεις (85)–(87) (Παράρτημα III, Αλγόριθμος Α).

Βήμα 4. Το τελικό βέλτιστο διάνυσμα ισχύος εκπομπής κατά τη ζεύξη καθόδου υπολογίζεται υιοθετώντας τον αλγόριθμο ανάθεσης ισχύος που προτάθηκε στο [82] (Παράρτημα III. Β); και το βέλτιστο διάνυσμα ρυθμού μετάδοσης κατά τη ζεύξη καθόδου υπολογίζεται για τους χρήστες με υπηρεσία μη πραγματικού και πραγματικού χρόνου μέσω των σχέσεων $\hat{R}_{NRT,i}^{R_i^*} = \hat{U}_{NRT,i}^{R_i^*}(P_i,a,b_{NRT,i}) \quad \forall i \in S_{NRT}$ και $\hat{R}_{RT,i}^{R_i^*} = \hat{U}_{RT,i}^{R_i^*}(P_i,a,b_{RT,i}) \quad \forall i \in S_{RT}$, αντίστοιχα (80).

Αξίζει να σημειώσουμε σε αυτό το σημείο, ότι ο υπολογισμός της ισχύος μετάδοσης και του ρυθμού μετάδοσης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου γίνεται χρησιμοποιώντας σε όλες τις εμπλεκόμενες σχέσεις την παράμετρο $b_{RT,i}$ η οποία αντικατοπτρίζει το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται, (Βήμα 4) και όχι την $\hat{b}_{RT,i}$.

6.9 Αξιολόγηση Επίδοσης Προτεινόμενης Ευκαιριακής Πολιτικής ΔΠΔ

Η παρούσα ενότητα εμπεριέχει αναλυτική αξιολόγηση της λειτουργίας και της επίδοσης της προτεινόμενης ευκαιριακής πολιτικής ελέγχου ρυθμού και ισχύος μετάδοσης χρηστών βασισμένης σε πλαίσιο δυναμικής μεταβολής συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών, DUA_UPRA, μέσω μοντελοποίησης και προσομοιώσεων. Παράλληλα, με στόχο την καλλίτερη παρουσίαση και ανάλυση της απόδοσης και της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης πολιτικής σε σχέση με τη α) συνολική μέση ρυθμαπόδοση του συστήματος και β) τη διασφάλιση των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ

χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (real time users - RT) που επιτυγχάνεται υπό αυτή, υλοποιήθηκε και παρουσιάζεται η συγκριτική της μελέτη με τη βασική ευκαιριακή πολιτική ελέγχου ισχύος και ρυθμού μετάδοσης χρηστών η οποία προτάθηκε στο [80] (στην συνέχεια του κεφαλαίου αναφερόμαστε στην πολιτική αυτή ως UPRA). Η πολιτική UPRA έχει ως μοναδικό στόχο τη βελτιστοποίηση της συνολικής πραγματικής ρυθμαπόδοσης των χρηστών (goodput) χωρίς να λαμβάνει υπόψη της τα ΚΥΠ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

Η ανάλυσή μας επικεντρώνεται στη μελέτη μιας μόνο κυψέλης ενός CDMA ασύρματου δικτύου. Ο χρόνος είναι διαιρεμένος σε χρονοσχισμές ίσου μεγέθους και διάρκειας 1.67 msec , ενώ η συνολική διάρκεια κάθε προσομοίωσης είναι 10.000 slots . Υποθέτουμε ότι ο σταθμός βάσης βρίσκεται στο κέντρο της κυψέλης που εξετάζουμε και ότι η μέγιστη συνολική ισχύς μετάδοσής του είναι $P_{max}=10$ (Watts). Παράλληλα, το κέρδος μετάδοσης από το σταθμό βάσης προς τον εκάστοτε χρήστη i , G_i , μοντελοποιείται ως: $G_i = K_i / d_i^a$ όπου η μεταβλητή d_i εκφράζει την απόσταση του χρήστη i από το σταθμό βάσης, ως a' ορίζεται ο εκθέτης απωλειών διαδρομής ($a'=4$), και η μεταβλητή K_i ορίζει μια τυχαία μεταβλητή η οποία ακολουθεί «log-normal» κατανομή, με μέση τιμή ίση με 0 και διακύμανση ίση με $\sigma^2 = 8(\text{dB})$. Μέσω της τ.μ. K_i , αναπαριστώνται και εισάγονται στο μοντέλο προσομοίωσης τα φαινόμενα σκίασης που παρατηρούνται σε έναν ασύρματο δίαυλο [89].

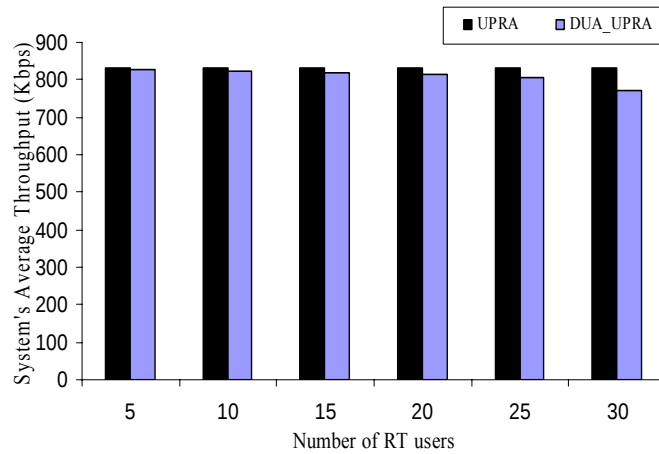
Θεωρούμε ότι το εύρος ζώνης εξάπλωσης (spreading bandwidth) του CDMA ασύρματου δικτύου είναι ίσο με $W = 10^8$ και ότι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης κατά τη ζεύξη καθόδου για κάθε χρήστη είναι $R_i^{\max} = 2 \cdot 10^3 \text{ Kbps}$. Ο συνολικός αριθμός των χρηστών στο σύστημα είναι ίσος με $N=30$ και υποθέτουμε ότι όλοι οι χρήστες έχουν συνέχεια δεδομένα προς μετάδοση στους αντίστοιχους καταχωρητές τους στο σταθμό βάσης (continuously backlogged users). Θεωρούμε την ύπαρξη δύο τύπων χρηστών βάσει της υπηρεσίας τους, τους χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου τους οποίους συμβολίζουμε ως NRT (και το πλήθος αυτών ως N_{NRT}), και τους χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου RT (N_{RT}). Ως ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου τέθηκαν τα ακόλουθα, α) απαίτηση για σταθερό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ίσο με $R_{RT,i}=512 \text{ kbps} \quad \forall i \in S_{RT}$ β) χρονικό παράθυρο παρατήρησης ίσο με $W_i=20 \text{ slots} \quad \forall i \in S_{RT}$ (το οποίο καθορίζει και αυστηρή απαίτηση καθυστέρησης μετάδοσης δεδομένων) και βάσει των παραπάνω, γ) το κάτω όριο του ποσού των δεδομένων, που απαιτεί να λάβει ο εκάστοτε χρήστης με υπηρεσία πραγματικού χρόνου εντός του χρονικού παραθύρου παρατήρησής του είναι ίσο με $B_{RT,i}=17002 \text{ bits}$. Η μεταβλητή ευαισθησίας της προτεινόμενης ευκαιριακής πολιτικής DUA_UPRA τέθηκε ίση με $Tr=0.3$. Επίσης, θεωρείται ότι και οι δύο τύποι χρηστών χρησιμοποιούν το ίδιο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Για το λόγο αυτό, υποθέτουμε ότι όλοι έχουν την ίδια μορφή συνάρτησης απόδοσης $f_i(\gamma)$, της οποίας οι παράμετροι τέθηκαν ως $a=2$ και $b_{NRT,j}=b_{RT,i}=3 \quad \forall i \in S_{RT}, \forall j \in S_{NRT}$ [80], [82]. Τέλος, για τον υπολογισμό του άνω και του κάτω ορίου της μεταβλητής $\hat{b}_{RT,i}(t)$ ενός χρήστη με

υπηρεσία πραγματικού χρόνου ανά χρονοσχισμή t σύμφωνα με τους αλγορίθμους που προτάθηκαν στη υποενότητα 6.7, θεωρήσαμε ότι $\varepsilon = 10^{-5}$ και $L_{max} = 10^5$.

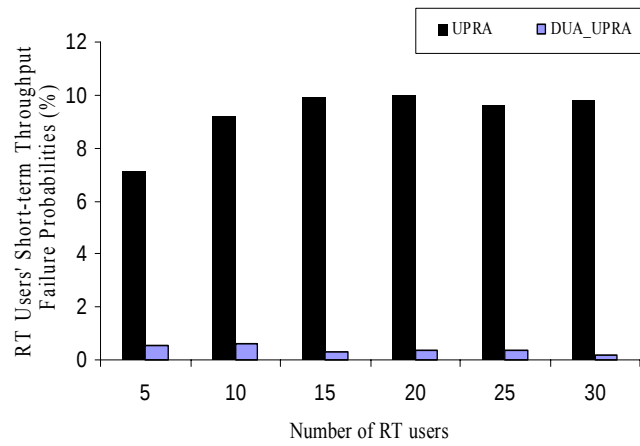
Με στόχο την καλλίτερη αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος υπό την προτεινόμενη ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ DUA_UPRA υλοποιήσαμε, εξετάσαμε και παρουσιάζουμε αναλυτικά δύο διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο, το οποίο αναφέρεται ως SC1 υποθέτουμε ότι η μέση τιμή της ποιότητας του καναλιού όλων των χρηστών στο σύστημα είναι ίδια. Στόχος μας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς του συστήματος υπό την προτεινόμενη πολιτική σε σχέση με α) την ικανοποίηση των ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου και β) την επιβεβαίωση της εύρυθμης λειτουργίας και της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου πλαισίου δυναμικής μεταβολής των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών, στο να αντικατοπτρίζουν με σαφήνεια στην πολιτική ΔΠΔ του συστήματος τη συνολική τους απόδοση/ευχαρίστηση. Στο δεύτερο σενάριο, το οποίο αναφέρεται ως SC2, αξιολογούμε την επίδοση του συστήματος υπό την προτεινόμενη ευκαιριακή πολιτική όταν χρήστες με διαφορετική μέση τιμή ποιότητας καναλιού εξυπηρετούνται ταυτόχρονα. Στόχος μας είναι να αναδείξουμε την ικανότητα και την ευελιξία της προτεινόμενης πολιτικής ΔΠΔ στο να προσαρμόζει κατάλληλα την ανάθεση των πόρων του συστήματος στους χρήστες αυτού, όχι μόνο βάσει των διάφορων ΚΠΥ τους, αλλά, και βάσει της μέσης ποιότητας καναλιού τους, ώστε να μειώνει αισθητά τις αρνητικές συνέπειες και ανισότητες που προκαλούνται μεταξύ των χρηστών λόγω του φαινομένου “ κοντινού – μακρινού χρήστη” (users’ “near – far” effect).

6.9.1 1^ο Σενάριο Προσομοίωσης (SC1)

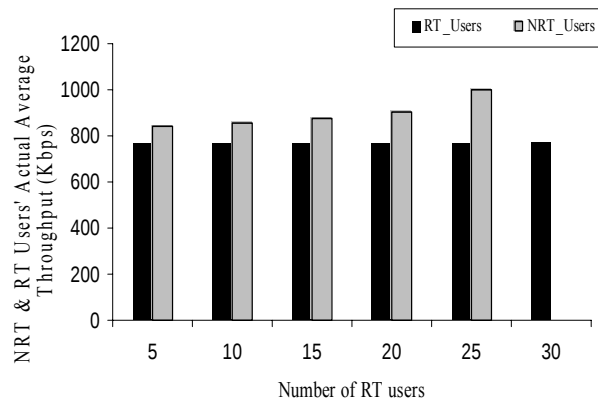
Στο Σχήμα 16, παρουσιάζεται η συνολική μέση ρυθμαπόδοση του συστήματος συναρτήσει του πλήθους των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου που ήταν ενεργοί στο σύστημα σε κάθε προσομοίωση (οι τιμές πλήθους χρηστών πραγματικού χρόνου που εξετάστηκαν αποτέλεσαν πολλαπλάσια του πέντε, δηλαδή $N_{RT}=5,10,...,30$). Παράλληλα, το Σχήμα 17, παρουσιάζει τις αντίστοιχες τιμές της πιθανότητας μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (δηλαδή της πιθανότητας $\Pr[\hat{\beta}_{RT,i}(t) \leq B_{RT,i}]_{W_i}$) συναρτήσει του πλήθους τους στο σύστημα, υπό τις ευκαιριακές πολιτικές ΔΠΔ UPRA (τα αποτελέσματα δίδονται σε μαύρες στήλες) και DUA_UPRA (τα αποτελέσματα δίδονται σε γαλάζιες στήλες).



Σχήμα 16. Ολική μέση ρυθμαπόδοση συστήματος συναρτήσει του πλήθους των χρηστών πραγματικού χρόνου στο σύστημα, κατά το σενάριο SC1.



Σχήμα 17. Πιθανότητες μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης χρηστών πραγματικού χρόνου συναρτήσει του πλήθους των χρηστών πραγματικού χρόνου στο σύστημα, κατά το σενάριο SC1.

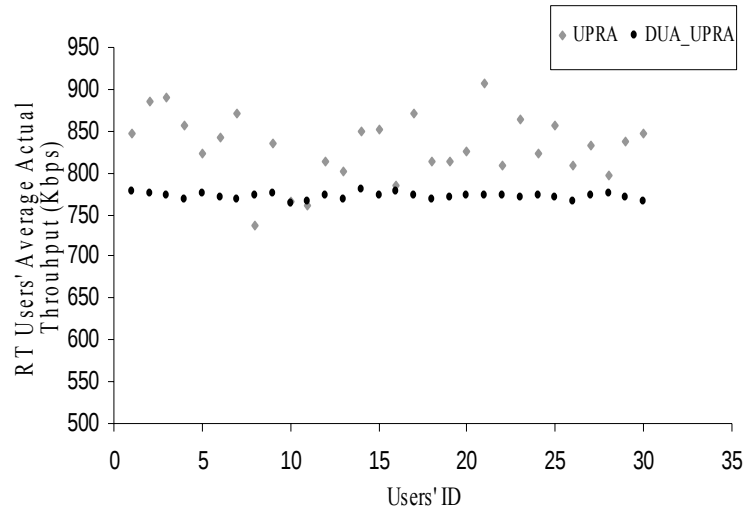


Σχήμα 18. Μέση πραγματική ρυθμαπόδοση χρηστών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου υπό την πολιτική DUA_UPRA συναρτήσει του πλήθους των χρηστών πραγματικού χρόνου στο σύστημα, κατά το σενάριο SC1.

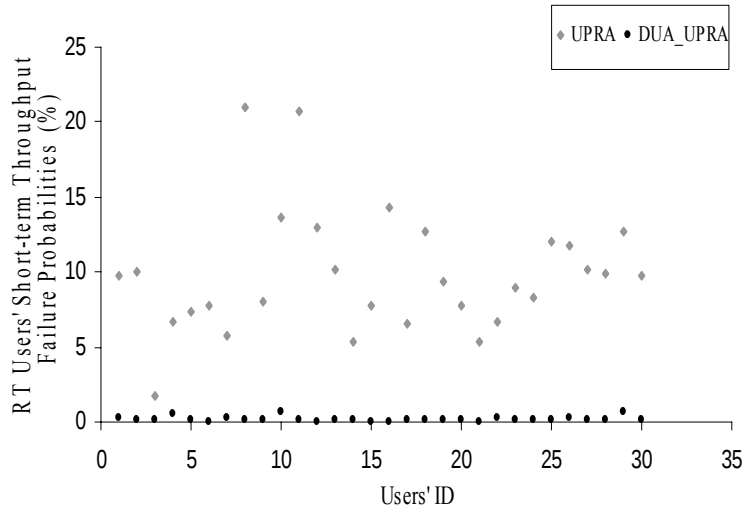
Αρχικά, μπορούμε ξεκάθαρα να παρατηρήσουμε από τα αποτελέσματα του Σχήματος 17, ότι οι πιθανότητες μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου υπό την προτεινόμενη ευκαιριακή πολιτική DUA_UPRA είναι εξαιρετικά μικρές και παρουσιάζουν σημαντική μείωση, συγκριτικά με αυτές που επιτυγχάνει η πολιτική UPRA. Αυτό παρατηρείται ακόμα και για μεγάλο πλήθος χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου στο σύστημα. Παράλληλα, μπορούμε να διακρίνουμε ότι η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης πολιτικής ΔΠΔ, στο να ικανοποιεί τα αυστηρά βραχυπρόθεσμα ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, συνοδεύεται από πολύ μικρές απώλειες στη συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος (και ανά χρήστη). Συγκεκριμένα, όπως αναδεικνύουν τα αποτελέσματα του Σχήματος 16, η τιμή της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος υπό την πολιτική DUA_UPRA παραμένει παραπλήσια εκείνης που επιτυγχάνει η άπληστη ευκαιριακή πολιτική UPRA.

Επιπροσθέτως, μέσω της σχολαστικότερης παρατήρησης του τρόπου με τον οποίο κατανέμονται οι πόροι του συστήματος στους χρήστες αυτού και ειδικότερα, της μέσης πραγματικής ρυθμαπόδοσης (goodput) που επιτυγχάνεται για κάθε τύπο χρήστη, μπορούμε να διακρίνουμε μια άκρως επιθυμητή ιδιότητα της προτεινόμενης πολιτικής ΔΠΔ. Συγκεκριμένα, η προτεινόμενη πολιτική ΔΠΔ εκμεταλλεύεται την ευκαιριακή της φύση ξεχωριστά και με διαφορετικό τρόπο και στόχο για κάθε τύπο χρήστη, ώστε να επιτύχει την διασφάλιση των διαφορετικών ΚΠΥ τους με βέλτιστο τρόπο.

Προς αυτή την κατεύθυνση, στο Σχήμα 18, παρουσιάζεται η μέση τιμή της πραγματικής ρυθμαπόδοσης (goodput) των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού (RT) και μη πραγματικού (NRT) χρόνου αντίστοιχα, υπό την προτεινόμενη πολιτική DUA_UPRA συναρτήσει του πλήθους των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου στο σύστημα. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι η μέση ρυθμαπόδοση των χρηστών με υπηρεσία πραγματικού χρόνου παραμένει σχεδόν σταθερή, ανεξαρτήτως του πλήθους τους στο σύστημα. Αυτό συμβαίνει λόγω της σχεδιαστικής ιδιότητας της πολιτικής DUA_UPRA να αναθέτει πόρους δικτύου σε κάθε χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, μέχρις εκείνου του σημείου που να ικανοποιείται πλήρως η απαιτούμενη σταθερή ρυθμαπόδοσή του, και όχι παραπάνω. Αξίζει να επισημάνουμε στο Σχήμα 18, ότι η μέση ρυθμαπόδοση που επιτυγχάνεται για ένα χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου είναι ελαφρώς μεγαλύτερης της απαιτούμενης ($R_{RT,i}=512\text{ kbps } \forall i \in S_{RT}$), λόγω της προληπτικής φύσης της πολιτικής DUA_UPRA όταν εξυπηρετεί χρήστες τέτοιου τύπου (η οποία καθορίζεται από την τιμή της μεταβλητής ευαισθησίας του συστήματος Tr). Στον αντίποδα, η μέση πραγματική ρυθμαπόδοση των χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου αυξάνει καθώς μειώνεται το πλήθος τους στο σύστημα, λόγω της μείωσης του μεταξύ τους ανταγωνισμού σε πόρους συστήματος. Κάτι, το οποίο αποτελεί χαρακτηριστική εγγενή ιδιότητα των ευκαιριακών πολιτικών ΔΠΔ.



Σχήμα 19. Μέση πραγματική ρυθμαπόδοση χρηστών πραγματικού χρόνου υπό τις πολιτικές UPRA και DUA_UPRA στο σενάριο SC1 (όταν $N=N_{RT}=30$).



Σχήμα 20. Πιθανότητες μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης χρηστών υπό τις πολιτικές UPRA και DUA_UPRA στο σενάριο SC1 (όταν $N=N_{RT}=30$).

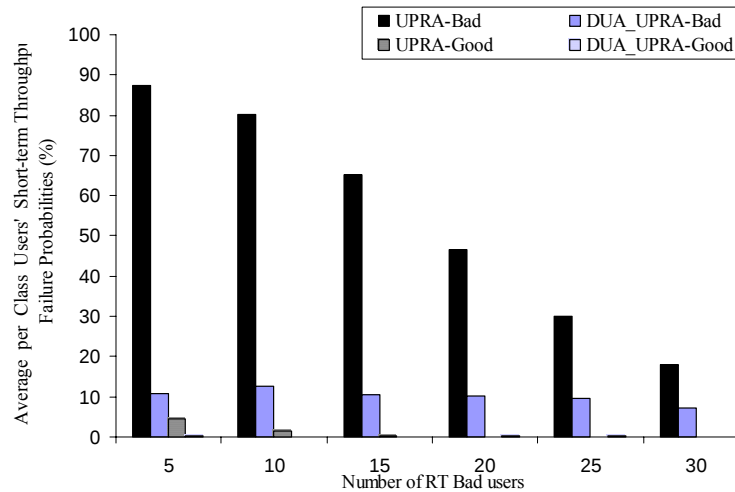
Εν συνεχεία, μέσω των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στα Σχήματα 19 και 20, επικεντρώνουμε την προσοχή μας στη μελέτη της απόδοσης του συστήματος υπό την προτεινόμενη πολιτική DUA_UPRA όταν όλοι οι χρήστες του συστήματος ζητούν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου ($N=N_{RT}=30$). Δηλαδή εξετάζουμε την πιο απαιτητική εκ' των περιπτώσεων που διερευνήθηκαν στο σενάριο 1, λόγω της δυσκολίας διασφάλισης των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσία πραγματικού χρόνου. Βασικός μας στόχος είναι να αναδείξουμε την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης πολιτικής στο να ικανοποιεί τα ΚΠΥ όλων των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου στο σύστημα. Δηλαδή, ότι η διασφάλιση των ΚΠΥ των χρηστών δεν αφορά ένα μέρος του

συνόλου αυτών, αλλά αφορά όλους τους ενεργούς χρήστες πραγματικού χρόνου στο σύστημα, ασχέτως των μεγάλων βραχυπρόθεσμων διακυμάνσεων της στιγμιαίας ποιότητας των καναλιών τους. Στο Σχήμα 19, δίδεται ο μέσος πραγματικός ρυθμός μετάδοσης όλων των χρηστών στο σύστημα συναρτήσει του χαρακτηριστικού ταυτοποίησής τους (ID). Στο Σχήμα 20 παρουσιάζεται η αντίστοιχη τιμή της πιθανότητας μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσής τους, υπό της πολιτικές DUA_UPRA (μαύρες κουκίδες) και UPRA (γκρι τετράγωνα).

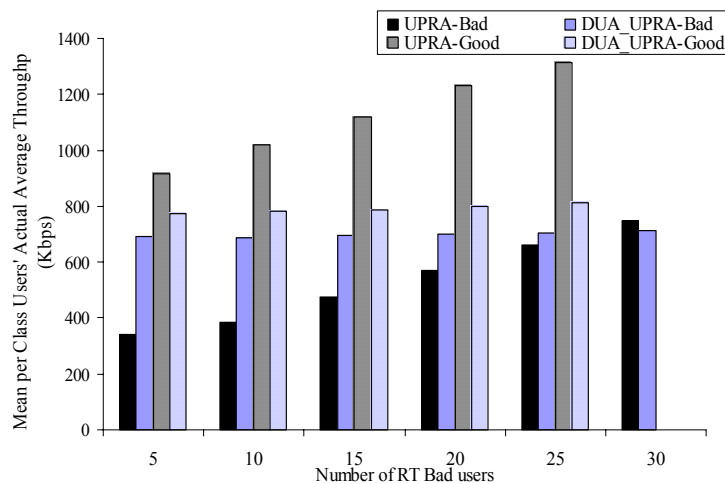
Αρχικά, παρατηρούμε ότι για όλους του χρήστες οι πιθανότητες μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσής τους είναι εξαιρετικά μικρές (μέγιστη τιμή: 0,7%, μέση τιμή: 0,19%) υπό την πολιτική DUA_UPRA, ενώ υπό την πολιτική UPRA είναι σημαντικά υψηλές και παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση (μέγιστη τιμή: 20,7%, μέση τιμή: 9,8%). Επιπροσθέτως, υπό την πολιτική DUA_UPRA η μέση ρυθμαπόδοση κάθε χρήστη υπηρεσίας πραγματικού χρόνου παραμένει υψηλή, σε σχέση με την αντίστοιχη που επιτυγχάνεται υπό την UPRA, παρά το μεγάλο πλήθος του τύπου αυτών των χρηστών και του μεγέθους των αντίστοιχων απαιτήσεών τους. Υπενθυμίζεται ότι η πολιτική UPRA έχει ως μοναδικό στόχο τη μεγιστοποίησης της συνολικής ρυθμαπόδοσης των χρηστών στο σύστημα. Επίσης, όλοι οι χρήστες απολαμβάνουν παραπλήσιων τιμών μέση πραγματικής ρυθμαπόδοσης κάτι το οποίο επιβεβαιώνει την ίση μεταχείρισή τους υπό την πολιτική DUA_UPRA.

6.9.2 2^ο Σενάριο Προσομοίωσης (SC2)

Κατά τη διάρκεια του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης SC2, το πλήθος των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου στο σύστημα συνεχίζει να είναι ίσο με 30 (δηλαδή $N=N_{RT}=30$), ενώ το σύνολο των χρηστών διαχωρίζεται σε δύο κλάσεις, τους χρήστες με καλές συνθήκες διαύλου (συντομογραφικά αναφέρονται ως καλοί χρήστες – good users) και τους χρήστες με κακές συνθήκες διαύλου (συντομογραφικά αναφέρονται ως κακοί χρήστες – bad users) οι οποίοι χαρακτηρίζονται από καλή (υψηλή) και κακή (χαμηλή) μέση τιμή ποιότητας καναλιού, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή της ποιότητας του καναλιού των καλών χρηστών τέθηκε 7dB μεγαλύτερη εκείνης των κακών χρηστών. Για κάθε κλάση χρηστών στο σύστημα αξιολογούμε τις πιθανότητες μη διασφάλισης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης χρηστών πραγματικού χρόνου (Σχήμα 21) καθώς και τη μέση πραγματική ρυθμαπόδοση των χρηστών (Σχήμα 22), συναρτήσει του πλήθους των χρηστών κακής ποιότητας καναλιού στο σύστημα υπό τις πολιτικές DUA_UPRA (μπλε στήλες, ενιαίου χρώματος στην περίπτωση κακών χρηστών και ραβδωτών στην περίπτωση καλών χρηστών) και UPRA (μπλε στήλες, ενιαίου χρώματος στην περίπτωση κακών χρηστών και ραβδωτών στην περίπτωση καλών χρηστών).



Σχήμα 21. Πιθανότητες μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης χρηστών συναρτήσει του πλήθους των χρηστών πραγματικού χρόνου στο σύστημα υπό το σενάριο SC2.



Σχήμα 22. Μέση πραγματική ρυθμαπόδοση χρηστών συναρτήσει του πλήθους των χρηστών πραγματικού χρόνου στο σύστημα υπό το σενάριο SC2.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπό την ευκαιριακή πολιτική UPRA (μαύρες συμπαγής στήλες) οι κακοί χρήστες είναι εξαιρετικά αδικημένοι και υποβαθμισμένοι, όχι μόνο λόγω της μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσής τους (Σχήμα 21) αλλά και λόγω της χαμηλής ρυθμαπόδοσής τους (Σχήμα 22) ειδικά, όταν το πλήθος τους στο σύστημα είναι μικρό. Η βασική αιτία της παραπάνω αρνητικής συνέπειας είναι ο μυωπικός στόχος της πολιτικής UPRA να μεγιστοποιεί τη συνολική απόδοση του συστήματος. Συγκεκριμένα, καθώς οι χρήστες με κακή ποιότητα καναλιού συμβάλουν ελάχιστα στη μεγιστοποίηση της συνολικής ευχαρίστησης του συστήματος, επιλέγονται σπάνια προς εξυπηρέτηση από την ευκαιριακή πολιτική UPRA, το οποίο οδηγεί και στην υποβάθμιση της συνολικής τους ρυθμαπόδοσης. Πρακτικά αυτό συμβαίνει, διότι αυτοί οι χρήστες συνεισφέρουν στον παραπάνω στόχο μεγιστοποίησης μόνο όταν η στιγμιαία

ποιότητα καναλιού τους, λόγω των διαρκών διακυμάνσεών της, είναι πολύ υψηλή σε σχέση με τους καλούς χρήστες, οι οποίοι έχουν εν γένει υψηλές τιμές ποιότητας καναλιού. Εν αντιθέσει, υπό την προτεινόμενη πολιτική DUA_UPRA οι τιμές των πιθανοτήτων μη διασφάλισης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης των χρηστών με κακή ποιότητα καναλιού βελτιώνονται αισθητά (Σχήμα 21, μπλε συμπαγείς στήλες). Ειδικότερα, όταν το πλήθος τους στο σύστημα είναι μικρό, το ποσοστό μείωσης της πιθανότητας μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ τους υπό την πολιτική DUA_UPRA σε σχέση με την UPRA (Σχήμα 21, μαύρες συμπαγείς στήλες) αγγίζει το 75%. Τέλος, παρατηρούμε ότι η μέση πραγματική ρυθμαπόδοση των χρηστών με κακή ποιότητα καναλιού παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη του πλήθους τους στο σύστημα υπό την πολιτική DUA_UPRA (Σχήμα 22, μπλε συμπαγείς στήλες).

Παρατηρώντας τα αντίστοιχα αποτελέσματα στην περίπτωση των χρηστών με καλή ποιότητα καναλιού, παρατηρούμε ότι οι πιθανότητες μη ικανοποίησης των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσής τους είναι αισθητά βελτιωμένες υπό την πολιτική DUA_UPRA (Σχήμα 21, μπλέ ραβδωτές στήλες) αφού είναι πάντα μικρότερες της τιμής 0,18 %, ακόμα και όταν το πλήθος τους στο σύστημα είναι μεγάλο (και το πλήθος των κακών χρηστών είναι μικρό). Από την άλλη, υπό την πολιτική UPRA, λόγω του υψηλού ανταγωνισμού μεταξύ τους για πόρους συστήματος, τα βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσής τους δεν επιτυγχάνονται (Σχήμα 21, μαύρες ραβδωτές στήλες). Τέλος, αξίζει να επισημάνουμε ότι η μείωση της πραγματικής ρυθμαπόδοσης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και καλή ποιότητα καναλιού υπό την πολιτική DUA_UPRA, συγκρινόμενες με αυτές που επιτυγχάνει η πολιτική UPRA, δεν επιφέρει καμία αρνητική επίπτωση (Σχήμα 22, μπλε και μαύρες ραβδωτές στήλες), αφού οι καλοί χρήστες πραγματικού χρόνου εξακολουθούν να επιτυγχάνουν της επιθυμητή ρυθμαπόδοσή τους. Επιπροσθέτως, ευνοεί και το σύνολο των χρηστών στο σύστημα, αφού με αυτό τον τρόπο οι εναπομείναντες περισευούμενοι πόροι του συστήματος αναδιανέμονται αποτελεσματικά α) στους κακούς χρήστες πραγματικού χρόνου με στόχο την περεταίρω βελτίωση των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ τους και β) στους χρήστες με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου με στόχο τη βελτίωση της συνολικής τους ρυθμαπόδοσης.

7 Βέλτιστη Κατανομή Πόρων σε CDMA Δίκτυα με Υπηρεσίες Μη Πραγματικού και Πραγματικού Χρόνου υπό Ετερογενές Μοντέλο Συστήματος – Η Ζεύξη Ανόδου

Το τελευταίο ερευνητικό αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα διδακτορική διατριβή αφορά στη βέλτιστη κατανομή πόρων στους χρήστες ετερογενούς CDMA ασύρματου δικτύου υπό το πρίσμα ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ κατά τη ζεύξη ανόδου. Στις προηγούμενες ενότητες έγινε αναφορά και τεκμηρίωση των λόγων διαφοροποίησης των δύο ζεύξεων, ανόδου και καθόδου, λόγω των φυσικών εγγενών διαφορών τους, οι οποίες σκιαγράφονται από τις σχέσεις (1) και (3). Η βασικότερη όλων οφείλεται στη ταυτόχρονη εκπομπή των χρηστών προς το σταθμό βάσης με ανεξάρτητες, άνω φραγμένες ισχείς μετάδοσης. Η παραπάνω δυνατότητα έχει ως αποτέλεσμα τη θεώρηση ως θόρυβο από τον εκάστοτε χρήστη που προσπαθεί να μεταδώσει δεδομένα, την ισχύ των υπολοίπων χρηστών που μεταδίδουν ταυτόχρονα προς το σταθμό βάσης. Ως εκ τούτου, δυσχεραίνεται η επίτευξη κατάλληλων σηματοθορυβικών λόγων από τους χρήστες και κατ' επέκταση επιθυμητών ρυθμών μετάδοσης.

Λόγω των παραπάνω ιδιομορφιών, ακολουθήθηκε διαφορετική προσέγγιση στον τρόπο αντιμετώπισης του προβλήματος της βέλτιστης κατανομής πόρων κατά τη ζεύξη ανόδου σε σχέση με τη ζεύξη καθόδου, με κύριους τους ακόλουθους δύο άξονες διαφοροποίησης:

Α. Διαφορετικός τρόπος έκφρασης των συνθηκών εξασφάλισης των ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

Η χρήση πιθανοτικών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων καθυστέρησης ή ρυθμαπόδοσης κατά τη ζεύξη ανόδου δεν είναι επαρκής, καθώς η διασφάλισή τους κρίνεται αβέβαιη λόγω των περιορισμών ισχύος μετάδοσης του κάθε χρήστη η οποία πολλές φορές δεν επαρκεί (καθώς είναι συγκριτικά πολύ μικρότερη σε σχέση με τη μέγιστη ισχύ εκπομπής του σταθμού βάσης). Για το λόγο αυτό, απαιτούμε την ικανοποίηση των ΚΠΥ χρηστών πραγματικού αλλά και μη πραγματικού χρόνου ανά χρονοσχισμή, μέσω της χρήσης κατάλληλων συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών σε σχέση με τον πραγματικό ρυθμό μετάδοσης που επιτυγχάνεται ανά χρονοσχισμή (όπως αυτές εκφράζονται στο (Σχήμα 2) οι οποίες αποτελούν ευρέως χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις ευχαρίστησης χρηστών σε ενσύρματα [74] και ασύρματα δίκτυα [57]). Ως αποτέλεσμα, οι τελικές (ολικές) συναρτήσεις ευχαρίστησης των χρηστών αποτελούν φωλιασμένες μη κυρτές συναρτήσεις των οποίων η μεταχείριση, η ένταξη σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και η επίλυσή του απαιτούν ιδιαίτερη

ανάλυση, όπως θα αναδειχθεί στη συνέχεια. Παράλληλα, στις συναρτήσεις ευχαρίστησης των χρηστών ο παράγων ισχύς κατανάλωσης ανά χρονοσχισμή παίζει σημαντικό ρόλο, λόγω της κρισιμότητάς του κατά τη ζεύξη ανόδου.

B. Διαφορετικός τρόπος επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης, μέσω θεωρίας παιγνίων.

Η πολυπλοκότητα, η εξαγωγή σύνθετων κεντροποιημένων αλγορίθμων και η επιπλέον σηματοδοσία που απαιτείται για την επίλυση ενός προβλήματος βέλτιστης κατανομής πόρων CDMA δικτύου κατά τη ζεύξη ανόδου μέσω αναλυτικών μεθόδων (Lagrange multipliers) οδήγησαν την ερευνητική κοινότητα μετά το δεύτερο μισό της τρέχουσας δεκαετίας στην υιοθέτηση της θεωρίας παιγνίων για την ανάλυση και αντιμετώπισή του. Ακολουθώντας την παραπάνω κατεύθυνση, η παρούσα διδακτορική διατριβή θέτει και επιλύει το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων CDMA δικτύου κατά τη ζεύξη ανόδου όταν οι χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου εξυπηρετούνται από το σύστημα υπό το πρίσμα της θεωρίας παιγνίων.

