



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΠΟΛΥ-
ΥΠΗΡΕΣΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΑΡΙΟΥ-ΠΟΛΥΧΡΟΝΗ Κ. ΔΡΑΚΟΥ

*Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού
Υπολογιστών Ε.Μ.Π*

Αθήνα, Νοέμβριος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΠΟΛΥ- ΥΠΗΡΕΣΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΑΡΙΟΥ-ΠΟΛΥΧΡΟΝΗ Κ. ΔΡΑΚΟΥ

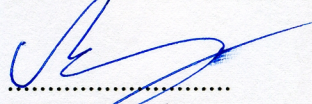
*Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού
Υπολογιστών Ε.Μ.Π*

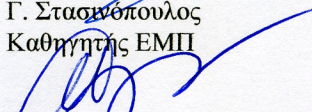
Συμβουλευτική Επιτροπή : Γεώργιος Στασινόπουλος

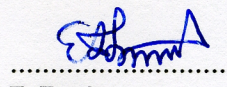
Ευστάθιος Συκάς

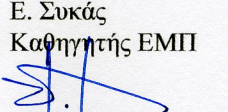
Ελευθέριος Καγιάφας

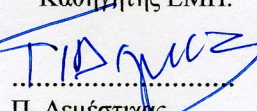
Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 2^α Νοεμβρίου 2010.


.....
Γ. Στασινόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

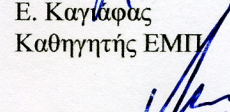

.....
Μ. Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ


.....
Ε. Συκάς
Καθηγητής ΕΜΠ


.....
Β. Λούμος
Καθηγητής ΕΜΠ.


.....
Π. Δεμέστιχας
Αν. Καθηγητής Παν. Πειραιώς


.....
Ε. Καγιάφας
Καθηγητής ΕΜΠ


.....
Ν. Μήτρου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2010

.....
ΜΑΡΙΟΣ-ΠΟΛΥΧΡΟΝΗΣ Κ. ΔΡΑΚΟΣ

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

Copyright © **ΜΑΡΙΟΣ-ΠΟΛΥΧΡΟΝΗΣ Κ. ΔΡΑΚΟΣ, 2010.**

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.

*Το καΐκι στη στεριά δεν λογίζεται κι η καρδιά στη μαχαιριά συγκλονίζεται
Έλα αγάπη μου βοριά, δώσ' μου κύματα να 'χω σιγουριά*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το ερευνητικό αντικείμενο, οι επιμέρους θεωρητικές προσεγγίσεις, οι προτάσεις και τα αριθμητικά αποτελέσματα της παρούσας διατριβής έχουν ως αφετηρία, σε μεγάλο βαθμό, το ερευνητικό ευρωπαϊκό πρόγραμμα *MUSE*, στο οποίο εργάστηκα ως μέλος του εργαστηρίου Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων, της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Η ενασχόληση με ένα θέμα, όπως είναι η μελέτη μηχανισμών διαλειτουργικότητας σε δίκτυα επόμενης γενιάς και η προσπάθεια βελτίωσης της λειτουργίας και της απόδοσής τους με απώτερο στόχο την παροχή εγγυημένης ποιότητας υπηρεσίας στον τελικό χρήστη, αποτέλεσε μία ευκαιρία για βαθύτερη έρευνα σε ένα γνωστικό αντικείμενο του οποίου η χρησιμότητα είναι κυρίαρχη στην πραγματικότητα των δικτύων τηλεπικοινωνιών. Αποτελεί ήδη κομμάτι της καθημερινότητας του σύγχρονου ανθρώπου, ενώ, ταυτόχρονα, καθώς τα δίκτυα επόμενης γενιάς θα εξελίσσονται και θα εξαπλώνονται, θα αποτελεί συνεχές πεδίο έρευνας στο μέλλον. Η εμπειρία της εργασίας σε ένα τέτοιο αντικείμενο ήταν πρωτόγνωρη και ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα.

Αναγνωρίζοντας ότι η διατριβή μου θα ήταν αδύνατον να πραγματοποιηθεί χωρίς τη συμπαράσταση των καθηγητών και των συναδέλφων μου, θα ήθελα να αναφερθώ σε όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν. Ξεκινώντας από τη συμβουλευτική μου επιτροπή θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γ. Στασινόπουλο για τον χρόνο που μου αφιέρωσε και για την καθοδήγηση που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια. Μέσα από πολλές συζητήσεις, τις εύστοχες παρατηρήσεις του και τις ενδιαφέρουσες προτάσεις του για την εξέλιξη της διατριβής μου, με βοήθησε σημαντικά να ολοκληρώσω αυτήν την εργασία. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για τη συνεργασία που είχαμε τόσο σε επίπεδο επιστημονικό όσο και σε επίπεδο ανθρώπινων σχέσεων. Μαζί με τον κ. Γ. Στασινόπουλο, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου για τις χρήσιμες συμβουλές τους, προς τα υπόλοιπα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Ε. Συκά και τον Καθηγητή κ. Ε. Καγιάφα. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Β. Λούμο, τον Καθηγητή κ. Μ. Θεολόγου, τον Καθηγητή κ. Ν. Μήτρου και τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πειραιώς κ. Π. Δεμέστιχα, για την τιμή που μου κάνουν να συμμετέχουν στην επταμελή συμβουλευτική επιτροπή.

Τα χρόνια της ερευνητικής μου δραστηριότητας στο εργαστήριο αποτελούν για μένα μια πολύτιμη εμπειρία ζωής, τόσο από επαγγελματική όσο και από προσωπική άποψη. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους Γρηγόρη Δουμένη, Απόστολο Νικολαΐδη, Γιώργο Θάνο, Κώστα Παπακωνσταντίνου, Φώτη Ανδριτσόπουλο, Γιάννη Μητσό, Μιχάλη Φουκόπουλο και Σεραφείμ Παπαστέφανο, με τους οποίους συνεργάστηκα στενά στα πλαίσια ερευνητικών προγραμμάτων και συνυπάρξαμε σε στιγμές χαλάρωσης με ισχυρές δόσεις αμπελοφιλοσοφίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους παλαιότερους Βασίλη Καλούδη, Ιωάννα Θεολογίτου, Στέργιο Σπανό, Λάμπρο Σαράκη και Κυριάκο Σάτλα για τις πολύτιμες συμβουλές τους στο ξεκίνημα της προσπάθειάς μου.

Απεριόριστη ευγνωμοσύνη οφείλω στους γονείς μου, Κοσμά και Καλλιόπη, και την αδερφή μου, Ζέφη, για την αγάπη τους, την υπομονή τους, τις θυσίες τους και τη στήριξη που μου παρείχαν απλόχερα όλα αυτά τα χρόνια. Τους εκφράζω την ανιδιοτελή αγάπη μου για ότι βρίσκονται πάντα κοντά μου, έτοιμοι να προσφέρουν. Τους ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου για όλα όσα έχουν κάνει και συνεχίζουν να κάνουν για μένα.

Κλείνοντας, ένα μεγάλο ευχαριστώ και αμέριστη αγάπη οφείλω στην σύζυγό μου, Ρένα Συγκούνα, η οποία στάθηκε δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και με βοήθησε να ξεπεράσω τις δυσκολίες και, κυρίως, τις απογοητεύσεις του «άπιαστου στόχου» που κάποιες φορές συνόδεψαν την προσπάθειά μου. Αν δεν υπήρχε η ακατανίκητη επιμονή της και η ακατανόητη, πολλές φορές, πίστη της σε μένα, ίσως και να μην είχα ολοκληρώσει την προσπάθειά μου... Από την άλλη, βέβαια, με καθυστέρησε λίγο μιας και έφερε στον κόσμο πριν λίγους μήνες το πρώτο μας παιδάκι. Μα τι λέω όμως... Μήπως, πέρα και πάνω απ' όλα, αυτό δεν αποτελεί την απόλυτη δημιουργία στη ζωή του ανθρώπου; Μήπως αυτό το γεγονός δεν είναι που θα σημαδέψει τη χρονιά της ολοκλήρωσης της διδακτορικής διατριβής μου; Χωρίς καμία αμφιβολία...Τους αγαπώ και τους δύο απλά και μόνο γιατί είναι κοντά μου!

*Μάριος Δράκος
Αθήνα, Νοέμβριος 2010*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή έχει ως βασικό στόχο την πρόταση συγκεκριμένων μηχανισμών για τη βελτίωση της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσίας σε πολυ-υπηρεσιακά δίκτυα επόμενης γενιάς. Η αποδεδειγμένη ανάγκη υποστήριξης πολλαπλών κλάσεων τηλεπικοινωνιακής κίνησης στα δίκτυα επόμενης γενιάς για την παροχή εγγυημένης και ποσοτικοποιημένης ποιότητας υπηρεσίας, καθώς και η αναγνώριση του κρίσιμου προβλήματος της κάθετης διαλειτουργικότητας μεταξύ δικτύων διαφορετικής χωρητικότητας, αποτέλεσαν τις βασικές θεωρήσεις της ερευνητικής εργασίας.

Ειδικότερα, η προτεινόμενη λύση καθορίζει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο, το οποίο προσδιορίζει διαφοροποιημένες κλάσεις με βάση την ποιότητα υπηρεσίας για τις ροές των πακέτων και εφαρμόζει χρονοπρογραμματισμό αυστηρής προτεραιότητας. Αναγνωρίζοντας τη μεταβολή καθυστέρησης ως μέτρο επίδοσης κρίσιμης σημασίας για πολυμεσικές εφαρμογές υψηλής ποιότητας, επιλέγεται αυτή η μετρική ως κυρίαρχος διαφοριστής των προτεινόμενων κλάσεων υπηρεσίας. Αναλύεται η ποιοτική σχέση της με την μέγιστη διατεματική μεταβολή καθυστέρησης, καθώς και με την διατεματική καθυστέρηση και εξάγονται οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της στους κόμβους συμφόρησης, η εγκυρότητα των οποίων εξετάζεται με χρήση εργαλείου δικτυακής προσομοίωσης. Στη συνέχεια, λαμβάνονται οι ντετερμινιστικές σχέσεις που δίνουν τον μέγιστο αριθμό επιτρεπτών ροών ανά κλάση υπηρεσίας, ενώ, ταυτόχρονα, παρουσιάζεται και η αντίστοιχη στατιστική μελέτη. Τέλος, πραγματοποιείται αποτίμηση της επίδοσης ενός κόμβου συμφόρησης ως προς την μεσοσταθμική συστημική πιθανότητα φραγής και την διεκπεραιωτικότητα.

Με απώτερο σκοπό τη βελτιστοποίηση της επίδοσης σε σχέση με την πιθανότητα φραγής και τη διεκπεραιωτικότητα, προτείνεται στη συνέχεια ένας προηγμένος μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης, βασισμένος στην μεταβολή καθυστέρησης, ο οποίος προορίζεται να εφαρμοστεί τοπικά στους κόμβους συμφόρησης. Προς αυτή την κατεύθυνση, διατυπώνεται ένα σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, ο αρχικός χώρος των πολιτικών πρόσβασης περιορίζεται στις πολιτικές κυρτών συντεταγμένων και προτείνεται μια απλοποιημένη μέθοδος ελέγχου πρόσβασης, βασισμένη σε Ανώτατα Όρια ανά κλάση υπηρεσίας, η οποία εξετάζεται ως προς την αποτελεσματικότητά της.

Τέλος παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης και συζητούνται ενδιαφέρουσες προεκτάσεις.

ABSTRACT

This thesis has as main objective the proposal of specific mechanisms to improve quality of service in multi-service next generation networks. Proven need to support multiple classes of telecommunications traffic over next generation networks, in order to provide guaranteed and quantified quality of service, and, moreover, the recognition of the critical problem of vertical interoperability between networks with different capacities, were the main considerations of the research work.

Specifically, the proposed solution defines a comprehensive framework to identify diverse classes, based on the quality of service for flows of packets and implements strict priority scheduling. Recognizing the delay variation (jitter) as a critical performance metric for high-quality multimedia applications, it is selected as the dominant differentiator of the proposed classes of service. The qualitative relationship with the maximum end to end delay variation and the end to end delay is presented and analytical relations for the nodes of congestion are exported, the validity of which is examined using a network simulation tool. Then, deterministic relations that give the maximum allowable flows per service class are extracted, while simultaneously the corresponding statistical analysis is presented. Lastly, a performance evaluation of a bottleneck node regarding the systemic weighted average blocking probability and throughput takes place.

Targeting to optimize the performance in relation to blocking probability and throughput, an advanced connection admission control mechanism is presented. It is based on delay variation and it is intended to be applied locally within the nodes of congestion. Towards this direction a complex optimization problem is formulated. Then, the primary set of admission policies is limited to coordinate convex policies and a simplified method for connection admission control is presented, based on upper limits per class of service. The latter is examined in terms of effectiveness.

Finally, the main conclusions of the study and discussion of interesting implications are presented.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	1
1.2	ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	6
1.3	ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	7
1.4	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ	11
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
2.2	ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ	12
2.2.1	Ορισμός	12
2.2.2	Βασικά Χαρακτηριστικά	13
2.2.3	Πλεονεκτήματα	15
2.2.4	Αρχιτεκτονική	15
2.3	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ	20
2.3.1	Δίκτυα Πρόσβασης Επόμενης Γενιάς	21
2.3.1.1	Ενσύρματα Δίκτυα (Wired Networks)	23
2.3.1.2	Ασύρματα Δίκτυα (Wireless Networks)	26
2.3.2	Δίκτυα Κορμού Επόμενης Γενιάς	32
2.4	ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ	37
2.4.1	Είδη Διαλειτουργικότητας	38
2.4.1.1	Οριζόντια Διαλειτουργικότητα	38
2.4.1.2	Κάθετη Διαλειτουργικότητα	38
2.4.2	Σχετική Βιβλιογραφία	39
2.5	ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ - ΚΙΝΗΤΡΟ ΜΕΛΕΤΗΣ	40
2.5.1	Κίνητρο Μελέτης Προβλήματος	40
2.5.2	Προσέγγιση Λύσης Προβλήματος	42
2.6	ΕΠΙΛΟΓΟΣ	43
2.7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ	49
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	49
3.2	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (QUALITY OF SERVICE - QOS)	50
3.2.1	Παράμετροι Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS Metrics)	51

3.2.2	<i>Μηχανισμοί Ελέγχου Ποιότητας Υπηρεσίας</i>	53
3.2.2.1	Έλεγχος Πρόσβασης (Admission Control).....	53
3.2.2.2	Μορφοποίηση/Αστυνόμευση Κίνησης (Traffic Shaping/Policing).....	55
3.2.2.3	Ταξινόμηση Πακέτων (Packet Classification).....	56
3.2.2.4	Χρονοπρογραμματισμός Πακέτων (Packet Scheduling).....	56
3.2.2.5	Απόρριψη Πακέτων (Packet Dropping).....	56
3.2.2.6	Δρομολόγηση με βάση την Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS-based Routing).....	57
3.2.2.7	Δέσμευση Πόρων (Resource Reservation).....	58
3.2.3	<i>Μοντέλα Ποιότητας Υπηρεσίας</i>	60
3.2.4	<i>Καθορισμός Κλάσεων Ποιότητας Υπηρεσίας</i>	61
3.2.4.1	Κλάσεις Κίνησης (Traffic Classes).....	61
3.2.4.2	Κλάσεις Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS Classes).....	63
3.3	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΜΠΕΙΡΙΑΣ (QUALITY OF EXPERIENCE - QOE).....	64
3.3.1	<i>Ορισμός Ποιότητας Εμπειρίας</i>	65
3.3.2	<i>Αποτίμηση Ποιότητας Εμπειρίας</i>	67
3.3.2.1	Απόλυτες Τακτικές Κλίμακες.....	67
3.3.2.2	Συγκριτικές Τακτικές Κλίμακες.....	69
3.4	ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.....	69
3.4.1	<i>Έλεγχος Πρόσβασης για Ελαστική και μη-Ελαστική Κίνηση</i>	70
3.4.2	<i>Έλεγχος Πρόσβασης για Διαχωρισμένους και μη-Διαχωρισμένους Τύπους Κίνησης</i>	71
3.4.3	<i>Κεντρικός ή Κατανεμημένος Έλεγχος Πρόσβασης</i>	71
3.4.4	<i>Έλεγχος Πρόσβασης Βασιζόμενος σε Περιγραφέα Κίνησης ή Μετρήσεις ή Ανιχνεύσεις</i>	72
3.4.5	<i>Έλεγχος Πρόσβασης για Ενδοτομεακή (Intra-domain) και Διατομεακή (Inter-domain) Κίνηση</i>	74
3.4.6	<i>Σηματοδοτημένος ή μη-Σηματοδοτημένος Έλεγχος Πρόσβασης</i>	75
3.4.7	<i>Επιλεκτικός Έλεγχος Πρόσβασης</i>	75
3.4.8	<i>Έλεγχος Πρόσβασης με Βάση τον Αντικειμενικό Σκοπό</i>	76
3.4.9	<i>Έλεγχος Πρόσβασης με Βάση τον Χρόνο Απόφασης</i>	76
3.5	ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	76
3.6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΛΥΣΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΡΟΩΝ..... 81

4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	81
4.2	ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	82
4.3	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ.....	86
4.3.1	<i>Η Μέγιστη Μεταβολή Καθυστέρησης ως Διαφοριστής των Κλάσεων Υπηρεσίας</i>	86
4.3.2	<i>Ποιοτική Ανάλυση Διατεματικής Μεταβολής Καθυστέρησης</i>	88

4.3.3	<i>Προτεινόμενες Κλάσεις Υπηρεσίας</i>	92
4.3.4	<i>Προτεινόμενος Μηχανισμός Χρονοπρογραμματισμού</i>	98
4.4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ.....	100
4.4.1	<i>Εισαγωγή</i>	100
4.4.2	<i>Αναλυτικός Υπολογισμός Παραμέτρων Υπηρεσίας</i>	101
4.4.3	<i>Στατιστική Μελέτη Επιτρεπτών Ροών Κίνησης</i>	104
4.4.4	<i>Πειραματικά Αποτελέσματα Δικτυακής Προσομοίωσης</i>	108
4.4.5	<i>Αποτίμηση Απόδοσης Κόμβου του Προτεινόμενου Δικτύου</i>	113
4.4.5.1	Πιθανότητα Φραγής και Διεκπεραιωτικότητα.....	113
4.4.5.2	Αριθμητικά Αποτελέσματα.....	117
4.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	128
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΕ ΠΟΛΥ-ΥΠΗΡΕΣΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ.....		131
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	131
5.2	ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	132
5.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΜΑΡΚΟΝ.....	134
5.4	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΩΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΜΑΡΚΟΝ...	135
5.5	ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	140
5.6	ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΑΝΩΤΑΤΩΝ ΟΡΙΩΝ.....	141
5.7	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	145
5.8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	152
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....		155
6.1	ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	155
6.2	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	158
6.3	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	163
6.4	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	165

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

<i>Πίνακας 1-1: Ποιοτικά χαρακτηριστικά στα σημερινά δίκτυα και στα δίκτυα επόμενης γενιάς.....</i>	<i>4</i>
<i>Πίνακας 2-1: Τεχνολογίες DSL.....</i>	<i>23</i>
<i>Πίνακας 2-2: Τεχνολογίες PON.....</i>	<i>26</i>
<i>Πίνακας 2-3: Χαρακτηριστικά SONET/SDH</i>	<i>33</i>
<i>Πίνακας 3-1: Σύσχετισμός κατηγοριοποίησης εφαρμογών από 3GPP, ITU</i>	<i>63</i>
<i>Πίνακας 3-2: Βαθμολογία Μέσης Γνώμης (MOS)</i>	<i>67</i>
<i>Πίνακας 3-3: Συγκριτική κλίμακα Ποιότητας Εμπειρίας.....</i>	<i>69</i>
<i>Πίνακας 4-1: Προτεινόμενες Κλάσεις Υπηρεσίας από τον Οργανισμό 3GPP</i>	<i>84</i>
<i>Πίνακας 4-2: Προτεινόμενες Κλάσεις Υπηρεσίας από τον Οργανισμό ITU-T.....</i>	<i>85</i>
<i>Πίνακας 4-3: Προτεινόμενες Κλάσεις Υπηρεσίας</i>	<i>92</i>
<i>Πίνακας 4-4: Τρόποι λειτουργίας κλάσης υπηρεσίας Elastic</i>	<i>95</i>
<i>Πίνακας 4-5: Προτεινόμενες επιδιωκόμενες τιμές παραμέτρων κλάσεων υπηρεσίας.....</i>	<i>96</i>
<i>Πίνακας 4-6: Χαρακτηριστικά υλοποίησης στους κόμβους συμφόρησης.....</i>	<i>98</i>
<i>Πίνακας 4-7: Απεικόνιση παραμέτρων κίνησης σε κίνηση ATM.....</i>	<i>108</i>
<i>Πίνακας 4-8: Τιμές Βαρών Κλάσεων Υπηρεσίας</i>	<i>118</i>
<i>Πίνακας 5-1: Τιμές Βαρών Κλάσεων Υπηρεσίας</i>	<i>146</i>

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1: Λειτουργική Αρχιτεκτονική Δικτύου Επόμενης Γενιάς.....	16
Σχήμα 2-2: Γενικό αρχιτεκτονικό-τοπολογικό μοντέλο IP δικτύου πρόσβασης βασισμένο σε Ethernet..	20
Σχήμα 2-3: WRAN σε σχέση με άλλα πρότυπα ασύρματης πρόσβασης.....	31
Σχήμα 2-4: Τεχνολογίες 3 κατώτερων επιπέδων του OSI μοντέλου στα NGN δίκτυα.....	33
Σχήμα 2-5: NGN δίκτυο κορμού και δίκτυα πρόσβασης.....	37
Σχήμα 2-6: Οριζόντια και Κάθετη διαλειτουργικότητα.....	39
Σχήμα 2-7: Η οικιακή πύλη ως κόμβος συμφόρησης προς το δίκτυο πρόσβασης.....	41
Σχήμα 2-8: Η οικιακή πύλη ως κόμβος συμφόρησης προς το δίκτυο πελάτη.....	41
Σχήμα 2-9: Ο κόμβος πρόσβασης ως κόμβος συμφόρησης.....	42
Σχήμα 3-1: Συνιστώσες του Μηχανισμού Ελέγχου Πρόσβασης.....	55
Σχήμα 3-2: Δρομολόγηση με βάση το QoS.....	58
Σχήμα 3-3: Αρχιτεκτονική δρομολογητή QoS.....	59
Σχήμα 3-4: Κατηγοριοποίηση εφαρμογών από τη 3GPP.....	62
Σχήμα 3-5: Κατηγοριοποίηση εφαρμογών από την ITU-T.....	62
Σχήμα 4-1: Γενικευμένο Δέντρο Κλάσεων Υπηρεσίας.....	83
Σχήμα 4-2: Συνιστώσες Διατερματικής Καθυστέρησης.....	88
Σχήμα 4-3: Ποιοτική κατανομή πιθανότητας καθυστέρησης.....	89
Σχήμα 4-4: Καθυστέρηση πακέτων για διαδοχικούς κόμβους.....	91
Σχήμα 4-5: Κλάση υπηρεσίας Elastic class με τρόπο λειτουργίας 2.....	94
Σχήμα 4-6: Κλάση υπηρεσίας Elastic class με τρόπο λειτουργίας 3.....	95
Σχήμα 4-7: Χρονοπρογραμματιστής Αυστηρής Προτεραιότητας.....	99
Σχήμα 4-8: Μοντέλο κίνησης στην οικιακή δικτυακή πύλη.....	101
Σχήμα 4-9: Μοντέλο εξυπηρέτησης κίνησης στο σημείο εξόδου του κόμβου.....	102
Σχήμα 4-10: Μέγιστο φορτίο ανά μέγεθος ουράς για πιθανότητα απώλειας πακέτων ίση με 10^{-11}	105
Σχήμα 4-11: Μέγιστο φορτίο ανά μέγεθος ουράς για πιθανότητα απώλειας πακέτων ίση με 10^{-7}	106
Σχήμα 4-12: Επιτρεπτές ροές ανά κλάση υπηρεσίας.....	107
Σχήμα 4-13: Τοπολογία δικτύου προσομοίωσης.....	109
Σχήμα 4-14: Μέγιστη διατερματική καθυστέρηση για τις προτεινόμενες κλάσεις.....	111
Σχήμα 4-15: Μέγιστη μεταβολή καθυστέρησης για τις προτεινόμενες κλάσεις.....	111
Σχήμα 4-16: Χρησιμοποίηση καταχωρητών στην ζεύξη εξόδου.....	113
Σχήμα 4-17: Πιθανότητα Φραγής για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Σταθερή μεταβολή καθυστέρησης).....	120
Σχήμα 4-18: Διεκπεραιωτικότητα για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Σταθερή μεταβολή καθυστέρησης).....	121

Σχήμα 4-19: Πιθανότητα Φραγής για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Διακύμανση μεταβολής καθυστέρησης)	121
Σχήμα 4-20: Διεκπεραιωτικότητα για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Διακύμανση μεταβολής καθυστέρησης)	122
Σχήμα 4-21: Πιθανότητα Φραγής για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης χαμηλής προτεραιότητας (Σταθερή μεταβολή καθυστέρησης)	123
Σχήμα 4-22: Διεκπεραιωτικότητα για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης χαμηλής προτεραιότητας (Σταθερή μεταβολή καθυστέρησης)	123
Σχήμα 4-23: Πιθανότητα Φραγής για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης χαμηλής προτεραιότητας (Διακύμανση μεταβολής καθυστέρησης).....	124
Σχήμα 4-24: Διεκπεραιωτικότητα για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης χαμηλής προτεραιότητας (Διακύμανση μεταβολής καθυστέρησης).....	124
Σχήμα 4-25: Πιθανότητα Φραγής για ελαφρώς φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Σταθερή μεταβολή καθυστέρησης)	125
Σχήμα 4-26: Διεκπεραιωτικότητα για ελαφρώς φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Σταθερή μεταβολή καθυστέρησης).....	126
Σχήμα 4-27: Πιθανότητα Φραγής για ελαφρώς φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Διακύμανση μεταβολής καθυστέρησης)	126
Σχήμα 4-28: Διεκπεραιωτικότητα για ελαφρώς φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Διακύμανση μεταβολής καθυστέρησης)	127
Σχήμα 5-1: Πλήρης Συμμερισμός χωρίς και με απαιτήσεις μέγιστων τιμών μεταβολής καθυστέρησης για 2 κλάσεις υπηρεσίας.....	142
Σχήμα 5-2: Προτεινόμενη Πολιτική Ελέγχου Πρόσβασης Ανωτάτων Ορίων για δύο Κλάσεις Υπηρεσίας	143
Σχήμα 5-3: Υπολογιστική Μέθοδος Πολιτικής Ανωτάτων Ορίων	145
Σχήμα 5-4: Μεσοσταθμική Πιθανότητα Φραγής για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης	147
Σχήμα 5-5: Μεσοσταθμική Διεκπεραιωτικότητα για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης	148
Σχήμα 5-6: Μεσοσταθμική Πιθανότητα Φραγής για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης χαμηλής προτεραιότητας	149
Σχήμα 5-7: Μεσοσταθμική Διεκπεραιωτικότητα για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης χαμηλής προτεραιότητας	149
Σχήμα 5-8: Μεσοσταθμική Πιθανότητα Φραγής για ελαφρώς φορτωμένες κλάσεις κίνησης	150
Σχήμα 5-9: Μεσοσταθμική Διεκπεραιωτικότητα για ελαφρώς φορτωμένες κλάσεις κίνησης	151

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Σήμερα έχει γίνει πλέον κατανοητό από όλους ότι η υποστήριξη της ευρύτατης εξάπλωσης των Δικτύων Επόμενης Γενιάς (*Next Generation Networks - NGNs*) θα διευκολύνει σε μέγιστο βαθμό την ανάδειξη μίας ολόκληρης ομάδας *online* εφαρμογών και υπηρεσιών, πολλές από τις οποίες δεν μπορούσαμε ούτε να φανταστούμε στο πρόσφατο παρελθόν [1]. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ποιότητας ζωής και την έκρηξη της οικονομικής ανάπτυξης. Η αληθινή δυναμική ενός τέτοιου δικτύου επόμενης γενιάς έγκειται στις βελτιστοποιημένες και εύκολα μετασχηματιζόμενες λειτουργίες που ενεργοποιεί. Αυτές οι λειτουργίες θα υποστηρίξουν ένα ευρύ πλήθος δικτυακών υπηρεσιών, που αναμένεται να αποφέρουν σημαντικά οφέλη στους καταναλωτές, στα εκπαιδευτικά ιδρύματα, στις επιχειρήσεις και, γενικότερα, στην κοινωνία και την οικονομία. Οι κυριότερες από τις λειτουργίες αυτές είναι η γρηγορότερη μεταφορά αρχείων και προς τις δύο κατευθύνσεις, η ρευμάτωση δεδομένων φωνής και βίντεο (*audio/video streaming*) που θα μετατρέψει το διαδίκτυο σε ένα αμιγώς οπτικοακουστικό μέσο, οι πραγματικόχρονες συνεργατικές πλατφόρμες (*real time cooperative platforms*) και η δυνατότητα ταυτόχρονης χρήσης πολλαπλών υπηρεσιών [2].

Ειδικότερα, η γρηγορότερη μεταφορά αρχείων θα βελτιώσει εντυπωσιακά την εμπειρία του χρήστη κατά την αποστολή ή την λήψη δεδομένων, εικόνων και αρχείων ήχου και βίντεο μέσα από το διαδίκτυο. Σημαντικό χαρακτηριστικό των δικτύων επόμενης γενιάς θα αποτελέσει η αναβάθμιση της ταχύτητας αναφόρτωσης, διευκολύνοντας τους καταναλωτές να προωθούν περιεχόμενο παραγόμενο από τους ίδιους προς το διαδίκτυο. Αυτό θα επιτρέψει στους χρήστες να δημιουργούν ουσιαστικά γνώση στο άκρο του δικτύου και να την μεταφέρουν πάλι πίσω στον πυρήνα του, υποστηρίζοντας την ιδανική προοπτική τύπου *πολλοί-προς-πολλούς* του δικτύου επόμενης γενιάς. Δίνοντας τη δυνατότητα στους τελικούς χρήστες να δημιουργούν, να πακετοποιούν και να ευρυσκέμπουν την γνώση τους, τις δυνατότητές τους και το δημιουργικό ταλέντο τους, είναι σίγουρο ότι θα ξεκλειδωθούν ανείπωτες δυναμικές καινοτομίας. Επιπρόσθετα, οι ταχύτερες μεταφορές αρχείων θα διευκολύνουν την πραγμάτωση της *υπολογιστικής νέφους (cloud computing)* [3], ένα όραμα

υπολογιστικής, σύμφωνα με το οποίο, τα προγράμματα και οι εφαρμογές υπολογιστών, το περιεχόμενο και η αποθήκευση αρχείων δεν θα χρειάζεται να παραμένουν στον προσωπικό υπολογιστή κάποιου χρήστη, αλλά θα μπορούν να αποθηκεύονται σε απομακρυσμένους εξυπηρετητές. Η υπολογιστική νέφος είναι σε θέση να φέρει την επανάσταση στον τρόπο αλληλεπίδρασης των χρηστών με τις υπολογιστικές πλατφόρμες.

Τα δίκτυα επόμενης γενιάς θα καταστήσουν δυνατή, επίσης, την εξάπλωση εφαρμογών ρευμάτωσης ήχου και βίντεο. Θα είναι έτσι υλοποιήσιμη σε τεχνικό επίπεδο η προσφορά υψηλής ποιότητας βίντεο κατ' αίτηση, οδηγώντας σε μία επανάσταση στην διανομή βίντεο. Οι τελικοί χρήστες θα είναι σε θέση με χρήση ενός δικτύου επόμενης γενιάς να μεταφορτώσουν μέσα σε λίγα λεπτά ταινίες μεγάλου μήκους. Η λειτουργία αυτή θα διευκολύνει ακόμα την ρευμάτωση βίντεο καλύτερης ποιότητας από υπηρεσίες όπως *YouTube*, *Hulu*, *ABC* [4-6] και άλλες παρόμοιες. Θα ανοίξει ακόμα ο δρόμος για την πλήρη εξάπλωση της παρακολούθησης τηλεοπτικών καναλιών μέσα από το διαδίκτυο (*IPTV*), κατά την οποία η υπηρεσία τηλεόρασης μεταφέρεται διαδραστικά στο οικιακό περιβάλλον μέσα από την ευρυζωνική ζεύξη [7-8]. Με μία τέτοια τεχνολογική πρόοδο, οι καταναλωτές δεν θα περιορίζονται από σταθερά τηλεοπτικά προγράμματα ή από συγκεκριμένο αριθμό και τύπο καναλιών. Επιπρόσθετα, ένα δίκτυο επόμενης γενιάς θα κληθεί να υποστηρίξει ταυτόχρονα την κατανάλωση σχετικών εφαρμογών, απαιτητικών ως προς το εύρος ζώνης και τα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας, όπως είναι η διαδραστική εικονοδιάσκεψη (*teleconference*), εφαρμογές τηλεπαρουσίας και η τηλεόραση υψηλής και υπερυψηλής ευκρίνειας (*HDTV-UHDTV*).

Στην τρίτη κυρίαρχη λειτουργική δυνατότητα των δικτύων επόμενης γενιάς θα συνδράμουν οι υψηλής ποιότητας πραγματικόχρονες πλατφόρμες συνεργασίας. Συγκεκριμένες εφαρμογές τηλεδιάσκεψης, είτε απλά με χρήση μίας κάμερας διαδικτύου δεμένη με μία κλήση φωνής πάνω από το πρωτόκολλο *IP (VoIP)* ή, εναλλακτικά, με περίπλοκες συσκευές εικονοδιάσκεψης, θα προσθέσουν αμφίδρομη ρευμάτωση βίντεο στην παλαιού τύπου τηλεφωνική κλήση. Ακόμα περισσότερο προηγμένα συστήματα εικονοδιάσκεψης, που συχνά αναφέρονται ως συστήματα τηλεπαρουσίας, θα αναπαράγουν μία προσωποποιημένη εμπειρία κατά την οποία οι συμμετέχοντες θα νοιώθουν ότι είναι μαζί στον ίδιο χώρο, δίνοντας καινούριο νόημα στην διαπροσωπική επικοινωνία. Θα δίνουν τη δυνατότητα στον τελικό χρήστη να συνδέεται με τον οποιονδήποτε στον κόσμο και να εργάζεται μαζί του σαν να βρίσκονται στον ίδιο χώρο, λύνοντας μαζί προβλήματα και αλληλεπιδρώντας με έναν τόσο άμεσο και πλούσιο σε πληροφορία τρόπο, που δεν θα αποτελεί πλέον απλά μία διάδραση αλλά κάτι πολύ περισσότερο, μία συνεργασία σε πραγματικό χρόνο. Τέτοια συστήματα τηλεπαρουσίας με βάση το βίντεο θα συνδέουν στο κοντινό μέλλον επιχειρήσεις, σχολεία, νοσοκομεία, σπίτια και δημόσιους οργανισμούς. Με

την μείωση των γεωγραφικών περιορισμών, οι επιχειρήσεις θα γίνουν περισσότερο ανταγωνιστικές μέσω βελτιωμένων συνεργατικών δομών. Η πρόσβαση σε καλύτερους δασκάλους, καθηγητές και ειδικούς υγείας δεν θα υπαγορεύεται πλέον από την τοποθεσία του τελικού καταναλωτή. Οι μηχανικοί, όπως και οι εξειδικευμένοι μηχανικοί που αναπτύσσουν λογισμικό, καθώς και οι αναλυτές της αγοράς θα συνεργάζονται μεταξύ τους σαν να είναι πρόσωπο με πρόσωπο. Όλα τα παραπάνω βέβαια θα γίνουν εφικτά αν η πιστότητα ήχου και εικόνας είναι πραγματικά υψηλής ποιότητας και αν το αναγκαίο τεχνολογικό υπόβαθρο γίνει κοινός τόπος, ακριβώς όπως είναι η τηλεφωνία σήμερα.

Το τελευταίο κυρίαρχο λειτουργικό χαρακτηριστικό ενός δικτύου επόμενης γενιάς είναι η δυνατότητα της ταυτόχρονης παράδοσης πολλαπλών υπηρεσιών στον τελικό χρήστη. Η συνάθροιση όλων αυτών των απαιτητικών εφαρμογών είναι που οδηγεί κυρίως την ανάγκη για εκτεταμένη υιοθέτηση δικτυακών τεχνολογιών επόμενης γενιάς. Επιπρόσθετα, τα μελλοντικά οικιακά περιβάλλοντα, σε αντίθεση με τα αναλογικά σπίτια του πρόσφατου παρελθόντος, μπορεί να περιλαμβάνουν περισσότερες από τριάντα διαφορετικές ηλεκτρονικές συσκευές, η πλειοψηφία των οποίων θα καλείται να επικοινωνήσει με τις υπόλοιπες καθώς και με το δίκτυο [9]. Αυτό το μεγάλο πλήθος από ηλεκτρονικές συσκευές διαφορετικού τύπου, όπως ψηφιακές κάμερες, οικιακός εξοπλισμός επεξεργασίας βίντεο, κινητά τηλέφωνα, συσκευές PDA, συσκευές εγγραφής βίντεο, τηλεοράσεις υψηλής ευκρίνειας, φορητοί υπολογιστές, συστήματα οικιακής παρακολούθησης, έξυπνες οικιακές συσκευές κ.α., αυξάνει την απαίτηση για ποιοτική ευρυζωνικότητα, καθώς επιτρέπουν στον μεμονωμένο τελικό χρήστη και να καταναλώνει και να παράγει περιεχόμενο, ενώ ταυτόχρονα του δίνουν τα μέσα για να το μοιραστεί και με άλλους. Επιπρόσθετα αναδεικνύει την ανάγκη για αποδοτικούς μηχανισμούς αυτοματοποιημένης διαχείρισης όλων αυτών των συσκευών από τον πάροχο των υπηρεσιών με απώτερο σκοπό την απόκρυψη της πολυπλοκότητάς τους από τον τελικό καταναλωτή [10-12].

Συνολικά, οι τέσσερις προηγούμενες μετασχηματιζόμενες λειτουργίες των δικτύων επόμενης γενιάς συνηγορούν στο ότι τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπηρεσιών και των εφαρμογών που θα προσφερθούν πάνω από τα αυτά στους καταναλωτές θα είναι πολύ διαφορετικά από τα αντίστοιχα των εφαρμογών που τρέχουν στο σημερινό διαδίκτυο, όπως φαίνονται και στον ακόλουθο Πίνακα 1-1:

Σημερινά Δίκτυα	Δίκτυα Επόμενης Γενιάς
Ανεξαρτησία: Μεταφόρτωση μουσικών αρχείων από ολόκληρο τον κόσμο.	Συνεργασία: Δημιουργία μουσικής μαζί με μουσικούς από ολόκληρο τον κόσμο.

Αντίδραση: Ιστότοποι.	Διάδραση: Εικονικοί κόσμοι.
Ιδιωτικοί πόροι: <i>Online</i> αποθήκευση.	Μεριζόμενοι πόροι: <i>Online</i> εξυπηρετητές αρχείων και απομακρυσμένες συσκευές.
Κεντριοποιημένη υπολογιστική: Τοπικά σύνολα δεδομένων και υπολογιστική.	Υπολογιστική νέφους: Καταναμημένα σύνολα δεδομένων και υπολογιστική.
Επικοινωνία τύπων <i>ένας-προς-έναν</i> ή <i>ένας-προς-πολλούς</i> : Συζητήσεις με δικτυακή κάμερα.	Επικοινωνία τύπου <i>πολλοί-προς-πολλούς</i> : Εικονικές συζητήσεις.
Χαμηλή ποιότητα: Ήχος και βίντεο χαμηλής ποιότητας.	Υψηλή ποιότητα: Ήχος και βίντεο υψηλής ανάλυσης.

Πίνακας 1-1: Ποιοτικά χαρακτηριστικά στα σημερινά δίκτυα και στα δίκτυα επόμενης γενιάς

Προς την κατεύθυνση της αποτελεσματικής λειτουργίας των δικτύων επόμενης γενιάς για την ικανοποίηση των παραπάνω ποιοτικών χαρακτηριστικών των υποστηριζόμενων υπηρεσιών και εφαρμογών, πέρα από την προφανή ευεργετική αύξηση της διαθέσιμης χωρητικότητάς τους σε όλους τους επιμέρους τομείς του δικτύου, σημαντικότερο ρόλο θα παίζει ασφαλώς η προσθήκη στοιχείων βέλτιστης αρχιτεκτονικής σχεδίασης και έξυπνης διαχείρισής τους [13]. Οι προαναφερθείσες υπηρεσίες θα αξιώσουν καλύτερη και περισσότερο αξιόπιστη απόδοση του δικτύου για να ικανοποιήσουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Θα απαιτήσουν σταθερές εγγυήσεις από το δίκτυο ότι συγκεκριμένοι πόροι (εύρος ζώνης, καθυστέρηση, χώροι ενδιάμεσου καταχωρητή) θα δεσμευτούν αποκλειστικά γι αυτές [14-16]. Επιπλέον, οι απαιτήσεις του τελικού χρήστη θα είναι αυξημένες τώρα, όσον αφορά την επίδοση, την προσιτότητα και την ασφάλεια. Το βέλτιστο δίκτυο του μέλλοντος δε θα είναι τελικά αυτό που θα προσφέρει ισομερή διανομή των πόρων του σε όλες τις ενεργές συνδέσεις τηλεπικοινωνιακής κίνησης, αλλά αυτό που θα προσφέρει διακριτές μεν, συγκεκριμένες δε εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας σε όσο το δυνατόν περισσότερους τελικούς χρήστες. Το τελευταίο δεν επιτυγχάνεται παρά μόνο με τον διαχωρισμό των προσφερόμενων εφαρμογών σε διακριτές κλάσεις υπηρεσίας με την ταυτόχρονη απόδοση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών ποιότητας υπηρεσίας (*QoS*) στην κάθε μία από αυτές.

Σε ένα τέτοιο απαιτητικό δίκτυο επόμενης γενιάς πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών, οι σχεδιαστές του δικτύου καλούνται να αντιμετωπίσουν ένα πολύπλοκο πρόβλημα βελτιστοποίησης του δικτύου έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας των διαφορετικών αυτών κλάσεων. Η σχεδίαση αυτή θα πρέπει να θεωρήσει ως

δεδομένο ότι ο τελικός χρήστης δεν ενδιαφέρεται ουσιαστικά για τον τρόπο με τον οποίο μία συγκεκριμένη υπηρεσία παραδίδεται προς κατανάλωση, αλλά αποκλειστικά για το επίπεδο της ποιότητας της υπηρεσίας που τελικά αυτός βιώνει. Έτσι, η ποιότητα υπηρεσίας μεταφράζεται στην ικανότητα ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος να παρέχει καλύτερη υπηρεσία σε επιλεγμένη κίνηση πάνω από ετερογενή δίκτυα. Η διαφορετικότητα των δικτύων επόμενης γενιάς μπορεί να αναφέρεται σε διαφορετικές τεχνολογίες δικτύων ή σε διαφορετικούς δικτυακούς τομείς. Η ανάγκη για λύσεις διαλειτουργικότητας τέτοιων ετερογενών δικτύων εμφανίζει τεράστιο ερευνητικό και πρακτικό ενδιαφέρον [17]. Ο κυρίαρχος στόχος της απαίτησης για εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας είναι, ανάμεσα σε άλλα, η παραχώρηση προτεραιότητας, η αποκλειστική χρήση εύρους ζώνης (*bandwidth*), η ελεγχόμενη καθυστέρηση (*delay*) και μεταβολή καθυστέρησης (*delay variation-jitter*) και τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά απωλειών (*loss probability*). Επιπρόσθετα, είναι εξίσου σημαντική η εξασφάλιση ενός ικανοποιητικού επιπέδου ποιότητας υπηρεσίας για τις υπηρεσίες και τις εφαρμογές που υπολείπονται σε προτεραιότητα.

Μία τέτοια ολοκληρωμένη πρόταση διάρθρωσης πολυυπηρεσιακών δικτύων επόμενης γενιάς, με στόχο την επιτυχή διαλειτουργικότητα τομειακών δικτύων και, τελικά, την παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας σε ομοιόμορφες και εξατομικευμένες εφαρμογές παρόμοιες με αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δίνεται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Συγκεκριμένα, βασικός στόχος της μελέτης είναι η πρόταση συγκεκριμένων μηχανισμών που θα μπορούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά το κρίσιμο πρόβλημα της διαλειτουργικότητας μεταξύ ετερογενών δικτύων υψηλής και χαμηλής χωρητικότητας. Η διατριβή αποσκοπεί στην πρόταση μιας συνολικής προσέγγισης-λύσης, η οποία θα είναι εφαρμόσιμη ανεξάρτητα από τις επιμέρους τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται κάθε φορά και οι οποίες αναμένεται να εξελίσσονται συνεχώς, ενώ ταυτόχρονα συνιστούν το πρόβλημα της διαλειτουργικότητας μεταξύ δικτύων διαφορετικής χωρητικότητας.

Ειδικότερα, η προτεινόμενη λύση καθορίζει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο, το οποίο προσδιορίζει διαφοροποιημένες κλάσεις με βάση την ποιότητα υπηρεσίας για τις ροές των πακέτων και εφαρμόζει χρονοπρογραμματισμό αυστηρής προτεραιότητας (*strict priority scheduling*). Αναγνωρίζοντας τη μεταβολή καθυστέρησης ως μέτρο επίδοσης κρίσιμης σημασίας για πολυμεσικές εφαρμογές υψηλής ποιότητας και παρατηρώντας ότι η μέγιστη τιμή της συναντάται στους κόμβους συμφόρησης, το σενάριο που μελετάται είναι αυτό κατά το οποίο ροές πακέτων που ανήκουν σε διαφορετικές κλάσεις «συναγωνίζονται» ως προς το εύρος ζώνης σε έναν κόμβο συμφόρησης. Με κατάλληλες υπολογιστικές μεθόδους εξάγεται ο μέγιστος αριθμός επιτρεπτών ροών ανά κλάση υπηρεσίας και πραγματοποιείται αποτίμηση της επίδοσης ενός κόμβου συμφόρησης με βάση την πιθανότητα φραγής (*blocking probability*) και την διεκπεραιωτικότητα (*throughput*).

Με απώτερο σκοπό τη βελτιστοποίηση της επίδοσης σε σχέση με την πιθανότητα φραγής και τη διεκπεραιωτικότητα, προτείνεται στη συνέχεια ένας προηγμένος μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης, βασισμένος στην μεταβολή καθυστέρησης, ο οποίος προορίζεται να εφαρμοστεί τοπικά στους κόμβους συμφόρησης. Αξίζει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι ο τοπικός έλεγχος πρόσβασης επιλέγεται συχνά ως αποτελεσματική εναλλακτική σε σχέση με τον κεντρικό, δεδομένου ότι επιτρέπει καλύτερη επίγνωση της διαθεσιμότητας των περιορισμένων δικτυακών πόρων στα άκρα [18]. Προς αυτή την κατεύθυνση, διατυπώνεται ένα σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης και προτείνεται μια προσεγγιστική μέθοδος επίλυσής του, η οποία αποδεικνύεται ότι παρέχει ανταγωνιστικές λύσεις. Επιπλέον, εμφανίζει χαμηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης, η οποία την καθιστά εμπορικά εφικτή.

1.2 ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Ο στόχος μίας πραγματολογικής, απλής και ταυτόχρονα αποδοτικής πρότασης υιοθετήθηκε στις τρεις ακόλουθες κυρίαρχες ερευνητικές συνιστώσες της διατριβής:

- ο Στην μελέτη καθορισμού του αριθμού των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσίας, των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, καθώς και του κυρίαρχου διαφοριστή τους. Η επιλογή της μέγιστης επιτρεπτής μεταβολής καθυστέρησης που μπορεί να υποστεί μία ροή ανά κλάση υπηρεσίας σε έναν κόμβο συμφόρησης του δικτύου, αποτελεί καινοτομική πρόταση της εργασίας. Η σύζευξη ενός τομέα δικτύου μικρής χωρητικότητας με έναν αντίστοιχο μεγάλης χωρητικότητας αυξάνει την καθυστέρηση ουροποίησης (*queuing delay*) που υφίστανται τα πακέτα των ροών των παρεχόμενων υπηρεσιών. Ενώ οι οργανισμοί προτυποποίησης αναδεικνύουν την μέγιστη διατεματική καθυστέρηση σαν παράμετρο διαφοροποίησης των κλάσεων υπηρεσίας [19-22], η εργασία προτείνει έναν μηχανισμό ελέγχου της μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης, περιορίζοντας ταυτόχρονα με έμμεσο τρόπο την διατεματική καθυστέρηση. Στην πρόταση αυτή συνέβαλλαν δύο αντικειμενικές παραδοχές. Πρώτον, το γεγονός ότι η μεταβολή καθυστέρησης έχει αναδειχτεί στην ερευνητική βιβλιογραφία σαν κυρίαρχη μετρική ποιότητας σε πολυμεσικές εφαρμογές [23-26]. Δεύτερον, το ότι, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, τα δίκτυα επόμενης γενιάς θα κληθούν να υποστηρίξουν κυρίως ένα ευρύ φάσμα από τέτοιες εφαρμογές ήχου και βίντεο. Η εκ των κάτω προσέγγιση της εργασίας με την επιλογή της μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης ανά κόμβο δικτύου ως διαφοριστή των κλάσεων υπηρεσίας, δίνει το δικαίωμα στην ακριβή μελέτη μηχανισμών ικανοποίησης των επιδιωκόμενων τιμών, αντίστοιχων με αυτόν που προτείνεται στην εργασία με χρήση μηχανισμού χρονοπρογραμματισμού αυστηρής προτεραιότητας.

- ο Στην αναλυτική μελέτη υπολογισμού των τιμών μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης που υφίστανται οι ροές των παρεχόμενων εφαρμογών ανά κλάση υπηρεσίας. Παίρνοντας ως δεδομένη την συγκεκριμένη επιλογή μηχανισμού χρονοπρογραμματισμού για την εξυπηρέτηση των προτεινόμενων κλάσεων υπηρεσίας στους κόμβους που εμφανίζουν το πρόβλημα της διαλειτουργικότητας μεταξύ δικτύων διαφορετικής χωρητικότητας, εξάγονται αναλυτικές σχέσεις που δίνουν τόσο την μεταβολή καθυστέρησης όσο και τα ενδεικνύομενα μεγέθη των ενδιάμεσων καταχωρητών στις ουρές εξυπηρέτησης των κλάσεων υπηρεσίας. Οι σχέσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για την βέλτιστη διαστασιοποίηση των κόμβων συμφόρησης ενός δικτύου συμβατού με τις προτάσεις της διατριβής.
- ο Και, τέλος, στην μελέτη εφαρμογής μίας πολιτικής ελέγχου πρόσβασης κλήσεων σε τοπικό επίπεδο στους κόμβους συμφόρησης. Ο απλοποιημένος μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης *Ανωτάτων Ορίων* που προτείνεται, αποδεικνύεται ότι βελτιώνει την συστημική απόδοση του δικτύου και εξομαλύνει σημαντικά τις όποιες ανωμαλίες λειτουργίας θα μπορούσε να δημιουργήσει ο χρονοπρογραμματιστής αυστηρής προτεραιότητας που χρησιμοποιείται στο ολοκληρωμένο πλαίσιο. Για βέλτιστη σύμπραξη των πολιτικών ελέγχου πρόσβασης και χρονοπρογραμματισμού, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι αριθμητικές λύσεις των προβλημάτων βελτιστοποίησης που μορφοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής.

1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η παρούσα διατριβή διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια, εκ των οποίων το παρόν αποτέλεσε μία πολύ σύντομη εισαγωγή, προβάλλοντας την ανάγκη που έχει δημιουργηθεί τα τελευταία χρόνια για ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο μηχανισμών διαλειτουργικότητας για πολυπηρεσιακά δίκτυα επόμενης γενιάς.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας, αρχικά ορίζονται και αναλύονται οι αρχιτεκτονικές και τα χαρακτηριστικά των δικτύων επόμενης γενιάς. Στη συνέχεια αναφέρονται οι πλέον κυρίαρχες τεχνολογίες επόμενης γενιάς, τόσο για τα δίκτυα κορμού όσο και για τα δίκτυα πρόσβασης. Δίνονται οι ορισμοί κάθετης και οριζόντιας διαλειτουργικότητας και σχετικά παραδείγματα αυτών. Τέλος, παρουσιάζεται μία γενική τοποθέτηση του κινήτρου μελέτης και της προσέγγισης για τη λύση του προβλήματος κάθετης διαλειτουργικότητας στα πλαίσια της διατριβής.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η ποιότητα υπηρεσίας σε πολυπηρεσιακά δίκτυα και δίνονται οι παράμετροι που την ποσοτικοποιούν. Περιγράφονται οι συγκεκριμένοι

μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για έλεγχο της ποιότητας υπηρεσίας, τα χαρακτηριστικά τους και τα μοντέλα εφαρμογής τους σε δίκτυα επόμενης γενιάς. Δίνεται μία θεωρητική ανάλυση του τρόπου καθορισμού διαφορετικών κλάσεων υπηρεσίας και οι διαφορετικές προσεγγίσεις. Τέλος, για την πληρότητα της διατριβής παρουσιάζεται η προσέγγιση της ποιότητας εμπειρίας που λειτουργεί συμπληρωματικά στην ποιότητα υπηρεσίας για την αποτίμηση της συνολικής ποιότητας μίας προσφερόμενης υπηρεσίας. Οι προτάσεις της παρούσας διατριβής θα μπορούσαν κάλλιστα να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής καινοτομικής έρευνας στον χώρο της ποιότητας εμπειρίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες του ολοκληρωμένου πλαισίου του μηχανισμού διαλειτουργικότητας για δίκτυα επόμενης γενιάς. Αφού αναλύονται οι σχετικές εργασίες των τηλεπικοινωνιακών οργανισμών προτυποποίησης, προτείνεται ο διαφορετικός τρόπος καθορισμού των κλάσεων υπηρεσίας με βάση τις επιτρεπτές τιμές της μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης. Παίρνοντας ως δεδομένη την πρόταση της διατριβής για εφαρμογή χρονοπρογραμματισμού αυστηρής προτεραιότητας για την εξυπηρέτησή τους, προκύπτουν οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης και των μεγεθών των ενδιάμεσων καταχωρητών στους κόμβους συμφόρησης, οι οποίες και επιβεβαιώνονται με χρήση εργαλείου δικτυακής προσομοίωσης. Στη συνέχεια, εξάγονται οι σχέσεις που δίνουν τον μέγιστο αριθμό επιτρεπτών ροών ανά κλάση υπηρεσίας και πραγματοποιείται αποτίμηση της επίδοσης ενός κόμβου συμφόρησης σε σχέση με τις συστημικές μετρικές της πιθανότητας φραγής και της διεκπεραιωτικότητας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο προτείνεται ένας προηγμένος μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης, βασισμένος στην μεταβολή καθυστέρησης. Προς αυτή την κατεύθυνση, διαμορφώνονται δύο προβλήματα βελτιστοποίησης του ελέγχου πρόσβασης σε πολυπηρεσιακά δίκτυα με τα χαρακτηριστικά που προτάθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το πρώτο πρόβλημα στοχεύει στη βελτιστοποίηση της συστημικής πιθανότητας φραγής και το δεύτερο στην συστημική διεκπεραιωτικότητα. Και τα δύο προβλήματα δίνονται σαν διαδικασίες αποφάσεων *Markov* συνεχούς χρόνου. Στη συνέχεια, προτείνεται μια απλοποιημένη μέθοδος ελέγχου πρόσβασης που βασίζεται στην υιοθέτηση γραμμικών ανώτατων ορίων στις επιτρεπτές ροές ανά κλάση υπηρεσίας, που αποδεικνύεται ότι παρέχει ανταγωνιστικές λύσεις με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα.

Τέλος, το έκτο κεφάλαιο συνοψίζει τα γενικά συμπεράσματα για το περιεχόμενο των κεφαλαίων που προηγήθηκαν και ανακεφαλαιώνει τα καινοτόμα στοιχεία που πραγματεύτηκε αυτή η διατριβή. Τέλος, προτείνει συγκεκριμένα μελλοντικά βήματα της παρούσας εργασίας.

1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Technical Analysis (2005). Sophisticated Broadband Services: Final Report for the Department of Trade and Industry (DTI). Available at:
http://www.broadbanduk.org/reports/dti/051128_sophisticated_broadband_services_report2.pdf
- [2] ITIF Technical Report (2009). The Need for Speed: The Importance of Next-Generation Broadband Networks. Available at:
<http://archive.itif.org/index.php?id=231>
- [3] Kovacicova T. (2009). Grid and cloud computing integration with NGN. In Proc. of the 13th WSEAS international conference on Communications.
- [4] Available at: <http://www.youtube.com>
- [5] Available at: <http://www.hulu.com>
- [6] Available at: <http://www.abc.go.com>
- [7] Lee G.M., Choi K.J. (2008). Personalized IPTV Services using Web-based Open Platform in NGN. In Proc. Of the: IEEE GLOBECOM 2008.
- [8] Mikoczy E., Schumann S., Stokking H., Deventer O., Niamut A. (2009). Combinational services of NGN based IPTV. In Proc of the 5th International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities.
- [9] Copeland R. (2008). Converging NGN Wireline and Mobile 3G Networks with IMS. CRC Press.
- [10] Nikolaidis A., Papastefanos S., Doumenis G., Stassinopoulos G., Drakos M.-P. (2007). Local and Remote Management Integration for Flexible Service Provisioning to the Home. IEEE Communications Magazine, 45(10), 130-138.
- [11] Nikolaidis A., Papastefanos S., Stassinopoulos G., Drakos M.-P., Doumenis G. (2006). Automating Remote Configuration Mechanisms for Home Devices. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 52(2), 407-413.
- [12] Nikolaidis A., Doumenis G., Stassinopoulos G., D'Haeseleer S., Drakos M.-P., Anastasopoulos M. (2005). Management Traffic in Emerging Remote Configuration Mechanisms for Residential Gateways and Home Devices. IEEE Communications Magazine, 43(5), 154-162.
- [13] Blum N., Magedanz T., Schreiner F., Wahle S. (2009). From IMS Management to SOA Based NGN Management. Journal of Network and Systems Management (Springer), 17(1-2), 33-52.
- [14] Mustill D., Willis P.J. (2005). Delivering QoS in the next generation network -- a standards perspective. BT Technology Journal (Kluwer), 23(2), 48-60.

- [15] Lakhtaria K.I. (2009). Enhancing QoS and QoE in IMS Enabled Next Generation Networks. In Proc. of the First International Conference on Networks and Communications.
- [16] Kos A., Volk M., Bester J. (2009). Quality Assurance in the IMS-Based NGN Environment. Book Chapter in Handbook of Research on Wireless Multimedia: Quality of Service and Solutions (IGI Global).
- [17] Ayatollahi Z., Sarukhani S., Fayazi F., Roknabady Z.A., Madani A. (2008). Interoperability problems in Next Generation Network protocols. In Proc. of the First ITU-T Kaleidoscope Academic Conference on Innovations in NGN: Future Network and Services.
- [18] Aracil J., Hernandez J.A., Elizondo A.J., Duque R., de Dios O.G. (2008). On local CAC schemes for scalability of high-speed networks. In Proc. of the 10th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks.
- [19] 3GPP TS 22.105 (2008). Services and service capabilities. V9.0.0, Release 9, 2008-12
- [20] 3GPP TS 23.107 (2010). Quality of Service (QoS) concept and architecture. V9.1.0, 2010-06.
- [21] ITU-T Recommendation Y.1541 (2002). Network Performance Objectives for IP-Based Services.
- [22] ITU-T Recommendation G.1010 (2001). End-User Multimedia QoS Categories.
- [23] Kadur S., Golshani F., Millard B. (1996). Delay-jitter control in multimedia applications. *Multimedia Systems*, 4(1), 30-39.
- [24] Corte A.L., Lombardo A., Palazzo S., Schembra G. (1995). QoS requirement control in delay jitter sensitive multimedia services. In Proc. of the IEEE International Conference on Communications.
- [25] Kandar S., Bhunia C.T. (2010). A New Protocol for Minimizing Jitter for Guaranteed QoS in Network Multimedia Communication. In Proc. of the International Conference on Advances in Computer Engineering.
- [26] Wang Z., Crowcroft J. (1993). Analysis of burstiness and jitter in multimedia communications. In Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, με τη διείσδυση του διαδικτύου στη σύγχρονη ζωή και την σταθερά ανοδική πορεία της ευρυζωνικότητας, η τεχνολογία πληροφοριών και επικοινωνιών συνεχίζει την εξέλιξη της προς τα *Δίκτυα Επόμενης Γενιάς (Next Generation Networks - NGNs)*. Η έννοια των Δικτύων Επόμενης Γενιάς έχει εισαχθεί για να λάβει υπόψη τη νέα κατάσταση στην αγορά τηλεπικοινωνιών, που χαρακτηρίζεται από παράγοντες όπως: ανταγωνισμός μεταξύ των παρόχων εξαιτίας της απελευθέρωσης της αγοράς, έκρηξη στην ψηφιακή κίνηση με την αυξανόμενη χρήση του διαδικτύου, αυξανόμενη ζήτηση των χρηστών για νέες πολυμεσικές υπηρεσίες και υποστήριξη κινητικότητας, σύγκλιση δικτύων και υπηρεσιών, κ.λπ. [1]. Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει τις εξελίξεις που αφορούν στα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς, καταγράφοντας τις τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν και αναδεικνύοντας τα προβλήματα διαλειτουργικότητας που παρουσιάστηκαν. Αναγνωρίζοντας την ερευνητική πρόκληση που πηγάζει από τα προβλήματα αυτά, στο παρόν κεφάλαιο εισάγεται το βασικό πρόβλημα που πραγματεύεται η διατριβή, ορίζοντας το γενικό πλαίσιο μελέτης του.

Στο στάδιο της μετάβασης προς τα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς, το Δημόσιο Τηλεπικοινωνιακό Δίκτυο Μεταγωγής (*Public Switched Telecommunication Network - PSTN*) αναδιαμορφώνεται συνεχώς από πλευράς τεχνολογίας. Τα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς αναμένεται να ενσωματώσουν όλες τις ενσύρματες και ασύρματες τεχνολογίες δικτύων, παρέχοντας στους χρήστες ομοιόμορφες και εξατομικευμένες πολυμεσικές υπηρεσίες, οπουδήποτε και οποτεδήποτε. Προς αυτήν την κατεύθυνση, η εξέλιξη των δικτύων σε Δίκτυα Επόμενης Γενιάς θα πρέπει να επιτρέψει τη διαλειτουργικότητα με τα υπάρχοντα δίκτυα, επιτρέποντας παράλληλα την υλοποίηση νέων δυνατοτήτων. Δεδομένου, επίσης, ότι οι τεχνολογίες δικτύων θα συνεχίσουν να εξελίσσονται με γρήγορους ρυθμούς, για να επιτευχθεί η αξιοποίηση των Δικτύων Επόμενης Γενιάς στο μέγιστο, απαιτείται να ξεπεραστεί το κρίσιμο πρόβλημα της διαλειτουργικότητας μεταξύ δικτύων διαφορετικής χωρητικότητας. Στο πλαίσιο αυτό, η πρόταση μιας συνολικής προσέγγισης-λύσης, η οποία θα είναι

εφαρμόσιμη ανεξάρτητα από τις επιμέρους τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, αποτελεί κρίσιμη περιοχή έρευνας και κίνητρο μελέτης της παρούσας διατριβής.

Τα κύρια σημεία αυτού του κεφαλαίου περιγράφονται εν συντομία στη συνέχεια. Καταρχήν, μελετάται η έννοια των Δικτύων Επόμενης Γενιάς, δίνοντας τον ορισμό, τα βασικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα από την εφαρμογή τους, και παρουσιάζοντας τη λειτουργική αρχιτεκτονική τους. Δεύτερον, καταγράφονται οι εξελίξεις που σημειώνονται στις τεχνολογίες των δικτύων πρόσβασης και κορμού επόμενης γενιάς. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται το κρίσιμο ζήτημα της διαλειτουργικότητας που συναντάται σε Δίκτυα Επόμενης Γενιάς, και ορίζεται σε δυο διαστάσεις, την οριζόντια και την κάθετη, ανάλογα με τον τύπο των δικτύων που εμπλέκονται. Επιπλέον, δίνεται η σχετική βιβλιογραφική έρευνα που αφορά στους δυο τύπους διαλειτουργικότητας. Τέλος, εστιάζοντας στην περιοχή μελέτης της κάθετης διαλειτουργικότητας, εισάγεται το πρόβλημα μελέτης της διατριβής, το οποίο πραγματεύεται το κρίσιμο πρόβλημα της διαλειτουργικότητας μεταξύ δικτύων διαφορετικής χωρητικότητας. Στο πλαίσιο αυτό, περιγράφεται το κίνητρο μελέτης του προβλήματος και η προσέγγιση της λύσης του, αναφέροντας τη σύνδεση με τα κεφάλαια που ακολουθούν.

2.2 ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

2.2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Ο όρος «Δίκτυα Επόμενης Γενιάς» χρησιμοποιείται γενικά για να περιγράψει τη μετάβαση προς υψηλότερες ταχύτητες δικτύων χρησιμοποιώντας ευρυζωνικά χαρακτηριστικά, τη μετακίνηση από το PSTN σε ένα IP δίκτυο, και μια ευρύτερη ενοποίηση των υπηρεσιών σε ένα ενιαίο δίκτυο, ενώ συχνά είναι αντιπροσωπευτικός της έννοιας του οράματος και της αγοράς [2].

Από πιο τεχνική άποψη, το Δίκτυο Επόμενης Γενιάς ορίζεται από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (*International Telecommunication Union - ITU*) ως ένα δίκτυο βασισμένο σε πακέτα, ικανό να παρέχει τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και να χρησιμοποιεί πολλαπλές ευρυζωνικές τεχνολογίες μεταφοράς με χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας, όπου οι λειτουργίες που σχετίζονται με το επίπεδο υπηρεσιών είναι ανεξάρτητες από τις υποκείμενες τεχνολογίες που σχετίζονται με το επίπεδο μεταφοράς. Επιτρέπει την αδέσμευτη πρόσβαση των χρηστών σε δίκτυα και παρόχους ή υπηρεσίες της επιλογής τους, ενώ υποστηρίζει γενικευμένη κινητικότητα, η οποία επιτρέπει τη συνεχή και πανταχού παρούσα παροχή υπηρεσιών στους χρήστες [1, 3].

Ένας από τους βασικούς σκοπούς των Δικτύων Επόμενης Γενιάς είναι να παράσχει ένα κοινό, ενοποιημένο και ευέλικτο περιβάλλον ελέγχου, το οποίο θα υποστηρίζει

πολλαπλούς τύπους υπηρεσιών και εφαρμογών διαχείρισης, πάνω από πολλαπλούς τύπους δικτύων μεταφοράς [4].

2.2.2 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Συνοπτικά, ένα Δίκτυο Επόμενης Γενιάς έχει τα ακόλουθα θεμελιώδη χαρακτηριστικά:

- Μεταφορά βασισμένη σε πακέτα.
- Διαχωρισμό των λειτουργιών ελέγχου μεταξύ των υποκείμενων δυνατοτήτων υποδομής, κλήσης/συνόδου, και εφαρμογής/υπηρεσίας.
- Αποσύζευξη των υπηρεσιών από το δίκτυο και παροχή «ανοικτών» διεπαφών.
- Υποστήριξη ενός ευρέους φάσματος υπηρεσιών, εφαρμογών και μηχανισμών βασισμένους σε δομικές μονάδες υπηρεσιών (συμπεριλαμβανομένων των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου/*streaming*/μη-πραγματικού χρόνου και πολυμεσικών).
- Ευρυζωνικές δυνατότητες με διατελεσματική ποιότητα υπηρεσίας.
- Διαλειτουργικότητα με τα συμβατικά δίκτυα μέσω ανοικτών διεπαφών.
- Γενικευμένη κινητικότητα.
- Απεριόριστη πρόσβαση των χρηστών σε διαφορετικούς παρόχους υπηρεσιών.
- Πληθώρα σχημάτων ταυτοποίησης που μπορούν να επιλυθούν σε IP διευθύνσεις για τους σκοπούς της δρομολόγησης στα IP δίκτυα.
- Ενιαία χαρακτηριστικά υπηρεσιών για την ίδια υπηρεσία, όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από τον χρήστη.
- Σύγκλιση μεταξύ σταθερών/κινητών υπηρεσιών.
- Ανεξαρτησία των λειτουργιών που σχετίζονται με τις υπηρεσίες από τις υποκείμενες τεχνολογίες που σχετίζονται με το δίκτυο μεταφοράς.
- Υποστήριξη πολλαπλών τεχνολογιών *τελευταίου μιλίου (last mile)*.
- Συμμόρφωση με όλες τις ρυθμιστικές απαιτήσεις, όπως για παράδειγμα με αυτές που αφορούν σε επικοινωνίες έκτακτης ανάγκης, ασφάλεια, ιδιωτικότητα, νόμιμη υποκλοπή, κ.λπ.

Πιο αναλυτικά, ένα Δίκτυο Επόμενης Γενιάς παρέχει τις δυνατότητες (υποδομή, πρωτόκολλα, κ.λπ.) για τη δημιουργία, ανάπτυξη και διαχείριση κάθε είδους υπηρεσίας

(γνωστού ή μη). Αυτό περιλαμβάνει υπηρεσίες που χρησιμοποιούν κάθε είδους μέσο (ακουστικό, οπτικό, οπτικοακουστικό), με όλα τα είδη σχεδίων κωδικοποίησης και υπηρεσιών δεδομένων, όπως συνομιλιακές, μονοεκπομπής (*unicast*), πολυεκπομπής (*multicast*) και ευρείας εκπομπής (*broadcast*), μηνυματοδοσίας (*messaging*), απλές υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων, πραγματικού χρόνου και μη-πραγματικού χρόνου, ευαίσθητες ή ανεκτικές στις καθυστερήσεις. Υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης, από μερικά kbit/s έως εκατοντάδες Mbit/s, εγγυημένες ή μη, υποστηρίζονται μέσα από τις δυνατότητες των τεχνολογιών των δικτύων μεταφοράς. Επιπλέον, στο πλαίσιο ενός Δικτύου Επόμενης Γενιάς δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην προσαρμογή των υπηρεσιών στις απαιτήσεις των πελατών από τους παρόχους, ενώ μερικοί από αυτούς θα προσφέρουν στους πελάτες τους τη δυνατότητα να προσαρμόζουν οι ίδιοι τις υπηρεσίες τους στις απαιτήσεις τους. Το Δίκτυο Επόμενης Γενιάς αποτελείται από τις κατάλληλες διεπαφές υπηρεσιών (*Application Programming Interfaces - APIs*) προκειμένου να υποστηρίζεται η αποτελεσματική δημιουργία, παροχή και διαχείριση των υπηρεσιών. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του Δικτύου Επόμενης Γενιάς είναι η αποσύζευξη των υπηρεσιών από το δίκτυο μεταφοράς, παρέχοντάς τους τη δυνατότητα να προσφέρονται χωριστά και να εξελίσσονται ανεξάρτητα. Συνεπώς, στις αρχιτεκτονικές NGN, υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ των λειτουργιών που αφορούν στις υπηρεσίες και αυτών που αφορούν στο δίκτυο μεταφοράς. Το Δίκτυο Επόμενης Γενιάς επιτρέπει την παροχή υπαρχουσών και νέων υπηρεσιών, ανεξάρτητα από το δίκτυο και τον τύπο πρόσβασης που χρησιμοποιείται.

Σε ένα Δίκτυο Επόμενης Γενιάς οι λειτουργικές οντότητες που ελέγχουν την πολιτική, τις συνόδους, τα μέσα, τους πόρους, την παροχή υπηρεσιών, την ασφάλεια, κ.λπ., ενδέχεται να είναι κατανεμημένες στην υποδομή των δικτύων, υπαρχόντων και νέων. Όταν είναι φυσικά κατανεμημένες, επικοινωνούν πάνω από ανοικτές διεπαφές. Συνεπώς ο προσδιορισμός των σημείων αναφοράς αποτελεί σημαντικό θέμα. Νέα πρωτόκολλα προτυποποιούνται για να παρέχουν επικοινωνία μεταξύ των εν λόγω λειτουργικών οντοτήτων. Η διαλειτουργικότητα μεταξύ Δικτύων Επόμενης Γενιάς διαφορετικών παρόχων ή μεταξύ Δικτύου Επόμενης Γενιάς και υπαρχόντων δικτύων όπως το PSTN, το ISDN και το GSM εξασφαλίζεται με τη βοήθεια πυλών.

Ένα Δίκτυο Επόμενης Γενιάς είναι δυνατόν να υποστηρίζει υπάρχοντες και «NGN-ενήμερες» τερματικές συσκευές. Ως εκ τούτου, στα τερματικά που συνδέονται σε ένα Δίκτυο Επόμενης Γενιάς περιλαμβάνονται τα αναλογικά τηλέφωνα, τα μηχανήματα fax, οι ISDN συσκευές, τα κυψελοειδή κινητά τηλέφωνα, οι GPRS τερματικές συσκευές, τα SIP τερματικά, τα Ethernet τηλέφωνα μέσω PCs, οι ψηφιακές επισύσκευες μονάδες (*set top boxes*), τα καλωδιακά modem, κ.λπ.

Πιο εξειδικευμένα θέματα αφορούν στην Ποιότητα Υπηρεσίας (*Quality of Service - QoS*) για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (με εγγυημένο εύρος ζώνης, εγγυημένη καθυστέρηση, εγγυημένη απώλεια πακέτων, κ.λπ.), καθώς επίσης και στην ασφάλεια. Το Δίκτυο Επόμενης Γενιάς θα πρέπει να παρέχει τους κατάλληλους μηχανισμούς ασφάλειας ώστε να προστατεύει την ανταλλαγή ευαίσθητων πληροφοριών πάνω από την υποδομή του, να προστατεύει από την αθέμιτη χρήση των υπηρεσιών και να προστατεύει την υποδομή του από τις εξωτερικές επιθέσεις.

