

Σχεδιασμός και Υλοποίηση Αρχιτεκτονικής για την Αποδοτική Επιλογή και Παροχή SLA σε Δίκτυα DiffServ

Αθανάσιος Γ. Παπαϊωάννου*

Μεταπτυχιακή Εργασία

Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Περίληψη

Το Internet, σήμερα, παρέχει μόνο την κλάση ποιότητας υπηρεσίας Best Effort σε όλες τις ροές κίνησης που εξυπηρετεί. Σύμφωνα με αυτή δεν παρέχονται εγγυήσεις όσον αφορά την ποιότητα υπηρεσίας που θα έχει η κυκλοφορία. Ολοένα, όμως, αυξάνονται οι εφαρμογές που έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις για παροχή ποιότητας υπηρεσίας που σε συνδυασμό με το διαρκώς αυξανόμενο πλήθος των χρηστών κάνουν επιτακτική την ανάγκη παροχής εγγυήσεων υπηρεσίας στο Internet, αλλά και τον έλεγχο εισαγωγής της κυκλοφορίας σ' αυτό. Επίσης, πρέπει να ορισθούν αλγόριθμοι διαπραγμάτευσης των συμβολαίων κίνησης, προκειμένου να εξυπηρετούνται οι πολιτικές του παροχέα του δικτύου, αλλά και τα συμφέροντα των χρηστών. Τα παραπάνω πρέπει να γίνουν με λύσεις που να αξιοποιούν την υπάρχουσα υποδομή του σημερινού Internet, να μην απαιτούν σημαντικές αλλαγές στη φύση και λειτουργία του, και να είναι υλοποιήσιμες και επεκτάσιμες χωρίς μεγάλο κόστος σε ολόκληρο το Internet. Καμιά από τις προτεινόμενες λύσεις για παροχή ποιότητας υπηρεσίας στο Internet (RSVP, DiffServ, RSVP/DiffServ, RSVP/MPLS, MPLS, Bandwidth Brokers), δεν ικανοποιεί εξ' ολοκλήρου αυτές τις προδιαγραφές. Στην παρούσα εργασία, ορίζουμε υλοποιούμε και μελετάμε ένα περιβάλλον ελέγχου και διαπραγμάτευσης κατά την εισαγωγή της κίνησης σε ένα διαχειριζόμενο περιβάλλον δικτύου που παρέχει διαφοροποιημένες υπηρεσίες στους χρήστες του. Χρησιμοποιούμε για διαφοροποιημένες κλάσεις υπηρεσιών στο δίκτυο την αρχιτεκτονική DiffServ, λόγω της απλότητας υλοποίησής της και της επεκτασιμότητας που παρέχει. Η κίνηση που εισάγεται σε αυτό το δίκτυο κατηγοριοποιείται στις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας του μέσω ενός περιβάλλοντος ελέγχου και σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου διαπραγμάτευσης. Το περιβάλλον ελέγχου αποτελείται από έναν εξυπηρετητή πολιτικών (Policy Server, PS), από τους δρομολογητές εισόδου του δικτύου και από τις λειτουργίες του λειτουργικού συστήματος Windows 2000 για παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Οι αιτήσεις για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε νέες ροές κίνησης γίνονται μέσω του πρωτοκόλλου RSVP με έναν τρόπο σαφή αλλά και αυστηρά ελεγχόμενο από το δίκτυο. Ο PS ενεργεί ως αντιπρόσωπος του δικτύου και σε αυτόν στέλνονται όλες οι αιτήσεις για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε νέες ροές κίνησης από τους δρομολογητές εισόδου του δικτύου μέσω του πρωτοκόλλου COPS. Ο PS διαπραγματεύεται με τον προσωπικό αντιπρόσωπο (User Agent, UA) του χρήστη την αποδοτική επιλογή συμβολαίου (Service Level Agreement, SLA) για μια νέα ροή κίνησης του χρήστη, δηλαδή την κατηγοριοποίηση της κυκλοφορίας μιας νέας ροής κίνησης ενός χρήστη σε μια κλάση υπηρεσίας του δικτύου με αποδοτικό τρόπο. Ο UA ενεργεί ως «ευφυής» αντιπρόσωπος του χρήστη, ο οποίος εξυπηρετεί τα συμφέροντά του στη διαδικασία επιλογής του SLA. Στη διαδικασία διαπραγμάτευσης που έχουμε ορίσει, ο UA επιλέγει το SLA για μια νέα ροή κίνησης μεγιστοποιώντας το καθαρό όφελος του χρήστη που αντιπροσωπεύει. Για το σκοπό αυτό, ορίζουμε ένα κατάλληλο μοντέλο ωφελιμότητας του χρήστη που εκφράζει τις

* E-mail: pathan@csd.uoc.gr

προτιμήσεις του με έναν απλό αλλά σαφή και λογικό τρόπο. Επίσης, αν και η ανωτέρω προσέγγιση είναι εφαρμόσιμη γενικότερα, θεωρούμε ότι ο PS χρεώνει τις υπηρεσίες του ανάλογα με το ισοδύναμο εύρος ζώνης κάθε ροής, προκειμένου να δώσει τα σωστά κίνητρα στο χρήστη όσον αφορά στη χρήση του δικτύου. Διατηρούμε τη δωρεάν χρήση της κλάσης ποιότητας υπηρεσίας Best Effort, όπως ισχύει στο σημερινό Internet. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της προσέγγισής μας είναι κατανομή της πληροφορίας που κάνει δυνατή την αποδοτική επιλογή SLA. Σύμφωνα με αυτή, κάθε συστατικό μέρος της αρχιτεκτονικής κατέχει μόνο την πληροφορία την οποία έχει κίνητρο να αποθηκεύει. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι η απλότητα της διαδικασίας του χρήστη για την επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων του Service Level Specification (SLS). Όσον αφορά στην πιο αποδοτική δυνατή διαχείριση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου υιοθετούμε το πρωτόκολλο MPLS για την υλοποίηση του δικτύου. Το MPLS παρέχει δυνατότητες για διαχείριση κυκλοφορίας (traffic engineering) μέσω δρομολόγησης βάσει κινήτρων. Περιγράφουμε πώς σε αυτό το περιβάλλον ο παροχέας του δικτύου είναι δυνατόν να εφαρμόσει πολιτικές διαχείρισης του δικτύου του μέσω της κατάλληλης χρέωσης για την κατηγοριοποίηση της κυκλοφορίας μιας νέας ροής κίνησης στις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας. Στο περιβάλλον ελέγχου και διαπραγμάτευσης εισόδου κυκλοφορίας στο δίκτυο που έχουμε ορίσει μπορούμε να εφαρμόσουμε οποιαδήποτε διαδικασία διαπραγμάτευσης. Εφαρμόζοντας αυτή που έχουμε ορίσει πραγματοποιούμε ατομική βελτιστοποίηση, μεγιστοποιώντας το καθαρό όφελος του κάθε χρήστη, και βελτιώνουμε την οικονομική αποδοτικότητα του συστήματος. Επιπροσθέτως, πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι παρέχονται τα σωστά κίνητρα στους χρήστες κατά τη διαδικασία επιλογής SLA, δηλαδή ότι η κοινωνική ευημερία που προκύπτει είναι καλύτερη απ' ό,τι όταν οι χρήστες μοιράζονται εξίσου το ίδιο σύνολο δικτυακών πόρων. Το σύστημα αυτό υλοποιήθηκε σε ένα πραγματικό περιβάλλον δικτύου DiffServ/MPLS, καταδεικνύοντας έτσι την εφαρμοσιμότητά του, και εξετάστηκε η απόδοσή του από πλευράς επιδόσεων. Τέλος, μελετήθηκαν οι δυνατές επεκτάσεις της προσέγγισής μας.

Επόπτης:

Γεώργιος Δ. Σταμούλης
Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Design and Implementation of an Architecture for Efficient SLA Selection and Provision in DiffServ Networks

Athanasios G. Papaioannou*

Master of Science Thesis

Computer Science Department
University of Crete

Abstract

Today's Internet provides only Best Effort service. Traffic is served as quickly as possible, while there is no guarantee as to timeliness or actual delivery. However, new applications that are demanding in terms of QoS emerge rapidly. This fact in conjunction with the continuously increasing amount of Internet users necessitates the provision of class guarantees as well as the control of the traffic inserted in Internet. Also, certain algorithms for the negotiation of the traffic contracts have to be introduced, in order both specific policies for network management and the interests of the end-users to be served. To accomplish the above, certain solutions are needed that use the current Internet framework. Such solutions should not modify in principle the network operation and nature, and they should be feasible and scalable in the whole Internet, without inducing great overhead costs. None of the proposed solutions for QoS provision in Internet (RSVP, DiffServ, RSVP/DiffServ, RSVP/MPLS, MPLS, Bandwidth Brokers) serves all of these goals so far. In the present thesis, we define, implement, and analyze an architecture for the control and negotiation of the traffic to be inserted in an administrative network domain that provides differentiated services in its users. We have employed the Differentiated Services (DiffServ) architecture for the QoS provision, due to simplicity in its implementation and the scalability it provides. The traffic inserted in this network is categorized in the various network QoS classes by means of a control environment according to the results of the negotiation algorithm. The control environment consists of a Policy Server (PS), the ingress routers of the network and the QoS functionalities of the Windows 2000 operating system. We use the RSVP signaling for the communication of the QoS provision requests for new traffic flows of the end-users to the network provider in a clear and controlled way. The PS functions as the network provider's representative, and thus all QoS provision requests for new traffic flows are sent to the PS by the ingress routers of the network using the COPS protocol. The PS negotiates with the User Agent (UA) of a user in order to select efficiently the Service Level Agreement (SLA) for a new traffic flow of the user, i.e. the categorization of the traffic flow in a QoS class in an efficient way. The UA functions as an "intelligent" user representative that serves the interests of the user in the SLA selection process. In this process, under our approach, a UA selects the SLA for a new traffic flow by maximizing the net benefit of the user that represents. For the purposes of negotiation, we develop an appropriate utility model that expresses user preferences in a simple yet informative way. Although our approach is more generally applicable, we assume that the PS charges proportional to the effective bandwidth of the traffic flows, thus providing the user with the right incentives for SLA selection. We retain free usage of Best Effort service, as in today's Internet. An important feature of our approach is the distribution of information enabling the efficient SLA selection. According to this distribution, each of the components involved only possesses those pieces of information for which it has an

* E-mail: pathan@csd.uoc.gr

incentive to store. Another important feature of our approach is the simplicity of user's procedure for selecting optimal Service Level Specification (SLS) parameters. In order to achieve efficient resource management in the network, we employ Multi-Protocol Label Switching (MPLS) protocol for the implementation of the network. MPLS has such routing features that facilitate the traffic engineering procedures. We describe how, using our approach, the network provider can employ network management policies (in conjunction with appropriate charging) for traffic categorization into QoS classes. In the SLA control and negotiation environment that we have developed any specific negotiation process can be used. Using our SLA selection process we achieve individual optimization, by maximizing the net benefit of the user, and at the same time we attain improved economic efficiency. In particular, experimental results indicate that users are provided with the right incentives in SLA selection process. Having implemented our system in a real DiffServ/MPLS network environment, we proved its feasibility, and assessed its efficiency in terms of performance. Last, we studied possible extensions of our approach.