Κατά τη διάρκεια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, πλήθος εξαιρετικών ερευνητικών προσπαθειών επικέντρωσαν το ενδιαφέρον τους στη μελέτη του προβλήματος της βέλτιστης κατανομής των πόρων CDMA δικτύου, δηλαδή του διανύσματος ισχύος μετάδοσης των χρηστών (power control) κατά τη ζεύξη ανόδου, μέσω της θεωρίας παιγνίων (game theory) [90], [91]. Εν γένει, ο έλεγχος ισχύος των χρηστών μοντελοποιείται ως ένα μη-συνεργατικό παίγνιο κατά το οποίο οι χρήστες δρουν ατομικά, ως ανεξάρτητοι παίκτες, προσπαθώντας να μεγιστοποιήσουν την ευχαρίστησή τους σε σχέση με τους πόρους του δικτύου που λαμβάνουν και κατ' επέκταση την ποιότητα των υπηρεσιών τους, όπως αυτή εκφράζεται μέσω κατάλληλων συναρτήσεων ευχαρίστησης. Με το όρο “οι χρήστες δρουν ατομικά”, ορίζουμε την αυτόβουλη δυνατότητά επιλογής ή αλλαγής της ισχύος με την οποία μεταδίδουν δεδομένα κατά τη διάρκεια ενός παιγνίου. Συνεπώς, η επιλογή συγκεκριμένων συναρτήσεων ευχαρίστησης επιδρά καθοριστικά όχι μόνο στη φύση του παιγνίου που ανακύπτει αλλά και στον τρόπο με τον οποίο οι χρήστες/παίκτες ενεργούν.

Στις μελέτες [92] και [93], στοχεύοντας στη μεγιστοποίηση της συνολικής χωρητικότητας του συστήματος (spectral capacity), οι συναρτήσεις ευχαρίστησης των χρηστών τίθενται ως λογαριθμικές, κοίλες συναρτήσεις ως προς το σηματοθορυβικό λόγο που επιτυγχάνεται για αυτούς. Τέτοιου τύπου συναρτήσεις εκφράζουν μια αναλογική σχέση μεταξύ της ευχαρίστησης του εκάστοτε χρήστη και της χωρητικότητας κατά Shannon (Shannon capacity) που επιτυγχάνεται, θεωρώντας παράλληλα το σύνολο των παρεμβολών στο σταθμό βάσης ως λευκό θόρυβο (white Gaussian noise) [94]. Στη μελέτη [95], η συνάρτηση ευχαρίστησης κάθε χρήστη αποτελείται από δύο μέρη, μια συνάρτηση ανάλογη της συνολικής ρυθμαπόδοσης που επιτυγχάνει, μειωμένη κατά μια συνάρτηση κόστους ανάλογη της κανονικοποιημένης ισχύος μετάδοσης που καταναλώνει ανά χρονοσχισμή. Η επίλυση μη συνεργατικών παιγνίων ελέγχου ισχύος χρηστών με σιγμοειδείς

συναρτήσεις ευχαρίστησης μελετάται στο [96]. Στα [97] και [98], οι συγγραφείς ορίζουν συναρτήσεις ευχαρίστησης χρηστών οι οποίες εκφράζουν μια αναλογική σχέση ως προς τη συνολική πραγματική ρυθμαπόδοση που επιτυγχάνεται (goodput) και ταυτόχρονα μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση ως προς την αντίστοιχη ισχύ μετάδοσης (joule of energy consumed) που δαπανάται για την επίτευξη του παραπάνω ρυθμού. Οι παραπάνω μελέτες επεκτείνονται στο [99], με την προσθήκη κατάλληλης συνάρτησης κόστους, έτσι ώστε να βελτιωθεί η συνολική απόδοση του συστήματος, να διασφαλιστεί δηλαδή, ότι το σημείο ισορροπίας κατά Nash που επιτυγχάνεται αποτελεί πάντα και τη μοναδική Pareto βέλτιστη (Pareto optimal) λύση του παιγνίου. Πρόσθετη επέκταση των παραπάνω μελετών στο από κοινού πρόβλημα βέλτιστης κατανομής πόρων του δικτύου με ταυτόχρονο σχεδιασμό των δεκτών των χρηστών μπορεί να βρεθεί στο [100], ενώ στο [48] θεωρείται διευρυμένο μοντέλο συστήματος μέσω της ύπαρξης πολλαπλών φερόντων (multicarrier system). Στο [101], παρουσιάζεται συγκριτική μελέτη κεντροποιημένων και αποκεντροποιημένων τεχνικών επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης κατανομής πόρων συστήματος όταν στόχος της πολιτικής ΔΠΔ είναι αντίστοιχα η μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος και η μεγιστοποίηση της απόδοσης κάθε χρήστη ατομικά. Τέλος, στο [102], μελετάται η σταθερότητα και ο ρυθμός σύγκλισης των κατανεμημένων αλγορίθμων ελέγχου ισχύος χρηστών στη ζεύξη ανόδου CDMA συστημάτων.

7.1 Ερευνητικός Στόχος, Αναγκαιότητα Επίτευξής του & Ανακύπτων Πρόβλημα Βελτιστοποίησης

Η παρούσα μελέτη πραγματεύεται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής των πόρων ετερογενούς CDMA συστήματος στους χρήστες αυτού κατά τη ζεύξη ανόδου, δίδοντας έμφαση στην διασφάλιση και ικανοποίηση των ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου ευαίσθητες ως προς την καθυστέρηση δεδομένων. Συγκεκριμένα, στόχος μας είναι η εύρεση εκείνου του διανύσματος ισχύος μετάδοσης των χρηστών του συστήματος ώστε να επιτύχουμε τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσής τους, ταυτόχρονα με τη διασφάλιση των ΚΠΥ των χρηστών, μέσω της μοντελοποίησης και της ανάλυσης της όλης διαδικασίας ελέγχου ισχύος των χρηστών υπό το πρίσμα της θεωρίας παιγνίων. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, προτείνουμε και ορίζουμε ένα νέο γενικευμένο πλαίσιο συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών, μέσω του οποίου μπορεί να μοντελοποιηθεί το πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης πόρων CDMA συστήματος ζεύξης ανόδου κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιδιώκεται α) η μεγιστοποίηση της συνολικής πραγματικής ρυθμαπόδοσής των χρηστών αυτού, σε σχέση με την αντίστοιχη ισχύ που καταναλώνουν για την επίτευξή της (όπως στις μελέτες που προαναφέρουμε), και β) η ταυτόχρονη ικανοποίηση των ΚΠΥ χρηστών διαφόρων υπηρεσιών, με έμφαση στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι στην εργασία [78] μελετάται το πρόβλημα του ελέγχου ισχύος χρηστών κατά τη ζεύξη ανόδου μέσω ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ, για χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, βάσει κατάλληλου μοντέλου συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών. Παρά τα αναλυτικά αποτελέσματα που εξάγονται, οι συναρτήσεις ευχαρίστησης των χρηστών πραγματικού χρόνου που υιοθετούνται εκφράζουν μόνο την ικανοποίηση τους ως προς την ποιότητα της υπηρεσία που λαμβάνουν και την τήρηση των ΚΠΥ αυτής, χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη η αντίστοιχη ισχύς που καταναλώνει ο εκάστοτε χρήστης. Επιπλέον, πρέπει να επισημάνουμε ότι η χρήση θεωρίας παιγνίων για τη μοντελοποίηση και επίλυση του προβλήματος που μελετάται από την παρούσα διατριβή, καταλήγει στο σχεδιασμό κατανεμημένων αλγορίθμων ελέγχου της ισχύος μετάδοσης των χρηστών κάτι το οποίο ευνοεί το σχεδιασμό αυτόνομων μηχανισμών ελέγχου βελτιστοποίησης της ποιότητας υπηρεσίας τους, εν αντιθέσει με το κεντροποιημένο σχήμα που προτείνεται στο [78].

Στη μελέτη [103], επίσης ερευνάται το πρόβλημα της επιτυχούς εξυπηρέτησης υπηρεσιών πραγματικού χρόνου στη ζεύξη ανόδου ενός CDMA συστήματος υπό το πλαίσιο θεωρίας παιγνίων και προτείνεται αντίστοιχος κατανεμημένος ευκαιριακός αλγόριθμος ΔΠΔ. Σε αυτή τη μελέτη όμως, οι συναρτήσεις ευχαρίστησης χρηστών εκφράζουν μόνο, μια γραμμική σχέση μεταξύ της ικανοποίησής τους και της αντίστοιχης πραγματικής ρυθμαπόδοσης που επιτυγχάνεται, ενώ τα ΚΠΥ χρηστών πραγματικού χρόνου εκφράζονται μέσω πιθανοτικών κριτηρίων καθυστέρησης, των οποίων η αναποτελεσματικότητα αναδείχθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που καλούμαστε να επιλύσουμε διατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \max_{P_i} E[U_i(P_i, \bar{P}_{-i})] \\ s.t. \quad 0 \leq P_i \leq P_i^{Max} \end{aligned} \quad (89)$$

όπου

$$U(R_i^*, P_i, \bar{P}_{-i}) = \frac{T_i(R_i^*, P_i, \bar{P}_{-i})}{P_i} = \frac{T_i(R_i^F * f_i(\gamma_i), P_i, \bar{P}_{-i})}{P_i} \quad (90)$$

από τη σχέση (3) ισχύει,

$$\gamma_i(R_i, P_i, \bar{P}_{-i}) = \frac{W}{R_i} \frac{G_i P_i}{\theta \sum_{j=1}^N G_j P_j - \theta G_i P_i + I_o}$$

και $T_i()$ κατάλληλα επιλεγμένη συνάρτηση ρυθμαπόδοσης $\forall i \in S$, $\bar{P}_{-i}$ το διάνυσμα ισχύος εκπομπής του συνόλου των χρηστών εξαιρουμένου του χρήστη i , και R_i^F , κατάλληλα επιλεγμένη σταθερή τιμή ρυθμαπόδοσης $\forall i \in S$. Καινοτομία της παρούσας διδακτορικής μελέτης αποτελεί ο τρόπος ορισμού των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών και κυρίως η εισαγωγή της συνάρτησης ευχαρίστησης ρυθμαπόδοσης $T_i()$ μέσω της οποίας εκφράζονται τα ΚΠΥ των χρηστών ως προς το είδος της υπηρεσίας τους, κάτι το οποίο δεν επιχειρείται στις προηγούμενες ερευνητικές

μελέτες στον τομέα αυτό. Οι συναρτήσεις ευχαρίστησης ως προς τη ρυθμαπόδοση χρηστών που χρησιμοποιήθηκαν βασίστηκαν στις ευρέως διαδεδομένες συναρτήσεις του (Σχήματος 2), δηλαδή σιγμοειδής για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και κυρτές και κοίλες για τις υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου.

7.2 Μεθοδολογία Ανάλυσης και Επίλυσης του Προβλήματος

Στην συνέχεια ακολουθεί ανάλυση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε ώστε να μελετηθεί και να επιλυθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης (89).

A. Μελέτη, Τεκμηρίωση και Ανάλυση των Συναρτήσεων Ευχαρίστησης των Χρηστών

Αρχικά, δίδεται ολοκληρωμένη μελέτη των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών (90), βασισμένη σε δύο κύριους άξονες:

- α) Τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων και της αναλυτικής μορφής των συναρτήσεων ευχαρίστησης ρυθμαπόδοσης των χρηστών T_i , ώστε αυτές να εκφράζουν αποτελεσματικά στο πρόβλημα βελτιστοποίησης και την εκάστοτε ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ, τα ΚΠΥ διαφόρων υπηρεσιών πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου.
- β) Τον καθορισμό των αλγεβρικών ιδιοτήτων των τελικών ολικών συναρτήσεων ευχαρίστησης U_i των χρηστών που προκύπτουν. (Οι συναρτήσεις U_i είναι μη-κυρτές φωλιασμένες συναρτήσεις και συνεπώς προσθέτουν επιπλέον δυσκολία στη μελέτη του προβλήματος βελτιστοποίησης που θεωρούμε).

Η μελέτη των παραπάνω δίδεται στην υποενότητα 7.3.

B. Μετασχηματισμός του Προβλήματος σε ένα Μη Συνεργατικό Παίγνιο.

Θεωρώντας ως απαρχή της μελέτης μας το πρόβλημα (89) και υποθέτοντας ότι α) τα κανάλια των διαύλων επικοινωνίας είναι ανεξάρτητα και ομοιόμορφα κατανεμημένα (i.i.d.), συνεπώς το πρόβλημα μεγιστοποίησης της μέσης ευχαρίστησης του κάθε χρήστη ισοδυναμεί με τη μεγιστοποίηση της ευχαρίστησης του χρήστη σε κάθε χρονοσχιμή, και ότι β) κάθε χρήστης προσπαθεί ανεξάρτητα να μεγιστοποιήσει την ευχαρίστησή του χωρίς να συνεργάζεται με τους υπόλοιπους, το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί ως ένα μη συνεταιριστικό παίγνιο κατανομής ισχύος κατά την άνω ζεύξη (το οποίο και θα καλούμε εφεξής UPC, λόγω της αγγλικής ορολογίας ορισμού του: non-cooperative Uplink Power Control (UPC) game).

Ορισμός Παιγνίου UPC. Ορίζουμε ως $G = [S, \{A_i\}, \{U_i\}]$ το προτεινόμενο μη συνεταιριστικό παίγνιο UPC, όπου S είναι το σύνολο των χρηστών (παιχτών) και $A_i = [0, P_i^{Max}] \times \mathbb{R}^N$ είναι το πεδίο στρατηγικής του χρήστη i . Κάθε στρατηγική που ανήκει στο A_i μπορεί να γραφεί $a_i = (P_i)$. Τέλος, όταν η ισχύς εκπομπής των υπόλοιπων χρηστών είναι γνωστή και σταθερή, το προκύπτει μη συνεταιριστικό παίγνιο για κάθε χρήστη i , σε κάθε χρονοσχιμή, μπορεί να εκφραστεί ως το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\max_{a_i} U_i = \max_{P_i} U_i(P_i, \overline{P_{-i}}) \text{ για κάθε } i=1, \dots, N \quad (91)$$

υπό τον περιορισμό $0 \leq P_i \leq P_i^{Max}$. ■

Αναλύοντας περιγραφικά το παίγνιο G , το οποίο επαναλαμβάνεται ανά χρονοσχιμή, κάθε χρήστης/παίκτης επιλέγει κατάλληλη ισχύ μετάδοσης δεδομένων από το πεδίο στρατηγικών του A_i , επιτυγχάνοντας ευχαρίστηση U_i με γνώμονα εκείνη την πολιτική B_i που τη μεγιστοποιεί, δηλαδή $B_i(\overline{P_{-i}}) = \max_{P_i \in A_i} U_i(P_i, \overline{P_{-i}})$

Γ. Επίλυση του Παιγνίου κατά Nash

Η επίλυση του μη συνεταιριστικού παιγνίου UPC που διατυπώθηκε προηγουμένως γίνεται μέσω της εύρεση του σημείου ισορροπίας κατά Nash (Nash equilibrium). Το σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου G είναι εκείνο το διάνυσμα ισχύος χρηστών κατά το οποίο κανένας χρήστης δεν έχει την τάση/βούληση να μεταβάλλει την ισχύ εκπομπής του, καθώς η ευχαρίστησή του (δηλαδή η τιμή της συνάρτησης ευχαρίστησής του) δεν μπορεί να βελτιωθεί περισσότερο αλλάζοντας ατομικά την ισχύ εκπομπής τους, ενώ η ισχύς των υπόλοιπων χρηστών παραμένει σταθερή.

Ορισμός Σημείου Ισορροπίας κατά Nash του Παιγνίου UPC: Το διάνυσμα ισχύος $\overline{P^*} = (P_1^*, \dots, P_N^*)$ είναι σημείο ισορροπίας κατά Nash για το μη συνεταιριστικό παίγνιο κατανομής ισχύος στην άνω ζεύξη G , όταν ισχύει η ανισότητα $U_i(P_i^*, \overline{P_{-i}^*}) \geq U_i(P_i, \overline{P_{-i}^*})$, $\forall i \in S$ για όλα τα P_i που ανήκουν στο πεδίο στρατηγικής A_i . ■

Για την επίλυση του προβλήματος UPC, ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία:

i) Αποδεικνύεται η ύπαρξη του σημείου ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου UPC. Η απόδειξη δίδεται στην υποενότητα 7.4.

ii) Αποδεικνύεται η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου UPC, και συνεπώς ότι αυτή αποτελεί και την Pareto βέλτιστη λύση του παιγνίου. Η απόδειξη δίδεται στην υποενότητα 7.4.

iii) Δίδεται αναλυτικός προσδιορισμός του σημείου ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου UPC. Η ανάλυση δίδεται στην υποενότητα 7.4.

iv) Δίδεται αλγόριθμος εύρεσης του σημείου ισορροπίας κατά Nash του προς εξέταση παιγνίου, αποδεικνύεται η σύγκλιση αυτού και μελετάται η πολυπλοκότητά του. Η περιγραφή και η μελέτη του προτεινόμενου αλγορίθμου δίδεται στην υποενότητα 7.5.

v) Μελετώνται οι ιδιότητες του σημείου ισορροπίας κατά Nash του προς εξέταση παιγνίου και επιδιώκεται η εύρεση συνθηκών αποδοχής κλήσεων χρηστών. Η ανάλυση των παραπάνω δίδεται στην υποενότητα 7.6.

Δ. Ενσωμάτωση των Προτεινόμενων Αλγορίθμων σε Υπάρχουσες Αρχιτεκτονικές Ασύρματων Κυβελωτών Δικτύων

Επιδιώκεται η ενσωμάτωση των προτεινόμενων αλγορίθμων στη συνολική αρχιτεκτονική ενός ασύρματου CDMA δικτύου και η εύρεση ή επέκταση ήδη υπάρχουσας κατάλληλης σηματοδότησης για τη διασφάλιση της εύρυθμης λειτουργίας τους. Η ανάλυση των παραπάνω δίδεται στην υποενότητα 7.5.

Ε. Αξιολόγηση των Προτεινόμενων Αλγορίθμων μέσω Προσομοίωσης

Η μελέτη μας ολοκληρώνεται με την παρουσίαση, ανάλυση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση μοντέλου συστήματος υπό τον προτεινόμενο αλγόριθμο ελέγχου ισχύος χρηστών. Η παραπάνω ανάλυση δίδεται στην υποενότητα 7.7, [104], [105], [106].

7.3 Ορισμός και Μελέτη Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Πραγματικής Ρυθμαπόδοσης και Ολικών Συναρτήσεων Ευχαρίστησης Χρηστών

Επιδιώκοντας το σχεδιασμό ενός αποδοτικού ευκαιριακού αλγορίθμου ελέγχου ισχύος χρηστών κατά τη ζεύξη ανόδου, μέσω του οποίου να εξυπηρετούνται αποτελεσματικά πολλαπλοί τύποι υπηρεσιών (πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου), σε αυτή την ενότητα ορίζουμε κατάλληλες συναρτήσεις ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης χρηστών καθώς και τις αντίστοιχες ολικές συναρτήσεις ευχαρίστησής τους. Στόχο μας αποτελεί η αποτελεσματική απεικόνιση των ΚΠΥ των χρηστών μέσω των συναρτήσεων ευχαρίστησής τους στο ΔΠΔ κατά τη ζεύξη ανόδου.

Αρχικά, βάσει της σχέσης (89), μπορούμε να επισημαίνουμε ότι η νέο-ορισμένη συνάρτηση ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης $T_i(R_i^*, P_i, \bar{P}_i) \equiv T_i(R_i^*)$ ενός χρήστη i , είναι μια φωλιασμένη (λόγω της ύπαρξης της f_i) μη-κυρτή συνάρτηση του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που επιτυγχάνεται R_i^* . Επιπλέον, η επιλογή της πρέπει να είναι τέτοια ώστε να απεικονίζει στην ολική συνάρτηση ευχαρίστησής του, U_i και συνεπώς στην πολιτική ΔΠΔ του συστήματος, τις απαιτήσεις πόρων της υπηρεσίας του χρήστη i καθώς και τα ΚΠΥ αυτής, υπό το πρίσμα των φυσικών περιορισμών του κινητού τερματικού.

Βάση των παραπάνω, υποθέτουμε ότι οι συναρτήσεις T_i χαρακτηρίζονται από τις ακόλουθες ιδιότητες.

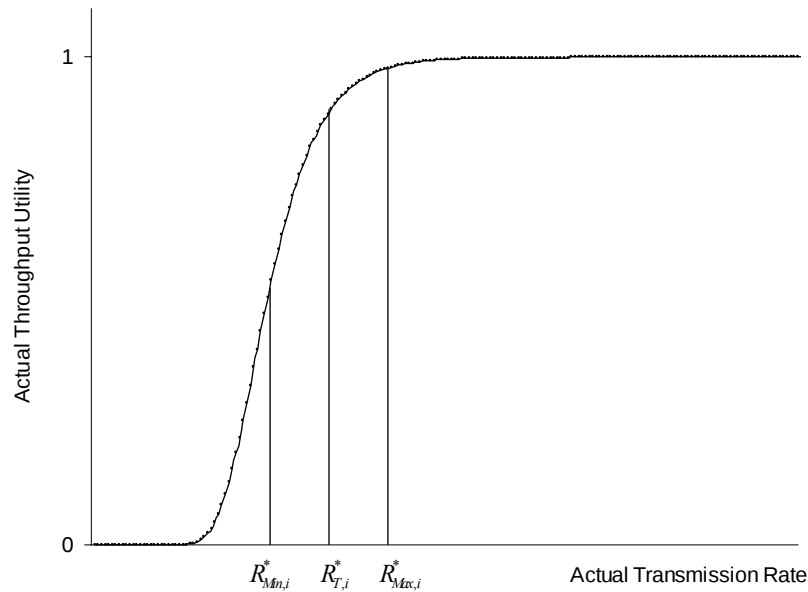
Υποθέσεις:

- α) Η T_i είναι μια αύξουσα συνάρτηση της μεταβλητής R_i^* .
- β) Η T_i είναι μια διπλά παραγωγίσιμη συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή R_i^* .
- γ) Ισχύει ότι $T_i(0)=0$ ώστε να διασφαλίσουμε το ότι $U_i = 0$ όταν $R_i^* = 0$.
- δ) Η T_i είναι άνω φραγμένη (δηλαδή, χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρούμε ότι μέσω κανονικοποίησης ισχύει ότι $T_i(R_i^*) \leq 1$).
- ε) Η T_i είναι σιγμοειδής⁵, αυστηρά κυρτή, ή αυστηρά κοίλη συνάρτηση της μεταβλητής R_i^* εντός του αντίστοιχου πεδίου ορισμού αυτής $[0, R_{Max,i}^*]$, όπου ως $R_{Max,i}^*$ συμβολίζεται η μέγιστη τιμή της πραγματικής ρυθμαπόδοσης ενός χρήστη i , λόγω των φυσικών περιορισμών ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων αυτού.

Στη συνέχεια της παρούσας μελέτης το ενδιαφέρον μας θα επικεντρωθεί σε σιγμοειδείς συναρτήσεις ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης χρηστών που χαρακτηρίζουν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Συγκεκριμένα, βασισμένοι στο γενικευμένο πλαίσιο υποστήριξης και διασφάλισης ΚΠΥ μέσω συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών που προτάθηκε στο [31], θεωρούμε ότι εκείνες οι μετρικές/μεταβλητές που εκφράζουν πλήρως τα ΚΠΥ μιας υπηρεσίας πραγματικού

⁵Υπενθυμίζεται ότι μια συνάρτηση $f(x)$ είναι σιγμοειδής ως προς την μεταβλητή x όταν έχει ένα και μόνο ένα σημείο καμπής, x_{infl} για το οποίο ισχύει ότι $d^2 f(x)/dx^2 \Big|_{x < x_{infl}} > 0$ και $d^2 f(x)/dx^2 \Big|_{x > x_{infl}} < 0$.

χρόνου ανά χρονοσχισμή και ταυτόχρονα μπορούν να αντικατοπτριστούν αποτελεσματικά από μια σιγμοειδή συνάρτηση ευχαρίστησης ρυθμαπόδοσης είναι α) ο σταθερός απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης της υπηρεσίας ανά χρονοσχισμή και β) ένας παράγοντας απόκλισης (Margin Factor). Ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης $R_{T,i}^*$, καθορίζει την ιδανική τιμή του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης ενός χρήστη ανά χρονοσχισμή η επίτευξη του οποίου διασφαλίζει την ικανοποίηση των ΚΠΥ αυτού. Παράλληλα, ο παράγοντας απόκλισης MF_i , καθορίζει τα επιτρεπτά και αποδεκτά όρια διακύμανσης του επιτεύξιμου πραγματικού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων του χρήστη ανά χρονοσχισμή, σε σχέση με τον προκαθορισμένο ρυθμό $R_{T,i}^*$. Με απλά λόγια, κατά τη ζεύξη ανόδου, τα μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενα πιθανοτικά βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου εκφράζονται στην πιο αυστηρή τους μορφή, αφού θέτουμε την πιθανότητα μη διασφάλισής τους ίση με μηδέν. Κάτι τέτοιο, συνεπάγεται τη διασφάλιση μιας σταθερής πραγματικής ρυθμαπόδοσης ανά χρονοσχισμή, $R_{T,i}^*$, ίση με τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της υπηρεσίας πραγματικού χρόνου.



Σχήμα 23. Συνάρτηση ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου.

Επιπλέον, ο παράγων απόκλισης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου καθορίζει την ελάχιστη αποδεκτή τιμή πραγματικής ρυθμαπόδοσής του ανά χρονοσχισμή (δηλαδή $R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - MF_i$). Βάσει των παραπάνω, επιχειρηματολογούμε υπέρ της άποψης ότι όταν η τιμή της πραγματικής ρυθμαπόδοσης ενός χρήστη βρίσκεται εντός του διαστήματος $[R_{Min,i}^*, R_{T,i}^*)$, τότε η συνάρτησης ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης αυτού θα πρέπει να είναι μια ομαλώς αύξουσα συνάρτηση (κοίλη) της πραγματικής ρυθμαπόδοσης (Σχήμα 23). Στον αντίποδα, όταν

$R_i^* < R_{Min,i}^*$ τότε η συνάρτησης ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης του χρήστη θα πρέπει να είναι μια ραγδαίως αύξουσα (κυρτή) συνάρτηση της μεταβλητής R_i^* , έτσι ώστε να αντικατοπτρίζει την αυξανόμενη προτεραιότητα αυτού στο να του ανατεθούν πόροι συστήματος. Η προηγούμενη σχεδιαστική επιλογή δίδει στον ευκαιριακό ΔΠΔ, όταν αυτός λειτουργεί υπό ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο ασύρματο περιβάλλον λόγω των συνεχών διακυμάνσεων στη ποιότητας του καναλιού των χρηστών, την δυνατότητα μείωσης του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης ενός χρήστη έως ένα ορισμένο σημείο ($R_{Min,i}^*$ - αν αυτό χρειαστεί λόγω της πιθανής στιγμιαίας κακής ποιότητας καναλιού του χρήστη) χωρίς να αναγκάσει τον αποκλεισμό του από το σύνολο εκείνων των χρηστών που θα λάβουν πόρους του συστήματος την επόμενη χρονοσχισμή. Το άνωθεν αρνητικό γεγονός θα λάμβανε χώρα αν χρησιμοποιούνταν βηματικές συναρτήσεις ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης χρηστών για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

Παράλληλα, ισχυριζόμαστε ότι μια επιπλέον αύξηση του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, σε σχέση με τον επιδιωκόμενο προκαθορισμένο ρυθμό $R_{T,i}^*$, δεν πρέπει να συμβάλει στην ανάλογη αύξηση της ευχαρίστησής του. Εν αντιθέσει, θα πρέπει να προκαλεί διαρκώς μικρότερες προσαυξήσεις, τείνοντας ασυμπτωτικά σε μια μέγιστη προκαθορισμένη τιμή όταν $R_i^* \rightarrow \infty$ (δηλαδή $T_i(\infty) = I$). Ο προηγούμενος ισχυρισμός βασίζεται στην παρατήρηση ότι καθώς τα ΚΠΥ ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου διασφαλίζονται πλήρως όταν ο προκαθορισμένος πραγματικός ρυθμός μετάδοσης $R_{T,i}^*$ επιτυγχάνεται ανά χρονοσχισμή. Συνεπώς, επιπλέον αύξηση αυτού δεν πρέπει να συμβάλει στην περαιτέρω αντίστοιχη αύξηση την συνολικής ευχαρίστησής του. Η προηγούμενη σχεδιαστική φιλοσοφία ακολουθήθηκε και κατά τον ορισμό των πιθανοτικών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης για χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου κατά τη ζεύξη καθόδου.

Με το να περιορίσουμε μέχρι ενός ορισμένου σημείου ($R_{Max,i}^*$) τον πραγματικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που δύναται να επιτύχει ένας χρήστης με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, ο οποίος πιθανώς λόγω των στιγμιαία καλών συνθηκών ποιότητας καναλιού του μπορεί να λάβει πληθώρα πόρων συστήματος, αποκτούμε το πλεονέκτημα της ανακατανομής των επιπλέον διαθέσιμων πόρων του συστήματος σε μη ευνοημένους χρήστες με υπηρεσία πραγματικού χρόνου (δηλαδή, σε αυτούς με στιγμιαία κακή ποιότητα καναλιού). Η παραπάνω διαδικασία, δεν οδηγεί μόνο στην αύξηση της ικανοποίησής των χρηστών αυτών από την απόδοση της υπηρεσίας που λαμβάνουν, αλλά και στη συνολική αύξηση του πλήθους αυτών που μπορεί το σύστημα να εξυπηρετεί επιτυχώς ταυτόχρονα. Τέλος, για πρακτικούς λόγους, λόγω των φυσικών περιορισμών των κινητών τερματικών των χρηστών, θεωρούμε ότι η συνάρτηση ευχαρίστησης ρυθμαπόδοσης ενός χρήστη λαμβάνει τιμές πολύ κοντά στη μέγιστη δυνατή, δηλαδή τιμές περίπου ίσες με την μονάδα, όταν $R_{Max,i}^* = R_{T,i}^* + MF_i$ (δηλαδή, ότι ισχύει $T_i(R_{Max,i}^*) = 1 - \varepsilon$, όπου ε είναι μια πολύ μικρή θετική σταθερά (π.χ. $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-5}$)).

Βάσει των προηγούμενων, καταλήγουμε ότι η συνάρτηση ευχαρίστησης πραγματικού ρυθμού μετάδοσης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου T_i χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες ιδιότητες (Σχήμα 23):

1) Η T_i είναι αύξουσα συνάρτηση ως προς την μεταβλητή R_i^* .

2) Η T_i είναι συνεχής, διπλά παραγωγίσιμη, σιγμοειδής συνάρτηση ως προς την R_i^* , με ένα και μοναδικό σημείο καμπής $R_{Infl,i}^*$, το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$R_{Infl,i}^* = \left\{ R_i^* : \frac{\partial^2 T_i(R_i^*)}{\partial (R_i^*)^2} \Big|_{R_i^* = R_{Min,i}^*} = 0 \right\} \quad R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - MF_i \quad (92)$$

3) Ισχύει ότι $T_i(0) = 0$ ώστε να διασφαλιστεί ότι $U_i = 0$ όταν $R_i^* = 0$,

4) Ισχύει ότι $T_i(\infty) = I$ και ότι

5) $T_i(R_{Max,i}^*) = 1 - \varepsilon$, όπου $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-5}$.

Τέλος, βάσει της σχέσης (90), και θέτοντας $R_i^F = R_{Max,i}^*$ η ολική συνάρτηση ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου ορίζεται ως εξής:

$$U_i(P_i, \bar{P}_i) = \frac{T_i(R_{Max,i}^*) \cdot f_i(\gamma_i)}{P_i} \quad (93)$$

όπου $R_i^* \in [0, R_{Max,i}^*]$, αφού ισχύει ότι $f_i(\gamma_i) \in [0, 1] \quad \forall \gamma_i \geq 0$.

Η προτεινόμενη συνάρτηση ευχαρίστησης (93) έχει ως στόχο να αντικατοπτρίσει στην ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ την αναλογία ανάμεσα στην ευχαρίστηση του χρήστη από την απόδοση της υπηρεσίας του και τη διασφάλιση των ΚΠΥ αυτής, σε σχέση με τους συνολικούς πόρους που δαπανώνται (ισχύς μετάδοσης δεδομένων) ώστε να επιτευχθεί η παραπάνω ευχαρίστηση. Η παραπάνω θεώρηση αποτελεί καινοτομία της παρούσας διδακτορικής διατριβής καθώς, οι μέχρι τώρα ερευνητικές προσπάθειες είχαν ως μοναδικό γνώμονα προσδιορισμού της ευχαρίστησης ενός χρήστη την πραγματική ρυθμαπόδοση αυτού. Ολοκληρώνοντας την παρούσα ενότητα, πρέπει να επισημάνουμε ότι η θεώρηση κυρτών ή κοίλων συναρτήσεων ευχάριστης πραγματικής ρυθμαπόδοσης χρηστών για χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, απαιτεί την ίδια με προηγουμένως μεθοδολογία ανάλυσης, όπως αποδεικνύουμε στο [106]. Στην συνέχεια της μελέτης μας θα καταπιαστούμε μόνο με την μελέτη υπηρεσιών πραγματικού χρόνου κατά τη ζεύξη ανόδου.

7.4 Επίλυση του Μη-Συνεταιριστικού Παιγνίου Κατανομής Πόρων Ασύρματου CDMA Δικτύου (UPC) κατά τη Ζεύξη Ανόδου (UPC)

Έχοντας ορίσει κατάλληλες συναρτήσεις ευχαρίστησης των χρηστών και έχοντας αιτιολογήσει τις σχεδιαστικές τους ιδιότητες, σε αυτή την ενότητα επιλύουμε το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων ενός ασύρματου CDMA δικτύου κατά τη ζεύξη ανόδου. Το προκύπτον πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα μη-συνεταιριστικό παίγνιο και επιλύεται μέσω των μαθηματικών εργαλείων της θεωρίας παιγνίων.

Το προς εξέταση μη-συνεταιριστικό παίγνιο ελέγχου ισχύος μετάδοσης χρηστών (UPC game) κατά τη ζεύξη ανόδου $G = [S, \{A_i\}, \{U_i\}]$ εκφράζεται μέσω του ακόλουθου προβλήματος βελτιστοποίησης όπως αναδείχθηκε στην σχέση (91):

$$\max_{a_i} U_i = \max_{P_i} U_i(P_i, \bar{P}_{-i}) \quad \text{for } i = 1, \dots, N. \quad (94)$$

Σύμφωνα με το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης, κάθε χρήστης προσπαθεί να μεγιστοποιήσει ανά χρονοσχιμή τη συνολική ευχαρίστησή του, μεταβάλλοντας κατάλληλα την ισχύ με την οποία μεταδίδει δεδομένα καθώς συμμετέχει στο παίγνιο G , δεδομένου του διανύσματος ισχύος μετάδοσης των υπολοίπων χρηστών στο σύστημα. Με στόχο την επίλυση του παραπάνω παιγνίου (94) υιοθετούμε μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική στην διεθνή βιβλιογραφία [107], εκείνη του προσδιορισμού του σημείου ισορροπίας κατά Nash αυτού. Συγκεκριμένα, ένα διάνυσμα ισχύος $\bar{P}^* = (P_1^*, \dots, P_N^*)$ χαρακτηρίζεται ως σημείο ισορροπίας κατά Nash για το μη συνεταιριστικό παίγνιο G , όταν ισχύει η ανισότητα $U_i(P_i^*, \bar{P}_{-i}^*) \geq U_i(P_i, \bar{P}_{-i}^*)$, $\forall i \in S$ όπου $P_i \in [0, P_i^{Max}]$. Η διερεύνηση και ο προσδιορισμός του σημείου ισορροπίας κατά Nash ενός παιγνίου απαιτεί την εξής ακολουθία βημάτων:

- Απόδειξη της ύπαρξής του,
- Απόδειξη της μοναδικότητάς του,
- Αναλυτικό προσδιορισμό αυτού, και
- Εύρεση κατανεμημένου αλγορίθμου για τον καθορισμό του ανά χρονοσχιμή.

Προς αυτή την κατεύθυνση, αρχικά εξετάζουμε και προσδιορίζουμε αναλυτικά τη μορφή και τις ιδιότητες της συνάρτησης ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης και της συνολικής συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, στα αντίστοιχα διαστήματα ορισμού τους. Το ακόλουθο λήμμα, καθορίζει τη μορφή και τα χαρακτηριστικά της T συναρτήσεως του λόγου ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές, γ , που επιτυγχάνει ο εκάστοτε χρήστης στο σταθμό βάσης.

Λήμμα 1. Δεδομένης: α) της συνάρτησης απόδοσης $f(\gamma)$ ενός χρήστη, η οποία είναι μια σιγμοειδής συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή γ και έχει ένα και μοναδικό σημείο καμπής γ_{Infl}^f , και β) της συνάρτησης ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης αυτού $T(R^*)$, η οποία είναι μια σιγμοειδής συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή R^* και έχει ένα και μοναδικό σημείο καμπής R_{Infl}^* , όπου $R^* \equiv R_{Max}^* \cdot f(\gamma)$, ισχύει ότι, η προκύπτουσα συνάρτηση $T(\gamma) \equiv T(R_{Max}^* \cdot f(\gamma))$ είναι επίσης μια σιγμοειδής συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή γ ($\gamma \geq 0$), με ένα και μοναδικό σημείο καμπής το οποίο συμβολίζεται ως γ_{Infl}^T και για το οποίο ισχύουν οι ακόλουθες ανισοτικές σχέσεις:

$$\gamma_{Infl}^T : \begin{cases} f^{-1}\left(\frac{R_{Infl}^*}{R_{Max}^*}\right) \leq \gamma_{Infl}^T \leq \gamma_{Infl}^f & \text{όταν } f^{-1}\left(\frac{R_{Infl}^*}{R_{Max}^*}\right) \leq \gamma_{Infl}^f \\ \gamma_{Infl}^f \leq \gamma_{Infl}^T \leq f^{-1}\left(\frac{R_{Infl}^*}{R_{Max}^*}\right) & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (95)$$

όπου $f^{-1}\left(\frac{R_{Infl}^*}{R_{Max}^*}\right)$ είναι η απεικόνιση του σημείου καμπής της συνάρτησης $T(R^*)$ στον άξονα (πεδίο) των γ ($\gamma \geq 0$).