Σημαντικό χαρακτηριστικό των Δικτύων Επόμενης Γενιάς αποτελεί και η γενικευμένη κινητικότητα (*generalized mobility*), η οποία επιτρέπει ενιαία και συνεχή παροχή υπηρεσιών σε έναν χρήστη, δηλαδή ο χρήστης θεωρείται ως μοναδική οντότητα κατά τη χρησιμοποίηση διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης, ανεξάρτητα από τον τύπο πρόσβασης. Οι χρήστες, έχοντας στη διάθεσή τους όλο και περισσότερες τεχνολογίες πρόσβασης, θα απαιτούν να κινούνται μεταξύ διαφορετικών δικτύων πρόσβασης, σταθερών (π.χ. από xDSL σε καλωδιακά) ή ασύρματων (π.χ. από UMTS σε WLAN), έχοντας συνεχή πρόσβαση στο σύνολο των υπηρεσιών τους. Συνεπώς, η γενικευμένη κινητικότητα συνεπάγεται τη δυνατότητα χρησιμοποίησης διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης σε διαφορετικές θέσεις, ενώ ο χρήστης ή/και ο ίδιος ο τερματικός εξοπλισμός κινείται, επιτρέποντας στους χρήστες να χρησιμοποιούν και να διαχειρίζονται με ενιαίο και συνεχή τρόπο τις εφαρμογές/υπηρεσίες τους, διασχίζοντας διαφορετικά δίκτυα [1, 3].

2.2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

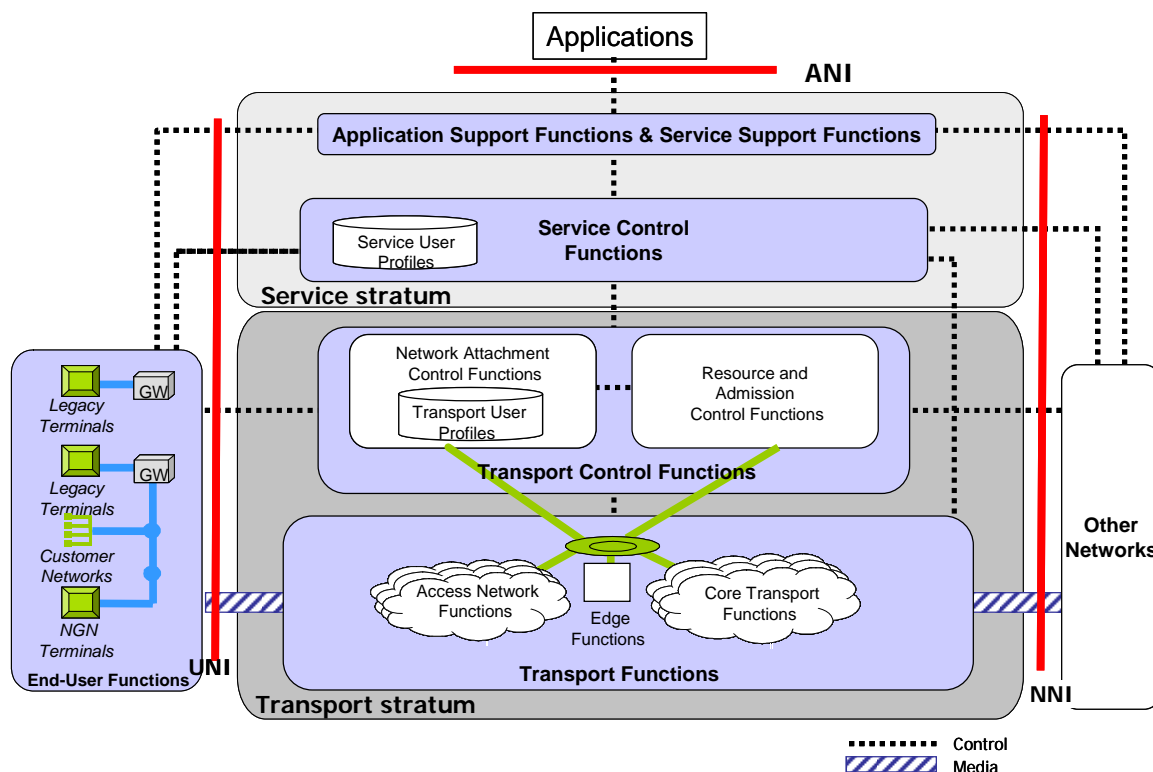
Μια ολοκληρωμένη προσέγγιση Δικτύων Επόμενης Γενιάς επιτυγχάνει τα εξής [4]:

- *Μείωση κόστους.* Μειώνει το κόστος, εξαλείφοντας την ανεπάρκεια των τρεχουσών ιδιόκτητων, μη-επαναχρησιμοποιήσιμων και προσαρμοσμένων στην κάθε υπηρεσία, λύσεων.
- *Μείωση χρόνου.* Μειώνει το χρόνο εισόδου στην αγορά και το κόστος του κύκλου ζωής νέων υπηρεσιών
- *Παροχή προηγμένων υπηρεσιών.* Επιτρέπει στους παρόχους να αναπτύξουν προηγμένες υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας ώστε να παραμείνουν ανταγωνιστικοί, καθώς επίσης και να επεκτείνουν τις δυνατότητές τους προς νέες αγορές.

2.2.4 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Η λειτουργική αρχιτεκτονική (*functional architecture*) ενός Δικτύου Επόμενης Γενιάς παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-1 που ακολουθεί. Οι βασικές λειτουργίες χωρίζονται σε

λειτουργίες στρώματος υπηρεσιών (*service stratum*) και λειτουργίες στρώματος μεταφοράς (*transport stratum*), σύμφωνα με [5, 7].



Σχήμα 2-1: Λειτουργική Αρχιτεκτονική Δικτύου Επόμενης Γενιάς

Οι λειτουργίες του στρώματος μεταφοράς περιλαμβάνουν τις λειτουργίες μεταφοράς (*transport functions*) και τις λειτουργίες ελέγχου μεταφοράς (*transport control functions*) [5, 7].

Οι λειτουργίες μεταφοράς παρέχουν τη συνδετικότητα για όλες τις συνιστώσες και τις φυσικά διαχωρισμένες λειτουργίες μέσα στο NGN. Υποστηρίζουν τη μεταφορά της πληροφορίας του μέσου, καθώς επίσης και τη μεταφορά πληροφορίας ελέγχου και διαχείρισης. Οι λειτουργίες μεταφοράς περιλαμβάνουν τις λειτουργίες δικτύου πρόσβασης (*access network functions*), τις λειτουργίες άκρων (*edge functions*), τις λειτουργίες δικτύου κορμού (*core network functions*), και τις λειτουργίες πυλών (*gateway functions*).

- Λειτουργίες δικτύου πρόσβασης (*access network functions*). Οι λειτουργίες δικτύου πρόσβασης ασχολούνται με την πρόσβαση των τελικών χρηστών στο δίκτυο, καθώς επίσης και με τη συλλογή και σύνθεση της πληροφορίας που προέρχεται από αυτές τις προσβάσεις προς το δίκτυο κορμού. Αυτές οι λειτουργίες εκτελούν επίσης τους μηχανισμούς ελέγχου ποιότητας υπηρεσίας, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης ενδιάμεσης μνήμης (*buffer management*), της ουροποίησης (*queueing*), του

χρονοπρογραμματισμού (*scheduling*), του φιλτραρίσματος πακέτων (*packet filtering*), της ταξινόμησης κίνησης (*traffic classification*), της σήμανσης (*marking*), της αστυνόμευσης (*policing*) και της μορφοποίησης (*shaping*). Ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την πρόσβαση στις υπηρεσίες του NGN, το δίκτυο πρόσβασης μπορεί να περιλαμβάνει λειτουργίες σχετικές με:

- 1) καλωδιακή πρόσβαση (*cable access*)
 - 2) xDSL πρόσβαση
 - 3) ασύρματη πρόσβαση (π.χ., τεχνολογίες IEEE 802.11, 802.16 πρόσβαση)
 - 4) οπτική πρόσβαση
- Λειτουργίες άκρων (*edge functions*). Οι λειτουργίες άκρων χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία της κίνησης, όταν συγκεντρωμένη κίνηση που προέρχεται από διαφορετικά δίκτυα πρόσβασης συγχωνεύεται στο δίκτυο κορμού. Περιλαμβάνουν λειτουργίες που σχετίζονται με την υποστήριξη για ποιότητα υπηρεσίας και έλεγχο της κίνησης. Οι λειτουργίες άκρων χρησιμοποιούνται επίσης μεταξύ δικτύων κορμού.
 - Λειτουργίες δικτύου κορμού (*core transport functions*). Οι λειτουργίες δικτύου κορμού είναι αρμόδιες για τη μεταφορά πληροφοριών σε όλο το δίκτυο κορμού. Παρέχουν τα μέσα για διαφοροποίηση της ποιότητας μεταφοράς στο δίκτυο κορμού. Αυτές οι λειτουργίες παρέχουν τους μηχανισμούς για ποιότητα υπηρεσίας, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης ενδιάμεσης μνήμης, της ουροποίησης, του χρονοπρογραμματισμού, του φιλτραρίσματος πακέτων, της ταξινόμησης κίνησης, της σήμανσης, της αστυνόμευσης, της μορφοποίησης και της υποστήριξης τειχών προστασίας. Η διασύνδεση μεταξύ του δικτύου κορμού και άλλων δικτύων πραγματοποιείται μέσω της διεπαφής NNI (*Network-to-Network Interface*).
 - Λειτουργίες πυλών (*gateway functions*). Οι λειτουργίες πυλών παρέχουν τις δυνατότητες για αλληλεπίδραση με τις λειτουργίες των τελικών χρηστών ή/και άλλα δίκτυα, συμπεριλαμβανομένων άλλων τύπων NGN και πολλών υπαρχόντων δικτύων, όπως PSTN/ISDN ή το διαδίκτυο. Οι λειτουργίες πυλών μπορούν να ελεγχθούν είτε άμεσα από τις λειτουργίες ελέγχου υπηρεσιών, είτε μέσω των λειτουργιών ελέγχου μεταφοράς.

Οι λειτουργίες ελέγχου μεταφοράς περιλαμβάνουν τις λειτουργίες ελέγχου πόρων και πρόσβασης (*Resource and Admission Control Functions - RACFs*) και τις λειτουργίες ελέγχου σύνδεσης δικτύου (*Network Attachment Control Functions - NACFs*).

- Λειτουργίες ελέγχου πόρων και πρόσβασης (*Resource and Admission Control Functions - RACF*). Το RACF λειτουργεί ως «διαιτητής» μεταξύ των λειτουργιών ελέγχου υπηρεσιών και των λειτουργιών μεταφοράς, για έλεγχο των πόρων δικτύου

σχετικά με ποιότητα υπηρεσίας μέσα στα δίκτυα πρόσβασης και κορμού. Η απόφαση βασίζεται σε πληροφορίες συνδρομής μεταφοράς, SLAs, κανόνες πολιτικής δικτύων, προτεραιότητες υπηρεσιών, την κατάσταση των πόρων μεταφοράς και πληροφορίες χρήσης.

Το RACF παρέχει μια γενική οπτική της υποδομής του δικτύου μεταφοράς προς τις λειτουργίες ελέγχου υπηρεσιών και καθιστά τους παρόχους υπηρεσιών «αδιάφορους» προς τις λεπτομέρειες των υποδομών μεταφοράς, όπως η τοπολογία δικτύου, η συνδετικότητα, η χρήση πόρων και οι μηχανισμοί/τεχνολογίες QoS. Το RACF αλληλεπιδρά με τις λειτουργίες ελέγχου υπηρεσιών και τις λειτουργίες μεταφοράς για πολλαπλές εφαρμογές (π.χ., κλήση βασισμένη σε SIP, video streaming, κ.λπ.) που απαιτούν τον έλεγχο των πόρων μεταφοράς.

Το RACF εκτελεί έλεγχο των πόρων μεταφοράς, βασισμένο σε πολιτικές κατόπιν αιτήματος που καταφθάνει από τις λειτουργίες ελέγχου μεταφοράς, καθορίζει τη διαθεσιμότητα και την αποδοχή των πόρων μεταφοράς, και εφαρμόζει ελέγχους στις λειτουργίες μεταφοράς για να επιβάλει την απόφαση της πολιτικής, συμπεριλαμβανομένης της κράτησης πόρων, του ελέγχου πρόσβασης και του ελέγχου πύλης. Το RACF αλληλεπιδρά με τις λειτουργίες μεταφοράς με σκοπό τον έλεγχο μιας ή περισσότερων από τις ακόλουθες λειτουργίες στο στρώμα μεταφοράς: κράτηση και κατανομή εύρους ζώνης, φιλτράρισμα πακέτων, ταξινόμηση κίνησης, σήμανση, αστυνόμευση, χειρισμός προτεραιοτήτων, μετάφραση δικτυακής διεύθυνσης/θύρας και υποστήριξη τειχών προστασίας.

Το RACF λαμβάνει υπόψη τις δυνατότητες των δικτύων μεταφοράς και τις σχετικές πληροφορίες συνδρομής για τους συνδρομητές που τους παρέχεται έλεγχος των πόρων μεταφοράς. Οι πληροφορίες συνδρομής είναι ευθύνη των λειτουργιών ελέγχου σύνδεσης δικτύου (NACFs). Το RACF και το NACF αλληλεπιδρούν για να ανταλλάξουν τις σχετικές πληροφορίες συνδρομής.

Για την παροχή αυτών των υπηρεσιών πάνω από διαφορετικούς παρόχους, οι λειτουργίες ελέγχου υπηρεσιών, το RACF και οι λειτουργίες μεταφοράς μπορούν να αλληλεπιδρούν με τις αντίστοιχες λειτουργίες σε άλλα NGNs.

- Λειτουργίες ελέγχου σύνδεσης δικτύου (*Network Attachment Control Functions - NACFs*). Το NACF πραγματοποιεί την εγγραφή στο επίπεδο πρόσβασης και την αρχικοποίηση των λειτουργιών των τελικών χρηστών (*end-user functions*) για την πρόσβαση στις υπηρεσίες NGN. Παρέχει την αναγνώριση/πιστοποίηση στο στρώμα μεταφοράς, διαχειρίζεται το διάστημα διευθύνσεων IP του δικτύου πρόσβασης, και πιστοποιεί τις συνόδους πρόσβασης. Τέλος, αναγγέλλει το σημείο επαφής των λειτουργιών NGN του στρώματος υπηρεσιών στον τελικό χρήστη.

Το NACF περιλαμβάνει επίσης το προφίλ μεταφοράς του χρήστη (transport user profile) που έχει τη μορφή μιας λειτουργικής βάσης δεδομένων και αντιπροσωπεύει το συνδυασμό πληροφοριών ενός χρήστη και άλλων δεδομένων ελέγχου σε μια ενιαία «λειτουργία προφίλ χρήστη» στο στρώμα μεταφοράς. Η εν λόγω λειτουργική βάση δεδομένων μπορεί να προδιαγραφεί και να υλοποιηθεί σαν ένα σύνολο συνεργαζόμενων βάσεων δεδομένων με λειτουργίες σε οποιοδήποτε μέρος του NGN.

Η παροχή των υπηρεσιών/εφαρμογών στον τελικό χρήστη γίνεται μέσω του στρώματος υπηρεσιών, το οποίο περιλαμβάνει τις λειτουργίες ελέγχου υπηρεσιών (*service control functions*) και τις λειτουργίες υποστήριξης εφαρμογών και υπηρεσιών (*application support functions*, *service support functions*) [5, 7].

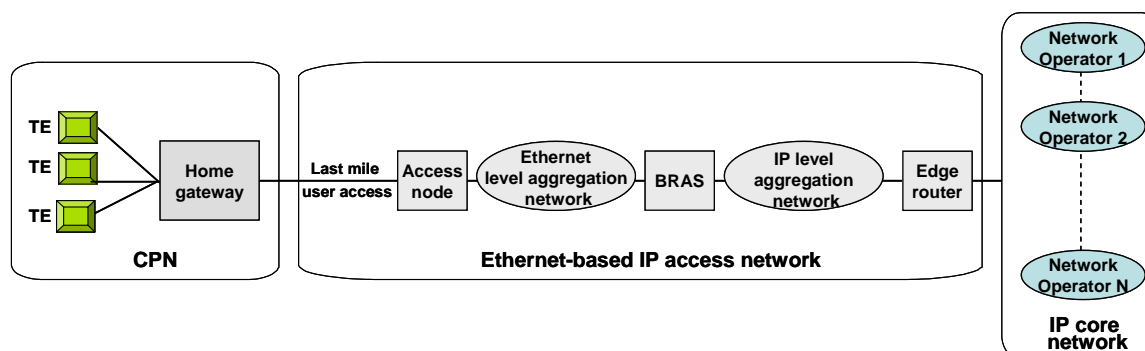
Οι λειτουργίες ελέγχου υπηρεσιών περιλαμβάνουν τον έλεγχο των πόρων, την εγγραφή, και τις λειτουργίες επαλήθευσης ταυτότητας (*authentication*) και εξουσιοδότησης (*authorization*) στο επίπεδο υπηρεσιών, για υπηρεσίες διαμεσολάβησης ή μη-διαμεσολάβησης. Μπορούν επίσης να περιλαμβάνουν λειτουργίες για τον έλεγχο εξειδικευμένων πόρων και πυλών στο επίπεδο σηματοδότησης υπηρεσίας. Όσον αφορά την επαλήθευση ταυτότητας εκτελείται αμοιβαία πιστοποίηση μεταξύ τελικού χρήστη και υπηρεσίας. Οι λειτουργίες ελέγχου υπηρεσιών φιλοξενούν επίσης το προφίλ υπηρεσιών του χρήστη (*service user profile*), το οποίο αντιπροσωπεύει το συνδυασμό πληροφοριών ενός χρήστη και άλλων δεδομένων ελέγχου σε μια ενιαία «λειτουργία προφίλ χρήστη» στο στρώμα υπηρεσιών, υπό τη μορφή λειτουργικών βάσεων δεδομένων.

Οι λειτουργίες υποστήριξης εφαρμογών και υπηρεσιών περιλαμβάνουν λειτουργίες πυλών, εγγραφής, επαλήθευσης ταυτότητας και εξουσιοδότησης στο επίπεδο εφαρμογών. Αυτές οι λειτουργίες είναι διαθέσιμες στις λειτουργικές ομάδες «εφαρμογών» και «τελικών χρηστών» και δουλεύουν από κοινού με τις λειτουργίες ελέγχου υπηρεσιών για να παρέχουν στους τελικούς χρήστες και τις εφαρμογές τις υπηρεσίες NGN που αιτούν. Μέσω της διεπαφής UNI (*User-to-Network Interface*), οι λειτουργίες αυτές παρέχουν ένα σημείο αναφοράς στις λειτουργίες των τελικών χρηστών. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των εφαρμογών και των λειτουργιών υποστήριξης εφαρμογών και υπηρεσιών πραγματοποιούνται μέσω της διεπαφής ANI (*Application-to-Network Interface*). Το ANI προσφέρει τις δυνατότητες και τους πόρους που απαιτούνται για την υλοποίηση των εφαρμογών.

Σχετικά με τις λειτουργίες τελικού χρήστη (*end-user functions*), ένα δίκτυο τελικών χρηστών μπορεί να είναι ένα δίκτυο μέσα σε ένα σπίτι ή ένα δίκτυο επιχείρησης. Συνδέεται με το δίκτυο του παρόχου υπηρεσιών μέσω της διεπαφής UNI. Διαφορετικές διεπαφές τελικών χρηστών και δίκτυα τελικών χρηστών μπορούν να συνδεθούν με το δίκτυο

πρόσβασης NGN. Ο εξοπλισμός των τελικών χρηστών μπορεί να είναι είτε κινητός είτε σταθερός.

Στη συνέχεια, για λόγους πιο κατανοητής απεικόνισης, δίνεται το αρχιτεκτονικό-τοπολογικό μοντέλο ενός IP δικτύου πρόσβασης βασισμένο σε Ethernet (Σχήμα 2-2), το οποίο αποτελείται από τις εξής συνιστώσες: τη ζεύξη τελευταίου μιλίου (*last mile user access*), τον κόμβο πρόσβασης (*access node*), π.χ. DSLAM, το Ethernet δίκτυο συγκέντρωσης (*Ethernet aggregation network*), τον ακρινό κόμβο (*edge node*), όπως για παράδειγμα BRAS (*Broadband Remote Access Server*), και ενδεχομένως το IP δίκτυο συγκέντρωσης (*IP aggregation network*). Στην περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει IP δίκτυο συγκέντρωσης, ο BRAS λειτουργεί ως ακρινός δρομολογητής (*edge router*). Συνεπώς, ο ακρινός κόμβος λειτουργεί σαν κόμβος εξόδου που συνδέει το IP δίκτυο πρόσβασης (*IP access network*) με το IP δίκτυο κορμού (*IP core network*), και μπορεί να παριστάνει είτε τον BRAS, είτε τον ακρινό δρομολογητή. Σημειώνεται ότι το IP δίκτυο πρόσβασης μπορεί να υποστηρίζει διαφορετικές τεχνολογίες για την πρόσβαση τελευταίου μιλίου. Για παράδειγμα, ένας Ethernet DSLAM ενδέχεται να υποστηρίζει πρόσβαση LAN/xDSL/WLAN, και διαφορετικοί κόμβοι πρόσβασης μπορεί να «συγκεντρώνονται» στον ίδιο BRAS [6].



Σχήμα 2-2: Γενικό αρχιτεκτονικό-τοπολογικό μοντέλο IP δικτύου πρόσβασης βασισμένο σε Ethernet

2.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

Τα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς περιλαμβάνουν τα δίκτυα κορμού επόμενης γενιάς (*next generation core networks*), τα οποία εξελίσσονται προς μια συγκεκριμένη υποδομή IP ικανή να μεταφέρει ένα πλήθος υπηρεσιών, όπως φωνή, βίντεο και δεδομένα, και τα δίκτυα πρόσβασης επόμενης γενιάς (*next generation access networks*), τα οποία ασχολούνται με την ανάπτυξη τοπικών βρόχων υψηλών ταχυτήτων που θα εγγυηθούν την παράδοση καινοτόμων υπηρεσιών. Στην ενότητα αυτή εστιάζουμε στη μελέτη των εξελίξεων που σημειώνονται στα δίκτυα πρόσβασης και κορμού επόμενης γενιάς, ώστε να εξετάσουμε στη συνέχεια σχετικά ζητήματα διαλειτουργικότητας. Η εστίαση αυτή οφείλεται στο ότι τα δίκτυα πρόσβασης και κορμού επόμενης γενιάς είναι αυτά που μεταβάλλουν το PSTN.

Οι αλλαγές που πραγματοποιούνται στο PSTN είναι σημαντικές. Για περισσότερα από 100 χρόνια ο χαλκός χρησιμοποιήθηκε ως τεχνολογία μετάδοσης στον τοπικό βρόχο για να συνδέσει κάθε σπίτι και κτίριο με το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Ο χαλκός όμως πλέον αντικαθίσταται όλο και περισσότερο από την οπτική ίνα στον τοπικό βρόχο, ενώ η τεχνολογία πακέτου που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο διαδικτύου (*Internet Protocol*) αντικαθιστά τις υπάρχουσες τεχνολογίες μεταγωγής κυκλώματος. Οι αλλαγές αυτές απαιτούν από τους αρμόδιους φορείς να αναθεωρήσουν και να επαναξιολογήσουν τους ισχύοντες κανονισμούς και τα πλαίσια πολιτικής και να εξασφαλίσουν ότι οι συμβατικές υποδομές δεν δυσχεραίνουν τη σύγκλιση, την επένδυση και τη δυνατότητα νέων επιλογών στην αγορά. Οι νέες τεχνολογίες μπορούν να φέρουν σημαντικά οφέλη στους τελικούς χρήστες, χρειάζεται όμως προσοχή ώστε να διατηρηθεί ο αποτελεσματικός ανταγωνισμός στις αγορές τηλεπικοινωνιών και να παρεμποδιστεί η υπερβολή στην αγοραστική δύναμη, η οποία θα μπορούσε τελικά να μειώσει τα οφέλη [2].

2.3.1 ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

Το δίκτυο πρόσβασης χαρακτηρίζεται ως το πιο βασικό τμήμα ενός NGN, δεδομένου ότι είναι αρμόδιο για την πανταχού παρούσα συνδετικότητα και την ομοιόμορφη κινητικότητα, χαρακτηριστικά θεμελιώδη για τη διάχυτη δυνατότητα πρόσβασης στις υπηρεσίες και τη συμμετοχή της εμπειρίας των χρηστών. Η λειτουργική αρχιτεκτονική του NGN προσφέρει την ευελιξία ρύθμισης-διαμόρφωσης που απαιτείται για να υποστηριχθούν πολλαπλές τεχνολογίες πρόσβασης [7].

Η επιλογή της τεχνολογίας για το δίκτυο πρόσβασης βασίζεται στον συνυπολογισμό πολλών παραγόντων, όπως τη χωρητικότητα του δικτύου, τη διαθεσιμότητα του δικτύου (παρουσία και φορτίο), τις δυνατότητες του τερματικού και την κατάστασή του (στάσιμο ή σε κίνηση), τις απαιτήσεις των υπηρεσιών, τον τύπο συνδρομής πελατών, κ.λπ. Συνεπώς, απαιτείται βέλτιστη χρήση των πόρων των δικτύων πρόσβασης. Στο πλαίσιο αυτό, ακόμη και κάτω από καταγιστική ανάπτυξη τεχνολογιών πρόσβασης, ειδικά ασύρματων, ο χώρος για ανάπτυξη νέων τεχνολογιών παραμένει μεγάλος [8].

Αρχικά, η πρόσβαση στα δημόσια τηλεπικοινωνιακά δίκτυα πάνω από τον τοπικό βρόχο (γραμμή συνδρομητών) πραγματοποιούνταν από αναλογική τεχνολογία πάνω από συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων χαλκού, υποστηρίζοντας φωνή και δεδομένα χαμηλών ταχυτήτων (π.χ. fax). Χάρη στις τεχνολογικές εξελίξεις, τα συνεστραμμένα ζεύγη μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά ψηφιακών σημάτων (π.χ. ψηφιακά δίκτυα ενοποιημένων υπηρεσιών - ISDN) ή να χρησιμοποιηθούν για φωνή και ψηφιακά δεδομένα, όπως στις διάφορες παραλλαγές του DSL (xDSL).

Ωστόσο, πρακτικοί περιορισμοί που αφορούν στα χαρακτηριστικά και την ανάπτυξη του DSL, έχουν εμποδίσει την DSL τεχνολογία από την προσέγγιση πολλών δυνητικών πελατών ευρυζωνικού Internet, διότι αποτελεί μια ακριβή λύση. Είναι γεγονός ότι ένας μεγάλος αριθμός περιοχών σε όλο τον κόσμο δεν έχει τη δυνατότητα για πρόσβαση στην ευρυζωνική συνδετικότητα. Με δεδομένο ότι το DSL μπορεί μόνο να φθάσει σε απόσταση περίπου τριών μιλίων από το κέντρο μεταγωγής, πολλές αστικές και προαστιακές περιοχές δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν από συνδέσεις DSL. Ο περιορισμός αυτός οφείλεται στο ότι πολλά παλαιότερα καλωδιακά δίκτυα δεν έχουν εξοπλιστεί ώστε να προσφέρουν κανάλι επιστροφής, ενώ η μετατροπή τους ώστε να υποστηρίξουν ευρυζωνικότητα υψηλών ταχυτήτων μπορεί τελικά να είναι ασύμφορη.

Η εμφάνιση υψηλότερων ταχυτήτων πρόσβασης, συχνά συμμετρικών, που καθίσταται διαθέσιμες στους συνδρομητές σπιτιών και επιχειρήσεων, έχει επαυξήσει το ρόλο των υποδομών επικοινωνίας με την επέκταση των διαθέσιμων υπηρεσιών. Τα δίκτυα υψηλών ταχυτήτων βοηθούν όλο και περισσότερο στην επίλυση κοινωνικών θεμάτων σε περιοχές όπως το περιβάλλον, η υγειονομική περίθαλψη και η εκπαίδευση, και διαδραματίζουν όλο και σημαντικότερο ρόλο στην κοινωνική δικτύωση. Στο πλαίσιο αυτό, η τεχνολογία οπτικών δικτύων θεωρείται συχνά ως η πιο «πολλά υποσχόμενη τεχνολογία» για την παροχή πρόσβασης υψηλών ταχυτήτων, με το κόστος ανάπτυξής της όμως να παραμένει υψηλό.

Εντούτοις, για να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά οι δυνατότητες των νέων τεχνολογιών, η αγορά απαιτεί καθολική ή σχεδόν καθολική δικτυακή κάλυψη. Η πλήρης αξιοποίηση αυτών των τεχνολογιών θα επιτευχθεί μόνο σε ανταγωνιστικές αγορές που προσφέρουν λύσεις, οι οποίες εξασφαλίζουν επαρκή δικτυακή κάλυψη στις περισσότερες γεωγραφικές περιοχές [2]. Οι τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης αποτελούν ελκυστική επιλογή για τους παρόχους σε περιοχές που δεν διαθέτουν ενσύρματο δίκτυο πρόσβασης, ενώ έχουν το συγκριτικό πλεονέκτημα ότι αναπτύσσονται πολύ γρηγορότερα, λιγότερο δαπανηρά, και πιο ευέλικτα σε σχέση με παρόμοιες ενσύρματες εγκαταστάσεις.

Συνεπώς, υπάρχουν διαθέσιμες τεχνολογίες που μπορεί να μην είναι σε θέση να ανταγωνιστούν πλήρως την τεχνολογία οπτικών ινών από πλευράς ταχύτητας, ωστόσο θεωρούνται κατάλληλες για χρήστες που δεν απαιτούν υψηλές ταχύτητες πρόσβασης. Οι διαφορετικές διαθέσιμες τεχνολογίες περιλαμβάνουν τα υπάρχοντα δίκτυα χαλκού που αναβαθμίζονται σε DSL, τα ομοαξονικά καλωδιακά δίκτυα, τις επικοινωνίες γραμμών ισχύος, τα ασύρματα δίκτυα υψηλών ταχυτήτων, ή υβριδική ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών. Στη συνέχεια αναλύονται οι επιμέρους τεχνολογίες των ενσύρματων και ασύρματων δικτύων πρόσβασης επόμενης γενιάς.

2.3.1.1 Ενσύρματα Δίκτυα (*Wired Networks*)

□ Ψηφιακή Συνδρομητική Γραμμή (*xDigital Subscriber Line - xDSL*)

Οι τεχνολογίες DSL σχεδιάστηκαν με σκοπό να παρέχουν ζεύξεις υψηλών ταχυτήτων πάνω από τις κοινές τηλεφωνικές γραμμές χαλκού. Οι βασικές κατηγορίες των xDSL τεχνολογιών είναι: το ασύμμετρο DSL (*Asymmetric DSL - ADSL*), στο οποίο η ταχύτητα στην κατερχόμενη κατεύθυνση (προς τον πελάτη) είναι υψηλότερη από αυτή στην ανερχόμενη, το DSL υψηλής ταχύτητας (*High bit rate DSL - HDSL*), το οποίο υποστηρίζει συμμετρικούς ρυθμούς μετάδοσης, και το DSL πολύ υψηλής ταχύτητας (*Very high bit rate DSL - VDSL*), το οποίο υποστηρίζει συμμετρικούς και μη-συμμετρικούς ρυθμούς μετάδοσης. Οι βασικές εναλλακτικές τεχνολογίες DSL δίνονται στον Πίνακα 2-1 που ακολουθεί.

Οικογένεια	ITU	Μέγ. Ταχύτητα
ADSL	G.992.1	7Mbps↓ /800Kbps↑
ADSL2	G.992.3	8Mbps↓ /1Mbps↑
ADSL2plus	G.992.5	24Mbps↓ /1Mbps↑
HDSL	G.991.1	2.048Mbps (Ευρώπη) 1.544 Mbps (Αμερική)
SHDSL	G.991.2	5.6Mbps
VDSL	G.993.1	Δεκάδες Mbps
VDSL2	G.993.2	200Mbps

Πίνακας 2-1: Τεχνολογίες DSL

□ Καλωδιακή Τηλεόραση (*Cable TV - CATV*)

Η υποδομή καλωδιακής τηλεόρασης έχει σαφή θέση στην ευρυζωνική αγορά του μέλλοντος λόγω των δυνατοτήτων της να παρέχει υπηρεσίες *triple/multi-play*. Το δίκτυο βελτιστοποιείται για διανομή TV και καθίσταται ικανό για παροχή ευρυζωνικότητας. Στο πλαίσιο αυτό, οι πάροχοι καλωδιακής τηλεόρασης έχουν αρχίσει να αναβαθμίζουν την υποδομή τους χρησιμοποιώντας υβριδική τεχνολογία χαλκού-οπτικής ίνας (*Hybrid Fiber Copper - HFC*), επιτρέποντας αμφίδρομη κίνηση και χρησιμοποιώντας το πρότυπο *Docsis* [9] για αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Αυτές οι εξελίξεις επιτρέπουν στις επιχειρήσεις CATV να παρέχουν υπηρεσίες φωνής και Internet (υπηρεσίες δεδομένων) στον ανταγωνισμό με τις επιχειρήσεις τηλεπικοινωνιών, οι οποίες μέσω της παροχής Internet TV έχουν αρχίσει να ανταγωνίζονται τις επιχειρήσεις CATV. Προσφέροντας υπηρεσίες δεδομένων και φωνής, εκτός από τηλεόραση, οι επιχειρήσεις καλωδιακής τηλεόρασης καταφέρνουν να διαφοροποιήσουν το προϊόν τους από τους παρόχους δορυφορικών επικοινωνιών.

Το εύρος ζώνης που παρέχεται από τα καλωδιακά δίκτυα, με χρήση Docsis, θα επιτρέψει 160 Mbit/s στην κατερχόμενη κατεύθυνση (*downstream*) και 120 Mbit/s στην ανερχόμενη (*upstream*), το οποίο θα διαμοιραστεί μεταξύ των τελικών χρηστών. Τυπικά υπάρχουν 500-1000 συνδρομητές σε ένα τοπικό σημείο διανομής [2].

□ **Επικοινωνίες Γραμμών Ισχύος (*Power Line Communications - PLC*)**

Η τεχνολογία PLC χρησιμοποιεί εκείνο το μέρος του φάσματος από τις υπάρχουσες υποδομές γραμμών ισχύος, που αντιστοιχεί στις υψηλές συχνότητες. Ενώ η παροχή ηλεκτρισμού πραγματοποιείται στη χαμηλή ζώνη 50-60 Hz, οι συχνότητες άνω του 1 MHz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παροχή ευρυζωνικότητας. Όσον αφορά τη χωρητικότητα, η τεχνολογία PLC είναι ισοδύναμη με τις τεχνολογίες DSL τα τελευταία χρόνια. Ένας από τους βασικούς λόγους χρήσης της PLC ως IP υποδομή είναι ότι η φυσική υποδομή βρίσκεται παντού. Οι υποδομές γραμμών ισχύος έχουν πολύ υψηλή αποδοχή και η ιδέα είναι ότι κάποιος μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτή την υποδομή για να παρέχει ευρυζωνικότητα με εύκολο τρόπο, χωρίς να εγκαταστήσει νέα φυσική υποδομή. Το γεγονός ότι σε κάθε σπίτι όλα τα δωμάτια συνδέονται σε γραμμές ισχύος, ενισχύει την υλοποίηση καινοτόμων ευρυζωνικών υπηρεσιών σύμφωνα με το παράδειγμα του «έξυπνου σπιτιού».

Η PLC δείχνει να παρέχει μια σειρά πλεονεκτημάτων, προσφέροντας όχι μόνο φωνή αλλά και ευρυζωνικές υπηρεσίες, με την ταχύτητα σύνδεσης να μην εξαρτάται από την απόσταση από το τηλεφωνικό κέντρο (όπως συμβαίνει με το DSL) ή τον αριθμό πελατών που συνδέονται (όπως στην περίπτωση καλωδίωσης). Με αυτό το σύστημα, ένας υπολογιστής (ή οποιαδήποτε άλλη συσκευή) θα πρέπει απλώς να συνδέσει ένα BPL (*Broadband over Power Lines*) modem σε οποιαδήποτε έξοδο ενός εξοπλισμένου κτιρίου για να έχει πρόσβαση Internet υψηλής ταχύτητας. Παρά τα οφέλη που μπορεί να προσφέρει η διαθεσιμότητα μιας εκτενούς υποδομής BPL, προς το παρόν η παροχή υπηρεσιών απέχει από την προτυποποίηση, ενώ και η χωρητικότητα του εύρους ζώνης που παρέχεται μέσω BPL είναι ακόμα υπό διερεύνηση [2].

□ **Οπτικές Ίνες (*Optical Fibers*)**

Το οπτικό δίκτυο πρόσβασης, συμπεριλαμβανομένων των Fiber To The Home/Curb/Node (*FTTx*), αποτελεί σαφή λύση στο πρόβλημα αναβάθμισης των ήδη συμφορημένων δικτύων πρόσβασης, σε δίκτυα που είναι ικανά να παρέχουν ευρυζωνικές ενοποιημένες υπηρεσίες του μέλλοντος. Οι οπτικές ίνες μπορούν να παρέχουν εύρη ζώνης που άλλα μέσα μετάδοσης, όπως τα ασύρματα ή ο χαλκός, δεν μπορούν. Λόγω της πολύ μεγάλης χωρητικότητας εύρους ζώνης, οι οπτικές ίνες έχουν χρησιμοποιηθεί ήδη σε δίκτυα κορμού, δίκτυα ευρείας περιοχής (*WANs*), μητροπολιτικά δίκτυα (*MANs*), αλλά και τοπικά

δίκτυα (*LANs*) επιτυχώς. Η χρήση της ίνας στα δίκτυα πρόσβασης αποτελεί το τελευταίο βήμα που απαιτείται για την επανάσταση του μέλλοντος προς τα πλήρως οπτικά δίκτυα.

Οι παραδοσιακές λύσεις οπτικών δικτύων που βασίζονται σε αρχιτεκτονικές σημείο-προς-σημείο θεωρούνται ακριβές: εκτός από τις δαπάνες ανάπτυξης των ιών, χρειάζονται συντήρηση για τα ενεργά συστήματα των εξωτερικών εγκαταστάσεων. Αυτά τα συστήματα αποτελούνται από πολλές συνιστώσες ηλεκτρική-προς-οπτική και οπτική-προς-ηλεκτρική, επιρρεπείς σε αστοχίες, οι οποίες αποτρέπουν την ανάπτυξή τους σε μεγάλη κλίμακα. Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων και την επίσπευση της εισαγωγής της τεχνολογίας FTTH, αναπτύχθηκαν τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα με Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (*Time Division Multiplexing Passive Optical Networks - TDM-PONs*). Τα TDM-PONs περιλαμβάνουν το Ethernet PON (*EPON*), το Broadband PON (*BPON*) και το Gigabit PON (*GPON*). Οι εν λόγω λύσεις είναι βασισμένες σε παρόμοιες παθητικές τοπολογίες δέντρων, αλλά διαθέτουν διαφορετικές τεχνολογίες μεταφοράς δεδομένων. Το EPON [10] προσφέρει σήμερα το υψηλότερο μέσο εύρος ζώνης στον τελικό πελάτη από οποιαδήποτε άλλη εναλλακτική TDM-PON. Οι εξοπλισμοί EPON μπορούν να υποστηρίξουν μέχρι 1.25 Gbps συμμετρικούς ρυθμούς και 32 Μονάδες Οπτικού Δικτύου (*Optical Network Units - ONUs*) χωρίς Εμπρόσθια Διόρθωση Σφάλματος (*Forward Error Correction - FEC*) ή 64 ONUs με FEC ανά PON. Όσον αφορά το BPON [11], οι μέγιστες ταχύτητες είναι 622 Mbit/s στην κατερχόμενη κατεύθυνση (*downstream*) και 155 Mbit/s στην ανερχόμενη (*upstream*). Το GPON [12] είναι σε θέση να υποστηρίξει τις υψηλότερες απαιτήσεις εύρους ζώνης για οικιακές υπηρεσίες και επιχειρήσεις, παρέχοντας έναν ονομαστικό ρυθμό 2.4 Gbps στην κατερχόμενη κατεύθυνση (*downstream*) και 1.2 Gbps στην ανερχόμενη (*upstream*). Ωστόσο, μπορεί να υποστηρίξει μέχρι 64 χρήστες, το οποίο καθιστά το μέσο εύρος ζώνης ανά χρήστη λίγο χαμηλότερο από αυτό του EPON.

Οι αρχιτεκτονικές TDM-PON που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν να ξεπεράσουν τα οικονομικά εμπόδια των παραδοσιακών σημείο-προς-σημείο λύσεων οπτικών ιών [13]. Έχουν προτυποποιηθεί διεθνώς από την IEEE και την ITU, ενώ έχουν αναπτυχθεί προϊόντα σύμφωνα με τα πρότυπα.

Σε μερικά χρόνια, μόλις επεκταθούν τα TDM-PONs, η αναβάθμιση αυτών των οπτικών δικτύων πρόσβασης θα αποτελεί πρόκληση, όταν οι απαιτήσεις χρηστών θα ξεπερνούν τις υπάρχουσες δυνατότητες των δικτύων πρόσβασης. Τα TDM-PONs διαθέτουν μόνο ένα μήκος κύματος για τα δεδομένα στην κατερχόμενη κατεύθυνση (*downstream*) και ένα για τα δεδομένα στην ανερχόμενη κατεύθυνση (*upstream*), διαμοιραζόμενο μεταξύ όλων των χρηστών, οπότε το μέσο εύρος ζώνης ανά χρήστη περιορίζεται σε μερικές δεκάδες Mbit/s [14]. Συνεπώς, το πολύ υψηλό διαθέσιμο εύρος ζώνης της ίνας, κατά κύριο λόγο, σπαταλάται.

Η τεχνολογία Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος (*Wavelength Division Multiplexing - WDM*) έχει θεωρηθεί ιδανική λύση για την επέκταση της χωρητικότητας των TDM-PONs, χωρίς δραστική αλλαγή στην υποδομή των ινών. Ωστόσο, το κόστος των WDM συνιστωσών είναι αρκετά υψηλό για τα δίκτυα πρόσβασης. Στα δίκτυα πρόσβασης, το κόστος των συστατικών μοιράζεται μεταξύ μερικών δεκάδων οικιακών χρηστών. Κατά συνέπεια, η ανάπτυξη δικτυακών αρχιτεκτονικών, υποσυστημάτων και συσκευών που θα μειώσουν το κόστος των WDM-PONs θεωρείται κρίσιμη για την υιοθέτησή τους. Διάφορες αρχιτεκτονικές που ενσωματώνουν την τεχνολογία WDM στο δίκτυο πρόσβασης έχουν προταθεί [15, 16]. Συνεπώς, η μετάβαση από το TDM-PON στο WDM-PON απαιτεί περαιτέρω έρευνα [17].

Στον Πίνακα 2-2 συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των TDM-PON και WDM-PON.

	TDM-PON			WDM-PON
	EPON	BPON	GPON	
Standard	IEEE 802.3ah	ITU G.983	ITU G.984	-
Framing	Ethernet	ATM	GEM/ATM	-
Maximum Bandwidth	1 Gbit/s	622 Mbit/s	2.488 Gbit/s	1-10 Gbit/s per channel
Users/PON	16	32	64	100's
Average Bandwidth per User	60 Mbit/s	20 Mbit/s	40 Mbit/s	1-10 Gbit/s
Video	RF/ IP	RF	RF/ IP	RF/ IP
Estimated Cost	Πολύ χαμηλό	Χαμηλό	Μεσαίο	Υψηλό
Upgrade-ability	Δύσκολο	Δύσκολο	Δύσκολο	Εύκολο

Πίνακας 2-2: Τεχνολογίες PON

2.3.1.2 Ασύρματα Δίκτυα (*Wireless Networks*)

Οι τεχνολογίες Ασύρματης Ευρυζωνικής Πρόσβασης (*Broadband Wireless Access - BWA*) στοχεύουν στην παροχή ασύρματης πρόσβασης υψηλής ταχύτητας σε μια ευρεία περιοχή. Ορισμένες πρώιμες σταθερές-ασύρματες τεχνολογίες πρόσβασης, όπως η Τοπική Πολυσημειακή Υπηρεσία Διανομής (*Local Multipoint Distribution Service - LMDS*) και η Πολυκαναλική Πολυσημειακή Υπηρεσία Διανομής (*Multichannel Multipoint Distribution Service - MMDS*), δεν κέρδισαν ποτέ ευρεία διάδοση στην αγορά.

Οι τεχνολογίες WiMAX - το σύνολο προτύπων IEEE 802.16 που αποτελούν θεμέλιο του WiMAX - και παρόμοιες ασύρματες ευρυζωνικές τεχνολογίες, εκτιμάται ότι θα ξεπεράσουν ορισμένες από τις αδυναμίες και θα καλύψουν τα κενά της αγοράς που αφήνουν τα ενσύρματα δίκτυα, ή απλώς θα συναγωνιστούν με τους παρόχους ενσύρματης πρόσβασης [2].

□ **WiFi (IEEE 802.11)**

Το WiFi αναφέρεται στα ασύρματα τοπικά δίκτυα που χρησιμοποιούν ένα από τα πρότυπα της IEEE 802.11 οικογένειας. Το WiFi επιτρέπει την ανάπτυξη τοπικών δικτύων (*Local Area Networks - LANs*) χωρίς καλωδίωση για τις συσκευές πελατών, μειώνοντας σημαντικά τις δαπάνες ανάπτυξης και επέκτασης των δικτύων. Λόγω του ανεκτού του κόστους, της δυνατότητας κλιμάκωσης και προσαρμοστικότητάς του, η δημοτικότητά του έχει επεκταθεί τόσο σε αγροτικές όσο και σε αστικές περιοχές. Το εύρος του WiFi περιορίζεται συνήθως στα 45 m περίπου σε εσωτερικούς χώρους και στα 90 m υπαίθρια, ωστόσο οι τεχνολογίες WiFi μπορούν επίσης να ρυθμιστούν για «σημείο-προς-σημείο» και «σημείο-προς-πολλαπλά-σημεία» δίκτυα, προκειμένου να βελτιωθεί το εύρος τους και να παρασχεθεί η σταθερή ασύρματη πρόσβαση τελευταίου μιλίου. Το WiFi παρέχει πρόσβαση τοπικού δικτύου με ταχύτητες μέχρι 54 Mbps σε κανάλι 20MHz. Οι χρήστες κυμαίνονται από έναν μέχρι ορισμένες δεκάδες, με ένα συνδρομητή για κάθε συσκευή. Ένας τρόπος να εξυπηρετηθούν οι απομακρυσμένες περιοχές που δεν μπορούν να προσεγγιστούν με τις προαναφερθείσες τεχνολογίες είναι με τις ασύρματες λύσεις «πλέγματος» (*wireless "mesh" solutions*). Συχνά περιλαμβάνουν μια backhaul δορυφορική σύνδεση μέσω Τερματικών με Κεραία Πολύ Μικρού Ανοίγματος (*Very Small Aperture Terminals*), που συνδέονται συνήθως με ασύρματες τεχνολογίες όπως το WiFi. Αυτός ο συνδυασμός επιτρέπει την πρόσβαση σε υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών και δεδομένων ακόμη και στις πιο απομακρυσμένες περιοχές, αν και με περιορισμένο (και ακριβό) εύρος ζώνης.

□ **WiMAX (IEEE 802.16)**

Η τεχνολογία της Παγκόσμιας Διαλειτουργικότητας για Μικροκυματική Πρόσβαση (*Worldwide Interoperability for Microwave Access - WiMAX*) αποτελεί την ασύρματη τεχνολογία, βασισμένη στα πρότυπα IEEE 802.16, που παρέχει ευρυζωνική σύνδεση για δίκτυο μητροπολιτικής περιοχής (*Metropolitan Area Network - MAN*). Ειδικότερα, το IEEE 802.16d πρότυπο υποστηρίζει μόνο σταθερές εφαρμογές, ενώ το IEEE 802.16e καλύπτει τόσο σταθερές όσο και κινητές εφαρμογές. Το WiMAX προσφέρει λύση στο πρόβλημα τελευταίου μιλίου συνδέοντας μεμονωμένα σπίτια και επιχειρήσεις.

Τα μεγέθη καναλιών του WiMAX κυμαίνονται από 1,5 έως 20MHz, και προσφέρουν στο WiMAX δίκτυο την ευελιξία να υποστηρίξει μια πληθώρα ρυθμών μετάδοσης

δεδομένων, όπως T1 (1.5 Mbps) αλλά και υψηλότερους ρυθμούς, μέχρι περίπου 70 Mbps, σε ένα κανάλι που μπορεί να υποστηρίξει χιλιάδες χρήστες. Όταν οι χρήστες συνδέονται ταυτόχρονα, ο επικείμενος διαμερισμός χωρητικότητας θα μειώσει σημαντικά τις ταχύτητες για τους μεμονωμένους χρήστες που μοιράζονται την ίδια χωρητικότητα [18, 2].

Η λύση που βασίζεται σε WiMAX αναπτύσσεται όπως στα κυψελοειδή συστήματα, χρησιμοποιώντας σταθμούς βάσης που εξυπηρετούν ακτίνα ορισμένων χιλιομέτρων. Η πιο τυπική αρχιτεκτονική WiMAX περιλαμβάνει έναν σταθμό βάσης που τοποθετείται σε ένα κτήριο και είναι αρμόδιος για επικοινωνία «σημείου-προς-πολλαπλά-σημεία», με τους σταθμούς των συνδρομητών να βρίσκονται σε γραφεία επιχειρήσεων ή σπίτια. Ο εξοπλισμός του πελάτη (*Customer Premise Equipment - CPE*) συνδέει το σταθμό βάσης με έναν πελάτη. Το σήμα φωνής και δεδομένων καθοδηγείται στη συνέχεια μέσω του τυποποιημένου καλωδίου Ethernet, είτε άμεσα σε έναν υπολογιστή, είτε σε ένα 802.11 σημείο, είτε σε ένα ενσύρματο τοπικό δίκτυο Ethernet. Το WiMAX επιτρέπει στους προμηθευτές εξοπλισμού να δημιουργούν πολλούς διαφορετικούς τύπους προϊόντων βασισμένων σε IEEE 802.16, συμπεριλαμβανομένων των διαφόρων σχηματισμών σταθμών βάσεων και εξοπλισμού πελατών.

□ **MBWA (IEEE 802.20)**

Η τεχνολογία της Κινητής Ασύρματης Ευρυζωνικής Πρόσβασης (*Mobile Broadband Wireless Access – MBWA*) βασίζεται στα πρότυπα IEEE 802.20 και αναπτύχθηκε για να υποστηρίξει υψηλές ταχύτητες δεδομένων καθώς και πλήρη κινητικότητα χρηστών. Συνεπώς αυξάνει την κάλυψη και την κινητικότητα σε σχέση με τα υπάρχοντα 802.11 και 802.16, ενώ τοποθετείται στους υπάρχοντες κυψελοειδείς πύργους, υποσχόμενο την ίδια περιοχή κάλυψης με ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας, με την ταχύτητα μιας WiFi σύνδεσης [19]. Μπορεί να παρέχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης 20 Mbps. Η βασισμένη σε πακέτα πρόσβαση μέσω διεπαφής αέρα βοηθά ώστε η μεταφορά IP υπηρεσιών να επιτρέψει την υλοποίηση των MBWA δικτύων παγκοσμίως.

Σκοπός του 802.20 είναι να προδιαγράψει τα PHY και MAC στρώματα της διεπαφής αέρα για διαλειτουργικά συστήματα κινητής ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης βασισμένα σε πακέτα, λειτουργώντας στις αδειοδοτημένες ζώνες συχνότητας 3,5 GHz και κάτω, υποστηρίζοντας ρυθμό δεδομένων 1 Mbps ανά χρήστη και ταχύτητες οχήματος μέχρι 250 Km/h. Παρέχει κάλυψη από υπαίθριο χώρο σε εσωτερικό χώρο χωρίς οπτική επαφή, καθώς και υπαίθρια κάλυψη. Μπορεί να παρέχει παγκόσμια υλοποίηση οικονομικά αποδοτικών, αποδοτικών στη χρήση φάσματος, πάντα ενεργών και διαλειτουργικών συστημάτων κινητής ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης. Αυτό ικανοποιεί την ανάγκη για πανταχού παρούσα και κινητή πρόσβαση στο Internet, «διαφανή» υποστήριξη Internet εφαρμογών, και πρόσβαση

στις υπηρεσίες intranet μιας επιχείρησης. Η τεχνολογία MBWA καλύπτει το κενό που αφορά στην απόδοση μεταξύ των υπαρχουσών υπηρεσιών υψηλών ρυθμών μετάδοσης και χαμηλής κινητικότητας της σειράς 802 και των κυψελοειδών δικτύων υψηλής κινητικότητας [20].

Διαφορές μεταξύ IEEE 802.16 και 802.20

Οι διαφορές των 802.16e και 802.20 θα περιγραφούν σε 3 διαστάσεις: του τελικού χρήστη, του παρόχου και της τεχνολογίας.

Όσον αφορά τον τελικό χρήστη, και οι δυο τεχνολογίες χρησιμοποιούν συμμετρικές υπηρεσίες δεδομένων, αλλά το 802.16e προσφέρει υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για σταθερή ασύρματη πρόσβαση με επιπρόσθετη κινητή υπηρεσία, ενώ το 802.20 προσφέρει ρυθμό δεδομένων υψηλής διεκπεραιωτικότητας (*throughput*) με πλήρη κινητικότητα. Οι ρυθμοί μετάδοσης του 802.16e κυμαίνονται περίπου μεταξύ 10-50 Mbps, ενώ για το 802.20 είναι >16 Mbps.

Σχετικά με τον πάροχο, το 802.16e παρέχεται από παρόχους σταθερών ασύρματων υπηρεσιών που προσθέτουν την κινητικότητα σαν επιπρόσθετη υπηρεσία. Αντίθετα, το 802.20 παρέχεται από παρόχους κινητών ασύρματων υπηρεσιών, προσφέροντας πλήρη κινητικότητα και περιαγωγή.

Από τεχνολογικής πλευράς, τα στρώματα MAC και PHY του 802.16e αποτελούν προεκτάσεις του 802.16a, ενώ στο 802.20 δημιουργούνται από την αρχή, βελτιστοποιημένα για υπηρεσίες πακέτων και προσαρμοστικές κεραίες. Το 802.16e χρησιμοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων 2-6 GHz, ενώ το 802.20 χρησιμοποιεί συχνότητες κάτω των 3.5 GHz. Τυπικά εύρη ζώνης καναλιών για το 802.16e και το 802.20 είναι >5 MHz και <5 MHz αντίστοιχα [21]. Η ακτίνα κάλυψης στο 802.16e είναι 50 Km, ενώ το 802.20 δεν έχει συγκεκριμένη ακτίνα. Το 802.16e υποστηρίζει ταχύτητα χρήστη 60 Km/h, ενώ το 802.20 μέχρι 250 Km/h. Τέλος, η τεχνολογία του 802.20 είναι βελτιστοποιημένη για πλήρη κινητικότητα, ενώ η 802.16e έγινε στην πορεία συμβατή για υποστήριξη κινητικότητας [22].

□ **WRAN (IEEE 802.22)**

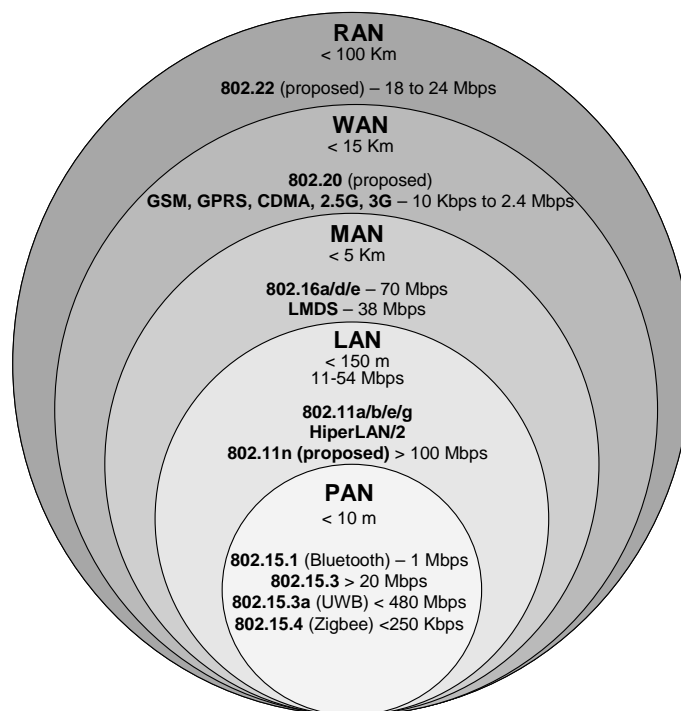
Η τεχνολογία των Ασύρματων Δικτύων Περιφερειακής Περιοχής (*Wireless Regional Area Networks - WRAN*) βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.22, το οποίο αποτελεί το πρώτο παγκόσμιο πρότυπο διεπαφής αέρα βασισμένο σε τεχνικές Γνωστικών Ραδιοεπικοινωνιών (*Cognitive Radios - CRs*). Τα CRs [23, 24, 25] θεωρούνται ως λύση για την τρέχουσα χαμηλή χρήση ραδιοφάσματος. Έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν τη μεγάλη ποσότητα του αχρησιμοποίητου φάσματος με ευφυή τρόπο, χωρίς να δημιουργούν παρεμβολές με άλλες συσκευές σε ζώνες συχνοτήτων στις οποίες έχει χορηγηθεί άδεια για συγκεκριμένες χρήσεις. Συνεπώς, το 802.22, το οποίο λειτουργεί στις ζώνες TV, χρησιμοποιεί τεχνικές όπως

ανίχνευση φάσματος και αποφυγή, και διαχείριση φάσματος, ώστε να πετύχει αποτελεσματική συνύπαρξη και διαμερισμό των ραδιοπόρων με τις υπάρχουσες αδειοδοτημένες υπηρεσίες. Η πιο χαρακτηριστική εφαρμογή-στόχος του 802.22 είναι η ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση στις αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές, με απόδοση συγκρίσιμη με εκείνη των τεχνολογιών σταθερής ευρυζωνικής πρόσβασης σε αστικές και προαστιακές περιοχές (π.χ. DSL).

Το 802.22 προσδιορίζει αποδοτικότητα φάσματος στο εύρος από 0,5 bit/sec/Hz έως 5 bit/sec/Hz. Θεωρώντας κατά μέσο όρο την τιμή 3 bits/sec/Hz, αυτό αντιστοιχεί σε ένα συνολικό ρυθμό δεδομένων 18 Mbps σε τηλεοπτικό κανάλι 6 MHz. Προκειμένου να ληφθεί ο ελάχιστος ρυθμός δεδομένων ανά CPE, λαμβάνονται συνολικά 12 ταυτόχρονοι χρήστες, το οποίο οδηγεί σε μια απαιτούμενη ελάχιστη τιμή κορυφής για τον ρυθμό δεδομένων στην άκρη της κάλυψης που είναι 1.5 Mbps ανά CPE στην κατερχόμενη κατεύθυνση (*downstream*). Στην ανερχόμενη κατεύθυνση (*upstream*) προσδιορίζεται ένας μέγιστος ρυθμός 384 Kbps. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του 802.22 που το διαφοροποιεί από τα υπάρχοντα 802 πρότυπα είναι το εύρος κάλυψης του σταθμού βάσης, το οποίο μπορεί να φτάσει τα 100 Km εάν η ισχύς δεν αποτελεί πρόβλημα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3 που ακολουθεί, τα WRANs έχουν πολύ μεγαλύτερο εύρος κάλυψης από τα υπόλοιπα δίκτυα, το οποίο οφείλεται κυρίως στην υψηλότερη ισχύ τους και τα ευνοϊκά χαρακτηριστικά διάδοσης στις ζώνες συχνότητας TV. Αυτό το ενισχυμένο εύρος κάλυψης προσφέρει μοναδικές τεχνικές προκλήσεις καθώς επίσης και ευκαιρίες [26].

Διαφορές μεταξύ IEEE 802.16 και 802.22

Το 802.22 στοχεύει κυρίως στις αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές, ενώ το εύρος κάλυψής του είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό του 802.16. Επίσης, το 802.16 δεν περιλαμβάνει επιβεβλημένες τεχνικές προστασίας, απαραίτητες να λειτουργούν στις αδειοδοτημένες ζώνες, ενώ επικεντρώνεται αποκλειστικά στη συνύπαρξη συστημάτων 802.16, μέσω του 802.16h [27].



Σχήμα 2-3: WRAN σε σχέση με άλλα πρότυπα ασύρματης πρόσβασης

Οι επίγειες ασύρματες υπηρεσίες προσφέρουν τη δυνατότητα ανάπτυξης ανταγωνιστικών υποδομών πρόσβασης. Ωστόσο, μπορούν να παρέχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά υπηρεσιών σε σχέση με τις υπηρεσίες σταθερών γραμμών από πλευράς κάλυψης, συμμετρικότητας και ταχυτήτων. Αυτά τα δίκτυα ενδέχεται να είναι λιγότερο κατάλληλα σε υφιστάμενες συνδέσεις υψηλού εύρους ζώνης για μεγαλύτερους αριθμούς χρηστών, ή για εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης, όπως η κατ' αίτηση Τηλεόραση Υψηλής Ευκρίνειας (*High Definition TV*). Επιπλέον, η ανάπτυξη ασύρματων υπηρεσιών περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα φάσματος. Ταυτόχρονα, τα οικονομικά της ανάπτυξής τους είναι συχνά κλιμακούμενα, το οποίο σημαίνει ότι έχουν χαμηλότερα οικονομικά εμπόδια κατά την είσοδό τους στην αγορά έναντι, για παράδειγμα, των οπτικών ινών. Επομένως, ενώ οι ασύρματες τεχνολογίες δεν αποτελούν πλήρες υποκατάστατο, μπορούν να συμπληρώσουν τα ενσύρματα δίκτυα και να είναι εναλλακτικός προμηθευτής σε ορισμένες περιοχές ή για συγκεκριμένες υπηρεσίες [28, 2].

□ Δορυφορικά Δίκτυα (*Satellite Networks*)

Οι δορυφορικές υπηρεσίες αφιερώνονται συνήθως στις απευθείας-στο-σπίτι τηλεοπτικές υπηρεσίες και υπηρεσίες βίντεο, το δορυφορικό ραδιόφωνο και τις εξειδικευμένες χρήσεις κινητής τηλεφωνίας. Οι πιο πρόσφατες τεχνολογικές προόδους, όπως οι αλγόριθμοι της τεχνολογίας δέσμης κηλίδας (*spot beam technology*) και της συμπίεσης δεδομένων, αύξησαν την τεχνική αποδοτικότητα στις δορυφορικές επικοινωνίες,

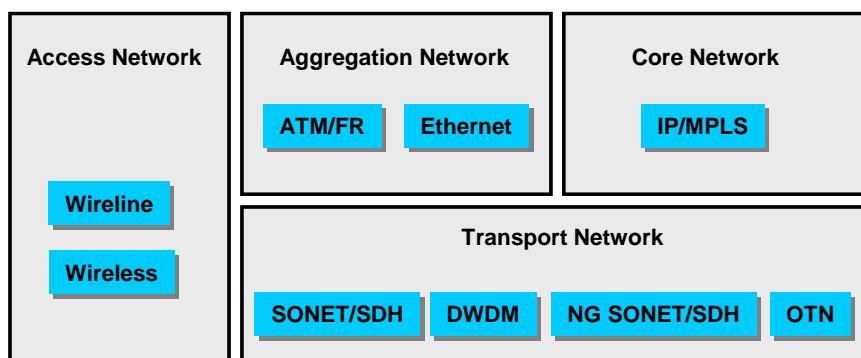
επιτρέποντας την αποδοτικότερη χρήση του φάσματος, και μειώνοντας τον πλεονασμό, αυξάνοντας συνεπώς την πραγματική πυκνότητα δεδομένων και μειώνοντας το απαιτούμενο εύρος ζώνης μετάδοσης [29]. Η δορυφορική ευρυζωνικότητα παρέχεται συνήθως στον πελάτη μέσω γεωσύγχρονου δορυφόρου. Η επίγεια υποδομή περιλαμβάνει τον απομακρυσμένο εξοπλισμό, που αποτελείται από μια μικρή κεραία και μια ενδοκτιριακή μονάδα. Κατάλληλες πύλες συνδέουν το δορυφορικό με το επίγειο δίκτυο. Εκτός από τις θέσεις των πυλών, η δορυφορική ευρυζωνικότητα είναι ανεξάρτητη από την επίγεια υποδομή όπως π.χ. αγωγοί και πύργοι, επιτρέποντας την παροχή κάλυψης ακόμη και στις απομακρυσμένες περιοχές.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, διάφοροι πάροχοι άρχισαν να προσφέρουν δορυφορική ευρυζωνική υπηρεσία στους οικιακούς καταναλωτές, ειδικά σε εκείνους που βρίσκονται σε περιοχές μη ειδάλλως προσβάσιμες από ευρυζωνικά δίκτυα, σε προσιτές τιμές και με ταχύτητες συγκρίσιμες με εκείνες που παρέχονται από ορισμένες ενσύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες.

Ενώ οι τεχνολογικές εξελίξεις επέτρεψαν στις δορυφορικές υπηρεσίες να προσφέρουν σημαντικά υψηλότερη χωρητικότητα και βελτιωμένη απόδοση, υπάρχουν ακόμη μερικές προκλήσεις για τους χρήστες της δορυφορικής συνδετικότητας. Ειδικότερα, η περιορισμένη χωρητικότητα στην ανερχόμενη κατεύθυνση (*upstream*) περιορίζει τη δυνατότητα των χρηστών να ωφεληθούν από τις δυνατότητες του νέου Web 2.0, ενώ τα ζητήματα που αφορούν στην καθυστέρηση θα συνεχίσουν να περιορίζουν τη δυνατότητα χρήσης των δορυφορικών επικοινωνιών για ορισμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες και εφαρμογές (π.χ. φωνητική και εικονο-διάσκεψη), ενώ οι ταχύτητες αναμένεται να είναι σημαντικά χαμηλότερες από αυτές των οπτικών δικτύων.

2.3.2 ΔΙΚΤΥΑ ΚΟΡΜΟΥ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-4 που ακολουθεί, το Aggregation (*Backhaul*) δίκτυο υιοθετεί τεχνολογίες ATM/Frame Relay και Ethernet, ενώ στο δίκτυο κορμού χρησιμοποιείται IP/MPLS (επιπέδου 2-3 του OSI μοντέλου).



Σχήμα 2-4: Τεχνολογίες 3 κατώτερων επιπέδων του OSI μοντέλου στα NGN δίκτυα

Το αντίστοιχο δίκτυο μεταφοράς (φυσικό επίπεδο του OSI μοντέλου) υποστηρίζει ένα σύνολο οπτικών τεχνολογιών μεταφοράς, όπως SONET/SDH, DWDM, Next Generation SONET/SDH και OTN, οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια [30].

□ SONET/SDH

Παραδοσιακά, η τεχνολογία φυσικού επιπέδου που έχει χρησιμοποιηθεί στα δίκτυα κορμού είναι η SONET/SDH. Στην πραγματικότητα, SONET και SDH είναι πρότυπα για σύγχρονη μετάδοση δεδομένων πάνω από δίκτυα οπτικών ινών. Το SONET (*Synchronous Optical Network*) αποτελεί την αμερικάνικη έκδοση του προτύπου που έχει εκδοθεί από το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Εθνικών Προτύπων (*American National Standards Institute - ANSI*) [31, 32], ενώ το SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) αποτελεί τη διεθνή έκδοση του προτύπου, όπως αυτή έχει δημοσιευτεί από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (*International Telecommunications Union - ITU*) [33, 34, 35].

Οι ρυθμοί μετάδοσης που υποστηρίζονται δίνονται στον Πίνακα 2-3:

SONET Optical Carrier Level	SONET Frame Format	SDH level and Frame Format	Payload bandwidth (Mbps)	Line Rate (Mbps)
OC-1	STS-1	STM-0	50.112	51.840
OC-3	STS-3	STM-1	150.336	155.520
OC-12	STS-12	STM-4	601.344	622.080
OC-24	STS-24	STM-8	1202.688	1244.160
OC-48	STS-48	STM-16	2405.376	2488.320
OC-192	STS-192	STM-64	9621.504	9953.280
OC-768	STS-768	STM-256	38486.016	39813.120
OC-3072	STS-3072	STM-1024	153944.064	159252.480

Πίνακας 2-3: Χαρακτηριστικά SONET/SDH

Σημειώνεται ότι η πρόοδος του ρυθμού δεδομένων ξεκινά στα 155Mb/s και αυξάνεται σε πολλαπλάσια του 4. Άλλοι ρυθμοί, όπως OC-9, OC-18, OC-36, OC-96 και OC-

1536 περιγράφονται μερικές φορές, αλλά δεν είναι σαφές εάν έχουν ποτέ αναπτυχθεί, και φυσικά δεν συνηθίζονται και δεν είναι συμβατοί με τα πρότυπα. Ο επόμενος λογικός ρυθμός των 160 Gbit/sec (OC-3072/STM-1024) δεν έχει ακόμη προτυποποιηθεί, λόγω του κόστους των πομποδεκτών υψηλής ταχύτητας και της δυνατότητας για πιο φθηνή πολυπλεξία μηκών κύματος στα 10 και 40 Gbit/sec.

Ωστόσο, το 10 Gigabit Ethernet δεν παρέχει σαφή διαλειτουργικότητα σε επίπεδο bitstream με συστήματα SDH/SONET. Αυτό διαφέρει από τους αναμεταδότες συστημάτων WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), συμπεριλαμβανομένων τόσο των CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) όσο και των DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) που υποστηρίζουν τα OC-192 σήματα SONET, τα οποία μπορούν κανονικά να υποστηρίξουν 10 Gigabit Ethernet με πλαισιοποίηση thin-SONET.

□ *Next-generation SONET/SDH*

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας SONET/SDH οδηγήθηκε αρχικά από την ανάγκη μεταφοράς πολλαπλών σημάτων PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) όπως DS1, E1, DS3 και E3 μαζί με άλλες ομάδες πολυπλεγμένης φωνητικής κίνησης 64 Kbps με παλμοκωδική διαμόρφωση. Η δυνατότητα μεταφοράς ATM κίνησης αποτέλεσε μια άλλη πρόωμη εφαρμογή. Προκειμένου να υποστηριχθούν μεγάλα εύρη ζώνης στο ATM, αναπτύχθηκε η τεχνική της συνένωσης (*concatenation*), με την οποία μικρότεροι περιέκτες πολυπλεξίας πολυπλέκονται αντιστρόφως ώστε να δημιουργήσουν ένα μεγαλύτερο περιέκτη, και συνεπώς να υποστηρίξουν μεγάλους «αγωγούς μεταφοράς δεδομένων» [36].

Ωστόσο, ένα πρόβλημα με την παραδοσιακή συνένωση είναι η έλλειψη ευελιξίας. Ανάλογα με την ανάμειξη κίνησης δεδομένων και φωνής που πρέπει να μεταφερθεί, μπορεί να υπάρξει ένα μεγάλο ποσό αχρησιμοποίητου εύρους ζώνης που σπαταλάται, λόγω των σταθερών μεγεθών των συνενωμένων περιεκτών. Για παράδειγμα, η «τοποθέτηση» μιας σύνδεσης 100 Mbps γρήγορου Ethernet μέσα σε ένα περιέκτη 155 Mbps οδηγεί σε σημαντική σπατάλη. Πιο σημαντική είναι η επιβεβλημένη ανάγκη για όλα τα ενδιάμεσα στοιχεία δικτύου να υποστηρίξουν τα νέα μεγέθη συνένωσης. Αυτό το πρόβλημα ξεπεράστηκε αργότερα με την εισαγωγή της εικονικής συνένωσης (*Virtual Concatenation - VCAT*) [37].

Η τεχνική VCAT επιτρέπει μια πιο αυθαίρετη συνένωση χαμηλότερης προτεραιότητας περιεκτών πολυπλεξίας, δημιουργώντας μεγαλύτερους πολυπλέκτες αυθαίρετου μεγέθους (π.χ., 100 Mbit/s), χωρίς να υπάρχει η ανάγκη τα ενδιάμεσα στοιχεία δικτύου να υποστηρίξουν αυτή την ιδιαίτερη μορφή συνένωσης. Η VCAT ολοένα και περισσότερο υποστηρίζει τα πρωτόκολλα της γενικής διαδικασίας πλαισιοποίησης (*Generic Framing Procedure - GFP*) [38, 39] προκειμένου να ταιριάζει ωφέλιμα φορτία αυθαίρετου εύρους ζώνης στον εικονικά συνενωμένο περιέκτη.

Η τεχνική του σχεδίου ρύθμισης της χωρητικότητας ζεύξεων (*Link Capacity Adjustment Scheme - LCAS*) [40] επιτρέπει τη δυναμική αλλαγή του εύρους ζώνης μέσω της δυναμικής εικονικής συνένωσης, πολυπλέκοντας περιέκτες με βάση τις βραχυπρόθεσμες ανάγκες εύρους ζώνης στο δίκτυο.

Το σύνολο των πρωτοκόλλων SONET/SDH επόμενης γενιάς που επιτρέπουν τη μεταφορά Ethernet αναφέρονται ως Ethernet πάνω από SONET/SDH (*Ethernet over SONET/SDH - EoS*) [41].

□ OTN

Τα δίκτυα μεταφοράς εξελίσσονται από τα παραδοσιακά SONET/SDH/DWDM στα OTN/ DWDM, και οι ταχύτητες μετάδοσης στα δίκτυα κορμού αυξάνονται σε 40 και 43 Gbits/sec. Συγχρόνως, οι πάροχοι αντιμετωπίζουν σκληρό ανταγωνισμό και αναμένεται να παρέχουν την υψηλότερη ποιότητα εμπειρίας – ουσιαστικά, τη χωρίς λάθη μετάδοση σε δίκτυα μακράς διαδρομής (*long-haul networks*) και πολύ μακράς διαδρομής (*ultralong-haul networks*). Προκειμένου να υποστηριχθούν τα υψηλότερα εύρη ζώνης που απαιτούνται για την παροχή υπηρεσιών NGN όπως φωνή, δεδομένα και βίντεο σε μεγάλες αποστάσεις, απαιτείται οι πάροχοι να αναβαθμίσουν τις υπάρχουσες υποδομές και να επεκτείνουν το μήκος των οπτικών συνδέσεων των δικτύων τους.