Supervisor:

George D. Stamoulis
Assistant Professor
Computer Science Department
University of Crete

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, φτάνοντας στο τέλος μιας κοπιαστικής προσπάθειας και έχοντας τελειώσει μια σημαντική εργασία τόσο σε όγκο όσο και σε δυσκολία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν να φέρω σε πέρας την παρούσα εργασία. Καταρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επόπτη καθηγητή μου κ. Σταμούλη Δ. Γεώργιο για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε καθόλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών και την αποφασιστική του συμβολή στην επιστημονική μου πρόοδο. Τον ευχαριστώ επίσης για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, τις μεγάλες ευκαιρίες που μου έδωσε, την υπομονή του σε διαδικαστικά θέματα, και τις πολύτιμες συμβουλές του. Οφείλω να πω ότι η συνεργασία μαζί του επηρέασε σε πολύ μεγάλο βαθμό τα επιστημονικά μου ενδιαφέροντα, αλλά και ότι έγινε σε ιδανικό κλίμα.

Επίσης, ευχαριστώ τα μέλη της εισηγητικής επιτροπής κ. Απόστολο Τραγανίτη, κ. Αικατερίνη Χούστη και κ. Στέλιο Σαρτζετάκη για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις και διορθώσεις τους στην εργασία αυτή, αλλά και κατά τη διάρκεια της παρουσιάσής της.

Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Στέλιο Σαρτζετάκη για την πολύτιμη βοήθειά του στην ολοκλήρωση των ιδεών μου στην παρούσα εργασία. Τον ευχαριστώ επίσης, γιατί από νωρίς πίστεψε στις δυνατότητές μου, μου ανέθετε πάντα δύσκολες εργασίες με σιγουριά ότι θα τις φέρω σε πέρας, και πάντα με εμπύχωνε όταν έχανα το κουράγιο μου.

Ευχαριστώ επίσης το Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Κρήτης για το περιβάλλον εργασίας που μου παρείχε και τις γνώσεις που μου έδωσε την ευκαιρία να αποκτήσω, καθώς και το Ινστιτούτο Πληροφορικής του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας, και ειδικότερα την Ομάδα Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, για την υψηλού επιπέδου υλικοτεχνική υποδομή που μου παρείχε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, επιτρέποντάς μου να εφαρμόσω τις ιδέες μου σε πραγματικό δικτυακό περιβάλλον.

Η παρούσα εργασία δε θα ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί χωρίς την ψυχική στήριξη των αγαπημένων μου προσώπων, της οικογένειάς μου και των φίλων μου. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον αδερφό μου Βασίλη που ήταν συνεχώς δίπλα μου αυτά τα δύο χρόνια και του αφιερώνω την παρούσα εργασία. Ευχαριστώ επίσης τους γονείς μου και τα άλλα αδέρφια μου για την αγάπη και την υπομονή τους όσα χρόνια είμαι μακριά τους. Τέλος, ευχαριστώ τη Στέλλα Παπαθεοδώρου που ήταν δίπλα μου στην ψυχικά επίπονη διαδικασία της συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Αθανάσιος Γ. Παπαϊωάννου

Περιεχόμενα

<i>Περίληψη</i>	<i>i</i>
<i>Abstract</i>	<i>iii</i>
<i>Ευχαριστίες</i>	<i>v</i>
<i>Περιεχόμενα</i>	<i>vii</i>
<i>Κατάλογος Σχημάτων</i>	<i>ix</i>
<i>Κατάλογος Εικόνων</i>	<i>xiii</i>
1 Εισαγωγή	1
1.1 Ορισμός του Προβλήματος	2
1.2 Η Συνεισφορά της Παρούσας Εργασίας	3
2 Ανασκόπηση Περιοχής	5
2.1 Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS)	5
2.2 Παρεχόμενες Λύσεις QoS για IP δίκτυα	7
2.2.1 Το πρωτόκολλο RSVP	7
2.2.1.1 Λειτουργία και Χαρακτηριστικά.....	7
2.2.1.2 Μειονεκτήματα	9
2.2.2 Integrated Services	10
2.2.2.1 Λειτουργία και Χαρακτηριστικά.....	10
2.2.2.2 Μειονεκτήματα	10
2.2.3 Differentiated Services	11
2.2.3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά	11
2.2.3.2 Ο Ελεγκτής Κυκλοφορίας (Traffic Conditioner).....	11
2.2.3.3 Κλάσεις Υπηρεσίας και PHB.....	12
2.2.4 Το πρωτόκολλο MPLS.....	14
2.2.5 Ο Μεσίτης Εύρους Ζώνης (Bandwidth Broker).....	16
2.2.6 RSVP over DiffServ/MPLS	17
2.2.6.1 Ορισμός Προβλήματος	17
2.2.6.2 Πρώτη Προσέγγιση (IntServ over DiffServ)	17
2.2.6.3 Δεύτερη Προσέγγιση (RSVP over DiffServ με χρήση BB).....	18
2.2.6.4 Τρίτη Προσέγγιση (RSVP over MPLS).....	21
2.2.7 Παραλλείψεις των Παραπάνω Προσεγγίσεων	24
2.3 Εγγύηση Ποιότητας Υπηρεσίας	24
2.4 Χρέωση με Βάση τη Χρήση	26
2.4.1 Χρέωση Ελαστικών Υπηρεσιών.....	26
2.4.2 Χρέωση Εγγυημένων Υπηρεσιών	27
2.4.2.1 Προσέγγιση Courcoubetis and Siris.....	30
2.4.2.2 Προσέγγιση Kelly	33
2.5 Χρήση Προσωπικών Αντιπροσώπων	33
3 Αξιοποίηση Υπάρχουσας Τεχνολογίας	36
3.1 Χρήση Χαρακτηριστικών DiffServ	36
3.2 Ορισμός Παραμέτρων SLS	36
3.3 Χρήση Λειτουργιών RSVP	38

4	Περιγραφή Αρχιτεκτονικής	40
4.1	Η Αρχιτεκτονική	40
4.1.1	Οι Οντότητες	40
4.1.2	Λειτουργικότητα των Οντοτήτων	41
4.1.3	Η Μέθοδος Χρέωσης	43
4.1.4	Κατανομή Πληροφορίας	44
4.1.5	Το Μοντέλο Ωφελιμότητας του Χρήστη (User Utility Model)	47
4.1.6	Η Διαδικασία Διαπραγμάτευσης (Negotiation Process)	50
4.2	Επεκτάσεις	52
4.2.1	Προσανατολισμός Υπηρεσίας.....	52
4.2.2	Κόστος Εξυπηρέτησης	53
4.2.3	Χρήση Παραμέτρων R και S	53
4.2.4	Χρέωση Βάσει Συνολικής Χρήσης Πόρων	53
5	Υλοποίηση Αρχιτεκτονικής και Επίδειξη	55
5.1	Η στοιβά πρωτοκόλλων του υπολογιστή (Host Protocol Stack)	55
5.2	Το πρωτόκολλο Common Open Policy Service (COPS)	59
5.3	Το δίκτυο MPLS	61
5.4	Το Σύστημά μας	63
5.4.1	Γενική Περιγραφή	63
5.4.2	Ο Policy Server	63
5.4.3	Ο COPS Server.....	65
5.4.4	Ο Προσωπικός Αντιπρόσωπος (User Agent)	66
5.4.5	Ο Εξυπηρετητής Video (Video Server).....	66
5.4.6	Η Εφαρμογή του Παραλήπτη Video (Video Applet).....	67
5.4.7	Επικοινωνία και Διαπραγμάτευση	67
5.5	Επίδειξη Συστήματος	70
6	Αποτίμηση Προσέγγισης Διαπραγμάτευσης και Αρχιτεκτονικής	75
6.1	Γενικά	75
6.2	Ποιοτική Αποτίμηση	75
6.3	Τεχνικά Θέματα	76
6.4	Οικονομική Αποδοτικότητα	78
6.4.1	Μεγιστοποίηση Καθαρού Οφέλους και Πραγματικό Βέλτιστο SLS	78
6.4.2	Δικαιοσύνη και Κίνητρα	79
6.4.3	Κοινωνική Ευημερία	79
6.5	Πολυπλοκότητα – Φόρτος	85
7	Εφαρμογή της Αρχιτεκτονικής για Παροχή Υπηρεσιών από Άκρη-σε-Άκρη	88
8	Συμπεράσματα – Μελλοντική Εργασία	92
	Αναφορές – Βιβλιογραφία	94
	Παράρτημα Α	98