Απόδειξη: Η απόδειξη του λήμματος 1 δίδεται στο Παράρτημα VII. ■

Αναλυτικότερα, μέσω του λήμματος 1, αποδεικνύεται ότι η σύνθεση δύο σιγμοειδών συναρτήσεων, όπως στην περίπτωση της συνάρτησης ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, καταλήγει σε μια φωλιασμένη συνάρτηση η οποία είναι και αυτή σιγμοειδής. Επιπλέον, αναδεικνύεται ότι οι δυνατές τιμές του σημείου καμπής της προκύπτουσας συνάρτησης βρίσκονται πάντα ανάμεσα στις τιμές των σημείων καμπής των δύο αρχικών γεννητόρων συναρτήσεων. Όπως θα διαφανεί και από την ανάλυση που ακολουθεί στις επόμενες ενότητες, το προηγούμενο ίδιον παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις τελικές ιδιότητες του σημείου ισορροπίας του μη-συνεταιριστικού παιγνίου UPC. Συγκεκριμένα, μέσω της παραπάνω ιδιότητας καθορίζουμε τη δυνατότητα διασφάλισης ή μη των ΚΠΥ των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου από το σύστημα, κάτι το οποίο θα μας οδηγήσει στην εξαγωγή κατάλληλων κριτηρίων αποδοχής κλήσεων (χρηστών). Εν συνεχεία, διερευνάται και προσδιορίζεται αναλυτικά το μέγιστο της ολικής συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη, υπό την προϋπόθεση ότι η ισχύς μετάδοσης των υπολοίπων θεωρείται σταθερή.

Λήμμα 2. Η συνάρτηση ευχαρίστησης $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ ενός χρήστη $i \in S$ είναι οιοονεί κοίλη (quasi-concave) συνάρτηση της ισχύος μετάδοσής του P_i . Θεωρώντας το διάνυσμα ισχύος μετάδοσης των υπολοίπων χρηστών στο σύστημα σταθερό, τότε η συνάρτηση $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ όπου $P_i \in [0, P_i^{Max}]$, έχει ένα και μοναδικό σημείο μεγιστοποίησης (τοπικό μέγιστο εντός του πεδίου ορισμού της $[0, P_i^{Max}]$)

το οποίο δίδεται ως εξής:

$$P_i^* = \min\left\{\frac{\gamma_i^* R_{Max,i}^* I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{WG_i}, P_i^{Max}\right\} \quad (96)$$

το οποίο επιτυγχάνεται μόνο για μια συγκεκριμένη επιθυμητή τιμή του λόγου ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές, γ_i^* στο σταθμό βάσης. Η τιμή γ_i^* αποτελεί τη μοναδική (θετική) λύση της εξίσωσης $\frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$.

Απόδειξη: Η απόδειξη του λήμματος 2 δίδεται στο Παράρτημα VIII. ■

Βάσει της σχέσης (96), γίνεται φανερό ότι στην περίπτωση που η μέγιστη ισχύς μετάδοσης του χρήστη δεν είναι αρκετή ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός λόγος ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές γ_i^* , πιθανώς λόγω της στιγμιαίας κακής ποιότητας του καναλιού του χρήστη, τότε η καλύτερη πολιτική που μπορεί να ακολουθήσει είναι απλά να εκπέμψει με τη μέγιστη δυνατή ισχύ εκπομπής του. Επίσης, το λήμμα 2 αποκαλύπτει ότι ο στόχος των χρηστών να μεγιστοποιήσουν τη συνολική απόδοση της υπηρεσίας τους, μέσω της μεγιστοποίησης της συνάρτησης ευχαρίστησής τους, μπορεί τελικά να συσχετιστεί/ερμηνευθεί ως μια συνεχής προσπάθεια επίτευξης ενός επιθυμητού λόγου ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές στο σταθμό βάσης. Διαισθητικά, κάτι τέτοιο οδηγεί σε ένα ισορροπημένο κατά “SINR” δίκτυο (SINR-balanced network).

Το ακόλουθο θεώρημα διασφαλίζει την ύπαρξη και τη μοναδικότητα ενός σημείου ισορροπίας κατά Nash για το προτεινόμενο μη-συνεταιριστικό παίγνιο ελέγχου ισχύος χρηστών κατά τη ζεύξη ανόδου, και επιπλέον καθορίζει κατάλληλη αναλυτική έκφραση για τον υπολογισμό του παραπάνω σημείου ισορροπίας (δηλαδή, του διανύσματος ισχύος χρηστών $\bar{P}^* = (P_1^*, \dots, P_N^*)$).

Θεώρημα 6. Το σημείο ισορροπίας κατά Nash του μη-συνεταιριστικού παιγνίου (94) δίδεται ως P_i^* ,

$$\text{όπου } P_i^* = \min\left\{\frac{\gamma_i^* R_{Max,i}^* I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{WG_i}, P_i^{Max}\right\} \quad \forall i \in S, \text{ και το } \gamma_i^* \text{ προσδιορίζεται ως η μοναδική θετική λύση}$$

$$\text{της εξίσωσης } \frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0. \text{ Επιπροσθέτως, το προς εξέταση σημείο ισορροπίας υπάρχει}$$

και είναι μοναδικό.

Απόδειξη. Σύμφωνα με το λήμμα 2, η τιμή της ισχύος μετάδοσης ενός χρήστη i που οδηγεί στη μεγιστοποίηση της συνολικής ευχαρίστησής του, δεδομένου του διανύσματος ισχύος μετάδοσης των υπολοίπων χρηστών στο σύστημα, ισούται με την τιμή της ισχύος που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση ευχαρίστησής του (90) όταν θέσουμε ως επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης χρήστη $R_i^F = R_{Max,i}^*$. Παράλληλα, προσδιορίζεται ως εξής $P_i^* = \min\{\gamma_i^* R_{Max,i}^* I_{-i}(\bar{P}_{-i})/WG_i, P_i^{Max}\}$, όπου γ_i^* είναι η

μοναδική θετική λύση της εξίσωσης $\partial T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$.

Έως τώρα, έχουμε δείξει ότι στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου G , αν αυτό υπάρχει, κάθε χρήστης επιδιώκει τη διασφάλιση ενός συγκεκριμένου λόγου ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές στο σταθμό βάσης, γ_i^* . Ο λόγος αυτός δεν εξαρτάται μόνο από το σχήμα πολυπλεξίας και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται (το οποίο επηρεάζει και εκφράζεται μέσω της συνάρτησης απόδοσής του f_i) αλλά, εξαρτάται και από τα ΚΥΠ του χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου (τα οποία επηρεάζουν και εκφράζονται μέσω της συνάρτησης ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης αυτού).

Βασισμένοι στη μεθοδολογία και την αναλυτική τεκμηρίωση των [68], [69], η ύπαρξη του(των) σημείου(ων) ισορροπίας κατά Nash του προτεινόμενου παιγνίου G , μπορεί να αποδειχθεί μέσω της “quasi-concave” ιδιότητας των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών συναρτήσει της ισχύος μετάδοσής τους. Συνεπώς, αφού βάσει του λήμματος 2 έχουμε ήδη αποδείξει ότι η $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ είναι μια “quasi-concave” συνάρτηση ως προς $P_i \in [0, P_i^{Max}]$, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει πάντα τουλάχιστον ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash για το παίγνιο G (UPC).

Παράλληλα, για τις σιγμοειδείς συναρτήσεις ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης χρηστών T_i , έχουμε ήδη δείξει ότι η εξίσωση $\partial T_i(\gamma_i)/\partial \gamma_i \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0$ έχει μια και μοναδική λύση τη γ_i^* , η οποία καθορίζει και το μοναδικό ολικό μέγιστο της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i , εντός του πεδίου ορισμού της. Λόγω της μοναδικότητας του γ_i^* και της «ένα προς ένα» σχέσης ανάμεσα στην ισχύ μετάδοσης ενός χρήστη και τη μεταβλητή γ_i^* , αποδεικνύεται και η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας κατά Nash του προς εξέταση παιγνίου. ■

7.5 Προτεινόμενη Ευκαιριακή Πολιτική ΔΠΔ μέσω του Ελέγχου Ισχύος Ασύρματων Κόμβων

Σε αυτήν την ενότητα, βασισμένοι στην ανάλυση που προηγήθηκε, προτείνεται κατάλληλος επαναληπτικός και κατανεμημένος αλγόριθμος ελέγχου ισχύος χρηστών κατά τη ζεύξη ανόδου, μέσω του οποίου πραγματοποιείται ο υπολογισμός του σημείου ισορροπίας κατά Nash του προτεινόμενου μη-συνεταιριστικού παιγνίου G (UPC). Με απλά λόγια, η υλοποίησή του ανά χρονοσχισμή από τους χρήστες, τους οδηγεί στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του συστήματος. Δηλαδή, οδηγεί τον κάθε έναν από αυτούς στον προσδιορισμό της ισχύος P_i^* και κατ' επέκταση το σύστημα στο διάνυσμα ισχύος $\bar{P}^*$. Ο παρακάτω αλγόριθμος υλοποιείται σε κάθε χρήστη του συστήματος και αρχικοποιείται ανά χρονοσχισμή.

Αλγόριθμος Ελέγχου Ισχύος Ανόδου - UPC.

Βήμα 1. Στην αρχή κάθε χρονοσχισμής t , ο χρήστης $i, i \in S$ εκπέμπει με τυχαία επιλεγμένα αρχική ισχύ μετάδοσης $P_i^{*(0)}, i \in S$ μεταξύ του διαστήματος $0 \leq P_i^{*(0)} \leq P_i^{Max}$. Θέσε $k=0$ και $P_i^{*(0)}, i \in S$.

Βήμα 2. Δεδομένης της ισχύος που μεταδίδουν οι υπόλοιποι χρήστες στο σύστημα (πληροφορία η οποία συλλέγεται από το σταθμό βάσης και μετέπειτα διανέμεται εμμέσως στους χρήστες μέσω ευρυεκπομπής (broadcasting) της τιμής του συνόλου των παρεμβολών $I^{(k)}(\bar{P}^{(k)})$ σε αυτόν), ο χρήστης υπολογίζει τη μεταβλητή $I_{-i}^{(k)}(\bar{P}_{-i}^{(k)})$ και ακολούθως, καθορίζει τη νέα ισχύ μετάδοσής του. Δηλαδή, υπολογίζει τη μεταβλητή $P_i^{*(k+1)}$ βάσει της σχέσης (96).

Βήμα 3. Αν οι ισχύεις των χρηστών έχουν συγκλίνει (δηλαδή $|P_i^{*(k+1)} - P_i^{*(k)}| \leq 10^{-5}$) τότε «Σταμάτα».

Βήμα 4. Θέσε $k=k+1$, και πήγαινε στο **Βήμα 2**.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος UPC μπορεί να χαρακτηριστεί ως αλγόριθμος μιας μεταβλητής «καλλίτερης στιγμιαίας αντίδρασης χρήστη» (best response algorithm), με σημείο αφετηρίας τυχαία τιμή ισχύος εντός του πεδίο στρατηγικής του $A_i (P_i^{*(0)} \forall i \in S)$ και σημείο τερματισμού, το σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου UPC, G [108]. Η πολυπλοκότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι πολύ μικρή αφού σε κάθε επανάληψη απαιτείται μόνο μια διαίρεση και μια σύγκριση μεταξύ δύο πραγματικών αριθμών. Ακολουθώντας, εξετάζουμε τις ιδιότητες σύγκλισης του αλγορίθμου.

Από τις παραπάνω ιδιότητες και υπό την προϋπόθεση ότι η μέγιστη ισχύς μετάδοσης P_i^{Max} κάθε χρήστη είναι τέτοια ώστε σε κάθε περίπτωση να μπορεί να επιτευχθεί ο επιθυμητός λόγος ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές γ_i^* , μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος συγκλίνει πάντα στο ζητούμενο σημείο ισορροπίας κατά Nash, σύμφωνα με το θεώρημα 1 στο [99].

Στη γενικότερη περίπτωση όμως, δηλαδή όταν δεν ισχύει η παραπάνω προϋπόθεση, τότε οι επιθυμητές ιδιότητες σύγκλισης του προτεινόμενου αλγορίθμου UPC μπορούν να εξαχθούν βάσει της ιδιότητας «supermodularity» του προτεινόμενου παιγνίου, ακολουθώντας τη μεθοδολογία στις προτάσεις 1 και 3 και το θεώρημα 1, στο [109]. Ο χαρακτηρισμός ενός παιγνίου μίας μεταβλητής ως «supermodular game» μπορεί να γίνει βάσει του ορισμού που δίδεται στο [90] και επαναλαμβάνεται ακολούθως.

Ορισμός «Supermodular» Παίγνιου. Ένα μη-συνεταιριστικό παίγνιο $G=[S, \{A_i\}, \{U_i\}]$, όπου S είναι το σύνολο χρηστών/παικτών σε αυτό και $A_i=[0, P_i^{Max}] \times \Re^N$ το πεδίο στρατηγικής του εκάστοτε χρήστη i , χαρακτηρίζεται ως «supermodular» όταν και μόνο όταν για κάθε χρήστη i η συνάρτηση ευχαρίστησης αυτού $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ έχει θετικές μερικές παραγώγους (nondecreasing differences (NDD) attribute) στο πεδίο ορισμού των μεταβλητών $(P_i, \bar{P}_{-i})$ [90]. ■

Παράλληλα, όπως αποδεικνύεται στο [109], ικανές και αναγκαίες συνθήκες για να χαρακτηριστεί ένα παίγνιο ως «supermodular» είναι οι εξής:

- Σ1. Το πεδίο στρατηγικών A_i κάθε χρήστη i να είναι ένα μη κενό «compact sublattice» σύνολο.
- Σ2. Η συνάρτηση ευχαρίστησης U_i κάθε χρήστη i να είναι α) συνεχής ως προς όλες τις στρατηγικές των χρηστών/παικτών (δηλαδή, συνεχής ως προς όλες τις μεταβλητές ισχύος των χρηστών $(P_1, \dots, P_N)$), β) «supermodular» στο πεδίο στρατηγικής του ίδιου του χρήστη i , και να έχει γ) θετικές μερικές παραγώγους μεταξύ οποιασδήποτε μεταβλητής του πεδίου στρατηγικής του χρήστη και κάθε μεταβλητής του πεδίου στρατηγικής όλων των υπολοίπων χρηστών/παικτών.

Όσον αφορά το υπό εξέταση προτεινόμενο παίγνιο UPC, καθώς το πεδίο στρατηγικής του κάθε χρήστη i , A_i είναι ένας κλειστός μονοδιάστατος μη-κενός χώρος, η συνθήκη Σ1 ισχύει. Επιπλέον, εξ ορισμού, η συνάρτηση ευχαρίστησης U_i κάθε χρήστη $i \in S$ είναι συνεχής ως προς όλες τις στρατηγικές των χρηστών/παικτών καθώς και «supermodular», λόγω α) της μιας διάστασής της, β) της συνέχειά της και γ) του κλειστού πεδίου ορισμού της. Η μοναδική ιδιότητα που απομένει να αποδειχθεί, εκείνη των θετικών μερικών παραγώγων της U_i μεταξύ οποιασδήποτε μεταβλητής του πεδίου στρατηγικής του χρήστη i και κάθε μεταβλητής του πεδίου στρατηγικής όλων των υπολοίπων χρηστών/παικτών (δηλαδή $\frac{\partial^2 U_i(P_i, \bar{P}_{-i})}{\partial P_i \partial P_j} \geq 0 \quad \forall i, j \in S$), ισχύει βάσει του θεωρήματος 1

στο [109]. Επισημαίνουμε δε, ότι μπορούμε άμεσα να χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα του παραπάνω θεωρήματος, λόγω του ότι η συνάρτηση ευχαρίστησης ενός χρήστη είναι οιονεί κοίλη (quasi-concave) συνάρτηση της ισχύος μετάδοσής του P_i και συνεχής, αντιστρόφως ανάλογη συνάρτηση της ισχύος των υπολοίπων χρηστών. Ικανοποιούνται με αυτόν τον τρόπο, οι ίδιες ακριβώς ιδιότητες με τη συνάρτηση ευχαρίστησης που μελετάται στο [109] (θεώρημα 2, εξίσωση (9)). Συνεπώς, αποδείξαμε ότι το προτεινόμενο παίγνιο UPC ικανοποιεί τις συνθήκες Σ1 και Σ2 και άρα είναι «supermodular».

Τέλος, βάσει του θεωρήματος 3 στο [109], όταν ένα παίγνιο G είναι «supermodular» ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες:

- ι) Αν η πολιτική «καλλίτερης στιγμιαίας αντίδρασης» κάθε χρήστη είναι μονοδιάστατη και κάθε χρήστης ελέγχει την ισχύ μετάδοσής του μόνο βάσει της μυωπικής πολιτικής «καλλίτερης

στιγμιαίας αντίδρασης» του (όπως ο προτεινόμενος αλγόριθμος UPC), τότε, ξεκινώντας από το μικρότερο (μεγαλύτερο) σημείο του πεδίου στρατηγικής του, η πολιτική θα συγκλίνει στο μικρότερο (μεγαλύτερο) σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου/συστήματος.

ii) Αν το σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου/συστήματος είναι μοναδικό, τότε η μυωπική πολιτική «καλλίτερης στιγμιαίας αντίδρασης» κάθε χρήστη (όπως ο προτεινόμενος αλγόριθμος UPC) συγκλίνει πάντα σε αυτό το μοναδικό σημείο ισορροπίας ξεκινώντας από οιαδήποτε αρχική τιμή.

7.6 Μελέτη Ιδιοτήτων Σημείου Ισορροπίας κατά Nash Χρηστών με Υπηρεσίες Πραγματικού Χρόνου - Οδεύοντας προς το Σχεδιασμό Αυτόνομων Ασύρματων Κόμβων

Στην παρούσα ενότητα, αναλύονται και διερευνώνται οι ιδιότητες του σημείου ισορροπίας κατά Nash του προτεινόμενου παιγνίου ελέγχου ισχύος χρηστών κατά τη ζεύξη ανόδου ενός CDMA δικτύου, όσον αφορά α) στην κατανάλωση ισχύος των χρηστών στο σημείο αυτό, β) στο ρόλο των φυσικών περιορισμών ισχύος μετάδοσης των κινητών τερματικών των χρηστών και γ) στην επίδραση που έχουν τα παραπάνω στην πραγματική ρυθμαπόδοσή του εκάστοτε χρήστη, στην διασφάλιση των ΚΠΥ του αλλά και την συνολική απόδοση του δικτύου. Το κυριότερο συμπέρασμα που εξάγεται μέσω της μελέτης που ακολουθεί είναι το εξής. Δίδοντας στο ΔΠΔ του συστήματος τη δυνατότητα (ή αντίστοιχα στους χρήστες την αυτονομία) να ελέγχει και να καθορίζει α) το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται (για τη μετάδοση δεδομένων από τον εκάστοτε χρήστη) και β) την αντίστοιχη στάθμη ισχύος μετάδοσης των χρηστών, είναι εφικτή η πλήρης ικανοποίηση των ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου στο σύστημα.

Ακολουθώντας βασικές αρχές της θεωρίας προβλημάτων βελτιστοποίησης, επισημαίνουμε αρχικά, ότι η εκάστοτε (μοναδική και θετική) τιμή του λόγου ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές γ_i^* η οποία μεγιστοποιεί τη συνάρτηση ευχαρίστησης U_i ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, πρέπει είναι πάντα μεγαλύτερη της τιμής $\gamma_{Infl,i}^T$ (δηλαδή, μεγαλύτερη του σημείου καμψής της συνάρτησης ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης του χρήστη). Αυτό συμβαίνει γιατί η τιμή του γ_i^* που μεγιστοποιεί την U_i πρέπει να βρίσκεται στο κοίλο τμήμα της $T_i(\gamma_i)$ (βάσει του δεύτερου κριτηρίου βελτιστοποίησης – KKT optimality conditions [110]). Συνεπώς, ισχύει ότι:

$$\gamma_{Infl,i}^T < \gamma_i^* \quad (97)$$

Επίσης, σύμφωνα με το λήμμα 1, γνωρίζουμε ότι η τιμή του σημείου καμψής της συνάρτησης $T_i(\gamma_i)$ ως προς γ_i , βρίσκεται πάντα ανάμεσα στις τιμές των σημείων καμψής των γεννητόρων συναρτήσεων

αυτής (δηλαδή της $f_i(\gamma_i)$ και της $T_i(R_i^*)$ ως προς R_i^*). Από τα παραπάνω και βάσει των σχέσεων (95) και (97), μπορούμε να εξάγουμε την ακόλουθη ιδιότητα για την τιμή του γ_i^* :

$$\gamma_i^* : \begin{cases} f_i^{-1}\left(\frac{R_{Infl,i}^*}{R_{Max,i}^*}\right) < \gamma_i^* & \text{όταν } f_i^{-1}\left(\frac{R_{Infl,i}^*}{R_{Max,i}^*}\right) \leq \gamma_{Infl,i}^f \\ \gamma_{Infl,i}^f < \gamma_i^* & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (98)$$

Βασισμένοι στο προηγούμενο συμπέρασμα, η πρόταση που ακολουθεί καθορίζει τη σχέση/εξάρτηση μεταξύ του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιεί κατά τη μετάδοση των δεδομένων του ένας χρήστης με υπηρεσία πραγματικού χρόνου και την αντίστοιχη απόδοση της υπηρεσίας τους, κυρίως σε σχέση με τη διασφάλιση των ΚΠΥ αυτής.

Πρόταση 1. Αν για ένα χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου $i \in S$ ισχύει ότι $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f$, τότε στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του προτεινόμενου παιχνιδιού ελέγχου ισχύος UPC, G (στο οποίο $P_i = P_i^*$ και $\gamma_i = \gamma_i^*$), ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που επιτυγχάνεται για το χρήστη i , R_i^* , είναι πάντα μεγαλύτερος από τον ελάχιστο αποδεκτό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της υπηρεσίας του (βάσει των ΚΠΥ αυτής) $R_{Min,i}^* = R_{T,i}^* - MF_i$. Δηλαδή ισχύει ότι:

$$\text{αν } f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f \text{ τότε } R_i^* > R_{Min,i}^*$$

Απόδειξη: Όταν ισχύει $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f$ τότε σύμφωνα με τη σχέση (98) γνωρίζουμε ότι $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) < \gamma_i^*$ και συνεπώς $R_{Infl,i}^* < R_{Max,i}^* \cdot f_i(\gamma_i^*)$, αφού η f_i είναι συνεχής γνησίως αύξουσα συνάρτηση ως προς γ_i όταν $\gamma_i \geq 0$. Αφού εξ ορισμού το σημείο καμπής της συνάρτησης ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου τίθεται ως $R_{Infl,i}^* = R_{Min,i}^*$, σύμφωνα με τις επιταγές των ΚΠΥ αυτού, και λόγω του γεγονότος ότι $R_i^* \equiv R_{Max,i}^* \cdot f_i(\gamma_i^*)$, μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε το εξής:

$$\text{αν } f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f \text{ τότε } R_i^* > R_{Min,i}^* \quad (99)$$

και συνεπώς ότι,

$$\text{αν } f_i^{-1}(R_{Min,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f \text{ τότε } R_i^* > R_{T,i}^* - MF_i \quad (100)$$

όταν και μόνο όταν η τιμή του P_i^{Max} είναι αρκετά μεγάλη ώστε να επιτυγχάνεται πάντα το επιθυμητό γ_i^* . ■

Η παραπάνω πρόταση καθορίζει μια ισχυρή και άμεση συσχέτιση μεταξύ των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται (το οποίο εκφράζεται μέσω της συνάρτησης απόδοσης) και τα ανώτατα όρια ισχύος εκπομπής των χρηστών (λόγω των φυσικών περιορισμών των κινητών τερματικών). Με απλά λόγια, διαφαίνεται ότι με τη κατάλληλη επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης του χρήστη (δηλαδή της συνάρτησης απόδοσης) είναι δυνατόν να επιτυγχάνεται πάντα ο επιθυμητός πραγματικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (goodput) αυτού ανά χρονοσχισμή. Επιπλέον, εάν το ανώτατο όριο της ισχύος του χρήστη, P_i^{Max} , είναι αρκετά μεγάλο ώστε να εξασφαλίζεται η επίτευξη του επιθυμητού λόγου ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές γ_i^* , τότε στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του συστήματος, δεν μεγιστοποιείται μόνο η συνολική ευχαρίστηση του χρήστη, αλλά και διασφαλίζονται πάντα και πλήρως οι απαιτήσεις του σε ρυθμό μετάδοσης, R_i^* . Όλα τα παραπάνω ισχύουν υπό την προϋπόθεση ότι $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f$.

Αναλυτικότερα, υπό την οπτική γωνία ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

A. Εάν ισχύει ότι $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f$, τότε διασφαλίζεται ότι ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνει ο χρήστης κυμαίνεται πάντα μεταξύ των ορίων που καθορίζει ο επιθυμητός πραγματικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων του $R_{T,i}^*$ και ο παράγων απόκλισης MF_i . Δηλαδή, ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης του χρήστη κυμαίνεται πάντα μεταξύ του κατώτατου ορίου $R_{Infl,i}^* = R_{Min,i}^*$ και του ανώτατου ορίου $R_{Max,i}^*$. Άρα, όταν $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f$ ισχύει ότι $R_i^* \in [R_{Infl,i}^*, R_{Max,i}^*)$.

B. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του παράγοντα απόκλισης MF_i , τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να ικανοποιηθούν οι ανάγκες του χρήστη ως προς τις απαιτήσεις του σε πραγματικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ανά χρονοσχισμή. Το παραπάνω συμπέρασμα οφείλεται στο ότι η συνάρτηση f_i^{-1} είναι γνησίως αύξουσα ως προς το λόγο $R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^* = (R_{T,i}^* - MF_i)/(R_{T,i}^* + MF_i)$. Με απλά λόγια, όσο αυξάνεται ο παράγων δυνατής απόκλισης MF_i , τόσο μειώνεται ο λόγος $R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^* = (R_{T,i}^* - MF_i)/(R_{T,i}^* + MF_i)$ και άρα, τόσο πιο πιθανή είναι η ικανοποίηση του κριτηρίου $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f$.

Γ. Όσο αυστηρότερα είναι τα ΚΠΥ των χρηστών, δηλαδή όταν η τιμή του παράγοντα ελαστικότητας MF_i είναι μικρή (το οποίο υποδηλώνει και δυνατότητα για μικρές μόνο αποκλίσεις από τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης), τόσο πιο δύσκολο είναι να επιτευχθούν οι απαιτήσεις του χρήστη σε ρυθμό μετάδοσης. Επιπλέον, εάν ο παράγοντας ελαστικότητας MF_i του χρήστη έχει τέτοια τιμή ώστε $\gamma_{Infl,i}^f < f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*)$, τότε ακόμα και αν μεγιστοποιείται η συνολική του

ευχαρίστηση (δηλαδή μεγιστοποιείται η U_i), ο ρυθμός μετάδοσης του χρήστη υπάρχει πιθανότητα να είναι μικρότερος του κάτω ορίου $R_{Min,i}^*$.

Συγκεντρωτικά, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το δυαδικό κριτήριο επιλογής χρήστη που καθορίζει η πρόταση 1, είναι κατάλληλο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο αποδοχής κλήσεων χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου κατά τη ζεύξη ανόδου ενός CDMA δικτύου. Συγκεκριμένα, εάν για τον εκάστοτε χρήστη i ικανοποιείται το κριτήριο $f_i^{-1}(R_{Inf,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Inf,i}^f$ τότε γίνεται αποδεκτός από το δίκτυο διότι διασφαλίζονται τα ΚΠΥ του.

Από τη σκοπιά του δικτύου, όταν ένας χρήστης καταφθάνει σε αυτό και χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες απαιτήσεις ως προς την ποιότητα της υπηρεσίας του (μέσω κατάλληλης συνάρτησης ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης T_i και τις περαμέτρους αυτής $R_{T,i}^*, MF_i$), το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση των δεδομένων του (συνάρτησης απόδοσης $f_i(\gamma_i)$) πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να ικανοποιείται το κριτήριο (99). Επιπροσθέτως, βάσει του κριτηρίου (99) γίνεται αντιληπτό ότι, όσο πιο απαιτητικός είναι ο χρήστης ως προς την ποιότητα των υπηρεσιών που επιθυμεί, δηλαδή όσο μικρότερη είναι η τιμή του παράγοντα απόκλισης MF_i , τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η τιμή του σημείου καμπής της συνάρτησης απόδοσης $f_i(\gamma_i)$ που επιλέγεται. Με απλά λόγια, αφού ο παράγων απόκλισης MF_i ελαττώνεται όσο οι απαιτήσεις του χρήστη αυξάνονται, τότε η καμπύλη της συνάρτησης απόδοσής του θα πρέπει να μετατοπίζεται προς τα δεξιά στον άξονα των γ , με αποτέλεσμα το σημείο καμπής της να μετατοπίζεται και αυτό ώστε να ικανοποιηθεί το κριτήριο (99). Για τον παραπάνω λόγο, καθώς φαίνεται από το Σχήμα 14, επιλέγεται χειρότερο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης σε σχέση με το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που επιτυγχάνεται υπό το σχήμα αυτό [1]. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι ο χρήστης πρέπει να θυσιάσει την ποιότητα του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιεί, διαλέγοντας κάποιο χειρότερο σχήμα ως προς την συνολική ρυθμαπόδοση που μπορεί να επιτευχθεί μέσω αυτού, ώστε να επιτυγχάνει πάντα ρυθμό μετάδοσης εντός των επιθυμητών ορίων. Έτσι, μέσω της μαθηματικής ανάλυσης που προηγήθηκε, επιβεβαιώνεται και θεωρητικά η αλληλεξάρτηση και η αντιστρόφως ανάλογη σχέση που ισχύει μεταξύ της μεγιστοποίησης του ρυθμού μετάδοσης των χρηστών και της διασφάλισης των ΚΠΥ τους, υπό το πρίσμα ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ.

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη μας, αξίζει να παρατηρήσουμε ότι τα προηγούμενα κριτήρια ευνοούν το σχεδιασμό αυτόνομων μηχανισμών χρηστών οι οποίοι ελέγχουν α) την ισχύ εκπομπής τους P_i , ώστε να μεγιστοποιείται η συνολική τους απόδοση (υιοθετώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο κατανομής ισχύος) και β) τη διασφάλιση των ΚΠΥ των υπηρεσιών των χρηστών. Συγκεκριμένα, οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν αυτόνομα την απόδοση των υπηρεσιών τους μέσω:

- της επιλογής κατάλληλης πρωταρχικής συνάρτησης ευχαρίστησης T_i .
- του καθορισμού του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που ακολουθούν με βάσει τα προκαθορισμένα κριτήρια που διατυπώθηκαν στην πρόταση 1.
- της βελτιστοποίησης της λαμβανόμενης ποιότητας υπηρεσιών (ΚΠΥ) μέσω του προτεινόμενου αλγορίθμου UPC.

7.7 Αξιολόγηση της Επίδοσης της Προτεινόμενης Ευκαιριακής Πολιτικής ΔΠΔ

Στην παρούσα ενότητα δίδονται αναλυτικά αριθμητικά αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση και τη συμπεριφορά του συστήματος υπό την προτεινόμενη ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ και ελέγχου της ισχύος μετάδοσης των χρηστών UPC κατά τη ζεύξη ανόδου ενός CDMA ασύρματου δικτύου. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εξήχθησαν μέσω μοντελοποίησης και προσομοιώσεων. Αρχικά, για λόγους καλύτερης παρουσίασης και κατανόησης, υποθέτουμε σταθερές προκαθορισμένες τιμές ποιότητας καναλιών χρηστών στο σύστημα. Οι τιμές αυτές είναι κατάλληλα επιλεγμένες ώστε να μελετήσουμε και να παρουσιάσουμε τη συμπεριφορά του συστήματος όταν αυτό βρεθεί στο σημείο ισορροπίας κατά Nash (του παιγνίου ελέγχου ισχύος αυτού), για διάφορες συνθήκες ποιότητας διαύλου χρηστών και ΚΠΥ αυτών. Εν συνεχεία, εξετάζουμε τη συμπεριφορά του δικτύου και του προτεινόμενου αλγορίθμου σε μακροπρόθεσμη κλίμακα θεωρώντας κανάλια χρηστών με χρονομεταβλητή εξασθένιση Rayleigh. Σε αυτήν την περίπτωση, οι προσομοιώσεις αναδεικνύουν τα χαρακτηριστικά του δικτύου όταν ακολουθείται ο προτεινόμενος αλγόριθμος κατανομής ισχύος στην άνω ζεύξη (UPC algorithm) και παρουσιάζεται η αντιστοιχία που υπάρχει ανάμεσα α) στις συνθήκες του καναλιού του εκάστοτε χρήστη, β) την κατανάλωση ισχύος του και γ) την ολική απόδοση/ευχαρίστησή του. Τέλος, μελετάται η επίδραση που έχει η επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου στην ικανοποίηση των απαιτήσεων ΚΠΥ του και αναδεικνύεται η ισχύς και η καταλληλότητα της Πρότασης 1.