Το διεθνές πρότυπο γνωστό ως Οπτικό Δίκτυο Μεταφοράς (*Optical Transport Network - OTN*) - η ITU-T σύσταση G.709 καθορίζει τη δομή πλαισιοποίησης [42] - ικανοποιεί αυτές τις προκλήσεις. Κατά συνέπεια, οι τεχνολογίες OTN και DWDM γίνονται κυρίαρχες σε δίκτυα μακράς και πολύ μακράς διαδρομής που διασυνδέουν απόμακρες περιοχές και χώρες.

Η τεχνολογία OTN επιτρέπει σε πολλαπλά δίκτυα και υπηρεσίες, όπως τα συμβατικά SONET/SDH, να συνδυάζονται ομοιόμορφα σε μια κοινή υποδομή για δεδομένα, φωνή, βίντεο και εφαρμογές αποθήκευσης. Η OTN ουσιαστικά «πακετάρει» τα δεδομένα των πελατών (SONET OC-768/OC-192/OC-48, SDH STM-256/STM-64/STM-16 και 10-Gigabit Ethernet LAN και WAN) σε ένα νέο ωφέλιμο φορτίο που διατηρεί πλήρως κάθε υπηρεσία και μεταφέρει το σήμα μέσω του δικτύου μακράς διαδρομής. Αυτό διασφαλίζει την αρχική υπογραφή του πελάτη και επιτρέπει λεπτομερή έλεγχο της επίδοσης σε ολόκληρο το δίκτυο.

Οι δυνατότητες διαχείρισης εύρους ζώνης που παρέχει η τεχνολογία OTN επεκτείνουν την απόδοση των δικτύων SONET/SDH προς την πλευρά των δικτύων DWDM, όπου οι χρήστες μπορούν να παρακολουθούν την επίδοση κάθε καναλιού μέσα στο δίκτυο DWDM. Ο μηχανισμός της Εμπρόσθιας Διόρθωσης Σφάλματος (*Forward Error Correction – FEC*) επιτρέπει στους παρόχους να επεκτείνουν το μήκος της οπτικής ζεύξης χωρίς να πρέπει

να αναπαραχθεί το σήμα, το οποίο περιορίζει τις απαιτήσεις σε εξοπλισμό και την πιθανότητα λαθών.

Όπως η τεχνολογία SONET/SDH, το ίδιο και η OTN προσφέρει μηχανισμό για προειδοποίηση κινδύνου, προστασία, μεταγωγή και απομακρυσμένη διαχείριση μέσω επιπλέον bytes. Με την εξέλιξη των δικτύων, η OTN παρέχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα, με την επέκταση των ιδίων δυνατοτήτων διαχείρισης προς νέες τεχνολογίες όπως Gigabit Ethernet (*GbE*), 10GbE, Κανάλι Ινών (*Fibre Channel - FC*), Σύνδεση Επιχειρηματικών Συστημάτων (*Enterprise Systems Connection*) και Ινοοπτική Σύνδεση (*Fibre Connection*). Με την τεχνολογία OTN, νέες υπηρεσίες μπορούν να μεταφερθούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις, με πιο υψηλά επίπεδα επίδοσης και με λιγότερο εξοπλισμό. Το κέρδος για τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους είναι χαμηλότερες βασικές δαπάνες, λιγότερα δικτυακά ζητήματα, και γενικά καλύτερη εμπειρία πελατών.

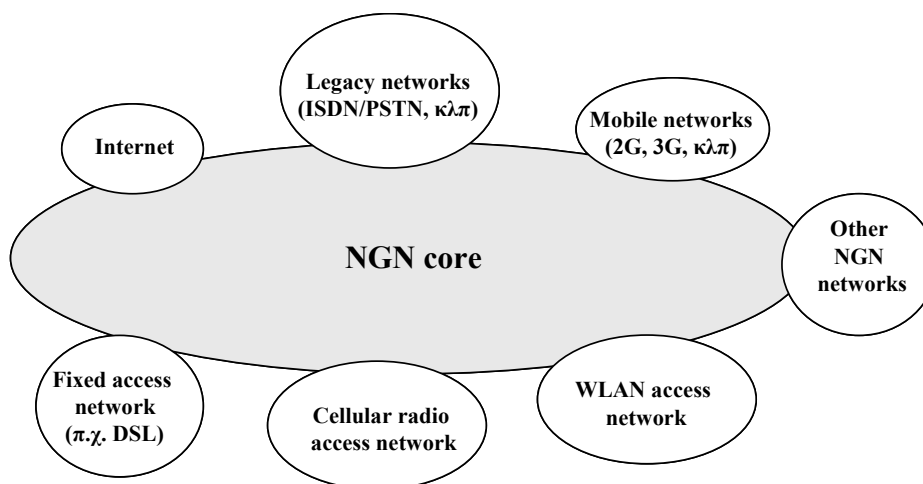
Επιπλέον, η OTN συνδυάζει τις δυνατότητες διαχείρισης, συντήρησης και προστασίας της παραδοσιακής τεχνολογίας SONET/SDH με τις δυνατότητες διαχείρισης εύρους ζώνης ενός δικτύου DWDM. Η OTN επιτρέπει στους παρόχους να ελέγχουν την απόδοση κάθε καναλιού που διαπερνά τα διαφορετικά μήκη κύματος και να διερευνούν τις λεπτομέρειες κάθε μήκους κύματος σε όλο το δίκτυο. Η δυνατότητα για παρακολούθηση και έλεγχο τόσο της πλευράς του πελάτη όσο και της τεχνολογίας φυσικού στρώματος DWDM επιτρέπει στους τεχνικούς να ελέγχουν την απόδοση φτάνοντας στο επίπεδο δεδομένων και ωφέλιμου φορτίου. Χωρίς αυτή τη δυνατότητα, η ανίχνευση λαθών θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη και όλος ο έλεγχος θα έπρεπε να εκτελεσθεί στην πλευρά του πελάτη του SONET/SDH.

Οι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών στις περισσότερες αναπτυγμένες χώρες χρησιμοποίησαν τεχνολογία μεταφοράς 10 Gbit/sec για κάποιο διάστημα. Ωστόσο, καθώς οι απαιτήσεις εύρους ζώνης συνεχώς αυξάνονται, η ταχύτητα 10 Gbit/sec αποτελεί πρόβλημα για ορισμένες εφαρμογές. Για το λόγο αυτό, άρχισαν να προστίθενται περισσότερες συνδέσεις 10 Gbit/sec, απαιτώντας πρόσθετη οπτική ίνα και εξοπλισμό ώστε να ξεπεραστεί το πρόβλημα.

Από την πλευρά των τηλεπικοινωνιακών παρόχων, η αύξηση της ταχύτητας σε 40 Gbits/sec (SONET OC-768/SDH STM-256) αποτελεί καλύτερη επιλογή. Επιπλέον, η μετάδοση σε ταχύτητα 43-Gbit/sec μέσω της τεχνολογίας OTN (OTU3), ειδικά όταν συνδυάζεται με DWDM, μπορεί να παρέχει ικανοποιητικό εύρος ζώνης για την μεταφορά όλων των υπηρεσιών μέσω του δικτύου, και μάλιστα χωρίς λάθη.

2.4 ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

Εκτός από τη νέα αρχιτεκτονική και τις νέες υπηρεσίες, το NGN επιφέρει ένα πρόσθετο επίπεδο πολυπλοκότητας στα υπάρχοντα δίκτυα. Η επιπρόσθετη υποστήριξη πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης και κινητικότητας οδηγεί στην ανάγκη υποστήριξης πολλαπλών σχηματισμών δικτύου. Το παρακάτω σχήμα παριστάνει ένα NGN δίκτυο κορμού με ένα σύνολο χαρακτηριστικών δικτύων πρόσβασης. Στο σχήμα αυτό, το δίκτυο κορμού είναι εκείνο το μέρος του NGN που παρέχει τις τηλεπικοινωνιακές ή/και πολυμεσικές υπηρεσίες του NGN στο χρήστη. Διαχωρίζεται από τα δίκτυα πρόσβασης δεδομένου ότι παρέχει κοινές λειτουργίες που διαμοιράζονται σε ένα ή περισσότερα δίκτυα πρόσβασης. Το NGN δίκτυο κορμού μπορεί να διαχωρίζεται από άλλα NGN δίκτυα κορμού βάσει διαχειριστικών ή ιδιοκτησιακών αναγκών. Τα δίκτυα πρόσβασης διακρίνονται από το δίκτυο κορμού δεδομένου ότι δεν παρέχουν άμεσα υπηρεσίες τελικών χρηστών (εκτός από τη μεταφορά). Τα δίκτυα πρόσβασης μπορεί επίσης να διαχωρίζονται μεταξύ τους βάσει τεχνολογίας, διαχειριστικών ή ιδιοκτησιακών αναγκών [7].



Σχήμα 2-5: NGN δίκτυο κορμού και δίκτυα πρόσβασης

Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη ότι το NGN θα περιλάβει ένα πλήθος δικτυακών προσεγγίσεων, η εξασφάλιση διαλειτουργικότητας μεταξύ αυτών θεωρείται ουσιαστικής σημασίας για τη παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών σε όλους [43]. Στο πλαίσιο αυτό, και χάριν μιας πιο διευκρινιστικής μελέτης, η διαλειτουργικότητα θα οριστεί σε δυο διαστάσεις, την οριζόντια και την κάθετη, οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια.

2.4.1 ΕΙΔΗ ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ

2.4.1.1 Οριζόντια Διαλειτουργικότητα

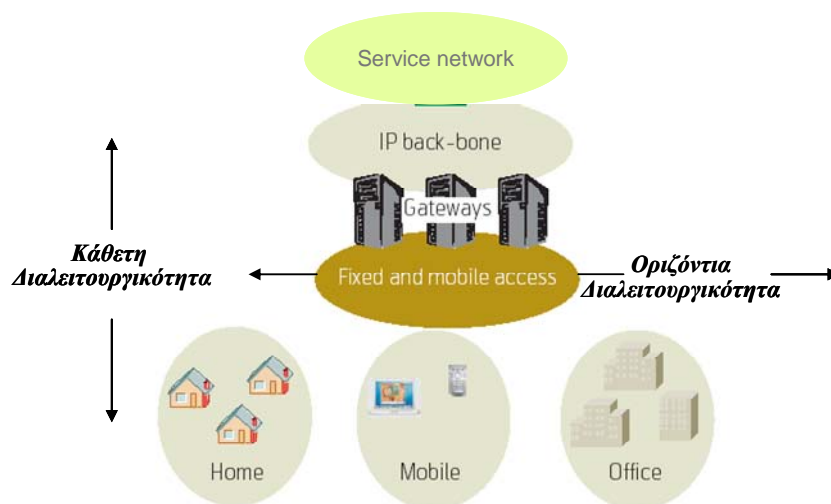
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το δίκτυο πρόσβασης χαρακτηρίζεται ως το πιο βασικό τμήμα ενός NGN, δεδομένου ότι είναι αρμόδιο για την πανταχού παρούσα συνδετικότητα και την ομοιόμορφη κινητικότητα, χαρακτηριστικά θεμελιώδη για τη διάχυτη δυνατότητα πρόσβασης στις υπηρεσίες. Το χαρακτηριστικό της γενικευμένης κινητικότητας των NGN προσφέρει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης σε διαφορετικές θέσεις, ενώ ο χρήστης ή/και ο ίδιος ο τερματικός εξοπλισμός κινείται, επιτρέποντας στους χρήστες να χρησιμοποιούν και να διαχειρίζονται με ενιαίο και συνεχή τρόπο τις εφαρμογές/υπηρεσίες τους, διασχίζοντας διαφορετικά δίκτυα.

Στο πλαίσιο αυτό ορίζεται η *οριζόντια διαλειτουργικότητα*, η οποία αναφέρεται στη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών δικτύων πρόσβασης (Σχήμα 2-6). Δεδομένου ότι οι τεχνολογίες πρόσβασης, ειδικά οι ασύρματες, θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται με καταγιστικό ρυθμό, η οριζόντια διαλειτουργικότητα θα επιτρέψει στους χρήστες να κινούνται μεταξύ διαφορετικών δικτύων πρόσβασης, έχοντας συνεχή πρόσβαση στο σύνολο των υπηρεσιών τους.

2.4.1.2 Κάθετη Διαλειτουργικότητα

Κατά μήκος της διαστρωματωμένης αρχιτεκτονικής ενός δικτύου NGN, το πλήθος των τεχνολογιών που συναντώνται στο δίκτυο του πελάτη, στο δίκτυο πρόσβασης και το δίκτυο κορμού δημιουργεί ένα πλήθος δυνατών σχηματισμών δικτύων.

Η *κάθετη διαλειτουργικότητα* αναφέρεται στη διαλειτουργικότητα μεταξύ δικτύου πρόσβασης και δικτύου κορμού ή μεταξύ δικτύου πελάτη (*Customer Premise Network - CPN*) και δικτύου πρόσβασης (Σχήμα 2-6). Το δίκτυο πρόσβασης, ως σημείο συμφόρησης, είναι συνήθως υπεύθυνο για τη χαμηλή ποιότητα μιας διατερματικής σύνδεσης, εξαιτίας του περιορισμένου του εύρους ζώνης και της καθυστέρησης που προκαλεί.



Σχήμα 2-6: Οριζόντια και Κάθετη διαλειτουργικότητα

2.4.2 ΣΧΕΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Μετά από σχετική βιβλιογραφική έρευνα προέκυψε ότι ένας αριθμός ερευνητών έχει ασχοληθεί με το ζήτημα της διαλειτουργικότητας στα NGN δίκτυα. Οι δυο τύποι διαλειτουργικότητας που ορίστηκαν προηγουμένως διερευνώνται στην εργασία [44]. Οι συγγραφείς, μετά τον εντοπισμό των βασικών δυναμικών και εμποδίων της διαλειτουργικότητας, επικεντρώνονται στην ανάλυση συγκεκριμένων περιπτώσεων που αφορούν τόσο στην οριζόντια όσο και στην κάθετη διαλειτουργικότητα, με σκοπό να αναδείξουν την πολυπλοκότητα και το ευρύ πεδίο της έννοιας της διαλειτουργικότητας και συνεπώς την ανάγκη μελέτης της σε πολλαπλά μέτωπα. Ωστόσο, περιορίζονται στα υπό μελέτη παραδείγματα χωρίς να προτείνουν συγκεκριμένη λύση.

Στα πλαίσια της οριζόντιας διαλειτουργικότητας, η διαλειτουργικότητα μεταξύ GPON και WiMAX μελετάται στο άρθρο [45]. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς προτείνουν μια ραδιο-οπτική αρχιτεκτονική δικτύου πρόσβασης που να παρέχει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του WiMAX πάνω από GPON πλατφόρμες, στοχεύοντας στο να επιτρέψει τον πλεονασμό στα GPON μέσω των ασύρματων συνδέσεων, καθώς επίσης να βελτιώσει τη συμφόρηση του ασύρματου φάσματος και να αυξήσει έτσι τη χωρητικότητα του WiMAX. Η πρόταση βασίζεται στην ιδέα των αλληλοκαλυπτόμενων ραδιοκυβελών, οι οποίες ελέγχονται κεντρικά από το τερματικό οπτικής γραμμής (*OLT*). Γενικότερα, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στη βιβλιογραφία, όσον αφορά την οριζόντια διαλειτουργικότητα, εστιάζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ συγκεκριμένων ασύρματων και οπτικών δικτυακών τεχνολογιών [46, 47, 48, 49, 50, 17].

Σχετικά με την κάθετη διαλειτουργικότητα, η εργασία [51] μελετά τη διαλειτουργικότητα από πλευράς δικτύωσης μεταξύ WiFi στο δίκτυο πρόσβασης και WiMAX στο δίκτυο κορμού, μέσω διατεματικής λύσης η οποία εγγυάται ποιότητα υπηρεσίας για παροχή χρονικά κρίσιμων και απαιτητικών από πλευράς εύρους ζώνης εφαρμογών. Στο ίδιο πλαίσιο κινούνται οι εργασίες [52, 53, 54], οι οποίες μελετούν το ζήτημα της διαλειτουργικότητας για συγκεκριμένες τεχνολογίες που επιλέγονται για το δίκτυο πρόσβασης και το δίκτυο κορμού. Οι προτεινόμενες λύσεις είναι κάθε φορά ειδικά προσαρμοσμένες στα συγκεκριμένα σενάρια δικτύωσης.

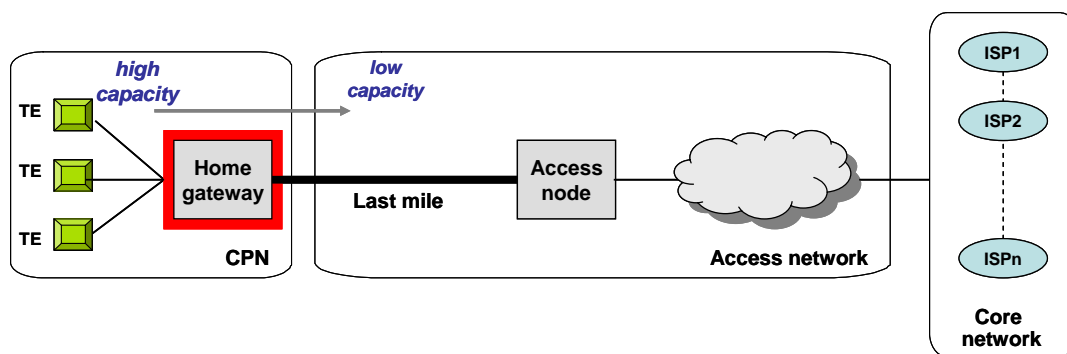
2.5 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ - ΚΙΝΗΤΡΟ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.5.1 ΚΙΝΗΤΡΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Τα NGN δίκτυα αναμένεται να ενσωματώσουν όλες τις ενσύρματες και ασύρματες τεχνολογίες δικτύων, παρέχοντας στους χρήστες ομοιόμορφες και εξατομικευμένες πολυμεσικές υπηρεσίες οπουδήποτε και οποτεδήποτε. Δεδομένου ότι οι τεχνολογίες δικτύων θα συνεχίσουν να εξελίσσονται με γρήγορους ρυθμούς, για να επιτευχθεί η αξιοποίηση των NGN στο μέγιστο, απαιτείται να ξεπεραστεί το κρίσιμο πρόβλημα της *διαλειτουργικότητας μεταξύ δικτύων υψηλής και χαμηλής χωρητικότητας*, το οποίο εντάσσεται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης της κάθετης διαλειτουργικότητας. Σε αντίθεση με τις λύσεις που προτείνονται στη βιβλιογραφία και αναφέρθηκαν παραπάνω, *η παρούσα διατριβή αποσκοπεί στην πρόταση μιας συνολικής προσέγγισης-λύσης, η οποία θα είναι εφαρμόσιμη ανεξάρτητα από τις επιμέρους τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, και οι οποίες συνιστούν το πρόβλημα της διαλειτουργικότητας μεταξύ δικτύων διαφορετικής χωρητικότητας.*

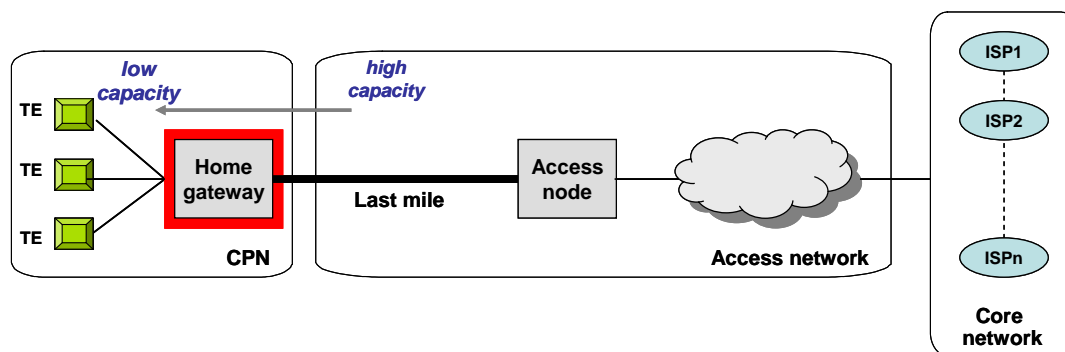
Το πρόβλημα της διαλειτουργικότητας μεταξύ δικτύων υψηλής και χαμηλής χωρητικότητας στα NGN προκύπτει συνήθως εξαιτίας του τελευταίου μιλίου που συνδέει το δίκτυο του πελάτη (*CPN*) με το δίκτυο του παρόχου. Όπως θα φανεί στη συνέχεια μέσα από συγκεκριμένα παραδείγματα, η *οικιακή πύλη (home gateway)* και ο *κόμβος πρόσβασης (access node)* ενδέχεται να αποτελέσουν κόμβους συμφόρησης, με τη ζεύξη εισόδου να εμφανίζει χωρητικότητα μεγαλύτερη από αυτή της ζεύξης εξόδου.

Η οικιακή πύλη αποτελεί κόμβο συμφόρησης, όταν για παράδειγμα χρησιμοποιείται τεχνολογία Ethernet υψηλής ταχύτητας στο δίκτυο του πελάτη (*CPN*), ενώ για τη ζεύξη τελευταίου μιλίου στο δίκτυο πρόσβασης χρησιμοποιείται τεχνολογία χαμηλότερης ταχύτητας, όπως xDSL, WiFi, WiMAX, 802.20 ή 802.22. Στην περίπτωση αυτή, η ζεύξη εισόδου της οικιακής πύλης έχει σημαντικά μεγαλύτερη χωρητικότητα από τη ζεύξη εξόδου, δημιουργώντας σημείο συμφόρησης (Σχήμα 2-7).



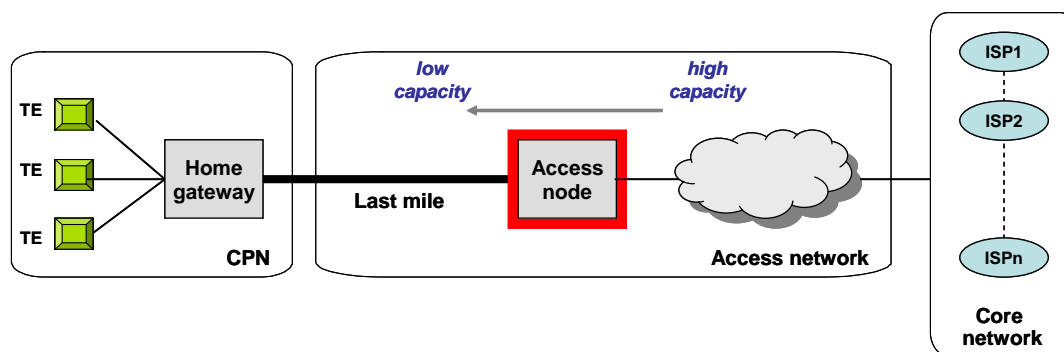
Σχήμα 2-7: Η οικιακή πύλη ως κόμβος συμφόρησης προς το δίκτυο πρόσβασης

Στην περίπτωση που η ζεύξη τελευταίου μιλίου υλοποιηθεί με οπτική τεχνολογία και το δίκτυο του πελάτη με κάποια τεχνολογία τοπικού δικτύου όπως WiFi ή Bluetooth, η οικιακή πύλη θα αποτελέσει και πάλι κόμβο συμφόρησης, από το δίκτυο πρόσβασης προς το δίκτυο του πελάτη, δεδομένου ότι η οικιακή πύλη θα λαμβάνει κίνηση από το οπτικό δίκτυο υψηλής χωρητικότητας και θα τη μεταφέρει σε τοπικό οικιακό δίκτυο μικρότερης χωρητικότητας (Σχήμα 2-8).



Σχήμα 2-8: Η οικιακή πύλη ως κόμβος συμφόρησης προς το δίκτυο πελάτη

Ο κόμβος πρόσβασης αποτελεί επίσης συχνά σημείο συμφόρησης, δεδομένου ότι από την πλευρά του backhaul δικτύου, το οποίο συνήθως υλοποιείται με τεχνολογία υψηλής χωρητικότητας όπως οπτικά δίκτυα, διοχετεύεται κίνηση προς τη ζεύξη τελευταίου μιλίου, οι τεχνολογίες υλοποίησης της οποίας διαθέτουν πολύ χαμηλότερη τιμή μέγιστης χωρητικότητας (Σχήμα 2-9).



Σχήμα 2-9: Ο κόμβος πρόσβασης ως κόμβος συμφόρησης

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, η ζεύξη τελευταίου μιλίου με τους κόμβους συμφόρησης προκαλούν κακή ποιότητα μιας διατεματικής σύνδεσης, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η παροχή προηγμένων ευρυζωνικών υπηρεσιών προσαρμοσμένων στις απαιτήσεις των πελατών.

2.5.2 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Αναγνωρίζοντας το κρίσιμο πρόβλημα της διαλειτουργικότητας μεταξύ δικτύων υψηλής και χαμηλής χωρητικότητας, σκοπός της διατριβής είναι να μελετήσει και να προτείνει μια συνολική λύση εξομάλυνσης του προβλήματος διαλειτουργικότητας στους κόμβους συμφόρησης, ανεξάρτητη από τις εξειδικευμένες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται ανά περίπτωση και οι οποίες αναμένεται να εξελίσσονται συνεχώς. Στο πλαίσιο αυτό, προτείνει μια προηγμένη πολιτική ελέγχου πρόσβασης με εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας, εφαρμόσιμη στους κόμβους συμφόρησης. Βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με την ποιότητα υπηρεσίας και τις πολιτικές ελέγχου πρόσβασης παρατίθενται στο Κεφάλαιο 3.

Ειδικότερα, η προτεινόμενη λύση καθορίζει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο, το οποίο προσδιορίζει διαφοροποιημένες κλάσεις με βάση την ποιότητα υπηρεσίας για τις ροές των πακέτων και εφαρμόζει *χρονοπρογραμματισμό αυστηρής προτεραιότητας (strict priority scheduling)*. Αναγνωρίζοντας τη *μεταβολή καθυστέρησης (jitter)* ως μέτρο επίδοσης κρίσιμης σημασίας για streaming εφαρμογές ήχου ή τηλεόρασης υψηλής ποιότητας και παρατηρώντας ότι η μέγιστη τιμή της συναντάται στους κόμβους συμφόρησης, το σενάριο που μελετάται είναι αυτό κατά το οποίο ροές πακέτων που ανήκουν σε διαφορετικές κλάσεις «συναγωνίζονται» ως προς το εύρος ζώνης σε έναν κόμβο συμφόρησης. Με κατάλληλες υπολογιστικές μεθόδους εξάγεται ο μέγιστος αριθμός επιτρεπτών ροών ανά κλάση υπηρεσίας και πραγματοποιείται αποτίμηση της επίδοσης ενός κόμβου συμφόρησης με βάση την *πιθανότητα φραγής (blocking probability)* και την *διεκπεραιωτικότητα (throughput)* (Κεφάλαιο 4).

Με απώτερο σκοπό τη βελτιστοποίηση της επίδοσης σε σχέση με την πιθανότητα φραγής και τη διεκπεραιωτικότητα, προτείνεται στη συνέχεια ένας προηγμένος μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης, βασισμένος στην μεταβολή καθυστέρησης, ο οποίος προορίζεται να εφαρμοστεί τοπικά στους κόμβους συμφόρησης. Αξίζει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι ο τοπικός έλεγχος πρόσβασης επιλέγεται συχνά ως αποτελεσματική εναλλακτική σε σχέση με τον κεντρικό, δεδομένου ότι επιτρέπει καλύτερη επίγνωση της διαθεσιμότητας των περιορισμένων δικτυακών πόρων στα άκρα. Προς αυτή την κατεύθυνση, διατυπώνεται ένα σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης και προτείνεται μια προσεγγιστική μέθοδος επίλυσής του, η οποία αποδεικνύεται ότι παρέχει ανταγωνιστικές λύσεις. Επιπλέον, εμφανίζει χαμηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης, η οποία την καθιστά εμπορικά εφικτή (Κεφάλαιο 5).

2.6 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η έννοια των Δικτύων Επόμενης Γενιάς, αναλύοντας τα βασικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα από την εφαρμογή τους, και περιγράφοντας τις επιμέρους συνιστώσες της λειτουργικής αρχιτεκτονικής τους. Στη συνέχεια, αναγνωρίζοντας ότι τα δίκτυα πρόσβασης και κορμού επόμενης γενιάς είναι αυτά που μεταβάλλουν το παραδοσιακό PSTN, καταγράφηκαν οι τεχνολογικές εξελίξεις που παρουσιάστηκαν στα δίκτυα πρόσβασης και κορμού. Λαμβάνοντας υπόψη την πληθώρα των τεχνολογικών λύσεων, τέθηκε το πρόβλημα της διαλειτουργικότητας, το οποίο ορίστηκε και αναλύθηκε σε δυο επιμέρους διαστάσεις, την οριζόντια και την κάθετη. Μετά την παρουσίαση της σχετικής βιβλιογραφικής έρευνας, και εστιάζοντας στην περιοχή μελέτης της κάθετης διαλειτουργικότητας, δόθηκε η γενική περιγραφή του προβλήματος μελέτης της διατριβής, αναλύοντας το κίνητρο μελέτης του και παρουσιάζοντας την προσέγγιση της λύσης του, με αναφορές στα κεφάλαια που ακολουθούν.

2.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] ITU-T Recommendation Y.2001. General Overview of NGN.
- [2] OECD (2007). Convergence and Next Generation Networks. Available at: <http://www.oecd.org/dataoecd/25/11/40761101.pdf>
- [3] ITU Telecommunication Standardization Sector (2004). NGN 2004 Project description, Document Q1-B11/TD-19. Available at: http://wftp3.itu.int/av-arch/lbc-site/2001-2004/0309_Paris/q1b11.doc
- [4] Telcordia Technologies White Paper. Next Generation Network (NGN) Services. Available at: www.mobilein.com/NGN_Svcs_WP.pdf
- [5] ITU-T Recommendation Y.2011. General Principles and General Reference Model for Next Generation Networks.
- [6] ITU-T Recommendation Y.2112. A QoS Control Architecture for Ethernet-based IP Access Network.
- [7] ITU-T Recommendation Y.2012. Functional Requirements and Architecture of the NGN.
- [8] Salina J., Salina P. (2008). Next Generation Networks: Perspectives and Potentials. Wiley, ISBN: 978-0-470-51649-2.
- [9] Cable Television Laboratories Inc. (2009). Data Over Cable Service Interface Specifications (Docsis 3.0). Available at: <http://www.cablelabs.com/specifications/CM-SP-PHYv3.0-I08-090121.pdf>
- [10] IEEE Standard 802.3ah. Ethernet in the First Mile Task Force.
- [11] ITU-T Recommendations G.983
- [12] ITU-T Recommendations G.984
- [13] Soo Kim K. (2003). On the Evolution of PON-based FTTH Solutions. Information Sciences, 149(1-2), 21-30.
- [14] Gutierrez D., Soo Kim K., Rotolo S., An F.-T., Kazovsky L. (2005). FTTH Standards, Deployments and Research Issues. In Proc. of the JCIS 2005.
- [15] Froberg N.M., Henion S.R., Rao H.G., Hazzard B.K., Parikh S., Rornkey B.R., Kuznetsov M. (2000). The NGI ONRAMP Testbed: Reconfigurable WDM Technology for Next Generation Regional Access Networks. IEEE Journal of Lightwave Technology, 18(12), 1697-1708.
- [16] Kani J., Teshima M., Akimoto K., Takachio N., Suzuki H., Iwatsuki K. (2003). A WDM-based Optical Access Network for Wide-Area Gigabit Access Services. IEEE Optical Communications Magazine, 41(2), S43 - S48.

- [17] Kazovsky L.G., Shaw W.T., Gutierrez D., Cheng N., Wong S.W. (2007). Next-Generation Optical Access Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 25(11), 3428-3442.
- [18] OECD (2006). The Implications of WiMAX for Competition and Regulation. Available at: <http://www.oecd.org/dataoecd/32/7/36218739.pdf>
- [19] Bolton W., Xiao Y., Guizani M. (2007). IEEE 802.20: Mobile Broadband Wireless Access. *IEEE Wireless Communications*, 14(1), 84-95.
- [20] Greenspan A., Klerer M., Tomcik J., Canchi R., Wilson J. (2008). IEEE 802.20: Mobile Broadband Wireless Access for the Twenty-First Century. *IEEE Communications*, 46(7), 56-63.
- [21] Klerer M. (2003). Introduction to IEEE 802.20 Technical and Procedural Orientation. Available at: http://ieee802.org/20/P_Docs/IEEE%20802.20%20PD-04.pdf
- [22] Gnanachandran J., Prashanth V., Bonthu R. (2009). Mobile Broadband Wireless Access – IEEE 802.16 vs 802.20. Available at: <http://www.docstoc.com/docs/14924328/MOBILE-BROADBAND-WIRELESS-ACCESS---IEEE-80216-vs-80220>
- [23] Mitola J. et al. (1999). Cognitive Radios: Making Software Radios more Personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4).
- [24] Mitola J. (2000). Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio. PhD Dissertation, Royal Inst. Technol. (KTH).
- [25] Haykin S. (2005). Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications. *IEEE JSAC*, 23(2).
- [26] Cordeiro C., Challapali K., Birru D., Shankar S. (2006). IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios. *Journal of Communications*, 1(1), 38-47.
- [27] IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access. Available at: <http://www.ieee802.org/16/>
- [28] OFCOM (2006). Regulatory Challenges Posed by Next Generation Access Networks. Available at: <http://www.ofcom.org.uk/research/telecoms/reports/nga/nga.pdf>
- [29] FCC (2008). Second Annual Report and Analysis of Competitive Market Conditions with Respect to Domestic and International Satellite Communications Services. Available at: <http://www.fcc.gov/ib/obc/scr/scr.html>
- [30] Mohapatra S., Mortensen M. (2009). A Solution Framework for Next-Generation Network Planning. VPIsystems White Paper. Available at: <http://www.docstoc.com/docs/20046662/A-Solution-Framework-for-Next-Generation-Network-Planning>

- [31] ANSI Standard T1.105. SONET - Basic Description including Multiplex Structure, Rates and Formats.
- [32] ANSI Standard T1.119.01. SONET - Operations, Administration, Maintenance, and Provisioning (OAM&P) – Communications: OAM&P Communications Protection Switching Fragment.
- [33] ITU-T Recommendation G.707/Y.1322. Network Node Interface for the Synchronous Digital Hierarchy (SDH).
- [34] ITU-T Recommendation G.783. Characteristics of Synchronous Digital Hierarchy (SDH) Equipment Functional Blocks.
- [35] ITU-T Recommendation G.803. Architecture of Transport Networks Based on the Synchronous Digital Hierarchy (SDH).
- [36] Cavendish D., Murakami K., Yun S., Matsuda O., Nishihara M. (2002). New Transport Services for Next-Generation SONET/SDH Systems. *IEEE Communications Magazine*, 40(5).
- [37] ITU-T Recommendation G.7043. Virtual Concatenation of Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH) Signals.
- [38] ITU-T Recommendation G.7041/Y.1303. Generic Framing Procedure (GFP).
- [39] Hernandez-Valencia E., Scholten M., Zhu Z. (2002). The Generic Framing Procedure (GFP): An Overview. *IEEE Communications Magazine*, 40(5).
- [40] ITU-T Recommendation G.7042/Y.1305. Link Capacity Adjustment Scheme (LCAS) for Virtual Concatenated Signals.
- [41] Chohan H., Mukhopadhyay A., Swaber R. (2002). Ethernet-over-Sonet Tutorial. Available at: www.commsdesign.com/story/OEG20020418S0005
- [42] ITU-T Recommendation G.709. Interfaces for the Optical Transport Network (OTN).
- [43] ITU-T Recommendation Y.2006. Description of Capability Set 1 of NGN Release 1.
- [44] Settembre M., Tardy I. (2006). Interoperability Issues for Hybrid Access and Backhaul Networks. *TELEKTRONIKK Journal*, 102(2), 39-47.
- [45] Milosavljevic M., Shachaf Y., Kourtessis P., Senior J.M. (2009). Interoperability of GPON and WiMAX for Network Capacity Enhancement and Resilience. *Journal of Optical Networking*, 8(3), 285-294.
- [46] Shen G., Tucker R., Chae C. (2007). Fixed Mobile Convergence Architectures for Broadband Access: Integration of EPON and WiMAX. *IEEE Communications Magazine*, 45(8), 44-50.
- [47] Sarkar S., Dixit S., Mukherjee B. (2007). Hybrid Wireless-Optical Broadband-Access Network (WOBAN): A Review of Relevant Challenges. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 25(11), 3329-3340.

- [48] Zhensheng J., Jianjun Y., Ellinas G., Chang G. (2007). Key Enabling Technologies for Optical-Wireless Networks: Optical Millimeter-Wave Generation, Wavelength Reuse, and Architecture. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 25(11), 3452-3471.
- [49] Sarkar S., Yen H., Dixit S., Mukherjee B. (2007). RADAR: Risk-and-Delay Aware Routing Algorithm in a Hybrid Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN). In *Proc. of the Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optics Engineers Conference, OSA Technical Digest Series (CD)* (Optical Society of America).
- [50] Hu J., Qian D., Wang T., Cvijetic M. (2008). Wireless Intermediate Frequency Signal over Passive Optical Networks: Architecture and Experimental Performance Evaluation. In *Proc. of the National Fiber Optic Engineers Conference, OSA Technical Digest (CD)* (Optical Society of America).
- [51] Kalle R., Sagar V., Kumar S., Lele A., Das D. (2008). A Novel Interface Gateway Architecture for Seamless Interoperability between 802.11e and 802.16e. In *Proc. of the IEEE International Conference on COMMunication System softWARE and middlewaRE (COMSWARE)*.
- [52] Berlemann L., Hoymann C., Hiertz G.R., Mangold S. (2006). Coexistence and Interworking of IEEE 802.16 and IEEE 802.11(e). In *Proc. of the Vehicular Technology Conference*.
- [53] Gakhar K. et al. (2005). IROISE: A new QoS Architecture for IEEE 802.16 and IEEE 802.11e Interworking. In *Proc. of the 2nd International Conference on Broadband Networks*.
- [54] Frattasi S. et al. (2003). Interworking between WLAN and WMAN: An Ethernet-based Integrated Device. In *Proc. of the 6th Wireless Personal Multimedia Conference (WPMC)*.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έννοια του Δικτύου Επόμενης Γενιάς γίνεται συχνά αντιληπτή ως ένα νέο είδος δικτυακής αρχιτεκτονικής και σχετικών τεχνολογιών που αναπτύσσονται με σκοπό την ενσωμάτωση διαφορετικών πολλαπλών υπηρεσιών (δεδομένα, φωνή, βίντεο, κ.λπ.) και τη σύγκλιση σταθερών και κινητών δικτύων. Με βάση τον ορισμό που παρέχεται από τον οργανισμό προτυποποίησης ITU-T [1], τα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς δομούνται συνήθως πάνω από τεχνολογία μεταγωγής πακέτου (όπως το πρωτόκολλο Διαδικτύου) και είναι σε θέση να παρέχουν *Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service - QoS)* στο στρώμα μεταφοράς, διατηρώντας το ανεξάρτητο από το στρώμα υπηρεσιών και προσφέροντας γενικευμένη κινητικότητα χρηστών και υπηρεσιών [2]. Συνεπώς, η έννοια της Ποιότητας Υπηρεσίας θεωρείται κρίσιμης σημασίας σε ένα Δίκτυο Επόμενης Γενιάς, δεδομένου ότι η κίνηση διασχίζει πολλαπλά δίκτυα. Με τις προσδοκίες των πελατών να κατευθύνονται ολοένα και περισσότερο προς προηγμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες πολυμέσων και μεγάλου όγκου πληροφοριών, οι τελικοί χρήστες θα αλληλεπιδρούν με το δίκτυο μέσω προηγμένου εξοπλισμού, και θα είναι σε θέση να επιλέξουν το επιθυμητό επίπεδο Ποιότητας Υπηρεσίας.

Η Ποιότητα Υπηρεσίας ορίζεται με βάση δυο διαφορετικές προσεγγίσεις: την αντικειμενική και την υποκειμενική. Η αντικειμενική προσέγγιση αφορά στην αποτίμηση της ποιότητας μιας υπηρεσίας εστιάζοντας σε δικτυακά ζητήματα και λαμβάνοντας υπόψη ποσοτικές μετρήσεις. Αντιθέτως, η υποκειμενική προσέγγιση εστιάζει στην εμπειρία χρηστών, και αξιολογεί πόσο καλά μια υπηρεσία ικανοποιεί τις προσδοκίες των πελατών, λαμβάνοντας υπόψη ποιοτικά κριτήρια. Στην περίπτωση αυτή, εισάγεται η έννοια της *Ποιότητας Εμπειρίας (Quality of Experience - QoE)*, η οποία αναφέρεται στην Ποιότητα Υπηρεσίας που γίνεται αντιληπτή από διαφορετικούς χρήστες.

Η παροχή δικτυακών πόρων για ικανοποίηση των απαιτήσεων Ποιότητας Υπηρεσίας αποτελεί βασικό ζήτημα στα πολυ-υπηρεσιακά Δίκτυα Επόμενης Γενιάς. Η παροχή πόρων μπορεί να εξασφαλιστεί από ένα πλήθος μηχανισμών ελέγχου Ποιότητας Υπηρεσίας. Μεταξύ αυτών, ο Έλεγχος Πρόσβασης (*Admission Control*) έχει λάβει μεγάλο ενδιαφέρον με την

εισαγωγή των IP αρχιτεκτονικών δικτύων και αποσκοπεί στην παροχή Ποιότητας Υπηρεσίας σε ροές κίνησης. Το ενδιαφέρον αυτό δημιουργήθηκε από την πεποίθηση ότι η ρύθμιση της αποδοχής νέων ροών αποτελεί ένα από τα βασικά μέσα πρόληψης της συμφόρησης των δικτύων και εξασφάλισης Ποιότητας Υπηρεσίας. Με άλλα λόγια, ο Έλεγχος Πρόσβασης μπορεί να οριστεί ως το σύνολο των ενεργειών που θα πρέπει να εκτελεστούν κατά τη διάρκεια της φάσης εγκατάστασης μιας ροής (επίκλιση) για να καθορίσουν εάν η ροή πρέπει να γίνει αποδεκτή ή όχι και ο βασικός του ρόλος είναι να ελέγχει το ποσό κίνησης που εγχέεται στο δίκτυο έτσι ώστε να επιτευχθούν οι προκαθορισμένοι στόχοι απόδοσης. Ο σχεδιασμός μηχανισμών Ελέγχου Πρόσβασης έχει σημαντικές συνέπειες στην απόδοση ενός δικτύου, δεδομένου ότι ένας μηχανισμός που απορρίπτει άσκοπα ροές που θα μπορούσαν να είχαν γίνει αποδεκτές επιτυχώς, κάνει κακή χρήση των πόρων του δικτύου. Ομοίως, ένας μηχανισμός που λανθασμένα αποδέχεται πάρα πολλές ροές ενδέχεται να προκαλέσει παραβιάσεις του QoS [3, 4].

Τα βασικά σημεία του παρόντος κεφαλαίου συνοψίζονται στα εξής: Αρχικά, αναλύεται η έννοια της Ποιότητας Υπηρεσίας, παρουσιάζοντας τις βασικές παραμέτρους που τη συνιστούν, τους μηχανισμούς ελέγχου της, τα κύρια μοντέλα της, καθώς και τον τρόπο καθορισμού των κλάσεων Ποιότητας Υπηρεσίας από τις κλάσεις κίνησης. Στη συνέχεια, και για λόγους πληρότητας, αναλύεται η έννοια της Ποιότητας Εμπειρίας, όπως αυτή συναντάται στη βιβλιογραφία, συμπληρώνοντας την έννοια της Ποιότητας Υπηρεσίας. Τέλος, το ενδιαφέρον εστιάζεται στο μηχανισμό Ελέγχου Πρόσβασης, ο οποίος θεωρείται θεμελιώδης για τον έλεγχο συμφόρησης και την παροχή QoS. Στο πλαίσιο αυτό, περιγράφεται ένα πλήθος κριτηρίων που χρησιμοποιούνται για διαχωρισμό των διαφόρων πολιτικών Ελέγχου Πρόσβασης που συναντώνται στη βιβλιογραφία σε επιμέρους κατηγορίες.

3.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (QUALITY OF SERVICE - QOS)

Στην περιοχή των δικτύων μεταγωγής πακέτου και δικτύων υπολογιστών, ο όρος «Ποιότητα Υπηρεσίας» αναφέρεται στους μηχανισμούς ελέγχου που μπορούν να παρέχουν διαφορετική προτεραιότητα σε διαφορετικούς χρήστες ή διαφορετικές ροές δεδομένων, ή να εγγυηθούν ένα ορισμένο επίπεδο απόδοσης σε μια ροή δεδομένων σύμφωνα με τα αιτήματα από τα προγράμματα εφαρμογών. Οι εγγυήσεις Ποιότητας Υπηρεσίας θεωρούνται σημαντικές εάν η χωρητικότητα του δικτύου είναι περιορισμένη, ειδικά για τις streaming πολυμεσικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου, για παράδειγμα εφαρμογές VoIP ή IP-TV, δεδομένου ότι αυτές απαιτούν συχνά σταθερό ρυθμό bit και είναι πιθανό να είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση [5].

Η Ποιότητα Υπηρεσίας ορίζεται από την ITU-T [6] ως η *συνολική επίδραση της απόδοσης μιας υπηρεσίας, η οποία καθορίζει το βαθμό ικανοποίησης ενός χρήστη της*

υπηρεσίας. Από αυτή την άποψη, η Ποιότητα Υπηρεσίας καθορίζεται από την προοπτική των τελικών χρηστών, και το πρόβλημα παροχής Ποιότητας Υπηρεσίας συνίσταται τελικά στην ικανοποίηση των χρηστών. Οι χρήστες είναι ικανοποιημένοι όταν η αντίληψή τους για την υπηρεσία ευθυγραμμίζεται με τις προηγούμενες προσδοκίες τους. Το πρόβλημα είναι ότι η αντίληψή τους αυτή βασίζεται σε αντικειμενικές και υποκειμενικές απόψεις, με το υποκειμενικό μέρος να είναι δύσκολο για τους παρόχους να ελεγχθεί. Στο πλαίσιο αυτό, το QoS μπορεί να περιγραφεί με όρους ποσοτικούς και ποιοτικούς, αντίστοιχα. Στην περίπτωση της ποσοτικής προσέγγισης, που αποτελεί και αντικείμενο μελέτης της παρούσας ενότητας, καθορίζονται όρια σε στατιστικές ή ντετερμινιστικές παραμέτρους, τα οποία συμφωνούνται σε μία *Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας (Service Level Agreement - SLA)*. Το πρόβλημα καταλήγει σε πρόβλημα παρακολούθησης των SLAs, ώστε να αποδειχτεί εάν αυτά τα όρια ικανοποιούνται ή όχι. Στην περίπτωση αυτή, συνήθως χρησιμοποιούνται παράμετροι του καναλιού ή της απόδοσης του συστήματος, όπως για παράδειγμα ο *λόγος σήματος-προς-θόρυβο (signal-to-noise ratio – S/N)*, ο *ρυθμός εσφαλμένων bit (bit error rate - BER)*, ο *ρυθμός διεκπεραιωτικότητας μηνυμάτων (message throughput rate)*, η *πιθανότητα φραγής κλήσης (call blocking probability)*, η *μεταβολή καθυστέρησης (jitter)* και η *καθυστέρηση (delay)* [5]. Αντίθετα, η ποιοτική προσέγγιση είναι γενικά απλούστερη, και συνήθως συνδέεται με σχετικό (σε αντιδιαστολή με τον απόλυτο) χειρισμό της κίνησης. Τυπικά, δεν έχει καμία σχετιζόμενη παράμετρο, αλλά θα πρέπει να παρέχει ικανοποιητική εμπειρία χρήστη, ώστε να δικαιολογήσει τη χρησιμοποίηση QoS [7].

Τα σημερινά δίκτυα τηλεπικοινωνιών φιλοδοξούν να μεταφέρουν με ικανοποιητικό τρόπο, τόσο για το χρήστη όσο και για το πάροχο δικτύου, κίνηση που παράγεται από υπηρεσίες και εφαρμογές πολύ διαφορετικής φύσης. Η ικανοποίηση χρήστη επιτυγχάνεται μέσω της διαμόρφωσης αντίληψης για την υπηρεσία υψηλότερου ή τουλάχιστον ίδιου επιπέδου με τις προσδοκίες του. Οι προσδοκίες του χρήστη εξαρτώνται κυρίως από την προηγούμενη εμπειρία του από παρόμοιες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και την τιμή που διατίθεται να πληρώσει. Από την άλλη πλευρά, η ικανοποίηση του παρόχου δικτύου επιτυγχάνεται μέσω της διατήρησης μιας βιώσιμης και αρκετά κερδοφόρας επιχείρησης. Συνεπώς, ο πάροχος δικτύου θα προσπαθήσει να ικανοποιήσει τις προσδοκίες χρηστών, και επομένως να παρέχει Ποιότητα Υπηρεσίας, με την πιο μικρή, κατά το δυνατόν, ποσότητα πόρων και τον αποδοτικότερο τρόπο χρήσης αυτών [8].

3.2.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (QoS METRICS)

Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται οι πιο σημαντικές παράμετροι που ποσοτικοποιούν και καταμετρούν το QoS με αντικειμενικά κριτήρια, και αφορούν κυρίως στην απόδοση του δικτύου. Αυτές είναι:

- *Πιθανότητα φραγής (Blocking probability)*: Περιγράφει την αποτυχία ενός δικτύου να εγκαταστήσει μια σύνδεση εξαιτίας της έλλειψης διαθέσιμων πόρων (συνεπώς, ολόκληρο το μονοπάτι μεταξύ των συμβαλλόμενων μερών δεν είναι διαθέσιμο). Δίνεται ως ο λόγος μεταξύ των περιπτώσεων φραγής και των προσπαθειών.
- *Διαθεσιμότητα δικτύου (Network availability)*: Αυτή η παράμετρος περιγράφει την απαίτηση για παροχή υπηρεσιών χωρίς διακοπή και με την αποδεκτή ποιότητα. Συνεπώς, αναφέρεται στη διαθεσιμότητα του δικτύου συνολικά, που εγγυάται την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των συμβαλλόμενων μερών. Δίνεται ως ο λόγος μεταξύ του χρόνου που το δίκτυο είναι διαθέσιμο και του συνολικού χρόνου.
- *Χρόνος αποκατάστασης εφαρμογής (Application set-up time)*: Αντιστοιχεί στο χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ του αιτήματος του χρήστη και της απόκρισης του δικτύου. Αυτή η παράμετρος είναι διαφορετική από την καθυστέρηση, η οποία αναφέρεται στον διατεματικό χρόνο που χρειάζεται ένα πακέτο για να διασχίσει το δίκτυο.
- *Χρόνος αποκατάστασης σύνδεσης (Connection set-up time)*: Αντιστοιχεί στο χρόνο που απαιτείται για την εγκατάσταση μιας σύνδεσης ή συνόδου μεταξύ δυο συμβαλλόμενων μερών. Ο χρόνος μετράται από το πρώτο μήνυμα που στέλνει το ένα μέρος, έως ότου το δίκτυο είναι έτοιμο για μετάδοση των δεδομένων και το άλλο μέρος είναι έτοιμο να λάβει τα δεδομένα.
- *Ευρωστία δικτύου (Network robustness)*: Αναφέρεται στο βαθμό στον οποίο ένα δίκτυο ή ένα μέρος του μπορεί να λειτουργήσει σωστά παρουσία ανέγκυρων εισόδων ή ακραίων συνθηκών (π.χ. συμφόρηση δικτύου ή διακοπή λειτουργίας στοιχείων δικτύου). Η ευρωστία δικτύου επιτυγχάνεται μέσω μηχανισμών προσαρμοστικότητας (*resilience mechanisms*), με κύρια εφαρμογή στο δίκτυο κορμού.
- *Διεκπεραιωτικότητα (Throughput)*: Περιγράφει την ποσότητα δεδομένων που μεταφέρονται από το ένα μέρος στο άλλο ή που υποβάλλονται σε επεξεργασία σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων για τα δίκτυα μετρώνται σε όρους διεκπεραιωτικότητας. Τυπικά, η διεκπεραιωτικότητα μετράται σε *kbps*, *Mbps* και *Gbps*.
- *Καθυστέρηση (Delay)*: Η καθυστέρηση δικτύου αντιστοιχεί στο χρόνο που χρειάζεται για τη μεταφορά δεδομένων από ένα σημείο του δικτύου σε ένα άλλο. Η καθυστέρηση δικτύου προκαλείται από το συνδυασμό της καθυστέρησης επεξεργασίας (*processing delay*), της καθυστέρησης μετάδοσης (*transmission delay*), της καθυστέρησης διάδοσης (*propagation delay*), και της καθυστέρησης δρομολόγησης και αναμονής (*routing and queuing delay*) στους ενδιάμεσους δρομολογητές στο μονοπάτι προς τον κόμβο

προορισμού. Μεγάλη καθυστέρηση μπορεί να προκαλέσει μη-διαθεσιμότητα δεδομένων και ασυνεπή αλληλεπίδραση πραγματικού χρόνου, προκαλώντας απογοήτευση στον τελικό χρήστη. Η καθυστέρηση μετράται σε *msec*.

- *Μεταβολή καθυστέρησης (Jitter)*: Προκαλείται συνήθως από τους ενδιάμεσους καταχωρητές (*buffers*) που «τοποθετούνται» στους δρομολογητές κατά τη διάρκεια των περιόδων αυξανόμενης κίνησης, και λιγότερο συχνά από αλλαγές στη δρομολόγηση, που οφείλονται σε αποτυχίες ή αναπροσαρμογές στους πίνακες δρομολόγησης. Η ποσότητα στη μεταβολή καθυστέρησης που μια εφαρμογή μπορεί να «ανεχτεί» εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, ο σημαντικότερος από τους οποίους είναι η φύση της εφαρμογής. Εξαρτάται επίσης από τη μεταβολή καθυστέρησης που εισάγεται από άλλα συστήματα στο διατεματικό μονοπάτι της εφαρμογής. Οι εφαρμογές με αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης μπορούν να «αντέξουν» την ελάχιστη μεταβολή καθυστέρησης. Το μέγεθος των ενδιάμεσων καταχωρητών ρυθμίζεται συνήθως στη μέγιστη αναμενόμενη μεταβολή καθυστέρησης. Τα πακέτα που καθυστερούν περισσότερο από αυτό θεωρούνται ως χαμένα και «γεμίζουν» με προεπιλεγμένο (*default*) περιεχόμενο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ατέλειες υπηρεσιών (θόρυβο ή τρεμόσβημα εικόνας). Επίσης, υπάρχουν περιορισμοί στους ενδιάμεσους καταχωρητές. Οι περιορισμοί αυτοί εξαρτώνται από την ανοχή καθυστέρησης της εφαρμογής και από τους περιορισμούς μνήμης των ενδιάμεσων καταχωρητών. Η μεταβολή καθυστέρησης μετράται σε *msec*.
- *Ρυθμός εσφαλμένων bit (Bit Error Rate - BER)*: Σε μια ψηφιακή μετάδοση, το BER είναι το ποσοστό των bits με λάθη προς το συνολικό αριθμό bits που έχουν μεταδοθεί, ληφθεί ή επεξεργαστεί κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Συνήθως εκφράζεται σε αρνητική δύναμη του 10. Για παράδειγμα, 4 λάθος bits σε σύνολο 100.000 bits που έχουν μεταδοθεί, αντιστοιχεί σε BER ίσο με 4×10^{-5} . Το BER είναι το ψηφιακό ισοδύναμο του λόγου σήματος-προς-θόρυβο σε ένα αναλογικό σύστημα.
- *Ρυθμός απώλειας πακέτων (Packet loss rate)*: Η απώλεια πακέτων είναι συνήθως το αποτέλεσμα συμφόρησης στο δίκτυο. Ο ρυθμός απώλειας πακέτων ορίζεται ως το ποσοστό των πακέτων που χάνονται κατά μήκος του μονοπατιού από την πηγή στον προορισμό, από το συνολικό αριθμό των μεταδιδόμενων πακέτων. Δίνεται συνήθως ως ο λόγος μεταξύ των χαμένων και των μεταδιδόμενων πακέτων.

3.2.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

3.2.2.1 Έλεγχος Πρόσβασης (*Admission Control*)

Μερικές εφαρμογές, όπως η τηλεδιάσκεψη, παράγουν κίνηση στο δίκτυο που απαιτεί ένα εγγυημένο επίπεδο Ποιότητας Υπηρεσίας για τη σωστή λειτουργία τους. Αυτές οι

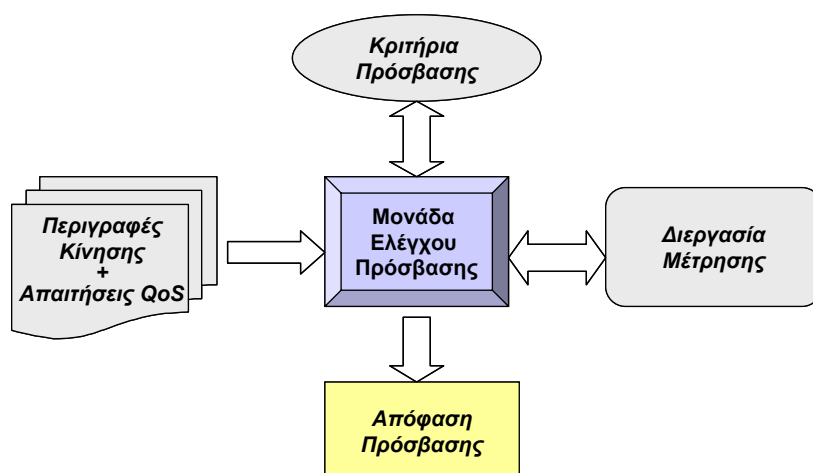
απαιτήσεις Ποιότητας Υπηρεσίας μπορεί να σχετίζονται με ελάχιστο εύρος ζώνης, περιορισμένες διατεματικές καθυστερήσεις ή μέγιστους ρυθμούς απώλειας πακέτων που υφίσταται μια ροή. Τα στοιχεία δικτύου που υποστηρίζουν τέτοιες ροές πρέπει να είναι σε θέση να διαθέσουν και να διατηρήσουν τους πεπερασμένους δικτυακούς πόρους τους για να τηρήσουν τις εγγυήσεις τους. Συνεπώς, αυτά τα στοιχεία δικτύου ενδέχεται επίσης να πρέπει να απορρίψουν νέες ροές κίνησης που θα οδηγούσαν σε παραβίαση των υποσχέσεών τους. Η διαδικασία της απόφασης σχετικά με την αποδοχή ή απόρριψη μιας νέας ροής καλείται «Έλεγχος Πρόσβασης». Η πρόληψη εμφάνισης συμφόρησης που επιτυγχάνει ο Έλεγχος Πρόσβασης μειώνει την καθυστέρηση και την απώλεια πακέτων, βελτιώνοντας την απόδοση σε πραγματικό χρόνο.

Η απόφαση Ελέγχου Πρόσβασης μπορεί να είναι τόσο απλή όσο ένας απλός υπολογισμός ανισότητας: εάν το άθροισμα του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης των τρεχουσών ροών και της νέας ροής είναι μεγαλύτερο από το συνολικό εύρος ζώνης του δικτύου, η νέα ροή απορρίπτεται. Οι εγγυήσεις QoS, οι οποίες δεν έχουν καμία ανοχή σε παραβιάσεις, καλούνται «σκληρές» εγγυήσεις, και μερικές ροές απαιτούν αυτήν την εγγυημένη υπηρεσία. Άλλες ροές, ωστόσο, μπορούν να δεχτούν κάποιο ποσοστό παραβίασης εγγυήσεων QoS, που συνήθως περιορίζεται από ορισμένες τιμές πιθανότητας. Τέτοιες στατιστικές, ή «μαλακές» εγγυήσεις παρέχουν περισσότερη ευελιξία στον μηχανισμό Ελέγχου Πρόσβασης, οδηγώντας σε αυξημένη χρησιμοποίηση δικτύου [9].

Στη συνέχεια δίνονται οι βασικές συνιστώσες ενός μηχανισμού Ελέγχου Πρόσβασης. Μια *Μονάδα Ελέγχου Πρόσβασης (Admission Control Unit)* (Σχήμα 3-1) παίρνει ως είσοδο τις *Περιγραφές Κίνησης (Traffic Descriptions)* και τις *Απαιτήσεις QoS (QoS Requirements)* της ροής, και εξάγει μια απόφαση, είτε αποδοχής της ροής στη ζητούμενη Ποιότητα Υπηρεσίας, είτε απόρριψής της, εάν η συγκεκριμένη Ποιότητα Υπηρεσίας δεν ικανοποιείται [10]. Για το λόγο αυτό συμβουλευεται τα *Κριτήρια Πρόσβασης (Admission Criteria)*, που αποτελούν τους κανόνες σύμφωνα με τους οποίους ένα σχέδιο Ελέγχου Πρόσβασης δέχεται ή απορρίπτει μια ροή. Δεδομένου ότι οι δικτυακοί πόροι που διατίθενται σε μια κλάση κίνησης μοιράζονται από όλες τις ροές αυτής της κλάσης, η απόφαση να γίνει αποδεκτή μια νέα ροή μπορεί να έχει επιπτώσεις στις δεσμεύσεις QoS που λαμβάνονται για τις αποδεκτές ροές αυτής της κλάσης. Η νέα ροή μπορεί επίσης να έχει επιπτώσεις στο QoS των ροών που ανήκουν σε κλάσεις χαμηλότερης προτεραιότητας. Συνεπώς, μια απόφαση Ελέγχου Πρόσβασης λαμβάνεται συνήθως με βάση την εκτίμηση της επίδρασης που η νέα ροή θα έχει στις άλλες ροές και της προβλεπόμενης χρησιμοποίησης του δικτύου.

Μια άλλη χρήσιμη συνιστώσα του Ελέγχου Πρόσβασης είναι η *Διεργασία Μέτρησης (Measurement Process)*. Εάν υποθέσουμε ότι οι πηγές μπορούν να περιγράψουν την κίνησή

τους χρησιμοποιώντας επακριβώς τις περιγραφές κίνησης, η Μονάδα Ελέγχου Πρόσβασης μπορεί απλά να χρησιμοποιήσει τις παραμέτρους από τις περιγραφές κίνησης. Ωστόσο, παρατηρείται ότι οι σε πραγματικό χρόνο οι πηγές κίνησης είναι πολύ δύσκολο να περιγραφούν και οι παράμετροι μπορούν απλώς να παρέχουν έναν πολύ χαλαρό ανώτατο όριο του ρυθμού κίνησης. Όταν υπάρχει έκρηξη στην πραγματική κίνηση, η χρησιμοποίηση του δικτύου μπορεί να είναι πολύ κακή εάν ο Έλεγχος Πρόσβασης είναι απλώς βασισμένος στις παραμέτρους που παρέχονται κατά το χρόνο εγκατάστασης μιας κλήσης. Συνεπώς, η Μονάδα Ελέγχου Πρόσβασης θα πρέπει να παρακολουθεί συνεχώς τη δυναμική του δικτύου και να χρησιμοποιεί μετρήσεις, όπως το στιγμιαίο φορτίο του δικτύου και την καθυστέρηση πακέτων για να λαμβάνει τις αποφάσεις αποδοχής ή μη.



Σχήμα 3-1: Συνιστώσες του Μηχανισμού Ελέγχου Πρόσβασης

3.2.2.2 Μορφοποίηση/Αστυνόμευση Κίνησης (Traffic Shaping/Policing)

Αφότου ένα ρεύμα κίνησης γίνει αποδεκτό με μια δεδομένη απαίτηση QoS και με δεδομένη περιγραφή κίνησης, αποτελεί δέσμευση για την πηγή να διατηρήσει το συγκεκριμένο προφίλ. Εάν μια «ανυπάκουη» πηγή «σπάσει τη συμφωνία της» και στείλει περισσότερη κίνηση από όση είχε διαπραγματευτεί, θα υπάρξει βλάβη στη λειτουργία του μοντέλου υπηρεσίας. Για την αποτροπή αυτού του ενδεχομένου, η μορφοποίηση και η αστυνόμευση κίνησης αποτελούν σημαντικές λύσεις.

Ο αλγόριθμος *token bucket* [11] χρησιμοποιείται σχεδόν πάντα για τη μορφοποίηση κίνησης. Ο αλγόριθμος αυτός είναι συνώνυμος με έναν κάδο βάθους b , στον οποίο συλλέγονται κουπόνια με ρυθμό r . Όταν ο κάδος γεμίσει, τα επιπλέον κουπόνια χάνονται. Μια πηγή μπορεί να στείλει δεδομένα μόνο εάν μπορεί να «αρπάξει» και να καταστρέψει ικανοποιητικό αριθμό κουπονιών από τον κάδο.

Ο αλγόριθμος *leaky bucket* [11] χρησιμοποιείται για την αστυνόμευση κίνησης, σύμφωνα με τον οποίο η υπερβολική κίνηση διώχνεται. Ο *leaky bucket* είναι συνώνυμος με έναν κάδο βάθους b , με μια τρύπα στο κάτω μέρος του, η οποία επιτρέπει ροή κίνησης με σταθερό ρυθμό r . Εάν ο κάδος είναι πλήρης, τα επιπλέον πακέτα απλώς πέφτουν.

3.2.2.3 Ταξινόμηση Πακέτων (*Packet Classification*)

Κάθε πακέτο, ανεξάρτητα από το εάν είναι πραγματικού χρόνου ή μη, αντιμετωπίζεται με τον ίδιο τρόπο σε όλους τους δρομολογητές στο Διαδίκτυο βέλτιστης προσπάθειας (*best-effort Internet*). Ωστόσο, η πολυμεσική κίνηση πραγματικού χρόνου απαιτεί διαφορετικό χειρισμό στο δίκτυο. Κατά συνέπεια, τα νεότερα μοντέλα υπηρεσιών θα πρέπει να χρησιμοποιούν κάποιο μηχανισμό που να ξεχωρίζει τα πακέτα πραγματικού χρόνου από τα μη πραγματικού χρόνου. Στην πράξη, αυτό γίνεται συνήθως με τη *σήμανση πακέτων* (*packet marking*). Το πεδίο *Είδος Υπηρεσίας* (*Type of Service - ToS*) στην IP επικεφαλίδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το λόγο αυτό. Κάποιες νεότερες αρχιτεκτονικές Διαδικτύου, όπως η *MPLS*, χρησιμοποιούν τις *σύντομες ετικέτες* (*short labels*), οι οποίες επισυνάπτονται στην αρχή των IP πακέτων για τον ίδιο λόγο.

3.2.2.4 Χρονοπρογραμματισμός Πακέτων (*Packet Scheduling*)

Εάν διαφορετικός χειρισμός των πακέτων πρόκειται να παρασχεθεί στο δίκτυο, ο χρονοπρογραμματισμός *FIFO* που χρησιμοποιείται παραδοσιακά στους δρομολογητές θα πρέπει να αντικατασταθεί από σύνθετες μεθόδους ουροποίησης, όπως την *Ουροποίηση Προτεραιότητας* (*Priority Queuing*), τη *Σταθμισμένη Δίκαιη Ουροποίηση* (*Weighted Fair Queuing*), κ.λπ.

Η *Ουροποίηση Προτεραιότητας* παρέχει διαφορετικές ουρές για διαφορετικούς τύπους κίνησης. Κάθε ουρά έχει μια σχετική προτεραιότητα, σύμφωνα με την οποία εξυπηρετείται. Οι ουρές με τη χαμηλότερη προτεραιότητα εξυπηρετούνται μόνο όταν δεν υπάρχει κανένα πακέτο σε όλες τις ουρές υψηλότερης προτεραιότητας. Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να οδηγήσει ροές χαμηλής προτεραιότητας σε «λιμοκτονία».

Η *Σταθμισμένη Δίκαιη Ουροποίηση* επίσης έχει διαφορετικές ουρές για διαφορετικές κλάσεις κίνησης. Ωστόσο, για κάθε ουρά ορίζεται ένα συγκεκριμένο βάρος w , και τα πακέτα μιας συγκεκριμένης ουράς παίρνουν πάντα ένα μέρος w/C του εύρους ζώνης, όπου C είναι η συνολική χωρητικότητα της ζεύξης.

3.2.2.5 Απόρριψη Πακέτων (*Packet Dropping*)

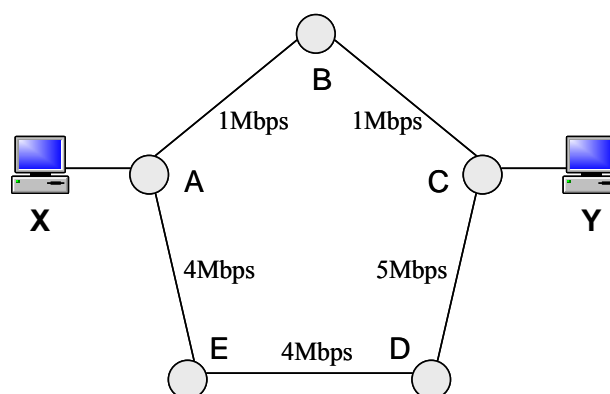
Υπό συνθήκες συμφόρησης, μερικά πακέτα θα πρέπει να απορρίπτονται από τους δρομολογητές. Στο παρελθόν, αυτό γίνονταν τυχαία, οδηγώντας σε ανεπαρκή απόδοση για

την πολυμεσική κίνηση. Για παράδειγμα, ένα ρεύμα πακέτων με κωδικοποίηση MPEG περιέχει πλαίσια I, P και B. Τα πλαίσια I συμπιέζονται χωρίς χρήση οποιουδήποτε χρονικού πλεονασμού μεταξύ των πλαισίων, ενώ τα πλαίσια P και B κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας διανύσματα κίνησης από τα I (ή P) πλαίσια. Συνεπώς, τα πακέτα που περιέχουν πλαίσια I είναι σημαντικότερα από εκείνα που περιέχουν πλαίσια P ή B. Όταν λοιπόν, πρόκειται να πραγματοποιηθεί απόρριψη πακέτων, το δίκτυο θα πρέπει να δώσει υψηλότερη προτεραιότητα απόρριψης στα πλαίσια P και B σε σύγκριση με τα πακέτα πλαισίων I. Έρευνα σχετική με τα διάφορα σχήματα απόρριψης πακέτων δίνεται στο [12].

3.2.2.6 Δρομολόγηση με βάση την Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS-based Routing)

Το best-effort Internet χρησιμοποιεί πρωτόκολλα δρομολόγησης όπως, Ανοικτή Πρώτα η Βραχύτερη Διαδρομή (*Open Shortest Path First - OSPF*), Πρωτόκολλο Πληροφοριών Δρομολόγησης (*Routing Information Protocol - RIP*), και Πρωτόκολλο Συνοριακής Πύλης (*Border Gateway Protocol - BGP*) [13]. Αυτά τα πρωτόκολλα χαρακτηρίζονται ως πρωτόκολλα δρομολόγησης βέλτιστης προσπάθειας (*best effort routing protocols*), και κανονικά χρησιμοποιούν αλγορίθμους βελτιστοποίησης μοναδικού σκοπού, οι οποίοι θεωρούν ένα μόνο μετρικό (είτε τον αριθμό βημάτων, είτε το κόστος γραμμής) και το ελαχιστοποιούν για να βρουν το συντομότερο μονοπάτι από την πηγή στον προορισμό. Συνεπώς, όλη η κίνηση καθοδηγείται κατά μήκος του συντομότερου μονοπατιού, οδηγώντας σε συμφόρηση μερικές ζεύξεις, ενώ άλλες παραμένουν υποχρησιμοποιούμενες. Επιπλέον, εάν η συμφόρηση των ζεύξεων χρησιμοποιείται για την εξαγωγή τους κόστους των γραμμών, έτσι ώστε οι ιδιαίτερα συμφορημένες ζεύξεις να έχουν υψηλότερο κόστος, οι εν λόγω αλγόριθμοι μπορούν να προκαλέσουν «ταλαντώσεις» στο δίκτυο, με το φορτίο κίνησης να μετατοπίζεται συνεχώς από τις ζεύξεις υψηλής συμφόρησης στις ζεύξεις χαμηλής συμφόρησης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η καθυστέρηση και η μεταβολή καθυστέρησης που θα βιώνεται από τους τελικούς χρήστες.

Στη δρομολόγηση με βάση το QoS, καθορίζονται μονοπάτια για τις διαφορετικές ροές κίνησης βάσει κάποιας γνώσης της διαθεσιμότητας πόρων στο δίκτυο, καθώς επίσης και της απαίτησης QoS των ροών. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 3-2, υποθέτουμε ότι υπάρχει μια ροή κίνησης από τον κόμβο X στον κόμβο Y, η οποία απαιτεί εύρος ζώνης 4 Mbps. Παρόλο που το μονοπάτι A-B-C είναι το συντομότερο (ακριβώς δύο βημάτων), δεν θα επιλεγεί επειδή δεν έχει αρκετό εύρος ζώνης. Αντ' αυτού, το μονοπάτι A-E-D-C επιλέγεται, δεδομένου ότι ικανοποιεί την απαίτηση εύρους ζώνης.