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Η σηματοδότηση του πρωτοκόλλου RSVP μεταξύ ενός αποστολέα (sender) και ενός παραλήπτη (receiver).....	8
Σχήμα 2: Η χρήση RSVP και Bandwidth Broker για παροχή δυναμικών SLA από-άκρη-σε-άκρη πάνω από δίκτυα DiffServ.....	18
Σχήμα 3: Το μοντέλο διαχείρισης πόρων Two-Tier.....	21
Σχήμα 4: Η χρήση RSVP και Bandwidth Broker για παροχή δυναμικών SLA από άκρη-σε-άκρη πάνω από δίκτυα MPLS.....	22
Σχήμα 5: Το μοντέλο ελέγχου κυκλοφορίας κυλιόμενου χρονικού παράθυρου (LB).....	28
Σχήμα 6: Η αρχιτεκτονική γενικά.....	42
Σχήμα 7: Το εύρος των τιμών όταν ορίζονται δυναμικά, αλλά και οι στατικές τιμές τους πρέπει να διατηρούν τη μονοτονία της συνάρτησης $P(\cdot)$	44
Σχήμα 8: Η καμπύλη αδιαφορίας των ζευγαριών τιμών (ρ, β) για μια καθυστέρηση μορφοποίησης (ένα μέγιστο ρυθμό h) και για ένα ορισμένο ποσοστό της κίνησης που συμμορφώνεται στις παραμέτρους (h, ρ, β)	46
Σχήμα 9: Η μορφή της συνάρτησης $f(r_{user}, r_{netw})$	48
Σχήμα 10: Μια πιθανή συνάρτηση ωφελιμότητας $U(\cdot)$ ως προς την παρεχόμενη κλάση ποιότητας υπηρεσίας για ελαστικές υπηρεσίες.....	49
Σχήμα 11: Μια πιθανή συνάρτηση ωφελιμότητας $U(\cdot)$ ως προς την παρεχόμενη κλάση ποιότητας υπηρεσίας για εγγυημένες υπηρεσίες.....	49
Σχήμα 12: Τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ των συστατικών μερών της αρχιτεκτονικής κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης, αν το ζητούμενο περιεχόμενο είναι αποθηκευμένο από τον εξυπηρετητή.....	51
Σχήμα 13: Τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ των συστατικών μερών της αρχιτεκτονικής κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης, αν το ζητούμενο περιεχόμενο δεν είναι αποθηκευμένο στον εξυπηρετητή.....	51
Σχήμα 15: Η χρήση της στοίβας πρωτοκόλλων των Windows 2000 σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο COPS.....	58
Σχήμα 16: Τα στάδια μορφοποίησης και χρονοπρογραμματισμού αποστολής κίνησης του Packet Scheduler.....	58
Σχήμα 17: Το περιβάλλον ελέγχου δέσμευσης πόρων που προτείνεται από την IETF.....	60
Σχήμα 18: Το δίκτυο στο οποίο υλοποιήσαμε την αρχιτεκτονική και τη διαδικασία αποδοτικής επιλογής SLS που προτείνουμε.....	61

Σχήμα 19: Η ακολουθία μηνυμάτων προκειμένου να κατηγοριοποιηθεί η κίνηση μιας νέας σύνδεσης.	68
Σχήμα 20: (α) Το εύρος των συναρτήσεων ωφελιμότητας των εγγυημένων και των ελαστικών χρηστών, και (β) οι διάφορες μορφές της συνάρτησης χρέωσης (κοίλη καμπύλη, ευθεία, κυρτή καμπύλη).	82
Σχήμα 21: Οι ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των U_{NB} και U_{fair} , για τις διάφορες συναρτήσεις χρέωσης, όταν το $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές μεταξύ 30000 και 100000, και $W_c = 20000$	83
Σχήμα 22: Δύο χρήστες με τη διαδικασία επιλογής SLS που προτείνουμε επιλέγουν τις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας x_1 και x_2 . Τότε η μέση κλάση ποιότητας υπηρεσίας που παρέχεται είναι η x_m . Ισοκατανέμοντας τους δικτυακούς πόρους κάθε χρήστης πληρώνει c_{fair} , το οποίο αντιστοιχεί στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας x_{fair} , που όμως, είναι $x_{fair} > x_m$	85
Σχήμα 23: Συμβόλαιο ενοποιημένων ροών για τη κίνηση που λαμβάνει το δίκτυο A από το B σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας που χαρακτηρίζεται από το $DSCP_\alpha$ και αντιστοιχεί στο $DSCP_\beta$ του δικτύου B.	89
Σχήμα 24: Η σηματοδότηση για την παροχή δυναμικού SLA ανά ροή κίνησης σε περιβάλλον πολλών διαχειριζομένων δικτύων DiffServ.	90
Σχήμα 25: Επιλογή συμβολαίων με κοίλη χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 30000 έως 50000.	98
Σχήμα 26: Επιλογή συμβολαίων με κοίλη χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 30000 έως 50000.	98
Σχήμα 27: Επιλογή συμβολαίων με κοίλη χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 55000 έως 75000.	99
Σχήμα 28: Επιλογή συμβολαίων με κοίλη χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 55000 έως 75000.	99
Σχήμα 29: Επιλογή συμβολαίων με κοίλη χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 80000 έως 100000.	99
Σχήμα 30: Επιλογή συμβολαίων με κοίλη χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 80000 έως 100000.	100
Σχήμα 31: Επιλογή συμβολαίων με γραμμική χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 30000 έως 50000.	100
Σχήμα 32: Επιλογή συμβολαίων με γραμμική χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 30000 έως 50000.	101
Σχήμα 33: Επιλογή συμβολαίων με γραμμική χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 55000 έως 75000.	101
Σχήμα 34: Επιλογή συμβολαίων με γραμμική χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 55000 έως 75000.	102
Σχήμα 35: Επιλογή συμβολαίων με γραμμική χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 80000 έως 100000.	102

Σχήμα 36: Επιλογή συμβολαίων με γραμμική χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 80000 έως 100000.	103
Σχήμα 37: Επιλογή συμβολαίων με κυρτή χρέωση μεγιστοποιώντας το <i>net benefit</i> των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 30000 έως 50000.	103
Σχήμα 38: Επιλογή συμβολαίων με κυρτή χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 30000 έως 50000.	104
Σχήμα 39: Επιλογή συμβολαίων με κυρτή χρέωση μεγιστοποιώντας το <i>net benefit</i> των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 55000 έως 75000.	104
Σχήμα 40: Επιλογή συμβολαίων με κυρτή χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 55000 έως 75000.	105
Σχήμα 41: Επιλογή συμβολαίων με κυρτή χρέωση μεγιστοποιώντας το <i>net benefit</i> των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 80000 έως 100000.	105
Σχήμα 42: Επιλογή συμβολαίων με κυρτή χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 80000 έως 100000.	106

Κατάλογος Εικόνων

<i>Εικόνα 1: Η ιστοσελίδα του παροχέα βίντεο-ταινιών.....</i>	<i>70</i>
<i>Εικόνα 2: Ο κατάλογος λειτουργιών “Action”.....</i>	<i>71</i>
<i>Εικόνα 3: Ο κατάλογος λειτουργιών “Set”.....</i>	<i>71</i>
<i>Εικόνα 4: Ο κατάλογος λειτουργιών “View”.....</i>	<i>71</i>
<i>Εικόνα 5: Ο κατάλογος λειτουργιών “Tools”.....</i>	<i>71</i>
<i>Εικόνα 6: Ο κατάλογος λειτουργιών “Help”.....</i>	<i>71</i>
<i>Εικόνα 7: Το «παράθυρο» που περιέχει τον πίνακα με τις ταινίες που παρέχονται.....</i>	<i>72</i>
<i>Εικόνα 8: Η πληροφορία που δημοσιεύει ο Video Server για την ταινία “Mission 2 Mars – Trailer” ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας του δικτύου.....</i>	<i>72</i>
<i>Εικόνα 9: Οι ακριβείς απαιτήσεις του πελάτη για παροχή QoS από το δίκτυο κατά τη μεταφορά της ταινίας.....</i>	<i>73</i>
<i>Εικόνα 10: Η ζητούμενη ταινία προβάλλεται στην οθόνη του πελάτη σύμφωνα με το SLS που έχει επιλεγεί για αυτή με τη διαδικασία διαπραγμάτευσης που προτείνουμε.....</i>	<i>73</i>
<i>Εικόνα 11: Το «παράθυρο» αυτό περιέχει πληροφορίες για το σύστημα που υλοποιήσαμε, καθώς και οδηγίες για την εκτέλεση της εφαρμογής.....</i>	<i>74</i>
<i>Εικόνα 12: Το «παράθυρο» αυτό περιέχει πληροφορίες για τον κατασκευαστή του συστήματος και την ημερομηνία κατασκευής του.....</i>	<i>74</i>

1 Εισαγωγή

Το πρωτόκολλο επιπέδου δικτύου Internet Protocol (IP), στο οποίο βασίζεται το Internet σήμερα, παρέχει μόνο την κλάση ποιότητας υπηρεσίας Best Effort. Σύμφωνα με αυτή η εξυπηρέτηση της κίνησης γίνεται το συντομότερο δυνατό, χωρίς όμως καμιά εγγύηση τόσο για το χρόνο παράδοσής της όσο και για την ίδια την παράδοση. Αυτό το γνώρισμα επιτρέπει στο διαδίκτυο να παραμένει σχετικά απλό στην υλοποίησή του, έχοντας την όποια πολυπλοκότητά του συγκεντρωμένη στους σταθμούς εργασίας. Το μοντέλο αυτό είναι πολύ επεκτάσιμο όπως φαίνεται και από τη δυνατότητα του Internet να επεκτείνεται και να υποστηρίζει την ολοένα αυξανόμενη χρήση του. Όσο περισσότεροι σταθμοί εργασίας συνδέονται στο Internet, τόσο αυξάνεται η ζήτηση για εύρος ζώνης που τελικά υπερβαίνει τη χωρητικότητα του δικτύου. Όμως, αυτό δεν έχει σαν αποτέλεσμα την άρνηση εξυπηρέτησης της επιπλέον κίνησης από το δίκτυο, αλλά την υποβάθμιση της ποιότητάς της στο βαθμό που είναι αναγκαίο, ώστε να εξυπηρετηθεί ολόκληρη η κίνηση. Η υποβάθμιση της ποιότητας έχει διαφορετικές συνέπειες για την κίνηση κάθε εφαρμογής. Ορισμένες εφαρμογές, όπως το e-mail, η μεταφορά αρχείων και η πρόσβαση στο WWW, μπορούν να προσαρμοζονται σε συνθήκες συμφόρησης του δικτύου. Όμως, άλλες εφαρμογές με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου αντιμετωπίζουν πρόβλημα με τις καθυστερήσεις παράδοσης της κίνησης. Τέτοιες είναι οι εφαρμογές πολυμέσων και ιδίως αυτές που περιλαμβάνουν αμφίδρομη επικοινωνία όπως η τηλεφωνία ή η συνομιλία μέσω video (video-conferencing). Αυτές οι εφαρμογές απαιτούν κάποια ποιότητα υπηρεσίας (QoS) για την εξυπηρέτησή τους.