Η ανάλυσή μας επικεντρώνεται στη μελέτη μιας μόνο κυψέλης ενός CDMA ασύρματου δικτύου. Ο χρόνος είναι διαιρεμένος σε χρονοσχισμές ίσου μεγέθους και διάρκειας 1.67 msec , ενώ η συνολική διάρκεια κάθε προσομοίωσης είναι 10.000 slots . Υποθέτουμε ότι ο σταθμός βάσης βρίσκεται στο κέντρο της κυψέλης που εξετάζουμε και ότι το σύστημα εξυπηρετεί ταυτόχρονα $N=10$ χρήστες με υπηρεσίες πολυμέσων πραγματικού χρόνου, οι οποίοι έχουν πάντα συνεχώς δεδομένα προς μετάδοση στους καταχωρητές τους («continuously backlogged users assumption»). Παράλληλα, το κέρδος μετάδοσης από τον εκάστοτε χρήστη i προς το σταθμό βάσης, G_i , μοντελοποιείται ως $G_i = K_i / d_i^{a'}$, όπου η μεταβλητή d_i εκφράζει την απόσταση του χρήστη i από το σταθμό βάσης, ως a' ορίζεται ο εκθέτης απωλειών διαδρομής ($a'=4$), και η μεταβλητή K_i ορίζει μια τυχαία μεταβλητή η οποία ακολουθεί «log-normal» κατανομή με μέση τιμή ίση με θ και διακύμανση ίση με $\sigma^2 = 8(\text{dB})$. Μέσω της τυχαίας μεταβλητής K_i αναπαριστώνται και εισάγονται

στο μοντέλο προσομοίωσης τα φαινόμενα σκίασης που παρατηρούνται σε ένα ασύρματο δίαυλο [89]. Συγκεντρωτικά, η παραμετροποίηση του συστήματος που προσομοιώθηκε παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Παραμετροποίηση Συστήματος Ζεύξης Ανόδου

Παράμετρος ($\forall i \in \mathcal{S}$)	Τιμή
P_i^{Max}	2 (Watt)
W	10^6 (Hz)
I_0	$5 \cdot 10^{-16}$
a'	4

Παράλληλα, θεωρούμε δύο ομάδες («classes») χρηστών, οι οποίες διακρίνονται με βάση το είδος της υπηρεσίας των χρηστών που ανήκουν σε αυτές. Ανάλογα με την κλάση στην οποία ανήκει ο εκάστοτε χρήστης, χαρακτηρίζεται και από διαφορετικές τιμές παραμέτρων της συνάρτησης ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης αυτού $T_i(R_i^*) = (1 - e^{-(R_i^* - A_i)})^{M_{T,i}}$. Οι τιμές των παραμέτρων για τις δύο κλάσεις υπηρεσιών που εξετάστηκαν φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 4.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4. ΚΠΥ Χρηστών Πραγματικού Χρόνου ανά Κλάση

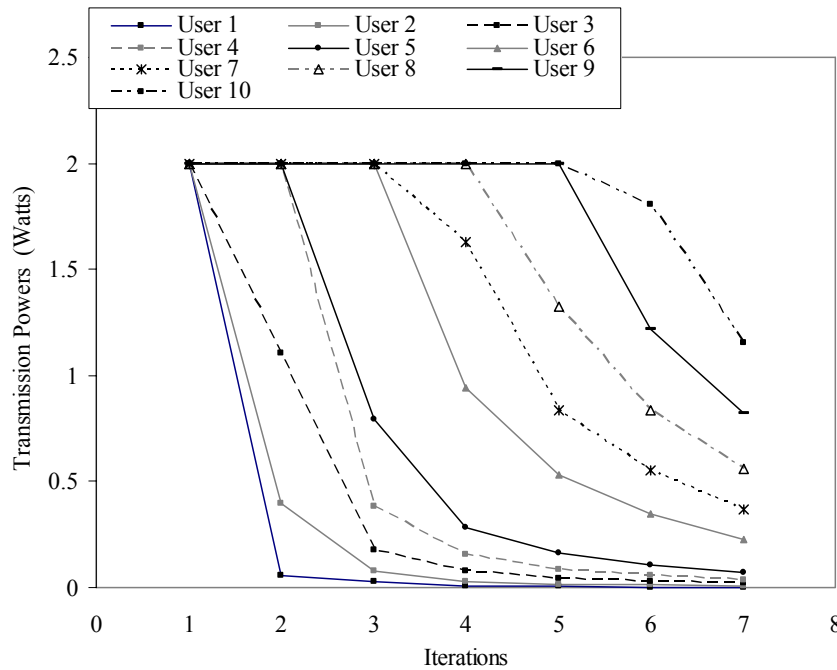
Κλάση Χρηστών Μεταβλητές	Κλάση 1 (π.χ. Υπηρεσία Φωνής)	Κλάση 2 (π.χ. Υπηρεσία «Video Conference»)
R_T^*	64 (Kbps)	128 (Kbps)
MF	10 (Kbps)	10 (Kbps)
M_T	800	800
A_T	48	112
$\gamma_{M=100}^*$	6.6 (8.2 dB)	7.3 (8.6 dB)
$\gamma_{M=500}^*$	8.25 (9.16 dB)	8.9 (9.5 dB)

Επιπλέον, με βάση τα θεωρητικά αποτελέσματα για τις τιμές των σημείων καμπής των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών, μελετώνται στη συνέχεια δύο διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης βασισμένα στη συνάρτηση απόδοσης $f_i(\gamma_i) = (1 - e^{-\gamma_i})^M \quad \forall i = 1, \dots, N$. Στο πρώτο σενάριο (το οποίο εφ' εξής θα αποκαλούμε SC_I), θεωρείται ότι $M=500$ και για αυτό ισχύει $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f \quad \forall i = 1, \dots, N$ και για τις δύο κλάσεις χρηστών, ενώ στο δεύτερο σενάριο (το

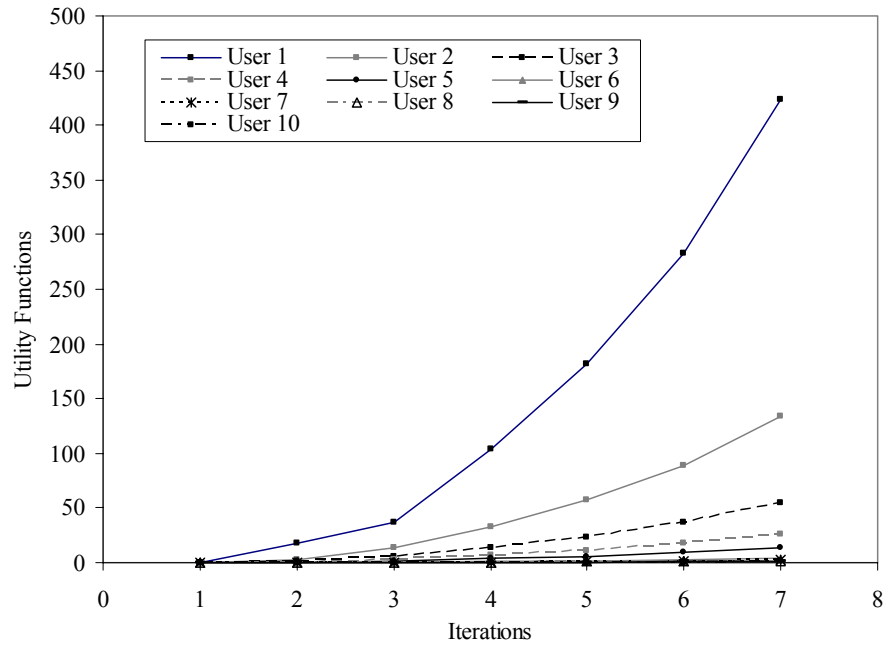
οποίο εφ' εξής θα αποκαλούμε SC_II) θεωρείται ότι $M=100$ και για αυτό ισχύει $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \geq \gamma_{Infl,i}^f \forall i=1,\dots,N$.

7.7.1. Ιδιότητες σημείου ισορροπίας κατά Nash για το προτεινόμενο παίγνιο ελέγχου ισχύος μετάδοσης χρηστών (UPC) κατά τη ζεύξη απόδοσης.

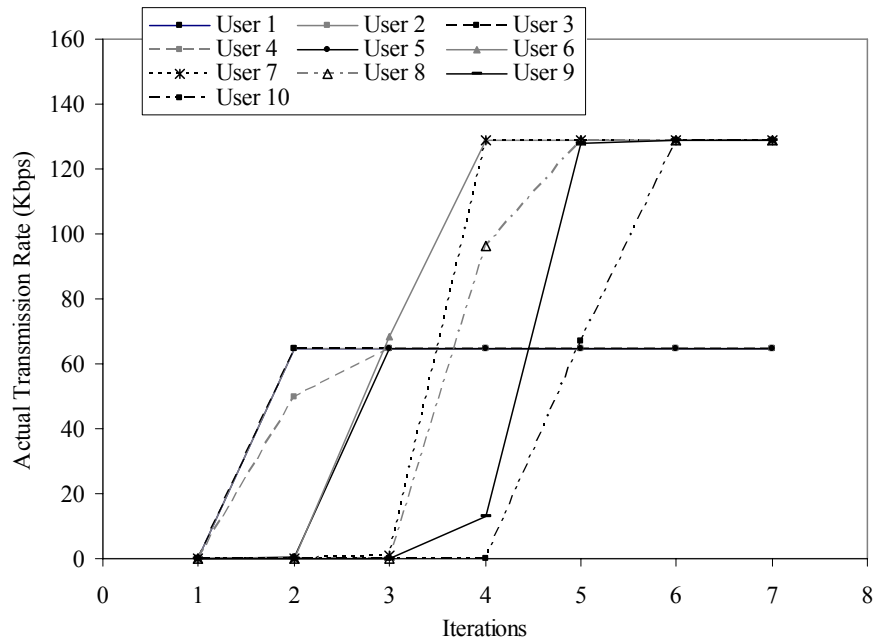
Με στόχο την εξέταση και παρουσίαση των ιδιοτήτων σύγκλισης ανά χρονοσχισμή του προτεινόμενου αλγορίθμου UPC στο σημείο ισορροπίας κατά Nash του παιγνίου G , θεωρούμε την ύπαρξη σταθερών τιμών κέρδους (ποιότητας) καναλιού χρηστών. Συγκεκριμένα, θέτουμε $G_i = 1/d_i^{\alpha}$ για κάθε χρήστη i , όπου $d_i = d_{i-1} + 100$ (m) όταν $i=2,\dots,10$ και $d_1=300$ (m). Με αυτόν τον τρόπο, προσομοιώνεται σενάριο χρηστών κατά το οποίο οι συνθήκες διαύλου αυτών δυσχεραίνουν καθώς αυξάνεται η τιμή του διακριτικού τους ID (δηλαδή $i=1,\dots,10$). Επιπλέον, θεωρούμε ότι οι χρήστες 1 έως 5 ζητούν υπηρεσίες κλάσης 1, οι χρήστες 6 έως 10 υπηρεσίες κλάσης 2. Όλοι οι χρήστες υπακούουν στο σενάριο 1 (SC_I), καθώς θέτουμε $M=500$.



Σχήμα 24. Ισχύς μετάδοσης χρηστών κατά τη σύγκλισή τους (ανά επανάληψη - iteration) για δεδομένη χρονοσχισμή, συναρτήσει του διακριτικού τους (ID).



Σχήμα 25. Ολική συνάρτηση ευχαρίστησης χρηστών ανά επανάληψη (iteration) για δεδομένη χρονοσχιμή, συναρτήσει του διακριτικού τους (ID).



Σχήμα 26. Πραγματική ρυθμαπόδοση (goodput) χρηστών ανά επανάληψη (iteration) για δεδομένη χρονοσχιμή, συναρτήσει του διακριτικού τους (ID).

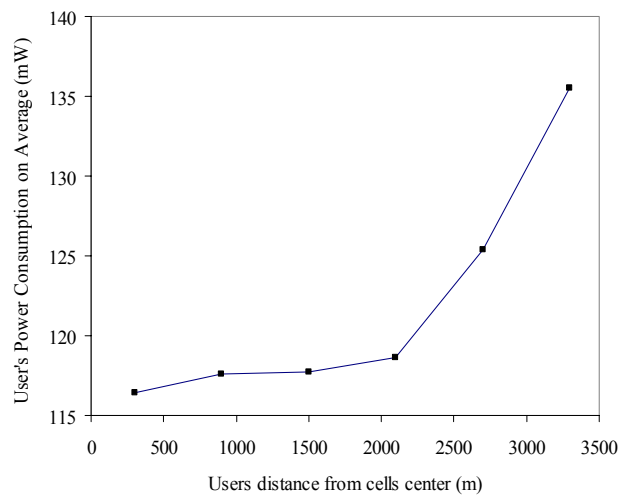
Στα Σχήματα 24, 25 και 26, παρουσιάζονται οι τιμές των ισχύων μετάδοσης των χρηστών, οι τιμές των ολικών συναρτήσεων ευχαρίστησής τους καθώς και οι πραγματικοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων τους συναρτήσει των διακριτικών τους (ID). Παράλληλα, οι τιμές τους παρουσιάζονται για κάθε επανάληψη του προτεινόμενου UPC αλγορίθμου έως ότου αυτές συγκλίνουν στο σημείο

ισορροπίας κατά Nash, $\bar{P}^*$, του παιγνίου UPC, G , και κατ' επέκταση του συστήματος. Αρχικά, τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι οι τιμές των ισχύων μετάδοσης των χρηστών στο σημείο ισορροπίας του συστήματος είναι αντιστρόφως ανάλογες της στιγμιαίας ποιότητας του καναλιού τους (Σχήμα 24). Επιπροσθέτως, παρατηρούμε ότι απαιτούνται μόνο επτά επαναλήψεις έως ότου επέλθει η σύγκλιση στο επιθυμητό σημείο ισορροπίας, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό και επιθυμητό λόγω του μικρού μεγέθους των χρονοσχισμών που υιοθετούν οι ευκαιριακές πολιτικές ΔΠΔ που εξετάζουμε (κατά το πρότυπο HDR το μέγεθος της κάθε χρονοσχισμής είναι ίσο με 1.67 msec [1]).

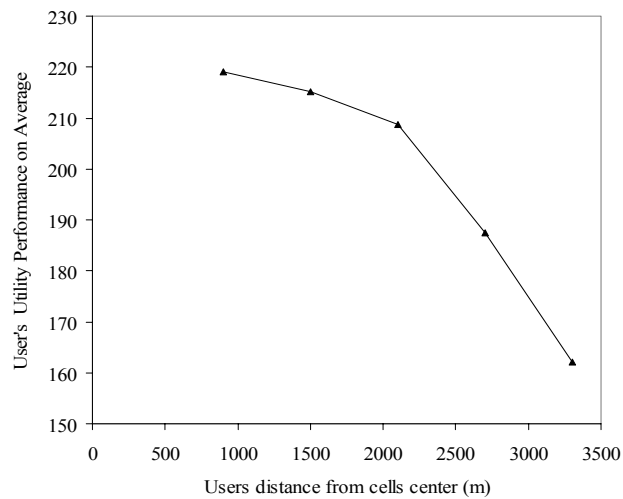
Γίνεται φανερό επίσης, ότι ακόμα και αν οι τελικές τιμές των ολικών συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών είναι ανάλογες της ποιότητας του καναλιού τους (Σχήμα 25), η πραγματική ρυθμαπόδοση κατά τη ζεύξη ανόδου για κάθε χρήστη είναι τόση, ώστε να ικανοποιούνται πλήρως τα ΚΠΥ των υπηρεσιών τους (Σχήμα 26). Αυτό συμβαίνει ακόμα και για τους πιο απαιτητικούς χρήστες δηλαδή, εκείνους με κακή ποιότητα καναλιού (μικρά G_i) και απαιτητικά ΚΠΥ (κλάση 2), (χρήστες με μεγάλα IDs). Βάσει της παραπάνω παρατήρησης αποκαλύπτεται η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου UPC αλγορίθμου στο να ελέγχει και να περιορίζει τις αρνητικές επιπτώσεις του φαινομένου “near – far” μεταξύ των χρηστών κατά τη ζεύξη ανόδου. Το πρόβλημα δηλαδή που δημιουργείται λόγω του μικρού σηματοθορυβικού λόγου που επιτυγχάνουν οι πιο απομακρυσμένοι χρήστες στο σύστημα. Τέλος, παρατηρούμε ότι και για τα δύο είδη κλάσεων υπηρεσιών πραγματικού χρόνου στο σύστημα, η πραγματική ρυθμαπόδοση των χρηστών είναι τέτοια ώστε να διασφαλίζονται πλήρως τα ΚΠΥ τους. Τα παραπάνω αποτελέσματα αποκαλύπτουν όχι μόνο την αποτελεσματική λειτουργία των προτεινόμενων συναρτήσεων ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης των χρηστών (T_i) στο να αντικατοπτρίζουν τα ΚΠΥ τους στη ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ και το αλγόριθμο UPC, αλλά και τη δυνατότητά τους να διαχωρίζουν ευκρινώς πολλαπλά ΚΠΥ διαφόρων υπηρεσιών πολυμέσων.

7.7.2. Μελέτη σχέσεων και αναλογιών μεταξύ των διανυσμάτων ισχύος, ολικών συναρτήσεων ευχαρίστησης και πραγματικής ρυθμαπόδοσης χρηστών.

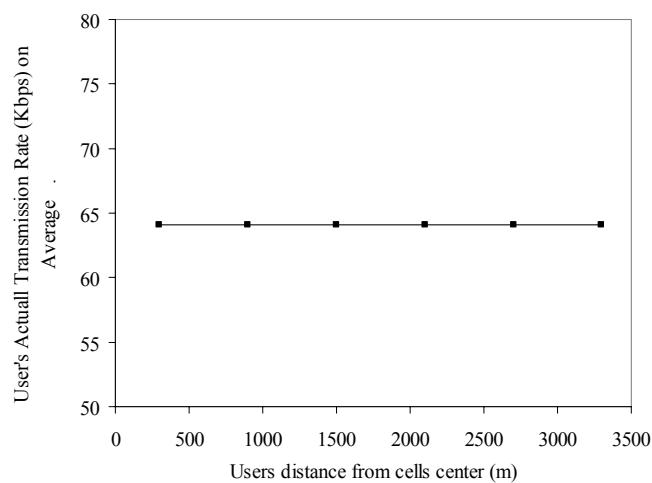
Σε αυτήν την υποενότητα ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στη μελέτη των σχέσεων και των αναλογιών μεταξύ της κατανάλωσης ισχύος των χρηστών, τα αντίστοιχα ΚΠΥ που επιτυγχάνονται και της ολικής ευχαρίστησης των χρηστών κατά το σημείο ισορροπίας του συστήματος, συναρτήσει της μέσης ποιότητας καναλιού των χρηστών στο σύστημα. Κατά τις προσομοιώσεις της παρούσας υποενότητας θεωρήθηκαν χρήστες με υπηρεσίες μόνο κλάσης 1, τα κανάλια των οποίων είναι διαρκώς μεταβαλλόμενα ακολουθώντας Rayleigh διακυμάνσεις με κοινή μέση τιμή (δηλαδή $d_i=d \forall i \in S$). Όλοι οι χρήστες υπακούουν στις παραδοχές του σεναρίου 1 (SC_I).



(a) Μέση ισχύς μετάδοσης (mW) χρηστών συναρτήσει της απόστασής τους από το σταθμό βάσης



(b) Μέση συνάρτηση ευχαρίστησης χρηστών συναρτήσει της απόστασής τους από το σταθμό βάσης



(c) Πραγματική μέση ρυθμαπόδοση (Kbps) χρηστών συναρτήσει της απόστασής τους από το σταθμό βάσης

Σχήμα 27. Μέση ισχύς κατανάλωσης, μέση ολική συνάρτηση ευχαρίστησης και μέση πραγματική ρυθμαπόδοση χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

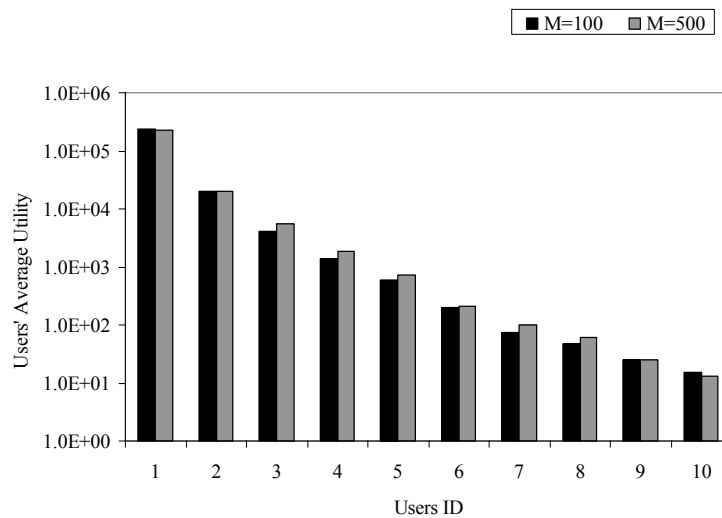
Στο Σχήμα 27, παρουσιάζονται η μέση ισχύς μετάδοσης δεδομένων, η αντίστοιχη συνάρτηση ευχαρίστησης που επιτυγχάνεται και η προκύπτουσα πραγματική ρυθμαπόδοση των χρηστών στο σύστημα υπό την πολιτική UPC, συναρτήσει αυξανόμενων τιμών της παραμέτρου d (όπου $d_i=d=300, 900, ..., 3300 \ \forall i \in S$). Δηλαδή κατά το σενάριο αυτό, όλοι οι χρήστες απομακρύνονται σταδιακά από το σταθμό βάσης του συστήματος. Από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων του Σχήματος 27 αποκαλύπτεται η εξής αναλογία. Όσο μειώνεται η ποιότητα του καναλιού ενός χρήστη, τόσο πιο δύσκολη γίνεται η ικανοποίηση των ΚΠΥ αυτού (Σχήμα 27 (c)) (δηλαδή, η διατήρηση της πραγματική ρυθμαπόδοσης ανά χρονοσχιμή του εκάστοτε χρήστη στα $64 Kbps$ με απόκλισης $10 Kbps$). Συνεπώς, η ισχύς μετάδοσής του αυξάνεται (Σχήμα 27 (a)), οδηγώντας και στην αντίστοιχη μείωση της ολικής ευχαρίστησής του (Σχήμα 27 (b)). Η παραπάνω αναλογίες επιβεβαιώνουν πειραματικά την αποτελεσματικότητα των σχεδιαστικών μας επιλογών όσον αφορά στις συναρτήσεις ευχαρίστησης των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, αλλά και τη γενικότερη πολιτική UPC. Συγκεκριμένα, γίνεται φανερό ότι παρά την αντιστρόφως ανάλογη σχέση που διατηρείται μεταξύ της συνολικής ευχαρίστησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου και την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος που απαιτείται για την μεγιστοποίηση αυτή, επιτυγχάνεται πάντα η διασφάλιση των ΚΠΥ του χρήστη, ανεξαρτήτως των διακυμάνσεων της ποιότητας του καναλιού του. Δηλαδή, επιτυγχάνεται πάντα σταθερός πραγματικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ανά χρονοσχιμή.

7.7.3. Μελέτη της συσχέτισης μεταξύ του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης των χρηστών και της αντίστοιχης διασφάλισης των ΚΠΥ αυτών.

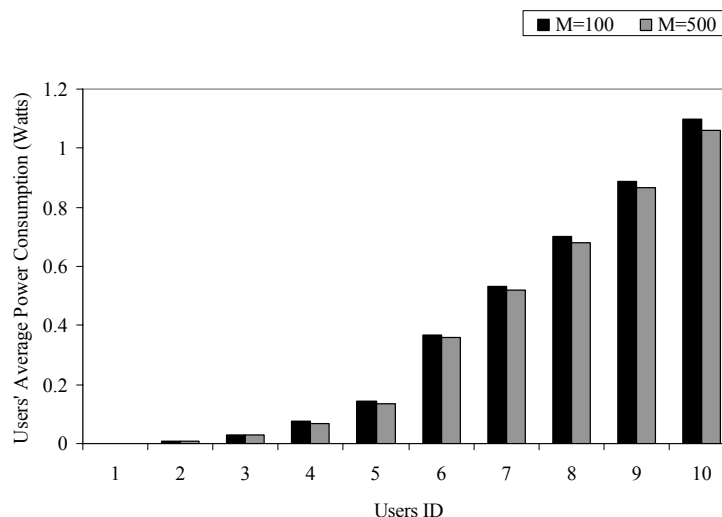
Κατά το τελικό στάδιο των προσομοιώσεών μας, θέτουμε $d_i=d_{i-1}+250$ (m) όταν $i=2,...,10$ όπου $d_1=300$ (m), ώστε η μέση ποιότητα των καναλιών των χρηστών να χειροτερεύει καθώς η τιμή του διακριτικού ID τους αυξάνει (καθώς δηλαδή $i=1,..., 10$). Παράλληλα, θεωρούμε ότι οι χρήστες 1 έως 5 ανήκουν στην κλάση 1 ενώ οι χρήστες 6 έως 10 στην κλάση 2. Τέλος, με στόχο τη μελέτη της συσχέτισης που προκύπτει μεταξύ της πλήρους διασφάλισης των ΚΠΥ των χρηστών πραγματικού χρόνου και του σχήματός διαμόρφωσης που επιλέγεται για τη μετάδοση των δεδομένων τους κατά τη ζεύξη ανόδου, θεωρούμε την ύπαρξη δύο διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης. Συγκεκριμένα, κατά το πρώτο σενάριο (SC_I) θέτουμε $M=500$; συνεπώς, και για τις δύο κλάσεις χρηστών τα σημεία καμπής των συναρτήσεων ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσής τους (όπως διαφαίνεται και στο Πίνακα 4) ικανοποιούν την εξής ανισότητα $f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \leq \gamma_{Infl,i}^f \ \forall i=1,...,N$. Σε αυτήν την περίπτωση, με βάση τα αποτελέσματα της Πρότασης 1, αναμένεται ότι η επιτευχθείσα πραγματική ρυθμαπόδοση όλων των χρηστών θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη της ελάχιστης επιτρεπτής. Στον αντίποδα, κατά το δεύτερο σενάριο (SC_II) θέτουμε $M=100$ και συνεπώς η ανισότητα $\gamma_{Infl,i}^f \leq f_i^{-1}(R_{Infl,i}^*/R_{Max,i}^*) \ \forall i=1,...,N$ ισχύει για όλους τους χρήστες. Σε αυτήν την περίπτωση, δεν υπάρχουν θεωρητικές δικλίδες που να διασφαλίζουν ότι η πραγματική

ρυθμαπόδοση των χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου είναι πάντα ανάμεσα στα επιτρεπτά και αποδεκτά όρια. Ως συνέπεια, υπάρχει πιθανότητα μη τήρησης των ΚΠΥ αυτών, παρόλη τη μεγιστοποίηση της ολικής συνάρτησης ευχαρίστησής τους που επιτυγχάνεται ανά χρονοσχιμή.

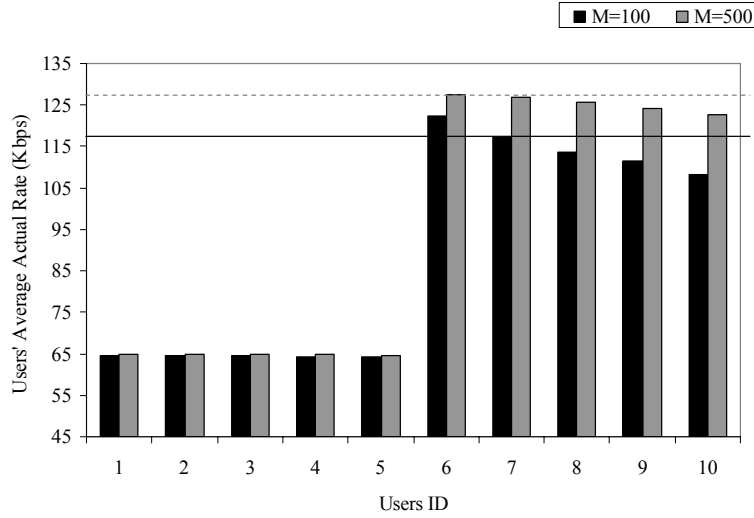
Τα Σχήματα 28, 29 και 30, παρουσιάζουν για κάθε χρήστη του συστήματος τη μέση συνάρτηση ευχαρίστησης που επιτυγχάνει, τη μέση κατανάλωση ισχύος του και τη μέση πραγματική ρυθμαπόδοσή του, υπό τα σενάρια SC_I (γκρίζες στήλες) και SC_II (μαύρες στήλες), αντίστοιχα. Αρχικά, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι καθώς η μέση ποιότητα του καναλιού των χρηστών μειώνεται (αυξανόμενα IDs χρηστών), τότε η συνολική μέση ευχαρίστησή τους μειώνεται και αυτή (Σχήμα 28), ενώ η κατανάλωση ισχύος τους αυξάνεται (Σχήμα 29).



Σχήμα 28. Μέση ολική (συνάρτηση) ευχαρίστησης χρηστών συναρτήσει του διακριτικού τους (ID).



Σχήμα 29. Μέση ισχύς μετάδοσης δεδομένων χρηστών συναρτήσει του διακριτικού τους (ID).



Σχήμα 30. Μέσος πραγματικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων χρηστών συναρτήσει του διακριτικού τους (ID).

Επιπλέον, επιβεβαιώνεται ο θεωρητικά αποδεδειγμένος ισχυρισμός μας ότι η κατάλληλη επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου μπορεί να διασφαλίσει την πλήρη ικανοποίηση των ΚΠΥ αυτού. Αναλυτικότερα, παρατηρούμε ότι όταν $M=500$, οι τιμές της πραγματικής ρυθμαπόδοσης κατά τη ζεύξη ανόδου όλων των χρηστών είναι εντός των προσδοκώμενων ορίων (δηλαδή $R_{Min,i}^* < E[R_i^*] < R_{Max,i}^* \quad \forall i \in S$ αφού $R_{Min,i}^* < R_i^* < R_{Max,i}^*$ σε κάθε χρονοσχισμή t). Αυτό συμβαίνει ακόμα και για τους χρήστες που ανήκουν στην κλάση 2. Επισημαίνουμε ότι στο Σχήμα 30 η μαύρη συμπαγής ($R_{Min,i}^*$) και η γκρίζα διακεκομμένη ($R_{T,i}^*$) γραμμή, οριοθετούν τα επιδιωκόμενα όρια πραγματικής ρυθμαπόδοσης. Αντίθετα, η παραπάνω παρατήρηση δεν ισχύει στην περίπτωση όπου $M=100$, επιβεβαιώνοντας έτσι και τα αποτελέσματα της Πρότασης 1.

Τέλος επισημαίνουμε τη σημαντική δυνατότητα που δίδεται στους χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου στο να ελέγχουν (αυτόνομα) την εξασφάλιση των ΚΠΥ τους, μέσω του ελέγχου του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που επιλέγεται για αυτούς. Συγκεκριμένα, έπειτα από τον αρχικό σχεδιασμό και προσδιορισμό της συνάρτησης ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης ενός χρήστη, σύμφωνα με τα ΚΠΥ αυτού κατά την είσοδό του στο σύστημα, το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησής του πρέπει να επιλέγεται έτσι, ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια της Πρότασης 1. Με αυτό το τρόπο διασφαλίζεται και η μεγιστοποίηση της ολικής ευχαρίστησής του, αλλά και η πλήρης διασφάλιση των ΚΠΥ αυτού.

8 Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων ενός ασύρματου CDMA δικτύου στοχεύοντας όχι μόνο στη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης/ρυθμαπόδοσης αυτού αλλά και στην αποτελεσματική διασφάλιση των ΚΠΥ διαφόρων υπηρεσιών δεδομένων και πολυμέσων. Έμφαση δίδεται στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου πολυμέσων υπό ευκαιριακές πολιτικές ΔΠΔ, των οποίων τα ΚΠΥ χαρακτηρίζονται από αυστηρούς βραχυπρόθεσμους περιορισμούς καθυστέρησης μετάδοσης δεδομένων και ρυθμαπόδοσης, επιδιώκοντας μέσω της μελέτης μας την κάλυψη του μέχρι τώρα κενού στη διεθνή βιβλιογραφία σε αυτή την ερευνητική περιοχή.

Οι παραπάνω επιδιώξεις, καθώς και η εκ φύσεως πολυπλοκότητα του συστήματος που μελετάται καθιστούν το όλο πρόβλημα δύσχρηστο και τη θεωρητική/αναλυτική του αντιμετώπιση μονόδρομο. Συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός κατάλληλης πολιτικής ΔΠΔ σε τέτοιου τύπου δίκτυα, δηλαδή του αλγορίθμου εκείνου που αποφασίζει το πόσοι και ποιοί χρήστες του δικτύου θα εξυπηρετηθούν κάθε χρονοσχισμή και τι ποσοστό των διαθέσιμων πόρων του θα καταλάβουν, αντιμετωπίζει πληθώρα προκλήσεων, τις κυριότερες εκ των οποίων αναφέρουμε επιγραμματικά:

- Οι ραγδαίες μεταβολές της ποιότητας των καναλιών των χρηστών στο σύστημα επιβάλλει τον εναρμονισμό (χρονικά) του τρόπου και κυρίως της συχνότητας (της τάξης του 1 msec) των αποφάσεων μιας ευκαιριακής πολιτικής ΔΠΔ με αυτές, με στόχο την εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου (multiuser diversity) ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του δικτύου. Στον αντίποδα, οι απαιτήσεις των χρηστών από το σύστημα χαρακτηρίζονται είτε από μακροπρόθεσμα (υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου) είτε από βραχυπρόθεσμα (υπηρεσίες πραγματικού χρόνου) κριτήρια δικαιοσύνης ή ΚΠΥ. Σε κάθε περίπτωση, η διασφάλιση αυτών, απαιτεί τη συσχέτιση των στιγμιαίων αποφάσεων ανάθεσης πόρων δικτύου από την ευκαιριακή πολιτική ΔΠΔ με τις μακροπρόθεσμες ή βραχυπρόθεσμες ιδιότητες απόδοσης των χρηστών, οι οποίες θα προκύψουν ως επακόλουθο των αποφάσεων και των επιλογών που πάρθηκαν ανά χρονοσχισμή.

Συνεπώς, απαιτείται η μελέτη των στοχαστικών ιδιοτήτων των προβλημάτων που εξετάζουμε.

- Λόγω της πολυπλεξίας διαίρεσης κώδικα που υιοθετείται και επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση των χρηστών στο σύστημα, ο ενδόκυψελικός θόρυβος που προκαλείται παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην απόδοση του συστήματος, για αυτό και ο χαρακτηρισμός τέτοιων συστημάτων ως «interference limited». Ένα από τα βασικά προβλήματα που προκύπτουν, η επίλυση του όποιου εμπίπτει στις αρμοδιότητες του ΔΠΔ, είναι το φαινόμενο «near-far» δηλαδή, η ανισότητα μεταξύ των πόρων που δύναται να λάβουν χρήστες κοντά στο σταθμό

βάσης και πιο απομακρυσμένοι χρήστες, λόγω των διαφορών στην ποιότητα του καναλιού τους.

Συνεπώς, απαιτείται η χρήση και εκμετάλλευση της πληροφορίας φυσικού στρώματος κατά το σχεδιασμό ενός ΔΠΔ (cross layering).

- Λόγω της πολυπλοκότητας του φυσικού στρώματος τέτοιων δικτύων, που οφείλεται α) σε σύνθετα σχήματα μετάδοσης και κωδικοποίησης, β) σε λάθη μετάδοσης, γ) σε φυσικούς περιορισμούς της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης είτε του σταθμού βάσης είτε των κινητών τερματικών και δ) στην επίδραση του θορύβου στο σύστημα, τα προβλήματα βελτιστοποίησης που προκύπτουν είναι συνήθως μη γραμμικά και κυρίως μη-κυρτά (non convex optimization problems).

Συνεπώς, απαιτείται η χρήση μη τετριμμένων μεθόδων επίλυσής τους.

Οι παραπάνω λόγοι έστρεψαν τα πρώτα βήματα της μελέτης μας στην εξέταση ομογενούς μοντέλου συστήματος, μια προσέγγιση που είναι απλοποιημένη μεν κατάλληλη δε για την εξαγωγή αναλυτικών αποτελεσμάτων και τη βαθύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας ενός ευκαιριακού αλγορίθμου ΔΠΔ.

Επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον μας στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου πολυμέσων, αξίζει να σημειωθεί ότι οι μέχρι πρόσφατα ερευνητικές προσπάθειες είχαν καταλήξει σε ευρηστικές τεχνικές διασφάλιση των ΚΠΥ τους, παραλλαγές αυτών που χρησιμοποιούνταν στο ενσύρματο περιβάλλον. Κυρίαρχες ήταν εκείνες οι πολιτικές που προσπαθούσαν να εξασφαλίσουν άνω φραγμένα πιθανοτικά κριτήρια καθυστέρησης στους χρήστες φωνής ή πολυμέσων. Δηλαδή, την πιθανοτική εξασφάλιση άνω φραγμάτων καθυστέρησης μετάδοσης ή λήψης δεδομένων.

Η απαρχή της ερευνητικής μας δραστηριότητας, στόχευσε αρχικά στην εξέλιξη των παραπάνω τεχνικών μέσω της εισαγωγής βραχυπρόθεσμων κριτηρίων δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών πραγματικού χρόνου, παράλληλα με τη διασφάλιση των βραχυπρόθεσμων πιθανοτικών κριτηρίων καθυστέρησης τους, οδηγώντας στην περαιτέρω τριβή μας με το ερευνητικό αντικείμενο αυτό. Έτσι, κυρίως μέσω παρατήρησης και πειραματισμών σε περιβάλλον προσομείωσης αλλά και απλουστευμένων αναλυτικών μεθόδων, καταλήξαμε στα εξής συμπεράσματα:

Συμπέρασμα 1. Η εξυπηρέτηση υπηρεσιών πολυμέσων υπό ευκαιριακές πολιτικές ΔΠΔ απαιτεί τη διαρκή παρατήρηση της βραχυπρόθεσμης απόδοσής τους, ώστε να διασφαλίζεται η άμεση επέμβαση και διορθωτική παρέμβαση του ΔΠΔ σε περιπτώσεις μη τήρησης των ΚΠΥ τους.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, η μυωπική παρατήρηση της τελευταίας εξυπηρέτησης του χρήστη πραγματικού χρόνου, είτε ως προς τους πόρους που έλαβε τότε είτε ως προς την καθυστέρηση επανεξυπηρέτησής του, κρίνεται πολλές φορές ακατάλληλη, καθώς παρέχει ελλιπή,

ακόμα και ακατάλληλη μερικές φορές πληροφορία για τη βραχυπρόθεσμη ποιότητα της υπηρεσίας του. Συνεπώς, απαιτείται μια πιο αποτελεσματική σχεδιαστική επιλογή.

Συμπέρασμα 2. Προτείνεται η χρήση βραχυπρόθεσμων, κυλιόμενων και επικαλυπτόμενων χρονικών παραθύρων παρατήρησης εντός των οποίων παρατηρούνται και προσμετρούνται οι πόροι που έλαβε ο εκάστοτε χρήστης υπηρεσίας πραγματικού χρόνου. Επιπλέον, με βάση τη διασπορά, την ποσότητα και την καταλληλότητα των πόρων που προσμετρήθηκαν, αναφορικά με την επίτευξη των αναγκών ΚΠΥ του χρήστη, η πολιτική ΔΠΔ δύναται να καθορίζει και να επηρεάζει αποτελεσματικά την προτεραιότητα εξυπηρέτησής του έναντι των υπολοίπων.

Συμπέρασμα 3. Ο σχεδιασμός βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας για χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να οδηγεί στη διασφάλιση των επιθυμητών ή πολλές φορές απαιτούμενων μακροπρόθεσμων κριτηρίων.