Σχήμα 3-2: Δρομολόγηση με βάση το QoS

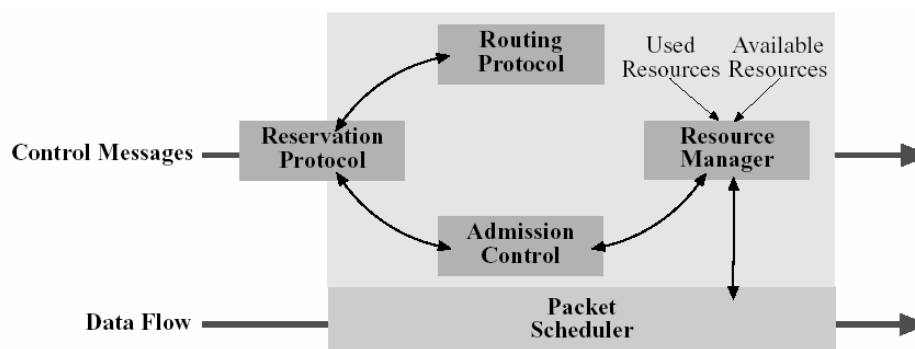
Εκτός από τη δρομολόγηση με βάση το QoS, υπάρχουν δύο άλλες σχετικές έννοιες, η δρομολόγηση βασισμένη σε πολιτικές (*policy-based routing*) και η δρομολόγηση βασισμένη σε περιορισμούς (*constraint-based routing*). Η δρομολόγηση βασισμένη σε πολιτικές [14] συνήθως σημαίνει ότι η απόφαση δρομολόγησης δεν βασίζεται σε γνώση της τοπολογίας του δικτύου και των σχετικών μετρικών, αλλά σε ορισμένες πολιτικές διαχείρισης. Για παράδειγμα, μια πολιτική μπορεί να απαγορεύει σε μια ροή κίνησης να χρησιμοποιήσει μια συγκεκριμένη ζεύξη για λόγους ασφάλειας, ακόμα κι αν η ζεύξη αυτή ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς QoS. Η δρομολόγηση βασισμένη σε περιορισμούς [15] προέρχεται από τη δρομολόγηση με βάση το QoS, αλλά έχει μια ευρύτερη έννοια. Στους αλγόριθμους αυτής της κατηγορίας οι διαδρομές υπολογίζονται βασιζόμενες σε πολλαπλούς περιορισμούς, συμπεριλαμβανομένων των περιορισμών QoS και των περιορισμών που σχετίζονται με πολιτικές. Τόσο η δρομολόγηση με βάση το QoS, όσο και η δρομολόγηση που βασίζεται σε πολιτικές μπορούν να θεωρηθούν ειδικές περιπτώσεις της δρομολόγησης που βασίζεται σε περιορισμούς.

3.2.2.7 Δέσμευση Πόρων (*Resource Reservation*)

Η δέσμευση πόρων έχει μελετηθεί περισσότερο στο κομμάτι που αφορά στο χρόνο εγκατάστασης μιας σύνδεσης. Το Πρωτόκολλο Δέσμευσης Πόρων (*Resource Reservation Protocol*) διαπραγματεύεται τις απαραίτητες δεσμεύσεις πόρων κατά μήκος του μονοπατιού από τον αποστολέα στον δέκτη. Γνωστό Πρωτόκολλο Δέσμευσης Πόρων αποτελεί το *RSVP* [16]. Το *RSVP* αποτελεί μηχανισμό Ποιότητας Υπηρεσίας και ορίστηκε από την *IETF* (*Internet Engineering Task Force*) στο RFC 2205. Εισήχθη ως μηχανισμός της αρχιτεκτονικής QoS ενοποιημένων υπηρεσιών (*IntServ*) για την υλοποίηση διατεμαστικού QoS στο δίκτυο δεδομένων. Το *RSVP* παρέχει διατεμαστική εγγυημένη Ποιότητα Υπηρεσίας και βασίζεται σε μηχανισμούς σήμανσης που μεταδίδονται από την πηγή στον προορισμό, έχοντας ενημέρωση για την τοπολογία του δικτύου. Βασικό μειονέκτημά του αποτελούν τα

μηνύματα σήμανσης, τα οποία επεξεργάζονται από κάθε δρομολογητή στο διατεματικό μονοπάτι. Αξίζει να σημειωθεί ότι διάφορες βελτιώσεις του RSVP έχουν προταθεί σε μια προσπάθεια να κατασταθεί το πρωτόκολλο πιο κλιμακωτό.

Ένα τυπικό σενάριο χρήσης του μηχανισμού δέσμευσης πόρων σε συνδυασμό με τους πιο διαδεδομένους μηχανισμούς ελέγχου Ποιότητας Υπηρεσίας αποτελεί το εξής (Σχήμα 3-3): Μια νέα σύνδεση που απαιτεί εγγυημένο ή προβλεφθέν QoS επικαλείται το Πρωτόκολλο Δέσμευσης Πόρων για την εγκατάσταση του ρεύματος δεδομένων μέσω του δικτύου. Εάν ένας δρομολογητής λάβει ένα αίτημα εγκατάστασης σύνδεσης, καλεί τη *Λειτουργία Δρομολόγησης (Routing Protocol)* για να βρει μια διαδρομή που θα είναι σε θέση να υποστηρίξει το απαιτούμενο QoS. Στη συνέχεια, ο *Αλγόριθμος Ελέγχου Πρόσβασης (Admission Control Algorithm)* πρέπει να ελέγξει εάν οι επιθυμητές παράμετροι QoS μπορούν ή όχι να εκπληρωθούν χωρίς παραβίαση των εγγυήσεων που έχουν ήδη δοθεί για τις άλλες συνδέσεις (*Resource Manager*). Εάν η νέα σύνδεση μπορεί να γίνει αποδεκτή, οι πόροι δεσμεύονται θέτοντας σε ισχύ τον *Χρονοπρογραμματιστή Πακέτων (Packet Scheduler)*, ο οποίος θα διευθετήσει τα εισερχόμενα πακέτα σύμφωνα με τους δεσμευμένους πόρους [17].



Σχήμα 3-3: Αρχιτεκτονική δρομολογητή QoS

Πιο αναλυτικά, ένα τυπικό σύστημα *Ελέγχου Αποδοχής Σύνδεσης (Connection Admission Control - CAC)* βασίζεται στην πλήρη εικόνα της διαθεσιμότητας όλων των πόρων του δικτύου σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Ο μηχανισμός CAC λαμβάνει όλα τα αιτήματα για την εκκίνηση μιας υπηρεσίας (SIP, IGMP, κ.λπ.), και σύμφωνα με την τρέχουσα εικόνα της κατάστασης του δικτύου, αποφασίζει εάν μπορεί να γίνει αποδεκτό το αίτημα ή όχι. Μόλις ληφθεί η παρούσα απόφαση, μπορεί να πραγματοποιηθεί η δέσμευση πόρων.

Η δέσμευση πόρων μπορεί να γίνει μέσω *ρητής δέσμευσης (explicit reservation)*, ανταλλάσσοντας πληροφορίες σήμανσης με τα στοιχεία δικτύου κάθε φορά που γίνεται αποδεκτό ένα νέο αίτημα προκειμένου να εκτελεσθεί η ρητή δέσμευση (π.χ. μέσω RSVP). Η ρητή δέσμευση είναι συνήθως λιγότερο κλιμακωτή καθώς το δίκτυο γίνεται μεγαλύτερο.

Η δέσμευση πόρων θα μπορούσε επίσης να γίνει μέσω της *εικονικής δέσμευσης* (*virtual reservation*), η οποία διατηρεί τη λειτουργία του δικτύου απλούστερη και είναι ευκολότερο να διαχειριστεί. Η εικονική δέσμευση συνίσταται στην οικοδόμηση μιας εικονικής άποψης των πόρων του δικτύου, και στον έλεγχο αυτής της εικονικής άποψης των διαθέσιμων πόρων για να αποφασιστεί αν τα νέα αιτήματα δέσμευσης πόρων μπορούν να γίνουν αποδεκτά. Κατά τη λήψη ενός αιτήματος, βρίσκεται το μονοπάτι της δρομολόγησης (σύμφωνα με τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο), και συνεπώς εντοπίζονται όλες οι συνδέσεις που εμπλέκονται στο εν λόγω μονοπάτι. Ένας εικονικός μετρητής του διαθέσιμου εύρους ζώνης διατηρείται ανά σύνδεση, και ο μηχανισμός CAC επαληθεύει εάν υπάρχει αρκετό εύρος ζώνης σε όλους τους εικονικούς μετρητές των συνδέσεων στο μονοπάτι. Εάν το αίτημα γίνει αποδεκτό, οι μετρητές ενημερώνονται κατάλληλα, μειώνοντας το εύρος ζώνης. Είναι επίσης απαραίτητο ο μηχανισμός CAC να γνωρίζει το χρόνο λήξης των συνόδων, προκειμένου να απελευθερώσει εικονικά τους πόρους (με την αύξηση των κατάλληλων μετρητών).

3.2.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Το *αυστηρό* (*tight*) μοντέλο Ποιότητας Υπηρεσίας (π.χ. IntServ, RSVP, IMS) περιλαμβάνει τις λύσεις εκείνες που αποσκοπούν στην παροχή «σκληρών» εγγυήσεων QoS, με τη βοήθεια ενός συνδυασμού αυστηρών μηχανισμών ελέγχου QoS, όπως η δέσμευση πόρων μέσω ολόκληρου του μονοπατιού (το οποίο απαιτεί επιπρόσθετα γνώση του μονοπατιού στην αρχή της επίκλησης υπηρεσιών), η επιβολή πολιτικών για ροές IP σε κόμβους συμφόρησης, και ο κεντρικός έλεγχος. Το πρόβλημα αυτής της προσέγγισης είναι η πιθανή έλλειψη δυνατότητας κλιμάκωσης, καθώς δεν θα είναι όλα τα τμήματα του δικτύου σε θέση να υποστηρίξουν αυτόν τον εξαιρετικό έλεγχο.

Το *χαλαρό* (*loose*) μοντέλο Ποιότητας Υπηρεσίας (π.χ. DiffServ) περιλαμβάνει τις λύσεις εκείνες που αποσκοπούν στην παροχή «μαλακών» ή και «σκληρών» εγγυήσεων QoS, με τη βοήθεια όμως πιο χαλαρών μηχανισμών ελέγχου QoS. Αυτοί οι χαλαρότεροι μηχανισμοί ακολουθούν τη φιλοσοφία, σύμφωνα με την οποία επιλέγεται ο κατάλληλος βαθμός πολυπλοκότητας σε κάθε τμήμα του δικτύου, έτσι ώστε η πολυπλοκότητα να μετατοπίζεται φυσικά στις άκρες του δικτύου, όπως προτείνει και η αρχιτεκτονική DiffServ. Με αυτόν τον τρόπο, η δέσμευση πόρων για παράδειγμα, δεν εφαρμόζεται σε ολόκληρο το μονοπάτι, αλλά μόνο στα τμήματα εκείνα όπου το εύρος ζώνης είναι μάλλον περιορισμένο. Οι μηχανισμοί QoS εφαρμόζονται στο πιο κατάλληλο επίπεδο συγκέντρωσης κίνησης σε κάθε τμήμα του δικτύου. Ο έλεγχος αυτών των μηχανισμών τείνει να είναι μερικώς κατανεμημένος, αντί για πλήρως κεντρικός [18, 19].

Έχοντας αναλύσει τους διάφορους τύπους μηχανισμών ελέγχου QoS, επιχειρείται στη συνέχεια διαχωρισμός ορισμένων από τους μηχανισμούς αυτούς σε αυστηρότερους και χαλαρότερους.

- *Κεντρικός-κατανεμημένος έλεγχος*. Ο αυστηρότερος έλεγχος QoS επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση μιας πλήρως κεντρικής προσέγγισης για τον Έλεγχο Πρόσβασης. Αντίθετα, σε μια χαλαρή προσέγγιση ελέγχου QoS, ο Έλεγχος Πρόσβασης είναι μερικώς ή πλήρως κατανεμημένος.
- *Λεπτομέρεια χειρισμού κίνησης (Granularity in traffic)*. Στο αυστηρότερο επίπεδο, κάθε IP-μικρο-ροή αντιμετωπίζεται χωριστά και η κίνηση αστυνόμευται σε επίπεδο μικρο-ροών. Στο μεσαίο επίπεδο, η λεπτομέρεια χειρισμού διαφέρει ανά βαθμίδα δικτύου (network tier). Στο πιο χαλαρό επίπεδο, δεν υπάρχει καμία διάκριση μεταξύ των ροών και πραγματοποιείται μόνο αστυνόμηση σε πιο χοντρικό επίπεδο.
- *Θέση αστυνόμησης*. Στο αυστηρότερο επίπεδο, κάθε στοιχείο δικτύου κατά μήκος της διατεματικής σύνδεσης εκτελεί αστυνόμηση δικτύου. Στις πιο χαλαρές προσεγγίσεις, μόνο επιλεγμένα στοιχεία δικτύου εκτελούν τις λειτουργίες αστυνόμησης [20].

3.2.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΚΛΑΣΕΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Οι κλάσεις Ποιότητας Υπηρεσίας (*QoS classes*) προκύπτουν κυρίως από τις απαιτήσεις των διαφορετικών κλάσεων κίνησης (*traffic classes*) που μεταφέρουν τα δίκτυα, λαμβάνοντας υπόψη τους διαθέσιμους μηχανισμούς και παραμέτρους για διαφοροποίηση των κλάσεων κίνησης σε ένα δίκτυο. Συνεπώς, ο καθορισμός διαφορετικών κλάσεων κίνησης βοηθάει στην εξασφάλιση διαφορετικής Ποιότητας Υπηρεσίας για κάθε κατηγορία κίνησης.

3.2.4.1 Κλάσεις Κίνησης (*Traffic Classes*)

Η Ποιότητα Υπηρεσίας βελτιώνει τη βασική υπηρεσία μεταφοράς που προσφέρεται από τα IP δίκτυα (γνωστή και ως υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας (*Best Effort*)) με το να επεξεργάζεται διαφορετικές κλάσεις κίνησης με διαφορετικούς τρόπους, σύμφωνα με τις απαιτήσεις τους. Η σύγχρονη δικτυακή κίνηση μπορεί να ταξινομηθεί με βάση τις διαφορετικές απαιτήσεις των σχετικών εφαρμογών, από την πλευρά της σχετικής προβλεψιμότητας του ρυθμού δεδομένων (για παράδειγμα, κίνηση με σταθερό ή μεταβλητό ρυθμό bit), της ευαισθησίας της κίνησης στην καθυστέρηση ή τη μεταβολή καθυστέρησης, και της ευαισθησίας της κίνησης στην απώλεια ή αλλοίωση πακέτων [21].

Στο πλαίσιο αυτό, η κατηγοριοποίηση που προτείνεται από τη 3GPP (TS 22.105 standard, annex B) [22] λαμβάνει υπόψη την καθυστέρηση και την ανοχή στα λάθη, ως βασικές παραμέτρους διαφοροποίησης, και είναι η ακόλουθη:

Error tolerant	Conversational voice and video	Voice messaging	Streaming audio and video	Fax
Error intolerant	Telnet, interactive games	E-commerce, WWW browsing,	FTP, still image, paging	E-mail arrival notification
	Conversational (delay <<1 sec)	Interactive (delay approx 1 sec)	Streaming (delay <10 sec)	Background (delay >10 sec)

Σχήμα 3-4: Κατηγοριοποίηση εφαρμογών από τη 3GPP

Με ανάλογο τρόπο, η ITU-T (Recommendation G.1010) [23] προτείνει την ακόλουθη κατηγοριοποίηση:

Error tolerant	Conversational voice and video	Voice/video messaging	Streaming audio and video	Fax
Error intolerant	Command/control (e.g. Telnet, interactive games)	Transactions (e.g. E-commerce, WWW browsing, Email access)	Messaging, Downloads (e.g. FTP, still image)	Background (e.g. Usenet)
	Interactive (delay <<1 s)	Responsive (delay ~2 s)	Timely (delay ~10 s)	Non-critical (delay >>10 s)

T1213060-02

Σχήμα 3-5: Κατηγοριοποίηση εφαρμογών από την ITU-T

Στην πλειοψηφία των προσπαθειών κατηγοριοποίησης της σχετικής βιβλιογραφίας, κυρίαρχοι διαφοριστές είναι η ελαστικότητα κίνησης (*traffic elasticity*), η διαδραστικότητα (*interactivity*) και η διαθεσιμότητα της εφαρμογής (*service availability*). Με βάση τις δυο πρώτες παραμέτρους (ελαστικότητα και διαδραστικότητα), επιχειρείται στη συνέχεια ο συσχετισμός των δυο διαφορετικών προσεγγίσεων κατηγοριοποίησης που αναφέρθηκαν προηγουμένως:

Κλάση κίνησης		3GPP	ITU
Ελαστική	Μη-διαδραστική	Background	Non-critical
	Διαδραστική	Interactive	Responsive
Ανελαστική	Μη-διαδραστική	Streaming	Timely
	Διαδραστική	Conversational	Interactive

Πίνακας 3-1: Συσχετισμός κατηγοριοποίησης εφαρμογών από 3GPP, ITU

Επισημαίνεται ωστόσο, ότι οι πραγματικές παράμετροι που ένα δίκτυο μπορεί να ελέγξει ή που μπορούν πραγματικά να εξεταστούν για διαφοροποίηση των εκάστοτε υπηρεσιών είναι η καθυστέρηση, η μεταβολή καθυστέρησης και ο χειρισμός των απωλειών [18].

Παρόλο που κάθε εφαρμογή μπορεί να περιγραφεί από το σύνολο απαιτήσεών της (ποσοτικές ή ποιοτικές), μια πιο κλιμακωτή προσέγγιση θα προέκυπτε αν συνδυάζονταν όλες οι εφαρμογές σε μερικές κλάσεις με παρόμοιες απαιτήσεις. Σε πολύ απλοϊκούς όρους, θα μπορούσαν να υπάρχουν μόνο δύο κλάσεις εφαρμογών: μια με ευαισθησία στο χρόνο και μια χωρίς ευαισθησία στο χρόνο (γνωστή επίσης και ως ελαστική). Αυτό το απλό σχέδιο θα μπορούσε να γίνει πιο σύνθετο εάν συνυπολογίζονταν και η ευαισθησία της κίνησης στην απώλεια δεδομένων, οδηγώντας σε περισσότερες κλάσεις κίνησης. Για κάθε κλάση κίνησης υπάρχει μια λίστα ποσοτικών κριτηρίων που αποτιμούν την Ποιότητα Υπηρεσίας για τη συγκεκριμένη κλάση. Για παράδειγμα, τα κριτήρια για την κλάση με ευαισθησία στο χρόνο (time-sensitive class) θα περιλάμβαναν την καθυστέρηση και την απώλεια πακέτων [21].

3.2.4.2 Κλάσεις Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS Classes)

Μια κλάση Ποιότητας Υπηρεσίας είναι μια προηγμένη υπηρεσία μεταφοράς που προκύπτει από τη συστηματική ανάπτυξη μηχανισμών QoS μέσα σε ένα δίκτυο (θεωρείται προηγμένη έναντι της συνηθισμένης “Best Effort” κλάσης). Τα πιο δημοφιλή παραδείγματα κλάσεων Ποιότητας Υπηρεσίας είναι: *Premium*, *Platinum*, *Gold*, *Silver* ή *Bronze*. Οι κλάσεις αυτές χαρακτηρίζονται από δείκτες απόδοσης που είναι γνωστά μετρικά Ποιότητας Υπηρεσίας, όπως η καθυστέρηση, η μεταβολή καθυστέρησης και η απώλεια πακέτων. Μια κλάση Ποιότητας Υπηρεσίας προορίζεται συνήθως να μεταφέρει συγκεκριμένες κλάσεις κίνησης. Οι κλάσεις κίνησης μπορούν να αντιστοιχούν άμεσα σε Ποιότητα Υπηρεσίας, δηλαδή κάθε κλάση κίνησης να εξυπηρετείται από μια συγκεκριμένη κλάση Ποιότητας Υπηρεσίας. Εναλλακτικά, αρκετές κλάσεις κίνησης μπορούν να αντιστοιχούν σε μια κλάση Ποιότητας Υπηρεσίας, έτσι ώστε ο αριθμός κλάσεων Ποιότητας Υπηρεσίας να είναι μικρότερος από τον αριθμό κλάσεων κίνησης. Για παράδειγμα, οι υπηρεσίες VoIP και

εικονοδιάσκεψης θα μπορούσαν να εξυπηρετηθούν από μια κλάση Ποιότητας Υπηρεσίας, την Premium [21].

Ο καθορισμός πολλαπλών κλάσεων Ποιότητας Υπηρεσίας καθιστά εφικτή τη λεπτομερή ρύθμιση, όσον αφορά την ανάθεση προτεραιοτήτων, την ανάθεση πόρων ή το συσχετισμό με μηχανισμούς αποκατάστασης. Αλλά αυτή η προσέγγιση έχει το μειονέκτημα ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κλάσεων, τόσο δυσκολότερη γίνεται η επίτευξη πραγματικής διαφοροποίησης στην Ποιότητα Υπηρεσίας. Επιπλέον, αυτές οι κλάσεις θα πρέπει να αντιστοιχούν σε διαφορετικά «επίπεδα υπηρεσίας» που να υποστηρίζονται από τον πάροχο δικτύου, οπότε θα πρέπει να είναι αρκετά απλές ώστε να μπορούν να υλοποιηθούν εύκολα, να διαχειριστούν και να προσφερθούν στην αγορά [18].

3.3 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΜΠΕΙΡΙΑΣ (QUALITY OF EXPERIENCE - QOE)

Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις για την αποτίμηση της ποιότητας μιας εφαρμογής-υπηρεσίας εστιάζουν αποκλειστικά σε δικτυακά ζητήματα. Παράμετροι όπως η καθυστέρηση, η μεταβολή καθυστέρησης, η απώλεια πακέτων και η διεκπεραιωτικότητα χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν την απόδοση του δικτύου και, στη συνέχεια, για να αποτιμήσουν την ποιότητα των υπηρεσιών. Η Ποιότητα Υπηρεσίας γίνεται αντιληπτή ως μέτρο απόδοσης των δικτύων στο επίπεδο πακέτων. Αντιπροσωπεύει το σύνολο των παραμέτρων, τεχνολογιών και μηχανισμών που θα πρέπει να υλοποιηθούν στο δίκτυο [24]. Βοηθά τους παρόχους να καθορίσουν τα επίπεδα ποιότητας που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικές υπηρεσίες, καθώς επίσης και να αντιληφθούν πώς πρέπει να ρυθμίσουν τις υπηρεσίες προκειμένου να τις διαφοροποιήσουν. Ταυτόχρονα, αυτό θα πρέπει να εξισορροπηθεί σε σχέση με την ανάγκη για ελαχιστοποίηση του κόστους και μεγιστοποίηση της χρησιμοποίησης των ζυξέων [25]. Ωστόσο, προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια πιο αξιόπιστη αποτίμηση της ποιότητας που βιώνεται από το χρήστη, απαιτείται μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση ποιοτικής αποτίμησης.

Η μέτρηση παραμέτρων QoS δεν αντιπροσωπεύει ένα πλήρες σύνολο μετρικών για τη διατεματική διαχείριση ποιότητας που εστιάζει στην εμπειρία χρηστών. Για το λόγο αυτό, έχει εισαχθεί η έννοια «Ποιότητα Εμπειρίας», η οποία αξιολογεί πόσο καλά μια υπηρεσία ικανοποιεί τις προσδοκίες των πελατών. Περιγράφει την απόδοση μιας συσκευής, ενός συστήματος, μιας υπηρεσίας ή μιας εφαρμογής (ή οποιουδήποτε συνδυασμού αυτών) από την πλευρά των χρηστών. Συνεπώς, η Ποιότητα Εμπειρίας είναι ένα μέτρο της διατεματικής απόδοσης στο επίπεδο υπηρεσιών από την πλευρά των χρηστών [24].

Η ενσωμάτωση της Ποιότητας Εμπειρίας στις μεθοδολογίες *engineering* εξασφαλίζει μια πελατο-κεντρική προοπτική και βοηθά να κινηθούμε πέρα από τις παραδοσιακές

παραμέτρους συμφωνίας επιπέδου υπηρεσίας (SLA) και τα μετρικά QoS που σχετίζονται αποκλειστικά με την απόδοση του δικτύου. Με την Ποιότητα Εμπειρίας, οι ανάγκες και οι προσδοκίες των πελατών γίνονται κυρίαρχες στη σχεδίαση προϊόντων και τις επιχειρησιακές διαδικασίες [25].

Συνοπτικά, η Ποιότητα Εμπειρίας:

- Αποτελεί βασική έννοια όταν προσπαθούμε να καταλάβουμε τι είναι σε θέση να παρέχει στους τελικούς χρήστες το Διαδίκτυο Επόμενης Γενιάς.
- Καλύπτει όλα τα σχετικά ζητήματα που καθορίζουν πόσο ικανοποιημένος είναι ένας χρήστης από μια υπηρεσία.
- Διαιρείται σε υπο-έννοιες (επειδή η ανάλυση πρέπει να είναι δομοστοιχειωτή σε κάθε περίπτωση).
- Έχει ως απώτερο στόχο να αξιολογεί πώς οι χρήστες συμπεριφέρονται με μια νέα υπηρεσία που παρέχεται π.χ. από το Διαδίκτυο Επόμενης Γενιάς [26].

3.3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΜΠΕΙΡΙΑΣ

Δεδομένου ότι η Ποιότητα Εμπειρίας αποτελεί ένα ερευνητικό θέμα υπό εξέλιξη, παρουσιάζονται στη συνέχεια οι πιο αντιπροσωπευτικοί ορισμοί που έχουν δοθεί στη βιβλιογραφία για την Ποιότητας Εμπειρίας:

□ [27]

Η Ποιότητα Εμπειρίας είναι κάτι περισσότερο από την αποτίμηση της Ποιότητας Υπηρεσίας που μια εφαρμογή παρέχει στους χρήστες. Ενώ η Ποιότητα Υπηρεσίας είναι μέρος της συνολικής αποτίμησης, π.χ. μέσω μέτρησης της μεταβολής καθυστέρησης ή της καθυστέρησης του δικτύου, υπάρχουν και άλλες παράμετροι προς θεώρηση, όπως η ευκολία χρήσης και η μέτρηση της κούρασης του χρήστη. Αυτές οι επιπλέον παράμετροι είναι υποκειμενικές και περιγράφουν την εμπειρία του χρήστη. Η Ποιότητα Υπηρεσίας σε συνδυασμό με την εμπειρία του χρήστη συνθέτουν τη συνολική Ποιότητα Εμπειρίας.

□ [24]

Η Ποιότητα Εμπειρίας στους τομείς Τηλεπικοινωνιών και Τεχνολογίας Πληροφοριών γίνεται κατά προσέγγιση κατανοητή ως η Ποιότητα Υπηρεσίας που γίνεται αντιληπτή από έναν χρήστη. Αποτελεί μια προσέγγιση για τη μέτρηση, τη μοντελοποίηση και την επικύρωση του επιπέδου ικανοποίησης των χρηστών για πολυμεσικές υπηρεσίες. Η έννοια της Ποιότητας Εμπειρίας είναι κάτι περισσότερο από μια απλή επέκταση της Ποιότητας Υπηρεσίας, δεδομένου ότι βασίζεται σε μεγάλο όγκο υποκειμενικών δοκιμών που πραγματοποιούνται με τη συνεργασία των χρηστών.

□ [25]

Η Ποιότητα Εμπειρίας είναι οι αντιλήψεις των χρηστών για το πόσο καλά ένα σύστημα ή μια εφαρμογή αποδίδει σε σχέση με τις προσδοκίες τους, καθώς επίσης και για το πώς μπορούν διαισθητικά να χρησιμοποιούν μια εφαρμογή ή μια υπηρεσία ώστε να ολοκληρώσουν ένα στόχο κατά τρόπο έγκαιρο και αποδοτικό, χωρίς να «ανησυχούν» για τα υποκείμενα στοιχεία του δικτύου. Παρόλο που η Ποιότητα Εμπειρίας και η Ποιότητα Υπηρεσίας είναι σχετικές έννοιες, είναι κατά βάση διαφορετικές. Για παράδειγμα, είναι δυνατό να υπάρχει άριστο QoS αλλά κακό QoE, όπως στην περίπτωση της άψογης μετάδοσης αλλοιωμένων πακέτων.

□ [28]

Η Ποιότητα Εμπειρίας προέρχεται από την αντίληψη των χρηστών για τη συνολική Ποιότητα Υπηρεσίας που παρέχεται από τα διαφορετικά επίπεδα του προτύπου OSI [29, 30, 31, 32]. Η Ποιότητα Υπηρεσίας που απαιτείται και γίνεται αντιληπτή από το χρήστη μπορεί να προσδιοριστεί από μια παράμετρο, ως χαμηλή (*low*), μέτρια (*fair*), καλή (*good*) και άριστη (*excellent*) [32]. Ωστόσο, οι απαιτήσεις χρηστών μπορούν να προσδιοριστούν με διάφορες παραμέτρους, όπως η ανάλυση, το ύψος, το πλάτος, το χρώμα, κ.λπ., οι οποίες συνδέονται άμεσα με το στρώμα εφαρμογής. Ο προσδιορισμός, η μετάφραση και η αντιστοίχιση αυτών των παραμέτρων ώστε να έχουν νόημα στα κατώτερα στρώματα αποτελεί ένα πολύ ενεργό ερευνητικό θέμα [29, 32, 33, 34, 35].

Τελικά, η Ποιότητα Εμπειρίας ορίζεται από τους συγγραφείς ως «η εμπειρία του χρήστη που διαμορφώνεται από αυτό που παρουσιάζεται από το στρώμα εφαρμογής, όπου το στρώμα εφαρμογής ενεργεί ως *front-end* διεπαφή χρήστη που παρουσιάζει το γενικό αποτέλεσμα της μεμονωμένης Ποιότητας Υπηρεσίας».

□ [36]

Η Ποιότητα Εμπειρίας ορίζεται ως προέκταση της παραδοσιακής Ποιότητας Υπηρεσίας, υπό την έννοια ότι παρέχει πληροφορίες σχετικές με τις παραδοθείσες υπηρεσίες από την πλευρά των τελικών χρηστών.

□ [26]

Η Ποιότητα Εμπειρίας είναι ένα υποκειμενικό μέτρο της συνολικής αξίας της παρεχόμενης υπηρεσίας από την οπτική του χρήστη. Η Ποιότητα Υπηρεσίας είναι απλώς ένα συστατικό, συχνά δευτερεύον, από την ανάλυση της Ποιότητας Εμπειρίας. Άλλα σημαντικά συστατικά είναι οι προσδοκίες των τελικών χρηστών, το περιεχόμενο της υπηρεσίας, η σημασία της υπηρεσίας για τον τελικό χρήστη, τα χαρακτηριστικά της χρησιμοποιούμενης συσκευής και η τιμή της υπηρεσίας. Η πρόκληση στην έρευνα της Ποιότητας Εμπειρίας είναι να

δημιουργήσει ένα πλαίσιο που να είναι σε θέση να συνδυάζει αυτά τα διαφορετικά συστατικά κάτω από μια κοινή ομπρέλα, με τρόπο που να είμαστε σε θέση να προβλέπουμε κάπως τη συμπεριφορά των τελικών χρηστών όταν τους προσφέρονται νέες υπηρεσίες.

3.3.2 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΕΜΠΕΙΡΙΑΣ

Η μέτρηση της Ποιότητας Εμπειρίας αποτελεί μια ερευνητική περιοχή με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Οι ερευνητές έχουν δοκιμάσει διάφορες μεθόδους με σκοπό να βρουν μια οριστική προσέγγιση, αλλά η ποικιλομορφία και η πολυπλοκότητα των διαθέσιμων περιβαλλόντων έχουν καθυστερήσει την πρόοδο στον τομέα αυτό [27]. Ενώ το QoS μετριέται αντικειμενικά, το QoE αποτελεί υποκειμενική μέτρηση που απαιτεί μετάφραση σε ποσοτικά δεδομένα. Το QoE μπορεί να ποσοτικοποιηθεί αντικειμενικά χρησιμοποιώντας τυποποιημένες στατιστικές διαδικασίες και διάφορες μεθόδους ανάλυσης, όπως εκτιμήσεις, μετρήσεις συχνότητας, χρόνους απόκρισης, αναλύσεις ομάδων (*cluster analyses*), κ.λπ. Μια άλλη προσέγγιση για την ποσοτικοποίηση του QoE είναι η συστηματική μοντελοποίηση που είναι σύμφωνη με αυτή που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας των συστημάτων με ανοχή στις βλάβες [25]. Πολυάριθμες συστάσεις που συνοδεύονται από προηγμένα στατιστικά εργαλεία, όπως το *Γενικευμένο Γραμμικό Μοντέλο (Generalized Linear Model - GLM)* ή τα *Μοντέλα Λανθάνουσας Δομής (Latent Structure Models)* αποσκοπούν στο να αποδώσουν μετρήσιμη μορφή στην Ποιότητα Εμπειρίας [24]. Συχνά επίσης, τα υποκειμενικά, ποιοτικά κριτήρια, όπως το QoE, περιγράφονται χρησιμοποιώντας τακτικές κλίμακες, που μπορεί να είναι απόλυτες ή συγκριτικές, και οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

3.3.2.1 Απόλυτες Τακτικές Κλίμακες

Ένα παράδειγμα απόλυτης κλίμακας ποιότητας είναι η *Βαθμολογία Μέσης Γνώμης (Mean Opinion Score - MOS)*, που αντιπροσωπεύει τον μέσο όρο των βαθμολογούμενων γνωμών, δηλαδή των τιμών από μια προκαθορισμένη κλίμακα που οι ενδιαφερόμενοι επιλέγουν να αποδώσουν στην επίδοση ενός συστήματος, και τυποποιήθηκε αρχικά από την ITU [37]. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, η ποιότητα ενός συστήματος αξιολογείται υποκειμενικά από τους χρήστες σε μια κλίμακα πέντε βαθμών, όπου το 5 υποδηλώνει την καλύτερη ποιότητα και το 1 τη χειρότερη (Πίνακας 3-2) [24].

MOS	Ποιότητα	Υποβάθμιση
5	Άριστη	Ανεπαίσθητη
4	Καλή	Αισθητή αλλά όχι ενοχλητική
3	Μέτρια	Ελαφρώς ενοχλητική
2	Ανεπαρκής	Ενοχλητική
1	Κακή	Πολύ ενοχλητική

Πίνακας 3-2: Βαθμολογία Μέσης Γνώμης (MOS)

Το *MOS* τεστ αποτελεί έναν τυποποιημένο τρόπο αξιολόγησης κωδικοαποκωδικοποιητή λόγου (*speech codec*) και κωδικοαποκωδικοποιητή ήχου (*audio codec*). Επειδή όμως η χρησιμοποίηση διαφόρων υποβαλλόμενων στο τεστ είναι χρονοβόρα, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι για την αντικειμενική αποτίμηση της ποιότητας ήχου συστημάτων. Μια προσέγγιση είναι να συγκριθεί ένα αλλοιωμένο σήμα με ένα σήμα αναφοράς και να αξιολογηθούν αυτά τα δύο χρησιμοποιώντας κάποιο διαισθητικό μοντέλο (*perceptual model*). Αυτή η προσέγγιση, γνωστή ως *Προσέγγιση Πλήρους Αναφοράς (Full Reference - FR)* χρησιμοποιείται στη μέθοδο *PESQ (Psychoacoustic Evaluation of Speech Quality)* [38] και τη μέθοδο *PEAQ (Perceptual Evaluation of Audio Quality)*, [39]. Σε αυτές τις μεθόδους, χρησιμοποιείται ένα διαισθητικό μοντέλο ακρόασης για να καθορίσει τη διαφορά, σε κλίμακες σχετικές με την ακρόαση (για τη συχνότητα και το πλάτος), μεταξύ ενός σήματος αναφοράς και ενός σήματος που έχει υποβιβαστεί από ένα σύστημα. Διάφορες παράμετροι ρυθμίζονται για να καταστήσουν τις ποιοτικές προβλέψεις όσο το δυνατόν πιο ταιριαστές με ένα μεγάλο σύνολο δεδομένων από διαισθητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τεστ με ανθρώπους. Για το μοντέλο *PESQ* είναι δυνατό να επιτευχθεί υψηλός συσχετισμός μεταξύ της αντικειμενικής τιμής *MOS* και των τιμών *MOS* από τις υποκειμενικές αξιολογήσεις και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αυτόματη αξιολόγηση των κωδικοαποκωδικοποιητών λόγου. Ωστόσο, μια τέτοια προσέγγιση είναι συνήθως λιγότερο ακριβής στην αξιολόγηση περιπτώσεων που είναι πολύ διαφορετικές από το σύνολο δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τη ρύθμιση του μοντέλου [40].

Άλλο παράδειγμα απόλυτης κλίμακας ποιότητας είναι ο *παράγοντας R (R-factor ή R-Value)* ως μέθοδος μέτρησης. Αυτή η αριθμητική περιγραφή μεταφράζει την Ποιότητα Εμπειρίας σε έναν αριθμό στην κλίμακα 0-100, που αντιπροσωπεύει το ποσοστό των χρηστών που είναι ικανοποιημένοι με τη συγκεκριμένη ποιότητα. Ο *R-factor* μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που χρησιμοποιείται για την υποκειμενική αποτίμηση της λεκτικής ποιότητας στα συστήματα μετάδοσης φωνής [41]. Σημειώνεται επίσης ότι το *MOS* μπορεί να προέλθει από τον *R-factor* (και αντίστροφα) εάν είναι γνωστή η λειτουργία αντιστοίχισης μεταξύ του *MOS* και του *R-factor* (ένας βαθμός *MOS* είναι ισοδύναμος με περίπου 20 βαθμούς *R-factor*, ωστόσο, η σχέση δεν είναι απαραίτητο να είναι απολύτως γραμμική) [42, 24].

Για την επικοινωνία πάνω από δίκτυα πακέτων, η επίδραση των καθυστερήσεων και των απωλειών πακέτων είναι σημαντική. Το αποκαλούμενο *E-model*, από το οποίο προκύπτει ο *R-factor*, έχει συμπεριλάβει την καθυστέρηση σε μία προσπάθεια να μοντελοποιήσει την ποιότητα λόγου [41], ενώ η *PESQ* όχι. Οι μελέτες για την ποιότητα λόγου έχουν δείξει αρκετά ασταθή αποτελέσματα, επειδή το ύφος του λόγου και οι ρυθμίσεις για το πείραμα

έχουν μεγάλη επίδραση στην υποβάθμιση του σήματος που οφείλεται στις καθυστερήσεις [40].

3.3.2.2 Συγκριτικές Τακτικές Κλίμακες

Οι συγκριτικές κλίμακες σχεδιάζονται συνήθως για ψυχοφυσικά πειράματα. Ένα παράδειγμα δίνεται στον Πίνακα 3-3 που ακολουθεί [24].

Κατηγορία	Βαθμός	Περιγραφή
1	-3	Πολύ καλύτερο
2	-2	Καλύτερο
3	-1	Ελαφρώς καλύτερο
4	0	Περίπου το ίδιο
5	1	Ελαφρώς χειρότερο
6	2	Χειρότερο
7	3	Πολύ χειρότερο

Πίνακας 3-3: Συγκριτική κλίμακα Ποιότητας Εμπειρίας

Τελικά, οι πάροχοι ενδιαφέρονται να καταστήσουν τη διαδικασία αποτίμησης του QoE γρήγορη και αυτόματη. Αυτός ο στόχος συνήθως εκπληρώνεται με την αντιστοίχιση της τεχνικής Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) στην Ποιότητα Εμπειρίας (QoE). Στην περίπτωση αυτή, *θα πρέπει να καθοριστεί η σχέση μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών, γνωστή ως συνάρτηση χρησιμότητας (utility function), για κάθε υπηρεσία*. Μόλις καθοριστούν οι συναρτήσεις-τύποι, θα πρέπει να συλλεχθούν οι πληροφορίες και μια εφαρμογή να επεξεργαστεί τις πληροφορίες, να εφαρμόσει τις συναρτήσεις και να λάβει τα αποτελέσματα. Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις λοιπόν, βασίζονται σε μια συγκεκριμένη υλοποίηση που προορίζεται για μια συγκεκριμένη υπηρεσία κάθε φορά [43].

3.4 ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

Ο Έλεγχος Πρόσβασης, ο οποίος ασχολείται με το ζήτημα της αποδοχής ή απόρριψης μιας νέας ροής, θεωρείται θεμελιώδης για τον έλεγχο συμφόρησης και την παροχή QoS. Για το λόγο αυτό, έχει μελετηθεί εκτενώς τόσο για ενσύρματα [44], όσο και για ασύρματα δίκτυα [45]. Τυπικά, η απόφαση να γίνει αποδεκτή ή να απορριφθεί μια νέα ροή βασίζεται στις εξής δυο ερωτήσεις [44]:

1. Θα έχει επιπτώσεις η νέα ροή στην Ποιότητα Υπηρεσίας των υπαρχουσών ροών;
2. Μπορεί να παρασχεθεί η Ποιότητα Υπηρεσίας που απαιτεί η νέα ροή;

Για να θεωρείται επιτυχημένος στην πράξη ένας μηχανισμός Ελέγχου Πρόσβασης, θα πρέπει να ικανοποιεί τις εξής απαιτήσεις:

- *Ευρωστία (Robustness)*: Ένας μηχανισμός Ελέγχου Πρόσβασης θα πρέπει να εξασφαλίσει ότι το ζητούμενο QoS παρέχεται και είναι εύρωστο, όσον αφορά την ετερογένεια κίνησης, τις χρονικές διακυμάνσεις (μακροπρόθεσμη εξάρτηση), καθώς επίσης και τα υψηλά φορτία κίνησης.
- *Χρησιμοποίηση πόρων (Resource utilization)*: Ο δεύτερος στόχος για τον Έλεγχο Πρόσβασης είναι να μεγιστοποιήσει τη χρησιμοποίηση πόρων, δεδομένων των περιορισμών QoS για τις αποδεκτές ροές.
- *Υλοποίηση (Implementation)*: Το κόστος ανάπτυξης ενός σχεδίου Ελέγχου Πρόσβασης θα πρέπει να είναι μικρότερο από τα οφέλη του. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά κίνησης που απαιτούνται από το σχέδιο θα πρέπει να εξασφαλίζονται εύκολα από τις πηγές κίνησης και το δίκτυο και, επίσης, το σχέδιο θα πρέπει να έχει καλές δυνατότητες κλιμάκωσης με τον αριθμό ροών.

Συνεπώς, η πρόκληση είναι να σχεδιάζονται απλές λειτουργίες Ελέγχου Πρόσβασης που θα παρέχουν το ζητούμενο QoS και θα βελτιώνουν την απόδοση του δικτύου κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες κίνησης [3].

Τα παρακάτω κριτήρια χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατηγοριοποίηση των μηχανισμών Ελέγχου Πρόσβασης. Συνδυασμοί των επιλογών που παρέχονται από το κάθε κριτήριο επιτρέπουν τη σύνθεση των περισσότερων μηχανισμών Ελέγχου Πρόσβασης που συναντώνται στη βιβλιογραφία.

3.4.1 ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΓΙΑ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗ-ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ

Ένα πρώτο κριτήριο διάκρισης των διαφορετικών μηχανισμών Ελέγχου Πρόσβασης δίνεται από τη φύση των εφαρμογών για τις οποίες προορίζονται οι μηχανισμοί. Οι εφαρμογές μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες βάσει του πρωτοκόλλου στρώματος μεταφοράς που χρησιμοποιούν: τις *μη-ελαστικές (UDP πρωτόκολλο)* και τις *ελαστικές (TCP πρωτόκολλο)* εφαρμογές. Η μεγάλη πλειοψηφία των μηχανισμών Ελέγχου Πρόσβασης προορίζεται για μη-ελαστικές ροές κίνησης, ωστόσο υπάρχουν και μηχανισμοί για ελαστικές ροές. Αυτές οι δύο κατηγορίες εφαρμογών έχουν διαφορετικές απαιτήσεις QoS (απώλειες, καθυστέρηση, μεταβολή καθυστέρησης για τις μη-ελαστικές εφαρμογές και διεκπεραιωτικότητα για τις ελαστικές εφαρμογές) και, επιπλέον, παρουσιάζουν διαφορετικά μοντέλα κίνησης και υιοθετούν διαφορετικές μεθόδους επίκλησης - η επίκληση των ελαστικών ροών κίνησης είναι κυρίως έμμεση (*κίνηση HTTP*), ενώ για τις μη-ελαστικές ροές κίνησης, η διαδικασία επίκλησης είναι άμεση. Συνεπώς, οι μηχανισμοί Ελέγχου Πρόσβασης που προορίζονται γι' αυτούς τους δύο διαφορετικούς τύπους εφαρμογών λαμβάνουν υπόψη αυτές τις βασικές διαφορές [3].

3.4.2 ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΕΝΟΥΣ ΚΑΙ ΜΗ-ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΕΝΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Οι περισσότεροι μηχανισμοί Ελέγχου Πρόσβασης υποθέτουν την ύπαρξη σαφούς διαχωρισμού μεταξύ των μη-ελαστικών και των ελαστικών ροών κίνησης. Αυτός ο διαχωρισμός καθιστά την παροχή QoS ευκολότερη, λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορετική φύση των απαιτήσεων QoS που έχουν οι μη-ελαστικές και οι ελαστικές ροές κίνησης. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες προσεγγίσεις που προορίζονται για δίκτυα, τα οποία δεν προσφέρουν κανένα διαχωρισμό μεταξύ αυτών των δύο τύπων κίνησης [46]. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι μηχανισμοί Ελέγχου Πρόσβασης, εκτός από την παροχή του απαιτούμενου QoS για τον τύπο κίνησης που προορίζονται, πρέπει επίσης να παρέχουν δικαιοσύνη όσον αφορά το διαμοιρασμό του εύρους ζώνης μεταξύ αυτών των δύο τύπων κίνησης [3].

3.4.3 ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ Η ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

Ένα άλλο κριτήριο διάκρισης των διαφορετικών μηχανισμών Ελέγχου Πρόσβασης δίνεται από τη θέση όπου λαμβάνεται η απόφαση Ελέγχου Πρόσβασης: σε έναν κεντρικό εξυπηρετητή (π.χ. μεσίτη εύρους ζώνης) ή σε διάφορα σημεία του δικτύου με κατανεμημένο τρόπο.

Η ιδέα του *κεντρικού μηχανισμού* είναι απλή. Με ένα πρωτόκολλο σηματοδοσίας, ανταλλάσσονται μηνύματα μεταξύ του αποστολέα της ροής και της κεντρικής οντότητας και, επίσης, μεταξύ των δρομολογητών του δικτύου και της κεντρικής οντότητας. Αυτά τα μηνύματα περιλαμβάνουν τις απαιτήσεις υπηρεσίας της ροής και την κατάσταση των διαθέσιμων πόρων σε κάθε δρομολογητή, και επομένως ο Έλεγχος Πρόσβασης εκτελείται από μια κεντρική οντότητα που έχει πλήρη και ενημερωμένη γνώση της τοπολογίας και των πόρων δικτύου, το οποίο θεωρείται ιδανική κατάσταση. Το βασικό πλεονέκτημα ενός κεντρικού μηχανισμού είναι ότι είναι απλό στη διαχείριση. Ωστόσο, στην πράξη, οι κεντρικοί μηχανισμοί έχουν ορισμένα μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Το πρώτο είναι ότι η κεντρική οντότητα αποτελεί μεμονωμένο σημείο αποτυχίας. Ένα άλλο ζήτημα είναι τα προβλήματα κλιμάκωσης που ένας κεντρικός μηχανισμός παρουσιάζει, και επίσης, οι ενδεχόμενες καθυστερήσεις που παρουσιάζονται με τη διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων σηματοδοσίας.

Οι *κατανεμημένοι μηχανισμοί* αποφεύγουν το μεμονωμένο σημείο αποτυχίας και τα προβλήματα κλιμάκωσης που ενυπάρχουν στην κεντρική προσέγγιση, αλλά η ύπαρξη πολλαπλών σημείων απόφασης Ελέγχου Πρόσβασης σημαίνει ότι ταυτόχρονες αποφάσεις ενδέχεται να ληφθούν από διαφορετικά σημεία απόφασης, για ροές που ανταγωνίζονται για τους ίδιους πόρους, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση που μπορεί να έχουν οι

ταυτόχρονες αποδοχές ροών στην κατάσταση των πόρων σε άλλα σημεία απόφασης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε παραβιάσεις του QoS. Οι επιπτώσεις των ταυτόχρονων αποφάσεων Ελέγχου Πρόσβασης εξαρτώνται από τον αριθμό των σημείων απόφασης που ανταγωνίζονται για τους ίδιους πόρους και επίσης από τη δυναμική άφιξης και τερματισμού των ροών [3].

3.4.4 ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟΣ ΣΕ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΑ ΚΙΝΗΣΗΣ Η ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ Η ΑΝΙΧΝΕΥΣΕΙΣ

Ένα άλλο κριτήριο διαχωρισμού των διαφορετικών μηχανισμών Ελέγχου Πρόσβασης βασίζεται στη μέθοδο που χρησιμοποιείται προκειμένου να αποφασιστεί εάν υπάρχουν αρκετοί πόροι ώστε να γίνει αποδεκτή ή όχι μια νέα ροή.

Ο *βασιζόμενος σε περιγραφέα κίνησης Έλεγχος Πρόσβασης (Traffic descriptor-based admission control - TDAC)* υποθέτει ότι περιγραφείς κίνησης, ντετερμινιστικοί ή στοχαστικοί, παρέχονται από την εφαρμογή ή τους τελικούς χρήστες για κάθε αιτούμενη ροή πριν από την εγκατάστασή της, και ο μηχανισμός χρησιμοποιεί τους δεδομένους περιγραφείς κίνησης για να εξάγει τις απαιτήσεις εύρους ζώνης που αντιστοιχούν στο απαιτούμενο QoS. Αυτή η προσέγγιση επιτυγχάνει καλή χρήση δικτύου όταν οι περιγραφείς κίνησης που χρησιμοποιούνται από το μηχανισμό Ελέγχου Πρόσβασης είναι ισχυροί. Ωστόσο, στην πράξη, παρουσιάζει διάφορα προβλήματα. Ένα από αυτά σχετίζεται με την αδυναμία των χρηστών να δημιουργήσουν καλούς περιγραφείς κίνησης πριν την εγκατάσταση των ροών. Στην περίπτωση που οι χρήστες υπερεκτιμήσουν τις απαιτήσεις τους, σπαταλώνονται πόροι στο δίκτυο σε όλη τη διάρκεια των ροών, οδηγώντας σε κακή χρήση του δικτύου. Από την άλλη, εάν οι χρήστες υποτιμήσουν τις απαιτήσεις τους, ανεπαρκείς πόροι θα διατεθούν στις ροές τους σε όλη τη διάρκειά τους, οδηγώντας σε υποβάθμιση του QoS. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι ένας περιγραφέας κίνησης και η σχετική εγγύηση QoS καθορίζουν μια σύμβαση μεταξύ της εφαρμογής και του δικτύου. Επομένως, προκύπτει η ανάγκη αστυνόμευσης βάσει αυτού του περιγραφέα κίνησης, που ειδικά για τους στατιστικούς περιγραφείς κίνησης θεωρείται δύσκολο. Τα ντετερμινιστικά μοντέλα, όπως τα token buckets, είναι εύκολο να αστυνομευτούν, αλλά αποτυγχάνουν να παρέχουν έναν ικανοποιητικό χαρακτηρισμό για να αποκομίσουν ένα μεγάλο μέρος του πιθανού στατιστικού κέρδους πολυπλεξίας.

Ο *βασιζόμενος σε μετρήσεις Έλεγχος Πρόσβασης (Measurement-based admission control - MBAC)* προσπαθεί να αποφύγει τα προβλήματα της προσέγγισης TDAC, μετατοπίζοντας την διεργασία χαρακτηρισμού της κίνησης από την εφαρμογή στο δίκτυο. Αντί για εφαρμογές που προσδιορίζουν σαφώς τους περιγραφείς κίνησής τους, το δίκτυο προσπαθεί «να μάθει» τα χαρακτηριστικά των υπαρχουσών ροών μέσω μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η προσέγγιση έχει ένα πλήθος από πλεονεκτήματα. Κατ' αρχάς, οι προσδιορισμένοι περιγραφείς κίνησης μπορούν να είναι πολύ απλοί, π.χ. ρυθμός αιχμής, το

οποίο μπορεί να ελεγχθεί εύκολα. Δεύτερον, ένας πολύ συντηρητικός προσδιορισμός δεν καταλήγει σε εκτενή ανάθεση πόρων για όλη τη διάρκεια της συνόδου υπηρεσίας. Τρίτον, όταν πολυπλέκεται κίνηση από διαφορετικές ροές, το σχετικό QoS εξαρτάται συχνά από τη συνολική συμπεριφορά των ροών, τα στατιστικά των οποίων είναι ευκολότερο να υπολογιστούν από εκείνα μιας μεμονωμένης ροής (αυτό είναι συνέπεια του κανόνα των μεγάλων αριθμών). Ωστόσο, με το να βασιζόμαστε σε μετρούμενες ποσότητες, προκύπτουν ορισμένα θέματα. Όπως με οποιαδήποτε διαδικασία μέτρησης/εκτίμησης, υπάρχει η πιθανότητα να γίνουν λάθη, τα οποία μπορούν να μεταφραστούν σε λανθασμένες αποφάσεις αποδοχής/απόρριψης ροών, που οδηγούν είτε σε υποβάθμιση QoS, εάν στις ροές χορηγείται πρόσβαση λανθασμένα, είτε σε κακή χρήση δικτύου, εάν οι ροές απορρίπτονται λανθασμένα. Η επίδραση των λανθασμένων αποφάσεων αποδοχής/απόρριψης ροών στην απόδοση εξαρτάται από το πόσο χρόνο παίρνει έως ότου διορθωθεί ένα λάθος. Επιπλέον, προκύπτει το θέμα προσδιορισμού ενός κατάλληλου ποσού μνήμης που χρησιμοποιείται για πληροφορίες παρελθόντος που αφορούν σε ροές παρούσες στο δίκτυο αυτήν την περίοδο, κάτι που δεν είναι εύκολο να διευθετηθεί. Οι μηχανισμοί MBAC μπορούν να διαιρεθούν περαιτέρω στους μηχανισμούς που *υπόκεινται σε μοντέλο (fitted-model)* και σε αυτούς που είναι *ανεξάρτητοι μοντέλου (model-free)*. Οι μηχανισμοί που υπόκεινται σε μοντέλο θεωρούν ένα μοντέλο κίνησης και προσπαθούν να βρουν τις παραμέτρους που ταιριάζουν καλύτερα από την παρατηρηθείσα πραγματική κίνηση. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να είναι μια καλή επιλογή εάν το μοντέλο κίνησης είναι έγκυρο, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες αποφάσεις Ελέγχου Πρόσβασης, εάν το μοντέλο κίνησης δεν είναι σωστό. Οι μηχανισμοί που είναι ανεξάρτητοι μοντέλου δεν θεωρούν κανένα μοντέλο κίνησης, αλλά χρησιμοποιούν γενικά στατιστικά κίνησης (π.χ. μετρήσεις της χρήσης δικτύου ή της απώλειας πακέτων). Αυτή η προσέγγιση είναι ελκυστική επειδή αποφεύγει το πρόβλημα της μοντελοποίησης κίνησης, ωστόσο είναι αμφίβολο εάν τα γενικά χαρακτηριστικά κίνησης μπορούν να αντιπροσωπεύσουν τα χαρακτηριστικά κίνησης τόσο καλά όσο ένα μοντέλο κίνησης.

Ο βασιζόμενος σε ανιχνεύσεις Έλεγχος Πρόσβασης (Probe-based admission control - PBAC) χρησιμοποιεί ελέγχους μέσω ενός προτύπου πακέτων για να εξαγει το QoS σε ένα μονοπάτι. Οι μηχανισμοί PBAC μπορούν να διαχωριστούν περαιτέρω στους μηχανισμούς που απαιτούν τη συμμετοχή των δρομολογητών κατά μήκος του μονοπατιού μεταξύ δύο άκρων επικοινωνίας και στους μηχανισμούς Ελέγχου Πρόσβασης άκρων (*Endpoint Admission Control - EAC*), όπου μόνο τα άκρα επικοινωνίας συμμετέχουν στη διαδικασία Ελέγχου Πρόσβασης. Στους μηχανισμούς PBAC που συμμετέχουν οι δρομολογητές, κάθε δρομολογητής κατά μήκος του μονοπατιού πρέπει να λάβει μια απόφαση σχετικά με το εάν οι ανιχνεύσεις μπορούν να συνεχίσουν να προωθούνται στον προορισμό. Σε αυτούς τους μηχανισμούς, πακέτα ελέγχου (*probe packets*) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν πακέτα

σηματοδοσίας για να μεταφέρουν τις «τοπικές» αποφάσεις Ελέγχου Πρόσβασης που λαμβάνονται από τους δρομολογητές κατά μήκος των μονοπατιών ως το άκρο επικοινωνίας, το οποίο στην συνέχεια συμπεραίνει έμμεσα τη «συνολική» απόφαση Ελέγχου Πρόσβασης. Στους μηχανισμούς EAC, πριν την αποδοχή μιας νέας ροής, οι ακραίοι κόμβοι στέλνουν ένα ρεύμα πακέτων ελέγχου με παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά της αιτούμενης ροής και βάσει του QoS που λαμβάνει το ρεύμα πακέτων ελέγχου, η νέα ροή γίνεται αποδεκτή ή απορρίπτεται. Τα πακέτα ελέγχου στέλνονται συνήθως είτε με την ίδια προτεραιότητα με τα πακέτα της κύριας ροής (*in-band probing*), είτε με χαμηλότερη προτεραιότητα (*out-of-band probing*). Για την περίπτωση του *in-band probing*, το επιδιωκόμενο QoS για την κύρια ροή μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως κατώτατο όριο για την αποδοχή της ροής. Για την περίπτωση του *out-of-band probing*, το QoS του ρεύματος πακέτων ελέγχου δεν συσχετίζεται άμεσα με το QoS της κύριας ροής και είναι, επομένως, απαραίτητο να προσδιοριστεί η μέθοδος εύρεσης του βέλτιστου κατώτατου ορίου για την αποδοχή ροής. Στους μηχανισμούς EAC, οι δρομολογητές κατά μήκος των μονοπατιών μπορεί να είναι απλοί, δεδομένου ότι απλώς προωθούν τα πακέτα ελέγχου, όπως τα κανονικά πακέτα δεδομένων. Ωστόσο, οι καθυστερήσεις αποκατάστασης μπορεί να είναι μεγάλες, δεδομένου ότι για λογικές καθυστερήσεις αποκατάστασης, τα μετρικά δεν απεικονίζουν σταθερές καταστάσεις του δικτύου, αλλά μάλλον στιγμιότυπα της κατάστασής του, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε μια αρκετά μη ρεαλιστική εικόνα του επιπέδου συμφόρησης δικτύου, και υπάρχει ο κίνδυνος *απαξίωσης* (*trashing*). Αυτό σημαίνει ότι ακόμα κι αν ο αριθμός αποδεκτών ροών είναι μικρός, ο συνολικός αριθμός των πακέτων ελέγχου αποτρέπει περαιτέρω αποδοχές ροών, οδηγώντας σε κακή χρήση δικτύου. Στην περίπτωση του *in-band probing*, η απαξίωση υποβιβάζει περαιτέρω το QoS που βιώνεται από τις ήδη εγκατεστημένες ροές λόγω της πίεσης που επιφέρουν τα πακέτα ελέγχου. Στην περίπτωση του *out-of-band probing*, δεδομένου ότι τα πακέτα ελέγχου στέλνονται με χαμηλότερη προτεραιότητα από τα πακέτα κύριας ροής, η απαξίωση δεν υποβιβάζει το QoS που βιώνεται από τις ήδη εγκατεστημένες ροές. Αντίθετα, μπορεί να έχει το αντίθετο αποτέλεσμα, δεδομένου ότι η κλάση υψηλότερης προτεραιότητας από τις κύριες ροές εκκενώνεται [3].

3.4.5 ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΓΙΑ ΕΝΔΟΤΟΜΕΑΚΗ (INTRA-DOMAIN) ΚΑΙ ΔΙΑΤΟΜΕΑΚΗ (INTER-DOMAIN) ΚΙΝΗΣΗ

Οι μηχανισμοί Ελέγχου Πρόσβασης μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ανάλογα με τη τοπολογική εμβέλεια των ροών κίνησης. Πολλοί μηχανισμοί Ελέγχου Πρόσβασης, ρητά ή σιωπηρά, υποθέτουν ότι η κίνηση είναι ενδοτομεακή, δηλαδή δημιουργείται και τελειώνει μέσα στην ίδια περιοχή. Επομένως, οι οντότητες διαχείρισης αυτής της περιοχής (π.χ. ο μεσίτης εύρους ζώνης - *Bandwidth Broker* - στην περίπτωση του κεντρικού Ελέγχου

Πρόσβασης) μπορούν να έχουν πλήρη γνώση και έλεγχο των διατεματικών μονοπατιών και της υποκείμενης αρχιτεκτονικής κατά τη διαμόρφωση των διαδικασιών Ελέγχου Πρόσβασης. Οι μηχανισμοί που θεωρούν ότι η κίνηση μπορεί να είναι διατομεακή, δηλαδή ενδεχομένως να πρέπει να περάσει από ενδιάμεσες περιοχές προκειμένου να φτάσει στον προορισμό της, συνήθως θεωρεί τη διατεματική διαδικασία Ελέγχου Πρόσβασης ως αλυσίδα διαδικασιών Ελέγχου Πρόσβασης «ανά-περιοχή», π.χ. ως συνεργασία μεσιτών εύρους ζώνης κατά μήκος των διατεματικών μονοπατιών, όπου ο κάθε μεσίτης εύρους ζώνης εκτελεί τον Έλεγχο Πρόσβασης στην περιοχή που διαχειρίζεται [3].

3.4.6 ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΗΜΕΝΟΣ Η ΜΗ-ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΗΜΕΝΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

Ο *σηματοδοτημένος Έλεγχος Πρόσβασης (signalled Admission Control)* αναφέρεται στην περίπτωση που χρησιμοποιείται σηματοδότηση για να ζητηθούν δικτυακοί πόροι πριν την αποδοχή μιας ροής. Η ροή γίνεται αποδεκτή ή απορρίπτεται βάσει της διαθεσιμότητας πόρων για μια συγκεκριμένη κατηγορία QoS.

Ο *μη-σηματοδοτημένος Έλεγχος Πρόσβασης (non-signalled Admission Control)* σημαίνει ότι η αίτηση δεν γίνεται από την ακραία συσκευή (*end-device*) αλλά από κάποιο άλλο στοιχείο δικτύου, μετά από ανίχνευση κίνησης που ταξινομείται ως νέα ροή μιας δεδομένης υπηρεσίας [47].

3.4.7 ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

Σε μεγάλα δίκτυα πρόσβασης ενδέχεται να προκύψει πρόβλημα κλιμάκωσης με την υλοποίηση σηματοδοτημένου Ελέγχου Πρόσβασης για κάθε ροή. Για το λόγο αυτό, απαιτείται μια λύση που να είναι σε θέση να παρέχει Ποιότητα Υπηρεσίας, χωρίς επίγνωση των χρησιμοποιημένων πόρων για κάθε μεμονωμένη ροή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρησιμοποίηση σηματοδοτημένου Ελέγχου Πρόσβασης για ένα υποσύνολο υπηρεσιών, και σε εκείνα τα μέρη δικτύου όπου ο διαχειριστής δικτύου έχει επισημάνει ενδεχόμενο πρόβλημα διαστασιολόγησης. Τεχνικές *traffic engineering*, όπως η χρήση εικονικών διαύλων (*virtual pipes*), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαχωρίσουν τους δικτυακούς πόρους σε:

- Ένα σύνολο πόρων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν από υπηρεσίες χωρίς διαδικασία Ελέγχου Πρόσβασης. Για κίνηση *best-effort*, που δεν έχει καμία εγγύηση QoS, δεν απαιτείται Έλεγχος Πρόσβασης όσον αφορά τη χρήση δικτυακών πόρων.
- Ένα σύνολο πόρων, για το οποίο απαιτείται Έλεγχος Πρόσβασης ανά ροή.

Σημειώνεται ότι, ένας δεδομένος δίαυλος μπορεί είτε να προορίζεται αποκλειστικά για κίνηση υποκείμενη σε Έλεγχο Πρόσβασης είτε, για βέλτιστη χρήση δικτύου, μπορεί να μοιράζεται μεταξύ κίνησης που υπόκειται σε Έλεγχο Πρόσβασης και κίνησης που δεν

υπόκειται σε Έλεγχο Πρόσβασης. Στη δεύτερη περίπτωση, απαιτούνται επιπλέον μηχανισμοί καθορισμού προτεραιοτήτων. Ανάλογα με την αρχιτεκτονική και τη διαστασιολόγηση του δικτύου, μηχανισμοί Ελέγχου Πρόσβασης μπορεί να απαιτούνται μόνο για ορισμένες ροές μέσα σε ένα διατεματικό μονοπάτι [48].

3.4.8 ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΟ ΣΚΟΠΟ

Οι μηχανισμοί Ελέγχου Πρόσβασης μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τους αντικειμενικούς σκοπούς για τους οποίους προορίζονται. Μεταξύ αυτών είναι παράμετροι Ποιότητας Υπηρεσίας, όπως πιθανότητα συμφόρησης σε επίπεδο ροής και επίπεδο πακέτου, καθυστέρηση των πακέτων, μεταβολή καθυστέρησης, εγγύηση εύρους ζώνης, διεκπεραιωτικότητα, κατανομή ισχύος, δικαιοσύνη, πιθανότητα αποτυχίας μεταπομπής (*handover failure probability*), πιθανότητα φραγής κλήσης, πιθανότητα απόρριψης πακέτου, κ.λπ. [49].

3.4.9 ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΑΠΟΦΑΣΗΣ

Με βάση το χρόνο απόφασης, οι μηχανισμοί Ελέγχου Πρόσβασης μπορούν να ταξινομηθούν σε *προδραστικούς* (*proactive*), οι οποίοι βασίζονται σε παραμέτρους, και *αναδραστικούς* (*reactive*), οι οποίοι βασίζονται σε μετρήσεις. Στην πρώτη περίπτωση, μια ροή γίνεται αποδεκτή ή απορρίπτεται βάσει προγνωστικής αναλυτικής αξιολόγησης των περιορισμών QoS. Στη δεύτερη περίπτωση, ο μηχανισμός αποφασίζει να επιτρέψει ή να απορρίψει μια ροή δυναμικά, βάσει μετρήσεων QoS σε πραγματικό χρόνο. Και οι δυο προσεγγίσεις έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Συνδυασμός και των δυο χρησιμοποιείται συχνά για πιο αποτελεσματικό έλεγχο συμφόρησης [49].

3.5 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η έννοια της Ποιότητας Υπηρεσίας και η σημασία της στα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς, αναλύοντας τις βασικές παραμέτρους και τους μηχανισμούς ελέγχου της. Επίσης, παρουσιάστηκαν τα βασικά μοντέλα που ακολουθούνται, καθώς επίσης και ο τρόπος καθορισμού κλάσεων Ποιότητας Υπηρεσίας από τις κλάσεις κίνησης. Στη συνέχεια, αναλύθηκε η έννοια της Ποιότητας Εμπειρίας, διαφωτίζοντας με τον τόπο αυτό την υποκειμενική συνιστώσα της Ποιότητας Υπηρεσίας. Τέλος, έχοντας αναλύσει το σύνολο των διαφόρων μηχανισμών ελέγχου Ποιότητας Υπηρεσίας, το ενδιαφέρον εστιάστηκε στον μηχανισμό Ελέγχου Πρόσβασης, ο οποίος θεωρείται κρίσιμης σημασίας για τον έλεγχο συμφόρησης σε ένα δίκτυο. Στο πλαίσιο αυτό, παρουσιάστηκαν οι επιμέρους κατηγορίες πολιτικών Ελέγχου Πρόσβασης, από τις οποίες συνθέτονται οι διαφορετικοί μηχανισμοί που συναντώνται στη βιβλιογραφία.

3.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] ITU-T NGN Working Definition. Available at:
http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com13/ngn2004/working_definition.html
- [2] Vidal I., Garcia J., Valera F., Soto I., Azcorra A. (2007). Integration of a QoS Aware End User Network within the TISPAN NGN Solutions. In Proc. of the 4th European Conference on Universal Multiservice Networks.
- [3] Available at: http://www.simpleweb.org/wiki/Admission_Control
- [4] Knightly E.W., Shroff N.B. (1999). Admission Control for Statistical QoS: Theory and Practice. IEEE Network, 13(2), 20-29.
- [5] European Regulators Group (ERG) (2007). Final Report on IP Interconnection. Project Team on IP Interconnection and NGN.
- [6] ITU-T Recommendation E.800. Terms and Definitions related to Quality of Service and Network Performance including Dependability.
- [7] Elizondo A.J. et al (2008). MUSE IST Project White Paper: Muse QoS Architecture. Available at: http://www.ist-muse.org/deliverables_list.htm
- [8] Armengol A.E., Rueda G.G. (2004). MUSE IST Project Deliverable A1.2 (v5): Network Requirements for Multi-Service Access. Available at: http://www.ist-muse.org/deliverables_list.htm
- [9] Guan P. (2001). Admission Control Algorithms: A Survey. Available at: <http://cseweb.ucsd.edu/classes/wi01/cse222/projects/reports/admit-8.ps>
- [10] Tang N., Tsui S., Wang L. (1998). Survey of Admission Control Algorithms. Technical Report, Course Project: A Survey of Admission Control Algorithms for Providing QoS over the Internet, Computer Science Department, University of California (UCLA).
- [11] Tanenbaum A. (1996). Computer Networks (3rd Edition). Prentice Hall, ISBN:0133499456.
- [12] Labrador M., Banerjee L. (1999). Packet Dropping Policies for ATM and IP Networks. IEEE Communication Surveys, 2(3).
- [13] Sun W. (1999). QoS/Policy/Constraint based Routing. Available at:
http://www.cse.wustl.edu/~jain/cis788-99/qos_routing/
- [14] Avramovic Z. (1992). Policy based Routing in the Defense Information System Network. In Proc. of the Military Communications Conference (MILCOM'92).
- [15] Kuipers F., Mieghem P.V., Korkmaz T., Krunz M. (2002). An Overview of Constraint-Based Path Selection Algorithms for QoS Routing. IEEE Communications Magazine, 40(12), 50-55.
- [16] Zhang L., Deering S., Estin D., Shenker S., Zappala D. (1993). RSVP: A New Resource Reservation Protocol. IEEE Network, 7(5), 8-18.

- [17] Reinhardt W. (1995). Advance Resource Reservation and its Impact on Reservation Protocols. In Proc. of the Broadband Islands'95.
- [18] Cavazzoni C. et al (2006). Revision of the Reference Architecture According to the Results of the Project Studies. MUPBED IST Project Deliverable D1.2, Proposal No. IST-511780. Available at: <http://www.ist-mupbed.uni-erlangen.de/index.html>
- [19] Elizondo A.J., Lobo-Poyo J.F. (2005). MUSE-NOBEL End-to-End QoS Concepts. In Proc.of the NOC 2005.
- [20] Nooren P., Oskar van Deventer M., Gamelas A., Elizondo A.J., Vinel R., Eriksson A.E. (2005). A Heterogeneous Approach to Achieve QoS in Fixed Access Networks - Results from FP6 Project MUSE. In Proc. of the BroadBand Europe.
- [21] Olifer V. (2005). Description of QoS Classes and Service Level Agreements. JANET QoS Development Project Report (V1.6).
- [22] 3GPP Technical Specification 22.105. Services and Service Capabilities.
- [23] ITU-T Recommendation G.1010. End-user Multimedia QoS Categories.
- [24] Grega M., Janowski L., Leszczuk M., Romaniak P., Papir Z. (2008). Quality of Experience Evaluation for Multimedia. *Przegląd Telekomunikacyjny*, 4, 142-153.
- [25] Bharrathsingh K. Quality of Experience as an Integral Part of Network Engineering. Available at: www.nortel.com/corporate/news/collateral/ntj1_quality.pdf
- [26] Kilkki K. (2007). Next Generation Internet and Quality of Experience. In Proc. of the EuroFGI IA.7.6, Workshop on Socio-Economic Issues of NGL.
- [27] Hamam A., Eid M., El Saddik A., Georganas N.D. (2008). A Fuzzy Logic System for Evaluating Quality of Experience of Haptic-Based Applications. In Proc. of the EuroHaptics 2008 Conference (LNCS 5024).
- [28] Siller M., Woods J. (2003). Improving Quality of Experience for Multimedia Services by QoS Arbitration on a QoE Framework. In Proc. of the Postgraduate Research Conference in Electronics Photonics Communications and Software.
- [29] Richards A., Rogers G., Witana V., Antoniadis M. (1998). Mapping User Level QoS from a Single Parameter. In Proc. of the 2nd IFIP/IEEE International Conference on Management of Multimedia Networks and Services (MMNS '98).
- [30] Nahrstedt K., Smith J. (1994). A Service Kernel for Multimedia Endpoints. In Proc. of the 2nd International Workshop on Multimedia: Advanced Teleservices and High-Speed Communication Architectures (LNCS-868).
- [31] Guo X., Pattinson C. (1997). Quality of Service Requirements for Multimedia Communications. In Proc. of the Time and the Web Conference. Available at: <http://www.hiraeth.com/conf/web97/papers/>

- [32] Chen D., Colweel R., Gelman H., Chrysanthis O., Mosse D. (1996). A Framework for Experimenting with QoS for Multimedia Services. In Proc. of the International Conference on Multimedia Computing and Networking.
- [33] Mossé D., Ly H. (1996). User to Network QoS Parameter Transformation in Networked Multimedia Systems. In Proc. of the Workshop on Resource Allocation Problems in Multimedia Systems.
- [34] Campbell A., Coulson G., Hutchison D. (1994). A Quality of Service Architecture. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 24(2), 6-27.
- [35] Nahrstedt K., Smith J.M. (1995). The QoS Broker. IEEE Multimedia, 2(1), 53-67.
- [36] Lopez D., Gonzalez F., Bellido L., Alonso A. (2006). Adaptive Multimedia Streaming over IP based on Customer Oriented Metrics. In Proc. of the 7th International Symposium on Computer Networks (ISCN 2006).
- [37] ITU-T Recommendation P.800. Methods for Subjective Determination of Transmission Quality.
- [38] ITU-T Recommendation P.862. Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ) - An Objective Method for End-to-End Speech Quality Assessment of Narrow-Band Telephone Networks and Speech Codecs.
- [39] ITU-R Recommendation BS.1387-1. Method for Objective Measurements of Perceived Audio Quality.
- [40] Perkis A., Svensson P., Hillestad O.I., Johansen S., Zhang J., Saebo A., Jetlund O. (2006). Multimedia over IP Networks. Teletronikk 1, 43-53.
- [41] ITU-T Recommendation G.107. The E-model: A Computational Model for Use in Transmission Planning.
- [42] Grega M., Szott S., Pacyna P. (2006). Collaborative Networking with Trust and Misbehaviour - A File Sharing Case. In Proc. of the 1st Workshop on Operator-assisted Community Networks (OpComm).
- [43] Sánchez-Macián A., López D., López de Vergara J.E., Pastor E. (2006). A Framework for the Automatic Calculation of Quality of Experience in Telematic Services. In Proc. of the 13th HP-OVUA Workshop.
- [44] Perros H.G., Elsayed K.M. (1996). Call Admission Control Schemes: A Review. IEEE Communications Magazine, 34(11), 82-91.
- [45] Ahmed M.H. (2005). Call Admission Control in Wireless Networks: A Comprehensive Survey. IEEE Communications Surveys, 7(1), 50-69.
- [46] Benameur N., Ben Fredj S., Oueslati-Boulahia S., Roberts J.W. (2002). Quality of Service and Flow Level Admission Control in the Internet. Computer Networks: The

- International Journal of Computer and Telecommunications Networking (Special Issue: Towards a New Internet Architecture), 40(1), 57-71.
- [47] Elizondo A.J., Alter C. (2006). Access Network Architecture III. MUSE IST Project Deliverable TF1.6 (v1). Available at: http://www.ist-muse.org/deliverables_list.htm
- [48] Armbruster F. (2008). GSB Access Network Architecture. MUSE IST Project Deliverable TF1.9 Part A (v11). Available at: http://www.ist-muse.org/deliverables_list.htm
- [49] Kassev K., Mihov Y., Tsankov B. (2009). Performance Analysis of Call Admission Control for Streaming Traffic with Activity Detection Function. International Book Series: Information Science and Computing, No.14 (New Trends in Intelligent Technologies), 47-52.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΛΥΣΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΡΟΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τάση στα μελλοντικά δίκτυα, ενσύρματα αλλά και ασύρματα, είναι προς τα δίκτυα πολλαπλών υπηρεσιών, στα οποία μία απλή δικτυακή υποδομή θα μπορεί να υποστηρίξει μία ποικιλία από εφαρμογές, όπως υπηρεσίες δεδομένων, φωνής και βίντεο. Κατά συνέπεια, τα μελλοντικά δίκτυα θα χειρίζονται τηλεπικοινωνιακή κίνηση που θα ανήκει σε διαφορετικές κλάσεις κάθε μία από τις οποίες θα απαιτεί διαφορετική ποιότητα υπηρεσίας (QoS) [1-2].