Επίσης, το Internet χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σαν ένα περιβάλλον προσφοράς υπηρεσιών. Σε αυτό το περιβάλλον, διάφορες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας μπορεί να είναι επιθυμητές. Για παράδειγμα, μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας που θα παρέχει κάποιο αναμενόμενο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας στην εξυπηρέτηση κίνησης για εταιρείες που πωλούν προϊόντα μέσω του WWW. Τέτοιες εταιρείες θα είναι διαθετειμένες να πληρώσουν κάποιο χρηματικό ποσό προκειμένου να κάνουν αξιόπιστες τις υπηρεσίες τους και να δώσουν στους πελάτες τους γρήγορη πρόσβαση σε αυτές. Αυτή η υποθετική κλάση ποιότητας υπηρεσίας μπορεί να παρέχει μόνο ένα συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας. Όμως, μπορεί να παρέχει και τα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας *Gold Service*, *Silver Service* και *Bronze Service*. Μια άλλη κλάση ποιότητας υπηρεσίας θα μπορούσε να παρέχει εγγυήσεις για χαμηλή καθυστέρηση και χαμηλή διακύμανση καθυστέρησης σε εφαρμογές όπως η τηλεφωνία και η συνομιλία μέσω video. Οι εταιρίες θα ήταν διαθετειμένες να πληρώσουν κάποιο ποσό για υπηρεσία συνομιλίας μέσω video υψηλής ποιότητας, προκειμένου να κερδίσουν τα έξοδα και το χρόνο ενός ταξιδιού. Επίσης, η κλάση ποιότητας υπηρεσίας Best Effort Service θα μπορούσε να διατηρηθεί για πελάτες που επιθυμούν μόνο απλή συνδεσιμότητα. Το αν είναι απαραίτητοι ή όχι μηχανισμοί για παροχή ποιότητας υπηρεσίας στο Internet είναι ένα αμφιλεγόμενο θέμα. Υπάρχει μια άποψη σύμφωνα με την οποία οι οπτικές ίνες και το Wavelength Division Multiplexing (WDM) θα κάνουν το εύρος ζώνης τόσο άφθονο (και φθινό) που η ποιότητα υπηρεσίας θα παρέχεται αυτόματα. Η άλλη άποψη είναι ότι όσο και να αυξηθεί το εύρος ζώνης που θα μπορούν να παρέχουν τα δίκτυα, θα δημιουργηθούν νέες εφαρμογές που θα το καταναλώνουν. Έτσι, θα είναι και πάλι αναγκαίοι μηχανισμοί για παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Δεν παίρνουμε θέση πάνω στη διαφωνία αυτή, απλώς σημειώνουμε ότι ακόμα κι αν το εύρος ζώνης γίνει κάποτε πολύ άφθονο, αυτό δεν πρόκειται να γίνει πολύ σύντομα, αφού εκτός των άλλων προϋποθέτει και αλλαγή στην υπάρχουσα δικτυακή υποδομή του Internet (π.χ. αλλαγή ηλεκτρικών δρομολογητών και μεταγωγέων με οπτικούς). Οπότε, κάποιοι απλοί μηχανισμοί για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στο Internet σίγουρα χρειάζονται προς το παρόν. Η άποψή μας υποστηρίζεται και από το γεγονός ότι οι κυριότεροι κατασκευαστές δικτυακών συσκευών ήδη παρέχουν κάποιους μηχανισμούς για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας.

1.1 Ορισμός του Προβλήματος

Στην παρούσα εργασία αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα της διαπραγμάτευσης και παροχής SLA σε δίκτυα διαφοροποιημένων υπηρεσιών. Στη συνέχεια της παρούσας ενότητας αναπτύσσουμε τα βασικά ζητήματα σχετικά με το πρόβλημα αυτό. Ο οργανισμός *Internet Engineering Task Force* (IETF) έχει προτείνει πολλά μοντέλα και μηχανισμούς για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε δίκτυα IP. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι το μοντέλο υπηρεσιών *Integrated Services* (IntServ)/*RSVP* ([2], [7]), το μοντέλο υπηρεσιών *Differentiated Services* (DiffServ) [1] και το πρωτόκολλο *Multi-Protocol Label Switching* (MPLS) [8].

Το μοντέλο υπηρεσιών *Integrated Services* χαρακτηρίζεται από δέσμευση πόρων. Οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου, πριν από την αποστολή πληροφορίας, πρέπει να καθορίσουν τα μονοπάτια από τα οποία θα περάσουν την πληροφορία και να δεσμεύσουν πόρους σε αυτά. Το πρωτόκολλο *RSVP* είναι ένα πρωτόκολλο σηματοδότησης που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό μονοπατιών και τη δέσμευση πόρων σε αυτά. Όμως, το μοντέλο IntServ/*RSVP* προϋποθέτει τη δέσμευση πόρων για κάθε ροή κίνησης σε κάθε δρομολογητή του μονοπατιού που ακολουθεί η κίνηση και γι' αυτό δεν είναι επεκτάσιμο όσο αυξάνει ο αριθμός των ροών κίνησης ή των δρομολογητών. Το πιο επεκτάσιμο μοντέλο υπηρεσιών, και το λιγότερο απαιτητικό σε αλλαγές στην υπάρχουσα υποδομή των δικτύων IP, είναι οι *Differentiated Services*. Συνοψίζεται στην παροχή μιας συγκεκριμένης ποιότητας υπηρεσίας σε ομαδοποιημένες ροές κίνησης σε κάθε δρομολογητή του δικτύου βάσει της τιμής του πεδίου DS των πακέτων. Τα πεδία DS των πακέτων κάθε ροή κίνησης σημαδεύονται με μια τιμή που καθορίζεται από το συμβόλαιο κίνησης (SLA) κάθε ροής. Από την άλλη μεριά, το πρωτόκολλο *MPLS* είναι ένα σχήμα προώθησης της κίνησης μέσα στο δίκτυο. Σε ένα δίκτυο *MPLS* το μονοπάτι που ακολουθεί ένα πακέτο προσδιορίζεται από μια ετικέτα του *MPLS* στην επικεφαλίδα του. Επίσης, το *MPLS*, χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα όπως το *RSVP* ή το *CR-LDP* προσδιορίζει μονοπάτια από τα οποία προωθεί την κίνηση, αλλά και δεσμεύει πόρους σε αυτά. Εφόσον το *MPLS* μπορεί να προωθεί την κίνηση μέσα από διαφορετικά μονοπάτια είναι κατάλληλο για διαχείριση κίνησης (*Traffic Engineering*).

Όμως, ενώ το να παρέχεται ποιότητα υπηρεσίας από το μοντέλο *DiffServ* σε επίπεδο ομαδοποιημένων ροών κίνησης είναι επιθυμητό από πλευράς επεκτασιμότητας, έχει και σοβαρά μειονεκτήματα αφού δεν παρέχονται αυστηρές εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας ανά ροή κίνησης. Επίσης, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορούν να εφαρμοστούν πολιτικές διαφορετικής εξυπηρέτησης ανά εφαρμογή ή ανά χρήστη. Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί οι αρχιτεκτονικές *Integrated Services operation over Differentiated Services* (IntServ over *DiffServ*) [6], και *Two-Bit Differentiated Services* (*Two-Bit*) [26] (μια παραλλαγή αυτής είναι η *Two-Tier* [5][0]). Στην αρχιτεκτονική *IntServ over DiffServ* κάθε ενδιαμέσο διαχειριζόμενο δίκτυο *DiffServ* από μια πηγή προς ένα προορισμό αντιμετωπίζονται σαν ένας κόμβος στη σηματοδότηση του *RSVP*. Στο εσωτερικό των δικτύων *DiffServ* της πηγής και του προορισμού οι πόροι δεσμεύονται δυναμικά με το πρωτόκολλο *RSVP* για κάθε ροή κίνησης. Από την άλλη μεριά στο εσωτερικό των ενδιάμεσων δικτύων *DiffServ* οι πόροι δεσμεύονται είτε στατικά είτε δυναμικά μέσω του εκτεταμένου *RSVP* ανά ομαδοποιημένη ροή κίνησης. Στην αρχιτεκτονική *Two-Bit* υπεύθυνη οντότητα για τη δέσμευση των πόρων τόσο στο εσωτερικό ενός διαχειριζόμενου δικτύου, όσο και μεταξύ διαχειριζόμενων δικτύων είναι ένας *Bandwidth Broker* (BB) ανά διαχειριζόμενο δίκτυο. Όλες οι αιτήσεις για δέσμευση πόρων σε ένα διαχειριζόμενο δίκτυο κατευθύνονται στον BB του δικτύου αυτού.