Παράλληλα όμως, κοιτώντας σε βάθος τον τρόπο εξυπηρέτησης χρηστών πραγματικού χρόνου υπό ευκαιριακές πολιτικές ΔΠΔ οι οποίες επιδίωκαν την ικανοποίηση μόνο των βραχυπρόθεσμων κριτηρίων καθυστέρησής τους, καταλήξαμε στα εξής συμπεράσματα, τα οποία και επηρέασαν καθοριστικά τη ροή της όλης ερευνητικής μας πορείας.

Συμπέρασμα 4. Η συνολική μέση ρυθμαπόδοση του χρήστη δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες του συστήματος (λόγω του ευκαιριακού χαρακτήρα της πολιτικής) και συνεπώς, η διασφάλιση συγκεκριμένης απαιτούμενης μέσης ρυθμαπόδοσης (δηλαδή σταθερός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων) για χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου δεν είναι ελέγξιμη και πολλές φορές μη εφικτή.

Συμπέρασμα 5. Ακόμα και αν τηρούνται πλήρως τα βραχυπρόθεσμα χρονικά κριτήρια καθυστέρησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, η ποσότητα των δεδομένων που λαμβάνει εντός σύντομων χρονικών παραθύρων δεν λαμβάνεται υπόψη, με αποτέλεσμα πολλές φορές να είναι κατά πολύ μικρότερη της απαιτούμενης. Με τον όρο απαιτούμενη ποσότητα δεδομένων, καλούμε εκείνη της οποίας ο επιθυξίμος ρυθμός μετάδοσης, είναι ίσος ή μεγαλύτερος από την απαιτούμενη σταθερή ρυθμαπόδοση της εκάστοτε υπηρεσίας πραγματικού χρόνου. Η αιτιολόγηση του παραπάνω φαινομένου βασίζεται στο ότι ο εξαναγκασμός του χρήστη να εξυπηρετηθεί σε κάποια χρονική στιγμή προς χάρη διασφάλισης του πιθανοτικού κριτηρίου καθυστέρησης του, μπορεί να συμπέσει με την κακή στιγμιαία ποιότητα του καναλιού του εκείνη τη χρονική στιγμή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα δεδομένα που θα λάβει ο χρήστης να είναι ελάχιστα. Αν κάτι τέτοιο επαναλαμβάνεται διαρκώς εντός μεγάλων χρονικών διαστημάτων, τότε μπορεί τα ΚΠΥ του χρήστη ως προς την καθυστέρηση μετάδοσης ή λήψης δεδομένων να ικανοποιούνται, αλλά η στιγμιαία και η μέση ρυθμαπόδοσή του παραμένουν μικρές σε σχέση με την προσδοκώμενες τιμές τους.

Η εξέλιξη αυτή, μας οδήγησε στην αμφισβήτηση της αποτελεσματικότητας και της καταλληλότητας των ίδιων των πιθανοτικών κριτηρίων καθυστέρησης, ως μοναδικών κριτηρίων διασφάλισης της ποιότητας της υπηρεσίας χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου υπό ευκαιριακούς αλγόριθμους ΔΠΔ. Παράλληλα, η επιβεβαίωση του παραπάνω ισχυρισμού έγινε μέσω της ανάπτυξης ενός θεωρητικού μαθηματικού μοντέλου το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, και μέσω αυτού δύναται ο αναλυτικός υπολογισμός των βραχυπρόθεσμων ιδιοτήτων απόδοσης υπηρεσιών πραγματικού χρόνου. Ως εκ τούτου, προτάθηκαν νέα κριτήρια διασφάλισης και έκφρασης των ΚΠΥ χρηστών πραγματικού χρόνου, τα πιθανοτικά βραχυπρόθεσμα κριτήρια ρυθμαπόδοσης.

Συμπέρασμα 6. Η διασφάλιση των βραχυπρόθεσμων πιθανοτικών κριτηρίων ρυθμαπόδοσης οδηγεί και στην τήρηση πιθανοτικών κριτηρίων καθυστέρησης και στην εξασφάλιση ενός σταθερού (και στιγμιαίου αλλά και μέσου) ρυθμού μετάδοσης δεδομένων για χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

Τη θεωρητική τεκμηρίωση του παραπάνω ισχυρισμού, ακολούθησε ο σχεδιασμός μιας νέας ευκαιριακής πολιτικής ΔΠΔ η οποία είχε ως στόχο όχι μόνο τη διασφάλιση των νέο-εισαχθέντων κριτηρίων για χρήστες πραγματικού χρόνου αλλά και την ικανοποίηση των ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου. Μια από τις σχεδιαστικές καινοτομίες της προτεινόμενης πολιτικής βασίζεται στο εξής συμπέρασμα.

Συμπέρασμα 7. Η αποτελεσματική διασφάλιση των βραχυπρόθεσμων ΚΥΠ χρηστών πραγματικού χρόνου και ταυτόχρονα των μακροπρόθεσμων ΚΥΠ χρηστών μη πραγματικού χρόνου απαιτεί τη σχεδίαση της ευκαιριακής πολιτικής ΔΠΔ του δικτύου με τέτοιο τρόπο, ώστε να διαχωρίζεται πλήρως ο τρόπος που αυτή ενεργεί για την επίτευξη των παραπάνω χρονικά ασυσχέτιστων απαιτήσεων. Συγκεκριμένα, χρειάζεται η ταυτόχρονη ύπαρξη μηχανισμών και μακροπρόθεσμης (βάρη χρηστών) αλλά και βραχυπρόθεσμης (κυλιόμενα παράθυρα παρατήρησης ποιότητας υπηρεσίας χρηστών) αντίδρασης σε ένα ΔΠΔ.

Εν συνεχεία, γενικεύοντας τη μελέτη μας μέσω της διεύρυνσης του προς εξέταση μοντέλου συστήματος από ομογενές σε ετερογενές, και βασισμένοι στα προηγούμενα συμπεράσματα, πραγματευθήκαμε το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής των πόρων ετερογενούς CDMA συστήματος στους χρήστες αυτού κατά τη ζεύξη καθόδου, όταν εξυπηρετούνται ταυτόχρονα χρήστες μη πραγματικού και πραγματικού χρόνου. Κύριο στόχο αποτέλεσε η εύρεση εκείνων των διανυσμάτων ισχύος μετάδοσης και ρυθμού μετάδοσης δεδομένων των χρηστών του συστήματος ώστε να επιτύχουμε τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσής του ταυτόχρονα με τη διασφάλιση των ΚΠΥ των χρηστών αυτών. Συγκεκριμένα, επιδιώχθηκε η μεγιστοποίηση της συνολικής πραγματικής ρυθμαπόδοσης των χρηστών με υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου και η διασφάλιση

των αυστηρών πιθανοτικών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων ρυθμαπόδοσης χρηστών πραγματικού χρόνου. Θεωρητική πλατφόρμα για τη μοντελοποίηση, αντιμετώπιση και επίλυση του παραπάνω προβλήματος, αποτέλεσε η θεωρία μεγιστοποίησης απόδοσης δικτύων μέσω συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών (Network Utility Maximization, NUM Theory). Η συνάρτηση ευχαρίστησης ενός χρήστη αντικατοπτρίζει την ευχαρίστησή του σε σχέση την απόδοση της υπηρεσίας του και την επίτευξη των ΚΠΥ αυτής, βάσει των πόρων του δικτύου που λαμβάνει.

Συμπέρασμα 8. Ο σχεδιασμός και η ανάλυση ενός ευκαιριακού ΔΠΔ μέσω ενός θεωρητικού πλαισίου συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών δίδει την επιθυμητή ευελιξία της από κοινού θεώρησης και αντιμετώπισης χρηστών με διαφορετικού τύπου υπηρεσίες (δηλαδή με διαφορετικά και πολλές φορές αντικρουόμενα ΚΥΠ), υπό την αιγίδα ενός κοινού προβλήματος βελτιστοποίησης πόρων δικτύου.

Ένα από τα κυριότερα προβλήματα που κληθήκαμε να αντιμετωπίσουμε ήταν η ορθή έκφραση των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ χρηστών πραγματικού χρόνου στο προκύπτον πρόβλημα βελτιστοποίησης των πόρων του δικτύου. Συγκεκριμένα, η ύπαρξη ενός πιθανοτικού κριτηρίου στο πρόβλημα βελτιστοποίησης είχε ως αποτέλεσμα την εμπλοκή χρονικά εξαρτώμενων μεγεθών στην ανά χρονοσχισμή επίλυσή του, δηλαδή στην ανά χρονοσχισμή εύρεση των βέλτιστων τιμών των πόρων του συστήματος. Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, αναθεωρήσαμε τον τρόπο ορισμού των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών και κατ' επέκταση του τρόπου με τον οποίον αυτές αντικατοπτρίζουν την ευχαρίστηση του κάθε χρήστη. Αναλυτικότερα, για χρήστες με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, θεωρήσαμε την ύπαρξη δυναμικά προσαρμοζόμενων συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών, που η συνεχής αλλαγή και προσαρμογή του ρόλου και των ιδιοτήτων τους γίνεται με βάση τη διασφάλιση ή μη των βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ τους. Με τη σειρά της, μια τέτοια επιλογή μας επιτρέπει τη δυναμική επιρροή και αλλαγή των προτεραιοτήτων εξυπηρέτησης ανά χρονοσχισμή των χρηστών αυτών.

Η παραπάνω επιλογή αποτέλεσε καινοτομία στον τομέα της βέλτιστης κατανομής πόρων δικτύου μέσω της θεωρίας μεγιστοποίησης ευχαρίστησης δικτύου (network utility maximization – NUM theory), αφού το σύνολο των μέχρι τότε ερευνητικών προσπαθειών στο τομέα αυτό υιοθετούσε μόνο στατικές συναρτήσεις ευχαρίστησης χρηστών, οδηγώντας στην εξαγωγή του παραπάνω σχεδιαστικού συμπεράσματος.

Συμπέρασμα 9. Η αποτελεσματική απεικόνιση βραχυπρόθεσμων ΚΠΥ σε ένα ευκαιριακό ΔΠΔ και στο αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης της κατανομής των πόρων του δικτύου, μπορεί να γίνει μέσω της χρήσης δυναμικά μεταβαλλόμενων συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών η προσαρμογή των οποίων βασίζεται στη βραχυπρόθεσμη ποιότητα της υπηρεσίας τους.

Πρέπει επίσης να επισημάνουμε ότι το προτεινόμενο πλαίσιο δυναμικής μεταβολής συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών μπορεί να χρησιμοποιηθεί γενικότερα για την απεικόνιση δυναμικά (χρονικά) μεταβαλλόμενων απαιτήσεων χρηστών σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Η ερευνητική μας προσπάθεια είχε ως αποτέλεσμα την πρόταση κατάλληλου κατανεμημένου ευκαιριακού αλγορίθμου ΔΠΔ για την εύρεση της βέλτιστης λύσης του προς εξέταση προβλήματος, του οποίου η αποτελεσματικότητά διαπιστώθηκε μέσω της συγκριτικής μελέτης αυτού με υπάρχοντες αλγορίθμους της διεθνούς βιβλιογραφίας, υπό περιβάλλον προσομοίωσης.

Τέλος, μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής των πόρων ετερογενούς CDMA συστήματος στους χρήστες αυτού κατά τη ζεύξη ανόδου, δίδοντας έμφαση στη διασφάλιση και ικανοποίηση των ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Συγκεκριμένα, θέσαμε ως στόχο την εύρεση εκείνου του διανύσματος ισχύος μετάδοσης των χρηστών ώστε να επιτύχουμε τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσής τους ταυτόχρονα με τη διασφάλιση των ΚΠΥ τους. Το πρόβλημα μοντελοποιήθηκε και αναλύθηκε ως ένα μη-συνεταιριστικό παίγνιο μη κυρτών συναρτήσεων κατά το οποίο κάθε χρήστης/παίκτης επιλέγει κατάλληλη ισχύ μετάδοσης δεδομένων από το πεδίο στρατηγικών του ώστε να επιτύχει τη μεγιστοποίηση της ολικής ευχαρίστησής του, βάσει της θεωρίας παιγνίων. Συγκεκριμένα, προτάθηκε ένα νέο καινοτόμο γενικευμένο πλαίσιο συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών, μέσω του οποίου μπορεί να μοντελοποιηθεί το πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης πόρων CDMA συστήματος ζεύξης ανόδου κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιδιώκεται α) η μεγιστοποίηση της συνολικής πραγματικής ρυθμαπόδοσής των χρηστών αυτού σε σχέση με την αντίστοιχη ισχύ που καταναλώνουν για την επίτευξή της και β) η ταυτόχρονη ικανοποίηση των ΚΠΥ χρηστών διαφόρων υπηρεσιών, με έμφαση στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Η συνολική μελέτη, μας οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα.

Συμπέρασμα 10. Η χρήση πιθανοτικών βραχυπρόθεσμων κριτηρίων καθυστέρησης ή ρυθμαπόδοσης κατά τη ζεύξη ανόδου δεν είναι επαρκής, καθώς η διασφάλισή τους κρίνεται αβέβαιη λόγω των περιορισμών ισχύος μετάδοσης του κάθε χρήστη (συγκριτικά πολύ μικρότερη σε σχέση με τη μέγιστη ισχύ εκπομπής του σταθμού βάσης). Για το λόγο αυτό πρέπει να απαιτείται η ικανοποίηση των ΚΠΥ χρηστών πραγματικού αλλά και μη πραγματικού χρόνου ανά χρονοσχισμή, μέσω της χρήσης κατάλληλων συναρτήσεων ευχαρίστησης για τους χρήστες σε σχέση με τους πόρους που λαμβάνουν ανά χρονοσχισμή.

Με στόχο την επίλυση του προτεινόμενου παιγνίου καταπιαστήκαμε με τη μελέτη της ύπαρξης και της μοναδικότητας του σημείου ισορροπίας κατά Nash αυτού, εν συνεχεία με τον αναλυτικό προσδιορισμό του και τέλος με το σχεδιασμό ενός κατανεμημένου αλγορίθμου εύρεσής του. Παράλληλα, μελετώντας τις ιδιότητες του σημείου ισορροπίας κατά Nash του προς εξέταση παιγνίου προσδιορίσαμε κατάλληλα κριτήρια αποδοχής κλήσεων χρηστών. Ειδικότερα, διερευνήθηκαν οι ιδιότητες του σημείου ισορροπίας κατά Nash του προτεινόμενου παιγνίου

ελέγχους ισχύος χρηστών κατά τη ζεύξη ανόδου ενός CDMA δικτύου σε σχέση με α) την κατανάλωση ισχύος των χρηστών στο σημείο αυτό, β) το ρόλο των φυσικών περιορισμών ισχύος μετάδοσης των κινητών τερματικών τους και γ) την επίδραση των παραπάνω στην πραγματική ρυθμαπόδοσή τους, στη διασφάλιση των ΚΠΥ τους αλλά και τη συνολική απόδοση του δικτύου, καταλήγοντας στο εξής συμπέρασμα.

Συμπέρασμα 11. Δίδοντας στο ΔΠΔ του συστήματος τη δυνατότητα (ή αντίστοιχα στους χρήστες την αυτονομία) να ελέγχει και να καθορίζει το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων από τον εκάστοτε χρήστη, καθώς και την αντίστοιχη στάθμη της ισχύος μετάδοσης αυτού, μπορεί να διασφαλιστεί η πλήρης ικανοποίηση των ΚΠΥ χρηστών με υπηρεσίες πολυμέσων πραγματικού χρόνου στο σύστημα.

Βάσει του παραπάνω συμπεράσματος και οδεύοντας προς την ολοκλήρωση της παρούσας ενότητας είναι σημαντικό να επισημάνουμε το εξής. Στις περισσότερες μελέτες προβλημάτων βέλτιστης κατανομής πόρων ασύρματων (CDMA ή και μη) δικτύων της διεθνούς βιβλιογραφίας, γίνεται η υπόθεση ότι οι πόροι του συστήματος είναι τέτοιοι, ώστε να επιτυγχάνονται τα ΚΥΠ των υπηρεσιών των χρηστών μακροπρόθεσμα. Με απλά λόγια, υπάρχει πάντα τουλάχιστον ένα διάλυμα κατανομής πόρων δικτύου, το οποίο να μπορεί να διασφαλίσει τους στόχους του προβλήματος που τέθηκαν, αρκεί αυτό να προσδιοριστεί και να βρεθεί κατάλληλη πολιτική ΔΠΔ που να οδηγεί σε αυτό. Ως εκ τούτου, το πρόβλημα της εύρεσης κριτηρίων αποδοχής κλήσεων/χρηστών αποδεσμεύεται από το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων δικτύου.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή δεν υιοθέτησε την παραπάνω τακτική. Συγκεκριμένα, μέσω της επίλυσης των προβλημάτων βελτιστοποίησης που ανέκυπταν (είτε αναλυτικά, είτε στα πλαίσια θεωρίας παιγνίων) και ειδικότερα της διερεύνησης των στοχαστικών ιδιοτήτων αυτών, εξήχθησαν κατάλληλα κριτήρια αποδοχής κλήσεων χρηστών τα οποία λάμβαναν υπόψη τους τα ΚΠΥ των υπηρεσιών τους. Αναλυτικότερα, στην προσπάθειά μας να προσδιορίσουμε αναλυτικά της μακροπρόθεσμες ιδιότητες του συστήματος υπό τις πολιτικές που προτάθηκαν, καταλήξαμε στη διατύπωση τέτοιων κριτηρίων, των οποίων η τήρηση να διασφαλίζει την επίτευξη ή μη των ΚΠΥ των χρηστών στο σύστημα. Έτσι, τα κριτήρια αυτά, μαζί με άλλα που καθορίζουν τη συνδεσιμότητα του χρήστη, μπορούν να αποτελέσουν ολοκληρωμένους παράγοντες καθορισμού της αποδοχής ή όχι ενός χρήστη στο σύστημα, δεδομένων των συνθηκών αυτού αλλά και των ΚΠΥ του χρήστη.

8.1 Μελλοντική Έρευνα

Ολοκληρώνοντας την μελέτη μας, η παρούσα υποενότητα αναδεικνύει και προτείνει πιθανή μελλοντική ερευνητική θεματολογία η οποία αποτελεί τη λογική συνέχεια της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Εκτός από την καταγραφή των υπό εξέταση ερευνητικών θεματικών περιοχών, επισημαίνεται η κρισιμότητά και η επικαιρότητά τους και προτείνεται μεθοδολογία αρχικής αντιμετώπισής τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι, μέρος των ερευνητικών αντικειμένων που θα παρουσιαστούν αφορά τρέχουσες ερευνητικές προσπάθειες οι οποίες βασίστηκαν, υιοθέτησαν ή εξέλιξαν τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης.

❖ *Βέλτιστη Κατανομή Ισχύος και Ρυθμού Μετάδοσης Δεδομένων Χρηστών κατά τη Ζεύξη Ανόδου CDMA Κυβελωτών Δικτύων.*

Ο τρόπος με τον οποίον αντιμετωπίσαμε το πρόβλημα της αποτελεσματικής εξυπηρέτησης χρηστών με υπηρεσίες πραγματικού και μη πραγματικού χρόνου κατά τη ζεύξη ανόδου ενός CDMA δικτύου στηρίχθηκε στον έλεγχο της ισχύος των χρηστών του συστήματος ανά χρονοσχισμή (uplink power control). Με απλά λόγια, προσδιορίσαμε εκείνο το διάνυσμα ισχύος των χρηστών στο σύστημα το οποίο οδηγεί αυτούς στη μεγιστοποίηση της συνολικής τους ευχαρίστησης και παράλληλα στη διασφάλιση των ΚΠΥ τους. Μια εκ των βασικών υποθέσεων που έγιναν ήταν ότι οι χρήστες εκπέμπουν δεδομένα με σταθερούς, κατάλληλα προσδιορισμένους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Συνεπώς, η τελική πραγματική ρυθμαπόδοση ενός χρήστη ανά χρονοσχισμή επηρεάζεται από το λόγο ενέργειας ψηφίου προς παρεμβολές που επιτυγχάνεται στο σταθμό βάσης και κατ' επέκταση, από την ισχύ μετάδοσης δεδομένων αυτού αλλά και των υπολοίπων χρηστών στο σύστημα λόγω παρεμβολών.

Διευρύνοντας την προηγούμενη προσέγγιση, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο προσδιορισμός όχι μόνο της ισχύος μετάδοσης των χρηστών, για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, αλλά και του ρυθμού μετάδοσης αυτών (όπως μελετήσαμε κατά τη ζεύξη καθόδου). Μια τέτοια εναλλακτική, πιθανώς να οδηγήσει στην εύρεση τέτοιου σημείου ισορροπίας κατά Nash του συστήματος κατά το οποίο η συνολική τιμή της ευχαρίστησης των χρηστών να είναι μεγαλύτερη εκείνης που επιτυγχάνεται μέσω του ελέγχου μόνο της ισχύος μετάδοσης των χρηστών. Η αιτιολόγηση του παραπάνω ισχυρισμού βασίζεται στο γεγονός ότι πλέον το σύστημα και κυρίως οι χρήστες θα έχουν δύο βαθμούς ελευθερίας αποφάσεων και άρα, διευρυμένο σύνολο στρατηγικών.

❖ *Βέλτιστη Κατανομή Πόρων υπό Ετερογενές Περιβάλλον Ασύρματων Δικτύων.*

Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά του σύγχρονου ασύρματου δικτυακού περιβάλλοντος αποτελεί η ετερογένειά του. Με τον όρο ετερογένεια αναφερόμαστε στη γεωγραφική συνύπαρξη

διαφόρων τύπων ασύρματων δικτύων, όπως κυψελωτά δίκτυα (CDMA (3GPPG2), OFDMA, SC-FDMA (3GPP)), WLANs (WiFi, WiMAX), αυτοοργανούμενα δίκτυα (ad-hoc) κ.α. Κάθε ένα από τα παραπάνω είδη δικτύων πρόσβασης χαρακτηρίζεται από διαφορετικούς μηχανισμούς κατανομής των εναέριων πόρων στους χρήστες αυτού και από διαφορετικούς μηχανισμούς διασφάλισης των ΚΥΠ τους. Λόγω της παραπάνω ιδιομορφίας, κύριο μέλημα της ερευνητικής κοινότητας τα τελευταία χρόνια αποτελεί η εύρεση κατάλληλων μηχανισμών και αρχιτεκτονικών μέσω των οποίων μπορεί να επιτευχθεί η συνεργασία των παραπάνω δικτύων με στόχο την από κοινού εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων που κάθε μια τεχνολογία προσφέρει. Με απλά λόγια, είναι σημαντική η εύρεση κατάλληλων μηχανισμών, οι οποίοι θα δίδουν τη δυνατότητα σε κάθε χρήστη που περιηγείται σε ένα ετερογενές περιβάλλον ασύρματων δικτύων, να μεταβαίνει από κυψέλη σε κυψέλη και από τεχνολογία σε τεχνολογία, ανάλογα με τις απαιτήσεις της υπηρεσίας τους (με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσής της) αλλά και του ίδιου του δικτύου (με στόχο την μεγιστοποίησης της απόδοσής του).

Πρώτο βήμα προς την κατεύθυνση της «ενοποίησης των ασύρματων δικτύων», όπως συνήθως καλείται ο παραπάνω στόχος, είναι η ενοποίησή τους σε επίπεδο IP, δηλαδή η δυνατότητα των χρηστών να περιάγονται σε οποιοδήποτε διαθέσιμο δίκτυο μεταβάλλοντας και διατηρώντας δυναμικά την IP συνδεσιμότητά τους (IP connectivity). Στο μεγαλύτερο μέρος του ο παραπάνω στόχος έχει ήδη επιτευχθεί. Το επόμενο βήμα είναι η ενοποίησή τους στο επίπεδο της από κοινού διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων τους, με στόχο τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου αλλά και των χρηστών σε αυτό. Μέχρι στιγμής, οι ερευνητικές προσπάθειες στον τομέα αυτόν παραμένουν κατά κύριο λόγο στο επίπεδο ευριστικών αλγορίθμων οι οποίοι διευθετούν ζητήματα αποτελεσματικής διαπομπής των χρηστών εντός του ενοποιημένου δικτύου (vertical handoff, horizontal handover). Αυτό που λείπει, είναι μια ενιαία μαθηματική πλατφόρμα μέσω της οποίας να μπορούν να μοντελοποιηθούν, να αναλυθούν και να επιλυθούν προβλήματα βέλτιστης κατανομής των πόρων ενός ετερογενούς περιβάλλοντος ασύρματων δικτύων όταν σε αυτό συνυπάρχουν παράλληλα χρήστες με πολλαπλά είδη υπηρεσιών.

Η θεωρία μεγιστοποίησης απόδοσης δικτύων μέσω συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών (Network Utility Optimization, NUM theory) μπορεί να προσφέρει ένα τέτοιο γενικευμένο θεωρητικό πλαίσιο. Από τη μία μεριά, μέσω των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών, μπορούμε να θέσουμε υπό τα πλαίσια ενός κοινού προβλήματος βελτιστοποίησης χρήστες με διάφορα και πολλές φορές αντικρουόμενα ΚΠΥ, όπως αποκαλύφθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Από την άλλη, μέσω των ορισμάτων των συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών, δηλαδή των μεταβλητών συναρτήσεων των οποίων ορίζονται οι συναρτήσεις ευχαρίστησης, μπορούμε να θέσουμε υπό τα πλαίσια ενός κοινού προβλήματος βελτιστοποίησης διαφορετικούς τύπους πόρων δικτύου (ανάλογα με του πόρους που αναθέτει στους χρήστες αυτού ο κάθε τύπος δικτύου). Έτσι, μέσω του προτεινόμενου ενιαίου πλαισίου συναρτήσεων ευχαρίστησης των χρηστών μπορούμε να

μελετήσουμε την αποτελεσματική ενοποίηση ετερογενών δικτύων σε επίπεδο βέλτιστης από κοινού κατανομής των πόρων τους. Ως ενδεικτικό παράδειγμα επέκτασης της μελέτης της παρούσας διδακτορικής διατριβής στο παραπάνω ερευνητικό τομέα αναφέρουμε τις μελέτες [111], [112], [113] οι οποίες ασχολούνται με την ενοποίηση CDMA κυψελωτών δικτύων και WLANs.

❖ *Σχεδίαση Αυτόνομων Ασύρματων Δικτύων.*

Παρατηρώντας τους κατανεμημένους αλγορίθμους βέλτιστης κατανομής πόρων δικτύου που προτάθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής (είτε για τη ζεύξη καθόδου είτε για τη ζεύξη ανόδου), αναδεικνύεται η δυνατότητα σχεδίασης αυτόνομων ασύρματων κόμβων. Με τον όρο αυτονομία κόμβων, εννοούμε τη δυνατότητά τους να παρατηρούν συνεχώς το περιβάλλον και την ποιότητας της υπηρεσίας τους και στη συνέχεια να παίρνουν αποφάσεις τέτοιες ώστε να βελτιώνεται η συνολική τους απόδοση. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα των χρηστών πραγματικού χρόνου κατά τη ζεύξη καθόδου στους οποίους μέσω της δυνατότητας που τους δίδεται να μεταβάλλουν δυναμικά τις συναρτήσεις ευχαρίστησής τους, σε σχέση με τη βραχυπρόθεσμη ποιότητα της υπηρεσίας τους, αποκτούν τη δυνατότητα να βελτιώνουν αυτόνομα τη συνολική ποιότητα της υπηρεσίας τους και να διασφαλίζουν επιτυχώς τα ΚΠΥ αυτής.

Επεκτείνοντας και γενικεύοντας τη μεθοδολογία σχεδίασης των προτεινόμενων αλγορίθμων, προκύπτει μια γενικευμένη μεθοδολογία σχεδιασμού αυτόνομων ασύρματων δικτύων βασισμένη σε θεωρητικά πλαίσια. Συγκεκριμένα, ξεκινώντας από τη μοντελοποίηση ενός κατάλληλου προβλήματος βέλτιστης κατανομής πόρων δικτύου μέσω συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών μπορούμε να καταλήξουμε στο σχεδιασμό αυτόνομων αρχιτεκτονικών δικτύων, ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

- α) Μοντελοποίηση του κατάλληλου προβλήματος βέλτιστης κατανομής πόρων δικτύου μέσω συναρτήσεων ευχαρίστησης χρηστών.
- β) Επίλυσή του μέσω αναλυτικών μεθόδων διάσπασης (decomposition methods).
- γ) Εύρεση των κατανεμημένων αλγορίθμων που οδηγούν στον προσδιορισμό της παραπάνω βέλτιστης λύσης (αλγόριθμοι που απαιτούν την εμπλοκή των χρηστών στην όλη διαδικασία βελτιστοποίησης).
- δ) Σχεδιασμός της προκύπτουσας τμηματοποιημένης/κατανεμημένης (modularized/distributed) αρχιτεκτονικής δικτύου, αφού μέσω των παραπάνω κατανεμημένων αλγορίθμων γνωρίσουμε επακριβώς το ποιος (network component) πρέπει να κάνει τι (decision making) στο δίκτυο και το πώς να τους διασύνδεουμε («who does what in the network and how to connect them»).

ε) Αναγνώριση των αυτόνομων συμπεριφορών των κόμβων του δικτύου, μέσω της παραπάνω κατανεμημένης αρχιτεκτονικής δικτύου, και σχεδιασμός των βρόγχων ελέγχου (control loops) που τις υλοποιούν.

Μέσω της παραπάνω μεθοδολογίας που προτείνουμε και προέκυψε από την έρευνα στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, επιτρέπεται ο σχεδιασμός αυτόνομων αρχιτεκτονικών δικτύων που είναι βασισμένος σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Αρχικές ερευνητικές προσπάθειες που υιοθετούν και προσπαθούν να εξελίξουν την παραπάνω προσέγγιση μπορούν να βρεθούν στα [112], [115], [116].

❖ *Βέλτιστη Κατανομή Πόρων Ασύρματου Κεφαλωτού CDMA Δικτύου με Ετεροκυψελικές Παρεμβολές.*

Μια από τις βασικότερες υποθέσεις που κάναμε κατά την ανάλυση του μοντέλου του συστήματος που εξετάστηκε, είτε στην περίπτωση ομογενούς είτε στην περίπτωση ετερογενούς μοντέλου, είναι η θεώρηση ότι η τιμή των ετεροκυψελικών παρεμβολών στο σύστημα είναι πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερη αυτής των ενδοκυψελικών παρεμβολών. Είναι λογικό ότι η παραπάνω θεώρηση επηρέασε σε μεγάλο βαθμό την μορφή των προβλημάτων βελτιστοποίησης που κληθήκαμε να επιλύσουμε αφού, ο συνολικός θόρυβος του συστήματος οφείλεται μόνο στις μεταδόσεις των χρηστών ανά κυψέλη και στο λευκό θόρυβο. Συνεπώς, μας επιτρέπεται η απομόνωση και η μελέτη ευκαιριακών αλγορίθμων ΔΠΔ ανά κυψέλη.

Η παραπάνω θεώρηση, αν και πολλές φορές είναι ρεαλιστική, απαιτεί γενίκευση, καθώς η επίδραση των ετεροκυψελικών παρεμβολών στο σύστημα μπορεί πολλές φορές να επηρεάζει τη συνολική απόδοση αυτού. Η παραπάνω γενίκευση αποτελεί ακόμα και σήμερα ανοιχτό ερευνητικό αντικείμενο στην περίπτωση ετερογενούς μοντέλου συστήματος.

❖ *Κατανομή Πόρων μέσω Ευκαιριακών Αλγορίθμων σε CDMA Αυτοργανούμενα Δίκτυα.*

Ολοκληρώνοντας την παρούσα ενότητα, θα αναφερθούμε στον τρόπο με τον οποίο μπορούν τα αποτελέσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής να εφαρμοστούν και να υιοθετηθούν από ένα διαφορετικού τύπου δίκτυο σε σχέση με τα κυψελωτά, τα αυτοργανούμενα (ad-hoc) CDMA δίκτυα. Ένα CDMA αυτοργανούμενο δίκτυο υιοθετεί και στηρίζεται σε όλες τις αρχές λειτουργίας αυτοργανούμενων δικτύων με τη μόνη διαφοροποίηση ότι η από κόμβο σε κόμβο επικοινωνία γίνεται μέσω πολυπλεξίας διαίρεσης κώδικα.

Η παραπάνω ιδιομορφία επιτρέπει το “πάντρεμα” των πλεονεκτημάτων και της ευελιξίας των ευκαιριακών πολιτικών ΔΠΔ που αναπτύσσονται στα κυψελωτά CDMA δίκτυα, με τους

κατανεμημένους αλγορίθμους κατανομής πόρων δρομολόγησης και ελέγχου τοπολογίας CDMA αυτοργανούμενων δικτύων. Το εύρος των προτερημάτων που προκύπτουν από τον παραπάνω προτεινόμενο συνδυασμό είναι μεγάλο και αφορά στη μεγιστοποίηση της συνολική απόδοσης/ρυθμαπόδοσης του δικτύου έως τη διασφάλιση από άκρο σε άκρο των ΚΠΥ ροών δεδομένων χρηστών; και από την εύρεση της βέλτιστης τοπολογίας δικτύου ως προς την συνολική ισχύ που καταναλώνεται από τους κόμβους αυτού έως τη βελτιστοποίηση της διαδρομής των ροών στο δίκτυο. Καθώς η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται το πρόβλημα της εξυπηρέτησης ροών πολυμέσων υπό ευκαιριακούς ΔΠΔ, οι αλγόριθμοι, οι μαθηματικές τεχνικές και οι σχεδιαστικές επιλογές που προτείνει μπορούν να υιοθετηθούν και να προσαρμοστούν στην περίπτωση CDMA αυτοργανούμενων δικτύων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων προσπαθειών βρίσκεται στις μελέτες [116] και [117].

9 Παραρτήματα

Παράρτημα Ι – Απόδειξη Θεωρήματος 1

Έστω ότι η μεταβλητή $S'_i(t, W_i)$ εκφράζει τον αριθμό των χρονοσχισμών κατά τις οποίες ο χρήστης i δεν έλαβε πόρους του συστήματος κατά τη διάρκεια οιοδήποτε χρονικού παραθύρου παρατήρησης W_i χρονοσχισμών (δηλαδή, από την χρονοσχισμή $(t-W_i+1)$ έως τη t). Τότε, ισχύει ότι $S'_i(t, W_i) = W_i - S_i(t, W_i)$, και αφού $\Pr(S_i(t, W_i) < \phi_i W_i) \leq q_i$, μπορούμε εύκολα να καταλήξουμε στην ακόλουθη σχέση:

$$\Pr(S'_i(t, W_i) > W_i - \phi_i W_i) \leq q_i \quad (\text{I.1})$$

Επιπροσθέτως, η καθυστέρηση d_i ενός χρήστη i εντός κάθε κυλιόμενου παραθύρου παρατήρησης W_i χρονοσχισμών ικανοποιεί την ακόλουθη ανισότητα $d_i \leq S'_i(t, W_i)$. Στη χειρότερη των περιπτώσεων, στην οποία όλες οι χρονοσχισμές κατά τις οποίες ο χρήστης i δεν έλαβε πόρους του συστήματος εντός του χρονικού παραθύρου παρατήρησής του είναι διαδοχικές, τότε η παραπάνω ανισότητα εκφυλίζεται σε ισότητα $d_i = S'_i(t, W_i)$. Συνεπώς, βάσει της σχέσης (I.1), ισχύει ότι:

$$\Pr(d_i > W_i - \phi_i W_i) \leq q_i$$

για κάθε χρονικό παράθυρο παρατήρησης W_i χρονοσχισμών κατά την διάρκεια της υπηρεσίας του εκάστοτε χρήστη i . ■

Παράρτημα ΙΙ – Απόδειξη Θεωρήματος 2

Αρχικά, υποθέτουμε την ύπαρξη τυχαίου χρονικού διαστήματος T (χρονοσχισμές) για το οποίο ισχύει ότι $T \geq W_{\max}$. Παράλληλα, για λόγους παρουσίας, και χωρίς να υπονομεύεται η γενικότητα της απόδειξης, υποθέτουμε ότι για το χρονικό παράθυρο παρατήρησης W_i χρονοσχισμών κάθε χρήστη i ισχύει η ακόλουθη ισότητα: $T = n_i W_i$ όπου $n_i = 1, 2, 3, \dots$. Αν για τον οιοδήποτε χρήστη i , ισχύει ότι $\Pr(S_i(t, W_i) < \phi_i W_i) = 0 \quad \forall t$, τότε είναι επόμενο ότι η προηγούμενη πιθανότητα ισχύει και για κάθε μη επικαλυπτόμενο χρονικό παράθυρο W_i χρονοσχισμών (από την χρονοσχισμή $t' = W_i$ έως τη $t' = T$), καθ' όλη τη διάρκεια της εξυπηρέτησής του από το σύστημα. Επομένως, ισχύει ότι $S_i(t', W_i) \geq \phi_i W_i \quad \forall t' = k_i W_i$ όπου $k_i = 1, 2, \dots, T/W_i$. Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω, ο αριθμός των χρονοσχισμών κατά τις οποίες ο χρήστης i έλαβε πόρους του συστήματος κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος T χρονοσχισμών ικανοποιεί την ακόλουθη ανισότητα:

$$\hat{S}_i(t, t+T) \geq \sum_{k_i=1}^{T/W_i} S_i(t' = kW_i, W_i) \geq \sum_{k_i=1}^{T/W_i} \phi_i W_i \geq T\phi_i \quad (\text{II.1})$$

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία, μπορούμε εύκολα να ισχυριστούμε ότι η ανισότητα (II.1) ισχύει για κάθε χρήστη στο σύστημα. Παράλληλα, επειδή ένας και μόνο ένας χρήστης λαμβάνει πόρους του συστήματος σε κάθε χρονοσχισμή και καθώς όλοι οι χρήστες έχουν πάντα δεδομένα προς μετάδοση στις ουρές αναμονής τους στο σταθμό βάσης (λόγω υπόθεσης: continuously backlogged), το άθροισμα της συνολικής υπηρεσίας που έλαβαν όλοι οι χρήστες (μετρημένο σε χρονοσχισμές) κατά τη χρονική διάρκεια T , ισούται με τον αριθμό των χρονοσχισμών εντός του διαστήματος αυτού (δηλαδή T χρονοσχισμές). Η προηγούμενη παρατήρηση μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\sum_{i=1}^N \hat{S}_i(t, t+T) = T \quad (\text{II.2})$$

όπου $\hat{S}_i(t, t+T) \geq T\phi_i$ για $i = 1, \dots, N$

Η λύση του γραμμικού προβλήματος (II.2) δίδεται ως εξής: $\hat{S}_i(t, t+T) = T\phi_i$ για $i = 1, \dots, N$. Συνεπώς, για κάθε τυχαίο ζεύγος χρηστών στο σύστημα i, j ισχύει η ακόλουθη ισότητα:

$$\left| \frac{\hat{S}_i(t, t+T)}{\phi_i} - \frac{\hat{S}_j(t, t+T)}{\phi_j} \right| = 0 \quad \forall i, j. \quad \blacksquare$$

Παράστημα III – Αλγόριθμοι Κατανομής Πόρων Γενικευμένου Προβλήματος (62)

• A. Αλγόριθμος Επιλογής Χρηστών

Βήμα 1. Ο σταθμός βάσης εκπέμπει τους μέγιστους δυνατούς πόρους που μπορούν να ανατεθούν (π.χ. τη συνολική τιμή ισχύος προς ανάθεση P_T).