Στις σύγχρονες σύνθετες και, πολλές φορές, πραγματικόχρονες εφαρμογές περιλαμβάνονται η συνομιλία μέσω βίντεο, το διαδραστικό βίντεο κατ' αίτηση, η μάθηση εξ' αποστάσεως, τα καταναεμημένα παιχνίδια βίντεο κτλ.. Οι εφαρμογές αυτές αξιολογούν καλύτερη και περισσότερο αξιόπιστη απόδοση του δικτύου. Απαιτούν σταθερές εγγυήσεις από το δίκτυο ότι συγκεκριμένοι πόροι (εύρος ζώνης, καθυστέρηση, χώροι ενδιάμεσου καταχωρητή) θα δεσμευτούν αποκλειστικά γι αυτές. Επιπλέον, οι απαιτήσεις του τελικού χρήστη είναι αυξημένες τώρα, όσον αφορά την επίδοση, την προσιτότητα και την ασφάλεια. Το βέλτιστο δίκτυο του μέλλοντος δε θα είναι αυτό που θα προσφέρει ισομερή διανομή των πόρων του σε όλες τις ενεργές συνδέσεις κίνησης, αλλά αυτό που θα προσφέρει εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας σε όσο το δυνατόν περισσότερους τελικούς χρήστες.

Για το λόγο αυτό, σε ένα απαιτητικό δίκτυο πολλαπλών κλάσεων υπηρεσιών, οι σχεδιαστές του δικτύου καλούνται να αντιμετωπίσουν ένα πολύπλοκο πρόβλημα βελτιστοποίησης του δικτύου έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας των διαφορετικών αυτών κλάσεων. Στην εργασία αυτή ασχολούμαστε κυρίως με δύο παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας – την μεταβολή καθυστέρησης (jitter) και το εύρος ζώνης (bandwidth). Μελετούμε τον τρόπο αλληλεπίδρασης αυτών των δύο παραμέτρων και προτείνουμε αρχιτεκτονικές λύσεις για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των κλάσεων ενός δικτύου πολλαπλών υπηρεσιών σε σχέση με τη μέγιστη μεταβολή καθυστέρησης και το εύρος ζώνης.

4.2 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ

Σε όλο το εύρος της σχετικής βιβλιογραφίας, ο κοινός τρόπος ομαδοποίησης των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών προκύπτει από την διαπίστωση των χαρακτηριστικών κίνησης και των απαιτήσεών τους. Οι κύριοι διαφοριστές που εμφανίζονται στην βιβλιογραφία είναι οι ακόλουθοι:

- *Επίπεδο ελαστικότητας*

Το επίπεδο ελαστικότητας αναφέρεται στην δυνατότητα διαφοροποίησης του αρχικού σχήματος κίνησης. Είναι εμφανές ότι δεν εμφανίζουν το ίδιο επίπεδο ελαστικότητας όλες οι υπηρεσίες. Φυσιολογικά, όλες οι υπηρεσίες επικοινωνιών στοχεύουν στην διατήρηση της ακεραιότητάς τους τόσο ως προς τον χρόνο όσο και ως προς τα δεδομένα. Για να καθοριστεί το επίπεδο ελαστικότητας μίας δεδομένης υπηρεσίας/εφαρμογής, είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί ποια από τις προηγούμενες παραμέτρους είναι η πιο περιοριστική. Κατά συνέπεια, η διαφοροποίηση μεταξύ ελαστικών και ανελαστικών εφαρμογών και των ροών κίνησης που αυτές παράγουν, αποτελεί συνάρτηση της σχετικής αναγκαιότητας διατήρησης της ακεραιότητας των δύο αυτών παραμέτρων. Στην περίπτωση που η ακεραιότητα δεδομένων είναι το σημαντικότερο (δηλαδή υπηρεσίες μη ανεκτικές σε λάθη δεδομένων), μιλάμε για ελαστική κίνηση. Στην αντίθετη περίπτωση που η ακεραιότητα σε μετρικές χρόνου είναι σημαντικότερη και υπάρχει μεγαλύτερη ανοχή στα λάθη δεδομένων, έχουμε ανελαστική κίνηση.

- *Επίπεδο διαδραστικότητας*

Το επίπεδο διαδραστικότητας χρησιμοποιείται για να αναδείξει (ή όχι) το δεύτερο σε σημαντικότητα χαρακτηριστικό διατήρησης ακεραιότητας. Σαν παράδειγμα, ελαστική κίνηση με υψηλό επίπεδο διαδραστικότητας θα μπορούσε να παραχθεί από μία εφαρμογή για την οποία σημαντικότερη παράμετρος ποιότητας υπηρεσίας είναι μεν η ακεραιότητα δεδομένων, αλλά ταυτόχρονα παραμένει ευαίσθητη ως προς τις διαφοροποιήσεις στις επιμέρους μετρικές χρόνου. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών αποτελούν οι εφαρμογές ηλεκτρονικού εμπορίου και η διαφύλλιση ιστού.

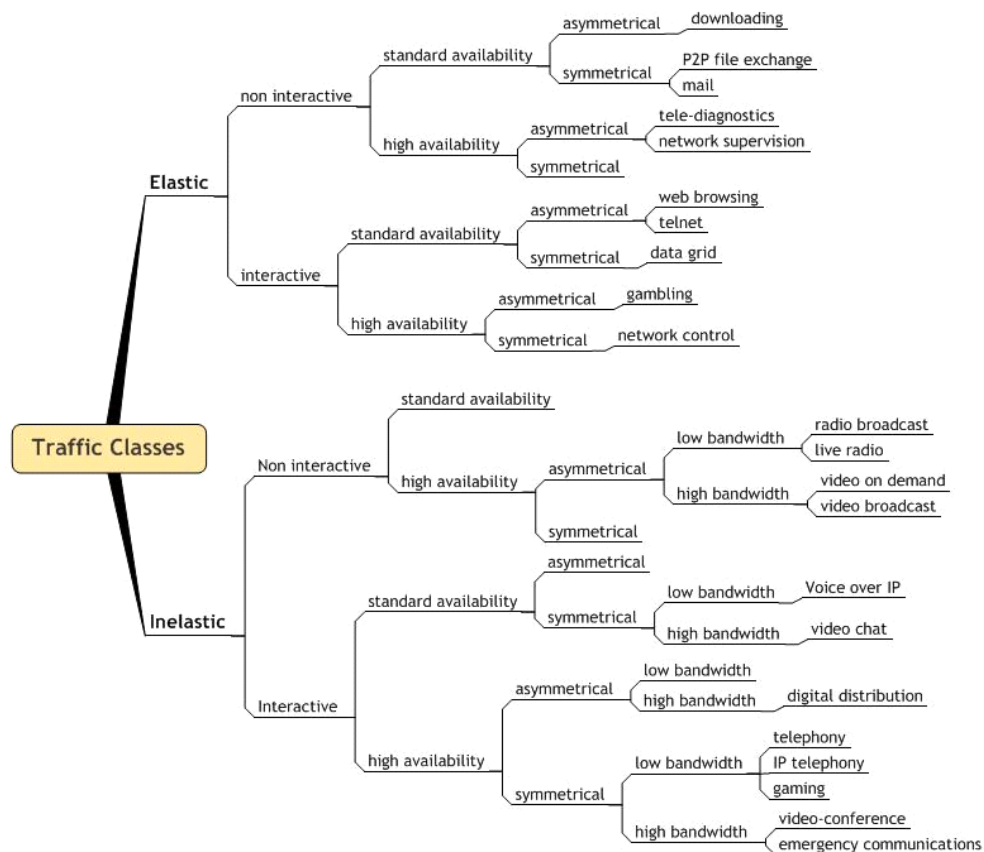
- *Επίπεδο διαθεσιμότητας υπηρεσίας*

Η διαθεσιμότητα υπηρεσίας λαμβάνει στις σχετικές εργασίες ταξινόμησης υπηρεσιών σημαντικότερη θέση, όπου χρησιμοποιείται σαν παράμετρος αναγνώρισης των διαφορετικών κλάσεων υπηρεσίας. Τα δύο επίπεδα που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των υπηρεσιών είναι το τυπικό και το υψηλό επίπεδο διαθεσιμότητας.

Γενικότερα, και άλλοι διαφοριστές τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών υιοθετούνται με βάση συγκεκριμένα σύγχρονα, όσο και εξελισσόμενα, τεχνολογικά και οικονομικά χαρακτηριστικά. Αυτό δεν συνεπάγεται όμως κάτι άλλο, πέρα από την διαπίστωση ότι ο

όποιος περαιτέρω διαχωρισμός ή ταξινόμηση κλάσεων υπηρεσίας δείχνει να είναι τεχνητός και εξαρτημένος από την τελευταία λέξη τεχνολογικών και οικονομικών προτύπων.

Ένα γενικευμένο δέντρο κλάσεων υπηρεσιών, με βάση τις προηγούμενες αναγνωρισμένες παραμέτρους διαφοροποίησης φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4-1: Γενικευμένο Δέντρο Κλάσεων Υπηρεσίας

Στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών, οι υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσιών περιγράφονται από τον οργανισμό τηλεπικοινωνιακής τυποποίησης 3GPP, ο οποίος έχει καθορίσει και τις τεχνικές προδιαγραφές τους [3,4]. Σύμφωνα με τον οργανισμό αυτό, η απόδοση μίας υπηρεσίας θα έπρεπε να εκφράζεται με παραμέτρους που:

- εστιάζουν στις επιπτώσεις που γίνονται αντιληπτές από τον τελικό χρήστη και όχι στις πηγές πρόκλησής τους στον δικτυακό χώρο,
- είναι ανεξάρτητες της εσωτερικής σχεδίασης του δικτύου,
- λαμβάνουν υπόψιν όλα τα χαρακτηριστικά της προσφερόμενης υπηρεσίας από την οπτική γωνία του τελικού χρήστη και τα οποία μπορούν να ποσοτικοποιηθούν με αντικειμενικό τρόπο στο σημείο πρόσβασης στην υπηρεσία,
- μπορούν να διασφαλιστούν στον τελικό χρήστη από τον πάροχο της υπηρεσίας.

Οι τέσσερις κλάσεις υπηρεσιών του οργανισμού 3GPP είναι οι κλάσεις *conversational*, *streaming*, *interactive* και *background* και απεικονίζονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα:

Error tolerant	Conversational voice and video	Voice messaging	Streaming audio and video	Fax
Error intolerant	Telnet, interactive games	E-commerce, WWW browsing,	FTP, still image, paging	E-mail arrival notification
	Conversational (delay <<1 sec)	Interactive (delay approx 1 sec)	Streaming (delay <10 sec)	Background (delay >10 sec)

Πίνακας 4-1: Προτεινόμενες Κλάσεις Υπηρεσίας από τον Οργανισμό 3GPP

Όπως γίνεται αντιληπτό από τον παραπάνω πίνακα, το βασικό χαρακτηριστικό το οποίο διακρίνει τις κλάσεις υπηρεσιών μεταξύ τους είναι η ευαισθησία της τηλεπικοινωνιακής κίνησης όσον αφορά την διατεματική καθυστέρηση. Για παράδειγμα η κλάση *conversational* περιλαμβάνει κίνηση ευαίσθητη στην διατεματική καθυστέρηση, ενώ αντίθετα η κλάση *background* είναι η λιγότερο ευαίσθητη κλάση υπηρεσιών στην διατεματική καθυστέρηση. Οι *conversational* και *streaming* κλάσεις υπηρεσιών προορίζονται για πραγματικόχρονες εφαρμογές. Η διαφορά μεταξύ τους είναι το επίπεδο ευαισθησίας στην διατεματική καθυστέρηση. Η πραγματικόχρονη *conversational* κλάση υπηρεσιών είναι η πιο ευαίσθητη κλάση στην καθυστέρηση. Η τηλεφωνία, η μεταφορά φωνής πάνω από το πρωτόκολλο IP, η βιντεοδιάσκεψη και άλλες ανάλογες εφαρμογές ανήκουν σε αυτή την κλάση υπηρεσιών. Η μέγιστη ανοχή στην διατεματική καθυστέρηση στην κλάση αυτή καθορίζεται από την ανθρώπινη αντίληψη της συνομιλίας κατά τη διάρκεια μια τηλεφωνικής κλήσης ή βιντεοκλήσης. Η ανοχή αυτή είναι πολύ μικρή και εξαιρετικά αυστηρή. Η κλάση υπηρεσιών *streaming* σχετίζεται με την παρακολούθηση βίντεο ή την ακρόαση μουσικής σε πραγματικό χρόνο. Αυτό το είδος κίνησης είναι ασύμμετρο και θα πρέπει να ρυθμίζεται ώστε ο ενδιάμεσος χρόνος άφιξης μεταξύ των πακέτων θα πρέπει να διατηρείται. Οι κλάσεις υπηρεσιών *interactive* και *background* περιλαμβάνουν παραδοσιακές εφαρμογές διαδικτύου όπως η πλοήγηση, το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, η μεταφορά αρχείων κ.α. Αυτές οι εφαρμογές είναι λιγότερο ευαίσθητες στην καθυστέρηση συγκρινόμενες με τις

conversational και *streaming* κλάσεις υπηρεσιών. Όμως, το περιεχόμενο τους θα πρέπει να παραδίδεται με χαμηλό ρυθμό σφαλμάτων, ο οποίος επιτυγχάνεται μέσα από την εφαρμογή κατάλληλης κωδικοποίησης και μέσα από την επαναμετάδοση. Η κύρια διαφορά μεταξύ *interactive* και *background* κλάσεων υπηρεσιών είναι ότι πρώτη αφορά υπηρεσίες όπως η πλοήγηση στο διαδίκτυο, η αναζήτηση σε βάσεις δεδομένων, η πρόσβαση σε εξυπηρετητές, ενώ η δεύτερη προορίζεται για εφαρμογές όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο ή λήψη αρχείων. Επίσης, η *interactive* κλάση υπηρεσιών έχει υψηλότερη προτεραιότητα χρονοπρογραμματισμού των πακέτων σε σχέση με τη *background* κλάση υπηρεσιών. Η *background* κλάση υπηρεσιών δεσμεύει πόρους όταν οι *interactive* εφαρμογές δεν τους χρειάζονται.

Ένα παρόμοιο γενικευμένο μοντέλο κλάσεων υπηρεσίας, ανεξάρτητο του υποκείμενου δικτύου, προτείνει και ο οργανισμός τηλεπικοινωνιακής τυποποίησης ITU-T [5,6]. Και αυτός ο οργανισμός διατυπώνει προτάσεις για τις διατεματικές απαιτήσεις απόδοσης όσον αφορά τις μετρικές της διατεματικής καθυστέρησης και της απώλειας πακέτων. Οι προτεινόμενες κλάσεις του οργανισμού ITU-T φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:

Error tolerant	Conversational voice and video	Voice/video messaging	Streaming audio and video	Fax
Error intolerant	Command/control (e.g. Telnet, interactive games)	Transactions (e.g. E-commerce, WWW browsing, Email access)	Messaging, Downloads (e.g. FTP, still image)	Background (e.g. Usenet)
	Interactive (delay $\ll 1$ s)	Responsive (delay ~ 2 s)	Timely (delay ~ 10 s)	Non-critical (delay $\gg 10$ s)

T1213060-02

Πίνακας 4-2: Προτεινόμενες Κλάσεις Υπηρεσίας από τον Οργανισμό ITU-T

Στην βιβλιογραφία έχουν επίσης προταθεί μοντέλα κλάσεων υπηρεσίας που αφορούν σε συγκεκριμένες τεχνολογίες και τοπολογίες δικτύων καθώς και σε υποστηριζόμενες υπηρεσίες. Ενδεικτικά, στο [7] οι συγγραφείς έχουν προτείνει έναν μηχανισμό διαχείρισης πόρων για ενοποιημένο δίκτυο κυψέλης/WLAN για την διαχείριση τριών κλάσεων υπηρεσίας. Στο [8] οι συγγραφείς έχουν προτείνει μία υβριδική τοπολογία δικτύου ινοοπτικής ραδιοζεύξης για την διανομή βίντεο με ταυτόχρονη δυνατότητα εκχώρησης διαφορετικής

κλάσης ποιότητας σε κάθε υποστηριζόμενη υπηρεσία. Στο [9] οι συγγραφείς πραγματεύονται το θέμα της υποστήριξης πολλαπλών κλάσεων υπηρεσίας σε δίκτυα WiMAX, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι είναι δυνατόν να ικανοποιηθούν αυστηρές επιδιωκόμενες τιμές ποιότητας υπηρεσίας με χρήση σταθμοσκόπησης και με σχετικά απλούς μηχανισμούς μηχανίκευσης κίνησης. Τέλος, στο [10] οι συγγραφείς προτείνουν μία γενικευμένη μεθοδολογία αντιστοίχισης διακριτών τύπων τηλεπικοινωνιακής κίνησης με συγκεκριμένες κλάσεις υπηρεσίας.

4.3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η πρόταση της διατριβής για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε ένα πρότυπο δίκτυο επόμενης γενιάς που θα υποστηρίζει πολλαπλές κλάσεις κίνησης. Οι επιμέρους μελέτες έγιναν με σκοπό τον καθορισμό της συνολικής αρχιτεκτονικής ενός τέτοιου ανοικτού δικτύου πολλαπλών υπηρεσιών, που θα κάνει δυνατή μία ευρέως διαδεδομένη αρχιτεκτονική δικτύου για παροχή ποικίλων υπηρεσιών στον τελικό χρήστη.

Μία σημαντική παράμετρος του προτεινόμενου προτύπου δικτύου για την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας είναι η εισαγωγή γενικευμένων σταθερών ποιότητας υπηρεσίας. Με διακριτές, παγιωμένες τιμές για κάποιες παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας, η διατερματική ποιότητα υπηρεσίας μπορεί να γίνει πραγματικότητα για διαφορετικά δίκτυα και παρόχους. Ο εξοπλισμός μπορεί να βελτιστοποιηθεί με ταυτόχρονη μείωση της πολυπλοκότητας και του κόστους. Φυσικά, προς αυτή την κατεύθυνση χρειάζονται τελικά οι διατερματικές τιμές

Η προσέγγιση εκ των κάτω που υιοθετείται, οδηγεί σε μία συγκεκριμένη πρόταση υλοποίησης των οργανικών συστατικών του πρότυπου δικτύου για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Περιγράφει μία ελάχιστη ομάδα λειτουργιών που θα πρέπει να υποστηρίζεται σε κάθε κόμβο του δικτύου που θα είναι συμβατός με τις προδιαγραφές της πρότασης της εργασίας. Επιπρόσθετες λειτουργίες θα μπορούσαν όπως είναι φυσικό να υποστηρίζονται.

4.3.1 Η ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΩΣ ΔΙΑΦΟΡΙΣΤΗΣ ΤΩΝ ΚΛΑΣΕΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Όπως προκύπτει από τις σχετικές εργασίες των οργανισμών προτυποποίησης που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, η διατερματική καθυστέρηση είναι η κυρίαρχη μετρική ποιότητας υπηρεσίας που χρησιμοποιείται για τη διαφοροποίηση των κλάσεων υπηρεσίας. Αυτό που παρατηρεί κανείς και στις δύο αυτές προσεγγίσεις είναι η ύπαρξη επιδιωκόμενων τιμών μέγιστης διατερματικής καθυστέρησης χωρίς παράλληλα να υπάρχει συγκεκριμένη πρόταση υπολογισμού της. Στην σχετική βιβλιογραφία έχουν προταθεί τόσο αναλυτικές όσο και στοχαστικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της διατερματικής

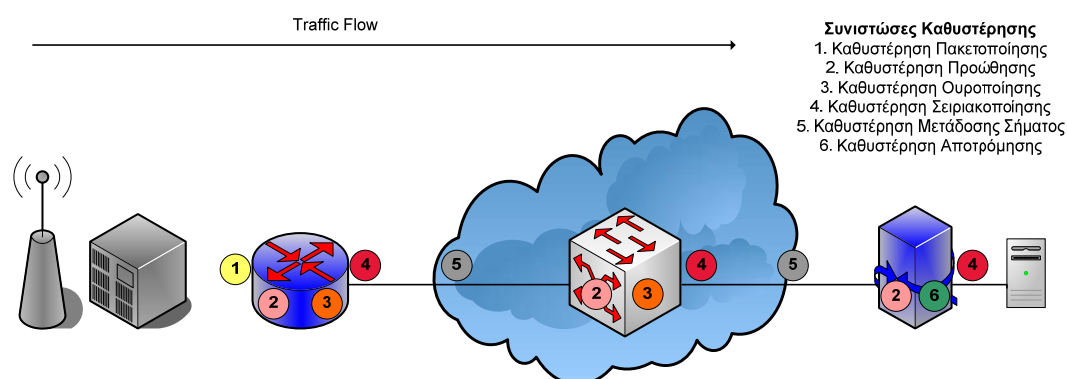
καθυστερήσης που όμως περιορίζονται σε συγκεκριμένες τοπολογίες δικτύου και υλοποιήσεις ενδιάμεσων κόμβων [11-14].

Στα πλαίσια της διατριβής, η μετρική αυτή διατηρήθηκε, αν και σκόπιμα επιμερίστηκε σε συνιστώσες με τελικό στόχο την έμμεση ικανοποίηση των επιδιωκόμενων τιμών της για κάθε κλάση υπηρεσίας μέσα από την ικανοποίηση επιδιωκόμενων τιμών συγκεκριμένων μεταβλητών συνιστωσών της.

Συγκεκριμένα, η διατεματική καθυστέρηση προκύπτει, όπως είναι γνωστό, από [15]:

- την *καθυστερήση πακετοποίησης*, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος του πακέτου και αναφέρεται στον χρόνο που απαιτείται για την δημιουργία και πλήρωση πακέτων δεδομένων για μετάδοση πάνω από δικτυακές τεχνολογίες.
- την *καθυστερήση διάδοσης σήματος* που προκύπτει από την ταχύτητα του σήματος στο φυσικό μέσο και είναι ανάλογη με την πραγματική απόσταση που το σήμα διανύει (για παράδειγμα η ταχύτητα του φωτός στην ίνα είναι 5ms/1000Km).
- την *καθυστερήση προώθησης* από το υλικό στους ενδιάμεσους δικτυακούς κόμβους. Η καθυστέρηση προώθησης συνδέεται με την εσωτερική καθυστέρηση επεξεργασίας του πακέτου για την λήψη συγκεκριμένης απόφασης προώθησής του. Η καθυστέρηση αυτή δεν είναι πάνω από 50μs στους σύγχρονους κόμβους.
- την *καθυστερήση ουροποίησης* η οποία εμφανίζεται στους κόμβους συμφόρησης του δικτύου και η οποία αποτελεί παράμετρο διερεύνησης στην διατριβή αυτή. Η καθυστέρηση ουροποίησης εξαρτάται άμεσα από τον μηχανισμό χρονοπρογραμματισμού των πακέτων καθώς και από την ύπαρξη ή όχι μηχανισμού κατάτμησης.
- την *καθυστερήση σειριακοποίησης* που εξαρτάται από την χωρητικότητα της ζεύξης στην πόρτα εξόδου και από το μέγεθος του πακέτου και δίνεται από τον λόγο του τελευταίου προς το εύρος ζώνης.
- και την *καθυστερήση αποτρόμησης* που απαντάται στον μηχανισμό απομάκρυνσης της μεταβολής καθυστέρησης στον τερματικό εξοπλισμό, το μέγεθος του οποίου ισούται συνήθως με την μέγιστη τιμή της μεταβολής καθυστέρησης.

Οι παραπάνω συνιστώσες της διατεματικής καθυστέρησης μαζί με τα σημεία εμφάνισής τους στο δίκτυο, απεικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4-2: Συνιστώσες Διατερματικής Καυστέρησης

Καθώς οι επιμέρους καθυστερήσεις πακετοποίησης, διάδοσης σήματος, προώθησης και σειριακοποίησης στους ενδιάμεσους κόμβους παραμένουν σταθερές για συγκεκριμένο εξοπλισμό και για συγκεκριμένο δικτυακό μονοπάτι της υπηρεσίας, η εργασία αυτή προτείνει τον έλεγχο της καθυστέρησης ουροποίησης που προκαλείται στους κόμβους συμφόρησης για κάθε μία από τις υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσίας. Ο έλεγχος της καθυστέρησης ουροποίησης ισοδυναμεί με τον έλεγχο της μεταβολής καθυστέρησης στους κόμβους αυτούς [16]. Το τελευταίο ισχύει υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις λειτουργίας τους, οι οποίες και αποτελούν παραδοχές στη συνέχεια της εργασίας της διατριβής.

Ο έλεγχος της μεταβολής καθυστέρησης σε κάθε κόμβο συμφόρησης συμβάλει ασφαλώς και στην βελτίωση της διατερματικής μεταβολής καθυστέρησης και, τελικά, στην μείωση της καθυστέρησης αποτρομής που εμφανίζεται στον τερματικό εξοπλισμό [17-18]. Κατά συνέπεια, η βελτίωση της διατερματικής καθυστέρησης επιτυγχάνεται τόσο άμεσα με τον έλεγχο της καθυστέρησης ουροποίησης όσο και έμμεσα με την μείωση της καθυστέρησης αποτρομής.

Τέλος, εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός ότι η μεταβολή καθυστέρησης αποτελεί την κυρίαρχη μετρική για πολυμεσικές εφαρμογές, οι οποίες και αναμένεται να κυριαρχήσουν στα δίκτυα επόμενης γενιάς. Κατά συνέπεια, η επιλογή της ως διαφοριστής των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσίας αποδεικνύεται συμβατή και με την ποιοτική αυτή παράμετρο.

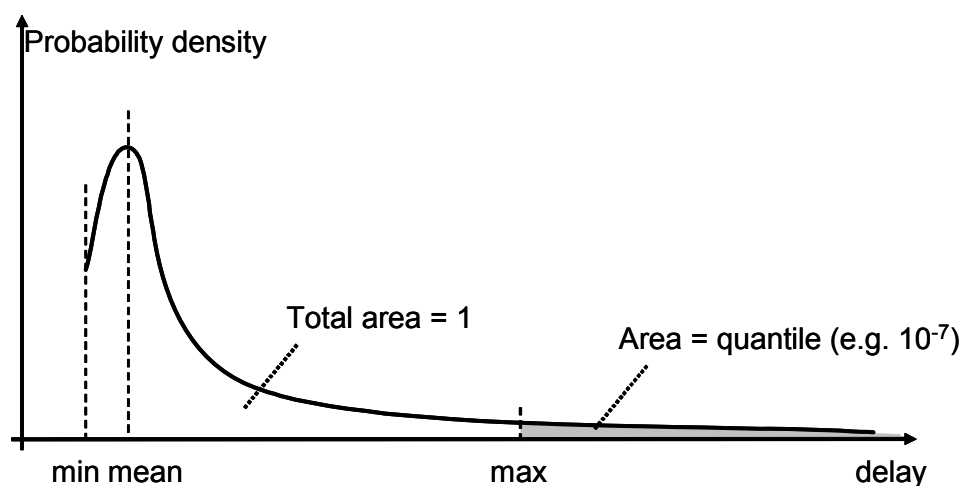
4.3.2 ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΕΡΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

Η διατερματική μεταβολή καθυστέρησης είναι σχετική κυρίως με εφαρμογές οπτικοακουστικής ροής, στις οποίες ο αποδέκτης της ροής οφείλει να αντισταθμίσει τη μέγιστη καθυστέρηση στην τελική μονάδα αποθήκευσης. Για άλλες εφαρμογές όπως είναι η διαφύλλιση ιστού ή η απομακρυσμένη υπολογιστική, η διατερματική καθυστέρηση είναι η

κρίσιμη παράμετρος. Ο τελικός χρήστης βιώνει τη μέση καθυστέρηση όταν περιμένει μία απόκριση. Σε εφαρμογές απομακρυσμένης υπολογιστικής η μέγιστη καθυστέρηση πρέπει να παραμείνει κάτω από την τιμή εκπνοής των πρωτοκόλλων χειραψίας.

Για να εξασφαλίσουμε τη διατεματική καθυστέρηση, είναι σημαντικό, όπως είπαμε προηγούμενα, να ελέγχουμε την μεταβολή καθυστέρησης σε κάθε κόμβο. Παρακάτω στην ενότητα αυτή, ερευνάται ο τρόπος που η διατεματική συμπεριφορά μπορεί να προβλεφθεί από τη συμπεριφορά ανά κόμβο ως προς την μεταβολή καθυστέρησης.

Το Σχήμα 4-3 απεικονίζει ποιοτικά τον ορισμό της μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης ως την τιμή της καθυστέρησης που ανήκει σε ένα συγκεκριμένο ποσοστημόριο. Για παράδειγμα, το ποσοστημόριο 10^{-7} που είναι σκιαγραμμισμένο αποτελεί την πιθανότητα η καθυστέρηση να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη τιμή.



Σχήμα 4-3: Ποιοτική κατανομή πιθανότητας καθυστέρησης

Η ελάχιστη τιμή στο προηγούμενο σχήμα είναι ξεκάθαρο ότι αποτελεί την καθυστέρηση στην περίπτωση ενός άδειου κόμβου. Καθορίζεται από το χρόνο επεξεργασίας του πακέτου για την λήψη απόφασης προώθησης καθώς και από το χρόνο σειριακοποίησης. Στην αντίθετη περίπτωση ενός κόμβου γεμάτου με τηλεπικοινωνιακό φορτίο, το ενδεχόμενο να διασχίσει ένα πακέτο τον κόμβο με την ελάχιστη καθυστέρηση είναι απίθανο. Θεωρητικά η μέγιστη καθυστέρηση μπορεί να είναι άπειρη. Στην πράξη όμως περιορίζεται από το πεπερασμένο μέγεθος των ουρών χρονοπρογραμματισμού. Κατά συνέπεια τα πακέτα που καθυστερούν περισσότερο από τη μέγιστη τιμή καθυστέρησης απορρίπτονται.

Εξ' ορισμού η μεταβολή καθυστέρησης προκύπτει από τη διαφορά (μέγιστη καθυστέρηση – ελάχιστη καθυστέρηση).

Για τον υπολογισμό της συνολικής κατανομής καθυστέρησης σε δύο διαδοχικούς κόμβους του δικτύου πρέπει να επιλυθεί το ολοκλήρωμα της συνέλιξης και στις δύο κατανομές. Το τελευταίο εκφράζει την συνδυασμένη πιθανότητα της περίπτωσης κατά την οποία ένα πακέτο βιώνει μία συγκεκριμένη καθυστέρηση στον πρώτο κόμβο και, ανεξάρτητα από αυτό, μία δεύτερη συγκεκριμένη καθυστέρηση στο δεύτερο κόμβο.

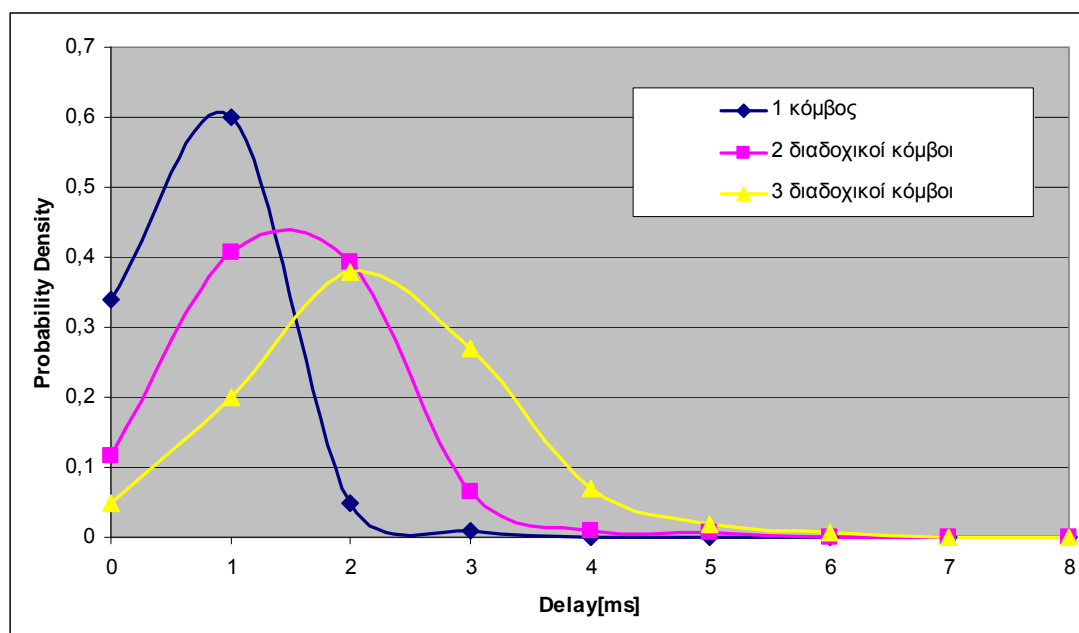
Στο επόμενο παράδειγμα για υπολογιστική ευκολία έχει επιλεγεί μία διακριτή κατανομή καθυστέρησης και μέγιστος αριθμός διαδοχικών κόμβων ο αριθμός 3. Πρώτη φανερή επισήμανση είναι ότι σε διαδοχικούς κόμβους με διαφορετική μέγιστη μεταβολή καθυστέρησης, ο κόμβος με τη χειρότερη μεταβολή καθυστέρησης καθορίζει και τη συνολική συμπεριφορά του δικτύου. Οι πόροι στους υπόλοιπους κόμβους με καλύτερες τιμές μεταβολής καθυστέρησης σπαταλώνται. Κατά συνέπεια, οι κόμβοι σε όλη τη διαδρομή μίας ροής ή μίας σύνδεσης θα πρέπει να έχουν την ίδια συμπεριφορά ως προς την μεταβολή καθυστέρησης.

Στο παράδειγμα αυτό υποθέτουμε ότι όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια πιθανότητα καθυστέρησης για μία συγκεκριμένη κλάση ποιότητας υπηρεσίας με μέγιστο φορτίο.

Καθυστέρηση	0ms	1ms	2ms	3ms	4ms	5ms
Πιθανότητα	34%	60%	5%	0.9%	0.1%	0

Η παραπάνω κατανομή έχει επιλεγεί κοντά στην πραγματικότητα – με πεπερασμένη μέγιστη τιμή. Το ποσοστημόριο 10^{-3} (0.1%) για το παράδειγμα αυτό είναι 4ms. Τα πακέτα που καθυστερούν περισσότερο από 4ms θεωρούνται εκτός ορίου. Κατά συνέπεια η μέγιστη μεταβολή καθυστέρησης του κόμβου είναι 4ms.

Η κατανομή πιθανότητας καθυστέρησης για 2 και 3 διαδοχικούς κόμβους αυτού του τύπου υπολογίζεται από το άθροισμα όλων των πιθανοτήτων για κάθε τιμή καθυστέρησης. Για παράδειγμα στην περίπτωση των δύο διαδοχικών κόμβων, μία συνολική καθυστέρηση της τάξης των 2ms λαμβάνεται με τον έναν κόμβο να εμφανίζει μηδενική καθυστέρηση και τον άλλον 2ms καθυστέρηση ή αντίστροφα ή όταν και οι δύο κόμβοι έχουν 1ms καθυστέρηση. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών απεικονίζονται στο Σχήμα 4-4 με ομαλοποιημένες καμπύλες.



Σχήμα 4-4: Καθυστέρηση πακέτων για διαδοχικούς κόμβους

Μπορεί να διαπιστωθεί από το προηγούμενο διάγραμμα ότι με τον αριθμό των διαδοχικών κόμβων να αυξάνεται, η απότομη κορυφή της κατανομής καθυστέρησης του μοναδικού κόμβου γίνεται ευρύτερη και πιο επίπεδη. Το ποσοστημόριο που είναι ίσο με 10^{-3} μπορεί να υπολογιστεί ότι βρίσκεται μεταξύ των 5ms και 6ms για τους δύο διαδοχικούς κόμβους, ενώ για 3 διαδοχικούς κόμβους η αντίστοιχη θέση εντοπίζεται μεταξύ των 6ms και 7ms. Η επιπρόσθετη ποσότητα στην μέγιστη μεταβολή καθυστέρησης τείνει να μειώνεται για κάθε επόμενο κόμβο που προστίθεται στο δίκτυο. Συμπεραίνουμε ότι η διαφορά στην συνολική μεταβολή καθυστέρησης ανάμεσα σε μεγαλύτερους αριθμούς κόμβων, για παράδειγμα 10 και 15 κόμβοι, θα είναι μικρή. Στην πράξη ο μέγιστος πιθανός αριθμός κόμβων για ένα μονοπάτι μεγάλης απόστασης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να ληφθεί ένα ανώτατο όριο στην μέγιστη μεταβολή καθυστέρησης πακέτου.

Το παραπάνω απλό παράδειγμα αποδεικνύει ότι η διατεματική μεταβολή καθυστέρησης είναι δυνατό να υπολογιστεί από την μεταβολή καθυστέρησης ενός μόνο κόμβου, εάν ο συνολικός αριθμός των κόμβων είναι γνωστός. Στην πράξη βέβαια, ο μέγιστος αριθμός των κόμβων δεν είναι γνωστός, ειδικά για συνδέσεις μεγάλης απόστασης. Ωστόσο, θα μπορούσε να θεωρηθεί μία πρακτική τιμή αριθμού κόμβων την οποία, ακόμα και σε διηπειρωτικές συνδέσεις, δεν υπερβαίνουμε ποτέ. Με χρήση αυτής της τιμής, ο πάροχος είναι ικανός να εγγυηθεί για τη μέγιστη διατεματική μεταβολή καθυστέρησης όταν είναι γνωστή η συμπεριφορά ενός μόνου κόμβου. Εναλλακτικά, ο αριθμός των κόμβων σε όλο το μονοπάτι μίας ροής θα μπορούσε να υπολογιστεί με χρήση του πεδίου μετρητή αλμάτων στην

επικεφαλίδα των IP πακέτων. Σε κάθε περίπτωση ο αναλυτικός υπολογισμός της διατεματικής μεταβολής καθυστέρησης παραμένει εκτός αντικειμένου της παρούσας διατριβής.

4.3.3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΚΛΑΣΕΙΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Με βάση τις σχετικές εργασίες των οργανισμών προτυποποίησης που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη ενότητα, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής προτείνονται οι ακόλουθες τέσσερις κλάσεις υπηρεσίας [19]:

- *Low Latency*
- *Real Time*
- *Elastic*
- *Best Effort*

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους απεικονίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Κλάση Υπηρεσίας	Επίπεδο Ελαστικότητας	Προτεραιότητα	Στατιστική Πολυπλεξία
<i>Low Latency</i>	Ανελαστική	Έγκαιρη Παράδοση	Όχι
<i>Real Time</i>			Όχι
<i>Elastic</i>	Ελαστική	Ακεραιότητα Δεδομένων	Προαιρετική
<i>Best Effort</i>			Ναι

Πίνακας 4-3: Προτεινόμενες Κλάσεις Υπηρεσίας

Ο όρος «στατιστική πολυπλεξία» χρησιμοποιείται για εφαρμογές με κίνηση *START-STOP*, για παράδειγμα η διαφύλλιση ιστού. Οι περίοδοι σιωπής των ανενεργών τερματικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τερματικά που την ίδια στιγμή εμφανίζονται να είναι ενεργά. Αυτό επιτρέπεται μόνο για ελαστικές εφαρμογές. Αντίθετα οι ανελαστικές ροές πακέτων δεσμεύουν το επιθυμητό εύρος ζώνης και δεν επιτρέπουν σε άλλες ανελαστικές ροές να χρησιμοποιήσουν μέρος αυτού. Ο λόγος είναι ότι μπορεί, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, η ανενεργή σύνδεση να συνεχίσει την λειτουργία της. Από την άλλη μεριά, οι συνδέσεις που ανήκουν στις δύο ελαστικές κλάσεις υπηρεσίας μπορούν να χρησιμοποιήσουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης που αφήνουν ελεύθερο οι κλάσεις υψηλότερης προτεραιότητας.

Η κλάση υπηρεσίας *Low Latency* προτείνεται ως μία κλάση ύψιστης ποιότητας για ειδικές εφαρμογές – με ειδική τιμολόγηση. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές φωνής υψηλής ποιότητας, διαδραστικό «παίξιν» και για οποιαδήποτε άλλη καινούρια και, ταυτόχρονα, απαιτητική εφαρμογή. Στην κλάση *Low Latency* αποδίδεται μία προκλητικά χαμηλή τιμή για την μέγιστη τιμή μεταβολής καθυστέρησης με στόχο την εκμετάλλευση στο μέγιστο των υψηλότερων ταχυτήτων μετάδοσης στα δίκτυα επόμενης γενιάς. Για να

επιτευχθεί αυτή η προκλητική τιμή μεταβολής καθυστέρησης για την κλάση αυτή, εισάγονται περιορισμοί στο μέγεθος ριπής των ροών της κλάσης, στο φορτίο με βάση τα χαρακτηριστικά των κόμβων συμφόρησης και στον αριθμό των ροών που γίνονται αποδεκτές μέσα στο δίκτυο για ταυτόχρονη εξυπηρέτηση.

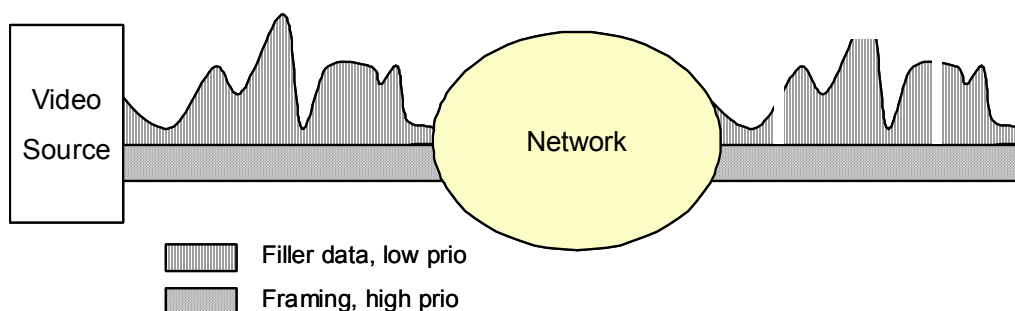
Η κλάση *Real Time* είναι λιγότερο αυστηρή και επιτρέπει την χρήση μεγαλύτερου μεγέθους ριπής από την προηγούμενη κλάση. Η μέγιστη τιμή μεταβολής καθυστέρησης ορίζεται 30 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή της κλάσης *Low Latency*, με στόχο την αντίληψη της διαφοράς στην διατεμαστική συμπεριφορά των εφαρμογών από τον τελικό χρήστη. Η κλάση *Real Time* θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για πρότυπη τηλεφωνία φωνής και βίντεο.

Τόσο η κλάση *Real Time*, όσο και η *Low Latency*, είναι ανελαστικού τύπου και δεν επιτρέπουν στατιστική πολυπλεξία. Ένα αυστηρά καθορισμένο συμβόλαιο κίνησης ελέγχει τον ρυθμό πακέτων και παύσεων ανάμεσα στις αποστολές πακέτων.

Η κλάση υπηρεσίας *Elastic* διακρίνει στα πακέτα υψηλή και χαμηλή προήγηση απόρριψης, ή χαμηλή και υψηλή προτεραιότητα, αντίστοιχα. Επιτρέπει, κατά συνέπεια, τους 4 ακόλουθους τρόπους λειτουργίας:

1. Στην περίπτωση που ο χρήστης χρησιμοποιεί την κλάση υπηρεσίας *Elastic* για να στείλει πακέτα υψηλής προτεραιότητας και μόνο, η συγκεκριμένη κλάση υπηρεσίας λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με τον τρόπο λειτουργίας των δύο ανελαστικών κλάσεων. Αυτό συνεπάγεται την τήρηση ενός αυστηρότερου συμβολαίου κίνησης με ανώτατο όριο ρυθμού, μέγιστο μέγεθος ριπής και καλά ορισμένους χρόνους παύσης. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές συνομιλιακού βίντεο με μεγαλύτερες ριπές και υψηλότερες επιδιωκόμενες τιμές διατεμαστικής καθυστέρησης από την κλάση υπηρεσίας *Real Time*.
2. Επιλογή από την πλευρά του χρήστη της προήγησης απόρριψης των πακέτων της εφαρμογής. Η δυνατότητα αυτή είναι χρήσιμη στην περίπτωση που πακέτα της ίδιας εφαρμογής έχουν διαφορετικό επίπεδο σπουδαιότητας. Για παράδειγμα, ένα βιντεόρρευμα μπορεί να αναλυθεί σε ένα ρεύμα πλαισιοποίησης υψηλής προτεραιότητας και σε ένα ρεύμα πλήρωσης χαμηλότερης προτεραιότητας. Σε αυτήν την περίπτωση ο χρήστης στέλνει πακέτα υψηλής προτεραιότητας συμβατά με το αυστηρότερο συμβόλαιο κίνησης, ενώ, επιπρόσθετα, μπορεί να στείλει πακέτα χαμηλότερης προτεραιότητας χωρίς κανέναν περιορισμό. Τα τελευταία αυτά πακέτα θα έχουν την ευκαιρία να φτάσουν στον προορισμό τους, με βάση το πραγματικό φορτίο στο δίκτυο. Σε περίπτωση βέβαια που συναντήσουν υπερφόρτωση δικτύου, κάποια από τα πακέτα αυτά θα απορριφθούν στους κόμβους συμφόρησης. Για

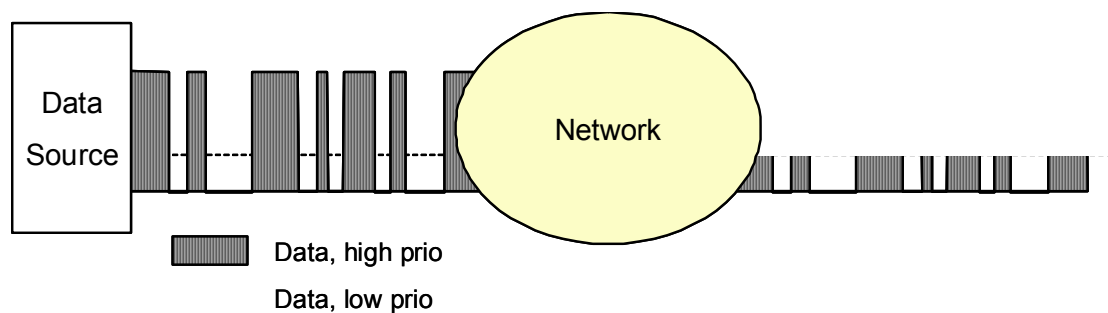
εφαρμογές, μάλιστα, που είναι ανεκτικές σε απώλειες πακέτων χαμηλής προτεραιότητας, τα πακέτα που χάνονται δεν χρειάζεται να επαναμεταδοθούν. Γίνεται φανερό, λοιπόν, ότι και αυτός ο τρόπος λειτουργίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές συνομιλιακού βίντεο. Στο παρακάτω Σχήμα 4-5 απεικονίζεται ένα παράδειγμα μίας πηγής βίντεο που είναι σε θέση να διαχωρίζει τα δεδομένα βίντεο σε πληροφορία πλαισιοποίησης (συν τα δεδομένα βασικής εικόνας) και σε πληροφορία πλήρωσης. Τα δύο ρεύματα έχουν διαφορετική προτεραιότητα. Τα δεδομένα πλαισιοποίησης, που χαρακτηρίζονται από υψηλή προτεραιότητα συμμορφώνονται με το συμβόλαιο κίνησης και τελικά παραδίδονται στο σύνολό τους, οδηγώντας σε μία σταθερή εικόνα στον τελικό χρήστη της εφαρμογής. Αντίθετα τα δεδομένα πλήρωσης που χαρακτηρίζονται από χαμηλή προτεραιότητα μπορεί να χαθούν στο δίκτυο σε περιόδους υπερφόρτωσής του. Οι απώλειες αυτές οδηγούν σε προσωρινά χαμηλότερη ποιότητα εικόνας που, βέβαια, είναι ανεκτή για κάποιες εφαρμογές.



Σχήμα 4-5: Κλάση υπηρεσίας Elastic class με τρόπο λειτουργίας 2

3. Στην περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει να στείλει όλα τα πακέτα με υψηλή προτεραιότητα, χωρίς όμως να συμμορφώνεται σε κάποιο αυστηρό συμβόλαιο κίνησης, ο μηχανισμός αστυνόμευσης στο άκρο του δικτύου τοποθετεί αναγνωριστική ένδειξη χαμηλής προτεραιότητας σε όποια πακέτα υπερβαίνουν το συμβόλαιο κίνησης. Μέρος τους ρεύματος πακέτων θα χαθεί σε περίπτωση υπερφόρτωσης του δικτύου και θα πρέπει να επαναμεταδοθεί, για παράδειγμα με χρήση του πρωτοκόλλου *TCP*. Τυπικά παραδείγματα εφαρμογών με τέτοια συμπεριφορά είναι κάθε διαδραστική υπηρεσία εγγυημένης διεκπαιρευτικότητας. Μία άλλη σχετική εφαρμογή είναι η μεταφορά αρχείων με οριοθετημένο, όμως, χρόνο μεταφοράς. Στο ακόλουθο Σχήμα 4-6 απεικονίζεται ένα παράδειγμα πηγής που παράγει κίνηση *START-STOP* με υψηλή προτεραιότητα και μόνο. Μέσα στο δίκτυο σημειώνονται τα μέρη του ρεύματος δεδομένων που ξεπερνούν τον επιτρεπτό ρυθμό

δεδομένων που έχει παραχωρηθεί στην εφαρμογή και που απεικονίζεται στο σχήμα με τη στικτή ευθεία γραμμή. Σε περιόδους υπερφόρτωσης του δικτύου μέρος αυτού του προσημειωμένου ρεύματος δεδομένων μπορεί να χαθεί και να πρέπει να επαναμετοδοθεί (η επαναμετάδοση δεν απεικονίζεται στο Σχήμα 4-6).



Σχήμα 4-6: Κλάση υπηρεσίας *Elastic class* με τρόπο λειτουργίας 3

4. Στον τέταρτο και τελευταίο τρόπο λειτουργίας της κλάσης υπηρεσίας *Elastic*, ο χρήστης επιλέγει να στείλει πακέτα δεδομένων με χαμηλή προτεραιότητα και μόνο. Αυτό είναι λογικό μόνο για εφαρμογές με μηδενικό εξασφαλισμένο ρυθμό μετάδοσης. Πρακτικά ο τρόπος λειτουργίας αυτός ισοδυναμεί με λειτουργία υπηρεσίας *Best Effort*, με μόνη διαφορά μία υψηλότερη προτεραιότητα εξυπηρέτησης από τους κόμβους του δικτύου. Παραδείγματα εφαρμογών που θα μπορούσαν να εμφανίσουν αυτόν τον τρόπο λειτουργίας είναι διαδραστικές εφαρμογές με υψηλότερη προτεραιότητα από εφαρμογές *Best Effort*.

Οι 4 δυνατοί τρόποι λειτουργίας της κλάσης υπηρεσίας *Elastic* συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 4-4:

Λειτουργία	Προτεραιότητα Δεδομένων	Μορφοποίηση Υψηλής Προτεραιότητας	Αστυνόμευση	Εφαρμογές
Ανελαστική	Υψηλή Προτεραιότητα	Όχι	Όχι	Βιντεόρρευμα
2 ρεύματα	Υψηλή και Χαμηλή Προτεραιότητα	Ναι	Όχι	Διαδραστικό Βίντεο
1 ρεύμα	Υψηλή Προτεραιότητα	Όχι	Ναι	TCP
Βέλτιστης Προσπάθειας	Χαμηλή Προτεραιότητα	Όχι	Όχι	TCP

Πίνακας 4-4: Τρόποι λειτουργίας κλάσης υπηρεσίας *Elastic*

Και για την κλάση υπηρεσίας *Elastic* η μέγιστη τιμή μεταβολής καθυστέρησης ορίζεται 30 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή της κλάσης *Real Time*, με στόχο την αντίληψη της διαφοράς στην διατεματική συμπεριφορά των εφαρμογών από τον τελικό χρήστη.

Τέλος, η κλάση *Best Effort* δεν έχει καμία εγγύηση ποιότητας υπηρεσίας. Πακέτα δεδομένων θα μπορούσαν να αποστέλλονται χωρίς κανέναν περιορισμό. Τυπικές εφαρμογές αυτής της κλάσης υπηρεσίας είναι αυτές που προκαλούν την λεγόμενη κίνηση παρασκηνίου, όπως είναι η μεταφορά ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.

Οι τρόποι λειτουργίας 2-4 της κλάσης υπηρεσίας *Elastic* και η κλάση υπηρεσίας *Best Effort* επιτρέπουν στατιστική πολυπλεξία ροών, η οποία είναι χρήσιμη για τηλεπικοινωνιακή κίνηση *START-STOP*. Αυτό συνεπάγεται την κοινή χρήση αδέσμευτου εύρους ζώνης από εφαρμογές χρηστών που παραμένουν ανενεργές για κάποιο συγκεκριμένο διάστημα. Η στατιστική πολυπλεξία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για διαδραστικές εφαρμογές όπως είναι η διαφύλλιση ιστού. Οι εφαρμογές αυτές χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο *TCP* για επαναμετάδοση πακέτων.

Στα πλαίσια της διατριβής αυτής, και με βάση τα προηγούμενα ποιοτικά χαρακτηριστικά των προτεινόμενων κλάσεων υπηρεσίας, προτείνονται οι παρακάτω επιδιωκόμενες τιμές για κάθε κλάση υπηρεσίας (Πίνακας 4-5). Στον πίνακα απεικονίζεται ακόμα η πρόταση για απεικόνιση των προτεινόμενων κλάσεων υπηρεσίας σε εφαρμοσμένη και δημοφιλή αρχιτεκτονική δικτύων, όπως είναι η αρχιτεκτονική *DiffServ*, καθώς και σε πρότυπο πρωτόκολλο επικοινωνίας στο δεύτερο επίπεδο της διαστρωμάτωσης *OSI* για υποστήριξη διαφοροποίησης της κίνησης (*IEEE 802.1p*).

QoS class	Max. burst size	Max. jitter target	Mean jitter target	Max. Packet loss rate	DiffServ code point	P-bits
<i>Low Latency</i>	200 byte	1 ms	-	10^{-10}	101 010	110
<i>Real Time</i>	1500 byte	30 ms	1 ms	10^{-10}	101 110 (EF)	101
<i>Elastic</i>	9000 byte	900 ms	36 ms	10^{-10}	100 010 (AF low drop precedence)	011
		-	-	-	100 110 (AF high drop precedence)	010
<i>Best Effort</i>	-	-	-	-	000 000	000

Πίνακας 4-5: Προτεινόμενες επιδιωκόμενες τιμές παραμέτρων κλάσεων υπηρεσίας

Στον πίνακα αυτόν φαίνονται οι 4 κλάσεις υπηρεσίας του προτεινόμενου δικτύου. Επίσης καταγράφονται τα προκαθορισμένα όρια για το ανώτατο μέγεθος ριπής κάθε κλάσης και οι ανώτεροι ρυθμοί απώλειας πακέτων. Τέλος, φαίνονται η προτεινόμενη διαφοροποίησή τους ως προς την μέγιστη μεταβολή καθυστέρησης που εμφανίζουν. Οι τιμές για την μεσοσταθμική μεταβολή καθυστέρησης προκύπτουν από την θεωρία ουρών και, πιο συγκεκριμένα, με μελέτη της ουράς κάθε κλάσης υπηρεσίας ως στατιστικό μοντέλο $M/D/1$. Η μεσοσταθμική μεταβολή καθυστέρησης δίνεται από τον λόγο του μεγέθους του ενδιάμεσου καταχωρητή για ποσοστημόριο ίσο με 10^{-11} και της μέσης τιμής. Ο λόγος αυτός μειώνεται για αυξανόμενο φορτίο. Για φορτίο ίσο με 98% της μέγιστης χωρητικότητας της ουράς ο λόγος προκύπτει ίσος με 25. Κατά συνέπεια, με επιδιωκόμενη τιμή μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης ίση με 900ms, η τιμή της μέσης μεταβολής καθυστέρησης πρέπει να είναι 25 φορές μικρότερη.

Όπως έχει επισημανθεί και νωρίτερα στο κεφάλαιο αυτό, η κρίσιμη μετρική για εφαρμογές ρεύματος καθώς και για συνομιλιακές εφαρμογές είναι η μέγιστη τιμή μεταβολής καθυστέρησης, ενώ για διαδραστικές εφαρμογές περισσότερο σημαντική είναι η μέση διατεματική καθυστέρηση.

Οι ακόλουθες οδηγίες υιοθετούνται στα πλαίσια της συνολικής πρότασης:

- Όταν αρχικοποιείται μία σύνδεση ο ρυθμός πρέπει να καθορίζεται αυστηρά (εκτός για τις *Best Effort* συνδέσεις)
- Τόσο για απλότητα όσο και για ευθυγράμμιση με την τεχνολογία *Ethernet* που αποτελεί την περισσότερο διαδεδομένη τεχνολογία στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων, προτείνεται να καθορίζονται ρυθμοί σε πολλαπλάσια των 100kb/s.
- Με σκοπό την πραγμάτωση της απαιτητικής κλάσης υπηρεσίας *Low Latency* πάνω από ζεύξεις μικρής χωρητικότητας, έχει εισαχθεί το όριο των 200 bytes σαν μέγεθος ριπής. Είναι άλλωστε και ένα μέγεθος που ταιριάζει για εφαρμογές φωνής πάνω από δίκτυα *IP* και για βιντεόρρευμα τύπου *MPEG2*.

Σε σχέση με την εκ-των-κάτω προσέγγιση υλοποίησης των προτεινόμενων κλάσεων υπηρεσίας, προκύπτουν από τις προηγούμενες κατευθύνσεις τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (Πίνακας 4-6) των κόμβων που θα είναι συμβατοί με την πρόταση της παρούσας διατριβής:

Κλάση Υπηρεσίας	Μηχανισμός Κόμβων Συμφόρησης
<i>Low Latency</i>	Ξεχωριστή ουρά με προνομιακή (πρώτη προτεραιότητα) εξυπηρέτηση, ομοιοκαταχώριση κίνησης με περιορισμένο φορτίο

Κλάση Υπηρεσίας	Μηχανισμός Κόμβων Συμφόρησης
<i>Real Time</i>	Ξεχωριστή ουρά με εξυπηρέτηση δεύτερης προτεραιότητας, ομοιοκαταχώριση κίνησης με περιορισμένο φορτίο, χωρίς προτεραιότητα απώλειας
<i>Elastic</i>	Ξεχωριστή ουρά με εξυπηρέτηση τρίτης προτεραιότητας, προήγηση απώλειας, εγγυημένη διεκπεραιωτικότητα για υψηλή προήγηση, δίκαιο μερίδιο διεκπεραιωτικότητας για κίνηση χαμηλής προήγησης
<i>Best Effort</i>	Ξεχωριστή ουρά, χαμηλότερη προτεραιότητα.

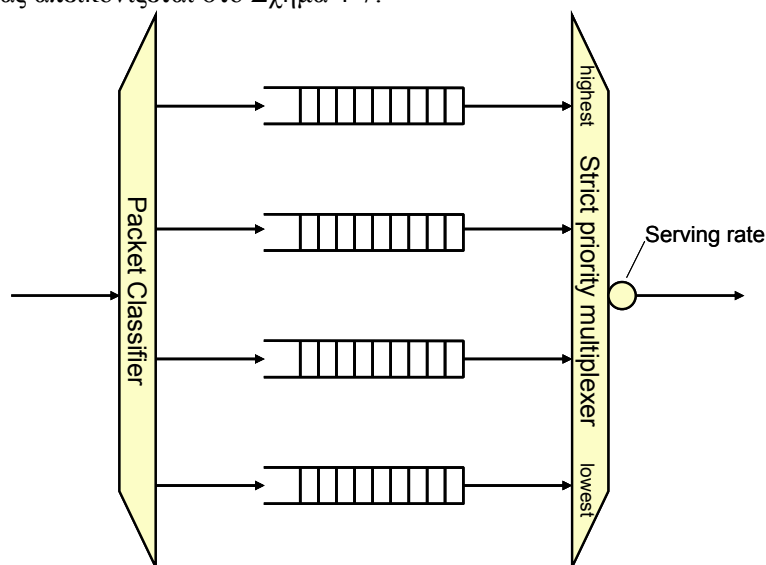
Πίνακας 4-6: Χαρακτηριστικά υλοποίησης στους κόμβους συμφόρησης

4.3.4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Ο μηχανισμός χρονοπρογραμματισμού στους κόμβους του δικτύου καθορίζει την σειρά εκπομπής των πακέτων των ροών κίνησης και, κατά συνέπεια είναι αυτός που ουσιαστικά ελέγχει την μεταβλητή καθυστέρηση ουροποίησης των πακέτων και, τελικά, την μεταβολή καθυστέρησης. Σε ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτων, τα πακέτα που ανήκουν σε μία συγκεκριμένη σύνδεση ταξιδεύουν στο δίκτυο μέσα από ένα συγκεκριμένο σύνολο δρομολογητών και ζεύξεων. Κάθε δρομολογητής περιλαμβάνει ένα δομικό στοιχείο χρονοπρογραμματισμού σε κάθε ζεύξη εξόδου. Καθώς ο χρονοπρογραμματιστής μπορεί να μεταδώσει μόλις ένα πακέτο, ή ακόμα περισσότερο ένα τμήμα αυτού, επιλέγει το επόμενο προς μετάδοση ανάμεσα σε όλα τα εκλέξιμα που περιμένουν σε πεπερασμένο αριθμό ουρών.

Με την ταυτόχρονη εφαρμογή μηχανισμών ελέγχου πρόσβασης και αστυνόμευσης, που περιορίζουν τον αριθμό των ροών και της κίνησης στο δίκτυο, διάφοροι μηχανισμοί χρονοπρογραμματισμού έχει αποδειχθεί ότι μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες φραγμένης καθυστέρησης. Αξιοσημείωτες ερευνητικές προσπάθειες οδήγησαν στην ανάπτυξη μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού για εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών φραγμένης καθυστέρησης [20-24]. Η επιλογή μίας συγκεκριμένης αρχής χρονοπρογραμματισμού στα πλαίσια της εργασίας μας, περιλαμβάνει έναν ισολογισμό ανάμεσα στην ανάγκη υποστήριξης μεγάλου αριθμού συνδέσεων και ροών κίνησης με τις προτεινόμενες διαφορετικές απαιτήσεις μεταβολής καθυστέρησης και την ανάγκη για έναν απλό αλλά ταυτόχρονα αποδοτικό αλγόριθμο. Στα πλαίσια της διατριβής, προτείνεται η χρησιμοποίηση ενός χρονοπρογραμματιστή αυστηρής προτεραιότητας, ο οποίος επιτυγχάνει καλή ισορροπία μεταξύ της απλής υλοποίησής του και της ευελιξίας ικανοποίησης διαφορετικών επιπέδων καθυστέρησης ουροποίησης, όπως θα δούμε και στη συνέχεια. Υπάρχουν ακόμα εργασίες που αποδεικνύουν ότι μπορεί να προσφέρει σχετικά υψηλή χρησιμοποίηση εύρους ζώνης από

κλάσεις υψηλής προτεραιότητας [25]. Ένας τέτοιος χρονοπρογραμματιστής αυστηρής προτεραιότητας απεικονίζεται στο Σχήμα 4-7:



Σχήμα 4-7: Χρονοπρογραμματιστής Αυστηρής Προτεραιότητας

Ο μηχανισμός κατηγοριοποίησης ταξινομεί τα εισερχόμενα πακέτα σύμφωνα με τις προτεραιότητες τους σε ουρές *FIFO*. Αυτές εξυπηρετούνται από τον πολυπλέκτη αυστηρής προτεραιότητας με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε, μετά από κάθε μεταφορά πακέτου, ο πολυπλέκτης να αρχίζει να σαρώνει τις ουρές για υπάρχοντα πακέτα από την υψηλότερη προς τη χαμηλότερη. Αυτό σημαίνει ότι όσο υπάρχουν πακέτα διαθέσιμα στην υψηλότερης προτεραιότητας ουρά, αυτή εξυπηρετείται και πακέτα σε ουρές χαμηλότερης προτεραιότητας πρέπει να περιμένουν. Η ουρά της χαμηλότερης προτεραιότητας εξυπηρετείται μόνο όταν όλες οι υπόλοιπες ουρές είναι άδειες. Εξαρτώμενη από το φορτίο των ουρών υψηλότερης προτεραιότητας, θα μπορούσε να περιμένει για πάντα. Αυτό ονομάζεται «λιμοκτονία». Η ιδέα της εκ των κάτω προσέγγισης είναι οι μεγαλύτερης προτεραιότητας ουρές να μην καταλαμβάνουν στο σύνολό τους ποτέ το 100% της χωρητικότητας της ζεύξης.

Όσον αφορά την ευκολία υλοποίησης, ασφαλώς και ο βασικός μηχανισμός *FCFS* (*First-Come-First-Served*) είναι με διαφορά ο πιο απλός. Αυτός είναι και ο λόγος που ακόμα και σήμερα πολλοί εμπορικοί δρομολογητές υιοθετούν τον συγκεκριμένο μηχανισμό. Είναι γνωστό βέβαια ότι ο μηχανισμός αυτός μπορεί να υποστηρίξει μόλις ένα όριο καθυστέρησης για όλες τις ροές κίνησης και, για το λόγο αυτό, είναι απίθανο να γίνει αποδεκτός στα μελλοντικά δίκτυα επόμενης γενιάς στα οποία θα υποστηρίζονται πολλαπλές κλάσεις υπηρεσίας με διαφορετικά επιθυμητά χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας. Ο μηχανισμός χρονοπρογραμματισμού *EDF* (*Earliest Deadline First*) από την άλλη, ο οποίος πάντα επιλέγει προς εκπομπή το πακέτο με την νωρίτερη προθεσμία, είναι σε θέση να υποστηρίζει

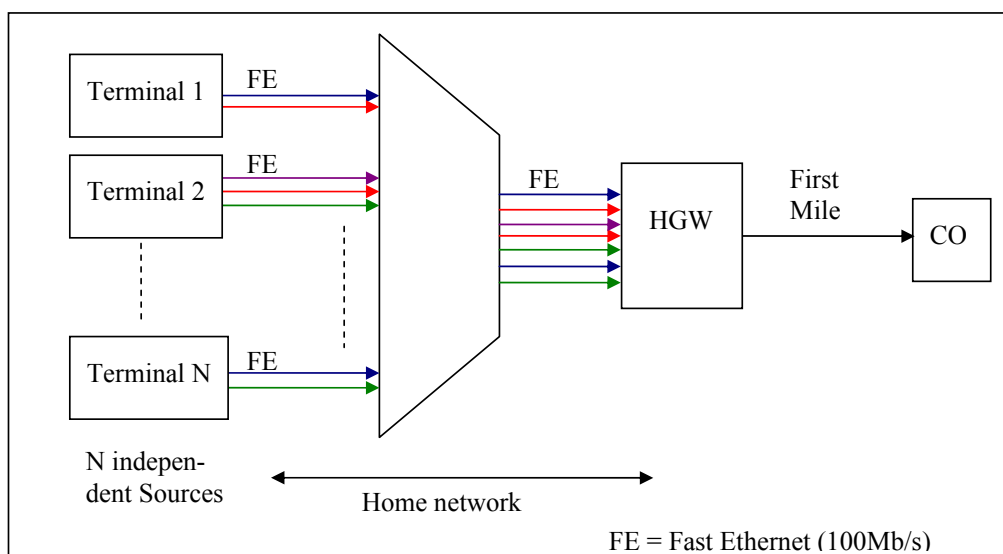
διαφορετικά όρια καθυστέρησης για τις διαφορετικές κλάσεις υπηρεσίας. Παρ' όλα αυτά, παραμένει πολύπλοκος ως προς την υλοποίησή του καθώς περιλαμβάνει την διαδικασία ανεύρεσης του πακέτου με την νωρίτερη προθεσμία. Απ' όσο είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε, στην σχετική βιβλιογραφία δεν έχει αποδειχθεί η εφαρμοσιμότητα του μηχανισμού *EDF*, καθώς και άλλων αντίστοιχων μηχανισμών που βασίζονται σε ταξινομημένες ουρές, σε δίκτυα υψηλής ταχύτητας και χωρητικότητας.

Τέλος, σε σχέση με την πρότασή μας για εφαρμογή μηχανισμού χρονοπρογραμματισμού αυστηρής προτεραιότητας, πρέπει να επισημανθεί η ευκολία υλοποίησής του με ένα πεπερασμένο αριθμό *FCFS* ουρών, δηλαδή με μία *FCFS* ουρά ανά επίπεδο προτεραιότητας των κλάσεων υπηρεσίας. Οι ενέργειες εισαγωγής και απομάκρυνσης πακέτων ενός χρονοπρογραμματιστή αυστηρής προτεραιότητας μπορούν να εκπληρωθούν από σταθερό αριθμό βημάτων, με την πολυπλοκότητα προγραμματισμού να παραμένει ιδιαίτερα χαμηλή. Λόγω αυτής της απλότητας λειτουργίας του, που διευκολύνει τον χρονοπρογραμματισμό πακέτων σε κόμβους υψηλής ταχύτητας, καθώς και της δυνατότητας ανάθεσης συγκεκριμένων ορίων καθυστέρησης ανά ουρά προτεραιότητας, ο μηχανισμός χρονοπρογραμματισμού αυστηρής προτεραιότητας κρίνεται επαρκής για την παρούσα εργασία και είναι αυτός που αναλύεται στη συνέχεια για την αποτίμηση της μετρικής της μεταβολής καθυστέρησης ανά κλάση υπηρεσίας.

4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ

4.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως είπαμε και στη προηγούμενη ενότητα, για να υπολογιστεί η διατεμαστική μεταβολή καθυστέρησης αρκεί να ξέρουμε την μέγιστη μεταβολή καθυστέρησης ενός κόμβου και τον αριθμό των διαδοχικών κόμβων που παρεμβάλλονται στο μονοπάτι της ροής. Γίνεται κατανοητό ότι οι κόμβοι που επιφέρουν την μεγαλύτερη μεταβολή καθυστέρησης σε ένα τέτοιο μονοπάτι ροής είναι οι κόμβοι που εμφανίζουν συμφόρηση. Τέτοιοι είναι οι κόμβοι του δικτύου στους οποίους η ζεύξη εισόδου εμφανίζει χωρητικότητα μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα της ζεύξης εξόδου. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων κόμβων στα ευρυζωνικά δίκτυα αποτελούν οι οικιακές δικτυακές πύλες στην κατεύθυνση προς το δίκτυο ευρείας περιοχής (WAN) καθώς και το σημείο εξόδου ενός πολυπλέκτη πρόσβασης προς το λεγόμενο «πρώτο μίλι» του ευρυζωνικού δικτύου. Η περίπτωση της οικιακής δικτυακής πύλης απεικονίζεται στο Σχήμα 4-8 που ακολουθεί.