Ένα μειονέκτημα των αρχιτεκτονικών αυτών είναι ότι χρησιμοποιείται η σηματοδότηση του *RSVP* για τη δέσμευση πόρων εν μέρει ή εξ' ολοκλήρου. Με τον τρόπο αυτό εξακολουθούν να υπάρχουν προβλήματα στην επεκτασιμότητα. Επίσης, λόγω της δρομολόγησης των πακέτων βάσει του πρωτοκόλλου IP, δεν μπορούν να εφαρμοστούν πολιτικές διαχείρισης του

δικτύου. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι οι χρήστες δεν έχουν κίνητρα για την επιλογή συμβολαίων κίνησης που εξυπηρετούν τις ανάγκες τους και μόνο αυτές, ώστε να μη σπαταλούνται οι πόροι του δικτύου. Επίσης, στις αρχιτεκτονικές αυτές δεν ορίζεται σαφής τρόπος γνώσης της απαιτούμενης πληροφορίας, αλλά και ο τρόπος ελέγχου των συμβολαίων κίνησης. Τέλος, δεν ορίζεται στις αρχιτεκτονικές αυτές καμιά διαδικασία διαπραγμάτευσης για την παροχή των συμβολαίων κίνησης.

Ένα συμβόλαιο κίνησης (Service Level Agreement SLA) περιέχει, εκτός των άλλων, το Service Level Specification (SLS) στο οποίο περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συμβολαίου κίνησης. Το SLS πρέπει να περιέχει πολλές τεχνικές λεπτομέρειες (π.χ. μέγιστο ρυθμό μετάδοσης και παραμέτρους ελέγχου της κίνησης του μοντέλου Leaky Bucket) για το συμβόλαιο κίνησης, προκειμένου να είναι σαφής η ποιότητα υπηρεσίας που παρέχεται από το δίκτυο. Ταυτόχρονα, όμως, πρέπει να καθορίζεται από το χρήστη με απλό τρόπο που να είναι κατανοητός από αυτόν. Επιπροσθέτως, μια διαδικασία διαπραγμάτευσης που θα επιτρέπει την αυτόματη και δυναμική επιλογή των SLS είναι αναγκαία. Μια τέτοια διαδικασία διαπραγμάτευσης θα πρέπει να έχει σαν αποτέλεσμα την επιλογή SLS που να ικανοποιεί τις πραγματικές απαιτήσεις των χρηστών για παροχή QoS και να εξυπηρετεί τις διάφορες πολιτικές διαχείρισης των πόρων του δικτύου. Ο αυτοματισμός είναι απαραίτητος, αφού επιτρέπει στους χρήστες να διαπραγματεύονται για συμβόλαια κίνησης ανεξάρτητα από το σημείο πρόσβασής τους στο δίκτυο. Η δυναμική επιλογή των SLS επίσης είναι απαραίτητη για την εξυπηρέτηση διαφορετικών εφαρμογών με ποικιλία στη διάρκεια και ποιότητα υπηρεσίας.

1.2 Η Συνεισφορά της Παρούσας Εργασίας

Για τη διευκόλυνση των χρηστών στην επιλογή των κατάλληλων SLS κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης, αλλά και σε άλλες εργασίες, έχει προταθεί η χρήση προσωπικών αντιπροσώπων (User Agent UA) [10]. Προκειμένου ο UA να επιλέξει το κατάλληλο SLS πρέπει να γνωρίζει το μοντέλο ωφελιμότητας του χρήστη που εκφράζει το βαθμό ικανοποίησης του χρήστη για τα διάφορα επίπεδα QoS. Στην παρούσα εργασία ορίζουμε μια αρχιτεκτονική για αυτοματοποιημένη και δυναμική διαπραγμάτευση και έλεγχο (παροχής και συμμόρφωσης) SLA ανά ροή κίνησης σε ένα διαχειριζόμενο δίκτυο DiffServ, στην οποία μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες πολιτικές διαχείρισης των πόρων του δικτύου. Ορίζουμε, επίσης τις τεχνικές πληροφορίες που πρέπει να περιέχει ένα SLS και τον τρόπο που αυτές καθορίζονται από το χρήστη με απλό και διαφανή τρόπο. Επίσης, αναπτύσσουμε μια κατανομή της απαιτούμενης πληροφορίας στο δίκτυο μας με τρόπο σαφή και λογικό. Σε αυτή την αρχιτεκτονική προτείνουμε μια διαδικασία διαπραγμάτευσης που έχει συμπληρωματική αξία για αυτή, όσον αφορά στην επιλογή των SLA από τους χρήστες με αποδοτικό τρόπο τόσο για αυτούς, όσο και για το δίκτυο. Υλοποιούμε το συνολικό σύστημα σε ένα πραγματικό περιβάλλον δικτύου διαπιστώνοντας την επεκτασιμότητα του, αλλά και την εφαρμογή των θεωρητικών διαπιστώσεων στην πράξη. Επίσης, προτείνουμε τρόπους χρήσης της διαδικασίας διαπραγμάτευσης για την εφαρμογή διαφόρων πολιτικών διαχείρισης κίνησης και πόρων. Τέλος, προτείνουμε επεκτάσεις στην αρχιτεκτονική, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε περιβάλλοντα πολλών διαχειριζόμενων δικτύων DiffServ για την παροχή δυναμικών SLA από πηγή σε προορισμό (από-άκρη-σε-άκρη).

Αναλυτικότερα, η αρχιτεκτονική που ορίζουμε παρέχει υπηρεσίες DiffServ στις ροές κίνησης ενός διαχειριζόμενου δικτύου. Στο δίκτυο αυτό οι εφαρμογές των χρηστών κάνουν αιτήσεις δέσμευσης πόρων για παροχή τουλάχιστον του ελάχιστου επιπέδου ποιότητας υπηρεσίας με την οποία θα είναι ικανοποιημένος ο εκάστοτε χρήστης. Για την υλοποίηση της διαφορετικής συμπεριφοράς προώθησης της ροής κίνησης σε κάθε κόμβο (Per Hop Behavior PHB) του δικτύου χρησιμοποιούμε το πρωτόκολλο MPLS. Το MPLS υποστηρίζει την έννοια της ομαδοποίησης των ροών κίνησης (μέσω της ετικέτας MPLS) και επιπροσθέτως μπορεί να

παρέχει διαφορετική ποιότητα υπηρεσίας σε διαφορετικές ροές κίνησης. Οι αιτήσεις δέσμευσης πόρων πραγματοποιούνται μέσω του πρωτοκόλλου RSVP. Έτσι είναι σαφή τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αιτήσεων δέσμευσης πόρων. Ορίζουμε επίσης τον τρόπο με τον οποίο κάποιος χρήστης κάνει τις αιτήσεις δέσμευσης πόρων με απλό τρόπο. Οι αιτήσεις αυτές γίνονται αντιληπτές από τους δρομολογητές εισόδου στο δίκτυο (μέσω του πρωτοκόλλου COPS) και αποστέλλονται σε ένα Policy Server (PS), ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση των πόρων σε ένα διαχειριζόμενο δίκτυο Diffserv. Ο PS διαπραγματεύεται την κατηγοριοποίηση μιας ροής κίνησης σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας (ίσως και σε συγκεκριμένο μονοπάτι) με τον UA του χρήστη, του οποίου η εφαρμογή πρόκειται να λάβει την κυκλοφορία της ροής κίνησης. Η κυκλοφορία κάθε ροής κίνησης σημαδεύεται και συμμορφώνεται σύμφωνα με το αποτέλεσμα της διαδικασίας διαπραγμάτευσης, και έτσι κατηγοριοποιείται στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας που της αντιστοιχεί. Στη χειρότερη περίπτωση μια ροή κίνησης θα εξυπηρετηθεί από την κλάση ποιότητας υπηρεσίας Best Effort. Έτσι, έχουμε ένα αυτόματο μηχανισμό διαπραγμάτευσης για την παροχή δυναμικών SLS. Η κίνηση κατηγοριοποιείται στις διάφορες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας. Η δυνατότητα που έχει ο PS (μέσω του COPS Server που υλοποιούμε) να λειτουργεί με έναν διαφανή τρόπο και στο εσωτερικό του δικτύου ως σημείο ελέγχου για την αποδοχή ή όχι των ροών νέων ροών κίνησης σε μια ορισμένη κλάση ποιότητας υπηρεσίας είναι ο κυριότερος λόγος που χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο COPS. Με τον τρόπο αυτό διατηρείται η απλότητα του μοντέλου επικοινωνίας και διασφαλίζεται η συμβατότητα των εφαρμογών με τις επιλογές μας.

Η διαδικασία διαπραγμάτευσης που ορίσαμε επιλέγει το SLS που μεγιστοποιεί το *καθαρό όφελος (net benefit)* του κάθε χρήστη. Υιοθετήσαμε στο δίκτυο DiffServ μια μέθοδο χρέωσης με βάση το ισοδύναμο εύρος ζώνης, προκειμένου να δώσουμε στους χρήστες το κίνητρο να ζητούν την ποιότητα υπηρεσίας που έχουν πραγματικά ανάγκη. Επίσης, ορίσαμε ένα μοντέλο ωφελιμότητας του χρήστη που εκφράζει, με απλό αλλά επαρκή τρόπο, το βαθμό ικανοποίησης του χρήστη για την QoS που παρέχεται από το δίκτυο. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα στην προσέγγισή μας για τη διαδικασία διαπραγμάτευσης είναι η κατανομή της πληροφορίας που απαιτείται για την αποδοτική επιλογή SLS. Σύμφωνα με αυτή, κάθε συστατικό μέρος της αρχιτεκτονικής μας κατέχει μόνο την πληροφορία την οποία έχει κάποιο κίνητρο να αποθηκεύει. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι η απλότητα της διαδικασίας του χρήστη για την επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων κίνησης για μια ροή κίνησης. Επίσης, παρουσιάζουμε κάποια πειραματικά αποτελέσματα για τη συνολική οικονομική αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται με τη διαδικασία επιλογής SLS που προτείνουμε. Τα πειραματικά αποτελέσματα συνηγορούν στην άποψη ότι η επιλογή των SLS με αυτή τη διαδικασία διαπραγμάτευσης δίνει στους χρήστες τα κατάλληλα κίνητρα για να κάνουν αιτήσεις για δέσμευση των πόρων που πραγματικά έχουν ανάγκη.