Βήμα 2. Κάθε χρήστης (κινητός σταθμός) εκπέμπει την παράμετρο $\lambda_i^{\max}$ που του αντιστοιχεί και ο σταθμός βάσης κατατάσσει τους χρήστες με φθίνουσα σειρά βάση της παραμέτρου $\lambda_i^{\max}$.

Βήμα 3. Τίθεται $k=1$.

Βήμα 4. Ο σταθμός βάσης εκπέμπει την τιμή $\lambda_k^{\max}$.

Βήμα 5. Κάθε χρήστης (κινητός σταθμός) εκπέμπει την τιμή $X_i(\lambda_k^{\max})$ που έχει υπολογίσει.

Βήμα 6. Αν $k=1$ και $X_1(\lambda_1^{\max}) = X_{\max}$ τότε επέλεξε το χρήστη 1 και σταμάτα τη διαδικασία επιλογής; **αλλιώς** αν $k=1$ και $X_1(\lambda_1^{\max}) < X_{\max}$ πήγαινε στο Βήμα 9; **αλλιώς** πήγαινε στο Βήμα 7.

Βήμα 7. Αν $\sum_{i=1}^{k-1} X_i(\lambda_k^{\max}) > X_{\max}$ επέλεξε τα κινητά από 1 ως $k-1$ και σταμάτα; **αλλιώς** πήγαινε στο Βήμα 8.

Βήμα 8. Αν $\sum_{i=1}^{k-1} X_i(\lambda_k^{\max}) \leq X_{\max}$ και $\sum_{i=1}^k X_i(\lambda_k^{\max}) > X_{\max}$ τότε επέλεξε τα κινητά από 1 ως $k-1$ και σταμάτα; **αλλιώς** πήγαινε στο Βήμα 9

Βήμα 9. Τίθεται $k=k+1$. Αν $k \leq N$ πήγαινε στο Βήμα 4; **αλλιώς** επέλεξε τα κινητά από 1 ως $k-1$ και σταμάτα.

• Β. Αλγόριθμος Βέλτιστης Ανάθεσης Πόρων

Έστω ε πολύ μικρή θετική σταθερά.

Βήμα 1. Τίθεται $\alpha=0$, $\beta=\lambda_T^{\max}$ και $v=1$.

Βήμα 2. Ο σταθμός βάσης εκπέμπει την τιμή $\lambda = \frac{\alpha+\beta}{2}$ στους επιλεγμένους χρήστες.

Βήμα 3. Κάθε χρήστης (κινητός σταθμός) εκπέμπει την τιμή $X_i(\lambda)$ που έχει υπολογίσει.

Βήμα 4. Αν $|\beta-\alpha| \leq 2\varepsilon$ ή $\sum_{i=1}^T X_i(\lambda) = X_{\max}$ σταμάτα; **αλλιώς** πήγαινε στο Βήμα 5.

Βήμα 5. Αν $\sum_{i=1}^T X_i(\lambda) > X_{\max}$ τότε $\alpha=\lambda$; **αλλιώς** κάνε $\beta=\lambda$.

Βήμα 6. Τίθεται $v=v+1$. Πήγαινε στο Βήμα 2.

Αν ο παραπάνω αλγόριθμος σταματήσει στην v^* επανάληψη έχουμε ότι $|\lambda^{v^*} - \lambda^*| < \varepsilon$ όπου λ^* η βέλτιστη λύση του προβλήματος. Άρα, μικρότερη τιμή του ε θα δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα. Τέλος, μπορεί να αποδειχθεί ότι η σχέση του ελάχιστου αριθμού επαναλήψεων για ένα συγκεκριμένο όριο ε δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$n^* = \min \left\{ n \geq \frac{\log \lambda_T^{\max} - \log 2\varepsilon}{\log 2}, n = 1, 2, \dots \right\}$$

που καθορίζει και την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου.

Παράρτημα IV – Απόδειξη Θεωρήματος 3

Εξετάζοντας τη σχέση (81), μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για δύο οποιουδήποτε χρήστες i, j , για τους οποίους ισχύει ότι $A_i = A_j$ και $R_i^{\max} = R_j^{\max}$, οι μόνες παράμετροι που επηρεάζονται από την πιθανή αλλαγή των τιμών των μεταβλητών b_i, b_j και κατ' επέκταση καθορίζουν τις ιδιότητες και τη μορφή των συναρτήσεων ευχαρίστησής τους $U_i^{R_i^*}(P, a, b_i)$ και $U_j^{R_j^*}(P, a, b_j)$, είναι οι μεταβλητές γ_i^* , γ_j^* καθώς και οι αντίστοιχες τιμές των συναρτήσεων f_i και f_j που προκύπτουν, αντίστοιχα. Συνεπώς, στοχεύοντας στον καθορισμό της επίδρασης που έχει η μεταβολή καθώς και η σχέση μεταξύ των παραμέτρων b_i, b_j στις αντίστοιχες συναρτήσεις ευχαρίστησης των χρηστών i, j , αρχικά παραθέτουμε τα ακόλουθα δύο λήμματα τα οποία καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει η τιμή της παραμέτρου b_i ενός χρήστη i την συνάρτηση f_i αυτού και την τιμή της παραμέτρου γ_i^* .

Λήμμα 3. Αν $b_i < b_j$ τότε $f_i(\gamma, a, b_i) > f_j(\gamma, a, b_j) \quad \forall \gamma \in (0, \infty)$.

Απόδειξη: Αν θέσουμε $x_i = e^{ab_i}$ τότε ο γενικευμένος ορισμός μια στιγμοειδούς συνάρτησης:

$$f_i(\gamma_i(R_i, \bar{P}), a, b_i) = c_i \left\{ \frac{1}{1 + e^{-a(\gamma_i - b_i)}} - d_i \right\} \quad (\text{IV.1})$$

όπου $c_i = (1 + e^{ab_i}) / e^{ab_i}$ και $d_i = 1 / (1 + e^{ab_i})$, μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$f_i(\gamma, a, b_i) = \frac{1 - e^{-a\gamma}}{1 + x_i e^{-a\gamma}}.$$

Συνεπώς, αν ισχύει ότι $b_i < b_j$, τότε εύκολα δείχνεται ότι $1 + x_i e^{-a\gamma} < 1 + x_j e^{-a\gamma}$ και συνεπώς, ότι ισχύει $f_i(\gamma, a, b_i) > f_j(\gamma, a, b_j) \quad \forall \gamma \in (0, \infty)$. ■

Λήμμα 4. Αν $A_i = A_j$ και $R_i^{\max} = R_j^{\max}$, τότε αν $b_i < b_j$ ισχύει ότι $\gamma_i^* < \gamma_j^*$.

Απόδειξη: Από τον ορισμό των σχέσεων (80) και (81) μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της μεταβλητής γ_i^* ενός χρήστη i ως εξής:

$$\gamma_i^* = \max_{\gamma \geq 1} \left\{ \frac{1}{\gamma} f_i(\gamma, a, b_i) \right\} = \max_{\gamma \geq 1} \left\{ \frac{1}{\gamma} \frac{e^{a\gamma} - 1}{e^{a\gamma} + x_i} \right\}$$

όπου $x_i = e^{ab_i}$. Με στόχο την ανάλυση της παραπάνω σχέσης επιτρέψτε τον ορισμό των ακόλουθων συναρτήσεων $g(x_i, \gamma) = \frac{1}{\gamma} \frac{e^{a\gamma} - 1}{e^{a\gamma} + x_i}$ και $h(x_i, \gamma) = \frac{\partial g(x_i, \gamma)}{\partial \gamma} = \frac{e^{a\gamma}(a\gamma x_i - e^{a\gamma} - x_i + 1 + a\gamma) + x_i}{(e^{a\gamma} + x_i)^2 \gamma^2}$.

Βάσει του πρώτου κριτηρίου ύπαρξης βέλτιστης λύσης, γνωρίζουμε ότι όταν $\gamma_i = \gamma_i^*$ τότε πρέπει

$\frac{\partial g(x_i, \gamma)}{\partial \gamma} = 0$ αφού ως γ_i^* έχει οριστεί η εκείνη η τιμή της μεταβλητής γ_i που μεγιστοποιεί την g .

Επιπλέον, ισχύουν οι ακόλουθες ανισότητες:

$$\begin{aligned} h(x_i, \gamma) &> 0 \quad \forall \gamma < \gamma_i^* \\ h(x_i, \gamma) &< 0 \quad \forall \gamma > \gamma_i^* \end{aligned} \quad (IV.2)$$

Επίσης, αν $x_i > x_j$ τότε ισχύει ότι $h(x_i, \gamma) > h(x_j, \gamma)$ αφού:

$$\frac{\partial h(x_i, \gamma)}{\partial x_i} = \frac{e^{a\gamma} a \gamma (e^{a\gamma} - 1)}{(e^{a\gamma} + x_i)^3 \gamma^2} > 0 \quad \forall a \geq 0, \gamma \geq 0, b_i \geq 0 \quad (IV.3)$$

Συνεπώς, αν υπάρχουν x_i, γ_i^* τέτοια ώστε $h(x_i, \gamma_i^*) = 0$, και x_j, γ_j^* τέτοια ώστε $h(x_j, \gamma_j^*) = 0$ τότε, αν $x_j > x_i$, βάσει της σχέσης (IV.3) ισχύει ότι $h(x_j, \gamma_i^*) > h(x_i, \gamma_i^*)$ και επίσης ότι $h(x_j, \gamma_i^*) > 0$. Συνεπώς, σε μια τέτοια περίπτωση όπου $h(x_j, \gamma_j^*) = 0$ και $h(x_j, \gamma_i^*) > 0$, προκύπτει βάσει της σχέσης (IV.2) ότι $\gamma_i^* < \gamma_j^*$. Ολοκληρώνοντας, αφού όπως αποδείχθηκε όταν $x_j > x_i$ τότε ισχύει ότι $\gamma_i^* < \gamma_j^*$, και παράλληλα όταν $x_j > x_i$ τότε ισχύει ότι $b_i < b_j$, μπορούμε να καταλήξουμε στο ότι: αν $b_i < b_j$ τότε $\gamma_i^* < \gamma_j^*$. ■

Ακολουθώντας, βασισμένοι στα λήμματα 3 και 4 μπορούμε να ολοκληρώσουμε την απόδειξη του θεωρήματος 3. Βάσει του σχόλιου 1 στο θεώρημα 3 του [82]), γνωρίζουμε ότι αν για δύο χρήστες i, j ισχύει ότι $U_i^{R_i^*}(P, a, b_i) > U_j^{R_j^*}(P, a, b_j)$ όταν $0 \leq P \leq P_{\max}$, τότε $\lambda_i^{\max} > \lambda_j^{\max}$. Συνεπώς, πρέπει να αποδείξουμε ότι αν $b_i < b_j$ τότε $U_i^{R_i^*}(P, a, b_i) > U_j^{R_j^*}(P, a, b_j)$ όταν $0 \leq P \leq P_{\max}$. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, και με βάσει το ορισμό της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i στην σχέση (81), καθώς και το λήμμα 4, ορίζουμε τα ακόλουθα:

$$K_i = \frac{R_i^{\max} \gamma_i^* (\theta P_{\max} + A_i)}{W + \theta R_i^{\max} \gamma_i^*} \leq \frac{R_j^{\max} \gamma_j^* (\theta P_{\max} + A_j)}{W + \theta R_j^{\max} \gamma_j^*} = K_2.$$

Βάσει των παραπάνω, υπάρχουν μόνο τρεις πιθανές περιπτώσεις τιμών της μεταβλητής P , όταν $0 \leq P \leq P_{\max}$.

Περίπτωση 1^η: Αν $P \leq K_1 < K_2$ τότε από την (81) και τα λήμματα 3 και 4, αν $b_i < b_j$, τότε

$$\frac{f_i(\gamma_i^*, a, b_i)}{\gamma_i^*} \geq \frac{f_j(\gamma_j^*, a, b_j)}{\gamma_j^*} \text{ και συνεπώς ισχύει ότι } U_i^{R_i^*}(P, a, b_i) \geq U_j^{R_j^*}(P, a, b_j).$$

Περίπτωση 2^η: Αν $P \geq K_1$ και $P \geq K_2$ τότε από το λήμμα 3 γνωρίζουμε ότι αν $b_i < b_j$ τότε ισχύει ότι $f_i(\gamma_i^*, a, b_i) \geq f_j(\gamma_j^*, a, b_j)$, το οποίο συνεπάγεται ότι $U_i^{R_i^*}(P, a, b_i) \geq U_j^{R_j^*}(P, a, b_j)$.

Περίπτωση 3^η: Αν $P \geq K_1$ και $P \leq K_2$ τότε $R_i^{\max} f_i(\gamma_i(R_i^{\max}), P, a, b_i) \geq \frac{WP}{\gamma_i^*(\theta P_{\max} - \theta P + A_i)} f_i(\gamma_i^*, a, b_i)$ και αφού (όπως και στην περίπτωση 1) $R_i^{\max} f_i(\gamma_i(R_i^{\max}), P, a, b_i) \geq \frac{WP}{\gamma_j^*(\theta P_{\max} - \theta P + A_j)} f_j(\gamma_j^*, a, b_j)$, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι $U_i^{R_i^*}(P, a, b_i) \geq U_j^{R_j^*}(P, a, b_j)$.

Τέλος, με βάση την παραπάνω ανάλυση, δείξαμε ότι αν $b_i < b_j$, τότε ισχύει ότι $U_i^{R_i^*}(P, a, b_i) > U_j^{R_j^*}(P, a, b_j)$ όταν $0 \leq P \leq P_{\max}$, το οποίο και ολοκληρώνει την απόδειξή μας. ■

Παράρτημα V – Απόδειξη Θεωρήματος 4

Με στόχο τον προσδιορισμό του κάτω ορίου της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, αρχικά μελετάμε και αναγνωρίζουμε κάποιες σημαντικές ιδιότητες της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη συναρτήσει της μεταβλητής $\hat{b}_{RT,i} \in [0, b_{RT,i})$, στο διάστημα ορισμού που μας ενδιαφέρει. Το ακόλουθο λήμμα καθορίζει την σχέση ανάμεσα στο σημείο καμπής της σιγμοειδούς συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i και της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$.

Λήμμα 5. Για οιοσδήποτε δύο τυχαίες τιμές $b'_{RT,i}$, $b''_{RT,i}$, της μεταβλητής $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i τέτοιες ώστε $b'_{RT,i} < b''_{RT,i}$, ισχύει ότι $P_i^{0'} < P_i^{0''}$ όπου $P_i^{0'}$, $P_i^{0''}$ είναι τα σημεία καμπής των αντίστοιχων συναρτήσεων ευχαρίστησης $U_i^{R_i^*}(P_i, b'_{RT,i})$ και $U_i^{R_i^*}(P_i, b''_{RT,i})$ που ανακύπτουν, αντίστοιχα.

Απόδειξη: Η απόδειξη του λήμματος 5 δίδεται στο Παράρτημα IX. ■

Επιπροσθέτως, μπορούμε να αποδείξουμε ότι όταν ισχύει $\hat{b}_{RT,i} = 0$ τότε το σημείο καμπής της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i έχει πάντα τιμή μικρότερη από το οριακό σημείο διαχωρισμού της, $P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)$.

Λήμμα 6. Όταν $\hat{b}_{RT,i} = 0$, τότε ισχύει ότι $P_i^0|_{\hat{b}_{RT,i}=0} < P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)|_{\hat{b}_{RT,i}=0}$.

Απόδειξη: Η απόδειξη του λήμματος 6 δίδεται στο Παράρτημα X. ■

Βασισμένοι στα δύο προηγούμενα λήμματα, μπορούμε να δείξουμε ότι πάντα υπάρχει μια τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i} \in [0, b_{RT,i})$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i , την οποία ορίζουμε ως $\hat{b}_{RT,i}^*$, τέτοια ώστε όταν η τιμή της $\hat{b}_{RT,i}$ είναι μικρότερη της οριακής τιμής $\hat{b}_{RT,i}^*$, τότε το μοναδικό σημείο καμπής της συνάρτησης $U_i^{R_i^*}(P_i, \hat{b}_{RT,i})$ είναι πάντα μικρότερο (κατά τιμή) του οριακού σημείου διαχωρισμού της (δηλαδή, $P_i^0 < P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)$). Για το σκοπό αυτό, δίδεται το ακόλουθο θεώρημα.

Θεώρημα 7. Υπάρχει πάντα μια μοναδική τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου όταν $\hat{b}_{RT,i} \in [0, b_{RT,i})$, το οποίο και ορίζεται ως $\hat{b}_{RT,i}^*$, τέτοιο ώστε $P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)|_{\hat{b}_{RT,i}=\hat{b}_{RT,i}^*} = P_i^0|_{\hat{b}_{RT,i}=\hat{b}_{RT,i}^*}$ και επιπροσθέτως, ισχύει ότι $P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)|_{\hat{b}_{RT,i}<\hat{b}_{RT,i}^*} > P_i^0|_{\hat{b}_{RT,i}<\hat{b}_{RT,i}^*}$ όταν $\hat{b}_{RT,i} \in [0, \hat{b}_{RT,i}^*)$.

Απόδειξη: Η απόδειξη του θεωρήματος 7 δίδεται στο Παράρτημα XI. ■

Βάσει των παραπάνω, εν συνεχεία μπορούμε να αποδείξουμε ότι όταν $\hat{b}_{RT,i} \in [0, \hat{b}_{RT,i}^*)$, υπάρχει πάντα μια μοναδική τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, η οποία ορίζεται ως $b_{min,i}$, τέτοια ώστε όταν $\hat{b}_{RT,i} < b_{min,i}$ τότε η βέλτιστη τιμή κόστους υπολογίζεται μόνο βάσει του δευτέρου σκέλους της συνάρτησης (85), επειδή δεν υπάρχει αποδεκτή τιμή για τη μεταβλητή P_i^* στη εξίσωση (86), και παράλληλα εκκληρώνεται και η συνθήκη (88). Προς αυτήν την κατεύθυνση, δίνουμε το ακόλουθο θεώρημα.

Θεώρημα 8. Υπάρχει πάντα μια και μοναδική τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία μη πραγματικού χρόνου όταν $\hat{b}_{RT,i} \in [0, \hat{b}_{RT,i}^*)$, η οποία ορίζεται ως εξής $\hat{b}_{RT,i}^{**}$, για την οποία ισχύει ότι όταν $\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^{**}$ τότε δεν υπάρχει $P_i^* \in [P_i^0, P_{\max}]$ τέτοιο ώστε $U_i^{R_i^*}(P, \hat{b}_{RT,i}) - P \frac{\partial U_i^{R_i^*}(P, \hat{b}_{RT,i})}{\partial P} = 0$ για $P_i^0 \leq P \leq P_{\max}$.

Απόδειξη: Η απόδειξη του θεωρήματος 8 δίδεται στο Παράρτημα XII. ■

Σύμφωνα με το θεώρημα 7, υπάρχει πάντα μοναδική τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου (δηλαδή, η τιμή $\hat{b}_{RT,i}^*$) όταν $\hat{b}_{RT,i} \in [0, b_{RT,i})$ τέτοια ώστε: όταν $0 \leq \hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^* < b_{RT,i}$ τότε να ισχύει ότι:

$$P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)|_{\hat{b}_{RT,i}<\hat{b}_{RT,i}^*} > P_i^0|_{\hat{b}_{RT,i}<\hat{b}_{RT,i}^*} \quad (V.1)$$

και επίσης, βάσει του θεωρήματος 8, μοναδική τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου (δηλαδή, η τιμή $\hat{b}_{RT,i}^{**}$) όταν $\hat{b}_{RT,i} \in [0, b_{RT,i})$ τέτοια ώστε: όταν $0 \leq \hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^{**} \leq \hat{b}_{RT,i}^* < b_{RT,i}$ τότε να ισχύει ότι:

$$\left[U_i^{R_i^*}(P) - P \frac{\partial U_i^{R_i^*}(P)}{\partial P} \right]_{P=P_i^{LLM}(\gamma_i^*, A_i)} \Big|_{\hat{b}_{RT,i}(t) < \hat{b}_{RT,i}^{**}(t)} > 0 \quad (V.2)$$

και παράλληλα, ότι η εξίσωση (86) δεν έχει καμία εφικτή λύση. Για τον παραπάνω λόγο, υπάρχει πάντα μοναδική τιμή της μεταβλητής $\hat{b}_{RT,i}$ όταν $\hat{b}_{RT,i} \in [0, b_{RT,i})$, η οποία ορίζεται ως $b_{\min,i}$, τέτοια ώστε και οι δύο σχέσεις (V.1) και (V.2) να ικανοποιούνται. Συγκεκριμένα, $b_{\min,i} = \hat{b}_{RT,i}^{**}$. Επίσης, όταν $\hat{b}_{RT,i} \in [0, \hat{b}_{RT,i}^{**} = b_{\min,i})$ τότε η εξίσωση (86) δεν έχει καμία εφικτή λύση και συνεπώς σύμφωνα με τη σχέση (85) στην περίπτωση αυτή μπορούμε εύκολα να δείξουμε ότι

$$\lambda_i^{\max} = \frac{U_i^{R_i^*}(P_{\max})}{P_{\max}} = \frac{WP_{\max}}{A_i} \frac{1 - e^{-\frac{aN_i P_{\max}}{A_i}}}{1 + e^{-\frac{a(\hat{b}_{RT,i} - \frac{N_i P_{\max}}{A_i})}{A_i}}} \quad \text{όπου} \quad N_i = \frac{W}{R_i^{\max}}. \quad \text{Επιπροσθέτως, αφού ισχύει ότι}$$

$$\hat{b}_{RT,i} < \frac{N_i P_{\max}}{A_i} \quad \text{μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όταν} \quad \hat{b}_{RT,i} \in [0, b_{\min,i}) \quad \text{τότε} \quad \lambda_i^{\max} = \frac{WP_{\max}}{A_i} \quad \text{και τέλος ότι,}$$

$$\left. \frac{\partial \lambda_i^{\max}(\hat{b}_{RT,i})}{\partial \hat{b}_{RT,i}} \right|_{\hat{b}_{RT,i} < b_{\min,i}} = 0.$$

Βάσει των παραπάνω ολοκληρώνεται η απόδειξη μας. ■

Παράρτημα VI – Απόδειξη Θεωρήματος 5

Αρχικά, καθορίζουμε εκείνες τις ικανές και αναγκαίες συνθήκες που θα μας επιτρέψουν να ορίσουμε και να προσδιορίσουμε το άνω όριο της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία μη πραγματικού χρόνου όταν $\hat{b}_{RT,i} \gg b_{RT,i}$; και στη συνέχεια να αιτιολογήσουμε και να ερμηνεύσουμε την ύπαρξη του βάσει της συνθήκης (88). Πρέπει να επισημάνουμε ότι αφού $\hat{b}_{RT,i} \gg b_{RT,i}$, τότε χωρίς βλάβη της γενικότητας της απόδειξης που ακολουθεί, υποθέτουμε ότι για τη συνάρτηση απόδοσης ενός χρήστη i, f_i , ισχύει ότι οι παράμετροι $c_i(\hat{b}_{RT,i}) = (1 + e^{a\hat{b}_{RT,i}}) / e^{a\hat{b}_{RT,i}} \equiv c_i$ και $d_i(\hat{b}_{RT,i}) = 1 / (1 + e^{a\hat{b}_{RT,i}}) \equiv d_i$ έχουν σταθερές τιμές ανεξαρτήτες της τιμής της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$.

Αρχικά, καθορίζουμε ένα άνω όριο για την παράμετρο $\hat{b}_{RT,i}$ ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, το οποίο ορίζεται ως $B_{MAX,i}(A_i) \quad \forall i \in S_{RT}$, χωρίς να βασιστούμε στην ικανοποίηση της οριακής συνθήκης (88). Η ύπαρξη ενός τέτοιου άνω ορίου βασίζεται στην ύπαρξη του φυσικού περιορισμού μέγιστης ισχύος εκπομπής του σταθμού βάσης της κυψέλης ενός CDMA ασύρματου δικτύου, όπως εξηγείται μέσω του ακόλουθου λήμματος.

Λήμμα 7. Υπάρχει πάντα ένα μοναδικό άνω όριο για τη τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου όταν $\hat{b}_{RT,i} \gg b_{RT,i}$, το οποίο ορίζεται ως $B_{MAX,i}(A_i)$ και δίδεται από την σχέση:

$$B_{MAX,i}(A_i) = \frac{1}{a} \left\{ \ln \left(\frac{c_i}{1 + \frac{A_i}{aW(P_{\max} + A_i)} + c_i d_i} - 1 \right) + \frac{aWP_{\max}}{R_i^{\max} A_i} \right\}$$

λόγω των φυσικών περιορισμών συνολικής ισχύος μετάδοσης του σταθμού βάσης κατά τη ζεύξη καθόδου ($P_{\max}$), το οποίο εξαρτάται από την αντίστοιχη στιγμιαία τιμή της ποιότητας του καναλιού του χρήστη i , A_i . Ειδικότερα, αν $\hat{b}_{RT,i} > B_{MAX,i}(A_i)$ τότε ισχύει ότι $P_i^* > P_{\max}$ όπου P_i^* είναι η μοναδική λύση της εξίσωσης (86).

Απόδειξη: Η απόδειξη του λήμματος 7 δίδεται στο Παράρτημα XIII. ■

Παράλληλα, έχουμε ήδη αποδείξει ότι η συνάρτηση $\lambda_i^{\max}(\hat{b}_{RT,i})$ είναι μια συνεχής και αύξουσα συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή $\hat{b}_{RT,i}$ (σύμφωνα με το θεώρημα 3), καθώς και ότι ισχύει και το αντίστροφο. Εν συνεχεία, το ακόλουθο λήμμα αποδεικνύει ότι όταν $\hat{b}_{RT,i} \gg b_{RT,i}$, η μεταβλητή $\hat{b}_{RT,i}$ είναι και αυτή επίσης μια συνεχής και κοίλη συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή $\lambda_i^{\max}$, η οποία στρέφει τα κοίλα άνω.

Λήμμα 8. Όταν $\hat{b}_{RT,i} \gg b_{RT,i}$ η παράμετρος $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου είναι μια κοίλη συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή $\lambda_i^{\max}$, αφού:

$$\frac{\partial^2 \hat{b}_{RT,i}}{\partial (\lambda_i^{\max})^2} > 0 \quad .$$

Απόδειξη: Η απόδειξη του λήμματος 8 δίδεται στο Παράρτημα XIV. ■

Βάσει των προηγούμενων δύο λημμάτων, μπορούμε πλέον να ορίσουμε αναλυτικά το άνω όριο

της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου, σύμφωνα και με τη σχέση (88), ως εξής.

Έστω L_{max} μια μεγάλη θετική σταθερά για την οποία ισχύει ότι όταν $\left. \frac{\partial \hat{b}_{RT,i}}{\partial \lambda_i^{\max}} \right|_{\lambda_i^{\max} \rightarrow 0} \leq -L_{max}$, τότε

$\left. \frac{\partial \lambda_i^{\max}(\hat{b}_{RT,i})}{\partial \hat{b}_{RT,i}} \right|_{\hat{b}_{RT,i} \rightarrow \infty} \rightarrow 0$. Μέχρι στιγμής, έχουμε αποδείξει ότι για την παράμετρο $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης

ευχαρίστησης ενός χρήστη i , όταν αυτή εκφραστεί ως συνάρτηση της παραμέτρου $\lambda_i^{\max}$, ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες:

1. $\hat{b}_{RT,i} < B_{MAX,i}(A_i)$ (σύμφωνα με το λήμμα 7)
2. Όταν $b_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i} \leq B_{MAX,i}(A_i)$ τότε:
 - a. Η $\hat{b}_{RT,i}$ είναι μια συνεχής και φθίνουσα συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή $\lambda_i^{\max}$ (σύμφωνα με το θεώρημα 3).
 - b. Η $\hat{b}_{RT,i}$ είναι μια κοίλη συνάρτηση (με τα κοίλα άνω) ως προς τη μεταβλητή $\lambda_i^{\max}$ (σύμφωνα με το λήμμα 8).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορούμε εύκολα να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει πάντα μια μοναδική τιμή για την παράμετρο $\hat{b}_{RT,i} \forall i \in S_{RT}$, η οποία ορίζεται ως $b_{\max,i}$, τέτοια ώστε:

$$b_{\max,i} = \left\{ \hat{b}_{RT,i} : \min \left(\left. \frac{\partial \hat{b}_{RT,i}}{\partial \lambda_i^{\max}} \right|_{\hat{b}_{RT,i} = b_{\max,i}} \leq -L_{\max}, B_{MAX,i}(A_i) \right) \right\}$$

Αυτό ολοκληρώνει την απόδειξή μας. ■

Παράρτημα VII – Απόδειξη Λήμματος 1

Βάσει ορισμού, για μια σιγμοειδή συνάρτηση ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες:

$$\frac{\partial f(\gamma)}{\partial \gamma} > 0 \quad \text{και} \quad \frac{\partial T(R^*)}{\partial R_i^*} > 0 \quad (\text{VII.1})$$

$$\left. \frac{\partial^2 f(\gamma)}{\partial \gamma^2} \right|_{\gamma < \gamma_{\text{inf}}^f} > 0, \quad \left. \frac{\partial^2 f(\gamma)}{\partial \gamma^2} \right|_{\gamma > \gamma_{\text{inf}}^f} < 0 \quad (\text{VII.2})$$

$$\left. \frac{\partial^2 T(R^*)}{\partial (R^*)^2} \right|_{R_i^* < R_{\text{inf}}^*} > 0, \quad \left. \frac{\partial^2 T(R^*)}{\partial (R^*)^2} \right|_{R_i^* > R_{\text{inf}}^*} < 0 \quad (\text{VII.3})$$

$$\lim_{R^* \rightarrow 0} \frac{\partial^2 T(R^*)}{\partial (R^*)^2} = \lim_{R^* \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T(R^*)}{\partial (R^*)^2} = 0, \quad \lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\partial^2 f(\gamma)}{\partial \gamma^2} = \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 f(\gamma)}{\partial \gamma^2} = 0 \quad (\text{VII.4})$$

Όσον αφορά την πρώτη παράγωγο της $T(\gamma)$ συναρτήσει της μεταβλητής γ ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(\gamma)}{\partial \gamma} &= \frac{\partial T(R_{Max}^* f(\gamma))}{\partial \gamma} = \frac{\partial T(R_{Max}^* f(\gamma))}{\partial R_{Max}^* f(\gamma)} \cdot \frac{\partial R_{Max}^* f(\gamma)}{\partial \gamma} \\ &= R_{Max}^* \frac{\partial T(R^*)}{\partial R^*} \cdot \frac{\partial f(\gamma)}{\partial \gamma} > 0 \end{aligned}$$

σύμφωνα με τη σχέση (VII.1). Όσον αφορά την δεύτερη παράγωγο της συνάρτησης $T(\gamma)$ ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T(\gamma)}{\partial \gamma^2} &= \frac{\partial^2 T(R_{Max}^* f(\gamma))}{\partial \gamma^2} = R_{Max}^* \frac{\partial T(\frac{\partial T(R_{Max}^* f(\gamma))}{\partial R_{Max}^* f(\gamma)} \cdot \frac{\partial f(\gamma)}{\partial \gamma})}{\partial \gamma} = \\ &R_{Max}^* \left[R_{Max}^* \frac{\partial^2 T(R^*)}{\partial (R^*)^2} \cdot \left(\frac{\partial f(\gamma)}{\partial \gamma} \right)^2 + \frac{\partial^2 f(\gamma)}{\partial \gamma^2} \frac{\partial T(R^*)}{\partial R^*} \right] \quad (\text{VII.5}) \end{aligned}$$

Διερευνώντας την παραπάνω σχέση, αρχικά, εξετάζουμε τις ιδιότητες της δεύτερης παραγώγου στα άκρα του πεδίου ορισμού της $T(\gamma)$ $\gamma \in [0, \infty)$. Μπορούμε εύκολα να δούμε ότι:

$$\begin{aligned} \lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\partial^2 T(\gamma)}{\partial \gamma^2} &= R_{Max}^* \cdot \\ &\left[R_{Max}^* \lim_{R^* \rightarrow 0} \frac{\partial^2 T(R^*)}{\partial (R^*)^2} \cdot \left(\lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\partial f(\gamma)}{\partial \gamma} \right)^2 + \lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\partial^2 f(\gamma)}{\partial \gamma^2} \cdot \lim_{R^* \rightarrow 0} \frac{\partial T(R^*)}{\partial R^*} \right] = 0 \end{aligned}$$

και επίσης ότι,

$$\begin{aligned} \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 T(\gamma)}{\partial \gamma^2} &= R_{Max}^* \cdot \\ &\left[R_{Max}^* \lim_{R^* \rightarrow R_{Max}^*} \frac{\partial^2 T(R^*)}{\partial (R^*)^2} \cdot \left(\lim_{\gamma \rightarrow \infty} \frac{\partial f(\gamma)}{\partial \gamma} \right)^2 + \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 f(\gamma)}{\partial \gamma^2} \cdot \lim_{R^* \rightarrow R_{Max}^*} \frac{\partial T(R^*)}{\partial R^*} \right] = 0 \end{aligned}$$

αφού $\lim_{R^* \rightarrow R_{Max}^*} \frac{\partial^2 T(R^*)}{\partial (R^*)^2} \neq \infty$ και $\lim_{R^* \rightarrow R_{Max}^*} \frac{\partial T(R^*)}{\partial R^*} \neq \infty$.

Εν συνεχεία, αναλόγως με τη σχετική θέση των σημείων καμπής των γεννητόρων συναρτήσεων (δηλαδή των σημείων γ_{Infl}^f και $f^{-1}(R_{Infl}^*/R_{Max}^*)$) πάνω στον άξονα των γ ($\gamma \geq 0$), εξετάζουμε τις ιδιότητες της δεύτερης παραγώγου της συνάρτησης $T(\gamma)$ συναρτήσει της μεταβλητής γ σε δύο διακριτές και ανεξάρτητες μεταξύ τους περιπτώσεις.

Περίπτωση 1^η. Όταν ισχύει ότι $f^{-1}(R_{Inf}^/R_{Max}^*) \leq \gamma_{Inf}^f$.*

Αρχικά, εξετάζουμε τις εξής υποπεριπτώσεις:

A) Όταν $0 \leq \gamma \leq f^{-1}(R_{Inf}^*/R_{Max}^*) \leq \gamma_{Inf}^f$ τότε βάσει των σχέσεων (VII.1), (VII.2), (VII.3) μπορεί εύκολα να δειχθεί ότι $\frac{\partial^2 T(\gamma)}{\partial \gamma^2} > 0$.

B) Όταν $f^{-1}(R_{Inf}^*/R_{Max}^*) \leq \gamma_{Inf}^f \leq \gamma$ τότε βάσει των σχέσεων (VII.1), (VII.2), (VII.3) μπορεί εύκολα να δειχθεί ότι $\frac{\partial^2 T(\gamma)}{\partial \gamma^2} < 0$.