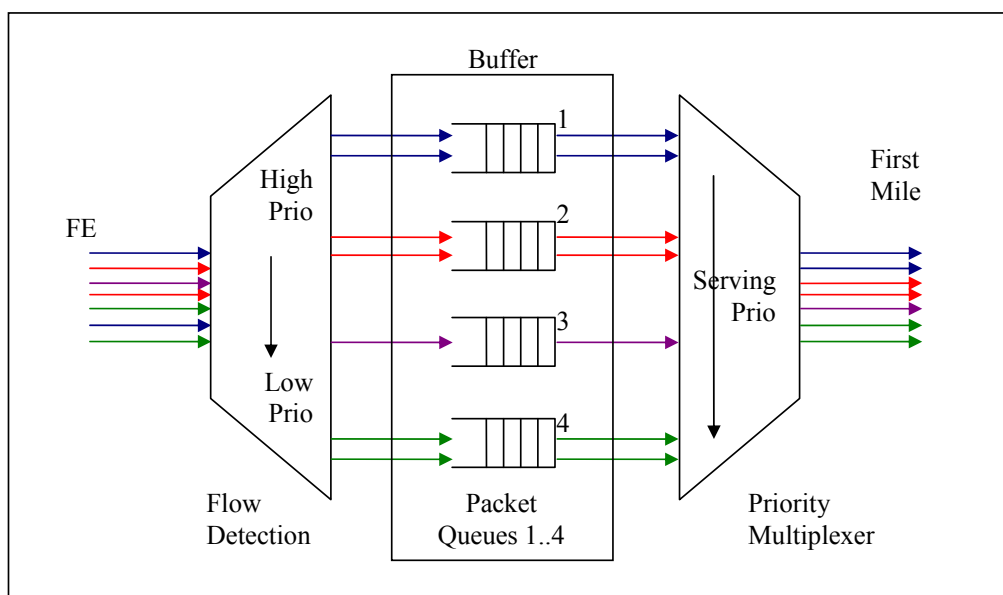
Σχήμα 4-8: Μοντέλο κίνησης στην οικιακή δικτυακή πύλη

Στην πρώτη περίπτωση, αυτή της οικιακής δικτυακής πύλης, έχουμε έναν κόμβο που λαμβάνει τηλεπικοινωνιακή κίνηση από το τοπικό οικιακό δίκτυο τυπικής χωρητικότητας 100Mbps και τη μεταφέρει στο δίκτυο ευρείας περιοχής πάνω από μία ζεύξη, οι τεχνολογίες υλοποίησης της οποίας διαθέτουν μέγιστη χωρητικότητα της τάξης των 20Mbps. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στο στον πολυπλέκτη πρόσβασης, όπου κίνηση από το δίκτυο πρόσβασης μεγάλης χωρητικότητας πρέπει να δρομολογηθεί προς τη ζεύξη μεταξύ του πολυπλέκτη και της οικιακής δικτυακής πύλης που χαρακτηρίζεται από μικρή χωρητικότητα.

Στην ενότητα αυτή αναλύουμε και υπολογίζουμε τις μετρικές ποιότητας υπηρεσίας σε αυτούς τους κόμβους κάνοντας χρήση των χαρακτηριστικών του δικτύου που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα.

4.4.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Η συνηθισμένη μέθοδος για την επιτυχή αντιμετώπιση της συμφόρησης σε κόμβους με αυτά τα χαρακτηριστικά είναι να διαχωρίζονται οι ροές των πακέτων σύμφωνα με την κλάση ποιότητας υπηρεσίας και να προωθούνται σε διαφορετικές ουρές, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο Σχήμα 4-9. Σε συμφωνία με τα γενικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου δικτύου που αναφέρθηκαν προηγουμένα, οι ουρές αυτές εξυπηρετούνται από έναν χρονοπρογραμματιστή αυστηρής προτεραιότητας. Με βάση την πρόταση της εργασίας για τις 4 κλάσεις διαφορετικές κλάσεις υπηρεσίας, εισάγονται και υλοποιούνται 4 ουρές προτεραιότητας στα σημεία ενδιαφέροντος των κόμβων αυτών.



Σχήμα 4-9: Μοντέλο εξυπηρέτησης κίνησης στο σημείο εξόδου του κόμβου

Με έναν τέτοιο διαχωρισμό της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και τις ουρές να εξυπηρετούνται από έναν χρονοπρογραμματιστή αυστηρής προτεραιότητας, υφίστανται 3 διαφορετικοί μηχανισμοί που συνδράμουν στην συνολική μεταβολή καθυστέρησης του κόμβου:

1. Μέσα σε κάθε ουρά εξυπηρέτησης, μεταβολή καθυστέρησης δημιουργείται όταν πολυπλέκονται πακέτα κίνησης της ίδιας προτεραιότητας αλλά από διαφορετικές ροές.
2. Ουρές χαμηλότερης προτεραιότητας πρέπει να περιμένουν την εξυπηρέτηση των πακέτων των ουρών των κλάσεων μεγαλύτερης προτεραιότητας.
3. Ένα πακέτο που αφίκεται σε μία άδεια ουρά, ακόμα και αν έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα από το πακέτο που εξυπηρετείται την ίδια στιγμή, θα πρέπει να περιμένει για την ολοκλήρωση της εξυπηρέτησης αυτού του πακέτου. Η επιπρόσθετη καθυστέρηση οφείλεται στο ότι η εξυπηρέτηση δεν διακόπτεται.

Με βάση τους μηχανισμούς αυτούς, εξάγουμε τις υπολογιστικές μεθόδους έτσι ώστε να λάβουμε τον μέγιστο αριθμό επιτρεπτών ροών για κάθε κλάση υπηρεσίας του προτεινόμενου δικτύου [26]. Για το σκοπό αυτό εισάγονται οι ακόλουθες μεταβλητές:

$LinkRate$	χωρητικότητα ζεύξης σε b/s
n_i	αριθμός των ανεξάρτητων ροών στην κλάση κίνησης i
e_i	κοινή απαίτηση εύρους ζώνης κάθε ροής που ανήκει στην κλάση κίνησης i

- SegmentSize* δίνεται από το μηχανισμό κατάτμησης και είναι 53 bytes για την τεχνολογία *ATM*, 75 bytes για την τεχνολογία *WiMAX* και 1500 bytes για την τεχνολογία *Ethernet*
- BurstSize_i* μέγεθος ριπής για την κλάση κίνησης *i*
- MinPacketSize* ελάχιστο μέγεθος πακέτου (ορίζεται από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται)
- MaxDelay_i* η μέγιστη καθυστέρηση στο σημείο εξόδου που βιώνει ένα πακέτο της κλάσης κίνησης *i*
- MinDelay_i* η ελάχιστη καθυστέρηση στο σημείο εξόδου που βιώνει ένα πακέτο της κλάσης κίνησης *i*
- MaxJitter_i* η μέγιστη μεταβολή καθυστέρησης που βιώνει ένα πακέτο της κλάσης κίνησης *i*
- QueueSize_i* το μέγεθος της ουράς προτεραιότητας της κλάσης κίνησης *i*

Είναι γνωστό ότι η μεταβολή καθυστέρησης ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης καθυστέρησης της προώθησης του πακέτου. Όσον αφορά την κλάση κίνησης με την υψηλότερη προτεραιότητα, η μέγιστη καθυστέρηση προκύπτει για το πακέτο της κλάσης που πρέπει να περιμένει την εξυπηρέτηση ενός τεμαχίου (στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μηχανισμός κατάτμησης) μίας ουράς με χαμηλότερη προτεραιότητα και, ακόμα, την μετάδοση n_1 ριπών πακέτων της ουράς της ίδιας προτεραιότητας, συμπεριλαμβανομένου και του ίδιου πακέτου:

$$MaxDelay_1 = (SegmentSize + n_1 \times BurstSize_1) / LinkRate \quad (1)$$

Στην αντίθετη περίπτωση που όλες οι ουρές είναι άδειες, η ελάχιστη καθυστέρηση προκύπτει ίση με την καθυστέρηση μετάδοσης ενός πακέτου της ροής με το ελάχιστο μέγεθος:

$$MinDelay_1 = (1 \times MinPacketSize) / LinkRate \quad (2)$$

Η διαφορά μεταξύ των προηγούμενων τιμών είναι η μέγιστη μεταβολή καθυστέρησης που μπορεί να βιώσει ένα πακέτο της υψηλότερης προτεραιότητας:

$$MaxJitter_1 = MaxDelay_1 - MinDelay_1 \Rightarrow$$

$$MaxJitter_1 = \frac{(SegmentSize + n_1 \times BurstSize_1 - MinPacketSize)}{LinkRate} \quad (3)$$

Με χρήση ενός προκαθορισμένου ορίου για τη μέγιστη μεταβολή καθυστέρησης που θα μπορούσε να βιώσει ένα πακέτο της υψηλότερης προτεραιότητας, μπορούμε να επιλύσουμε

την προηγούμενη εξίσωση για να λάβουμε τον μέγιστο αριθμό των ροών της πρώτης κλάσης κίνησης που θα πρέπει να επιτραπούν στον κόμβο:

$$n_1 \leq \frac{MaxJitter_1 \times LinkRate + MinPacketSize - SegmentSize}{BurstSize_1} \quad (4)$$

Όσον αφορά τις υπόλοιπες κλάσεις υπηρεσίας, μία απλοποιημένη αλλά πραγματιστική πρόταση θα ήταν να αντικαταστήσουμε τον όρο $LinkRate$ της ανισότητας (4) με τον όρο $LinkRate - SumHigherPriorityRates$, αφού η ουρά της συσχετιζόμενης χαμηλότερης προτεραιότητας εξυπηρετείται με αυτόν τον υπολειπόμενο ρυθμό εξυπηρέτησης. Κατά συνέπεια, με την αρχική αξίωση ότι όλες οι ροές που ανήκουν στην ίδια κλάση κίνησης απαιτούν το ίδιο εύρος ζώνης, λαμβάνουμε την γενικευμένη ανισότητα για τον μέγιστο αριθμό επιτρεπτών ροών στο σύστημα για κάθε μία από τις υπόλοιπες κλάσεις τηλεπικοινωνιακής κίνησης του προτεινόμενου δικτύου:

$$n_i \leq \left(MaxJitter_i \times \left[LinkRate - \sum_{j=1}^{i-1} (n_j \times e_j) \right] + MinPacketSize - SegmentSize \right) / BurstSize_i \quad (5)$$

Τέλος, για την διαστασιοποίηση των ουρών προτεραιότητας για τις διάφορες κλάσεις υπηρεσίας μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ακόλουθη σχέση:

$$QueueSize_i = n_i \times BurstSize_i$$

Για την ουρά της υψηλότερης προτεραιότητας, χρησιμοποιώντας το μέγιστο που προκύπτει από την ανισότητα (4), παίρνουμε:

$$QueueSize_1 = MaxJitter_1 \times LinkRate + MinPacketSize - SegmentSize$$

Όσον αφορά τις υπόλοιπες κλάσεις υπηρεσίας, υιοθετώντας την πραγματιστική πρόταση για τον υπολογισμό των ανωτάτων ορίων ροών (5), λαμβάνουμε την γενικευμένη σχέση υπολογισμού του μεγέθους της ουράς προτεραιότητας για κάθε μία από τις υπόλοιπες κλάσεις τηλεπικοινωνιακής κίνησης του προτεινόμενου ολοκληρωμένου πλαισίου:

$$QueueSize_i = MaxJitter_i \times \left[LinkRate - \sum_{j=1}^{i-1} (n_j \times e_j) \right] + MinPacketSize - SegmentSize$$

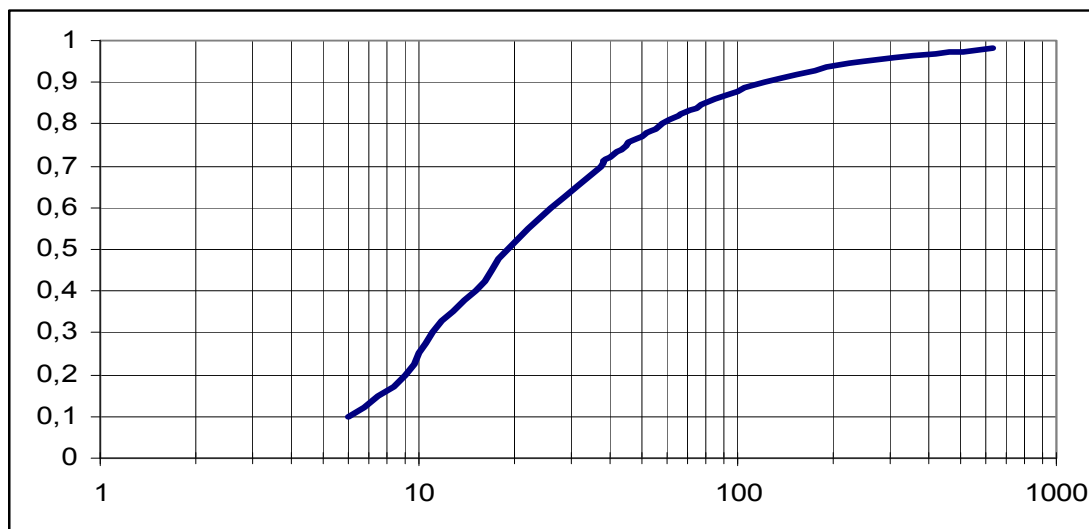
4.4.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΤΡΕΠΤΩΝ ΡΟΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ

Με δεδομένο τον καθορισμό συγκεκριμένων μεγίστων τιμών ριπής πακέτων και μεταβολής καθυστέρησης για κάθε κλάση υπηρεσίας, τα προτεινόμενα μεγέθη ουρών προτεραιότητας μπορούν να προκύψουν από τις προηγούμενες αναλυτικές σχέσεις για προκαθορισμένο μηχανισμό κατάτμησης και για διάφορους ρυθμούς εξυπηρέτησης. Τα

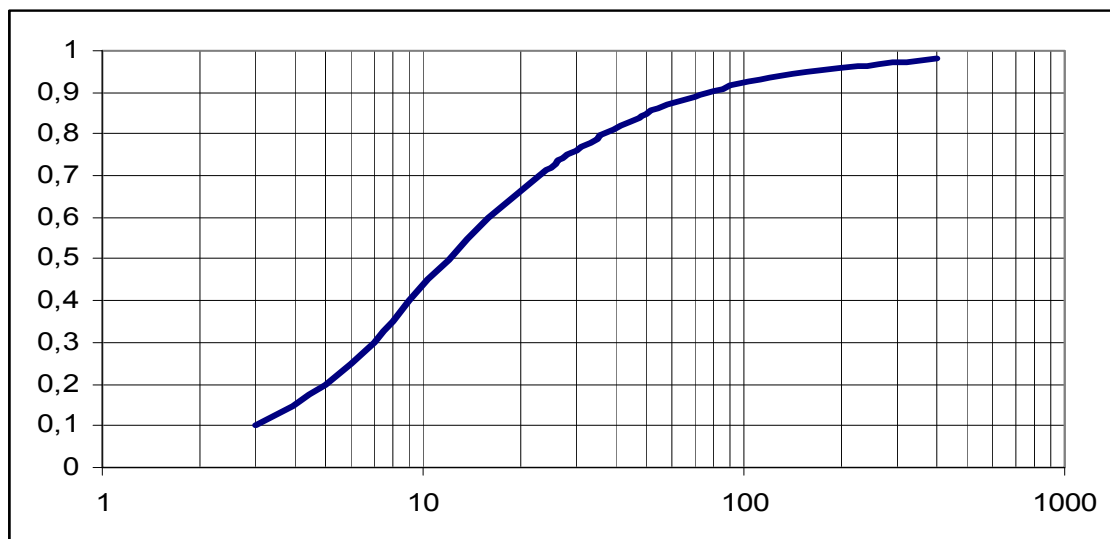
μεγέθη των ουρών καθορίζουν τον μέγιστο επιτρεπτό αριθμό ανεξαρτήτων ροών μίας συγκεκριμένης κλάσης υπηρεσίας με μηδενική πιθανότητα απωλειών.

Παρ' όλα αυτά, εκτός από την καθαρά ντετερμινιστική προσέγγιση, υπάρχει και η στατιστική εικόνα που υποστηρίζει ότι για τιμές επιτρεπτών ροών μεγαλύτερες από αυτές που προκύπτουν από τις προηγούμενες αναλυτικές σχέσεις, είναι όλο και πιο απίθανο για όλο και μεγαλύτερο αριθμό ανεξαρτήτων πηγών τηλεπικοινωνιακής κίνησης το σενάριο της ταυτόχρονης αποστολής πακέτων. Αυτό σημαίνει ότι η ουρά προτεραιότητας θα μπορούσε να υποστηρίξει μεγαλύτερο αριθμό ροών από τις μέγιστες τιμές που προκύπτουν από τις προηγούμενες σχέσεις με το κόστος μίας αυξημένης πιθανότητας απωλειών. Επιπροσθέτως, για ένα μέγιστο επιτρεπτό ρυθμό απωλειών, υπάρχει ένα μέγιστο όριο συνολικού φορτίου της ουράς προτεραιότητας (Φορτίο Ουράς Προτεραιότητας / Συνολική Χωρητικότητα Εξυπηρέτησης Κόμβου) που εξαρτάται από το στατιστικό μοντέλο που υιοθετείται.

Για δεδομένη πιθανότητα απωλειών, το μέγιστο αθροιστικό επιτρεπτό φορτίο για θεωρητικά άπειρο αριθμό ροών ($n_i \rightarrow \infty$) υπολογίστηκε με χρήση στατιστικού μοντέλου $M/D/1$. Τα αποτελέσματα για πιθανότητες απωλειών πακέτων 10^{-11} και 10^{-7} απεικονίζονται στα ακόλουθα Σχήματα 4-10 και 4-11, αντίστοιχα.



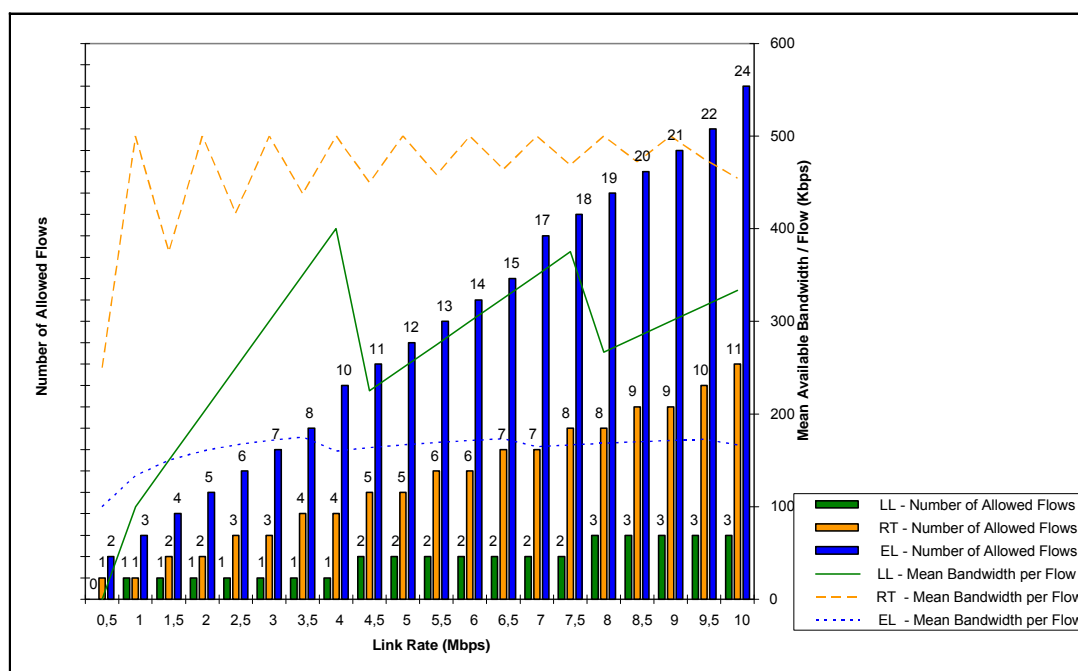
Σχήμα 4-10: Μέγιστο φορτίο ανά μέγεθος ουράς για πιθανότητα απώλειας πακέτων ίση με 10^{-11}



Σχήμα 4-11: Μέγιστο φορτίο ανά μέγεθος ουράς για πιθανότητα απώλειας πακέτων ίση με 10^{-7}

Από το γράφημα του Σχήματος 4-10 αποδεικνύεται ότι ουρά προτεραιότητας με μέγεθος ίσο με 20 φορές το μέγιστο μέγεθος ριπής πακέτων, είναι σε θέση να εξυπηρετήσει άπειρο αριθμό ανεξαρτήτων ροών κίνησης με πιθανότητα απωλειών ίση με 10^{-11} , με την προϋπόθεση ότι το συνολικό φορτίο της ουράς προτεραιότητας δεν θα ξεπεράσει το όριο του 52%. Την ίδια στιγμή από την αντίστοιχη ντετερμινιστική εκδοχή που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα προκύπτει ότι συνολικά 20 ανεξάρτητες ροές κίνησης μπορούν να μοιραστούν την ουρά προτεραιότητας με μηδενική πιθανότητα απωλειών πακέτων με την προϋπόθεση ότι το συνολικό φορτίο τους παραμένει κάτω από το 100%.

Στο ακόλουθο Σχήμα 4-12 διακρίνονται ο αριθμός των επιτρεπτών ροών για κάθε κλάση υπηρεσίας καθώς και το μέσο διαθέσιμο εύρος ζώνης ανά ροή ακολουθώντας το ντετερμινιστικό μοντέλο ανάλυσης. Το συγκεκριμένο γράφημα μπορεί να διαβαστεί ως εξής: για τεχνολογία πρόσβασης με ρυθμό ζεύξης εξόδου ίσο με 2Mbps, μπορούν να υποστηριχθούν μέχρι και 1, 2 και 5 ανεξάρτητες ροές κίνησης για τις τρεις πρώτες κλάσεις υπηρεσίας, αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, η μία επιτρεπτή ροή της κλάσης υψηλότερης προτεραιότητας *Low Latency* μπορεί να κάνει χρήση μέχρι και 200Kbps του εύρους ζώνης, οι ροές της κλάσης δεύτερης προτεραιότητας μπορούν να χρησιμοποιήσουν συνολικά μέχρι και $2 \cdot 500$ Kbps, ενώ, τέλος, οι ροές της κλάσης τρίτης προτεραιότητας επιτρέπεται να χρησιμοποιήσουν μέχρι και $5 \cdot 160$ Kbps συνολικά από το διαθέσιμο εύρος ζώνης του κόμβου.



Σχήμα 4-12: Επιτρεπτές ροές ανά κλάση υπηρεσίας

Με μία πιο προσεκτική ματιά στο γράφημα συμπεραίνεται ότι για χωρητικότητα ζεύξης μέχρι και 3,5Mbps, ο ντετερμινιστικός τρόπος προσέγγισης θα πρέπει να εφαρμοστεί σε όλες τις κλάσεις υπηρεσίας (αριθμός επιτρεπτών ροών <10). Ακόμα, φαίνεται ότι για ζεύξεις με διαθέσιμη χωρητικότητα από 4Mbps έως και 8Mbps, η στατιστική ανάλυση θα μπορούσε να είναι αποτελεσματική μόνο για την κλάση τρίτης προτεραιότητας, ενώ, τέλος, για την κλάση υψηλής προτεραιότητας δεν μπορεί παρά να εφαρμοστεί μόνο η ντετερμινιστική μέθοδος.

Παρά το γεγονός ότι η εφαρμογή στατιστικής ανάλυσης θα επέτρεπε την αποδοχή μεγαλύτερου αριθμού ροών, εμφανίζει ένα μειονέκτημα σε σχέση με την πιθανότητα απωλειών. Συγκεκριμένα, καθώς το προτεινόμενο πλαίσιο στοχεύει σε ιδιαίτερα χαμηλές τιμές πιθανότητας απωλειών (της τάξης του 10^{-11}) ακόμα και για εφαρμογές σχετικά ανεκτικές σε απώλειες, το επιτρεπτό φορτίο ανά ουρά προτεραιότητας θα έπρεπε να περιοριστεί σημαντικά σε ζεύξεις μικρής χωρητικότητας που παρατηρούνται στους κόμβους συμφόρησης. Αυτό θα οδηγούσε σε σύγκρουση ανάμεσα στο στόχο του ρυθμού απωλειών και στο στόχο της δέσμευσης εύρους ζώνης για κάθε κλάση υπηρεσίας. Για παράδειγμα, για μία ανερχόμενη ζεύξη χωρητικότητας ίσης με 10Mbps, η κλάση δεύτερης προτεραιότητας, με στόχο δέσμευσης εύρους ζώνης ίσο με 50%, δηλαδή 5Mbps, θα έπρεπε να περιοριστεί στα 3 Mbps έτσι ώστε να είναι σε θέση να υποστηρίξει άπειρο αριθμό ροών με ταυτόχρονη επίτευξη ρυθμού απωλειών ίσου με 10^{-11} . Για να ξεπεραστεί αυτό προτείνουμε και

υιοθετούμε στη συνέχεια της εργασίας την ντετερμινιστική προσέγγιση για όλες τις κλάσεις υπηρεσίας με περιορισμό του επιτρεπτού αριθμού ανεξαρτήτων ροών.

4.4.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

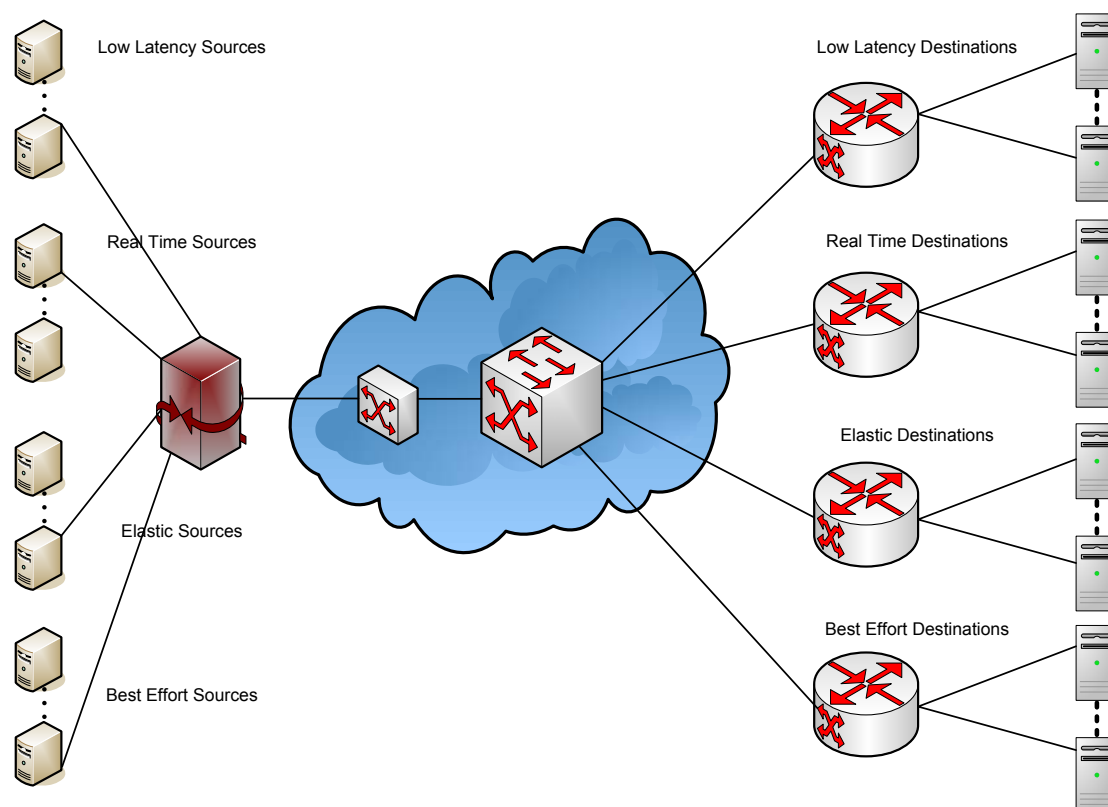
Με χρήση του δικτυακού εργαλείου προσομοίωσης *LBNL Network Simulator (ns-2)* [27], προχωρήσαμε στην πρώτη ομάδα μετρήσεων προσομοίωσης προς επιβεβαίωση της αναλυτικής προσέγγισης που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η τεχνολογία ATM επιλέχθηκε για να ικανοποιήσει τον μηχανισμό κατάτμησης στις αργές γραμμές πρόσβασης. Προς αυτή τη κατεύθυνση, ένα δομοστοιχείο που προτάθηκε παλαιότερα [28] ενημερώθηκε έτσι ώστε να ικανοποιεί τις ανάγκες και τα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου πλαισίου εφαρμογής.

Η μετάφραση των προτεινόμενων κλάσεων υπηρεσίας σε ATM κλάσεις λαμβάνει χώρα μέσα στο δομοστοιχείο του κόμβου συμφόρησης. Ο Πίνακας 4-7 που ακολουθεί, περιλαμβάνει την απεικόνιση των προτεινόμενων παραμέτρων κίνησης σε χαρακτηριστικά κίνησης ATM:

Traffic Class	Traffic Parameter	ATM Traffic Class	ATM Parameters
Low Latency	Reserved Rate (RR)	CBR	PCR=RR
Real Time	Reserved Rate (RR)	RT-VBR	SCR=RR, PCR=3xRR MBS=1500B, no tagging
Elastic	Reserved Rate (RR)	NRT-VBR	MCR=RR, PCR=3xRR MBS=8.760B, tagging enabled
Best Effort	N/A	UBR	N/A

Πίνακας 4-7: Απεικόνιση παραμέτρων κίνησης σε κίνηση ATM

Η τοπολογία δικτύου που χρησιμοποιήσαμε για την μελέτη θεμάτων ποιότητας υπηρεσίας στα πειράματά μας φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4-13:



Σχήμα 4-13: Τοπολογία δικτύου προσομοίωσης

Η διαφοροποιημένη κίνηση IP παράγεται από πεπερασμένο αριθμό πηγών μέσα στο οικιακό δίκτυο (αριστερή πλευρά της τοπολογίας) και συναθροίζεται σε έναν μοναδικό κόμβο δικτύου, την οικιακή πύλη, που αποτελεί και τον κόμβο συμφόρησης. Το δομοστοιχείο της οικιακής πύλης αναλαμβάνει να τεμαχίσει τα εισερχόμενα πακέτα IP κάνοντας χρήση του πρωτοκόλλου AAL5 και να προωθήσει τα παραχθέντα τμήματα ATM μήκους 53 bytes στο κύριο λειτουργικό δομοστοιχείο του κόμβου. Το τελευταίο αποτελεί και το σημείο στο οποίο η τηλεπικοινωνιακή κίνηση αρχικά εναρμονίζεται με την προηγούμενη διαδικασία αντιστοίχισης και, στη συνέχεια, προωθείται σε ένα από τα 4 PVCs της ζεύξης εξόδου. Κάθε ένα από τα 4 PVCs δένεται αυστηρά με μία από τις 4 ATM κλάσεις υπηρεσίας του προηγούμενου πίνακα.

Ένας χρονοπρογραμματιστής αυστηρής προτεραιότητας, όπως ορίζει και το προτεινόμενο ολοκληρωμένο πλαίσιο, χρησιμοποιείται για να εξυπηρετήσει την κίνηση στην μικρής χωρητικότητας ζεύξη πρόσβασης. Η κίνηση οδηγείται στον κόμβο πολυπλεξίας του δικτύου πυρήνα και στη συνέχεια στον αποκλειστικό ακραίο εξυπηρετητή προορισμού. Στην πειραματική τοπολογία υπάρχει ένας τέτοιος εξυπηρετητής για κάθε μία από τις κλάσεις υπηρεσίας που υποστηρίζονται. Όλοι αυτοί επανασυναρμολογούν τα εισερχόμενα τμήματα

ATM σε πακέτα IP τα οποία και στέλνουν στους αντίστοιχους προορισμούς κίνησης στην δεξιά πλευρά της τοπολογίας που έχει απεικονιστεί.

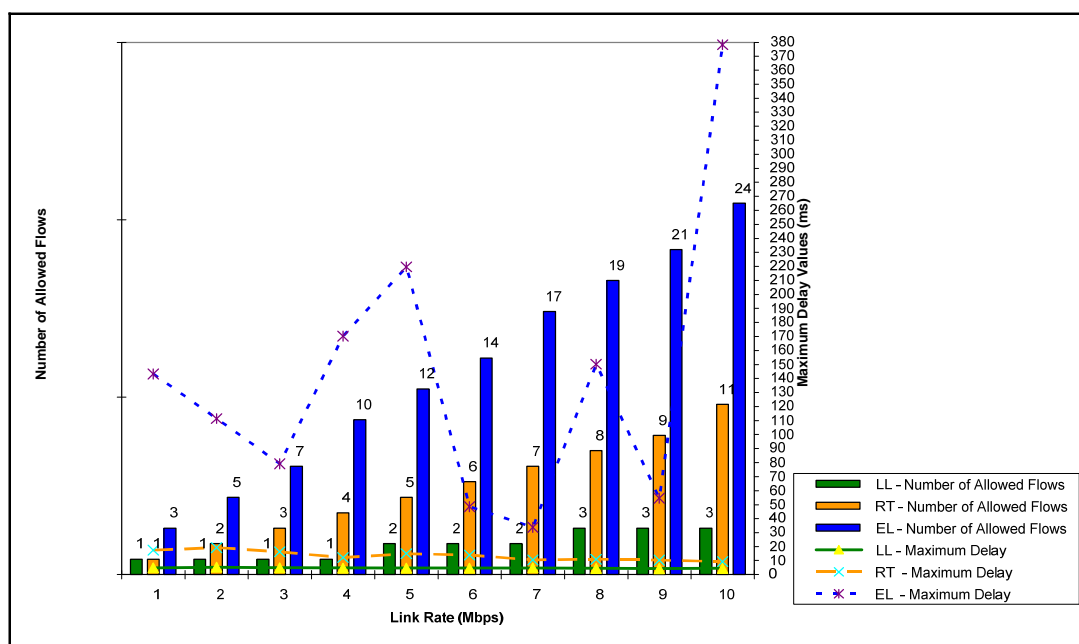
Ο αριθμός των ανεξάρτητων πηγών σε κάθε κλάση τηλεπικοινωνιακής κίνησης έχει προκύψει από τις προηγούμενες αναλυτικές σχέσεις της συνολικής μας πρότασης. Όλες οι ζεύξεις μεταξύ των πηγών και του κόμβου συμφόρησης (δικτυακή οικιακή πύλη), καθώς και αυτές μεταξύ των ακραίων εξυπηρετητών προορισμού και των κόμβων τελικού προορισμού, ρυθμίστηκαν να έχουν χωρητικότητα ίση με 100Mbps. Η προβληματική ζεύξη συμφόρησης μεταξύ της οικιακής δικτυακής πύλης και του πολυπλέκτη του δικτύου πυρήνα τέθηκε στα πειράματά μας να έχει χωρητικότητα από 1Mbps έως και 10Mbps. Οι ζεύξεις, τέλος, μεταξύ του πολυπλέκτη και των εξυπηρετητών προορισμού ήταν χωρητικότητας ίσης με 1Gbps, έτσι ώστε να μην εισαγάγουν περαιτέρω καθυστέρηση.

Οι πηγές τηλεπικοινωνιακής κίνησης που χρησιμοποιήθηκαν, διαφοροποιήθηκαν έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών υποστηριζόμενων εφαρμογών χρήστη:

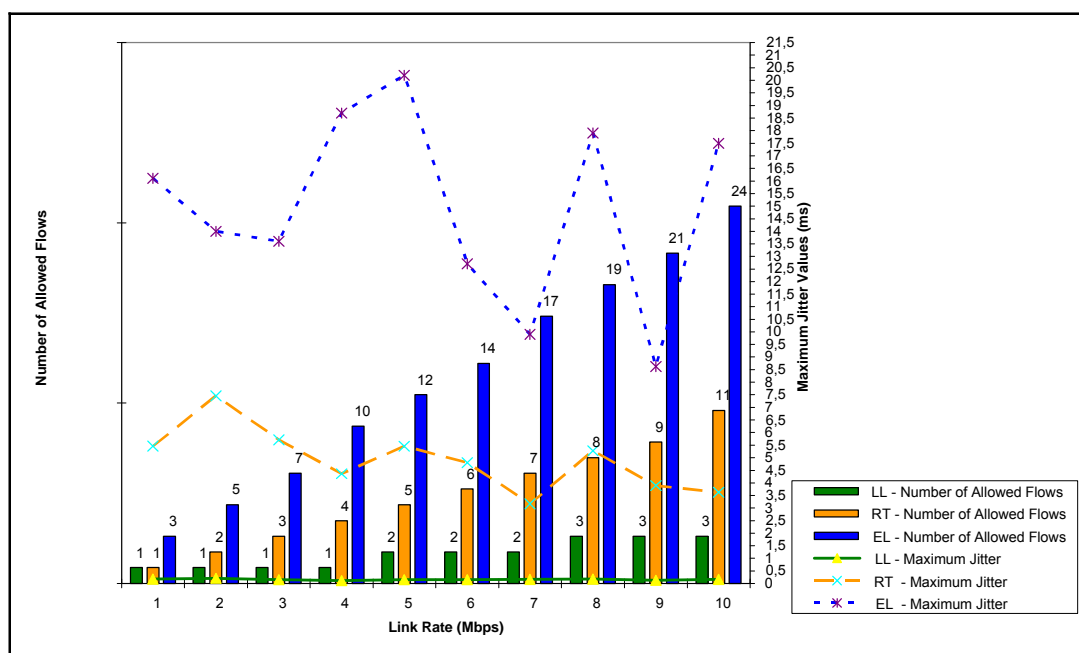
1. Οι πηγές κίνησης πρώτης προτεραιότητας παρήγαγαν κίνηση *CBR* με χρήση *UDP* πράκτορα μεταφοράς.
2. Οι πηγές κίνησης δεύτερης προτεραιότητας παρήγαγαν κίνηση *VBR* με χρονικές περιόδους *On/Off* βασισμένες σε εκθετική κατανομή. *UDP* πράκτορας χρησιμοποιήθηκε και εδώ για την μεταφορά των δεδομένων.
3. Τέλος, οι πηγές κίνησης τρίτης και τέταρτης προτεραιότητας δημιούργησαν κίνηση *VBR* με χρήση *TCP* πράκτορα μεταφοράς.

Οι αθροιστικοί ρυθμοί για κάθε κλάση κίνησης τέθηκαν έτσι ώστε να ικανοποιούν τον ποιοτικό κανόνα 10%-50%-40% για τις τρεις πρώτες κλάσεις κίνησης. Η κίνηση της κλάσης τέταρτης προτεραιότητας ορίστηκε ίση με το 10% του συνολικού ρυθμού της ζεύξης εξόδου, σαν κίνηση παρασκηνίου έτσι ώστε να επιτευχθεί 100% χρησιμοποίηση της ζεύξης πρόσβασης του πρώτου μιλίου.

Με βάση τις παραπάνω ρυθμίσεις δικτύου, έγινε μελέτη των μεγίστων τιμών καθυστέρησης και μεταβολής καθυστέρησης για τις προτεινόμενες 4 κλάσεις υπηρεσίας για διάφορες τιμές χωρητικότητας της ζεύξης συμφόρησης της οικιακής δικτυακής πύλης. Η μετρική της μεταβολής καθυστέρησης παρατηρήθηκε στην ζεύξη συμφόρησης, ενώ, αντίθετα, η καθυστέρηση μελετήθηκε μεταξύ των πηγών κίνησης και των αντίστοιχων κόμβων προορισμού. Τα αποτελέσματα για τις 3 πρώτες κλάσεις υπηρεσίας απεικονίζονται στα ακόλουθα γραφήματα:



Σχήμα 4-14: Μέγιστη διατεματική καθυστέρηση για τις προτεινόμενες κλάσεις



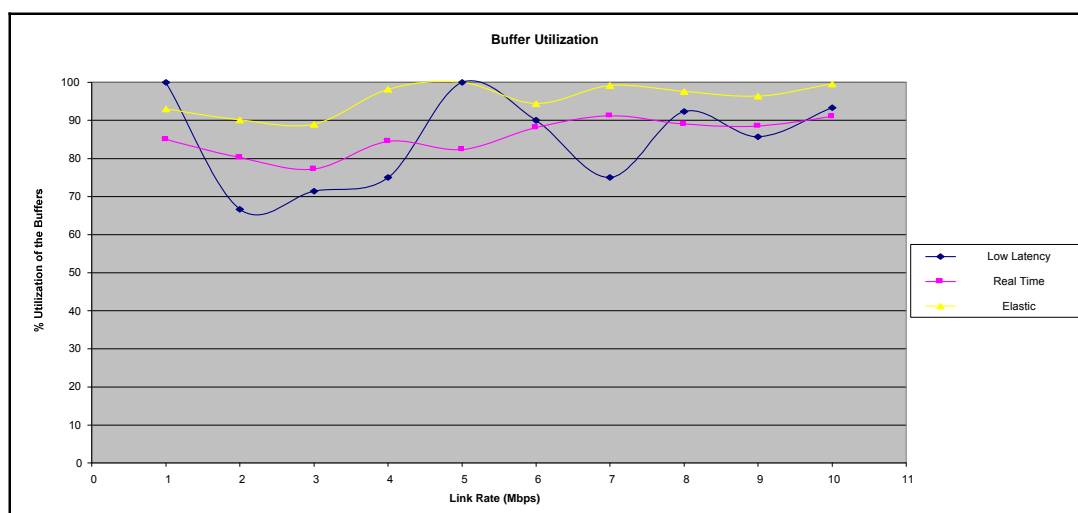
Σχήμα 4-15: Μέγιστη μεταβολή καθυστέρησης για τις προτεινόμενες κλάσεις

Όπως αναμενόταν, οι τιμές μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης που προκύπτουν για την πρώτη προτεραιότητας κλάση υπηρεσίας είναι αξιοσημείωτα χαμηλές (μικρότερες από 0,206ms). Αυτό συμφωνεί με την απαίτηση για μέγιστη τιμή μεταβολής καθυστέρησης μικρότερη από 1ms ανά δικτυακό κόμβο για την πρώτη κλάση υπηρεσίας. Επιπροσθέτως, οι τιμές μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης για τις δύο επόμενες κλάσεις υπηρεσίας παραμένουν

σε χαμηλά επίπεδα και μέσα στα συγκεκριμένα επιτρεπτά όρια του προτεινομένου πλαισίου (χαμηλότερη τιμή από 30ms ανά κόμβο για την κλάση δεύτερης προτεραιότητας και χαμηλότερη τιμή από 900ms ανά κόμβο για την κλάση τρίτης προτεραιότητας, αντίστοιχα). Η τέταρτη και τελευταία προτεραιότητας κλάση υπηρεσίας με κίνηση βέλτιστης προσπάθειας, η οποία είναι και η μοναδική η οποία υφίσταται απώλειες πακέτων, παρουσιάζει τιμές μεταβολής καθυστέρησης που φτάνουν να είναι ίσες με μερικά δευτερόλεπτα. Το τελευταίο είναι λογικό, κυρίως λόγω του ότι το συνολικό φορτίο κίνησης των τριών κλάσεων υπηρεσίας υψηλότερης προτεραιότητας επεκτείνεται μέχρι και την χωρητικότητα της ζεύξης εξόδου.

Όσον αφορά τις καθυστερήσεις που παρατηρούνται, τα αποτελέσματα της δικτυακής προσομοίωσης δείχνουν ότι η κίνηση της κλάσης της ύψιστης προτεραιότητας υφίσταται τις μικρότερες διατεματικές καθυστερήσεις με βάση την δικτυακή τοπολογία προσομοίωσης. Η μέγιστη καθυστέρηση που παρατηρείται είναι ίση με 5,31ms, στην περίπτωση που η χωρητικότητα της ζεύξης εξόδου στον κόμβο συμφόρησης είναι ίση με 2Mbps. Οι υπόλοιπες κλάσεις υπηρεσίας παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές διατεματικής καθυστέρησης. Παρ' όλα αυτά, η κλάση κίνησης Real Time φαίνεται να ικανοποιεί την ανάγκη για χαμηλές τιμές καθυστέρησης καθώς εμφανίζει μία αποδεκτή μέγιστη τιμή καθυστέρησης ίση με 19,3ms. Όπως ήταν αναμενόμενο, η κλάση κίνησης Best Effort επιδεικνύει τις μεγαλύτερες τιμές διατεματικής καθυστέρησης.

Τέλος, στο Σχήμα 4-16 απεικονίζεται η μέγιστη χρησιμοποίηση των καταχωρητών στη ζεύξη εξόδου του κόμβου συμφόρησης για χωρητικότητες από 1Mbps έως και 10Mbps. Φαίνεται καθαρά ότι όλα τα προ-υπολογισμένα μεγέθη καταχωρητών από τους αντίστοιχους αναλυτικούς τύπους ικανοποιούνται απόλυτα. Οι μέγιστες τιμές των ουρών των τριών κλάσεων υψηλότερης προτεραιότητας δεν ξεπερνούν ποτέ το μέγεθός τους και, κατά συνέπεια, δεν παρατηρείται απώλεια πακέτων για τις κλάσεις αυτές. Από την άλλη μεριά, αποτρέπεται οποιαδήποτε άσκοπη δέσμευση καταχωρητή. Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν την εφαρμοσιμότητα των σχέσεων που προέκυψαν στην προηγούμενη ενότητα για τον καθορισμό των μεγεθών των καταχωρητών.



Σχήμα 4-16: Χρησιμοποίηση καταχωρητών στην ζεύξη εξόδου

4.4.5 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΟΜΒΟΥ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

4.4.5.1 Πιθανότητα Φραγής και Διεκπεραιωτικότητα

Με βάση τους περιορισμούς στον μέγιστο αριθμό των ροών κάθε κλάσης κίνησης που προκύπτει από την απαίτηση για μέγιστη μεταβολή καθυστέρησης και την ντετερμινιστική ανάλυση που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, αποκτά ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον η αποτίμηση της απόδοσης ενός τέτοιου κόμβου συμβατού με τις προδιαγραφές του προτεινόμενου δικτύου. Ο χαρακτηρισμός της απόδοσης θα γίνει σε σχέση με δύο τυπικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τους κόμβους ενός δικτύου, όπως είναι η πιθανότητα φραγής και η διεκπεραιωτικότητα, και θα οδηγήσει στην καλύτερη κατανόηση της αλληλοσυσχέτισης των διαφόρων παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας.

Όπως φάνηκε και στην προηγούμενη ενότητα, σε οποιονδήποτε κόμβο του δικτύου που ακολουθεί τις προδιαγραφές του προτεινόμενου μοντέλου και εμφανίζει χαρακτηριστικά συμφόρησης, οι κλήσεις για εξυπηρέτηση ροών περιορίζονται από την απαίτηση για συγκράτηση της μεταβολής καθυστέρησης κάτω από ένα συγκεκριμένο ανώτατο όριο, διαφορετικό για κάθε κλάση κίνησης. Είναι αναμενόμενο το όριο αυτό να είναι ιδιαίτερα αυστηρό για την κλάση πρώτης προτεραιότητας και να γίνεται περισσότερο ελαστικό όσο προχωράμε σε κλάσεις χαμηλότερης προτεραιότητας που εμφανίζουν μικρότερες επιδιωκόμενες τιμές μεταβολής καθυστέρησης. Κατά συνέπεια, έχουμε μία ιδιαίτερη πολιτική αποδοχής των ροών κίνησης που διαφέρει από τις κλασικές πολιτικές αποδοχής. Η κλασικότερη και, ταυτόχρονα, στοιχειώδης είναι η πολιτική πλήρους συμμερισμού [29-30], στην οποία οι ροές γίνονται αποδεκτές εφόσον υπάρχει επαρκής αχρησιμοποίητη χωρητικότητα στο σύστημα. Εντούτοις, η μέθοδος για την εξαγωγή των πιθανοτήτων φραγής

κλήσεων καθώς και των υπολοίπων παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας παραμένει και στις δύο περιπτώσεις ίδια.

Στην ενότητα αυτή, εξάγουμε τις πιθανότητες φραγής κλήσεων που βιώνουν οι διαφορετικές κλάσεις κλήσεων με χρήση της πολιτικής για παροχή εξασφαλίσεων μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης. Για χάρη της γενικότητας των αναλυτικών σχέσεων που θα προκύψουν, θεωρούμε ότι έχουμε M κλάσεις κλήσεων. Στην περίπτωση του προτεινόμενου δικτύου της εργασίας οι κλάσεις είναι 4. Η απαίτηση των κλήσεων για εύρος ζώνης σε κάθε κλάση είναι δεδομένη, αλλά η απαίτηση μπορεί να διαφέρει από κλάση σε κλάση. Ας υποθέσουμε ότι η απαίτηση ενός χρήστη της κλάσης i είναι e_i μονάδες εύρους ζώνης (BWU), και ότι η χωρητικότητα της ζεύξης είναι C μονάδες εύρους ζώνης. Δεχόμαστε επίσης ότι οι κλήσεις της κλάσης $i, i=1,2,\dots,M$ αφικνούνται ακολουθώντας μία ανεξάρτητη κατανομή *Poisson* με ρυθμό λ_i κλήσεις ανά δευτερόλεπτο και ότι η διάρκεια της κράτησης κλήσης των κλήσεων της κλάσης i ακολουθεί ανεξάρτητη και εκθετική κατανομή με μέσο ρυθμό $1/\mu_i$ sec. Θεωρούμε ότι δεν υπάρχει ουροποίηση των κλήσεων. Κατά συνέπεια, η απόφαση για την αποδοχή ή την απόρριψη μίας κλήσης πρέπει να παρθεί άμεσα με την άφιξη της κλήσης. Επίσης, η υπόθεση ότι κάθε χρήστης της κλάσης i απαιτεί e_i μονάδες εύρους ζώνης είναι πολύ γενική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος όσο και σε δίκτυα μεταγωγής πακέτου, όπως είναι το προτεινόμενο δίκτυο.

Δηλώνουμε την κατάσταση του συστήματος με χρήση ενός διανύσματος από M στοιχεία (n_1, n_2, \dots, n_M) τέτοια ώστε το στοιχείο n_i να αναπαριστά τον αριθμό των ενεργών χρηστών της κλάσης i στο σύστημα. Έστω ότι $\{X(t); t \geq 0\}$ αναπαριστά την κατάσταση του συστήματος όπως εξελίσσεται στο χρόνο. Προκύπτει έτσι ότι το $X(t)$ αποτελεί μία αλυσίδα *Markov* συνεχούς χρόνου υπό την πολιτική αποδοχής κλήσεων σε κάποιον κόμβο του δικτύου [31]. Περισσότερα για την υιοθέτηση θεωρίας διαδικασιών *Markov* για την ανάλυση των προβλημάτων της παρούσας διατριβής θα δοθούν στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

Ορίζουμε το σύνολο S όλων των δυνατών καταστάσεων ως

$$S = \left\{ n = (n_1, n_2, \dots, n_M) : \sum_{i=1}^M n_i e_i \leq C \text{ και } n_i \in \mathbb{Z}^+ \text{ με } i=1,2,\dots,M \right\}$$

όπου \mathbb{Z}^+ το σύνολο των μη αρνητικών ακεραίων. Το σύνολο S περιέχει όλες τις πιθανές καταστάσεις έτσι ώστε η συνολική απαίτηση των ενεργών χρηστών για εύρος ζώνης να μη ξεπερνά το εύρος ζώνης της ζεύξης. Παρ' όλα αυτά, οι περιορισμοί που επιβάλλονται από τις ανισότητες (4) και (5) δεν έχουν περιληφθεί στον προηγούμενο χώρο καταστάσεων. Θα εισαχθούν όμως στην ακόλουθη διατύπωση των ρυθμών μετάβασης της παραγόμενης αλυσίδας *Markov* και θα οδηγήσουν στον ορισμό του περιορισμένου χώρου καταστάσεων του δικτύου S^* .

Για ευκολία της περιγραφής, ορίζουμε ως δ_i το διάστημα από M στοιχεία με μηδενικά παντού εκτός από τη θέση i όπου έχει τη μονάδα. Οι ρυθμοί μετάβασης από την κατάσταση n στην κατάσταση p , που δηλώνεται ως $q_{(n,p)}$, επηρεάζονται από τους περιορισμούς στον επιτρεπτό αριθμό των ροών, λόγω του περιορισμού της μέγιστης τιμής της μεταβολής καθυστέρησης για κάθε κλάση κίνησης, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην γίνεται αποδεκτή μία καινούρια ροή στο σύστημα, και έτσι να μην έχουμε μετάβαση από την κατάσταση n στην κατάσταση p , όταν οι ακόλουθες ανισότητες δεν ισχύουν για την προκύπτουσα κατάσταση του συστήματος p :

$$p_j \leq \left(\text{MaxJitter}_j \times \left[\text{LinkRate} - \sum_{k=1}^{j-1} (p_k \times e_k) \right] + \right. \\ \left. + \text{MinPacketSize} - \text{SegmentSize} \right) \\ / \text{BurstSize}_j, \text{ for } j = 2, 3, 4 \quad (6)$$

$$p_j \leq \left(\text{MaxJitter}_j \times \text{LinkRate} + \right. \\ \left. + \text{MinPacketSize} - \text{SegmentSize} \right) \\ / \text{BurstSize}_j, \text{ for } j = 1$$

Ορίζουμε τον ανανεωμένο χώρο S^* για το προτεινόμενο δίκτυο ως την τομή του αρχικού χώρου καταστάσεων S και όλων των καταστάσεων που ικανοποιούν τις ανισώσεις (6).

Με βάση τους προηγούμενους περιορισμούς και σύμφωνα με το κλασικό $M/M/m/m$ σύστημα, οι ρυθμοί μετάβασης από την κατάσταση n στην κατάσταση p , που δηλώνεται ως $q_{(n,p)}$, δίνονται όπως ακολούθως:

$$q_{(n,p)} = \left\{ \begin{array}{l} \lambda_i, \text{ if } p = n + \delta_i \text{ and } p \in S^* \\ n_i \times \mu_i, \text{ if } p = n - \delta_i \text{ and } p \in S^* \\ 0, \text{ otherwise} \end{array} \right\} \quad (7)$$

όπου το n_i αποτελεί το στοιχείο i του διανύσματος n . Ας σημειωθεί ότι η μετάβαση από την κατάσταση n στην κατάσταση $n + \delta_i$ γίνεται με ρυθμό ίσο με τον ρυθμό άφιξης των κλήσεων της κλάσης i εάν $n + \delta_i \in S^*$. Έστω π_n η πιθανότητα σταθερής κατάστασης του συστήματος να βρίσκεται στη θέση n . Τότε οι εξισώσεις ισορροπίας είναι οι ακόλουθες:

$$\pi_n \left(\sum_{\{i:n+\delta_i \in S\}} \lambda_i + \sum_{i=1}^M n_i \mu_i \right) = \sum_{\{i:n+\delta_i \in S\}} \pi_{n+\delta_i} (n_i + 1) \mu_i + \sum_{i:n_i \neq 0} \pi_{n-\delta_i} \lambda_i \quad \text{για κάθε } n \in S^*$$

Στην αριστερή πλευρά της παραπάνω εξίσωσης υπάρχει ο ρυθμός αναχώρησης από την κατάσταση n , ενώ στη δεξιά πλευρά έχουμε το ρυθμό εισόδου στην κατάσταση n . Επιπροσθέτως, η πιθανότητα π_n πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη συνθήκη κανονικοποίησης:

$$\sum_{\{n:n \in S^*\}} \pi_n = 1$$

Ακολουθώντας το μοντέλο *Markov* που περιγράφηκε προηγούμενα, είναι πρόσφορο να χρησιμοποιήσουμε την δημοφιλή στατική κατανομή μορφής γινομένου έτσι ώστε να υπολογίσουμε τις πιθανότητες σταθερής κατάστασης του χώρου καταστάσεων S^* :

$$\pi_{n \in S^*} = \pi_0 \prod_{i=0}^M \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!} \quad (8), \quad \text{όπου} \quad \pi_0 = \frac{1}{\sum_{n \in S^*} \prod_{i=0}^M \frac{\rho_i^n}{n_i!}} \quad (9).$$

Ας σημειωθεί ότι η πιθανότητα π_n μπορεί να μεταφραστεί ως το κλάσμα του χρόνου που το σύστημα παραμένει στην κατάσταση n . Προκύπτει έτσι από την ιδιότητα των μέσων χρόνων των αφίξεων *Poisson (PASTA)* ότι η πιθανότητα φραγής κλήσης για τις κλήσεις της κλάσης i δίνεται από τη σχέση:

$$B_i = \sum_{\{n:n \in S \text{ και } n+\delta_i \notin S^*\}} \pi_n,$$

στην οποία η δεξιά πλευρά είναι απλά το κλάσμα του χρόνου του συστήματος που βρίσκεται σε μία κατάσταση που δεν επιτρέπει κλήσεις της κλάσης i .

Για τη μεσοσταθμική πιθανότητα φραγής του κόμβου μπορούμε να θεωρήσουμε τα βάρη w_i , $i=1,2,\dots,M$, τα οποία αναπαριστούν τη σχετική σπουδαιότητα της φραγής κλήσεων για τις διάφορες κλάσεις κίνησης του προτεινόμενου δικτύου. Με χρήση αυτών των βαρών καθώς και της προηγούμενης σχέσης που δίνει την πιθανότητα φραγής για τις κλήσεις μίας κλάσης, μία μέτρηση της συνολικής μεσοσταθμικής πιθανότητας φραγής του συστήματος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$B_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^M w_i B_i, \quad i=1,2,\dots,M$$

Για την διεκπεραιωτικότητα της κλάσης i παίρνουμε διαδοχικά:

$$T_i = \lambda_i * \left(\sum_{\{n:n \in S \text{ και } n+\delta_i \in S^*\}} \pi_n \right) = \lambda_i * [1 - B_i],$$

όπου η δεξιά πλευρά αποτελεί το κλάσμα του χρόνου του συστήματος που βρίσκεται σε καταστάσεις που επιτρέπει κλήσεις της κλάσης υπηρεσίας i .

Στη συνέχεια ορίζουμε την ανταμοιβή ανά μονάδα χρόνου έτσι ώστε μακροπρόθεσμα η μέση ανταμοιβή ανά μονάδα χρόνου να αναπαριστά τη διεκπεραιωτικότητα που επιτυγχάνεται από το σύστημα. Όταν το σύστημα παραμένει στην κατάσταση $n = (n_1, n_2, \dots, n_M)$, η ανταμοιβή αυξάνεται με ρυθμό ίσο με

$$r_n = \sum_{i=1}^M n_i e_i$$

Η ανταμοιβή r_n στην κατάσταση n είναι το μέγεθος του εύρους ζώνης που χρησιμοποιείται στην κατάσταση αυτή. Από τον ορισμό της προηγούμενης εξίσωσης προκύπτει άμεσα ότι μακροπρόθεσμα η μέση ανταμοιβή ανά μονάδα χρόνου αναπαριστά τη διεκπεραιωτικότητα του συστήματος. Έτσι, με χρήση βαρών για την ανάδειξη της διαφορετικής σπουδαιότητας της αποδοχής μίας ροής από μία συγκεκριμένη κλάση κίνησης στο σύστημα, παίρνουμε την ακόλουθη σχέση για τη μεσοσταθμική διεκπεραιωτικότητα του συστήματος:

$$T_{sys} = \sum_{i=1}^M r_i T_i, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

Η τελευταία μπορεί να προκύψει απλοποιημένη με χρήση των ίδιων βαρών $w_i, i = 1, 2, \dots, M$ που χρησιμοποιήθηκαν και για την συστημική πιθανότητα φραγής προηγούμενα, δηλαδή:

$$T_{sys} = \sum_{i=1}^M w_i T_i, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

Στην επόμενη ενότητα μελετούμε την επίδραση των επιπλέον περιορισμών λόγω της επιθυμητής μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης για κάθε μία από τις κλάσεις υπηρεσίας στις προηγούμενες ενδεικτικές τιμές απόδοσης του συστήματος. Λαμβάνουμε πειραματικές μετρήσεις για διάφορα επίπεδα μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης και θα τις συγκρίνουμε με το αντίστοιχο σύστημα πλήρους συμμερισμού, όπου το μόνο όριο για την αποδοχή ή όχι μίας καινούριας ροής στο σύστημα είναι η χωρητικότητα του κόμβου. Οι μελέτες θα γίνουν για διάφορες τιμές διαθέσιμης χωρητικότητας και διαφορετικά χαρακτηριστικά κίνησης για τις υποστηριζόμενες κλάσεις υπηρεσίας.

4.4.5.2 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στα πλαίσια της διατριβής υλοποιήθηκε εργαλείο προσομοίωσης στην *MATLAB* [32] έτσι ώστε να μελετήσουμε την επίδραση των επιπλέον περιορισμών της επιθυμητής μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης τόσο στην μεσοσταθμική πιθανότητα φραγής του κόμβου όσο και στην αντίστοιχη συστημική μεσοσταθμική διεκπεραιωτικότητα.

Οι μετρήσεις μας πραγματοποιήθηκαν για τις τρεις πρώτες κλάσεις υπηρεσίας υψηλότερης προτεραιότητας. Τα βάρη και για τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης επιλέγονται

με βάση τη σχετική σπουδαιότητα των κλάσεων υπηρεσίας. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα βάρη για τις τρεις κλάσεις υπηρεσίας κλάσεων υπηρεσίας:

Κλάση Υπηρεσίας	Βάρος
Πρώτη Προτεραιότητα	0,5
Δεύτερη Προτεραιότητα	0,3
Τρίτη Προτεραιότητα	0,2

Πίνακας 4-8: Τιμές Βαρών Κλάσεων Υπηρεσίας

Για την χαμηλής χωρητικότητας ζεύξη του κόμβου συμφόρησης, αρχικά μεταβάλλουμε το εύρος ζώνης της ζεύξης μέχρι την τιμή των 10Mbps. Για την περίπτωση αυτή, η τεχνολογία σε επίπεδο MAC που επιλέγεται για τις μετρήσεις μας είναι αυτή των δικτύων WiMAX. Η τεχνολογία WiMAX μας δίνει την δυνατότητα να εκμεταλλευτούμε το πλεονέκτημα του μηχανισμού κατάτμησης που εμπεριέχει, θέτοντας ένα προτεινόμενο μέγεθος τμήματος ίσο με 75 bytes. Επίσης, η τεχνολογία ATM συμπεριλήφθηκε στα σενάρια δοκιμής, σαν τεχνολογία αναφοράς που κυριαρχεί στην υπάρχουσα υποκείμενη ευρυζωνική υποδομή (για παράδειγμα σε xDSL δίκτυα). Η τεχνολογία ATM εισάγει ένα πρότυπο μέγεθος τμήματος ίσο με 53 bytes.

Η χρησιμοποίηση της τεχνολογίας Ethernet για δοκιμές σε τόσο χαμηλές τιμές εύρους ζώνης της ζεύξης δεν ενδείκνυται λόγω του ότι οι περιορισμοί στις τιμές της μεταβολής καθυστέρησης, σε συνδυασμό με το μεγάλο μέγεθος τμήματος της τεχνολογίας, οδηγούν σε εξάλειψη των επιτρεπτών ροών κίνησης. Εξαιτίας αυτού, επιλέγουμε να μεταβάλλουμε το εύρος ζώνης της ζεύξης μέχρι και την τιμή των 20Mbps έτσι ώστε να χρησιμοποιήσουμε στις δοκιμές μας σαν αντιπροσωπευτική τεχνολογία την τεχνολογία Ethernet, με μέγεθος τμήματος ίσο με το μέγιστο μήκος πακέτου Ethernet (1500 bytes). Το γεγονός ότι η τεχνολογία Ethernet δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαμηλές τιμές ζεύξης ενός κόμβου με τα χαρακτηριστικά που προτάθηκαν προηγούμενα, είναι ένα σημαντικό συμπέρασμα που εξάγεται από την εργασία αυτή και το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν οδηγία λειτουργικής ολοκλήρωσης δικτύων επόμενης γενιάς.

Οι τεχνολογίες ATM και Ethernet στο στρώμα ζεύξης δεδομένων προσδιορίζουν την έναρξη της ύπαρξής τους στις τεχνολογίες δικτύων πριν πολλά χρόνια. Τις επιλέγουμε όμως για τις μετρήσεις μας μιας και έχουν για πολύ καιρό κυριαρχήσει τόσο στα δίκτυα οπισθοζευκτικής επικοινωνίας όσο και στα δίκτυα πρόσβασης. Ακόμα θεωρείται σίγουρο ότι θα συνεχίσουν να συνυπάρχουν με τις αναδυόμενες τεχνολογίες δικτύων συνθέτοντας ένα μεγάλο κομμάτι πραγματολογικών τοπολογιών δικτύων επόμενης γενιάς. Κάθε πρωτόκολλο

επικοινωνίας επόμενης γενιάς θα κληθεί να παράσχει στοιχεία και μεθόδους διαλειτουργικότητας με τα δύο αυτά πρωτόκολλα, κάνοντας χρήση μηχανισμών ενθυλάκωσης. Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν έχουμε διατηρήσει τα αρχικά μεγέθη τμήματος (για τις τεχνολογίες ATM και Ethernet), ακόμα και αν οποιαδήποτε εφαρμογή μίας συγκεκριμένης μεθόδου ενθυλάκωσης μίας αναδύομενης τεχνολογίας ζεύξης δεδομένων θα οδηγούσε σε μικρή αύξηση των μεγεθών αυτών.

Παρά το γεγονός ότι νωρίτερα προτάθηκαν συγκεκριμένες τιμές επιτρεπτής μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης για κάθε κλάση υπηρεσίας, για να προκύψει ολοκληρωμένη εικόνα της επίδρασης των περιορισμών μεταβάλλουμε για σταθερή χωρητικότητα ζεύξης και τις μέγιστες τιμές μεταβολής καθυστέρησης. Διατηρούμε όμως σταθερό τον λόγο των επιδιωκόμενων τιμών μεταξύ τους και ίσο με 30, κάτι που αναδεικνύει και τη σχετική προτεραιότητα των αντίστοιχων κλάσεων υπηρεσίας.

Όσον αφορά τα μεγέθη ριπής, αυτά προκύπτουν από την φύση των ροών πολυμεσικών εφαρμογών που θα συμπεριλάβουν οι προτεινόμενες κλάσεις υπηρεσίας, όπως ήδη αναφέραμε στην ανάλυση των χαρακτηριστικών τους. Κατά συνέπεια, στις δοκιμές μας το μέγεθος ριπής για την πρώτης προτεραιότητας κλάση υπηρεσίας τέθηκε ίσο με 200 bytes, ενώ αντίστοιχα για την δεύτερη προτεραιότητα 1500 bytes και για την τρίτη προτεραιότητα 9000 bytes.

Τέλος, η ένταση κίνησης για τις τρεις κλάσεις υπηρεσίας είναι ακόμα ένα μέγεθος που διαφοροποιείται στις περιπτώσεις δοκιμών μας. Η ένταση κίνησης ρ ορίζεται ως ο λόγος του ρυθμού αφίξεων κλήσεων προς τον ρυθμό εξυπηρέτησής τους.

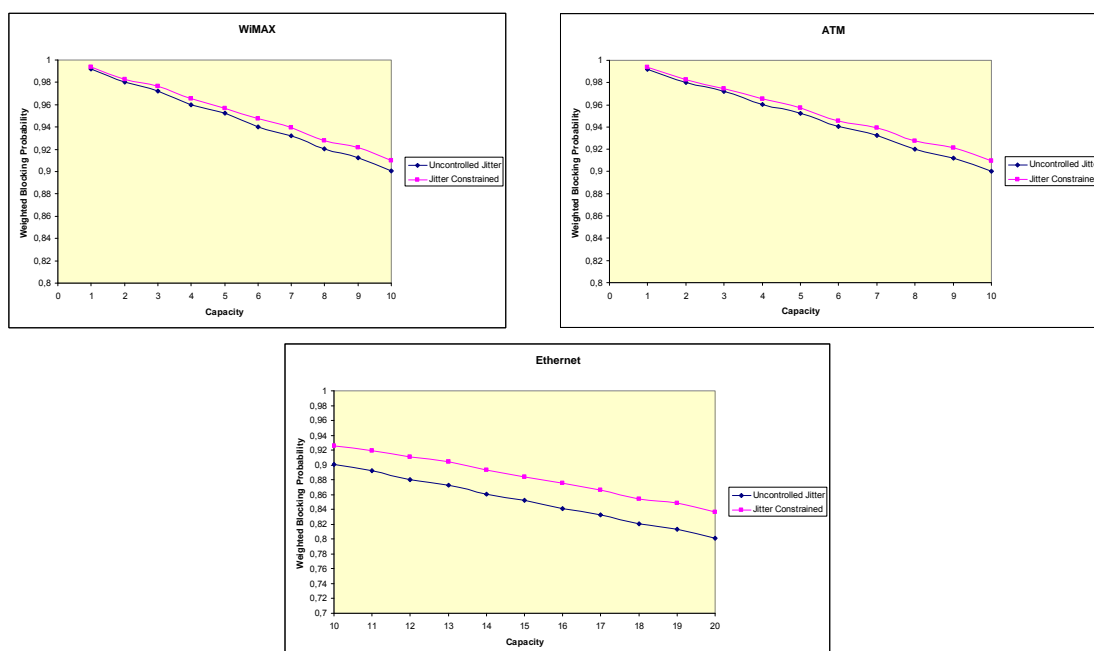
Κλάσεις Υπηρεσίας Κρίσιμα Φορτωμένες

Στην πρώτη ομάδα μετρήσεων διατηρούμε σταθερές τις επιδιωκόμενες τιμές μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης και ίσες με τις προτεινόμενες τιμές της εργασίας: 1ms για την πρώτης προτεραιότητας κλάση υπηρεσίας, 30ms για την δεύτερη και 900ms για την τρίτη κλάση υπηρεσίας. Στη δεύτερη ομάδα μετρήσεων μεταβάλλουμε, για μία συγκεκριμένη χωρητικότητα ζεύξης ανά τεχνολογία στρώματος ζεύξης δεδομένων, τις εφαρμοζόμενες μέγιστες τιμές μεταβολής καθυστέρησης και παρατηρούμε την επίδραση που έχει η διακύμανση αυτή στην συστημική πιθανότητα φραγής και στην διεκπεραιωτικότητα. Και για τις δύο ομάδες μετρήσεων σε αυτό το σενάριο δοκιμής, οι τιμές της έντασης κίνησης για όλες τις κλάσεις υπηρεσίας είναι ίσες και κρίσιμα υψηλές. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα ακόλουθα σχήματα.

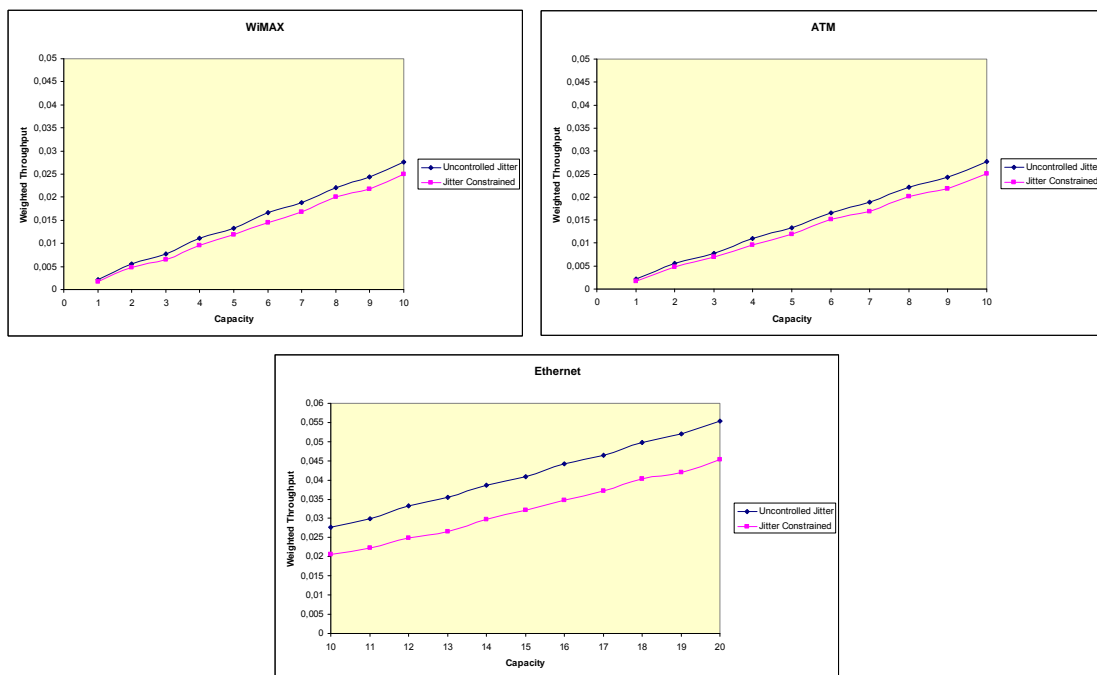
Από τα πρώτα δύο σχήματα παρατηρούμε ότι, και για τις τρεις τεχνολογίες, τόσο η μεσοσταθμική πιθανότητα φραγής όσο και η αντίστοιχη συστημική διεκπεραιωτικότητα επηρεάζονται από την επιβολή ανωτάτων ορίων μεταβολής καθυστέρησης στον κόμβο. Η μεν

πιθανότητα φραγής αυξάνεται, ενώ η διεκπεραιωτικότητα μειώνεται για όλες τις τιμές της χωρητικότητας ζεύξης. Οι διαφοροποιήσεις είναι αναμενόμενα σημαντικές λόγω του γεγονότος ότι οι κλάσεις υπηρεσίας είναι κρίσιμα φορτωμένες.