Το σύστημα (αρχιτεκτονική και διαδικασία αποδοτικής επιλογής SLS) που προτείνουμε είναι πολύ γενικό και μπορεί να συνδυαστεί με διάφορους μηχανισμούς διαχείρισης των πόρων του δικτύου. Η υλοποίησή του σε πραγματικό περιβάλλον δικτύου κατέδειξε την αποδοτικότητά του. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μηχανισμός συμπληρωματικός της διαχείρισης κυκλοφορίας του δικτύου. Τέλος, το σύστημά μας δίνει την ευελιξία στον παροχέα του δικτύου να εφαρμόσει διάφορες πολιτικές διαχείρισης και/ή χρέωσης των πόρων του δικτύου για τη βελτίωση της αποδοτικότητας στη λειτουργία του δικτύου.

2 Ανασκόπηση Περιοχής

2.1 Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS)

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, η κλάση ποιότητας υπηρεσίας Best Effort του σημερινού Internet δεν είναι κατάλληλη για τη μεταφορά της κίνησης εφαρμογών που είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση και στη διακύμανση καθυστέρησης παράδοσης. Γενικά, διακρίνουμε τρεις κατηγορίες κίνησης όσον αφορά στις απαιτήσεις τους σε ανώτατη καθυστέρηση και σε διακύμανση καθυστέρησης:

- Κίνηση εφαρμογών πραγματικού χρόνου, όπως είναι η τηλεφωνία και η βίντεο-συνομιλία. Αυτή η κίνηση απαιτεί πολύ μικρές καθυστερήσεις παράδοσης πακέτου (μικρότερες από ένα δέκατο του δευτερολέπτου), με μικρή διακύμανση καθυστέρησης. Τυχόν απώλειες πακέτων της κίνησης των εφαρμογών αυτών δεν αντιμετωπίζονται με επαναμετάδοσή τους, λόγω της απαίτησης για χαμηλή καθυστέρηση. Άρα πρέπει να υπάρχουν λίγες ή καθόλου απώλειες πακέτων (ανάλογα με τη σπουδαιότητα της μεταφερόμενης πληροφορίας) και να χρησιμοποιείται το κατάλληλο πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς χωρίς επανεκπομπές πακέτων (π.χ. UDP).
- Κίνηση εφαρμογών συναλλαγών, όπως είναι οι συναλλαγές στο χρηματιστήριο μέσω WWW και η πρόσβαση σε απομακρυσμένη βάση δεδομένων. Αυτή η κίνηση απαιτεί καθυστερήσεις παράδοσης πακέτων της τάξης του ενός δευτερολέπτου και κάτω. Μεγαλύτερες καθυστερήσεις κάνουν τους χρήστες να περιμένουν για απαντήσεις στα μηνύματά τους πριν μπορέσουν να συνεχίσουν την εργασία τους, μειώνοντας έτσι την παραγωγικότητά τους. Σε ορισμένες εφαρμογές, αν η καθυστέρηση παράδοσης υπερβεί κάποιο ανεκτό όριο, η υπηρεσία αποτυγχάνει.
- Κίνηση εφαρμογών που μεταφέρουν σημαντική ποσότητα πληροφορίας, όπως είναι η μεταφορά αρχείων και μηνυμάτων. Αυτή η κίνηση μπορεί να ανεχθεί μεγάλες καθυστερήσεις παράδοσης. Περισσότερη σημασία για αυτή την κίνηση έχει η μεταγωγή της. Οι περισσότερες εφαρμογές αυτής της κίνησης έχουν αναπτυχθεί έτσι ώστε να εκμεταλλεύονται όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Η κίνηση των δύο πρώτων κατηγοριών ονομάζεται εγγυημένης ποιότητας (ή απλώς εγγυημένη), ενώ η κίνηση της τρίτης κατηγορίας ονομάζεται ελαστική. Ένα πρώτο βήμα για την εξυπηρέτηση της κίνησης που είναι ευαίσθητη σε καθυστέρηση και σε διακύμανση καθυστέρησης παράδοσης θα ήταν η αύξηση του συνολικού εύρους ζώνης στο Internet. Αλλά και αυτό δεν είναι αρκετό, αφού οι εκρήξεις κίνησης δημιουργούν μεγάλες διακυμάνσεις στην καθυστέρηση, ακόμη και σε ένα δίκτυο με χαμηλό φόρτο κίνησης. Για να παρέχεται μια υπηρεσία με κατάλληλα χαρακτηριστικά έτσι ώστε να είναι χρήσιμη, πρέπει το δίκτυο IP να παρέχει κάποια ντετερμινιστική εγγύηση για τα ποσοτικά ή τα ποιοτικά χαρακτηριστικά αυτά. Αυτό σημαίνει ότι στο δίκτυο πρέπει να εισαχθούν κάποιοι μηχανισμοί με τους οποίους θα διαχωρίζεται η κίνηση που είναι ευαίσθητη σε καθυστερήσεις από την υπόλοιπη κίνηση και θα έχει την κατάλληλη αντιμετώπιση. Ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service QoS) είναι αυτή ακριβώς η διαφορετική αντιμετώπιση της κίνησης σύμφωνα με τα απαιτήσεις της. Οι μηχανισμοί και τα πρωτόκολλα για παροχή QoS επιχειρούν να παρέχουν μια μέθοδο για κατηγοριοποίηση και ανάθεση προτεραιοτήτων στην κίνηση που διασφαλίζει ότι η κίνηση των εφαρμογών που είναι σημαντικές για το δίκτυο θα μεταφέρεται από αυτό με προκαθορισμένα χαρακτηριστικά ανεξάρτητα από την υπόλοιπη κίνηση που την ανταγωνίζεται για τους ίδιους πόρους του δικτύου. Η ποιότητα υπηρεσίας διαχειρίζεται το εύρος ζώνης αποδοτικότερα, ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ενός μεγάλου εύρους εφαρμογών.

Η ποιότητα υπηρεσίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το διαμοιρασμό του κόστους χρήσης

του δικτύου με ένα τρόπο που να χαρακτηρίζεται δίκαιος από τους χρήστες. Επίσης, επιτρέπει στη χρέωση να συνδεθεί με την απόδοση του δικτύου, μέσω της ποιότητας ανά υπηρεσία.

Διάφορα πρωτόκολλα έχουν προταθεί για την παροχή QoS στο Internet. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι τα Integrated Services, το RSVP, τα Differentiated Services και το MPLS, τα οποία περιγράφονται σε ξεχωριστές ενότητες. Όλα έχουν σαν στόχο την παροχή διαφοροποιημένων υπηρεσιών σε ανεξάρτητες ή ομαδοποιημένες ροές κίνησης χωρίς σημαντικές αλλαγές στην υποδομή και στο χαρακτήρα του Internet. Σημαντικές αλλαγές στην υποδομή θα επέφεραν τεράστιο κόστος που οι εταιρίες που παρέχουν υπηρεσίες συνδεσιμότητας (ISP) δεν είναι διατεθειμένες να πληρώσουν άμεσα.

Δύο είναι οι προσεγγίσεις παροχής ποιότητας υπηρεσίας:

- Δέσμευση πόρων (integrated services, RSVP): Οι πόροι του δικτύου δεσμεύονται σύμφωνα με την αίτηση δέσμευσης πόρων κάποιας εφαρμογής και με βάση την πολιτική διαχείρισης των πόρων του δικτύου.
- Χρήση προτεραιοτήτων (differentiated services): Η κίνηση του δικτύου κατηγοριοποιείται σε κλάσεις υπηρεσίας και καταναλώνει τους πόρους του δικτύου που έχουν δεσμευθεί για τις κλάσεις αυτές, με βάση την πολιτική διαχείρισης των πόρων του δικτύου. Για την εφαρμογή της ποιότητας υπηρεσίας, τα στοιχεία του δικτύου παρέχουν καλύτερη αντιμετώπιση στις κατηγορίες κίνησης που προσδιορίζεται ότι είναι πιο απαιτητικές σε ποιότητα εξυπηρέτησης.

Επίσης, η ποιότητα υπηρεσίας μπορεί να παρέχεται ανά ανεξάρτητες ή ανά ομαδοποιημένες ροές κίνησης:

- Ανά ροή κίνησης: Μια ροή κίνησης ορίζεται ως το ξεχωριστό, μονόδρομο ρεύμα κυκλοφορίας μεταξύ δυο εφαρμογών (πηγής και προορισμού), που προσδιορίζεται μοναδικά από την εξής πεντάδα παραμέτρων: πρωτόκολλο μεταφοράς, διεύθυνση πηγής, πόρτα πηγής, διεύθυνση προορισμού, και πόρτα προορισμού.
- Ανά ομαδοποιημένη ροή κίνησης: Μια ομαδοποιημένη ροή κίνησης είναι απλά δύο ή περισσότερες ροές κίνησης. Αυτές οι ροές κίνησης έχουν κάτι κοινό (π.χ. για οποιαδήποτε ή και περισσότερες παραμέτρους από την πεντάδα, ή μια ετικέτα, ή κάποιο αριθμό προτεραιότητας).