Εν συνεχεία, στην περίπτωση όπου $f^{-1}(R_{Inf}^*/R_{Max}^*) \leq \gamma \leq \gamma_{Inf}^f$ τότε σύμφωνα με τις προηγούμενες υποπεριπτώσεις (A) και (B), γνωρίζουμε ότι η δεύτερη παράγωγος $\frac{\partial^2 T(\gamma)}{\partial \gamma^2}$ έχει τουλάχιστον ένα σημείο τομής με τον μηδενικό άξονα (δηλαδή, ένα τουλάχιστον σημείο μηδενισμού) στο διάστημα $\gamma \in [f^{-1}(R_{Inf}^*/R_{Max}^*), \gamma_{Inf}^f]$. Για να αποδείξουμε όμως ότι η συνάρτηση $T(\gamma)$ είναι σιγμοειδής, πρέπει επιπλέον να αποδείξουμε ότι υπάρχει ένα και μόνο ένα σημείο μηδενισμού της δεύτερης παραγώγου αυτής, το οποίο και συμβολίζουμε ως γ_{Inf}^T . Προς αυτήν την κατεύθυνση, και εξετάζοντας αναλυτικά τη σχέση (VII.5), παρατηρούμε ότι όταν $\gamma \in [f^{-1}(R_{Inf}^*/R_{Max}^*), \gamma_{Inf}^f]$, και αφού $\left. \frac{\partial^2 f(\gamma)}{\partial \gamma^2} \right|_{\gamma < \gamma_{Inf}^f} > 0$, τότε το δεύτερο σκέλος του αθροίσματος της (VII.5) δίδει πάντα θετικές τιμές. Συνεπώς, μόνο το πρόσημο της $\frac{\partial^2 T(R^*)}{\partial (R^*)^2}$ καθορίζει και δίνετε να μεταβάλει το πρόσημο της $\frac{\partial^2 T(\gamma)}{\partial \gamma^2}$.

Δεδομένου λοιπόν ότι η συνάρτηση $\frac{\partial^2 T(R^*)}{\partial (R^*)^2}$ αλλάζει το πρόσημό της μια μόνο φορά (εξ ορισμού), μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η συνάρτηση $\frac{\partial^2 T(\gamma)}{\partial \gamma^2}$ έχει πάντα ένα και μόνο ένα σημείο τομής με τον μηδενικό άξονα και συνεπώς, βάσει της προηγούμενης ανάλυσής μας όταν ισχύει ότι $f^{-1}(R_{Inf}^*/R_{Max}^*) \leq \gamma_{Inf}^f$, τότε η συνάρτηση $T(\gamma)$ είναι σιγμοειδής ως προς γ , με μοναδικό σημείο καμπής το γ_{Inf}^T για το οποίο ισχύει ότι $\gamma_{Inf}^T \in [f^{-1}(R_{Inf}^*/R_{Max}^*), \gamma_{Inf}^f]$.

Περίπτωση 2^η. Όταν ισχύει ότι $\gamma_{Inf}^f \leq f^{-1}(R_{Inf}^/R_{Max}^*)$.*

Ακολουθώντας την ίδια αποδεικτική μεθοδολογία με την προηγούμενη περίπτωση, μπορούμε εύκολα να καταλήξουμε στο ότι όταν ισχύει ότι $\gamma_{Inf}^f \leq f^{-1}(R_{Inf}^*/R_{Max}^*)$, τότε η συνάρτηση $T(\gamma)$ είναι σιγμοειδής συνάρτηση ως προς γ , με μοναδικό σημείο καμπής το γ_{Inf}^T για το οποίο ισχύει ότι $\gamma_{Inf}^T \in [\gamma_{Inf}^f, f^{-1}(R_{Inf}^*/R_{Max}^*)]$.

Βάσει των παραπάνω, ολοκληρώνεται η απόδειξη του λήμματος. ■

Παράρτημα VIII – Απόδειξη Λήμματος 2

Το λήμμα 1, αποδεικνύει ότι η συνάρτηση ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης ενός χρήστη με υπηρεσία πραγματικού χρόνου $T_i(\gamma_i)$ είναι σιγμοειδής συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή γ_i ($\gamma_i \geq 0$). Παράλληλα, λόγω της «ένα προς ένα» σχέσης μεταξύ των μεταβλητών γ_i και P_i , σύμφωνα με τις σχέσεις (90) και (3), μπορεί άμεσα να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η συνάρτηση ευχαρίστησης πραγματικής ρυθμαπόδοσης ενός χρήστη ως προς την ισχύ μετάδοσής του είναι και αυτή σιγμοειδής. Συνεπώς, ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες για τη συνάρτηση $T_i(\gamma_i) = T_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ όταν αυτή εκφράζεται συναρτήσει της μεταβλητής P_i , για $P_i \geq 0$:

- 1) Έχει πεδίο ορισμού το μη αρνητικό τμήμα του άξονα των πραγματικών αριθμών, δηλαδή $[0, \infty)$.
- 2) Το σύνολο τιμών της είναι το $[0, 1)$, βάσει των υποθέσεων που έγιναν για την T_i .
- 3) Σύμφωνα με το Λήμμα 1, είναι γνησίως αύξουσα ως προς P_i στο πεδίο ορισμού της.
- 4) Είναι κυρτή (convex) στο διάστημα $[0, P_{\text{Inf},i}^T]$, και κοίλη στο διάστημα $[P_{\text{Inf},i}^T, P_i^{\text{Max}}]$, όπου το σημείο $P_{\text{Inf},i}^T$ είναι το σημείο καμπής της και ορίζεται ως $P_{\text{Inf},i}^T = \frac{\gamma_{\text{Inf},i}^T R_i^F I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{G_i P_i} = \frac{\gamma_{\text{Inf},i}^T R_{\text{Max},i}^* I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{G_i P_i}$. Κατά την παρούσα μελέτη υποθέτουμε ότι $P_i^{\text{Max}} \geq P_{\text{Inf},i}^T$. Η εγκυρότητα της παραπάνω ιδιότητας ισχύει άμεσα μέσω του λήμματος 1.
- 5) Η πρώτη παράγωγός της είναι συνεχής, αφού και οι συναρτήσεις $T(R^*)$ και $f(\gamma)$ έχουν συνεχείς παραγώγους (όλων των τάξεων).

Βάσει των προηγούμενων ιδιοτήτων της $T_i(P_i, \bar{P}_{-i})$, ο λόγος $T_i(P_i, \bar{P}_{-i})/P_i$ είναι μια οιονεί-κοίλη (quasi-concave) συνάρτηση στο διάστημα $P_i \in [0, P_i^{\text{Max}}]$, σύμφωνα με το [110]. Συνεπώς, και η ολική συνάρτηση ευχαρίστησης ενός χρήστη $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ είναι οιονεί-κοίλη ως προς τη δική του ισχύ μετάδοσης.

Για τον προσδιορισμό των ακρότατων της συνάρτησης ευχαρίστησης $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ ενός χρήστη i ως προς τη μεταβλητή P_i , εξετάζουμε το σημείο μηδενισμού της πρώτης παραγώγου αυτής:

$$\frac{\partial U_i(P_i, \bar{P}_{-i})}{\partial P_i} = \frac{\partial (T_i(\gamma_i)/P_i)}{\partial P_i} = \frac{\partial T_i(\gamma_i)/\partial P_i \cdot P_i - T_i(\gamma_i)}{(P_i)^2} = 0$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, η συνάρτηση $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ μεγιστοποιείται όταν:

$$\frac{\partial T_i(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \cdot \gamma_i - T_i(\gamma_i) = 0 \quad (\text{VIII.1})$$

αφού από τη σχέση (3) εύκολα αποδεικνύεται ότι $\frac{\partial \gamma_i}{\partial P_i} = \gamma_i / P_i$. Επιπλέον, όπως αποδεικνύεται στην [110], λόγω της σιγμοειδούς φύσης της συνάρτησης $T_i(\gamma_i)$, η εξίσωση (VIII.1) έχει μια και μοναδική

λύση γ_i^* . Λόγω των παραπάνω, η τιμή εκείνη της μεταβλητής P_i που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ μπορεί να υπολογιστεί, βάσει της σχέσης (3), ως εξής:

$$\hat{P}_i = \gamma_i^* R_{Max,i}^* I_{-i}(\bar{P}_{-i}) / W G_i \quad (\text{VIII.2})$$

Ολοκληρώνοντας την απόδειξή μας, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα. Αν η μέγιστη επιτρεπτή τιμή της παραμέτρου P_i είναι μικρότερη από $\hat{P}_i$, τότε η συνάρτηση $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ έχει μέγιστο όταν $P_i = P_i^{Max}$, το οποίο δίδεται ως $U_i(P_i^{Max}, \bar{P}_{-i}) = T_i(P_i^{Max}, \bar{P}_{-i}) / P_i^{Max}$, αφού η συνάρτηση U_i είναι αύξουσα στο διάστημα $[0, \hat{P}_i]$. Συνεπώς, η μικρότερη εκ των τιμών $\hat{P}_i, P_i^{Max}$ αποτελεί το μέγιστο της συνάρτησης $U_i(P_i, \bar{P}_{-i})$ όταν $P_i \in [0, P_i^{Max}]$, δηλαδή ισχύει ότι.

$$P_i^* = \min \left\{ \frac{\gamma_i^* R_{Max,i}^* I_{-i}(\bar{P}_{-i})}{W G_i}, P_i^{Max} \right\}$$

το οποίο και ολοκληρώνει την απόδειξή μας. ■

Παράρτημα IX – Απόδειξη Λήμματος 5

Αν συμβολίσουμε ως P_i^0 το μοναδικό σημείο καμπής (αλλαγής προσήμου της δεύτερης παραγώγου) της σιγμοειδούς συνάρτησης ευχαρίστησης $U_i^{R_i^*}(P_i, \hat{b}_{RT,i}) \equiv U_i^{R_i^*}(P_i, b_i) \equiv U_i^{R_i^*}(P_i)$ ενός χρήστη i (για λόγους καλλίτερης παρουσίασης σε αυτό και μόνο αυτό το παράρτημα συμβολίζουμε τη μεταβλητή $\hat{b}_{RT,i}$ ως b_i), τότε η ακόλουθη ισότητα πρέπει να ισχύει πάντα:

$$\left. \frac{\partial^2 U_i^{R_i^*}(P_i)}{\partial P_i^2} \right|_{P_i=P_i^0} = 0 \quad (\text{IX.1})$$

Παράλληλα, μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τη δεύτερη παράγωγο της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη σύμφωνα με τον κανόνα αλυσίδας μερικών παραγώγων ως εξής,

$$\frac{\partial^2 U_i^{R_i^*}(P_i)}{\partial P_i^2} = \frac{\partial^2 U_i^{R_i^*}(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} \left(\frac{d\gamma_i}{dP_i} \right)^2 + \frac{\partial U_i^{R_i^*}(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \frac{d^2 \gamma_i}{dP_i^2} \quad \text{και μετά από απλούς μαθηματικούς χειρισμούς}$$

μπορούμε να καταλήξουμε στην ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\partial^2 U_i^{R_i^*}(P_i)}{\partial P_i^2} = \frac{N_i(P_T + A_i)}{(P_T - P_i + A_i)^3} \left[\frac{\partial^2 U_i^{R_i^*}(\gamma_i)}{\partial \gamma_i^2} (\gamma_i + N_i) + 2 \cdot \frac{\partial U_i^{R_i^*}(\gamma_i)}{\partial \gamma_i} \right] \quad (\text{IX.2})$$

όπου $N_i = W / R_i^{\max}$. Επίσης, σύμφωνα με την σχέση (IV.1) μπορούμε δείξουμε ότι:

$$\frac{\partial^2 U_i^{R_i^*}(P_i)}{\partial P_i^2} = \frac{N_i(P_T + A_i)}{(P_T - P_i + A_i)^3} \left[\frac{(1 + e^{a b_i})}{e^{a b_i}} a_i R_i^{\max} e^{a(b_i - \gamma_i)} \frac{e^{a(b_i - \gamma_i)} [a(\gamma_i + N_i) + 2] - [a(\gamma_i + N_i) - 2]}{(1 + e^{a(b_i - \gamma_i)})^3} \right] \quad (\text{IX.3})$$

Συνεχίζοντας την προηγούμενη ανάλυση, επιτρέψτε μας να ορίσουμε την ακόλουθη συνάρτηση:

$$F_i(\gamma_i(P_i), b_i) = e^{a(b_i - \gamma_i)} [a(\gamma_i + N_i) + 2] - [a(\gamma_i + N_i) - 2] \quad (\text{IX.4})$$

όπου $F_i(\gamma_i(P_i), b_i)|_{P_i=P_i^0} = 0$ ώστε να ικανοποιείται η ισότητα (IX.1) όταν $P_i = P_i^0$. Η συνάρτηση $F_i(\gamma_i(P_i), b_i)$ είναι αύξουσα συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή $b_i \in (-\infty, \infty)$, αφού ισχύει ότι:

$$\frac{\partial F_i(\gamma_i(P_i), b_i)}{\partial b_i} = a e^{a(b_i - \gamma_i)} [a(\gamma_i + N_i) + 2] > 0 \quad \forall b_i \in (-\infty, \infty) \quad (\text{IX.5})$$

και φθίνουσα συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή $\gamma_i \in (-\infty, \infty)$, αφού ισχύει ότι:

$$\frac{\partial F_i(\gamma_i(P_i), b_i)}{\partial \gamma_i} = (-a) \{ e^{a(b_i - \gamma_i)} [a(\gamma_i + N_i) - 1] + 1 \} < 0 \quad \forall \gamma_i \in (-\infty, \infty) \quad (\text{IX.6})$$

Θεωρούμε μια τυχαία τιμή για τη μεταβλητή $b_i = b'_i$, για την ειδική περίπτωση της οποίας ισχύει ότι $\gamma_i(P_i^{0'}) \equiv \gamma'_i$ και σύμφωνα με τις σχέσεις (IX.1) και (IX.4), $F_i(\gamma_i(P_i), b'_i)|_{P_i=P_i^{0'}} = 0$ αφού $P_i^{0'}$ είναι το σημείο καμπής της συνάρτησης ευχαρίστησης $U_i^{R_i^*}(P_i, b_i)$ ενός χρήστη i όταν $b_i = b'_i$ (δηλαδή $U_i^{R_i^*}(P_i, b'_i)$). Εν συνεχεία, αν αυξήσουμε την τιμή της παραμέτρου b_i του χρήστη i από την τιμή b'_i στην τιμή b''_i , όπου $b'_i < b''_i$, τότε ισχύει ότι:

$$F_i(\gamma_i(P_i), b''_i)|_{P_i=P_i^{0''}} > 0 \quad (\text{IX.7})$$

αφού η F_i είναι αύξουσα συνάρτηση της παραμέτρου b_i και ταυτόχρονα η τιμή της παραμέτρου γ_i είναι σταθερή (αφού $\gamma_i(P_i^{0'}) \equiv \gamma'_i$). Επιπλέον, βάσει των σχέσεων (24) και (27) πρέπει να υπάρχει κατάλληλη και μοναδική τιμή της παραμέτρου P_i^0 , η $P_i^{0''}$, η οποία να ορίζει μονοσήμαντα το σημείο καμπής της νέας συνάρτησης ευχαρίστησης $U_i^{R_i^*}(P_i, b''_i)$, όπου $\frac{\partial^2 U_i^{R_i^*}(P_i, b''_i)}{\partial P_i^2} \Big|_{P_i=P_i^{0''}} = 0$ και επιπλέον:

$$F_i(\gamma_i(P_i), b''_i)|_{P_i=P_i^{0''}} = 0 \quad (\text{IX.8})$$

Σύμφωνα με την ανισότητα (IX.7) και την ισότητα (IX.8), και αφού η F_i είναι φθίνουσα συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή γ_i , μπορούμε εύκολα να καταλήξουμε στο εξής $\gamma_i(P_i^{0''}) > \gamma_i(P_i^{0'})$ όταν $b'_i < b''_i$. Τέλος, καθώς η μεταβλητή γ_i είναι αύξουσα συνάρτηση της μεταβλητής P_i αποδείξαμε ότι αν $b'_i < b''_i$, τότε ισχύει ότι $P_i^{0'} < P_i^{0''}$. ■

Παράρτημα X – Απόδειξη Λήμματος 6

Μπορεί εύκολα να αποδειχθεί από τη σχέση (80) ότι:

$$\text{όταν } \hat{b}_{RT,i} = 0 \text{ τότε } \gamma_i^* = 1 \quad (\text{X.1})$$

Επίσης, παρατηρώντας τη σχέση (81) μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όταν $\hat{b}_{RT,i}(t) = 0$ τότε ισχύει ότι:

$$P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) \Big|_{\hat{b}_{RT,i}=0} = \frac{P_T + A_i}{N_i + 1} \quad (\text{X.2})$$

Επίσης, αν ισχύει ότι $\frac{\partial^2 U_i^{R_i^*}(P_i)}{\partial P_i^2} \Big|_{P=\frac{P_T+A_i}{N_i+1}} < 0$, τότε οι τιμές που δίνονται να πάρει η μεταβλητή

$P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) \Big|_{\hat{b}_{RT,i}=0}$ ανήκουν στο μόνο κοίλο τμήμα της σιγμοειδούς συνάρτησης ευχαρίστησης

$U_i^{R_i^*}(\gamma(P_i), P_i)$; συνεπώς ισχύει ότι: $P_i^0 \Big|_{\hat{b}_{RT,i}=0} < P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) \Big|_{\hat{b}_{RT,i}=0}$. Συνεχίζοντας την ανάλυσή μας προς

αυτήν την κατεύθυνση, και σύμφωνα με τη σχέση (IX.3) στο λήμμα 5, όταν $\hat{b}_{RT,i}(t) = 0$ ισχύει ότι:

$$\frac{\partial^2 U_i^{R_i^*}(P_i)}{\partial P_i^2} \Big|_{\hat{b}_{RT,i}=0, P=\frac{P_T+A_i}{N_i+1}} = \frac{2aR_i^{\max} e^{-\gamma_i^* a} e^{-2a} (N_i+1)^3}{N_i^2 (P_T + A_i)^2 (1 + e^{-\gamma_i^* a})^3} \cdot \{e^{-\gamma_i^* a} [a(\gamma_i + N_i) + 2] - [a(\gamma_i + N_i) - 2]\} \quad (\text{X.3})$$

Αρκεί λοιπόν να αποδείξουμε ότι το δεξιό μέρος της σχέσης (X.3) είναι αρνητικό. Για να ισχύει κάτι τέτοιο και δεδομένου ότι $\gamma \geq 1$ και $\alpha_i \geq 1$ τότε σύμφωνα με την (X.3) πρέπει να ισχύει η ακόλουθη ανισότητα $e^{-\gamma_i^* a} [a(\gamma_i + N_i) + 2] - [a(\gamma_i + N_i) - 2] \leq 0$, κάτι το οποίο εύκολα μπορεί ναδειχθεί ότι είναι αληθές. Συνεπώς αποδείξαμε ότι όταν $\hat{b}_{RT,i} = 0$, τότε $P_i^0 \Big|_{\hat{b}_{RT,i}=0} < P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) \Big|_{\hat{b}_{RT,i}=0}$ ■

Παράρτημα XI – Απόδειξη Θεωρήματος 7

Σύμφωνα με το λήμμα 5, το σημείο καμπής P_i^0 της σιγμοειδούς συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i είναι μια συνεχής και αύξουσα συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή $\hat{b}_{RT,i}$ όταν $\hat{b}_{RT,i} \in [0, b_{RT,i}]$.

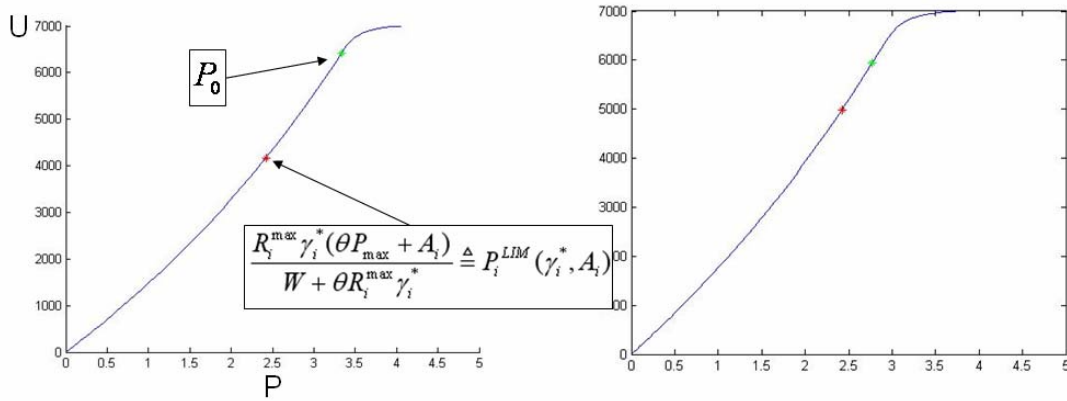
Για το λόγο αυτό, και καθώς έχουμε ήδη δείξει ότι όταν $\hat{b}_{RT,i} = 0$ τότε $P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) \Big|_{\hat{b}_{RT,i}=0} > P_i^0 \Big|_{\hat{b}_{RT,i}=0}$

σύμφωνα με το λήμμα 6, και ότι όταν $\hat{b}_{RT,i} = b_{RT,i}$ τότε $P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) \Big|_{\hat{b}_{RT,i}=0} < P_i^0 \Big|_{\hat{b}_{RT,i}=0}$, σύμφωνα με τον

ορισμό της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη στη σχέση (81), μπορούμε να συμπεράνουμε ότι υπάρχει πάντα μια τιμή για την παράμετρο $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με

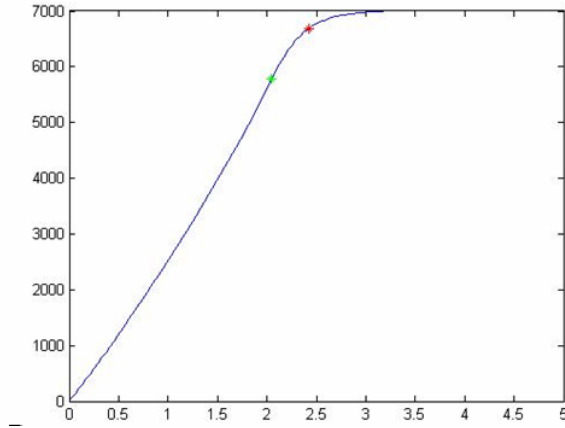
υπηρεσία πραγματικού χρόνου όταν $\hat{b}_{RT,i} \in (0, b_{RT,i})$, (την οποία ορίσαμε ως $\hat{b}_{RT,i}^*$) τέτοια ώστε $P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) \Big|_{\hat{b}_{RT,i} = \hat{b}_{RT,i}^*} = P_i^0 \Big|_{\hat{b}_{RT,i} = \hat{b}_{RT,i}^*}$ και επιπλέον, όταν $\hat{b}_{RT,i} \in [0, \hat{b}_{RT,i}^*)$ τότε ισχύει ότι $P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i) \Big|_{\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^*} > P_i^0 \Big|_{\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^*}$. Έτσι, ολοκληρώνεται και η απόδειξη του θεωρήματος.

Για να γίνει καλλίτερα κατανοητή η φυσική σημασία του παραπάνω θεωρήματος θα αποδοθεί σχηματικά το περιεχόμενό του. Στην συνέχεια (Σχήμα 31) φαίνονται τα γραφήματα της συνάρτησης ευχαρίστησης κάποιου χρήστη για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου b όπου φαίνονται τονισμένα τα σημεία καμπής και διαχωρισμού, με πράσινο και κόκκινο χρώμα αντίστοιχα.



Σχήμα 31. Συνάρτηση ευχαρίστησης χρήστη και τα σημεία καμπής και διαχωρισμού αυτής για διαφορετικές τιμές της μεταβλητής b

Όπως φαίνεται παραπάνω, όσο η τιμή της μεταβλητής b μικραίνει τόσο προσεγγίζουν τα σημεία διαχωρισμού και καμπής. Μετά από μεγάλη μείωση της b , δηλαδή στην περίπτωση που εξετάζουμε, παρατηρούμε την ακραία περίπτωση που αποδείχθηκε στο παραπάνω θεώρημα (θεώρημα 7) όπου η τιμή του σημείου διαχωρισμού της συνάρτησης είναι μεγαλύτερη από το σημείο καμπής της όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 32. Συνάρτηση ευχαρίστησης χρήστη και τα σημεία καμπής και διαχωρισμού στην περίπτωση όπου

$$\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^*.$$

Σε αυτό το σημείο παρατηρούμε την ασυνέχεια που ορίζει την παράμετρο b_{min} (Σχήμα 32) όπως αποδεικνύεται παρακάτω όπου ουσιαστικά αποδεικνύεται ότι η ασυνέχεια που παρατηρήσαμε οφείλεται στην αναδιάταξη των σημείων καμπής και διαχωρισμού για μία συνάρτηση χρησιμοποίησης. ■

Παράρτημα XII – Απόδειξη Θεωρήματος 8

Αρχικά, ορίσουμε την ακόλουθη συνάρτηση:

$$h_i(P) = U_i^{R_i^*}(P, \hat{b}_{RT,i}) - P \frac{\partial U_i^{R_i^*}(P, \hat{b}_{RT,i})}{\partial P} \equiv U_i^{R_i^{\max}}(P) - P \frac{\partial U_i^{R_i^*}(P)}{\partial P} \quad (\text{XII.1})$$

Επιπλέον, όπως έχει αποδειχθεί στο [80], λήμμα 3, η συνάρτηση ευχαρίστησης δικτύου $P_i(\lambda)$ ενός χρήστη i μεγιστοποιείται μόνο όταν η τιμή της ισχύος μετάδοσης που του ανατίθεται δίδει τιμές συνάρτησης ευχαρίστησης στο κοίλο τμήμα αυτής (δηλαδή όταν $P \in [P_i^0, P_{\max}]$, σε αυτό το τμήμα βρίσκεται η βέλτιστη λύση). Για αυτό το λόγο η αναζήτηση της λύσης της εξίσωσης $h_i(P)|_{P=P_i^*} = 0$, σύμφωνα και με τη σχέση (86), γίνεται μόνο εντός του διαστήματος τιμών $P_i^* \in [P_i^0, P_{\max}]$. Επιπροσθέτως, αφού σύμφωνα με το θεώρημα 4, όταν $\hat{b}_{RT,i} \in [0, \hat{b}_{RT,i}^*)$ τότε $P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)|_{\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^*} > P_i^0|_{\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^*}$, ισχύει ότι το κοίλο τμήμα της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη ως συνάρτηση της ισχύος μετάδοσής του, όταν $\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^*$, βρίσκεται μεταξύ των τιμών $P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)|_{\hat{b}_{RT,i} = \hat{b}_{RT,i}^*}$ και $P_{\max}$. Συνεπώς

$$\text{αν } \hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^* \text{ τότε } P_i^* \in [P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)|_{\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^*}, P_{\max}] \quad (\text{XII.2})$$

Επικεντρώνουμε την ανάλυσή μας και τη μελέτη της συνάρτησης $h_i(P)$ στο διάστημα $P_{\max} \geq P \geq P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)^{(*)}|_{\hat{b}_{RT,i} \leq \hat{b}_{RT,i}^*}$. Μπορούμε να συμπεράνουμε αρχικά ότι αφού:

$$\frac{\partial h_i(P)}{\partial P} = -P \frac{\partial^2 U_i^{R_i}(P)}{\partial P^2} \geq 0. \text{ Γιατί } \frac{\partial^2 U_i^{R_i}(P)}{\partial P^2} < 0 \quad \forall P > P_i^0; \text{ τότε η } h_i(P) \text{ είναι αύξουσα και συνεχής συνάρτηση ως προς } P \text{ και } P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)|_{\hat{b}_{RT,i} \leq \hat{b}_{RT,i}^*} \geq P_i^0|_{\hat{b}_{RT,i} \leq \hat{b}_{RT,i}^*}.$$

Έτσι, αν αποδείξουμε ότι υπάρχει μία και μόνο μία τιμή της μεταβλητής $\hat{b}_{RT,i}$, την οποία και συμβολίζουμε ως $\hat{b}_{RT,i}^{**} \in [0, \hat{b}_{RT,i}^*)$, τέτοια ώστε $h_i(P)|_{P=P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)^{(*)}|_{\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^{**}}} > 0$, όταν $\hat{b}_{RT,i} \in [0, \hat{b}_{RT,i}^{**})$, θα έχουμε ολοκληρώσει την απόδειξή μας όταν θα έχουμε δείξει ότι δεν υπάρχει εφικτή τιμή για το P_i^* . Μετά από αρκετούς μαθηματικούς μετασχηματισμούς, μπορούμε να καταλήξουμε βάσει της σχέσης (XII.1) στην ακόλουθη αναλυτική μορφή της:

$$h_i(P)|_{P=P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)^{(*)}|_{\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^*}} = R_i^{\max} \frac{N_i + N_i e^{a(b-\gamma_i^*)} - N_i e^{-a\gamma_i^*} - N_i e^{a(b-2\gamma_i^*)} - N_i a\gamma_i^* e^{-a\gamma_i^*} - N_i a\gamma_i^* e^{a(b-\gamma_i^*)} - a(\gamma_i^*)^2 e^{-a\gamma_i^*} - a(\gamma_i^*)^2 e^{a(b-\gamma_i^*)}}{N_i (1 + e^{a(b-\gamma_i^*)})^2} \quad (\text{XII.3})$$

στην οποία έχουμε θεωρήσει το συμβολισμό $\hat{b}_{RT,i} \equiv b$, μόνο και μόνο για λόγους καλλίτερης παρουσίασης. Αφού ο παρανομαστής στη σχέση (XII.3) παίρνει μόνο μη αρνητικές τιμές πρέπει να επικεντρωθούμε στον αριθμητή και να εξετάσουμε το πρόσημό του. Για το λόγο αυτό ορίζουμε την ακόλουθη συνάρτηση:

$$H_i(P, b) = N_i + N_i e^{a(b-\gamma_i^*)} - N_i e^{-a\gamma_i^*} - N_i e^{a(b-2\gamma_i^*)} - N_i a\gamma_i^* e^{-a\gamma_i^*} - N_i a\gamma_i^* e^{a(b-\gamma_i^*)} - a(\gamma_i^*)^2 e^{-a\gamma_i^*} - a(\gamma_i^*)^2 e^{a(b-\gamma_i^*)}.$$

Μέσω αναλυτικών πράξεων μπορούμε να δείξουμε ότι για την παραπάνω συνάρτηση ισχύει ότι,

$$\frac{\partial H_i(P, b)}{\partial b} = (1 - a\gamma_i^*) N_i a e^{a(b-\gamma_i^*)} - N_i a e^{a(b-2\gamma_i^*)} - (a\gamma_i^*)^2 e^{a(b-\gamma_i^*)} < 0 \quad (\text{XII.4})$$

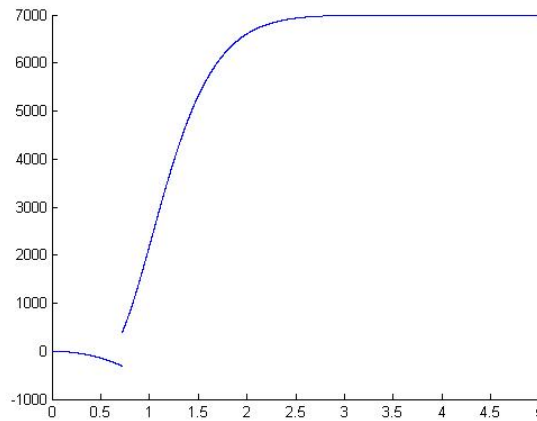
και

$$H_i(P, b)|_{\hat{b}_{RT,i}=0} = N_i + N_i (e^{-2a} - 2ae^{-a}) - 2ae^{-a} > 0 \quad (\text{XII.5})$$

Μέσω των ανισοτήτων (XII.4) και (XII.5) μπορούμε να αποδείξουμε ότι αφού α) ο αριθμητής της συνάρτησης $h_i(P)|_{P=P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)^{(*)}|_{\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^{**}}}$ είναι μια συνεχής και φθίνουσα συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή b , και $h_i(P)|_{P=P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)^{(*)}|_{\hat{b}_{RT,i}=0}} > 0$ και β) ο παρανομαστής της συνάρτησης

$h_i(P)|_{P=P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)^{(*)}}|_{\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^{**}}$ είναι πάντα θετικός, αν μειώσουμε σταδιακά την τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου από την τιμή $\hat{b}_{RT,i}^*$ έως την 0 , τότε υπάρχει πάντα μια και μοναδική τιμή της παραμέτρου $\hat{b}_{RT,i}$, την οποία και συμβολίζουμε ως $\hat{b}_{RT,i}^{**}$, τέτοια ώστε $h_i(P)|_{P=P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)^{(*)}}|_{\hat{b}_{RT,i} = \hat{b}_{RT,i}^{**}} = 0$ και όταν $\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^{**}$ τότε $h_i(P)|_{P=P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)^{(*)}}|_{\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^{**}} > 0$; για αυτό όταν $\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^{**}$, δεν υπάρχει τιμή της $P_i^* \in [P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)|_{\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^{**}}, P_{\max}]$ τέτοια ώστε $h_i(P)|_{P=P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)^{(*)}}|_{\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^{**}} = 0$, ολοκληρώνοντας την απόδειξή μας.

Τέλος, αξίζει να επισημάνουμε τα εξής. Η ασυνέχεια που παρατηρήθηκε παραπάνω και σηματοδοτεί την ύπαρξη του b_{min} οφείλεται ουσιαστικά στην ανυπαρξία εύρεσης λύσης της εξίσωσης $U_i^{R_i^*}(P) - P \frac{\partial U_i^{R_i^*}(P)}{\partial P}$ για το διάστημα $P_i^* \in [P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)|_{\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^*}, P_{\max}]$. Η εξίσωση αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της παραμέτρου λ_{max} στην περίπτωση σιγμοειδούς συνάρτησης χρησιμοποίησης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ότι η ασυνέχεια που παρατηρήθηκε παραπάνω οφείλεται στην ασυνέχεια που υπάρχει στη γραφική παράσταση της παραπάνω εξίσωσης της οποίας αναζητούμε λύση.