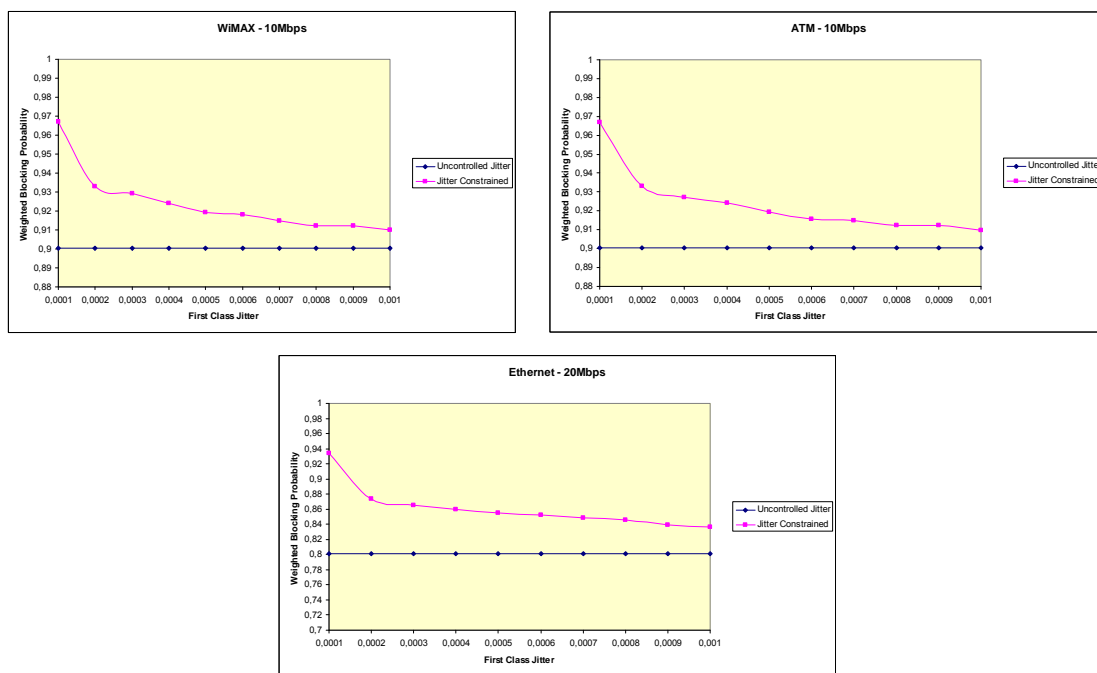
Από τα δύο επόμενα σχήματα αποδεικνύεται ότι η επίδραση αυστηρότερων ανωτάτων ορίων μεταβολής καθυστέρησης οδηγεί σε μεγαλύτερες πιθανότητες φραγής και μικρότερες τιμές συστημικής διεκπεραιωτικότητας. Η επιβολή ιδιαίτερα αυστηρών ορίων μπορεί να οδηγήσει σε λιμοκτονία ροών κίνησης. Συμπερασματικά μία ανάλυση ισολογισμού μεταξύ επιδιωκόμενων ανωτάτων ορίων μεταβολής καθυστέρησης και συστημικής απόδοσης κρίνεται επιβεβλημένη. Προς αυτή την κατεύθυνση, η αναζήτηση βέλτιστων πολιτικών ελέγχου αποδοχής κλήσεων θα λειτουργήσει εξισορροπιστικά και είναι αυτό που ερευνάται στη συνέχεια της διατριβής.



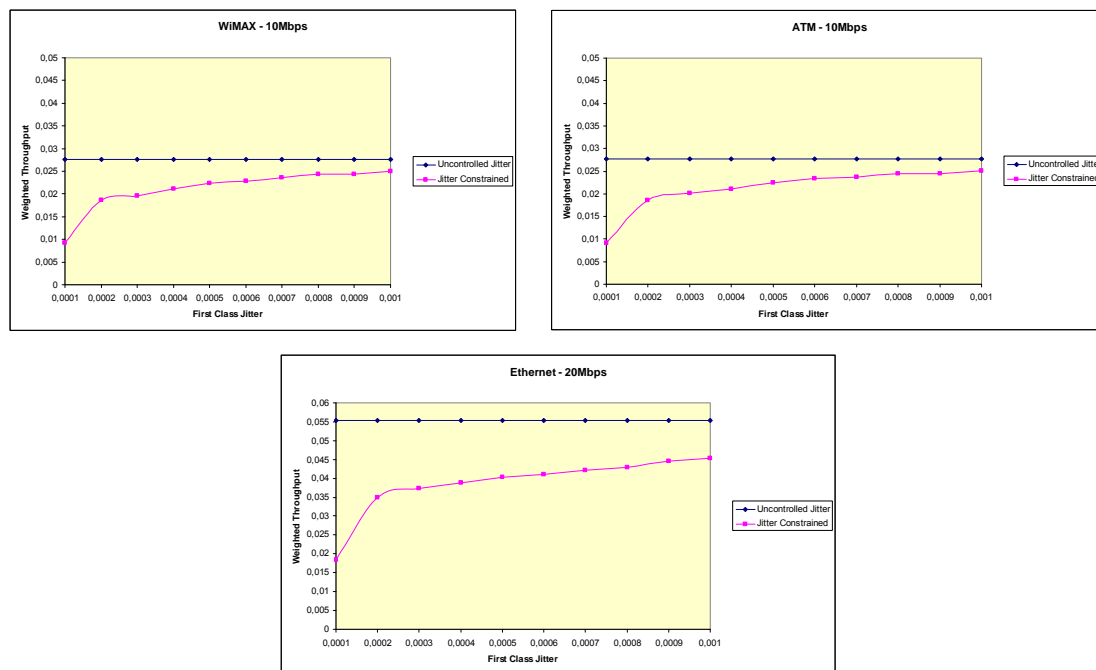
Σχήμα 4-17: Πιθανότητα Φραγής για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Σταθερή μεταβολή καθυστέρησης)



Σχήμα 4-18: Διεκπεραιωτικότητα για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Σταθερή μεταβολή καθυστέρησης)



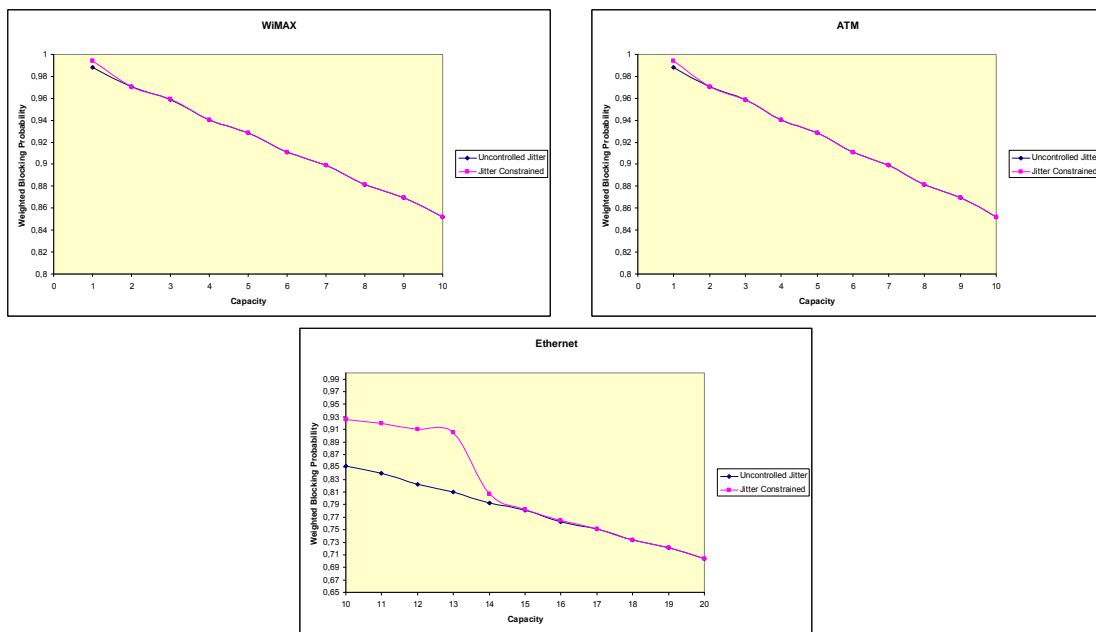
Σχήμα 4-19: Πιθανότητα Φραγής για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Διακύμανση μεταβολής καθυστέρησης)



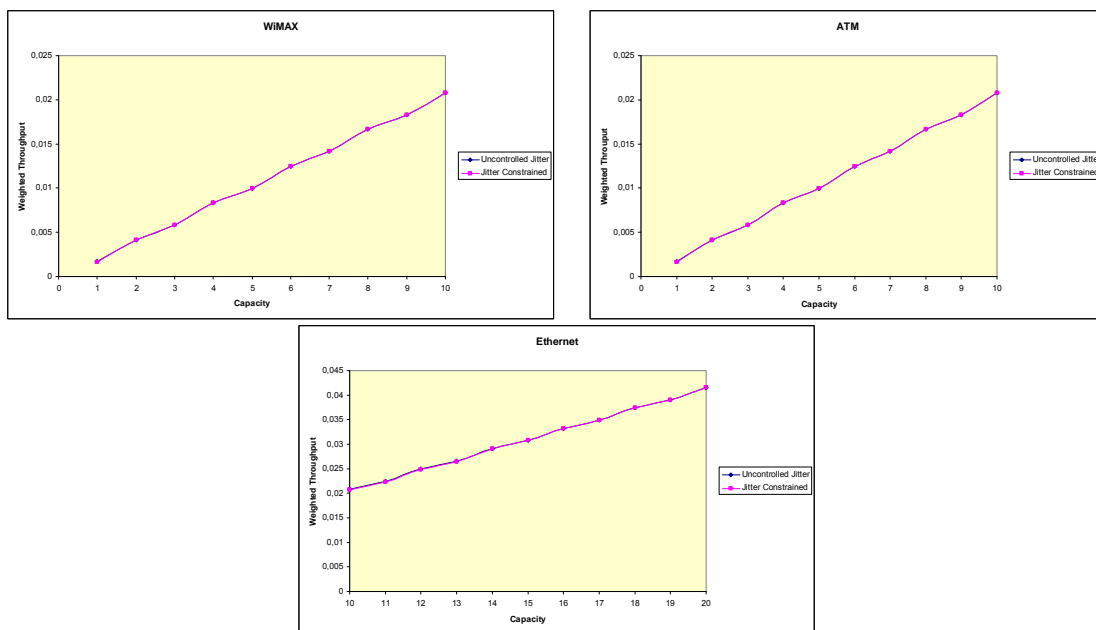
Σχήμα 4-20: Διεκπεραιωτικότητα για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Διακύμανση μεταβολής καθυστέρησης)

Χαμηλότερης Προτεραιότητας Κλάσεις Υπηρεσίας Κρίσιμα Φορτωμένες

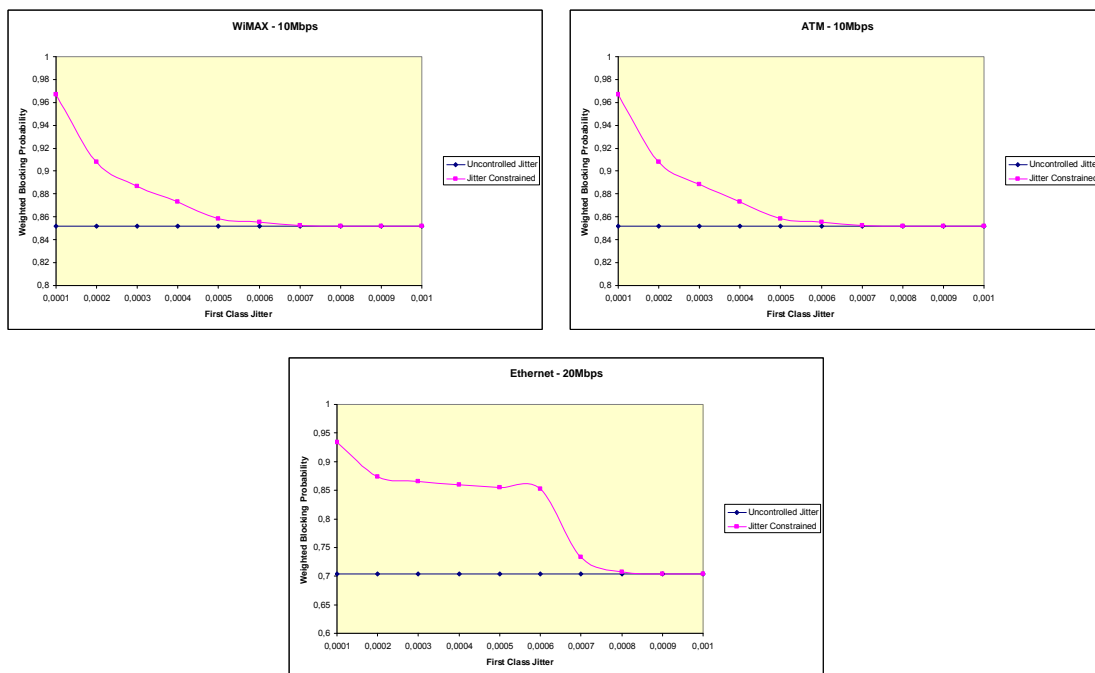
Στη συνέχεια των δοκιμών επιχειρήσαμε να εξάγουμε αντίστοιχες ομάδες μετρήσεων όταν η ένταση κίνησης της κλάσης υπηρεσίας με την υψηλότερη προτεραιότητα επιλέγεται να είναι υπερβολικά χαμηλότερη σε σχέση με την ένταση κίνησης των δύο άλλων κλάσεων υπηρεσίας που παραμένουν κρίσιμα φορτωμένες. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά της πρώτης ομάδας, όπως φαίνεται και στα ακόλουθα διαγράμματα, με την διαφορά ότι, όπως αναμενόταν, οι διακυμάνσεις στις συστημικές μετρικές της πιθανότητας φραγής και της διεκπεραιωτικότητας είναι εμφανώς μικρότερες. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι η κλάση ύψιστης προτεραιότητας παραμένει ελαφρώς φορτωμένη.



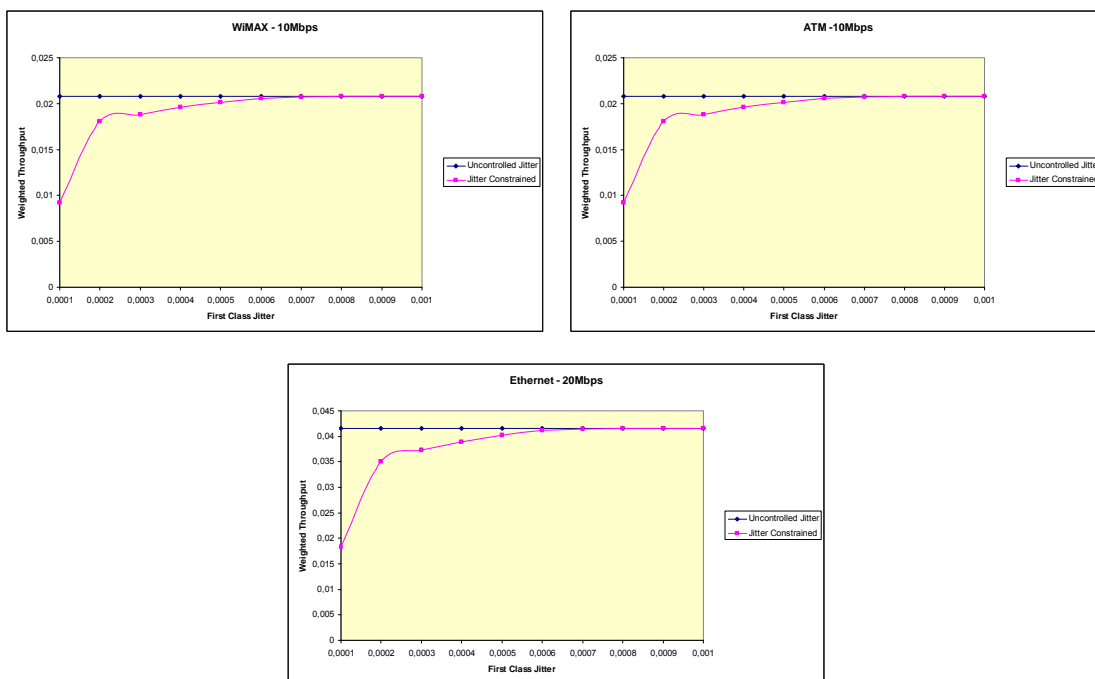
Σχήμα 4-21: Πιθανότητα Φραγής για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης χαμηλής προτεραιότητας (Σταθερή μεταβολή καθυστέρησης)



Σχήμα 4-22: Διεκπεραιωτικότητα για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης χαμηλής προτεραιότητας (Σταθερή μεταβολή καθυστέρησης)



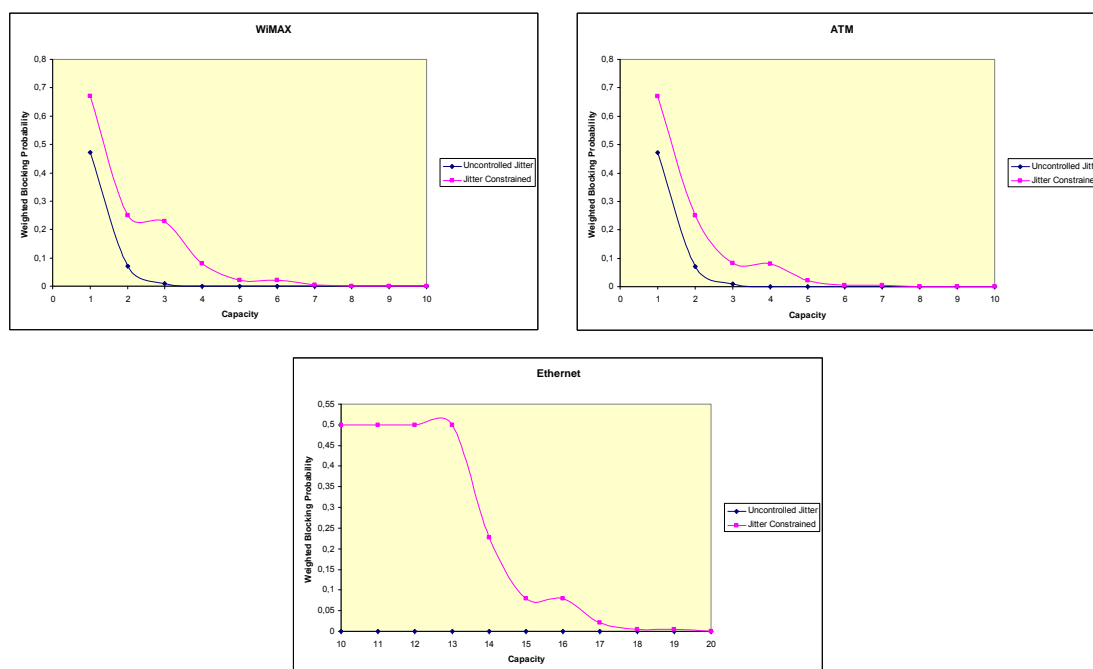
Σχήμα 4-23: Πιθανότητα Φραγής για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης χαμηλής προτεραιότητας (Διακύμανση μεταβολής καθυστέρησης)



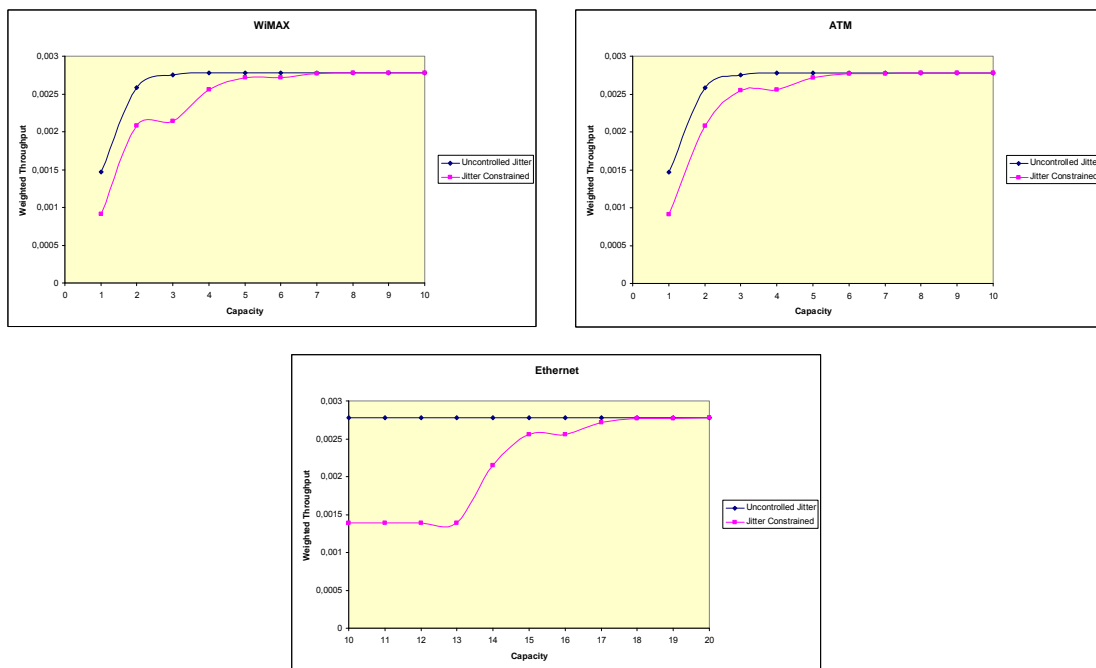
Σχήμα 4-24: Διεκπεραιωτικότητα για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης χαμηλής προτεραιότητας (Διακύμανση μεταβολής καθυστέρησης)

Κλάσεις Υπηρεσίας Ελαφρώς Φορτωμένες

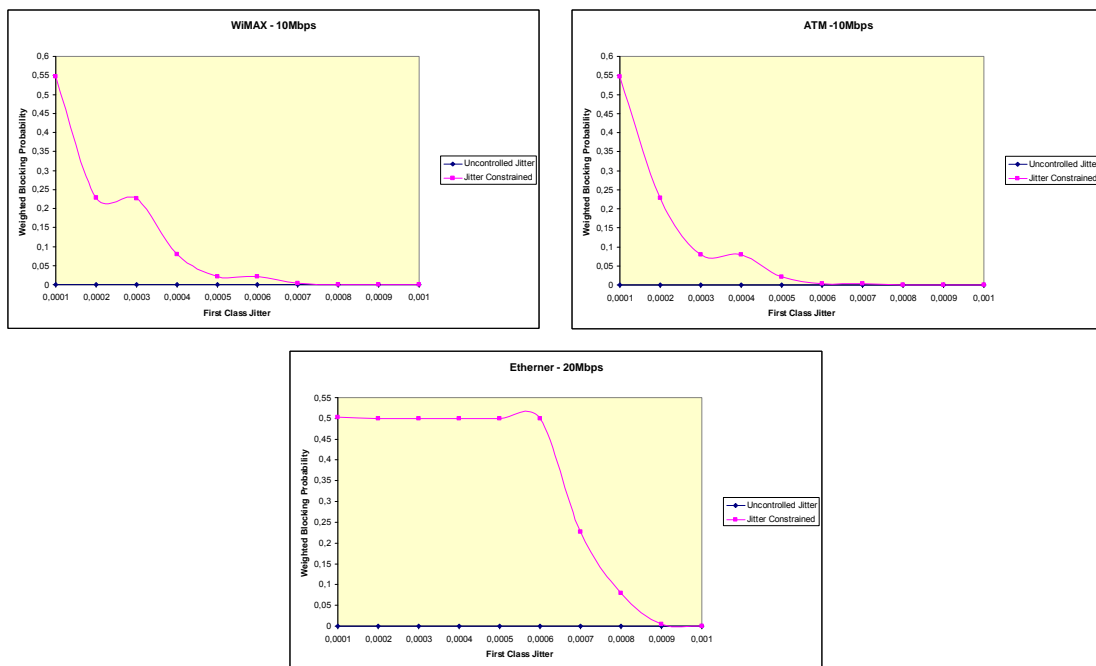
Στην τελευταία περίπτωση μετρήσεων οι κλάσεις υπηρεσίας χαρακτηρίζονται από κοντινές αλλά, ταυτόχρονα, χαμηλές τιμές έντασης κίνησης. Οι ίδιες δύο χαρακτηριστικές ομάδες μετρήσεων πραγματοποιούνται και στην περίπτωση αυτή. Τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα των προηγούμενων δύο ομάδων μετρήσεων. Υπάρχουν διακυμάνσεις στις συστημικές μετρικές σε σχέση με την περίπτωση ενός συστήματος χωρίς έλεγχο της μεταβολής καθυστέρησης οι οποίες εμφανίζονται να είναι σημαντικές. Συνολικότερα οι πιθανότητες φραγής προκύπτουν μικρότερες από αυτές των δύο προηγούμενων ομάδων μετρήσεων και, αντίστοιχα, οι τιμές διεκπεραιωτικότητας σημαντικά μικρότερες. Αυτό οφείλεται στην ένταση των κλάσεων υπηρεσίας που τέθηκε πολύ μικρή στην περίπτωση αυτών των τελευταίων μετρήσεων. Η ανάγκη για περιορισμό των σημαντικών διακυμάνσεων με εφαρμογή κατάλληλων πολιτικών αποδοχής κλήσεων γίνεται εμφανής και σε αυτή την περίπτωση.



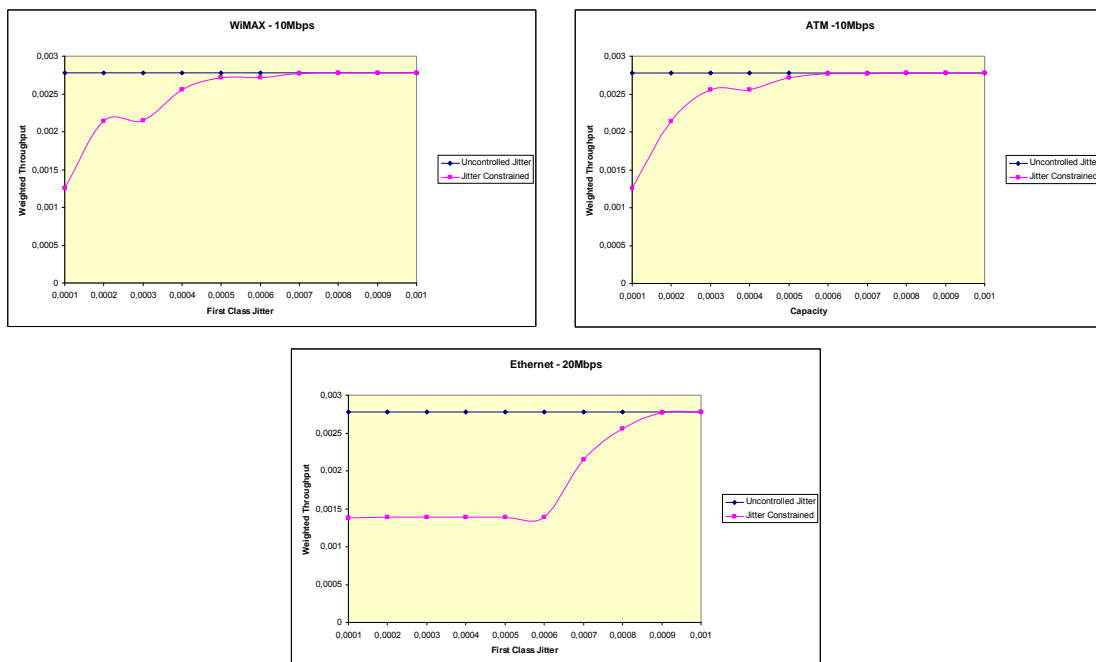
Σχήμα 4-25: Πιθανότητα Φραγής για ελαφρώς φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Σταθερή μεταβολή καθυστέρησης)



Σχήμα 4-26: Διεκπεραιωτικότητα για ελαφρώς φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Σταθερή μεταβολή καθυστέρησης)



Σχήμα 4-27: Πιθανότητα Φραγής για ελαφρώς φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Διακύμανση μεταβολής καθυστέρησης)



Σχήμα 4-28: Διεκπεραιωτικότητα για ελαφρώς φορτωμένες κλάσεις κίνησης (Διακύμανση μεταβολής καθυστέρησης)

4.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] ITU-T Recommendation Y.2001 (2004). General Overview of NGN.
- [2] OECD (2007). Convergence and Next Generation Networks. Available at: <http://www.oecd.org/dataoecd/25/11/40761101.pdf>
- [3] 3GPP TS 22.105 (2008). Services and service capabilities. V9.0.0, Release 9, 2008-12
- [4] 3GPP TS 23.107 (2010). Quality of Service (QoS) concept and architecture. V9.1.0, 2010-06.
- [5] ITU-T Recommendation Y.1541 (2002). Network Performance Objectives for IP-Based Services.
- [6] ITU-T Recommendation G.1010 (2001). End-User Multimedia QoS Categories.
- [7] Song W., Zhuang W. (2007). Multi-Class Resource Management in a Cellular/WLAN Integrated Network. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2007.
- [8] Bock C., Alcover M., Prat J. (2005). Hybrid radio-over-fibre WDM/TDM multi service network featuring dynamic resource allocation. In Proc. of the Transparent Optical Networks.
- [9] Gakhar K., Achir M., Gravey A. (2007). How Many Traffic Classes Do We Need In WiMAX?. In Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference.
- [10] Karam M., Tobagi F. (2000). On Traffic Types and Service Classes in the Internet. In Proc. of the GLOBECOM'2000.
- [11] Kee-Yin Ng J., Song S., Zhao W. (2003). Integrated End-to-End Delay Analysis for Regulated ATM Networks. Springer Real-Time Systems, 25(1), 93-124.
- [12] Baldi M., Ofek Y. (2000). End-to-end delay analysis of videoconferencing over packet-switched networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 8(4), 479-492.
- [13] Pucha H., Zhang Y., Mao Z.M., Hu Y.C. (2007). Understanding network delay changes caused by routing events. In Proc. of the SIGMETRICS, 35, 73–84.
- [14] Schwartz Y., Shavvit Y., Weinsberg U. (2010). A Measurement Study of the Origins of End-to-End Delay Variations. In Proc. of the 11th International Conference on Passive and Active Measurement.
- [15] Cisco Whitepaper (2006). Understanding Delay in Packet Voice Networks. Available at: <http://www.cisco.com/application/pdf/paws/5125/delay-details.pdf>
- [16] Verma D.C., Zhang H., Ferrari D. (1991). Delay jitter control for real-time communication in a packet switching network. In Proc. of the IEEE Conference on Communications for Distributed Applications and Systems.

- [17] Matragi W., Sohraby K., Bisdikian C. (1997). Jitter calculus in ATM networks: multiple nodes. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5(1), 122-133.
- [18] Sohraby K., Privalov A. (1999). End-to-end jitter analysis in networks of periodic flows. In *Proc. of the Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM '99*.
- [19] Drakos M.-P., Nikolaidis A., Foglar A. (2005). Dimensioning the Last Mile Towards Service Differentiation. In *Proc. of the 2nd IEEE International Conference on Broadband Networks*.
- [20] Demers A., Keshav S., Shenker S. (1990). Analysis and simulation of a fair queueing algorithm. *Journal of Internetworking Research and Experience*, 1(1), 3-26.
- [21] Ferrari D., Verma D. (1990). A scheme for real time channel establishment in wide-area networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 8(3), 368-379.
- [22] Golestani S. (1991). A framing strategy for congestion management. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 9(7), 1064-1077.
- [23] Kalmanek C., Kanakia H., Keshav S. (1990). Rate controlled servers for very high-speed networks. In *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference*.
- [24] Zhang H., Ferrari D. (1993). Rate-controlled static priority queuing. In *Proc. of the IEEE INFOCOM '93*.
- [25] Liebeherr J., Wrege D., Ferrari, D. (1994). Exact admission control for network with bounded delay services. Technical Report CS94-29, University of Virginia.
- [26] Drakos M.P., Nikolaidis A., Lukovszki Cs., Moldován I., Foglar A. (2005). QoS data plane issues in the MUSE access network. In *Proc. of the NOC 2005*.
- [27] The Network Simulator (ns-2). Available at: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [28] Manjanatha S., Bartos R. (2002). Integrating Differentiated Services with ATM. *Telecommunication Systems*, 19(3-4), 403-423.
- [29] Kaufman J.S. (1981). Blocking in a shared resource environment. *IEEE Transactions on Communications*, 29(10), 1474-1481.
- [30] Mitra D., Rieman M.I., Wang J. (1998). Robust dynamic admission control for unified cell and call QoS in statistical multiplexers. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16(5), 692-707.
- [31] Puterman M.L. (1994). *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*. Wiley, New York.
- [32] MATLAB - The Language of Technical Computing. Available at: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΕ ΠΟΛΥ-ΥΠΗΡΕΣΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, κατά την αποτίμηση ενός κόμβου συμμόρφωσης με τα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου δικτύου έγινε εμφανής η ανάγκη για ενέργειες εξισορρόπησης των αρνητικών επιδράσεων στις χαρακτηριστικές μετρικές του κόμβου που είχε η εφαρμογή των επιδιωκόμενων ανωτάτων ορίων μεταβολής καθυστέρησης στις κλάσεις υπηρεσίας. Τέτοιας στόχευσης ενέργεια εξισορρόπησης δεν μπορεί παρά να αποτελέσει η κατάργηση της στοιχειώδους πολιτικής μη ελεγχόμενης πρόσβασης και η υιοθέτηση βέλτιστων πολιτικών ελέγχου πρόσβασης. Σε αυτή την ενότητα, ασχολούμαστε με την διερεύνηση και καταγραφή τέτοιων βέλτιστων πολιτικών ελέγχου πρόσβασης με σκοπό την ικανοποίηση της απαίτησης για βελτίωση των χαρακτηριστικών μετρικών της μεσοσταθμικής πιθανότητας φραγής των κλήσεων των κλάσεων υπηρεσίας, καθώς και της συστημικής διεκπεραιωτικότητας.

Το γενικευμένο σενάριο που υιοθετούμε είναι αυτό κατά το οποίο αιτήσεις εξυπηρέτησης που ανήκουν σε διάφορες κλάσεις τηλεπικοινωνιακής κίνησης απαιτούν το ίδιο μέρος του εύρους ζώνης. Επίσης, θεωρούμε, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, ότι οι χρήστες που δεν γίνονται αποδεκτοί άμεσα στο σύστημα χάνονται, κάτι που σημαίνει ότι δεν αναφερόμαστε σε ουροποίηση των αιτήσεων. Όταν αφικνείται μία καινούρια αίτηση, προκύπτει μία απόφαση ελέγχου αποδοχής κλήσης κατά την οποία ένας ελεγκτής αποφασίζει εάν μία κλήση μπορεί να γίνει αποδεκτή ή όχι με βάση τη τρέχουσα κατάσταση του συστήματος και τους αντικειμενικούς στόχους του δικτύου.

Η θεώρηση ότι κάθε χρήστης απαιτεί ένα συγκεκριμένο ποσό από το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι σίγουρα εφαρμόσιμη σε δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος, π.χ. σε ασύρματα και οπτικά δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος. Παρ' όλα αυτά δεν μας περιορίζει μόνο στην περίπτωση των δικτύων μεταγωγής κυκλώματος. Για δίκτυα μεταγωγής πακέτου, παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχει φυσική εξασφάλιση του εύρους ζώνης για τον κάθε χρήστη, μία λογική αντίληψη του εύρους ζώνης παραμένει σημαντικός παράγοντας για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Σε δίκτυα μεταγωγής πακέτου με στατιστικές εγγυήσεις για ποιότητα

υπηρεσίας, το ποσό του εύρους ζώνης που χρειάζεται κάθε χρήστης θα δινόταν εύκολα από το «δραστικό» ή το «ισοδύναμο» εύρος ζώνης. Η προηγούμενη εκτίμηση της θεώρησης του εύρους ζώνης ή της απαίτησης ρυθμού από ένα χρήστη κρύβει τις λεπτομέρειες σε επίπεδο πακέτου και απλοποιεί την ανάλυση. Μία αιτιολόγηση για αυτόν τον διαχωρισμό μπορεί να βρεθεί στο [1].

Διάφορες μελλοντικές εφαρμογές είναι πιθανό να απαιτήσουν πολιτικές ελέγχου πρόσβασης για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις για ποιότητα υπηρεσίας σε επίπεδο κλάσεων. Με τον όρο ποιότητα υπηρεσίας σε επίπεδο κλάσεων, εννοούμε τις επιθυμητές σχετικές σχέσεις μεταξύ των πιθανοτήτων φραγής κλήσεων όλων των κλάσεων κλήσεων. Προβλέπεται ότι θα εισαχθούν κατάλληλοι μηχανισμοί τιμολόγησης για να αποφευχθεί συμφόρηση στα μελλοντικά δίκτυα [2]. Τα πολυυπηρεσιακά δίκτυα επόμενης γενιάς θα παρέχει διάφορα επίπεδα εξυπηρέτησης με κατάλληλες τιμές να συνδέονται με αυτά. Όλοι οι χρήστες που πληρώνουν όμοια ποσά για την ίδια εφαρμογή θα ανήκουν στην ίδια κλάση υπηρεσίας. Είναι ξεκάθαρο, ότι οι χρήστες που πληρώνουν περισσότερο θα πρέπει να τους παραχωρείται προτεραιότητα και θα πρέπει να ανήκουν σε κλάση μεγαλύτερης προτεραιότητας. Η πιθανότητα φραγής κλήσεων των κλάσεων μεγαλύτερης προτεραιότητας θα πρέπει να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη μίας κλάσης μικρής προτεραιότητας. Μία τέτοια απαίτηση για την πιθανότητα φραγής κλήσεων των κλάσεων κλήσεων αποτελεί ένα παράδειγμα απαίτησης για ποιότητα υπηρεσίας σε επίπεδο κλάσεων. Ένα άλλο παράδειγμα μίας απαίτησης για ποιότητα υπηρεσίας σε επίπεδο κλάσεων είναι η δίκαιη φραγή, κατά την οποία είναι επιθυμητό όλες οι κλάσεις κλήσεων να βιώνουν ακριβώς την ίδια πιθανότητα φραγής κλήσεων. Πέρα από την ποιότητα υπηρεσίας σε επίπεδο κλάσεων, η αποδοτικότητα της διεκπεραιωτικότητας είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν όταν σχεδιάζονται πολιτικές φραγής κλήσεων.

5.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Το πρόβλημα του ελέγχου αποδοχής κλήσεων έχει ερευνηθεί στο παρελθόν κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Η απλούστερη και ταυτόχρονα περισσότερο συνηθισμένη πολιτική αποδοχής κλήσης είναι η πολιτική πλήρους συμμερισμού (*Complete Sharing*). Σε αυτή την πολιτική, όλη η διαθέσιμη χωρητικότητα της ζεύξης είναι ανοικτή σε όλες τις κλάσεις χρηστών. Ο ελεγκτής αποδοχής στην πολιτική πλήρους συμμερισμού, αποφασίζει εάν υπάρχει διαθέσιμη χωρητικότητα για να αποδεχτεί μία νεοεισερχόμενη κλήση και αποδέχεται ή απορρίπτει τη κλήση με βάση το κριτήριο αυτό και μόνο. Αυτή η πολιτική μπορεί να είναι πολύ απλή και, κατά συνέπεια, εύκολα υλοποιήσιμη, από την άλλη μεριά, όμως, δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις των πιθανοτήτων φραγής κλήσεων για τις διαφορετικές κλάσεις κλήσεων. Κατά συνέπεια, οι διαφορετικές κλάσεις θα έχουν ευρέως διαφορετικές

πιθανότητες φραγής κλήσεων. Για παράδειγμα, είναι γνωστό ότι η πολιτική πλήρους συμμερισμού δεν διαθέτει την ευελιξία να διαχειριστεί τις πιθανότητες φραγής κλήσεων για όλες τις κλάσεις.

Η πολιτική πλήρους διαμερισμού (*Complete Partitioning*) [3], αντίθετα, διαιρεί τη συνολική χωρητικότητα σε τόσα μέρη όσες και οι κλάσεις χρηστών, και κάθε νεοεισερχόμενος χρήστης που βρίσκει ανεπαρκή χωρητικότητα στο μέρος για την κλάση του, εγκαταλείπεται. Η πολιτική πλήρους διαμερισμού μπορεί μεν να ρυθμιστεί να ελέγχει τη σχέση μεταξύ των πιθανοτήτων φραγής κλήσεων για διάφορες κλάσεις χρηστών, αλλά η προκύπτουσα διεκπεραιωτικότητα μπορεί να είναι πολύ χαμηλή. Ένα υβρίδιο των πολιτικών πλήρους συμμερισμού και πλήρους διαμερισμού είναι η πολιτική μερικού συμμερισμού (*Partial Sharing*). Στην πολιτική μερικού συμμερισμού, κάθε κλάση κλήσεων διαθέτει μία αποκλειστική μερίδα του εύρους ζώνης δεσμευμένη για την ίδια, και όλες οι κλάσεις ανταγωνίζονται για την υπολειπόμενη αδέσμευτη μερίδα του εύρους ζώνης [4].

Γενικότερα, η εύρεση μίας κατάλληλης πολιτικής ελέγχου πρόσβασης για την εκπλήρωση προεπιλεγμένων αντικειμενικών στόχων για συγκεκριμένες δικτυακές τοπολογίες υποστήριξης πολλαπλών υπηρεσιών, αποτέλεσε αντικείμενο εκτεταμένης ερευνητικής δραστηριότητας τις δύο τελευταίες δεκαετίες. Ανάμεσα σε άλλες, ενδιαφέρουσα δουλειά έχει γίνει στα [5-6], όπου οι συγγραφείς διατυπώνουν το πρόβλημα της εύρεσης μίας στρατηγικής ελέγχου πρόσβασης ως διαδικασία απόφασης *Markov* συνεχούς χρόνου (*MDP*). Οι συγγραφείς στο [7] ενδιαφέρθηκαν να εξισώσουν τις πιθανότητες φραγής για όλες τις κλάσεις υπηρεσίας. Χρησιμοποίησαν μία προσέγγιση θεωρίας παιγνίων για να αποκομίσουν τον αλγόριθμο ελέγχου πρόσβασης. Οι συγγραφείς στο [8] έχουν αναπτύξει στρατηγικές πρόσβασης έτσι ώστε να ικανοποιούνται απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας ανά κλάση υπηρεσίας, ενώ οι ίδιοι στο [9] έχουν αναπτύξει βέλτιστες πολιτικές έλεγχου πρόσβασης κάνοντας χρήση χρηστόριστων βοηθητικών συναρτήσεων για τις διαφορετικές κλάσεις υπηρεσίας.

Πιο πρόσφατες έρευνες έχουν επικεντρωθεί σε πολιτικές ελέγχου πρόσβασης για τα δίκτυα επόμενης γενιάς. Στο [10], παρουσιάζεται μία επισκόπηση των εννοιών που εγείρονται σε θέματα ελέγχου πρόσβασης και δέσμευσης πόρων. Οι συγγραφείς στο [11] έχουν προτείνει μία προσέγγιση βασισμένη σε μοντέλο ενισχυτικής μάθησης για να ορίσουν την δική τους πολιτική ελέγχου πρόσβασης, ενώ στο [12] οι συγγραφείς έχουν χρησιμοποιήσει μία τεχνική διαμερισμού του εύρους ζώνης, με βάση τον αλγόριθμο *round robin*, για να προτείνουν έναν αλγόριθμο ελέγχου πρόσβασης σε κυψελωτά δίκτυα επόμενης γενιάς. Στο [13], οι συγγραφείς έχουν βασιστεί στην θεωρία ασαφούς λογικής για να προτείνουν μία πολιτική ελέγχου πρόσβασης για ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς. Σχετικές εργασίες έχουν επίσης

πραγματοποιηθεί υπό τον περιορισμό αντικειμένου συγκεκριμένων δικτυακών τεχνολογιών επόμενης γενιάς. Για παράδειγμα, οι συγγραφείς του [14] έχουν μελετήσει και, τελικά, προτείνει διαδικασίες ελέγχου πρόσβασης σε συνεργατικά συστήματα WiMAX/DVB-RCS, ενώ στο [15] έχει παρουσιαστεί ένα πλαίσιο κανόνων ελέγχου πρόσβασης κλήσεων έτσι ώστε να εξυπηρετηθούν οι επιμέρους ιδιαιτερότητες των 802.16 δικτύων. Ακόμα, στο [16] οι συγγραφείς έχουν επικεντρωθεί σε δίκτυα 802.16 διαπλεγμένης διάρθρωσης και αναγνώρισαν την ανάγκη για από κοινού ορισμό συνεργατικών πολιτικών χρονοπρογραμματισμού και ελέγχου πρόσβασης στους δικτυακούς κόμβους. Τέλος, στο [17] οι συγγραφείς έχουν μοντελοποιήσει το πρόβλημα του ελέγχου πρόσβασης σαν μία διαδικασία απόφασης *Semi-Markov* με περιορισμούς (*CSMDP*) και αποκόμισαν τη δική τους βέλτιστη πολιτική ελέγχου για ένα ασύρματο δίκτυο μητροπολιτικής περιοχής τύπου 802.16.

Η πρόταση της παρούσας διατριβής απέχει κατά πολύ από τις σχετικές εργασίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, μιας και καμία από αυτές δεν ενσωματώνει την μεταβολή καθυστέρησης στις προτεινόμενες πολιτικές αποδοχής κλήσεων. Απ' όσο είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε, ελάχιστες ερευνητικές εργασίες έχουν λάβει υπ' όψιν αυτή τη μετρική απόδοσης στα πλαίσια της εξαγωγής μίας καινούριας πολιτικής ελέγχου πρόσβασης. Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς στο [18] όντως προτείνουν να μεταφράζεται η μεταβολή καθυστέρησης των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσίας σαν ένα επιπρόσθετο κριτήριο στην προτεινόμενη πολιτική πρόσβασης. Σε αντίθεση όμως με την πρόταση της διατριβής, που ποσοτικοποιεί τις μέγιστες τιμές μεταβολής καθυστέρησης με έναν απλοποιημένο καθαρά ντετερμινιστικό τρόπο, οι συγγραφείς της προαναφερθείσας εργασίας επιτυγχάνουν πιθανοτικές εγγυήσεις της μεταβολής καθυστέρησης για τις κλάσεις υπηρεσίας. Στο [19], οι συγγραφείς προτείνουν μία πολιτική ελέγχου πρόσβασης βασισμένη σε μόνιμη ανίχνευση στατιστικών τιμών μεταβολής καθυστέρησης, κάτι που προσθέτει πολυπλοκότητα στον προτεινόμενο μηχανισμό. Τέλος, οι συγγραφείς του [20] περιορίζουν τις επιδιωκόμενες συγκεκριμένες τιμές μεταβολής καθυστέρησης μόνο σε κλάσεις υπηρεσίας σταθερής ροής, ενώ η πρόταση της διατριβής αποδεικνύεται αγνωστικιστική των διαφοροποιήσεων των χαρακτηριστικών κίνησης, επιβάλλοντας μόνο επιτρεπτές μέγιστες τιμές ριπής ανά κλάση υπηρεσίας.

5.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ MARKOV

Στα πλαίσια της πρότασης της διατριβής, η διερεύνηση των πολιτικών ελέγχου πρόσβασης γίνεται με τη χρήση των διαδικασιών απόφασης *Markov*. Οι διαδικασίες απόφασης *Markov* αποτελούν μία ιδιαίτερη κατηγορία των μοντέλων *Markov* και έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν στην επίλυση διαφόρων ερευνητικών προβλημάτων στον τομέα των τηλεπικοινωνιών [21]. Η χρησιμότητά τους έγκειται στην προσθήκη δύο χαρακτηριστικών μεγάλης πρακτικής σημασίας για την περιγραφή συγκεκριμένων

προβλημάτων. Το πρώτο από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης αμοιβών σε μία διαδικασία, από την οποία προκύπτει μία διαδικασία ανταμοιβής *Markov*. Το δεύτερο χαρακτηριστικό δεν είναι παρά η δυνατότητα ελέγχου της διαδικασίας, ή ισοδύναμα, η ικανότητα του παρατηρητή να παίρνει αποφάσεις που επηρεάζουν την δυναμική της υποκείμενης διαδικασίας. Ο στόχος της λύσης μίας διαδικασίας απόφασης *Markov* είναι η εύρεση μίας ακολουθίας, μίας συνέχειας αποφάσεων που πρέπει να παρθούν έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η προκύπτουσα δομή ανταμοιβής.

Γενικότερα, η έννοια της ανταμοιβής μίας διαδικασίας «δένεται» με μία τυχαία μεταβλητή που συσχετίζεται με τις μεταβάσεις και τις καταλήψεις καταστάσεων της υποκείμενης διαδικασίας *Markov*. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι προσλαμβάνουσας ανταμοιβής. Ο πρώτος έχει να κάνει με την ανταμοιβή που λαμβάνεται καθ' όλη τη διάρκεια κατάληψης μίας κατάστασης, ενώ ο δεύτερος με αυτήν που προκύπτει κατά τις μεταβάσεις. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι δεν γίνεται διαφοροποίηση σε θετικές και αρνητικές ανταμοιβές και, κατά συνέπεια, μία ανταμοιβή μπορεί είτε να προστεθεί είτε να αφαιρεθεί σαν κόστος, αντίστοιχα. Ο πρώτος τύπος ανταμοιβής, που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια κατάληψης μίας κατάστασης, αναφέρεται ως ανταμοιβή μονιμότητας, ενώ ο δεύτερος ως ανταμοιβή παλμώθησης [22].

Πριν την αποτίμηση μίας διαδικασίας, αναδεικνύεται η μετρική μεγαλύτερης σπουδαιότητας. Οι δύο συνήθεις μετρικές που εξετάζονται είναι η συνολική αναμενόμενη ανταμοιβή και η μέση αναμενόμενη ανταμοιβή [23]. Και οι δύο είναι απλές όσον αφορά τη διερμηνεία τους και εμπεριέχουν υπολογισμούς σε όλο το χρόνο ζωής της διαδικασίας. Η συνολική αναμενόμενη ανταμοιβή είναι ακριβώς αυτό που υποδηλώνει το όνομά της, δηλαδή η συνολική ανταμοιβή σε όλο το χρόνο ζωής της διαδικασίας. Όταν γίνεται χρήση της μέσης αναμενόμενης ανταμοιβής, πρέπει πρώτα να καθοριστεί μία μονάδα χρόνου για την διαδικασία στο σενάριο συνεχούς χρόνου. Αντίστοιχα, πρέπει να οριστεί ένα διάστημα για την περίπτωση διακριτού χρόνου. Στη συνέχεια υπολογίζεται η αναμενόμενη συνολική ανταμοιβή της διαδικασίας για κάθε μία από τις μονάδες χρόνου και λαμβάνεται η αριθμητική μέση τιμή για όλες τις μονάδες του χρόνου ζωής της διαδικασίας, παράγοντας την μετρική της μέσης αναμενόμενης ανταμοιβής. Στα πλαίσια της διατριβής ασχοληθήκαμε μόνο με την μετρική της συνολικής αναμενόμενης ανταμοιβής και, για το λόγο αυτό, οι αναλυτικοί τύποι που παρουσιάζονται στη συνέχεια, περιορίζονται σε αυτό το πλαίσιο.

5.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΩΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ MARKOV

Στην ενότητα αυτή, μορφοποιούμε το πρόβλημα εύρεσης πολιτικών ελέγχου πρόσβασης που θα βελτιστοποιούν χαρακτηριστικές μετρικές απόδοσης σε κόμβους

συμφόρησης ενός δικτύου συμβατού με τις προδιαγραφές που προτείνονται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο [24]. Χρησιμοποιώντας τη σημειογραφία που ήδη δόθηκε κατά την αποτίμηση ενός τέτοιου κόμβου νορίτερα στην διατριβή, υποθέτουμε ότι οι κλήσεις της κλάσης υπηρεσίας i αφικνούνται ακολουθώντας μία ανεξάρτητη κατανομή *Poisson* με ρυθμό λ_i κλήσεις ανά δευτερόλεπτο και ότι η διάρκεια της εξυπηρέτησης των κλήσεων της κλάσης i ακολουθεί ανεξάρτητη και εκθετική κατανομή με μέσο ρυθμό $1/\mu_i$ sec. Για χάρη της γενικότητας, θεωρούμε ότι υπάρχουν M κλάσεις υπηρεσίας με την κάθε μεμονωμένη ροή τηλεπικοινωνιακής κίνησης της κλάσης i να απαιτεί e_i *BWUs*. Το σύνολο των επιτρεπτών καταστάσεων S^* είναι το ίδιο όπως ορίζεται στην προηγούμενη ενότητα. Αποτελεί την τομή του αρχικού χώρου καταστάσεων, όπου η υπέρβαση της χωρητικότητας της ζεύξης αποτελεί το μόνο λόγο άρνησης εξυπηρέτησης μίας καινούριας ροής, και των καταστάσεων που προκύπτουν από τις ανισώσεις του προηγούμενου κεφαλαίου και αφορούν τις επιθυμητές μέγιστες τιμές της μεταβολής καθυστέρησης για τις διάφορες κλάσεις υπηρεσίας.

Με δεδομένη την κατάσταση του συστήματος, ο ελεγκτής πρόσβασης παίρνει μία απόφαση ελέγχου πρόσβασης για τις κλήσεις των κλάσεων που θα γίνουν αποδεκτές στο σύστημα. Αυτή η απόφαση εξαρτάται από την κατάσταση του συστήματος και θα μπορούσε ακόμα να εξαρτάται και από τη χρονική στιγμή κατά την οποία παίρνεται η απόφαση, και από την όλη ιστορία του συστήματος. Σε κάθε κατάσταση, ο ελεγκτής πρόσβασης μπορεί να διαλέξει μία από διάφορες πιθανές ενέργειες. Επίσημα, μία ενέργεια δηλώνεται από ένα διάνυσμα u , τέτοιο ώστε $u = (u_1, u_2, \dots, u_M)$ με $u_i = 0$ ή 1 . Εάν, $u_i = 0$ τότε ο ελεγκτής πρόσβασης φράζει κάθε κλήση που προέρχεται από την κλάση i , και εάν $u_i = 1$ δέχεται κάθε κλήση που ανήκει στην κλάση i . Ορίζουμε το σύνολο K_n όλων των επιτρεπτών ενεργειών ελέγχου στην κατάσταση n όπως ακολούθως:

$$K_n = \{(u_1, u_2, \dots, u_M) : u_i = 0 \text{ ή } 1 \text{ για } i = 1, 2, \dots, M \text{ και} \\ n + \delta_i u_i \in S^* \text{ για } i = 1, 2, \dots, M\}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι μία ενέργεια u επιτρέπεται στην κατάσταση n μόνο εάν υπάρχει διαθέσιμη ανενεργή χωρητικότητα στο σύστημα για να αποδεχθεί μία κλήση που ανήκει σε οποιαδήποτε από τις κλάσεις κίνησης που με την ενέργεια u αποφασίζει να αποδεχθεί και ικανοποιούνται οι συνθήκες μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης της προηγούμενης ενότητας. Το σύνολο K_n περιέχει ακριβώς αυτές τις ενέργειες. Για κάθε κατάσταση $n \in S^*$, το σύνολο K_n έχει το πολύ 2^M στοιχεία. Μία πολιτική ελέγχου αποτελεί μία ακολουθία από τέτοιες ενέργειες ελέγχου πρόσβασης που γίνονται σε κάθε κατάσταση και καθώς το σύστημα εξελίσσεται. Δηλώνουμε ως F' το σύνολο όλων αυτών των πολιτικών

ελέγχου. Ο στόχος μας είναι να αποκομίσουμε μία πολιτική ελέγχου πρόσβασης που βελτιστοποιεί το ακόλουθο πρόβλημα:

$$\text{ελαχιστοποίηση } B_{\text{sys}} \\ f \in F'$$

όπου B_{sys} είναι η μεσοσταθμική πιθανότητα φραγής του συστήματος. Ανανεώνουμε τη σχέση της προηγούμενης ενότητας που έδινε την πιθανότητα φραγής του συστήματος με χρήση του διανύσματος ενεργειών που ορίσαμε προηγουμένα [25]. Έτσι, η πιθανότητα απόρριψης μίας κλήσης που ανήκει στην κλάση υπηρεσίας i , όταν το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση n και επιλέγεται μία συγκεκριμένη ενέργεια $u \in K_n$, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$B_i = \sum_{\{n \in S^*\}} \pi_n c_n^u(i)$$

όπου ο όρος c_n^u αποτελεί το κόστος της κλάσης κίνησης i που συνδέουμε με κάθε κατάσταση n και την επιλεγθείσα ενέργεια u . Το κόστος αυτό δίνεται από τη σχέση:

$$c_n^u(i) = \begin{cases} 0, & \text{if } u_i = 1 \\ w_i, & \text{if } u_i = 0 \end{cases}$$

με τα βάρη w_i να δίνουν, ακριβώς όπως ειπώθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, τη σχετική σημασία της απόρριψης μίας κλήσης που ανήκει στις διαφορετικές κλάσεις του δικτύου. Βασιζόμενοι στις προηγούμενες σχέσεις παίρνουμε την ποσότητα που θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε:

$$B_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^4 B_i, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

Το δεύτερο πρόβλημα βελτιστοποίησης που θα διαμορφώσουμε έχει να κάνει με τη μεσοσταθμική διεκπεραιωτικότητα του συστήματος. Αναζητούμε μία πολιτική ελέγχου πρόσβασης που βελτιστοποιεί το ακόλουθο πρόβλημα:

$$\text{μεγιστοποίηση } T_{\text{sys}} \\ f \in F'$$

Στη συνέχεια θα ορίσουμε την ανταμοιβή ανά μονάδα χρόνου έτσι ώστε μακροπρόθεσμα η μέση ανταμοιβή ανά μονάδα χρόνου να αναπαριστά τη διεκπεραιωτικότητα που επιτυγχάνεται από την επιλεγθείσα πολιτική ελέγχου $f \in F'$. Όταν το σύστημα παραμένει στην κατάσταση $n = (n_1, n_2, \dots, n_M)$ και επιλέγεται η απόφαση u , η ανταμοιβή αυξάνεται με ρυθμό ίσο με

$$r_n^u = \sum_{i=1}^M n_i e_i \quad \text{για κάθε } u \in K_n$$

όπου K_n είναι το σύνολο όλων των επιτρεπτών ενεργειών ελέγχου στην κατάσταση n . Πρέπει να σημειωθεί ότι η ανταμοιβή στην κατάσταση n είναι ανεξάρτητη της επιλεγθείσας ενέργειας στην κατάσταση αυτή. Η ανταμοιβή r_n^u στην κατάσταση n είναι το μέγεθος του εύρους ζώνης που χρησιμοποιείται στην κατάσταση αυτή. Από τον ορισμό της προηγούμενης εξίσωσης προκύπτει άμεσα ότι μακροπρόθεσμα η μέση ανταμοιβή ανά μονάδα χρόνου αναπαριστά τη διεκπεραιωτικότητα του συστήματος. Με δεδομένο ότι ξεκινάμε από την κατάσταση m , ο ακόλουθος ορισμός της μακροπρόθεσμης μέσης ανταμοιβής ανά μονάδα χρόνου αντιστοιχεί στην διεκπεραιωτικότητα που επιτυγχάνεται από την επιλεγθείσα πολιτική ελέγχου $f \in F'$:

$$R_m(f) = \lim_{t \rightarrow \infty} E_f \left[\frac{Z(t)}{t} \mid X(0) = m \right],$$

όπου $X(t)$ είναι η κατάσταση του συστήματος τη χρονική στιγμή t , $Z(t)$ είναι η συνολική συσσωρευμένη ανταμοιβή μέχρι τη χρονική στιγμή t , και $E_f(\cdot)$ είναι ο συντελεστής προσδοκίας που λαμβάνεται με βάση την πολιτική f . Αν το όριο δεν υφίσταται στην προηγούμενη εξίσωση, δεχόμαστε να πάρουμε το όριο στο άπειρο στη θέση του.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το σύνολο F' περιέχει πολιτικές ελέγχου που εξαρτώνται από τη χρονική στιγμή στην οποία λαμβάνεται η απόφαση ελέγχου πρόσβασης. Για παράδειγμα, περιέχει την πολιτική ελέγχου που ορίζει ότι στην πρώτη επίσκεψη στην κατάσταση m μία συγκεκριμένη ενέργεια ελέγχου πρέπει να επιλεγθεί, ενώ αρχίζοντας από τη δεύτερη επίσκεψη μία εναλλακτική ενέργεια ελέγχου πρέπει να επιλεγθεί. Τέτοιες πολιτικές ελέγχου που εξαρτώνται από το χρόνο στον οποίο λαμβάνεται η απόφαση ονομάζονται μη στατικές πολιτικές. Οι πολιτικές ελέγχου που δεν εξαρτώνται από το χρόνο της λήψης αποφάσεων ονομάζονται στατικές πολιτικές. Μία σημαντική ομάδα των στατικών πολιτικών είναι οι ακέραιες πολιτικές που επιλέγουν την ίδια απόφαση u σε κάθε επίσκεψη σε μία κατάσταση. Ας σημειωθεί ότι η τάξη των στατικών πολιτικών περιλαμβάνει επίσης τις λεγόμενες τυχαίες πολιτικές που επιλέγουν μία ενέργεια σύμφωνα με την ίδια κατανομή πιθανότητας κάθε φορά που επισκέπτεται μία κατάσταση.

Στην εργασία αυτή περιορίζουμε την εύρεση της βέλτιστης πολιτικής ελέγχου πρόσβασης στις στατικές, αλλά μη ακέραιες πολιτικές έτσι ώστε να προκύψει απλοποιημένη και εύκολα επεκτάσιμη λύση. Για να γίνουμε πιο συγκεκριμένοι, αν δηλώσουμε την πιθανότητα επιλογής της ενέργειας ελέγχου $u \in K_n$ όταν το σύστημα είναι στην κατάσταση $n \in S^*$ ως d_n^u , τότε δεν υπάρχει απαραίτητα μόνο μία ενέργεια $u \in K_n$ με $d_n^u = 1$. Οι πιθανότητες d_n^u της ενέργειας $u \in K_n$ με $n \in S^*$ είναι οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος. Είναι φανερό ότι:

$$\sum_{u \in K_n} d_n^u = 1 \text{ για } n \in S^*$$

και ότι

$$d_n^u \geq 0 \text{ για } u \in K_n \text{ και } n \in S^*.$$

Μία στατική πολιτική ελέγχου είναι το ακόλουθο σύνολο κατανομών πιθανοτήτων, μία για κάθε εφικτή κατάσταση:

$$\{d_n^u : u \in K_n \text{ και } n \in S^*\}.$$

Για μία δεδομένη τυχαία πολιτική f , οι καταστάσεις τις οποίες επισκέπτεται το σύστημα σχηματίζουν μία αλυσίδα συνεχούς χρόνου *Markov* με ρυθμούς μετάβασης που δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$q_{(n,p)}(f) = \sum_{\{u: u \in K_n\}} q_{(n,p)}^u d_n^u$$

Έστω ότι $\pi_n(f)$ είναι η περιορισμένη πιθανότητα σταθερής κατάστασης της αλυσίδας συνεχούς χρόνου *Markov* για την στατική πολιτική f . Γνωρίζουμε ότι αυτές οι πιθανότητες πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω συνθήκες:

$$\pi_n(f) \sum_{p \in S^*} \sum_{u \in K_n} q_{(n,p)}^u d_n^u - \sum_{i \in S^*} \sum_{u \in K_i} \pi_i(f) q_{(i,n)}^u d_i^u = 0 \text{ for } n \in S^*$$

$$\sum_{n \in S^*} \pi_n(f) = 1,$$

$$\pi_n(f) \geq 0 \text{ for } n \in S^*$$

Με τον προηγούμενο ορισμό της πιθανότητας σταθερής κατάστασης $\pi_n(f)$, η μακροπρόθεσμη μέση ανταμοιβή, και κατά συνέπεια και η διεκπεραιωτικότητα του συστήματος, καταλήγει να δίνεται από την ακόλουθη σχέση και να είναι ανεξάρτητη από την αρχική κατάσταση m του συστήματος:

$$T_{\text{sys}} = \sum_{n \in S^*} \sum_{u \in K_n} \pi_n(f) r_n^u d_n^u$$

Το γινόμενο $\pi_n(f)$ και d_n^u αποτελεί τη μονάδα του χρόνου που το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση n και επιλέγεται η ενέργεια u . Η προηγούμενη εξίσωση ουσιαστικά δίνει τη μεσοσταθμική μέση ανταμοιβή του συστήματος. Με αντίστοιχο τρόπο η συνολική μεσοσταθμική πιθανότητα φραγής του συστήματος μπορεί να γραφεί όπως ακολούθως:

$$B_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^4 \sum_{\{n: n \in S^*\}} \sum_{u \in K_n} \pi_n(f) c_n^u(i) d_n^u$$

Έτσι καταλήγουμε στα ακόλουθα δύο προβλήματα βελτιστοποίησης που πρέπει να επιλύσουμε:

$$\begin{aligned}
 & \text{μεγιστοποίηση} & T_{\text{sys}} &= \sum_{n \in S^*} \sum_{u \in K_n} \pi_n(f) r_n^u d_n^u \\
 & \text{με τους περιορισμούς:} & & \\
 & \pi_n(f) \sum_{p \in S^*} \sum_{u \in K_n} q_{(n,p)}^u d_n^u - \sum_{i \in S^*} \sum_{u \in K_i} \pi_i(f) q_{(i,n)}^u d_i^u = 0 \text{ για } n \in S^* \\
 & \sum_{n \in S^*} \pi_n(f) = 1, \\
 & \pi_n(f) \geq 0 \text{ για } n \in S^* \\
 & \sum_{u \in K_n} d_n^u = 1 \text{ για } n \in S^* \\
 & d_n^u \geq 0 \text{ για } u \in K_n \text{ και } n \in S^*
 \end{aligned}$$

ενώ για το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της μεσοσταθμικής πιθανότητας φραγής του συστήματος έχουμε:

$$\begin{aligned}
 & \text{ελαχιστοποίηση} & B_{\text{sys}} &= \sum_{i=1}^4 \sum_{\{n: n \in S^*\}} \sum_{u \in K_n} \pi_n(f) c_n^u(i) d_n^u \\
 & \text{με τους περιορισμούς:} & & \\
 & \pi_n(f) \sum_{p \in S^*} \sum_{u \in K_n} q_{(n,p)}^u d_n^u - \sum_{i \in S^*} \sum_{u \in K_i} \pi_i(f) q_{(i,n)}^u d_i^u = 0 \text{ για } n \in S^* \\
 & \sum_{n \in S^*} \pi_n(f) = 1, \\
 & \pi_n(f) \geq 0 \text{ για } n \in S^* \\
 & \sum_{u \in K_n} d_n^u = 1 \text{ για } n \in S^* \\
 & d_n^u \geq 0 \text{ για } u \in K_n \text{ και } n \in S^*
 \end{aligned}$$

5.5 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Τα δύο προηγούμενα προβλήματα βελτιστοποίησης έχουν μετρήσιμο χώρο καταστάσεων S^* και πεπερασμένο χώρο ενεργειών K_n για κάθε κατάσταση $n \in S^*$. Κατά συνέπεια υπάρχει μία βέλτιστη πολιτική αποδοχής κλήσεων για κάθε ένα από τα δύο προβλήματα βελτιστοποίησης [26] που θα εξαρτάται από τις λαμβάνουσες συνθήκες τηλεπικοινωνιακής κίνησης ανά κλάση υπηρεσίας. Τέτοιας μορφής προβλήματα

βελτιστοποίησης μπορούν να επιλυθούν με γνωστές τεχνικές, όπως επαναληπτική τιμής, επαναληπτική πολιτικής και αλγορίθμους γραμμικού προγραμματισμού [27-28]. Για οικονομία χώρου, η παράθεση αριθμητικών αποτελεσμάτων στα πλαίσια της παρούσας διατριβής κρίθηκε μη αναγκαία, μιας και ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη σχετική βιβλιογραφία.

Τεχνικές μείωσης του μοντέλου, όπως αυτές που περιγράφονται στα [29-30], θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να μειώσουν την υπολογιστική πολυπλοκότητα των προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ωστόσο, ακόμα και μετά την εφαρμογή η διαδικασία του υπολογισμού της βέλτιστης πολιτικής σε δίκτυα με πολλαπλές κλάσεις υπηρεσίας και μεγαλύτερες τιμές για τις χωρητικότητες των ζεύξεων, περιλαμβάνει επίλυση των προηγούμενων προβλημάτων βελτιστοποίησης με μεγάλους και δύσχρηστους χώρους καταστάσεων και χώρους ενεργειών. Το τελευταίο μπορεί να αποτελέσει μειονέκτημα για κόμβους με μικρές υπολογιστικές δυνατότητες και, γενικότερα, περιορισμένους συστημικούς πόρους.

5.6 ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΑΝΩΤΑΤΩΝ ΟΡΙΩΝ

Με απώτερο στόχο να υιοθετηθεί μία απλοποιημένη πολιτική ελέγχου πρόσβασης ροών σε κάθε δικτυακό κόμβο συμφόρησης που διασύνδεει δίκτυα μεγάλης χωρητικότητας με αντίστοιχα μικρής χωρητικότητας, περιορίσαμε την αναζήτησή μας στο σύνολο των πολιτικών κυρτών συντεταγμένων (*coordinate convex*) [31]. Έτσι, προχωρήσαμε στα πλαίσια της εργασίας αυτής στην πρόταση και ανάπτυξη μίας πολιτικής ελέγχου πρόσβασης *Ανωτάτων Ορίων*, αντίστοιχη με αυτή που προτάθηκε [32]. Στη συνέχεια εξετάσαμε την απόδοσή της για διάφορες περιπτώσεις δοκιμής [33]. Με τον όρο *Ανώτατα Όρια* υποδεικνύουμε την πολιτική κατά την οποία εισάγονται γραμμικές ανώτατες τιμές στον επιτρεπτό αριθμό συνδέσεων που επιβάλλει η ακραία πολιτική συμμερισμού με περιορισμούς στην μεταβολή καθυστέρησης. Αξίζει ωστόσο να επισημάνουμε ότι δεν υφίσταται η ανάγκη να καταχωρηθεί ένα ανώτατο όριο για κάθε μία κλάση υπηρεσίας έτσι ώστε να θεωρηθεί έγκυρη μία πολιτική *Ανωτάτων Ορίων*.

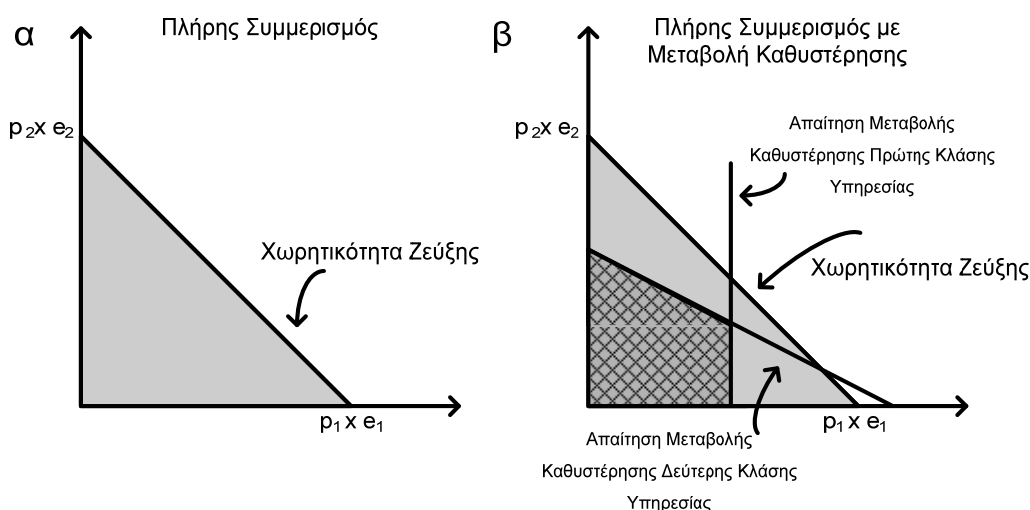
Ο τρόπος με τον οποίο η απαίτηση μεταβολής καθυστέρησης για κάθε κλάση τηλεπικοινωνιακής κίνησης επηρεάζει τον αρχικό χώρο επιτρεπτών καταστάσεων του συστήματος μπορεί να επεξηγηθεί καλύτερα για την περίπτωση των δύο κλάσεων υπηρεσίας. Ενώ, λοιπόν, αρχικά ο χώρος καταστάσεων περιορίζεται μόνο από την χαμηλή χωρητικότητα του κόμβου συμφόρησης, οι ανισώσεις (6) της προηγούμενης ενότητας περιορίζουν περαιτέρω τον χώρο καταστάσεων λόγω των περιορισμών της μέγιστης μεταβολής

καθυστερήσης για κάθε κλάση υπηρεσίας. Για την περίπτωση των δύο κλάσεων υπηρεσίας, τα όρια των επιτρεπτών ροών ανά κλάση υπηρεσίας δίνονται από τις ακόλουθες ανισώσεις:

$$p_1 \leq (MaxJitter_1 \times LinkRate + MinPacketSize - SegmentSize) / BurstSize_1,$$

$$p_2 \leq (MaxJitter_2 \times [LinkRate - p_1 \times e_1] + MinPacketSize - SegmentSize) / BurstSize_2,$$

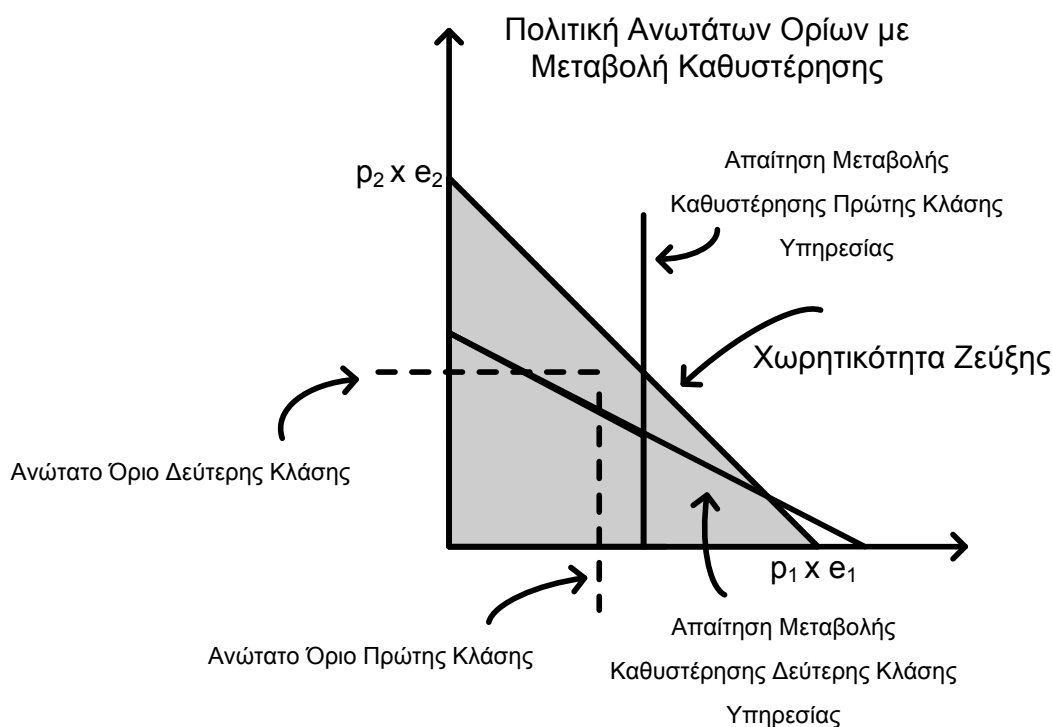
Γραφικά, η επίδραση της μεταβολής καθυστέρησης για την περίπτωση των δύο κλάσεων υπηρεσίας αποδίδεται στο παρακάτω Σχήμα 5-1:



Σχήμα 5-1: Πλήρης Συμμερισμός χωρίς και με απαιτήσεις μέγιστων τιμών μεταβολής καθυστέρησης για 2 κλάσεις υπηρεσίας

Εύκολα μπορεί να εξαχθεί από το προηγούμενο γράφημα, ότι ο αρχικός χώρος καταστάσεων περιορίζεται στο γραμμοσκιασμένο τραπεζοειδές του Σχήματος 5-1β, όταν εφαρμόζονται οι απαιτήσεις για μέγιστα όρια στην μεταβολή καθυστέρησης. Αντίστοιχες είναι οι περιπτώσεις και για περισσότερες από δύο κλάσεις υπηρεσίας, ελέγχοντας δηλαδή τις μεταβολές των χώρων καταστάσεων σε περισσότερες από δύο διαστάσεις.