Οι διαφορετικοί τύποι ποιότητας υπηρεσίας που παρέχονται ονομάζονται κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας. Αν το δίκτυο επιλέγει την κλάση ποιότητας υπηρεσίας με την οποία θα εξυπηρετηθεί μια ροή κίνησης, τότε λέμε ότι η υπηρεσία παρέχεται «έμμεσα». Αυτό σημαίνει πως η εφαρμογή στέλνει τη ροή κίνησης χωρίς να δηλώσει κάποιες απαιτήσεις για QoS και το δίκτυο κατηγοριοποιεί τη ροή σε κάποια κλάση ποιότητας υπηρεσίας με βάση το είδος της εφαρμογής. Αυτή η προσέγγιση έχει μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα. Καταρχήν δεν αλλάζει το μοντέλο παροχής υπηρεσιών, αφού οι εφαρμογές στέλνουν την κίνηση στο δίκτυο χωρίς διαπραγμάτευση με το δίκτυο και το δίκτυο αποφασίζει πώς θα την εξυπηρετήσει. Επίσης, εφόσον δεν προσδιορίζεται καμιά απαίτηση για συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας, η αντιστοίχιση της ροής κίνησης μιας εφαρμογής σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας είναι θέμα του παροχέα των υπηρεσιών δικτύου. Επιπροσθέτως, αυτή η αντιστοίχιση δε χρειάζεται να είναι ομοιόμορφη σε όλο το δίκτυο. Ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι το δίκτυο γνωρίζει τον τρόπο για να εξυπηρετήσει έναν συγκεκριμένο αριθμό από είδη εφαρμογών. Για μια άγνωστη εφαρμογή το δίκτυο δε γνωρίζει σε ποια κλάση να κατηγοριοποιήσει την κίνησή της. Επίσης, το δίκτυο δεν μπορεί να δώσει εξατομικευμένη ποιότητα υπηρεσίας σε δυο ή περισσότερους χρήστες που χρησιμοποιούν την ίδια εφαρμογή αλλά έχουν διαφορετικές ανάγκες για ποιότητα υπηρεσίας (π.χ. δύο χρήστες χρησιμοποιούν μια εφαρμογή με την οποία βλέπουν video κατά απαίτηση και ένας από τους δύο επιθυμεί να δει την ταινία με υψηλή ποιότητα, ενώ ο άλλος δεν έχει υψηλές απαιτήσεις).

Από την άλλη, αν οι χρήστες εκφράζουν τις απαιτήσεις τους για παροχή ποιότητας υπηρεσίας, τότε λέμε ότι η ποιότητα υπηρεσίας ζητείται «άμεσα». Αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο παρέχει ένα σύνολο από κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας και οι χρήστες διαλέγουν την κλάση ποιότητας υπηρεσίας στην οποία επιθυμούν να κατηγοριοποιηθεί η κίνηση των εφαρμογών τους. Αυτή η προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα ότι η αρχιτεκτονική της διεπιφάνειας μεταξύ των εφαρμογών και των χρηστών είναι σαφής. Έτσι, νέες εφαρμογές μπορούν να εξυπηρετηθούν με την επιθυμητή κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Άλλα έχει και σημαντικά μειονεκτήματα, όπως είναι το θέμα των κινήτρων για τους χρήστες. Οι χρήστες χρειάζεται να έχουν τα σωστά κίνητρα, ώστε να επιλέγουν την κλάση ποιότητας υπηρεσίας σύμφωνα με τις πραγματικές ανάγκες τους. Διαφορετικά, κάθε χρήστης θα επέλεγε την καλύτερη δυνατή κλάση, ακόμη και αν η επιπλέον παρεχόμενη QoS του ήταν άχρηστη. Αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα τη σπατάλη των πόρων του δικτύου και τη στέρηση τους από χρήστες που πραγματικά τους έχουν ανάγκη με αποτέλεσμα τη μείωση της κοινωνικής ευημερίας, δηλαδή της συνολικής ικανοποίησης όλων των χρηστών. Ένα άλλο μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η έλλειψη επεκτασιμότητας. Οι εφαρμογές πρέπει να γνωρίζουν το σύνολο των προσφερομένων κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας, αλλά και τα χαρακτηριστικά κάθε κλάσης. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά ποιότητας κάθε κλάσης πρέπει να παραμένουν τα ίδια σε όλο το δίκτυο προκειμένου οι αποφάσεις των χρηστών να βασίζονται σε ενιαία κριτήρια. Αυτό, όμως, δεν επιτρέπει στον παροχέα του δικτύου να μεταβάλλει δυναμικά τις προσφερόμενες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας ή τα χαρακτηριστικά τους, ανάλογα με την πολιτική διαχείρισης δικτύου που ακολουθεί.

2.2 Παρεχόμενες Λύσεις QoS για IP δίκτυα

2.2.1 Το πρωτόκολλο RSVP

2.2.1.1 Λειτουργία και Χαρακτηριστικά

Το πρωτόκολλο Resource reSerVation (RSVP) είναι ένα πρωτόκολλο σηματοδότησης που ορίστηκε από την IETF[2]. Το RSVP μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις εφαρμογές για να ζητηθεί ειδική αντιμετώπιση από το δίκτυο για συγκεκριμένες ροές κίνησης. Σύμφωνα με αυτό μπορούν να δεσμευθούν πόροι για κάποιες ροές κίνησης, δηλαδή να ανατεθούν προτεραιότητες, να δεσμευθεί χώρος ενταμίευσης και εύρος ζώνης, σε όλους τους ενδιάμεσους δρομολογητές και μεταγωγείς κίνησης κατά μήκος ενός μονοπατιού του δικτύου. Χρησιμοποιώντας μια σύνδεση για τη σηματοδότηση διαφορετική από τη σύνδεση για τη ροή κίνησης της πληροφορίας μια λαμβάνουσα εφαρμογή στέλνει μια αίτηση δέσμευσης πόρων μέσω του πρωτοκόλλου RSVP. Το πρωτόκολλο RSVP μπορεί να λειτουργήσει τόσο για συνδέσεις από σημείο σε σημείο όσο και για συνδέσεις από σημείο προς πολλά σημεία διαδίδοντας τις αιτήσεις δέσμευσης πόρων σε όλους τους δρομολογητές στα μονοπάτια από τα οποία θα περάσει η ροή κίνησης της πληροφορίας. Οι πόροι δεσμεύονται σε όλους τους δρομολογητές κατά μήκος του μονοπατιού από τα οποία θα περάσει η ροή κίνησης της πληροφορίας, αλλά μόνο προς την κατεύθυνση κατά την οποία ρέει η πληροφορία. Οι αποστολείς κίνησης προσδιορίζουν την κίνηση που πρόκειται να στείλουν όσον αφορά άνω και κάτω φράγματα σε εύρος ζώνης, καθυστέρηση και διακύμανση καθυστέρησης σε ένα αντικείμενο TSPEC. Το αντικείμενο TSPEC περιέχει μεταξύ άλλων τις παραμέτρους κίνησης της ροής πληροφορίας, δηλαδή:

- Ο ρυθμός κουπονιών (token rate) που είναι ο ρυθμός με τον οποίο γεμίζει (ή αδειάζει) ο Leaky Bucket και εκφράζει το μέγιστο μέσο ρυθμό αποστολής κίνησης.
- Το μέγεθος του ενταμιευτή κουπονιών (token bucket) του Leaky Bucket και εκφράζει τη μέγιστη διάρκεια αποστολής κίνησης με το μέγιστο ρυθμό.

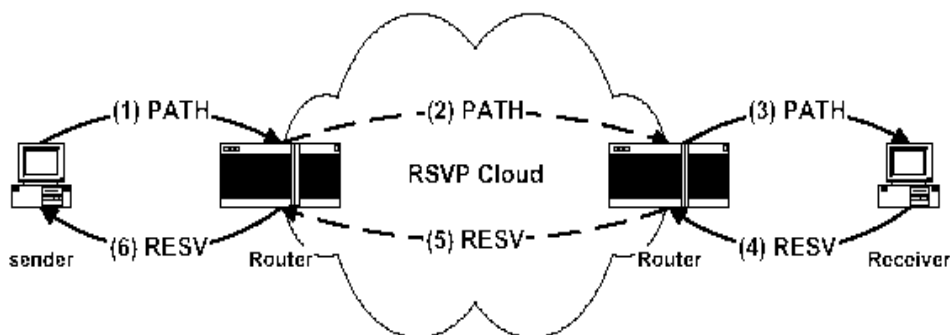
- Ο μέγιστος ρυθμός (peak rate) που είναι μέγιστος ρυθμός αποστολής κίνησης σε όλες τις χρονικές περιόδους.
- Το μέγιστο μέγεθος ελεγχόμενου πακέτου (maximum policed unit) από τον Leaky Bucket που είναι το μέγιστο μέγεθος μιας μονάδας μεταφοράς κίνησης (MTU) για την οποία ισχύει το συμβόλαιο.
- Το ελάχιστο μέγεθος ελεγχόμενου πακέτου (minimum policed unit) από τον Leaky Bucket που είναι το ελάχιστο μέγεθος μιας μονάδας μεταφοράς κίνησης (MTU) για την οποία ισχύει το συμβόλαιο.

Ένα άλλο αντικείμενο, το ADSPEC, καταγράφει πληροφορίες για το μονοπάτι που θα είναι χρήσιμες στους παραλήπτες της κίνησης προκειμένου να κάνουν την κατάλληλη αίτηση δέσμευσης πόρων. Στο αντικείμενο ADSPEC καταγράφονται πληροφορίες σχετικές με τους διαθέσιμους πόρους (διαθέσιμο εύρος ζώνης, καθυστέρηση), την υποστήριξη του πρωτοκόλλου RSVP, την υποστήριξη των διαφόρων επιπέδων υπηρεσίας του πρωτοκόλλου RSVP από τους δρομολογητές καθώς και άλλα στοιχεία που αφορούν τα μονοπάτια που θα ακολουθήσει η πληροφορία προς τους παραλήπτες. Το αντικείμενο TSPEC μαζί με το αντικείμενο ADSPEC αποτελούν, μεταξύ άλλων αντικειμένων (όπως τα SESSION, RSVP_HOP, TIME_VALUES και POLICY_DATA) το μήνυμα σηματοδοσίας PATH του πρωτοκόλλου RSVP που μεταδίδεται από τους αποστολείς προς τους παραλήπτες κίνησης.