Σχήμα 33. Γραφική απεικόνιση της συνάρτησης $h(P)$ και της ασυνέχειας αυτής στην περίπτωση όπου

$$\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^{**}.$$

Παραπάνω βλέπουμε ότι για τη συγκεκριμένη τιμή της παραμέτρου b που εμφανίζεται η ασυνέχεια στο διάγραμμα $\lambda_{max} - b$ του Σχήματος 14, εμφανίζεται ασυνέχεια και στο διάγραμμα της εξίσωσης $h(P)$ ως προς P . Λόγω της ασυνέχειας αυτής βλέπουμε ότι η εξίσωση δεν διαθέτει λύση στο διάστημα $P_i^* \in [P_i^{LIM}(\gamma_i^*, A_i)|_{\hat{b}_{RT,i} < \hat{b}_{RT,i}^*}, P_{\max}]$, δεξιά τμήμα της συνάρτησης στο Σχήμα 33. ■

Παράρτημα XIII – Απόδειξη Λήμματος 7

Σύμφωνα με τις σχέσεις (85) και (86), η βέλτιστη τιμή κόστους $\lambda_i^{\max}$ ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου μπορεί να υπολογιστεί όταν $\hat{b}_{RT,i} \gg b_{RT,i}$ ως:

$$\lambda_i^{\max} = \left. \frac{\partial U_i^{R_i^*}(P)}{\partial P} \right|_{P=P_i^*}.$$

Επιπλέον, πρέπει να ισχύει ότι $U_i^{R_i^*}(P_i^*) - P_i^* \lambda_i^{\max} = 0$, όπου έπειτα από αντικαταστάσεις και μαθηματικούς χειρισμούς της σχέσης καταλήγουμε στην ακόλουθη:

$$e^{-a(\gamma(P_i^*) - \hat{b}_{RT,i}(t))} = \frac{R_i^{\max} c_i}{P_i^* \lambda_i^{\max} + R_i^{\max} c_i d_i} - 1 \quad (\text{XIII.1})$$

και λύνοντας ως προς $\hat{b}_{RT,i}$ ισχύει ότι:

$$\hat{b}_{RT,i} = \frac{1}{a} \left\{ \ln \left(\frac{R_i^{\max} c_i}{P_i^* \lambda_i^{\max} + R_i^{\max} c_i d_i} - 1 \right) + a\gamma(P_i^*) \right\} \quad (\text{XIII.2})$$

Ακόμα, γνωρίζουμε ότι:

$$\lambda_i^{\max} = \left. \frac{U_i^{R_i^*}(P)}{P} \right|_{P=P_i^*} = \frac{Wa(P_{\max} + A_i)[R_i^{\max} c_i(1-d_i) - P_i^* \lambda_i^{\max}](P_i^* \lambda_i^{\max} + R_i^{\max} c_i d_i)}{(P_{\max} - P_i^* + A_i)^2 (R_i^{\max})^2 c_i}$$

και με αντικατάσταση των παραπάνω σχέσεων στην αναλυτική έκφραση της εξίσωσης $U_i^{R_i^*}(P_i^*) - P_i^* \lambda_i^{\max} = 0$, καταλήγουμε στο παρακάτω τριώνυμο:

$$A'(P_i^*)^2 + B'(P_i^*) + C' = 0 \quad (\text{XIII.3})$$

όπου $A' = k_i (\lambda_i^{\max})^2 + \lambda_i^{\max} c_i (R_i^{\max})^2$,

$$B' = R_i^{\max} c_i \lambda_i^{\max} [-k_i(1-2d_i) - 2R_i^{\max} (P_{\max} + A_i)],$$

$$C' = (R_i^{\max})^2 c_i [\lambda_i^{\max} (P_{\max} + A_i)^2 - c_i d_i (1-d_i)] \text{ όπου } k_i = Wa_i (P_{\max} + A_i).$$

Συνεπώς, για να έχει η εξίσωση (XIII.3) εφικτή λύση, την P_i^* , όταν $\hat{b}_{RT,i} \gg b_{RT,i}$, και επιπλέον $P_i^* \leq P_{\max}$, οι ακόλουθες δύο συνθήκες θα πρέπει να ισχύουν (χωρίς βλάβη της γενικότητας της απόδειξης και για απλότητα στην παρουσίαση, στην συνέχεια της απόδειξης μας θεωρούμε ότι

αφού $\hat{b}_{RT,i} \gg b_{RT,i}$ ισχύει ότι $c_i=L, d_i=0$:

1. $\Delta = (B')^2 - 4A'C' \geq 0$ η οποία μετά από απλούς μαθηματικούς χειρισμούς καταλήγει στην ακόλουθη ανισότητα:

$$\lambda_i^{\max} \leq \frac{aW + 4R_i^{\max}}{A_i + 4P_{\max}} \quad (\text{XIII.4})$$

2. $P_i^* \leq P_{\max}$, όπου σύμφωνα με τη σχέση (XIII.3):

$$P_i^* = \frac{-B' \pm \sqrt{\Delta}}{2A'} = R_i^{\max} (P_{\max} + A_i) \frac{[aW + 2R_i^{\max}] \pm \sqrt{aW[aW + 4R_i^{\max} - 4\lambda_i^{\max}(P_{\max} + A_i)]}}{2[k_i\lambda_i^{\max} + (R_i^{\max})^2]} \quad (\text{XIII.5})$$

Παράλληλα, αφού πρέπει $P_i^* > 0$ και συνεπώς βάσει της παραπάνω σχέσης $aW \gg 4R_i^{\max} - 4\lambda_i^{\max}(P_{\max} + A_i)$, για να ισχύει ότι $P_i^* \leq P_{\max}$ η ακόλουθη ανισότητα θα πρέπει να ισχύει:

$$\frac{R_i^{\max}(P_{\max} + A_i)(aW + R_i^{\max})}{k_i\lambda_i^{\max} + (R_i^{\max})^2} \leq P_{\max}$$

η οποία μέσω απλών μαθηματικών χειρισμών καταλήγει στην ακόλουθη ανισότητα:

$$\lambda_i^{\max} \geq \frac{R_i^{\max}}{P_{\max}} + \frac{A_i R_i^{\max}}{aWP_{\max}(P_{\max} + A_i)} \quad (\text{XIII.6})$$

Τέλος, από την παραπάνω σχέση (XIII.6) καθώς και την (XIII.2) μπορούμε να καθορίσουμε ένα άνω όριο για την μεταβλητή $\hat{b}_{RT,i}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης ενός χρήστη i με υπηρεσία πραγματικού χρόνου όταν $\hat{b}_{RT,i} \gg b_{RT,i}$, ως εξής:

$$\hat{b}_{RT,i} \leq \frac{1}{a} \left\{ \ln \left(\frac{c_i}{1 + \frac{A_i}{aW(P_{\max} + A_i)} + c_i d_i} - 1 \right) + \frac{aWP_{\max}}{R_i^{\max} A_i} \right\} \equiv B_{MAX,i}(A_i) \quad \blacksquare$$

Παράρτημα XIV – Απόδειξη Λήμματος 8

Σύμφωνα με τις σχέσεις (XIII.2) και (XIII.5) του λήμματος 7 μπορούμε να καταλήξουμε ότι όταν

$\hat{b}_{RT,i} \gg b_{RT,i}$ τότε:

$$\hat{b}_{RT,i} = \frac{1}{a} \left\{ \ln \left(\frac{\lambda_i^{\max} a W (P_{\max} + A_i) + (R_i^{\max})^2}{\lambda_i^{\max} (P_{\max} + A_i) [a W + 2 R_i^{\max}]} - 1 \right) + \frac{a W + R_i^{\max}}{\lambda_i^{\max} (P_{\max} + A_i) - R_i^{\max}} \right\}$$

Τέλος, μέσω μαθηματικών χειρισμών μπορούμε εύκολα να δείξουμε ότι

$$\frac{\partial^2 \hat{b}_{RT,i}}{\partial (\lambda_i^{\max})^2} = \frac{(P_{\max} + A_i) \{ (P_{\max} + A_i) [2aW + 2R_i^{\max} - R_i^{\max} \lambda_i^{\max}] + (R_i^{\max})^2 \}}{[\lambda_i^{\max} (P_{\max} + A_i) - R_i^{\max}]^3} > 0$$

αφού $W \gg R_i^{\max}$ και επιπλέον $\lambda_i^{\max} > \frac{R_i^{\max}}{P_{\max} + A_i}$ (αφού βάσει της σχέσης (XIII.6) του λήμματος 7 έχουμε

δείξει ότι όταν $\hat{b}_{RT,i} \gg b_{RT,i}$ τότε $\lambda_i^{\max} \geq \frac{R_i^{\max}}{P_{\max}} > \frac{R_i^{\max}}{P_{\max} + A_i}$); ολοκληρώνοντας την απόδειξή μας. ■

Βιβλιογραφία

- [1] P. Bender, P. Black, M. Grob, R. Padovani, N. Sindhushyana, and S. Viterbi, "CDMA/HDR: a bandwidth efficient high speed wireless data service for nomadic users," *IEEE Communications Magazine*, vol.38, no.7, p.p.70-77, Jul 2000.
- [2] N. Bhushan, C. Lott, P. Black, R. Attar, J. Yu-Cheun, M. Fan, D. Ghosh, and J. Au , "CDMA2000 1×EV-DO revision a: a physical layer and MAC layer overview," *IEEE Communications Magazine*, vol.44, no.2, p.p. 37-49, Feb. 2006.
- [3] R. Attar, D. Ghosh, C. Lott, M. Fan; P. Black, R. Rezaiifar, and P. Agashe, "Evolution of cdma2000 cellular networks: multicarrier EV-DO," *IEEE Communications Magazine*, vol.44, no.3, p.p. 46-53, March 2006.
- [4] S. Borst, "User-level performance of channel-aware scheduling algorithms in wireless data networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.13, no.3, pp. 636-647, June 2005.
- [5] S. Shakkottai and A. L. Stolyar, "Scheduling algorithms for a mixture of real-time and non-real-time data in HDR," in *Proc. of Teletraffic Engineering in the Internet Era, ITC-17*, Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, pp. 793-804, 2001.
- [6] S. C. Borst, K. Kumaran, K. Ramanan, and P. A. Whiting, "Queueing models for user-level performance of Proportional Fair scheduling," *Bell Labs, Lucent Technologies, Murray Hill, NJ, Tech. Memo.*, 2002.
- [7] S. C. Borst and P. A. Whiting, "Dynamic rate control algorithms for HDR throughput optimization," in *Proc. IEEE Infocom'01*, pp. 976-985, 2001.
- [8] J. M. Holtzman, "CDMA forward link waterfilling power control," in *Proc. IEEE VTC 2000 Spring Conf.*, pp. 1663-1667, 2000.
- [9] J. Zhang and T. Konstantopoulos, "Multiple-access interference processes are self-similar in multimedia CDMA cellular networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.51, no.3, pp.1024-1038, March 2005.
- [10] L. Xu, X. Shen, and J. W. Mark, "Fair resource allocation with guaranteed statistical QoS for multimedia traffic in wideband CDMA cellular network," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 4, no. 2, pp. 166-177, March-April 2005.
- [11] S. Yao and E. Geraniotis, "Optimal Power Control Law for Multimedia Multirate CDMA Systems," in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, pp. 392-396, Apr. 1996.
- [12] C.-L. I and K. K. Sabnani, "Variable Spreading Gain CDMA with Adaptive Control for True Packet Switching Wireless DS/CDMA Networks," *Proc. IEEE Int'l Conf. Comm.*, pp. 725-730,

1995.

- [13] I.E. Akyildiz, D.A. Levine and I. Joe, "A Slotted CDMA Protocol with BER Scheduling for Wireless Multimedia Networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 7, pp. 146-158, Apr. 1999.
- [14] J.H. Kim, T.S. Kim, Y.W. Kim and D.K. Sung, "Hybrid Channel Assignment Scheme for Accommodating Voice/Data Traffic in DS-CDMA Cellular Systems," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 49, pp. 1566-1577, Sept. 2000.
- [15] L. Song and N.B. Mandayam, "Hierarchical SIR and Rate Control on the Forward Link for CDMA Data Users under Delay and Error Constraints," *IEEE J. Selected Areas Comm.*, vol. 19, pp. 1871-1882, Oct. 2001
- [16] A.C. Kam, T. Minn and K.-Y. Siu, "Supporting Rate Guarantee and Fair Access for Bursty Data Traffic in W-CDMA," *IEEE J. Selected Areas Comm.*, vol. 19, pp. 2121-2130, Oct. 2001
- [17] M. Hu and J. Zhang, "Two novel schemes for opportunistic multi-access," in *Proc. of Multimedia Signal Processing*, pp. 412-415, 9-11 Dec. 2002.
- [18] M. Hu, J. Zhang, and J. Sadosky, "Traffic aided opportunistic scheduling for wireless networks: algorithms and performance bounds," *Computer Networks*, vol. 46, no. 4, pp. 505-518, 2004.
- [19] V. Tsibonis, L. Georgiadis, and L. Tassiulas, "Exploiting wireless channel state information for throughput maximization," in *Proc. of IEEE Infocom '03*, pp. 301-310, 2003.
- [20] R. Agrawal and V. Subramanian, "Optimality of certain channel-aware scheduling policies," in *Proc. of 40th Annu. Allerton Conf. Communications, Control, and Computing*, pp. 1532-1541, 2002.
- [21] W. Wu, A. Arapostathis and S. Shakkottai, "Optimal power allocation for a time-varying wireless channel under heavy-traffic approximation," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.51, no.4, pp. 580-594, April 2006.
- [22] W. Yang and G. Xu, "The optimal power assignment for smart antenna downlink weighting vector design," in *Proc. IEEE Veh. Tech. Conf.* Ottawa, ON, Canada, May 1998, pp. 485-488.
- [23] W. Yang and G. Xu, "Optimal downlink power assignment for smart antenna systems," in *Proc. of IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process.* Seattle, WA, May 1998, pp. 3337-3340.
- [24] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 48, no. 3, pp. 1277-1294, Jun. 2002.
- [25] M. Schubert and H. Boche, "Solution of the multiuser downlink beamforming problem with individual SINR constraints," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 53, no. 1, pp. 18-28, Jan. 2004.
- [26] M. Schubert and H. Boche, "Solvability of coupled downlink beamforming problems," in *Proc. of IEEE Global Telecommun. Conf.* San Antonio, TX, Nov. 2001, pp. 614-618.

- [27] S. Nanda, K. Balachandran, and S. Kumar, "Adaptation techniques in wireless packet data services," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 38, no. 1, pp. 54-64, Jan. 2000.
- [28] T. L. Marzetta, "BLAST training: Estimating channel characteristics for high capacity space-time wireless," in *Proc. of the 37th Annu. Allerton Conf. Commun., Control, Computing* Monticello, IL, Sep. 1999, pp. 958-966.
- [29] H. Boche and M. Schubert, "Optimal multi-user interference balancing using transmit beamforming," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 26, no. 4, pp. 305-324, Sep. 2003.
- [30] H. Boche and M. Schubert, "Solution of the SINR downlink beamforming problem," in *Proc. of Conf. Inform. Sci. Syst.* Princeton, NJ, [CD-ROM], Mar. 2002.
- [31] S. Shenker, "Fundamental design issues for the future Internet," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 13, no. 7, pp. 1176-1188, September 1995.
- [32] F. P. Kelly, A. Maulloo, and D. Tan, "Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability," *Journal of Operations Research Society*, vol. 49, no. 3, pp.237-252, March 1998.
- [33] C. Li and X. Wang, "Adaptive opportunistic fair scheduling over multiuser spatial channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol.53, no.10, pp. 1708-1717, Oct. 2005.
- [34] P. Gupta and A. L. Stolyar, "Optimal Throughput Allocation in General Random-Access Networks," in *Proc. of the 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems*, pp.1254-1259, 22-24 March 2006.
- [35] R. Jantti and Seong-Lyun Kim, "Transmission rate scheduling for the non-real-time data in a cellular CDMA system," *IEEE Communications Letters*, vol.5, no.5, pp.200-202, May 2001.
- [36] D. N. Tse, "Optimal power allocation over parallel Gaussian broadcast channels," in *Proc. of Int. Symp. Information Theory*, Ulm, Germany, June 1997, p.p. 27.
- [37] F. Berggren, S. L. Kim, and J. Zander, "Joint Power Control and Intracell Scheduling of DS-CDMA Nonreal Time Data," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 19, no. 10, p.p. 1860-1870, October 2001.
- [38] A. Jalali, R. Padovani, and R. Pankaj, "Data Throughput of CDMAHDR A High Efficiency-High Data Rate Personal Communication Wireless System," in *Proc. of VTC*, p.p. 1854-1858, 2000.
- [39] H. J. Kushner and P. A. Whiting, "Convergence of proportional-fair sharing algorithms under general conditions," *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol.3, no.4, p.p. 1250-1259, July 2004.
- [40] F. Berggren and R. Jäntti, "Asymptotically Fair Transmission Scheduling Over Fading Channels," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol.3, no.1, pp. 326- 336, January 2004.

- [41] Xin Liu, Edwin K.P. Chong and Ness B. Shroff, "A Framework for Opportunistic Scheduling in Wireless Networks," *Computer Networks*, vol. 41, p.p. 451–474, March 2003.
- [42] Y. Liu, S. Gruhl, and E. Knightly, "WCFQ: An Opportunistic Wireless Scheduler with Statistical Fairness Bounds," *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 2, no. 5, p.p. 1017 - 1028, Sept. 2003.
- [43] M. Andrews, L. Qian, and A. Stolyar, "Optimal utility based multi-user throughput allocation subject to throughput constraints," in *Proc. of IEEE INFOCOM '05*, vol. 4, p.p. 2415-2424, March 2005.
- [44] T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "QoS Provisioning in Wireless Data Networks under Non-Continuously Backlogged Users" in *Proc. of 6th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks and Workshops (RAWNET 2008)*. WiOpt 2008, p.p.71 - 76. April, 2008.
- [45] C. Li and S. Papavassiliou, "Fair channel-adaptive rate scheduling in wireless networks with multirate multimedia services," *IEEE J. Sel. Areas Comm.*, vol. 21, p.p. 1604–1614, Dec. 2003.
- [46] S. Kulkarni and C. Rosenberg, "Opportunistic scheduling policies for wireless systems with short term fairness constraints," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, vol. 1, p.p. 533–537, Nov. 2003.
- [47] M. Andrews, K. Kumaran, K. Ramanan, A. Stolyar, P. Whiting, and R. Vijayakumar, "Providing quality of service over a shared wireless link," *IEEE Communications Magazine*, vol.39, no.2, p.p.150-154, Feb. 2001.
- [48] F. Meshkati, A.J. Goldsmith, H.V. Poor and S.C. Schwartz, "A Game-Theoretic Approach to Energy-Efficient Modulation in CDMA Networks with Delay QoS Constraints", *IEEE J. Sel. Areas Communications*, vol. 25, no. 6, p.p. 1069-1078, Aug. 2007.
- [49] S. Shakkottai and A. Stolyar, "Scheduling for multiple flows sharing a time-varying channel: the exponential rule", *American Mathematical Society Translations*, Series 2, vol. 207, 2002.
- [50] S. Shakkottai, R. Srikant, and A. Stolyar, "Pathwise optimality of the exponential scheduling rule for wireless channels," *Advances in Applied Probabilities* (36), no. 4, p.p. 1021-1045, 2004.
- [51] T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "Satisfying Elastic Short Term Fairness in High Throughput Wireless Communication Systems with Multimedia Services", in *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC 2007)*, p.p. 5064-5069, June 2007.
- [52] T. Kastrinogiannis, and Symeon Papavassiliou, "Probabilistic Resource Allocation under Opportunistic Scheduling in Wireless Networks with Multimedia Services", in *Proc. of 12th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2007)*, p.p.699-705, July 2007.

- [53] T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "Probabilistic Short-term Delay and Throughput Requirements of Multimedia Services in High Throughput Wireless Networks", in *Proc. of IEEE Sarnoff Symposium on Advances in Wired and Wireless Communications 2007*, p.p.1-5, April 2007.
- [54] T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "Utility based Short-term Throughput Driven Scheduling Approach for Efficient Resource Allocation in CDMA Wireless Networks", in *Wireless Personal Communications journal special issue on "Resource and Mobility Management and Cross-Layer Design for the Support of Multimedia Services in Heterogeneous Emerging Wireless Networks"*, Springer. Published online: 13 November 2008
- [55] S. Sarkar and L. Tassiulas, "Fair allocation of utilities in multirate multicast networks: A framework for unifying diverse fairness objective," *IEEE Trans. on Automated Control*, vol. 47, no.6, p.p. 931-944, Jun. 2002.
- [56] H. Wang and N. Moayeri, "Finite-state Markov channel – a useful model for radio communication channels," *IEEE Trans. on Vehic. Tech.*, vol. 44, p.p. 163–171, March 1995.
- [57] J.-W. Lee, R.R. Mazumdar, and N.B. Shroff, "Downlink power allocation for multi-class wireless systems," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 13, no. 4, pp. 854-867, Aug. 2005.
- [58] S. Boyd and L. Vandenberghe, "Convex Optimization," *Cambridge University Press*, 2004.
- [59] R. T. Rockafellar, "Network Flows and Monotropic Programming," *Athena Scientific*, 1998.
- [60] R. T. Rockafellar, "Lagrange multipliers and optimality," *SIAM Review*, vol. 35, pp. 183-283, 1993.
- [61] D. P. Bertsekas, "Nonlinear Programming," 2nd ed. Belmont, MA: Athena Scientific, 1999.
- [62] M. Chiang, "Nonconvex optimization of communication systems," *Advances in Mechanics and Mathematics, Special volume on Strang's 70th Birthday*, Ed., D. Gao and H. Serali, Springer, 2008.
- [63] M. Fazel and M. Chiang, "Nonconcave network utility maximization by sum of squares programming," in *Proc. of IEEE Conference on Decision and Control*, Dec. 2005.
- [64] J. W. Lee, R. Mazumdar, and N. B. Shroff, "Non-convex optimization and rate control for multi-class services in the Internet," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 13, no. 4, pp. 827-840, Aug. 2005.
- [65] R. Cendrillon, J. Huang, M. Chiang, and M. Moonen, "Autonomous Spectrum Balancing (ASB) for digital subscriber loop," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol.55, no.8, pp.4241-4257, Aug. 2007.
- [66] D. Xu, M. Chiang, and J. Rexford, "DEFT: Distributed exponentially-weighted flow splitting," in *Proc. of IEEE Infocom '07*, pp.71-79, 6-12 May 2007.

- [67] M. Chiang, C. W. Tan, D. Palomar, D. O'Neill, and D. Julian, "Power control by geometric programming," *IEEE Transactions on Wireless Comm.*, vol.6, no.7, pp.2640-2651, July 2007.
- [68] F. Meshkati, H. V. Poor, and S. C. Schwartz, "A Non-Cooperative Power Control Game in Delay-Constrained Multiple-Access Networks," in *Proc. of IEEE International Symp. on Information Theory (ISIT '05)*, Adelaide, Australia, Sept. 2005.
- [69] F. Meshkati, A. Goldsmith, H. Poor, and S. Schwartz, "A Game-Theoretic Approach to Energy-Efficient Modulation in CDMA Networks with Delay Constraints," in *Proc. of IEEE Radio and Wireless Symposium*, pp.11-14, Jan. 2007.
- [70] S. Lu, V. Bharghavan, and R. Srikant, "Fair scheduling in wireless packet networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 7, no. 4, pp. 473–489, 1999.
- [71] T.-H. Lee, J.-C. Lin, and T. S. Yu, "Downlink power control algorithms for cellular radio systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 1, pp. 89–94, 1995.
- [72] S. Borst, and P. Whiting, "Dynamic rate control algorithms for HDR throughput optimization," in *Proc. of IEEE INFOCOM'01*, vol.2, pp.976-985, 2001.
- [73] J. B. Kim, and M. L. Honig, "Resource allocation for multiple classes of DS-CDMA traffic," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 2, pp. 506–519, 2000.
- [74] Tobias Harks, "Utility Proportional Fair Bandwidth Allocation: An Optimization Oriented Approach," in *Proc. of QoS in Multiservice IP Networks*, Springer LNCS 3375, pp. 61-74, Catania, Italy, 2005.
- [75] P. Hande, S. Zhang, and M. Chiang, "Distributed Rate Allocation for Inelastic Flows," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, no. 6, p.p. 1240-1253, Dec. 2007.
- [76] M. Dianati, X. S. Shen, and K. Naik, "Cooperative Fair Scheduling for the Downlink of CDMA Cellular Networks" *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 4, p.p. 1749–1760, Jul. 2007.
- [77] X. Duan, Z. Niu, and J. Zheng, "Utility optimization and fairness guarantees for multimedia traffic in the downlink of DS-CDMA systems," in *Proc. of Global Telecommunications Conf. 2003 (GLOBECOM '03)*, vol.2, no.2, p.p. 940-944, 1-5 Dec. 2003.
- [78] X. Duan, Z. Niu, and J. Zheng, "A Dynamic Utility-Based Radio Resource Management Scheme for Mobile Multimedia DS-CDMA Systems," in *Proc. of IEEE Global Telecommunications Conf. 2002 (GLOBECOM'02)*, Taipei, Taiwan, 17-21 Nov. 2002.
- [79] M. Xiao, N. B. Shroff, and E. K. P. Chong, "Utility-based power control (UBPC) in cellular wireless systems," in *Proc. of IEEE Infocom'01*, 2001, p.p. 412–421.

- [80] J.-W. Lee, R. R. Mazumdar, and N. B. Shroff, "Joint resource allocation and base-station assignment for the downlink in CDMA networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 14, no. 1, Feb. 2006.
- [81] J.-W. Lee, R.R. Mazumdar, and N.B. Shroff, "Opportunistic Power Scheduling for Multi-server Wireless Systems with Minimum Performance Constraints" in *Proc. of IEEE INFOCOM '04*, vol.4, Mar. 2004.
- [82] J.-W. Lee, R.R. Mazumdar, and N.B. Shroff, "Opportunistic power scheduling for dynamic multi-server wireless systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no.6, pp. 1506-1515, Jun. 2006.
- [83] X. Lin, N. B. Shroff, and R. Srikant, "A Tutorial on Cross-Layer Optimization in Wireless Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm. on "Non-Linear Optimization of Communication Systems"*, vol. 24, no 8, pp. 1452- 1463, June 2006.
- [84] Dahai Xu, Ying Li, M. Chiang, and A. Calderbank, "Elastic service availability: utility framework and optimal provisioning," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.26, no.6, pp.55-65, Aug. 2008.
- [85] D. P. Palomar and M. Chiang, "A tutorial on decomposition methods for network utility maximization," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, vol.24, no.8, pp.1439-1451, Aug. 2006.
- [86] T. Kastrinogiannis, S. Papavassiliou, K. Kastrinogiannis, and D. Soulios, "A Utility-based Resource Allocation Approach for the Downlink in CDMA Wireless networks with Multimedia Services", in *Proc. of the 18th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2007. (PIMRC 2007)*. p.p.1-5, Sept. 2007.
- [87] S.-J. Oh and K. M. Wasserman, "Optimality of greedy power control and variable spreading gain in multi-class CDMA mobile networks," in *Proc. ACM Mobicom*, pp. 102–112, 1999.
- [88] S.-J. Oh, T. L. Olsen, and K. M. Wasserman, "Distributed power control and spreading gain allocation in CDMA data networks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, vol. 2, pp. 379–385, 2000.
- [89] Stuber, "*Principles of Mobile Communication*," Norwell, MA: Kluwer Academic, 1996.
- [90] D. Goodman and N. Mandayam, "Power control for wireless data," *IEEE Pers. Communications*, vol. 7, pp. 48–54, Apr. 2000.
- [91] H. Ji and C.-Y. Huang, "Non-cooperative uplink power control in cellular radio systems," *Wireless Networks*, vol. 4, pp. 233–240, Apr. 1998.
- [92] T. Alpcan, T. Basar, R. Srikant, and E. Altman, "CDMA uplink power control as a noncooperative game," *Wireless Networks*, vol. 8, pp. 659–669, Nov. 2002.

- [93] S. Gunturi and F. Paganini, "Game theoretic approach to power control in cellular CDMA," in *Proc. of 58th IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC)*, pp. 2362–2366, Orlando, FL, Oct. 2003.
- [94] K.-K. Leung and C. W. Sung, "An opportunistic power control algorithm for cellular network," *IEEE/ACM Trans. on Netw.*, vol.14, no.3, pp. 470-478, Jun. 2006.
- [95] C. W. Sung and W. S. Wong, "A noncooperative power control game for multirate CDMA data networks," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 2, pp. 186–194, Jan. 2003.
- [96] E. Altman and Z. Altman, "S-modular games and power control in wireless networks," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 48, pp. 839–842, May 2003.
- [97] V. Shah, N. B. Mandayam, and D. J. Goodman, "Power control for wireless data based on utility and pricing," in *Proc. of 9th IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, pp. 1427–1432, Boston, MA, Sept. 1998.
- [98] D. J. Goodman and N. B. Mandayam, "Power control for wireless data," *IEEE Personal Commun.*, vol. 7, pp. 48–54, Apr. 2000.
- [99] C. U. Saraydar, N. B. Mandayam, and D. J. Goodman, "Efficient power control via pricing in wireless data networks," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 50, pp. 291–303, Feb. 2002.
- [100] F. Meshkati, H. V. Poor, S. C. Schwartz, and N. B. Mandayam, "An energy-efficient approach to power control and receiver design in wireless data networks," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 52, pp. 1885–1894, Nov. 2005.
- [101] N. Feng, S.-C. Mau, and N. B. Mandayam, "Pricing and power control for joint network-centric and user-centric radio resource management," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 52, pp. 1547–1557, Sept. 2004.
- [102] C. W. Sung, K. W. Shum, and K.-K. Leung, "Stability of distributed power and signature sequence control for CDMA systems-a game-theoretic framework," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.52, no.4, pp.1775-1780, Apr. 2006.
- [103] F. Meshkati, H. V. Poor, S. C. Schwartz, and R. Balan, "Energy-Efficient Resource Allocation in Wireless Networks with Quality-of-Service Constraints," in *preprint, Princeton University*, 2005.
- [104] T. Kastrinogiannis, E. E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, "Utility-based Uplink Power Control in CDMA Wireless Networks with Real-Time Services," in *Proc. of Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks (LNCS)*, Springer, vol. 5198, p.p. 307-320, Sept. 2008.
- [105] T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "Game Theoretic Distributed Uplink Power Control in CDMA Networks with Real-Time Services," *Computer Communications, Elsevier*. Available online: 20 November 2008.

- [106] E. E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "QoS-Driven Uplink Power Control in Multi-Service CDMA Wireless Networks - A Game Theoretic Framework", *accepted to appear in Journal of Communications (JCM)*.
- [107] J. F. Nash, "Non-Cooperative Games," *Ann. Math.*, vol. 54, pp. 289-295, 1951.
- [108] R. D. Yates, "A framework for uplink power control in cellular radio systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.13, pp. 1341 - 1347, Sept. 1995.
- [109] C. Long, Q. Zhang, B. Li, H. Yang, and X. Guan, "Non-Cooperative Power Control for Wireless Ad Hoc Networks with Repeated Games," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.25, no.6, pp.1101-1112, Aug. 2007.
- [110] V. Rodriguez, "An analytical foundation for resource management in wireless communication," in *Proc. of IEEE Global Telecom. Conf. 2003 (GLOBECOM '03)*, vol.2, no.2, pp. 898-902, 1-5 Dec. 2003.
- [111] G. Aristomenopoulos, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "A Unified Approach for Efficient Network Selection in Multi-Service Integrated CDMA/WLAN Systems," in *Proc. of the 5th Int. Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC 2009)*, June, 2009.
- [112] G. Aristomenopoulos, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "Efficient QoS-Driven Resource Allocation in Integrated CDMA/WLAN Networks - An Autonomic Architecture," in *Proc. of 1st International Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems (MOBILIGHT 2009)*, LNICST Springer, May 2009.
- [113] G. Aristomenopoulos, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "Enabling Efficient QoS-Driven Resource Management in Heterogeneous Wireless Networks via Autonicity," *Computer Communications Journal, Elsevier. Υπό κρίση*.
- [114] E. E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "Realization of QoS Provisioning in Autonomic CDMA Networks under Common Utility-Based Framework" in *Proc. of the 3rd IEEE WoWMoM workshop on Autonomic and Opportunistic Communications*, AOC'09, June, 2009.
- [115] G. Aristomenopoulos, T. Kastrinogiannis, Zhaojun Li, and S. Papavassiliou, "An Autonomic QoS-centric Architecture for Integrated CDMA/WLAN Networks," *IEEE Wireless Communication Magazine. Υπό κρίση*.
- [116] T. Kastrinogiannis, V. Karyotis, and S. Papavassiliou, "On the Problem of Joint Power and Rate Control in CDMA Ad Hoc Networks", in *Proc. of ISWPC '08*, p.p. 78-82, May 2008.
- [117] T. Kastrinogiannis, V. Karyotis, and S. Papavassiliou, "An Opportunistic Combined Power and Rate Allocation Approach in CDMA Ad Hoc Networks," in *Proc. of IEEE Sarnoff Symposium on Advances in Wired and Wireless Communications 2008*, p.p.1-5, April 2008.

Κατάλογος Δημοσιευμένων Εργασιών

A. Άρθρα σε Επιστημονικά Περιοδικά (με κρίση)

- [J1] **T. Kastrinogiannis**, and S. Papavassiliou, “Utility based Short-term Throughput Driven Scheduling Approach for Efficient Resource Allocation in CDMA Wireless Networks”, *Wireless Personal Communications Journal, Springer special issue on “Resource and Mobility Management and Cross-Layer Design for the Support of Multimedia Services in Heterogeneous Emerging Wireless Networks”*, Nov. 2008.
- [J2] **T. Kastrinogiannis**, and S. Papavassiliou, “Game Theoretic Distributed Uplink Power Control in CDMA Networks with Real-Time Services,” *Computer Communications Journal, Elsevier*, vol. 32, no.2, p.p. 376-385, Feb. 2009.
- [J3] E. E. Tsiropoulou, **T. Kastrinogiannis**, and S. Papavassiliou, “QoS-Driven Uplink Power Control in Multi-Service CDMA Wireless Networks - A Game Theoretic Framework”, *Journal of Communications (JCM), Academy Publisher*, vol. 4, no. 9, p.p. 654-668, Oct. 2009.

B. Κεφάλαια σε Βιβλία

- [B1] E. E. Tsiropoulou **T. Kastrinogiannis**, and S. Papavassiliou, “Non-cooperative power control in CDMA wireless networks,” *to appear in the book Game Theory for Wireless Communications and Networking* (edited by Dr. Yan Zhang), 2010.

Γ. Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Διεθνών Επιστημονικών Συνεδρίων (με κρίση)

- [C1] **T. Kastrinogiannis**, and S. Papavassiliou, “Probabilistic Short-term Delay and Throughput Requirements of Multimedia Services in High Throughput Wireless Networks”, *in Proc. of IEEE Sarnoff Symposium on Advances in Wired and Wireless Communications 2007*, p.p.1-5, April 2007.
- [C2] **T. Kastrinogiannis**, and S. Papavassiliou, “Satisfying Elastic Short Term Fairness in High Throughput Wireless Communication Systems with Multimedia Services”, *in Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC 2007)*, p.p. 5064-5069, June 2007.
- [C3] **T. Kastrinogiannis**, and Symeon Papavassiliou, “Probabilistic Resource Allocation under Opportunistic Scheduling in Wireless Networks with Multimedia Services”, *in Proc. of 12th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2007)*, p.p.699-705, July 2007.

- [C4] **T. Kastrinogiannis**, S. Papavassiliou, K. Kastrinogiannis, and D. Soulios, "A Utility-based Resource Allocation Approach for the Downlink in CDMA Wireless networks with Multimedia Services", in *Proc. of the 18th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2007. (PIMRC 2007)*. p.p.1-5, Sept. 2007.
- [C5] **T. Kastrinogiannis**, and S. Papavassiliou, "QoS Provisioning in Wireless Data Networks under Non-Continuously Backlogged Users" in *Proc. of 6th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks and Workshops (RAWNET 2008)*. WiOpt 2008, p.p.71-76. April, 2008.
- [C6] **T. Kastrinogiannis**, V. Karyotis, and S. Papavassiliou, "On the Problem of Joint Power and Rate Control in CDMA Ad Hoc Networks", in *Proc. of 3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing, 2008. (ISWPC 2008)*. p.p. 78-82, May 2008.
- [C7] **T. Kastrinogiannis**, V. Karyotis, and S. Papavassiliou, "An Opportunistic Combined Power and Rate Allocation Approach in CDMA Ad Hoc Networks," in *Proc. of IEEE Sarnoff Symposium on Advances in Wired and Wireless Communications 2008*, p.p.1-5, April 2008.
- [C8] **T. Kastrinogiannis**, E. E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, "Utility-based Uplink Power Control in CDMA Wireless Networks with Real-Time Services," in *Proc. of Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks, (LNCS) Springer*, vol. 5198, p.p. 307-320, Sept. 2008.
- [C9] J. Trnkoczy, Š. Dobravec, J. F. Tasi, P. Daras, D. Tzovaras, A. Sanna, G. Paravati, R. Traphoener, J. Franz, **T. Kastrinogiannis**, C. Malavazos, N. Ploskas, M. Gumz, K. Geramani, and G. J. Winterle, "VICTORY – a multimodal, cross-platform and distributed multimedia repository", in *Proc. of the Third International ICST Conference on Scalable Information Systems 2008 (INFOSCALE 2008)*, Vico Equense, Italy, June 2008.
- [C10] P. Daras, D. Tzovaras, S. Dobravec, J. Trnkoczy, R. Traphoener, C. Malavazos, A. Sanna, J. Franz, N. Ploskas, G. Winterle, G. Paravati, **T. Kastrinogiannis**, and M. Gumz, "VICTORY – A 3D Search Engine over P2P and wireless P2P Networks", in *Proc. of the 4th International Wireless Internet Conference (WICON 2008)*, ACM, Hawaii, USA, November 2008.
- [C11] R. Chaparadza, S. Papavassiliou, **T. Kastrinogiannis**, M. Vigoureux, E. Dotaro, A. Davy, K. Quinn, M. Wodczak and, A. Toth "Creating a viable Evolution Path towards Self-Managing Future Internet via a Standardizable Reference Model for Autonomic Network Engineering" in *Proc. of Future Internet Conference*, book on: "The best Future Internet research ideas and achievements", Prague, May 2009.
- [C12] G. Aristomenopoulos, **T. Kastrinogiannis**, and S. Papavassiliou, "Efficient QoS-Driven Resource Allocation in Integrated CDMA/WLAN Networks - An Autonomic Architecture," in

Proc. of 1st International Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems (MOBILIGHT 2009), LNICST Springer, p.p. 25-34, May 2009.

- [C13] E. E. Tsiropoulou, **T. Kastrinogiannis**, and S. Papavassiliou, “A Utility-based Power Allocation Non-cooperative Game for the Uplink in Multi-Service CDMA Wireless Networks,” *in Proc. of the 5th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC 2009)*, p.p. 365-370, June, 2009.
- [C14] G. Aristomenopoulos, **T. Kastrinogiannis**, and S. Papavassiliou, “A Unified Approach for Efficient Network Selection in Multi-Service Integrated CDMA/WLAN Systems,” *in Proc. of the 5th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC 2009)*, p.p 1263-1268, June, 2009.
- [C15] E. E. Tsiropoulou, **T. Kastrinogiannis**, and S. Papavassiliou, “Realization of QoS Provisioning in Autonomic CDMA Networks under Common Utility-Based Framework” *in Proc. of the 3rd IEEE WoWMoM workshop on Autonomic and Opportunistic Communications, AOC’09*, June, 2009.