Προτείνουμε την πολιτική ελέγχου πρόσβασης ανωτάτων ορίων που εισάγει ανώτατες τιμές στους αριθμούς των επιτρεπτών συνδέσεων. Για την περίπτωση των δύο κλάσεων υπηρεσίας, η προτεινόμενη πολιτική αποδίδεται γραφικά στο Σχήμα 5-2:



Σχήμα 5-2: Προτεινόμενη Πολιτική Ελέγχου Πρόσβασης Ανωτάτων Ορίων για δύο Κλάσεις Υπηρεσίας

Συμπερασματικά, ο αντικειμενικός στόχος είναι να βρεθούν όρια στον αριθμό των επιτρεπτών συνδέσεων για κάθε κλάση υπηρεσίας έτσι ώστε να βελτιστοποιηθούν συγκεκριμένα κριτήρια απόδοσης. Στην περίπτωσή μας, αυτά τα κριτήρια δεν είναι παρά τα ίδια που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, δηλαδή η μεσοσταθμική πιθανότητα φραγής και η μεσοσταθμική διεκπεραιωτικότητα.

Σε σύγκριση με την μορφοποίηση του προβλήματος για την εύρεση της βέλτιστης πολιτικής ελέγχου πρόσβασης, η προτεινόμενη απλοποιημένη πολιτική Ανωτάτων Ορίων δεν επιβάλλει πιθανότητες απόφασης σε κάθε κατάσταση $n \in S^*$ όσον αφορά την προκύπτουσα κατάσταση του συστήματος. Έτσι προκύπτει ότι, έχοντας σαν δεδομένο ότι το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση $n \in S^*$, η μονάδα ελέγχου πρόσβασης απλά θα αποδεχτεί κάθε νεοεισερχόμενη κλήση μίας κλάσης υπηρεσίας υπό τον όρο ότι η προκύπτουσα κατάσταση ανήκει στον επιτρεπτό χώρο καταστάσεων.

Ακολουθώντας το μοντέλο *Markov* που περιγράφηκε προηγούμενα, είναι πρόσφορο να χρησιμοποιήσουμε την δημοφιλή στατική κατανομή μορφής γινομένου που χρησιμοποιήθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, έτσι ώστε να υπολογίσουμε τις πιθανότητες σταθερής κατάστασης του χώρου καταστάσεων S^* :

$$\pi_{n \in S^*} = \pi_0 \prod_{i=0}^T \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!} \quad (21), \quad \text{όπου} \quad \pi_0 = \frac{1}{\sum_{n \in S^*} \prod_{i=0}^T \frac{\rho_i^n}{n_i!}} \quad (22) \quad \text{και}$$

$$S^* = \left\{ \begin{array}{l} n = (n_1, \dots, n_j, \dots, n_T) : \sum_{j=1}^T n_j \times e_j \leq LinkRate \text{ and } n_j \in \mathbb{Z}^+ \\ \\ n_j \leq \left(MaxJitter_j \times \left[LinkRate - \sum_{k=1}^{j-1} (p_k \times e_k) \right] + \right. \\ \quad \left. + MinPacketSize - SegmentSize \right) \\ \quad / BurstSize_j, \text{ for } j = 2, \dots, T \\ \\ n_j \leq (MaxJitter_j \times LinkRate + \\ \quad + MinPacketSize - SegmentSize) \\ \quad / BurstSize_j, \text{ for } j = 1 \\ \\ \text{for } j = 1, \dots, T \end{array} \right.$$

Κάνοντας χρήση των προαναφερθέντων τύπων μορφής γινομένου, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τις πιθανότητες σταθερής κατάστασης όλων των καταστάσεων που ανήκουν στον υποχώρο F_i , όπου $F_i = \{n \mid n \in S^* \text{ but } (n_1, \dots, n_j + 1, \dots, n_T) \notin S^*\}$, για κάθε συνδυασμό ανωτάτων ορίων στον αριθμό των επιτρεπτών ροών για κάθε κλάση υπηρεσίας. Με βάση τις προκύπτουσες μετρήσεις εξετάζουμε τις δύο μετρικές βελτιστοποίησης:

- μεσοσταθμική πιθανότητα φραγής που δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$B_{sys} = \sum_{i=1}^T w_i P(F_i) \quad (23), \text{ όπου } P(F_i) = \sum_{n \in F_i} \pi_n \quad (24)$$

- μεσοσταθμική διεκπεραιωτικότητα που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$T_{sys} = \sum_{i=1}^T w_i L_i \quad (25), \text{ όπου } L_i = \lambda_i [1 - P(F_i)] \quad (26)$$

Παρά το γεγονός ότι ο υπολογιστικός αλγόριθμος είναι εξαντλητικός, δεν είναι απαιτητικός και χρονοβόρος κυρίως λόγω των ζεύξεων χαμηλής χωρητικότητας στους κόμβους συμφόρησης τους οποίους και εξετάζουμε. Ο ψευδοκώδικας της προσεγγιστικής μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε για να εξαχθούν τα ανώτατα όρια για κάθε κλάση υπηρεσίας φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 5-3:

Upper Limit Admission Policy

Find the maximum number of flows \max_i imposed by the jitter per traffic class i

Select the minimum from $\{\max_i, (\text{LinkRate}/\text{mean_Bandwidth}_i)\}$ as limit_i

```

for ( $n_1, \dots, n_i, \dots, n_T$ ) = 0 to ( $\text{limit}_1, \dots, \text{limit}_i, \dots, \text{limit}_T$ )
  for ( $u_1, \dots, u_i, \dots, u_T$ ) = 0 to ( $(n_1 + 1), \dots, (n_i + 1), \dots, (n_T + 1)$ )
    if ( $\text{sum}(u_i * \text{mean\_Bandwidth}_i) < \text{LinkRate}$ ) &&
      ( $u_i \leq ((\text{LinkRate} - \text{sumLowerPriorityFlows}) + \text{MinPacketSize} - \text{SegSize}) / \text{BurstSize}_i$ )
        valid state: calculate steady state probability  $\pi_n$ 
      end
    for ( $u_1, \dots, u_i, \dots, u_T$ ) = 0 to ( $n_1, \dots, n_i, \dots, n_T$ )
      if (valid state) && ( $(u_1, \dots, u_i + 1, \dots, u_T)$  invalid state)
        add to blocking_probability_i its steady state probability
      end
    calculate weighted system blocking probability and throughput
    for upper bounds set ( $n_1, \dots, n_i, \dots, n_T$ )
  end
end

```

Select the upper bounds set with the minimum weighted blocking probability

Σχήμα 5-3: Υπολογιστική Μέθοδος Πολιτικής Ανωτάτων Ορίων

5.7 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της διατριβής υλοποιήθηκε εργαλείο προσομοίωσης στην *MATLAB* [34] έτσι ώστε να μελετήσουμε και να αξιολογήσουμε την εφαρμογή της προτεινόμενης πολιτικής ελέγχου πρόσβασης τόσο ως προς την μεσοσταθμική πιθανότητα φραγής του συστήματος όσο και ως προς την αντίστοιχη συστημική μεσοσταθμική διεκπεραιωτικότητα. Για οποιαδήποτε προτεινόμενη πολιτική ελέγχου πρόσβασης στην σχετική αρθρογραφία, ο κανόνας είναι να παρουσιάζεται ευρετική βελτίωση σε σχέση με τις δύο απλούστερες αλλά ακραίες πολιτικές, την πολιτική συμμερισμού και την πολιτική καταμερισμού. Έτσι, κάθε καινούρια πολιτική συγκρίνεται με αυτές τις δύο βασικές πολιτικές. Η πολιτική καταμερισμού επιβάλλει μέγιστο αριθμό ροών για κάθε κλάση υπηρεσίας που λειτουργούν όμως συμπληρωματικά ως προς το διαθέσιμο συνολικό εύρος ζώνης του κόμβου το οποίο και, κατά συνέπεια, «επιμερίζουν ολοκληρωτικά». Εύκολα εξάγεται ότι αυτά τα συγκεκριμένα σύνολα ανωτάτων ορίων αποτελούν απλά μία υποομάδα των ομάδων τιμών που ελέγχονται με την υπολογιστική μέθοδο που περιγράφηκε προηγούμενα και, συμπερασματικά, έχουν συμπεριληφθεί στον υπολογισμό της βέλτιστης λύσης. Τελικά, οδηγούμαστε να πάρουμε σαν αναφορά σύγκρισης για την προτεινόμενη πολιτική Ανωτάτων Ορίων μόνο την πολιτική πλήρους συμμερισμού με περιορισμούς στις μέγιστες τιμές της μεταβολής καθυστέρησης (Σχήμα 5-1β).

Οι διάφορες παράμετροι για την πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων που ακολουθούν επιλέγονται με πανομοιότυπο τρόπο με αυτόν κατά την αποτίμηση του κόμβου συμφόρησης στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι, τα βάρη και για τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης επιλέγονται με βάση τη σχετική σπουδαιότητα των κλάσεων υπηρεσίας. Χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα βάρη για τις τρεις κλάσεις υπηρεσίας κλάσεων υπηρεσίας:

Κλάση Υπηρεσίας	Βάρος
Πρώτη Προτεραιότητα	0,5
Δεύτερη Προτεραιότητα	0,3
Τρίτη Προτεραιότητα	0,2

Πίνακας 5-1: Τιμές Βαρών Κλάσεων Υπηρεσίας

Για την χαμηλής χωρητικότητας ζεύξη του κόμβου συμφόρησης, αρχικά μεταβάλλουμε το εύρος ζώνης της ζεύξης μέχρι την τιμή των 10Mbps. Τεχνολογίες αναφοράς αποτελούν οι τεχνολογίες WiMAX και ATM, με πρότυπα μεγέθη τμήματος ίσα με 75 bytes και 53 bytes, αντίστοιχα. Για λίγο μεγαλύτερες τιμές εύρους ζώνης (μέχρι 20Mbps), χρησιμοποιήσουμε στις δοκιμές μας σαν αντιπροσωπευτική τεχνολογία την τεχνολογία Ethernet, με μέγεθος τμήματος ίσο με το μέγιστο μήκος πακέτου Ethernet (1500 bytes).

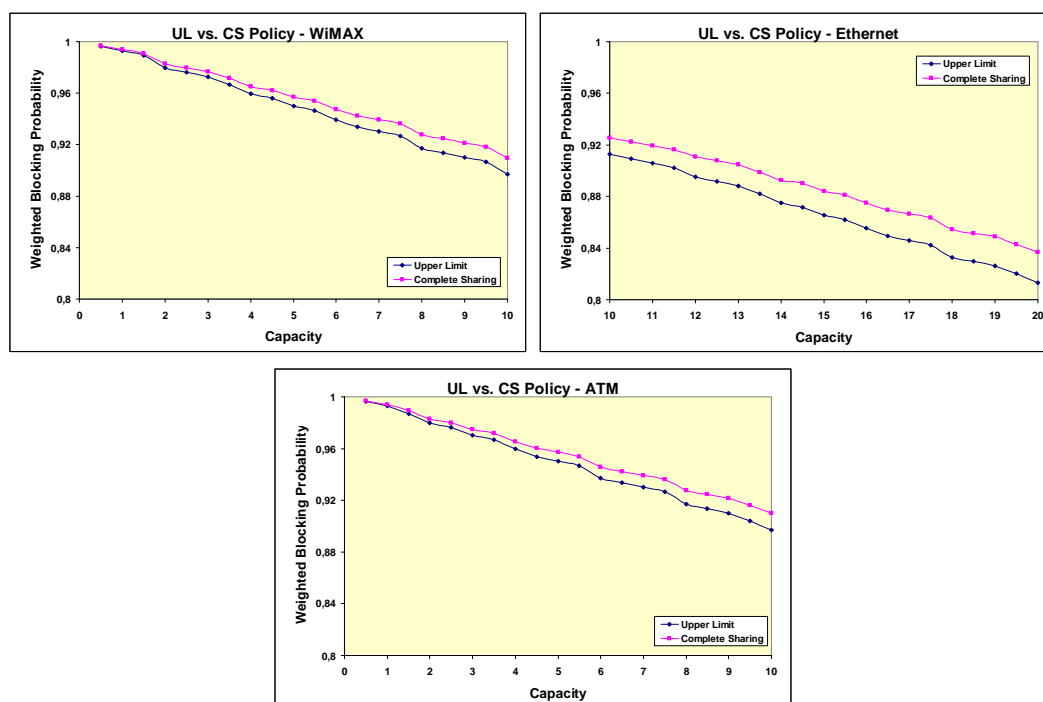
Σε σχέση με τις απαιτήσεις διακριτών μέγιστων τιμών μεταβολής καθυστέρησης για κάθε κλάση υπηρεσίας, επιλέγονται οι προτεινόμενες τιμές ανά κλάση υπηρεσίας του προηγούμενου κεφαλαίου: 1ms (κλάση πρώτης προτεραιότητας), 30ms (κλάση δεύτερης προτεραιότητας) και 900ms (τελευταία κλάση προτεραιότητας).

Όσον αφορά, τέλος, τα μεγέθη ριπής για τις τρεις κλάσεις υπηρεσίας, αυτά προκύπτουν από την φύση των ροών πολυμεσικών εφαρμογών που θα συμπεριλάβουν. Στις δοκιμές μας το μέγεθος ριπής για την πρώτη προτεραιότητας κλάση υπηρεσίας τέθηκε ίσο με 200 bytes, ενώ αντίστοιχα για την δεύτερη προτεραιότητα 1500 bytes και για την τρίτη προτεραιότητα 9000 bytes.

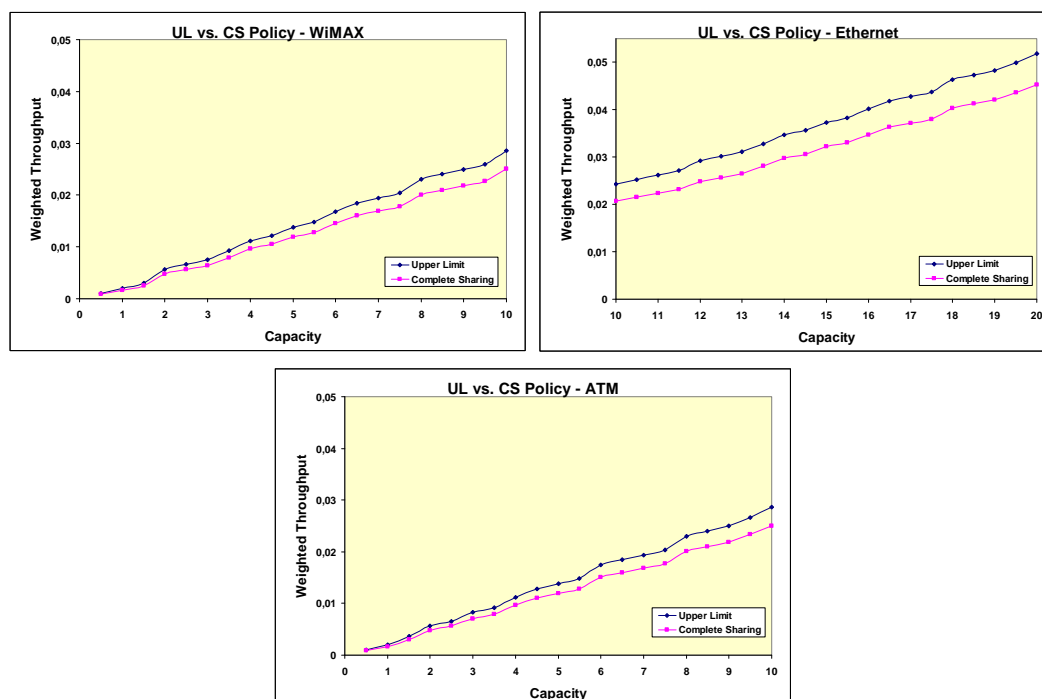
Η ένταση κίνησης για τις τρεις κλάσεις υπηρεσίας είναι πάλι το μέγεθος που διαφοροποιείται στις περιπτώσεις δοκιμών μας. Η ένταση κίνησης ρ ορίζεται ως ο λόγος του ρυθμού αφίξεων κλήσεων προς τον ρυθμό εξυπηρέτησής τους. Τα αποτελέσματα των περιπτώσεων δοκιμών που ακολουθούν αναδεικνύουν την αποδοτικότητα της προτεινόμενης πολιτικής ελέγχου πρόσβασης όταν αυτή εφαρμόζεται τοπικά σε έναν κόμβο δικτύου επόμενης γενιάς. Ο τελευταίος ενσωματώνει δικτυακές διεπαφές τόσο χαμηλής όσο και υψηλής χωρητικότητας, με ταυτόχρονη επιδίωξη ικανοποίησης συγκεκριμένων χαρακτηριστικών ποιότητας υπηρεσίας, όπως είναι η διαφοροποίηση των κλάσεων υπηρεσίας με βάση την μέγιστη τιμή μεταβολής καθυστέρησης.

Κλάσεις Υπηρεσίας Κρίσιμα Φορτωμένες

Σε αυτό το σενάριο δοκιμής, οι τιμές της έντασης κίνησης για όλες τις κλάσεις υπηρεσίας είναι κοντινές και κρίσιμα υψηλές. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η πολιτική *Ανωτάτων Ορίων (UL)* υπερισχύει της πολιτικής πλήρους συμμερισμού (*CS*), αφού δίνει χαμηλότερη μεσοσταθμική πιθανότητα φραγής και υψηλότερα επίπεδα διεκπεραιωτικότητας και για τις τρεις δικτυακές τεχνολογίες που μελετήθηκαν. Αυτό απεικονίζεται στα ακόλουθα σχήματα.



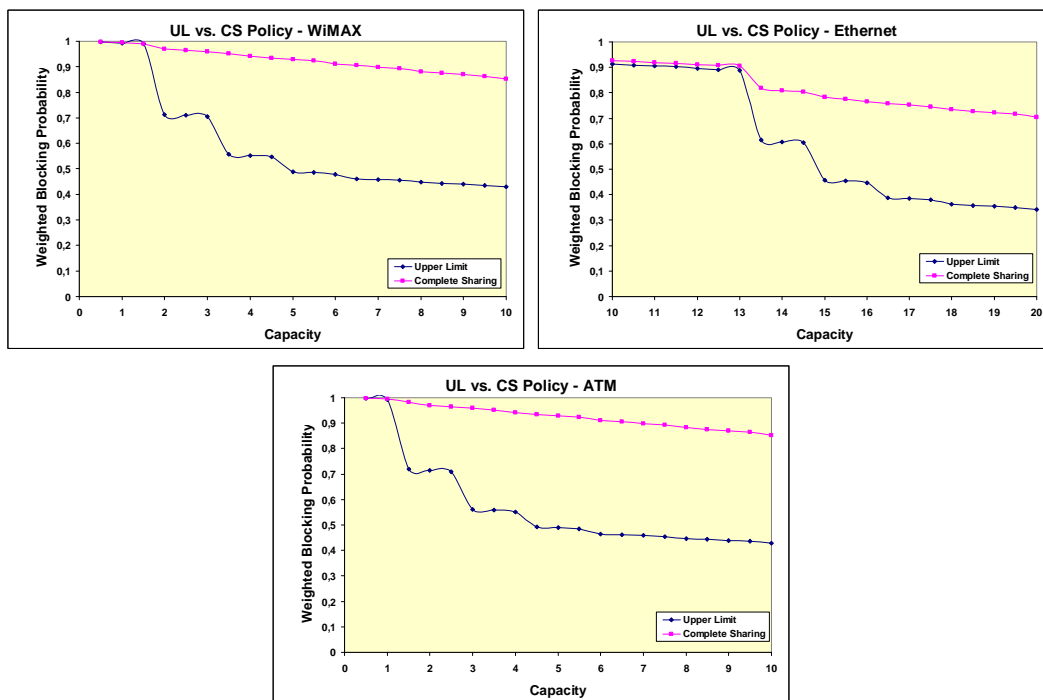
Σχήμα 5-4: Μεσοσταθμική Πιθανότητα Φραγής για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης



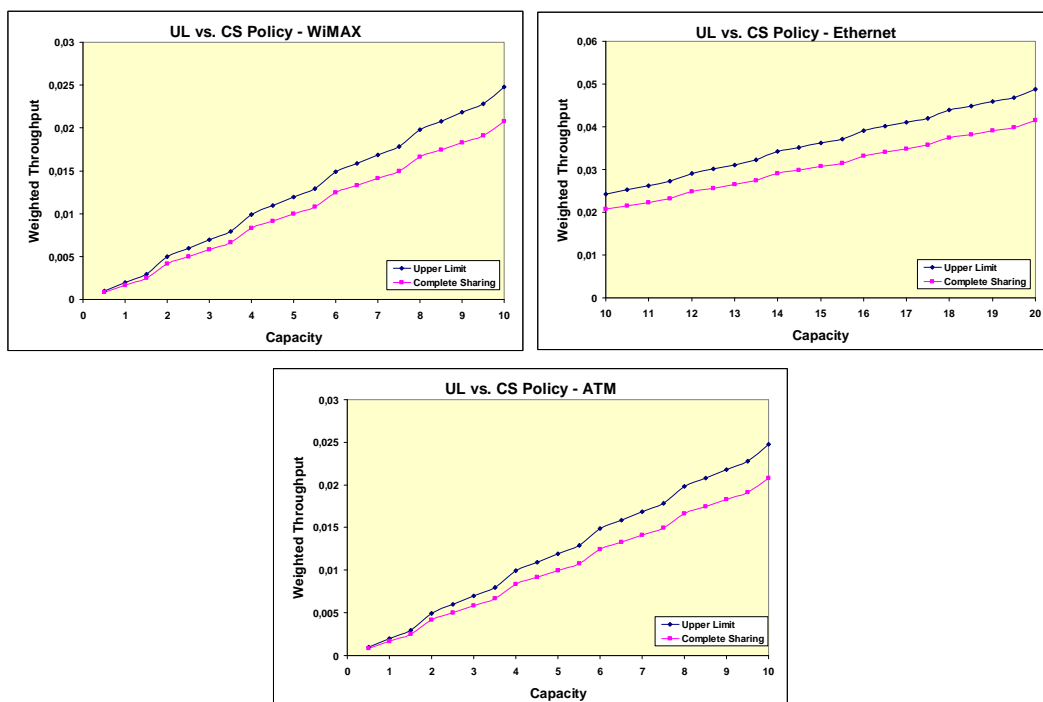
Σχήμα 5-5: Μεσοσταθμική Διεκπεραιωτικότητα για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης

Χαμηλότερης Προτεραιότητας Κλάσεις Υπηρεσίας Κρίσιμα Φορτωμένες

Στη συνέχεια των περιπτώσεων δοκιμής επιχειρήσαμε να διερευνήσουμε την εφαρμογή της πολιτικής *Ανωτάτων Ορίων* όταν η ένταση κίνησης της κλάσης υπηρεσίας με την υψηλότερη προτεραιότητα επιλέγεται να είναι υπερβολικά χαμηλότερη σε σχέση με την ένταση κίνησης των δύο άλλων κλάσεων υπηρεσίας που παραμένουν κρίσιμα φορτωμένες. Ένα μη ελεγχόμενο τέτοιο σύστημα καταλαμβάνεται από ροές κίνησης της δεύτερης και τρίτης προτεραιότητας, ενώ την ίδια στιγμή ροές που ανήκουν στην κλάση υπηρεσίας με την υψηλότερη προτεραιότητα θα μπορούσαν να απορριφθούν. Με την εφαρμογή της πολιτικής *Ανωτάτων Ορίων* εξασφαλίζεται η διατήρηση των προτεραιοτήτων με περιορισμό του μέγιστου αριθμού ροών της δεύτερης και τρίτης προτεραιότητας που μπορούν να γίνουν αποδεκτές στο σύστημα. Όπως φαίνεται και από τα γραφήματα που ακολουθούν, η πολιτική *Ανωτάτων Ορίων* επιτυγχάνει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα από την πολιτική πλήρους συμμερισμού για τις δύο μετρικές απόδοσης της μελέτης μας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η βελτίωση είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση δοκιμών, ενώ η απόκλιση γίνεται περισσότερο φανερή όταν η χωρητικότητα της ζεύξης αυξάνεται.



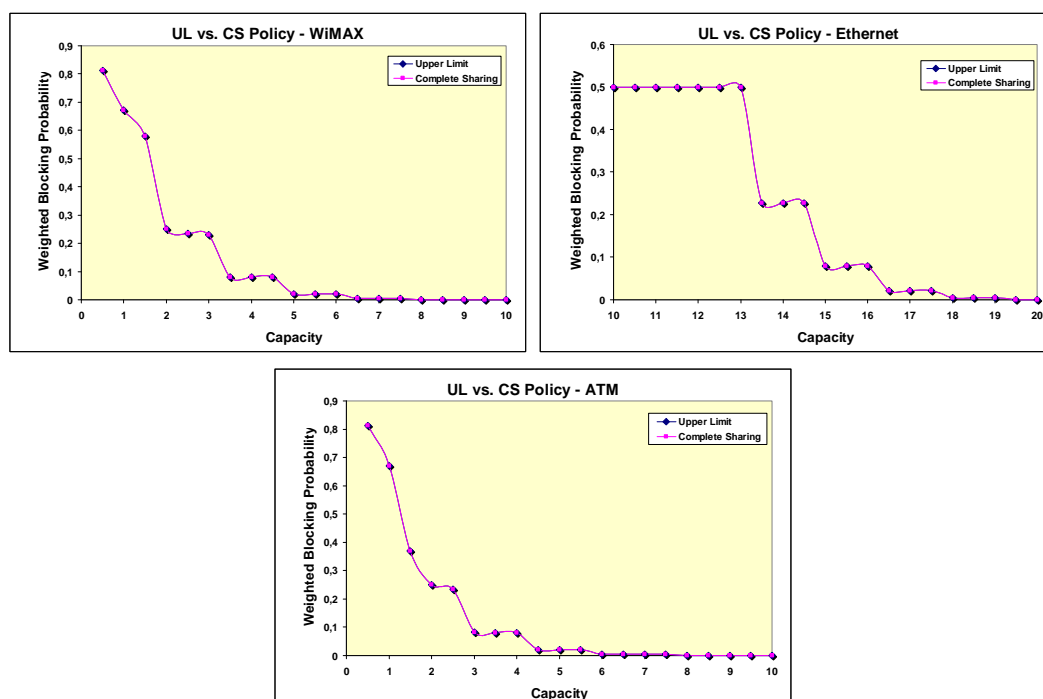
Σχήμα 5-6: Μεσοσταθμική Πιθανότητα Φραγής για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης χαμηλής προτεραιότητας



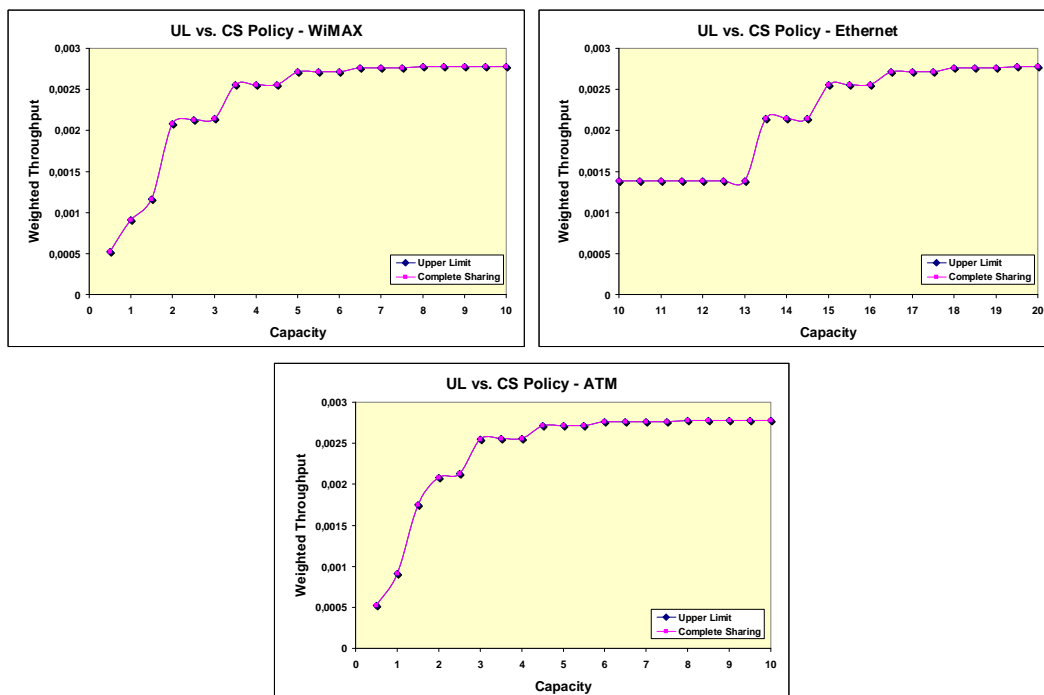
Σχήμα 5-7: Μεσοσταθμική Διεκπαιρωτικότητα για κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις κίνησης χαμηλής προτεραιότητας

Κλάσεις Υπηρεσίας Ελαφρώς Φορτωμένες

Στην τελευταία περίπτωση δοκιμών οι κλάσεις υπηρεσίας χαρακτηρίζονται από κοντινές αλλά, ταυτόχρονα, χαμηλές τιμές έντασης κίνησης. Εφαρμόζοντας την πολιτική ελέγχου πρόσβασης *Ανωτάτων Ορίων* προκύπτουν τα ίδια όρια με αυτά που αρχικά «επέβαλλαν» οι απαιτήσεις για την μεταβολή καθυστέρησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο χώρος καταστάσεων του συστήματος που προκύπτει να είναι ίδιος με τον αρχικό, δηλαδή με αυτόν της πολιτικής πλήρους συμμερισμού. Κατά συνέπεια οι τιμές μεσοσταθμικής πιθανότητας φραγής και μεσοσταθμικής διεκπεραιωτικότητας παραμένουν ίδιες με αυτές του μη ελεγχόμενου συστήματος, χωρίς μηχανισμό ελέγχου πρόσβασης. Στα επόμενα γραφήματα φαίνεται ότι οι δύο γραμμές επικαλύπτονται. Αξίζει να επισημάνουμε ότι, όπως αναμενόταν λόγω των ελαφρώς φορτωμένων κλάσεων υπηρεσίας, οι τιμές της μεσοσταθμικής πιθανότητας φραγής είναι χαμηλότερες σε σχέση με αυτές στις προηγούμενες περιπτώσεις δοκιμών και για τρεις δικτυακές τεχνολογίες που μελετήθηκαν.



Σχήμα 5-8: Μεσοσταθμική Πιθανότητα Φραγής για ελαφρώς φορτωμένες κλάσεις κίνησης



Σχήμα 5-9: Μεσοσταθμική Διεκπεραιωτικότητα για ελαφρώς φορτωμένες κλάσεις κίνησης

5.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] de Veciana G., Courcoubetis C., Walrand J. (1994). Decoupling bandwidths: a decomposition approach to resource management in networks. In Proc. of the IEEE INFOCOM '94.
- [2] Gibbens R.J., Kelly F.P. (1999). Resource pricing and the evolution of congestion control. *Automatica*, 35(12), 1969-1985.
- [3] Borst S.C., Mitra D. (1998). Virtual partitioning for robust resource sharing: computational techniques for heterogeneous traffic. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16(5), 668-678.
- [4] Labourdette J.-F., Hart J.-F.P. (1992). Blocking probabilities in multitraffic loss systems: insensitivity, asymptotic behavior, and approximations. *IEEE Transactions on Communications*, 40(8), 1355-1366.
- [5] Mitra, D., Riemann, M.I., Wang, J. (1998). Robust Dynamic Admission Control for Unified Cell and Call QoS in Statistical Multiplexers. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16(5), 692-707.
- [6] Hyman, J.M., Lazar, A.A., Pacifici, G. (1993). A Separation Principle Between Scheduling and Admission Control for Broadband Switching. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 11(4), 605-616.
- [7] Dziong, Z., Mason, L.G. (1996). Fair-efficient Call Admission Control Policies for Broadband Networks - A Game Theoretic Framework. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 4(1), 123-136.
- [8] Kalyanasundaram, S., Chong, E., Shroff, N. (2001). Admission Control Schemes to Provide Class-level QoS in Multi-class Networks. *Computer Networks*, 35(2), 307-326.
- [9] Kalyanasundaram, S., Chong, E., Shroff, N. (2002). Optimal Resource Allocation in Multi-class Networks with User-specified Utility Functions. *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 38(5), 613-630.
- [10] Cuevas, M. (2005). Admission control and resource reservation for session-based applications in next generation networks. *BT Technology Journal*, 23(2), 130-145.
- [11] Mignanti, S., DiGiorgio, A., Suraci, V. (2009). A Model Based RL Admission Control Algorithm for Next Generation Networks. In Proc. of the 2009 Eighth International Conference on Networks.
- [12] Jun, K., Kang, S. (2005). Call Admission Control for Next Generation Cellular Networks Using on Demand Round Robin Bandwidth Sharing. In Proc. of the Networking – ICN 2005.

- [13] Falowo, O.E., Chan, H.A. (2006). Fuzzy Logic Based Call Admission Control for Next Generation Wireless Networks. In Proc. of the ISWCS '06.
- [14] Salhani, M., Dhaou, R., Beylot, A. (2009). QoS mapping and connection admission control in the WiMAX - DVB-RCS access network. In Proc. of the 4th ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks.
- [15] Rong, B., Qian, Y., Kejie, L., Chen, H. Guizani, M. (2008). Call Admission Control Optimization in WiMAX Networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 57(4), 2509-2522.
- [16] Camara, D., Filali, F. (2009). Scheduling and Call Admission Control, A WiMax Mesh Networks View. In Guide to Wireless Mesh Networks (pp. 449-469). London: Springer.
- [17] Khemiri, S., Boussetta, K., Achir, N., Pujolle, G. (2007). Optimal Call Admission Control for an IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Network. In Proc. of the NET-COOP 2007.
- [18] Houeto, F., Pierre, S. (2004). Characterization of jitter and admission control in multiservice networks. IEEE Communications Letters, 8(2), 125-127.
- [19] Bianchi, G., Borgonovo, F., Capone, A., Fratta, L., Petrioli, C. (2002) Endpoint admission control with delay variation measurements for QoS in IP networks, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 32(2), 61-69.
- [20] Zhao, D., Shen, X., Mark, J. (2002) QoS Performance Bounds and Efficient Connection Admission Control for Heterogeneous Services in Wireless Cellular Networks, Kluwer Wireless Networks, 8, 85-90.
- [21] Altman E. (2000). Applications of markov decision processes in communication networks: A survey. Technical Report RR-3984.
- [22] Howard R.-A. (1971). Dynamic Probabilistic Systems, Vol II: Semi-Markov and Decision Processes. Wiley.
- [23] Ross K. (1995). Multiservice Loss Models for Broadband Telecommunication Networks. Springer Verlag.
- [24] Drakos M.-P., Nikolaidis A., Papastefanos S., Stassinopoulos G. (2006). Optimal Admission Control Schemes in MUSE Network. In Proc. of the Broadband Europe.
- [25] Kalyanasundaram S., Chong E., Shroff N. (2001). Admission Control Schemes to provide class-level QoS in multi-class networks. Computer Networks, 35, 307-326.
- [26] Puterman, M.L. (1994). Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming. New York: Wiley.

- [27] Ross S. (1970). Applied Probability Models with Optimization Applications. Holden-Day.
- [28] Ross S. (1983). Introduction to Stochastic Dynamic Programming. Academic Press.
- [29] Dean T., Givan R., Leach S. (1997). Model reduction techniques for computing approximately optimal solutions for Markov decision processes. In Proc. of the Uncertainty in AI.
- [30] Dean T., Givan R. (1997). Model minimization in Markov decision processes. In the Proc. of the National Conference on Artificial Intelligence.
- [31] Ross K., Tsang D. (1989). The stochastic knapsack problem. IEEE Transactions on Communications, 37(7), 740-747.
- [32] Foschini G., Gopinath B. (1983). Sharing Memory Optimally. IEEE Transactions on Communications, 31, 352-360.
- [33] Drakos M.-P., Stassinopoulos G., Sygkouna I., Nikolaidis A. (2010) A QoS-Aware Admission Control Scheme for Bottleneck Mitigation in Next-Generation Networks. Accepted to appear in: Telecommunication Systems, Special issue on: Challenges in Next-Generation and Resource-Constrained Networks, Springer.
- [34] MATLAB - The Language of Technical Computing. Available at: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

6.1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Τα δίκτυα επόμενης γενιάς αναμένεται να ενσωματώσουν όλες τις ενσύρματες και ασύρματες τεχνολογίες δικτύων, παρέχοντας στους χρήστες ομοιόμορφες και εξατομικευμένες πολυμεσικές υπηρεσίες οπουδήποτε και οποτεδήποτε. Δεδομένου ότι οι τεχνολογίες δικτύων θα συνεχίσουν να εξελίσσονται με γρήγορους ρυθμούς, για να επιτευχθεί η αξιοποίηση των δικτύων επόμενης γενιάς στο μέγιστο, απαιτείται να ξεπεραστεί το κρίσιμο πρόβλημα της διαλειτουργικότητας μεταξύ δικτύων υψηλής και χαμηλής χωρητικότητας. Η παρούσα διατριβή επικεντρώθηκε στην πρόταση ενός ολοκληρωμένου τεχνικού πλαισίου, το οποίο φιλοδοξεί να είναι εφαρμόσιμο ανεξάρτητα από τις επιμέρους τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται κάθε φορά και οι οποίες αναμένεται να εξελίσσονται συνεχώς, ενώ ταυτόχρονα είναι αυτές που συνιστούν το πρόβλημα της διαλειτουργικότητας μεταξύ δικτύων διαφορετικής χωρητικότητας. Ως βασικός στόχος της εργασίας τέθηκε η διερεύνηση και η υποβολή συνολικής πρότασης μη εξατομικευμένων μηχανισμών για τη βελτίωση της κάθετης διαλειτουργικότητας και της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσίας σε πολυ-υπηρεσιακά δίκτυα επόμενης γενιάς.

Ειδικότερα, η αποδεδειγμένη ανάγκη υποστήριξης πολλαπλών κλάσεων τηλεπικοινωνιακής κίνησης στα δίκτυα επόμενης γενιάς για την παροχή εγγυημένης και ποσοτικοποιημένης ποιότητας υπηρεσίας αποτέλεσε την βασική θεώρηση της ερευνητικής εργασίας. Μία τέτοια διαφοροποίηση της κίνησης επιφέρει αναπόφευκτα επιβάρυνση στην πολυπλοκότητα υλοποίησης, επιβάλλοντας σχετική επιπρόσθετη δικτυακή λειτουργικότητα. Από την άλλη μεριά, η ταυτόχρονη απαίτηση για συγκράτηση αυτής της επιβάρυνσης προς όφελος τόσο του παρόχου του δικτύου και της υπηρεσίας όσο και του τελικού χρήστη, επέβαλε το ουσιαστικό κριτήριο αξιολόγησης της πρότασης της εργασίας. Ο στόχος μίας πραγματολογικής, απλής και οικονομικά αποδοτικής προσέγγισης υιοθετήθηκε στις τρεις ακόλουθες κρίσιμες ερευνητικές συνιστώσες της πρότασης της διατριβής:

- ο Στην μελέτη καθορισμού του αριθμού των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσίας, των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, καθώς και του κυρίαρχου

διαφοριστή τους. Η επιλογή του τελευταίου αποτέλεσε και την αρχική θεώρηση των δύο επόμενων ερευνητικών συνιστωσών.

- ο Στην μελέτη εφαρμογής ενός μηχανισμού χρονοπρογραμματισμού για την εξυπηρέτηση των προτεινόμενων κλάσεων υπηρεσίας στους κόμβους που εμφανίζουν το πρόβλημα της διαλειτουργικότητας μεταξύ δικτύων διαφορετικής χωρητικότητας, δηλαδή τους κόμβους συμφόρησης του δικτύου.
- ο Και, τέλος, στην μελέτη εφαρμογής μίας πολιτικής ελέγχου πρόσβασης κλήσεων σε τοπικό επίπεδο. Το τελευταίο επιλέχθηκε ως αποτελεσματική εναλλακτική σε σχέση με τον κεντρικό έλεγχο, δεδομένου ότι επιτρέπει καλύτερη επίγνωση της διαθεσιμότητας των περιορισμένων δικτυακών πόρων σε προβληματικούς κόμβους.

Τα παραπάνω επιμέρους αντικείμενα μελετήθηκαν σε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο, το οποίο ξεκινάει από ένα θεωρητικό υπόβαθρο με αναφορά στα χαρακτηριστικά των δικτύων επόμενης γενιάς και τις διαφορετικές παραμέτρους της ποιότητας υπηρεσίας και καταλήγει στα ειδικότερα προβλήματα μελέτης της διατριβής. Στο κεφάλαιο 1, το οποίο αποτελεί εισαγωγή της παρούσας διατριβής, έγινε μία σύντομη αναφορά στην εξέλιξη των δικτύων και συζητήθηκαν οι προκλήσεις που παρουσιάζονται στα δίκτυα επόμενης γενιάς. Επιπρόσθετα, αναδείχτηκε η ανάγκη που έχει δημιουργηθεί για απλές λύσεις διαλειτουργικότητας σε πολυ-υπηρεσιακά δίκτυα επόμενης γενιάς.

Στο κεφάλαιο 2 αρχικά δίνεται ο ορισμός των δικτύων επόμενης γενιάς και παρουσιάζονται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια καταγράφονται τα πλεονεκτήματα μίας ολοκληρωμένης προσέγγισης δικτύων επόμενης γενιάς. Σημαντικό τμήμα του κεφαλαίου καταλαμβάνει η ανάλυση της λειτουργικής αρχιτεκτονικής ενός τέτοιου δικτύου, η ομαδοποίηση των βασικών λειτουργιών του σε λειτουργίες στρώματος υπηρεσιών και σε λειτουργίες στρώματος μεταφοράς και η περιγραφή των επιμέρους συνιστωσών τους. Ακολουθεί η καταγραφή των πλέον κυρίαρχων τεχνολογιών στα δίκτυα επόμενης γενιάς, τόσο για τα δίκτυα κορμού όσο και για τα δίκτυα πρόσβασης. Δίνονται οι ορισμοί κάθετης και οριζόντιας διαλειτουργικότητας και σχετικά παραδείγματα αυτών. Τέλος, παρουσιάζεται μία γενική τοποθέτηση του κινήτρου μελέτης και της προσέγγισης για τη λύση του προβλήματος στα πλαίσια της διατριβής.

Αντικείμενο του κεφαλαίου 3 αποτέλεσε η ποιότητα υπηρεσίας σε πολυ-υπηρεσιακά δίκτυα και οι διάφορες μετρικές ποσοτικοποίησής της. Περιγράφονται οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για έλεγχο της ποιότητας, τα χαρακτηριστικά τους και τα

μοντέλα εφαρμογής τους σε δίκτυα επόμενης γενιάς. Συγκεκριμένα, αναδείχθηκε η συμβολή στην παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας μηχανισμών, όπως ο έλεγχος πρόσβασης, η μορφοποίηση και η αστυνόμευση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, η ταξινόμηση πακέτων, η πολιτική χρονοπρογραμματισμού, η διαδικασία απόρριψης πακέτων, η δρομολόγηση με βάση την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας και η δέσμευση δικτυακών πόρων. Αναλύεται η λογική καθορισμού διαφορετικών κλάσεων τηλεπικοινωνιακής κίνησης και ο τρόπος που αυτές αντιστοιχίζονται σε κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας. Για την πληρότητα της διατριβής παρουσιάστηκε η προσέγγιση της ποιότητας εμπειρίας που λειτουργεί συμπληρωματικά στην ποιότητα υπηρεσίας για την αποτίμηση της συνολικής ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας. Ιδιαίτερα αναλύθηκε ο μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης αφού αποτέλεσε στη συνέχεια ιδιαίτερο αντικείμενο έρευνας στην παρούσα διατριβή. Συγκεκριμένα, δόθηκαν οι συνθήκες απαιτήσεων που θα πρέπει να ικανοποιεί μία επιτυχημένη πολιτική πρόσβασης καθώς και τα κριτήρια ταξινόμησης των πολιτικών πρόσβασης, όπως το είδος της κίνησης, το δικτυακό σημείο καθώς και ο τομέας εφαρμογής, ο τρόπος κτήσης γνώσης για την ποιότητα και την ποσότητα της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, η χρήση σηματοδοσίας, ο αντικειμενικός σκοπός και, τέλος, ο χρόνος λήψης της απόφασης πρόσβασης.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες του ολοκληρωμένου πλαισίου του μηχανισμού διαλειτουργικότητας για δίκτυα επόμενης γενιάς. Προσδιορίζονται οι 4 προτεινόμενες διαφοροποιημένες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας για τις ροές των πακέτων σε δίκτυα επόμενης γενιάς. Αναγνωρίζεται η μέγιστη μεταβολή καθυστέρησης ως μέτρο επίδοσης κρίσιμης σημασίας για πολυμεσικές εφαρμογές υψηλής ποιότητας και προτείνεται ως κυρίαρχος διαφοριστής των κλάσεων υπηρεσίας. Παρατηρώντας ότι η μέγιστη τιμή της συναντάται στους κόμβους συμφόρησης, αναλύεται η ποιοτική σχέση της με την μέγιστη διατηρηματική μεταβολή καθυστέρησης, καθώς και με την διατηρηματική καθυστέρηση. Ακολουθεί η πρόταση της διατριβής για εφαρμογή χρονοπρογραμματισμού αυστηρής προτεραιότητας για την εξυπηρέτησή των κλάσεων υπηρεσίας και, με βάση αυτό, εξάγονται οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της μεταβολής καθυστέρησης στους κόμβους συμφόρησης, οι οποίες και επιβεβαιώνονται με χρήση εργαλείου δικτυακής προσομοίωσης. Στη συνέχεια, εξάγονται οι ντετερμινιστικές σχέσεις που δίνουν τον μέγιστο αριθμό επιτρεπτών ροών ανά κλάση υπηρεσίας, ενώ, ταυτόχρονα, παρουσιάζεται και η αντίστοιχη στατιστική μελέτη που καθορίζει μεγαλύτερα ανώτατα όρια επιτρεπτών ροών με κόστος στην πιθανότητα απόρριψης πακέτων. Τέλος, πραγματοποιείται με χρήση εργαλείου προσομοίωσης, αποτίμηση της επίδοσης ενός κόμβου συμφόρησης ως προς την μεσοσταθμική συστημική πιθανότητα φραγής και την διεκπεραιωτικότητα, παίρνοντας ως δεδομένο την μη εφαρμογή πολιτικής αποδοχής πρόσβασης. Η αποτίμηση έγινε για 3

διαφορετικές τεχνολογίες δικτύου και για διαφορετικές συνθήκες τηλεπικοινωνιακής κίνησης ανά κλάση υπηρεσίας.

Στο κεφάλαιο 5 προτείνεται ένας προηγμένος μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης, βασισμένος στην μεταβολή καθυστέρησης. Προς αυτή την κατεύθυνση, διαμορφώνονται δύο προβλήματα βελτιστοποίησης του ελέγχου πρόσβασης σε πολυ-υπηρεσιακά δίκτυα με τα χαρακτηριστικά που προτάθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το πρώτο πρόβλημα στοχεύει στη βελτιστοποίηση της μεσοσταθμικής συστημικής πιθανότητας φραγής και το δεύτερο στην συστημική διεκπεραιωτικότητα. Και τα δύο δίνονται σαν διαδικασίες απόφασης *Markov* συνεχούς χρόνου και υποδεικνύονται οι δυνατές μέθοδοι επίλυσής τους. Στη συνέχεια, περιορίζεται η διερεύνηση στις πολιτικές κυρτών συντεταγμένων και προτείνεται μια απλοποιημένη πολιτική ελέγχου πρόσβασης κλήσεων που βασίζεται στην υιοθέτηση γραμμικών ανώτατων ορίων στις επιτρεπτές ροές ανά κλάση υπηρεσίας, που αποδεικνύεται ότι παρέχει ανταγωνιστικές λύσεις με βάση τα αποτελέσματα προσομοιώσεων. Και στη περίπτωση αυτή, τρεις διαφορετικές τεχνολογίες δικτύου και παραμετροποιήσιμα χαρακτηριστικά έντασης κίνησης χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την αποδοτικότητα της προτεινόμενης πολιτικής.

6.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διατριβή υπερασπίζεται μία πραγματολογική και δομημένη λύση για την παροχή υπηρεσιών με εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας σε δίκτυα επόμενης γενιάς. Η λύση αυτή συνίσταται βασικά στην διαφοροποίηση των κλάσεων τηλεπικοινωνιακής κίνησης, στην διαστασιοποίηση του δικτύου και στην σύμπραξη συγκεκριμένων μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού και ελέγχου πρόσβασης κλήσεων. Αναγνωρίζοντας την ανάγκη για προτάσεις διαλειτουργικότητας των τεχνολογιών που θα αποτελέσουν την βάση των δικτύων επόμενης γενιάς, η εργασία αυτή προτείνει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο λειτουργίας διακριτών δομοστοιχείων των δικτυακών κόμβων προς την κατεύθυνση της βελτίωσης της κάθετης διαλειτουργικότητας και της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσίας σε πολυ-υπηρεσιακά δίκτυα.

Η πρώτη συνεισφορά της εργασίας είναι ο καθορισμός 4 συγκεκριμένων κλάσεων υπηρεσίας, με την παραδοσιακή *Best Effort* κλάση να αποτελεί την μία από αυτές. Η ανάγκη για περιορισμό των κριτηρίων διαφοροποίησης των υποστηριζόμενων κλάσεων υπηρεσίας οδήγησε την περαιτέρω έρευνα στα πλαίσια της εργασίας. Μελετώντας πιο προσεκτικά τα ευρέως διαδεδομένα κριτήρια διαφοροποίησης των κλάσεων υπηρεσίας (ελαστικότητα, διαδραστικότητα, διαθεσιμότητα, συμμετρία, απαίτηση εύρους ζώνης), καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μόνο δύο από τα προηγούμενα είναι περισσότερο σχετικά με την διαφοροποίηση κλάσεων υπηρεσίας, η ελαστικότητα και η διαθεσιμότητα. Τα κριτήρια του

εύρους ζώνης και της συμμετρίας μεταφράζονται τελικά στην παράμετρο του ρυθμού εφαρμογής, η οποία είναι προτιμότερο να επιλέγεται ανεξάρτητα, ανά κατεύθυνση και κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Ακόμα, το κριτήριο της διαδραστικότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διάκριση και μόνο των τύπων των εφαρμογών.

Το κριτήριο διαθεσιμότητας σαν διαφοριστής των κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας ισοδυναμεί με την πιθανότητα απόρριψης πακέτων. Με βάση την πρόταση της εργασίας για ίση μεταχείριση των τριών κλάσεων υπηρεσίας υψηλότερης προτεραιότητας, προτείνουμε ενιαία επιδιωκόμενη τιμή για την πιθανότητα απόρριψης αυτών των κλάσεων και ίση με 10^{-10} . Για το κριτήριο της ελαστικότητας, η εργασία της διατριβής αναγνώρισε ότι η ελαστική τηλεπικοινωνιακή κίνηση υποστηρίζεται με χρήση ενδιάμεσων καταχωρητών στους δικτυακούς κόμβους. Οι τελευταίοι έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν τα πακέτα προσωρινά, όταν το δίκτυο εμφανίζει συμφόρηση, και να τα μεταδίδουν όταν η συνθήκη συμφόρησης παύει να ισχύει. Για την ελαστική κίνηση, μεγαλύτερης σπουδαιότητας χαρακτηριστικό αποτελεί η ακεραιότητα λήψης των πακέτων της εφαρμογής, ενώ, αντίθετα, για την ανελαστικού τύπου τηλεπικοινωνιακή κίνηση, προτεραιότητα δίνεται στην έγκαιρη άφιξη των πακέτων στον τελικό προορισμό.

Η ελαστικότητα αποτελεί ουσιαστικά ποιοτικό όρο, με την καθυστέρηση ουροποίησης να είναι η παράμετρος που την ποσοτικοποιεί. Η τελευταία είναι μετρική στατιστικής ανάλυσης που μπορεί να παίρνει τιμές από σχεδόν μηδενική, όταν πακέτα εισέρχονται σε έναν άδειο ενδιάμεσο καταχωρητή, μέχρι την τιμή μέγιστης καθυστέρησης, που θεωρητικά μπορεί να είναι άπειρη. Η κατάσταση άπειρης καθυστέρησης περιγράφεται σαν κατάσταση λιμοκτονίας και μπορεί να συμβεί όταν, κλάσεις υψηλότερης προτεραιότητας εμποδίζουν μία ουρά χαμηλής προτεραιότητας να εξυπηρετηθεί. Στα πλαίσια της εργασίας, για το κριτήριο της ελαστικότητας προτείνεται η διαφοροποίηση των κλάσεων υπηρεσίας με βάση την μέγιστη καθυστέρηση ουροποίησης, που ισοδυναμεί με την μέγιστη επιτρεπτή μεταβολή καθυστέρησης πακέτου. Αυτή ισούται με την διαφορά της μέγιστης καθυστέρησης ουροποίησης από την αντίστοιχη ελάχιστη. Με την χρήση της μετρικής της μέγιστης επιτρεπτής μεταβολής καθυστέρησης ανά κόμβο κερδίζουμε το πλεονέκτημα της εξασφάλισης της συμβατότητας των δικτυακών κόμβων με τις επιθυμητές προδιαγραφές λειτουργίας με χρήση αναλυτικών ή μετρητικών μηχανισμών.

Ο αναλυτικός τρόπος υπολογισμού της μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης που προτάθηκε στα πλαίσια της εργασίας αποτελεί και την δεύτερη κυριότερη συνεισφορά της παρούσας διατριβής. Αφού επιλέγεται και προτείνεται ως μηχανισμός χρονοπρογραμματισμού πακέτων ο μηχανισμός αυστηρής προτεραιότητας, προκύπτουν οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης. Με βάση τις

προτεινόμενες επιδιωκόμενες τιμές για την μετρική αυτή εξάγονται τα ανώτατα όρια επιτρεπτών ροών ανά κλάση υπηρεσίας, καθώς και τα ελάχιστα μεγέθη ενδιάμεσων καταχωρητών για κάθε υποστηριζόμενη κλάση. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα στατιστικής μελέτης και προκύπτει ότι ο ντετερμινιστικός τρόπος προσέγγισης ενδείκνυται για τους δικτυακούς κόμβους συμφόρησης, στους οποίους η χωρητικότητα ζεύξης εισόδου είναι πολύ μεγαλύτερη από την χωρητικότητα ζεύξης εξόδου. Αυτό αποδεικνύει την εφαρμοσιμότητα της προτεινόμενης λύσης στο πρόβλημα της κάθετης διαλειτουργικότητας σε δίκτυα επόμενης γενιάς, όπου διαφορετικών ρυθμών τεχνολογίες θα κληθούν να συνυπάρξουν αρμονικά. Ακόμα, προέκυψε ότι η εφαρμογή στατιστικής ανάλυσης, που θα επέτρεπε την αποδοχή μεγαλύτερου αριθμού ροών, εμφανίζει το μειονέκτημα του περιορισμού του επιτρεπτού φορτίου ανά ουρά προτεραιότητας με στόχο την διατήρηση της επιδιωκόμενης τιμής για την πιθανότητα απόρριψης των πακέτων.

Τα πειραματικά αποτελέσματα δικτυακής προσομοίωσης αποδεικνύουν την εγκυρότητα των αναλυτικών σχέσεων για τις επιδιωκόμενες τιμές μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης ανά κόμβο δικτύου. Οι παρατηρούμενες τιμές για τις τρεις υψηλότερης προτεραιότητας κλάσεις υπηρεσίας παραμένουν μέσα στα επιτρεπτά όρια, ενώ η τέταρτη και τελευταίας προτεραιότητας κλάση, η οποία είναι και η μοναδική η οποία υφίσταται απώλειες πακέτων, παρουσιάζει αυξημένες τιμές μεταβολής καθυστέρησης που φτάνουν να είναι ίσες με μερικά δευτερόλεπτα. Το τελευταίο αποδεικνύει ότι το κόστος ιδιαίτερης μεταχείρισης των τριών πρώτων κλάσεων μεταφέρεται στην εξυπηρέτηση της τέταρτης κλάσης, κάτι που είναι αποδεκτό για τις εφαρμογές παρασκηνίου που περιλαμβάνονται σε αυτή. Όσον αφορά τις καθυστερήσεις που παρατηρούνται, τα αποτελέσματα της δικτυακής προσομοίωσης δείχνουν ότι η κίνηση της κλάσης της ύψιστης προτεραιότητας υφίσταται τις μικρότερες διατεματικές καθυστερήσεις με βάση την δικτυακή τοπολογία προσομοίωσης, ενώ, όπως αναμενόταν, οι υπόλοιπες κλάσεις υπηρεσίας παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές διατεματικής καθυστέρησης. Τέλος, από την ίδια ομάδα προσομοιώσεων, προκύπτει η εγκυρότητα των αναλυτικών σχέσεων για την διαστασιοποίηση των ενδιάμεσων καταχωρητών των κλάσεων υπηρεσίας. Οι μέγιστες τιμές των ουρών των τριών κλάσεων υψηλότερης προτεραιότητας δεν ξεπερνούν ποτέ το μέγεθός τους και, κατά συνέπεια, δεν παρατηρείται απώλεια πακέτων για τις κλάσεις αυτές. Από την άλλη μεριά, η χρήση αυστηρών υπολογιστικών μεθόδων για τον προ-υπολογισμό των μεγεθών των ενδιάμεσων καταχωρητών αποτρέπει οποιαδήποτε άσκοπη δέσμευση πόρων στον δικτυακό κόμβο.

Η αποτίμηση ενός δικτυακού κόμβου συμφόρησης συμβατού με τις προδιαγραφές υποστήριξης των προτεινόμενων κλάσεων υπηρεσίας αποδεικνύουν ότι η συγκράτηση των τιμών της μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης ανά κλάση υπηρεσίας και, ισοδύναμα, των

επιτρεπτών ροών, γίνεται με κόστος στις μεσοσταθμικές μετρικές απόδοσης του κόμβου, όπως είναι η πιθανότητα φραγής και η διεκπεραιωτικότητα. Έχοντας ως δεδομένο ότι οι κλήσεις για εξυπηρέτηση ροών περιορίζονται πλέον από αυτές τις επιδιωκόμενες τιμές της μεταβολής καθυστέρησης και όχι από την διαθεσιμότητα του εύρους ζώνης της ζεύξης, χρησιμοποιούμε τις σχέσεις μορφής γινομένου για να αποτυπώσουμε την διαφοροποίηση στις συγκεκριμένες μετρικές απόδοσης. Η πρώτη σημαντικότερη διαπίστωση που προκύπτει είναι η αδυναμία ενσωμάτωσης τεχνολογιών που δεν παρέχουν μηχανισμό κατάτμησης ή που χαρακτηρίζονται από μεγάλο μέγεθος τμήμα σε μέρη του δικτύου με χαμηλής χωρητικότητας ζεύξεις. Στην περίπτωση αυτή, κάνοντας χρήση των αναλυτικών σχέσεων του κεφαλαίου 4, οι επιτρεπτές ροές ανά κλάση υπηρεσίας περιορίζονται κατά πολύ για να επιτευχθούν οι προτεινόμενες απαιτήσεις της μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης. Όταν μάλιστα η χωρητικότητα της ζεύξης εξόδου είναι ιδιαίτερα μικρή ($\ll 10\text{Mbps}$), ο αριθμός των επιτρεπτών ροών στην κλάση ύψιστης προτεραιότητας εκμηδενίζεται.

Επιπρόσθετα, τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι, για τις προτεινόμενες τιμές της μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης ανά κλάση υπηρεσίας και για τρεις διαφορετικές τεχνολογίες δικτύου, τόσο η μεσοσταθμική πιθανότητα φραγής όσο και η αντίστοιχη συστημική διεκπεραιωτικότητα επηρεάζονται σημαντικά. Γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η μεν πιθανότητα φραγής αυξάνεται, ενώ η διεκπεραιωτικότητα μειώνεται για όλες τις τιμές της χωρητικότητας ζεύξης εξόδου ενός κόμβου με χαρακτηριστικά συμφόρησης. Ειδικότερα, για συνολικά κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις υπηρεσίας το εύρος της διακύμανσης της πιθανότητας φραγής και της διεκπεραιωτικότητας είναι μεγάλο, ενώ το ίδιο έντονο είναι το φαινόμενο για συνολικά ελαφρώς φορτωμένες κλάσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο, η διαφορά των δύο ομάδων αποτελεσμάτων έγκειται στο επίπεδο τιμών τους. Και για την τρίτη περίπτωση μετρήσεων που εξετάστηκε όμως, αυτήν κατά την οποία μόνο οι κλάσεις χαμηλότερης προτεραιότητας παραμένουν κρίσιμα φορτωμένες, παρατηρείται διαφοροποίηση στις χαρακτηριστικές μετρικές με πολύ μικρότερες αποκλίσεις. Επιπρόσθετα, παρατηρείται και στις τρεις περιπτώσεις έντασης των κλήσεων, αύξηση των αποκλίσεων όσο αυξάνεται η χωρητικότητα της ζεύξης εξόδου.

Για την πλήρη εικόνα της επίδρασης της συγκράτησης της μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης, λαμβάνουμε αριθμητικά αποτελέσματα για τις χαρακτηριστικές μετρικές μεταβάλλοντας τις απαιτήσεις της μεταβολής καθυστέρησης ανά κλάση υπηρεσίας. Αν και η πρόταση της εργασίας περιλαμβάνει διακριτές καθορισμένες τιμές για τις υποστηριζόμενες κλάσεις, εντούτοις τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν ότι η διακύμανση των χαρακτηριστικών είναι τόσο μεγαλύτερη όσο αυστηρότερες είναι οι απαιτήσεις σε μεταβολή καθυστέρησης. Συμπερασματικά μία ανάλυση ισολογισμού μεταξύ επιδιωκόμενων ανωτάτων ορίων μεταβολής καθυστέρησης και συστημικής απόδοσης κρίνεται επιβεβλημένη. Προς

αυτή την κατεύθυνση, η εφαρμογή πολιτικής ελέγχου αποδοχής κλήσεων θα λειτουργούσε εξισορροπιακά και κρίνεται επιβεβλημένη.

Η διερεύνηση και καταγραφή βέλτιστων πολιτικών ελέγχου πρόσβασης με σκοπό την ικανοποίηση της απαίτησης για βελτίωση των χαρακτηριστικών μετρικών της μεσοσταθμικής πιθανότητας φραγής των κλήσεων των κλάσεων υπηρεσίας, καθώς και της συστημικής διεκπεραιωτικότητας, καθώς και η πρόταση της απλοποιημένης πολιτικής *Ανωτάτων Ορίων* αποτελεί την τρίτη συνεισφορά της παρούσας διατριβής. Η μορφοποίηση των δύο προβλημάτων βελτιστοποίησης ως διαδικασίες αποφάσεων *Markov* συνεχούς χρόνου είναι το απαραίτητο εργαλείο για την εξαγωγή των αποφάσεων πρόσβασης για συγκεκριμένες συνθήκες τηλεπικοινωνιακής κίνησης των κλάσεων υπηρεσίας. Η διαπίστωση ότι η διαδικασία του υπολογισμού της βέλτιστης πολιτικής, σε μελλοντικά δίκτυα με περισσότερες από τις προτεινόμενες κλάσεις υπηρεσίας και μεγαλύτερες τιμές για τις χωρητικότητες των ζεύξεων, περιλαμβάνει επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης με μεγάλους και δύσχρηστους χώρους καταστάσεων και χώρους ενεργειών, μας οδήγησε στην πρόταση της απλοποιημένης πολιτικής *Ανωτάτων Ορίων*.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι, εφαρμόζοντας την πολιτική *Ανωτάτων Ορίων* για τις προτεινόμενες τιμές της μέγιστης μεταβολής καθυστέρησης ανά κλάση υπηρεσίας και για τρεις διαφορετικές τεχνολογίες δικτύου, τόσο η μεσοσταθμική πιθανότητα φραγής όσο και η αντίστοιχη συστημική διεκπεραιωτικότητα επηρεάζονται θετικά. Ειδικότερα, για συνολικά κρίσιμα φορτωμένες κλάσεις υπηρεσίας, αποδεικνύεται ότι η πολιτική *Ανωτάτων Ορίων* υπερισχύει της πολιτικής πλήρους συμμερισμού, αφού δίνει χαμηλότερη μεσοσταθμική πιθανότητα φραγής και υψηλότερα επίπεδα διεκπεραιωτικότητας και για τις τρεις δικτυακές τεχνολογίες που μελετούνται. Η επίδοση της προτεινόμενης πολιτικής γίνεται περισσότερο εμφανής στη δεύτερη περίπτωση μετρήσεων, αυτήν κατά την οποία μόνο οι κλάσεις χαμηλότερης προτεραιότητας παραμένουν κρίσιμα φορτωμένες. Στην περίπτωση αυτή, εξασφαλίζεται η διατήρηση των προτεραιοτήτων με περιορισμό του μέγιστου αριθμού ροών της δεύτερης και τρίτης προτεραιότητας που μπορούν να γίνουν αποδεκτές στο σύστημα. Η βελτίωση που παρατηρείται είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την πρώτη περίπτωση χαρακτηριστικών κίνησης, ενώ η απόκλιση γίνεται περισσότερο φανερή όταν η χωρητικότητα της ζεύξης αυξάνεται. Τέλος, η πολιτική *Ανωτάτων Ορίων* δεν επιφέρει βελτίωση για συνολικά ελαφρώς φορτωμένες κλάσεις και οι τιμές μεσοσταθμικής πιθανότητας φραγής και μεσοσταθμικής διεκπεραιωτικότητας παραμένουν ίδιες με αυτές του μη ελεγχόμενου συστήματος, χωρίς μηχανισμό ελέγχου πρόσβασης.

6.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Με αφορμή την ερευνητική εργασία της διατριβής, αναγνωρίστηκαν κάποιες ενδιαφέρουσες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Στα δύο προβλήματα βελτιστοποίησης που διαμορφώθηκαν στο κεφάλαιο 5, θεωρήθηκε ότι οι αφίξεις κλήσεων των κλάσεων υπηρεσίας ακολουθούν κατανομή *Poisson* και ότι η διάρκεια της εξυπηρέτησης των κλήσεων ακολουθεί ανεξάρτητη και εκθετική κατανομή. Καθώς η εκθετική κατανομή της εξυπηρέτησης των κλήσεων δικαιολογείται απόλυτα για παραδοσιακές εφαρμογές φωνής, υπάρχουν αυξανόμενες αποδείξεις στη βιβλιογραφία ότι μπορεί να μην ταιριάζει για να περιγράψει διαφορετικού τύπου υπηρεσίες [1-2]. Η εργασία της διατριβής μας μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πρώτο βήμα για την διερεύνηση των προβλημάτων αυτών στο πλαίσιο γενικότερων κατανομών εξυπηρέτησης κλήσεων.

Επιπρόσθετα, πάλι στο κεφάλαιο 5, τα δύο προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να επεκταθούν και με αντίστοιχα προβλήματα σε επίπεδο κλάσης. Στην εργασία της διατριβής περιοριστήκαμε στην αναζήτηση της βέλτιστης πολιτικής ελέγχου πρόσβασης για την μεγιστοποίηση της μεσοσταθμικής διεκπεραιωτικότητας και την ελαχιστοποίηση της μεσοσταθμικής συστημικής πιθανότητας φραγής. Τέσσερα τέτοια πιθανά προβλήματα προς μελλοντική έρευνα είναι τα ακόλουθα:

- Μεγιστοποίηση της συστημικής μεσοσταθμικής διεκπεραιωτικότητας, ενώ ταυτόχρονα θα εξασφαλίζεται ότι η σταθμισμένη διαφορά των πιθανοτήτων φραγής μεταξύ δύο οποιονδήποτε κλάσεων υπηρεσίας θα παραμείνει κάτω από ένα κατώφλι.
- Ελαχιστοποίηση της συστημικής μεσοσταθμικής πιθανότητας φραγής, ενώ ταυτόχρονα θα εξασφαλίζεται ότι η σταθμισμένη διαφορά της διεκπεραιωτικότητας μεταξύ δύο οποιονδήποτε κλάσεων υπηρεσίας θα παραμείνει κάτω από ένα αντίστοιχο κατώφλι.
- Ελαχιστοποίηση της μέγιστης σταθμισμένης διαφοράς των πιθανοτήτων φραγής μεταξύ δύο οποιονδήποτε κλάσεων υπηρεσίας, ενώ ταυτόχρονα θα εξασφαλίζεται ότι η συστημική μεσοσταθμική διεκπεραιωτικότητα θα παραμείνει πάνω από ένα κατώφλι.
- Ελαχιστοποίηση της σταθμισμένης διαφοράς της διεκπεραιωτικότητας μεταξύ δύο οποιονδήποτε κλάσεων υπηρεσίας, ενώ ταυτόχρονα θα εξασφαλίζεται ότι η συστημική πιθανότητα φραγής θα παραμείνει κάτω από ένα κατώφλι.

Για τις προτάσεις της διατριβής στον χώρο των πολιτικών ελέγχου πρόσβασης, δεδομένη ήταν η αποδοχή των θεωρήσεων του κεφαλαίου 4 για απαιτήσεις μεταβολής καθυστέρησης ανά δικτυακό κόμβο, με απώτερο στόχο τον έλεγχο των μετρικών της καθυστέρησης και της μεταβολής της σε διατερματικό επίπεδο. Η ανάλυση για τα προβλήματα βελτιστοποίησης του κεφαλαίου 5 μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κάποιες διαφοροποιήσεις για εξαγωγή πολιτικών ελέγχου πρόσβασης για διαφορετικές θεωρήσεις πολυ-υπηρεσιακών δικτύων, όπου οι διατερματικές τιμές θα αποτελούν τις κρίσιμες μετρικές απόδοσης.

Στα πλαίσια του ολοκληρωμένου πλαισίου υποστήριξης πολλαπλών υπηρεσιών σε δίκτυα επόμενης γενιάς που προτάθηκε στο κεφάλαιο 4, δόθηκαν οι αναλυτικές σχέσεις για την μέγιστη τιμή μεταβολής καθυστέρησης για έναν δικτυακό κόμβο με χαρακτηριστικά συμφόρησης. Παρά την περιληφθείσα ποιοτική ανάλυση της σχέσης της μετρικής αυτής με την αντίστοιχη διατερματική, μελλοντική έρευνα μπορεί να λάβει χώρα για την εξαγωγή συγκεκριμένων σχέσεων για την τελευταία, για δεδομένο μονοπάτι παράδοσης της υπηρεσίας από τον πάροχο έως τον τελικό χρήστη, καθώς και γνωστό αριθμό κόμβων του δικτύου που παρεμβάλλονται. Αντίστοιχη μελλοντική μελέτη μπορεί να γίνει για την πιθανή δυνατότητα εξαγωγής ντετερμινιστικών σχέσεων για την διατερματική καθυστέρηση, λαμβάνοντας υπόψιν και τις υπόλοιπες πηγές καθυστέρησης πέρα από αυτήν της ουροποίησης.

Τέλος, μία περιοχή στην οποία οι προτάσεις και τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής μπορούν κάλλιστα να αποτελέσουν στο μέλλον αφετηρία έρευνας είναι αυτή της ποιότητας εμπειρίας. Οι απαιτήσεις για συγκράτηση της μεταβολής καθυστέρησης ανά κλάση υπηρεσίας μπορούν να συσχετιστούν με κάποια από τις χαρακτηριστικές μετρικές απόδοσης της διατριβής (πιθανότητα φραγής ή διεκπεραιωτικότητα), αποδίδοντας στους παρόχους ένα καλά καθορισμένο μοντέλο αποτίμησης της λαμβάνουσας από τον χρήστη ποιότητας εμπειρίας.

6.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Efthymoglou, G.P., Pattaramalai, S., Aalo, V.A. (2009). Call Completion Probability with Generalized Call Holding Time and Cell Dwell Time Distributions. In Proc. of the: 69th IEEE Vehicular Technology Conference.
- [2] Alwakeel M. (2009). Deriving Call Holding Time Distribution in Cellular Network from Empirical Data. International Journal of Computer Science and Network Security, 9(11).