Μετά την άφιξη του μηνύματος PATH στους παραλήπτες, οι τελευταίοι στέλνουν ένα μήνυμα σηματοδοσίας RESV προς τους αποστολείς της κίνησης που περιέχει την αίτηση δέσμευσης πόρων. Το μήνυμα RESV αποτελείται από ένα αντικείμενο TSPEC που περιέχει τις παραμέτρους κίνησης με τις οποίες ένας παραλήπτης επιθυμεί να λάβει κίνηση και ίσως από ένα αντικείμενο RSPEC που περιέχει τις απαιτήσεις του παραλήπτη για εγγυήσεις σε εύρος ζώνης και σε ανώτατη καθυστέρηση. Συγκεκριμένα το αντικείμενο RSPEC αποτελείται:

- Από το R που εκφράζει την απαίτηση της εφαρμογής του παραλήπτη κίνησης για δέσμευση εύρους ζώνης για την κίνηση που θα λάβει, και
- από το S που σε συνδυασμό με το R εκφράζει την απαίτηση της εφαρμογής του παραλήπτη κίνησης για ανώτατη καθυστέρηση στη λήψη κίνησης.

Κάθε ενδιάμεσος δρομολογητής κατά μήκος του μονοπατιού που ακολουθούν τα μηνύματα RESV μπορεί να αποδεχθεί ή να απορρίψει την αίτηση δέσμευσης πόρων. Αν η αίτηση δέσμευσης πόρων απορριφθεί από κάποιον δρομολογητή, τότε αυτός θα στείλει ένα μήνυμα σφάλματος (RESV_ERROR) στον παραλήπτη και η διαδικασία σηματοδοσίας θα τερματιστεί με την απόρριψη της αίτησης. Αν η αίτηση δέσμευσης πόρων γίνει αποδεκτή από όλους τους δρομολογητές κατά μήκος του μονοπατιού που ακολουθεί, τότε σε κάθε δρομολογητή δεσμεύεται εύρος ζώνης και χώρος ενταμίευσης και αποθηκεύεται πληροφορία σχετικά με τη ροή κίνησης για την οποία δεσμεύθηκαν οι πόροι. Κάθε δέσμευση πόρων στους δρομολογητές πρέπει να ανανεώνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα προκειμένου να ισχύει. Η διαδικασία σηματοδοσίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1: Η σηματοδοσία του πρωτοκόλλου RSVP μεταξύ ενός αποστολέα (sender) και ενός

παραλήπτη (receiver).

Τα επίπεδα υπηρεσίας που υποστηρίζει το πρωτόκολλο RSVP είναι:

- Η εγγυημένη (Guaranteed) κλάση ποιότητας υπηρεσίας που εξασφαλίζει το εύρος ζώνης για τη ροή των πακέτων της πληροφορίας χωρίς απώλειες και με εγγύηση για τη μέγιστη καθυστέρηση που θα αντιμετωπίσουν τα πακέτα της ροής κίνησης μέχρι τον προορισμό τους.
- Η προβλεπόμενη (Predictive) κλάση ποιότητας υπηρεσίας που εξασφαλίζει το εύρος ζώνης για τη ροή των πακέτων της πληροφορίας χωρίς απώλειες. Δεν παρέχει καμιά εγγύηση για τη μέγιστη καθυστέρηση των πακέτων της ροής κίνησης μέχρι τον προορισμό τους.
- Η κλάση ποιότητας υπηρεσίας ελεγχόμενου φόρτου (Controlled Load) που εξασφαλίζει αντιμετώπιση στα πακέτα μιας ροής κίνησης, όμοια με αυτή που θα είχαν από το δίκτυο αν ήταν ελαφρώς φορτωμένο με κίνηση. Δεν παρέχονται εγγυήσεις όσον αφορά το εύρος ζώνης και την καθυστέρηση.
- Η κλάση ποιότητας υπηρεσίας βέλτιστης προσπάθειας (Best Effort) που συνεπάγεται ότι το δίκτυο θα προσπαθήσει να μεταδώσει την πληροφορία, αλλά δεν παρέχει καμιά εγγύηση γι' αυτό.

2.2.1.2 Μειονεκτήματα

Ένα από τα προβλήματα του πρωτοκόλλου RSVP είναι ότι το ποσό της πληροφορίας που πρέπει να αποθηκεύεται στους δρομολογητές αυξάνει ανάλογα με τον αριθμό των ροών κίνησης στις οποίες παρέχεται μια συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας. Αυτό δημιουργεί πολύ μεγάλο υπολογιστικό φόρτο και απαιτεί τεράστιο αποθηκευτικό χώρο στους δρομολογητές. Γι' αυτό το πρωτόκολλο αυτό δεν επεκτείνεται αποδοτικά στο εσωτερικό του Internet. Το πρόβλημα αυτό περιορίζεται ελάχιστα από τη δυνατότητα του πρωτοκόλλου RSVP να ενοποιεί ροές κίνησης για πολλαπλούς αποδέκτες. Επίσης, οι απαιτήσεις σε λειτουργικότητα που δημιουργεί η αρχιτεκτονική αυτή στους δρομολογητές είναι μεγάλες. Όλοι οι δρομολογητές πρέπει να υλοποιούν το πρωτόκολλο RSVP, τη διαδικασία ελέγχου αποδοχής κλήσης, τη διαδικασία διαχωρισμού της κυκλοφορίας ανά ροή, και τη διαδικασία χρονοπρογραμματισμού αποστολής κίνησης.

Ένα άλλο πρόβλημα του πρωτοκόλλου RSVP είναι ότι τόσο για τα μηνύματα PATH όσο και για τα μηνύματα RESV τα πρωτόκολλα δρομολόγησης του δικτύου αποφασίζουν τις διαδρομές που ακολουθούν προκειμένου να φτάσουν στον προορισμό τους. Τα σημερινά πρωτόκολλα δρομολόγησης στο Internet δε λαμβάνουν υπόψη τους τον παράγοντα ποιότητα υπηρεσίας. Έτσι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να διαλέξουν μονοπάτια από τα οποία θα περάσει η σηματοδότηση του πρωτοκόλλου RSVP στα οποία οι δρομολογητές δε θα είναι σε θέση να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις για δέσμευση πόρων, είτε γιατί δε θα έχουν τη διαθέσιμη χωρητικότητα, είτε γιατί δε θα υλοποιούν το πρωτόκολλο RSVP. Αφού όλοι οι δρομολογητές κατά μήκος ενός μονοπατιού πρέπει να συμφωνήσουν για την ικανοποίηση μιας αίτησης δέσμευσης πόρων, η κατάσταση που περιγράφηκε μπορεί να οδηγήσει σε απόρριψη μιας αίτησης παρόλο που κάποιο μονοπάτι του δικτύου που θα μπορούσε να παρέχει την ποιότητα υπηρεσίας που ζητήθηκε παραμένει αχρησιμοποίητο (γιατί δεν επιλέχθηκε από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης).

Παρά τα προβλήματα του πρωτοκόλλου RSVP και το γεγονός ότι τα πρότυπα για αυτό είναι ακόμη σε εξέλιξη και δεν έχουν αποδειχθεί σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας, όλοι οι κύριοι κατασκευαστές συσκευών δικτύου (συμπεριλαμβανομένων των Cisco Systems, Bay Networks και 3Com) υλοποιούν το RSVP στους δρομολογητές τους και επιχειρούν την υλοποίηση του και σε κάποιους μεταγωγείς.

2.2.2 Integrated Services

2.2.2.1 Λειτουργία και Χαρακτηριστικά

Μόνο οι κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας Guaranteed και Controlled Load του πρωτοκόλλου RSVP έχουν ορισθεί από την IETF στο μοντέλο παροχής υπηρεσιών Integrated Services [7]. Η κλάση ποιότητας υπηρεσίας Best Effort δεν έχει ορισθεί, αλλά αυτό δε χρειάζεται γιατί αποτελεί την υπηρεσία που παρέχεται από το Internet χωρίς τη λειτουργία του πρωτοκόλλου RSVP. Η κλάση ποιότητας υπηρεσίας Guaranteed [12]0 προορίζεται για ανελαστικές εφαρμογές που απαιτούν συγκεκριμένο άνω φράγμα στην καθυστέρηση με την οποία λαμβάνουν τα πακέτα μιας ροής κίνησης. Από την άλλη, η κλάση ποιότητας υπηρεσίας Controlled Load προορίζεται για ελαστικές εφαρμογές που απαιτούν αξιόπιστη και αποδοτική υπηρεσία Best Effort. Η φιλοσοφία του μοντέλου παροχής υπηρεσιών Integrated Services έχει να κάνει με τη δέσμευση πόρων και τη διατήρηση πληροφορίας για αυτή σε κάθε δρομολογητή του δικτύου από τους οποίους πρόκειται να περάσει η κίνηση μιας ροής για την οποία δεσμεύονται οι πόροι. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο RSVP. Προκειμένου να ισχύουν τα χαρακτηριστικά μιας κλάσης ποιότητας υπηρεσίας για μια ροή κίνησης πρέπει αυτή η κλάση ποιότητας υπηρεσίας και φυσικά το πρωτόκολλο RSVP να υποστηρίζεται από όλους τους δρομολογητές από τους οποίους θα περάσει η ροή κίνησης. Όμως, δεν είναι αναγκαίο να υποστηρίζονται όλες οι κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας από κάθε δρομολογητή. Επίσης, η προσφερόμενη κλάση ποιότητας υπηρεσίας μπορεί να ανανεώνεται δυναμικά κατά τη διάρκεια παροχής της υπηρεσίας σύμφωνα με τα αποτελέσματα της σηματοδοσίας ή τις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν σε κάποιο δρομολογητή από τον οποίο περνά η ροή κίνησης της υπηρεσίας. Κάθε τέτοια αλλαγή στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας γίνεται γνωστή στον παραλήπτη μέσω της σηματοδοσίας. Ο παραλήπτης μπορεί να επιχειρήσει να επαναδιαπραγματευτεί την ποιότητα υπηρεσίας που λαμβάνει ή να διακόψει την παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Τη δυνατότητα να διακόψει την παροχή ποιότητας υπηρεσίας την έχει και ο αποστολέας κίνησης. Πρόσφατα, το πρωτόκολλο RSVP τροποποιήθηκε και επεκτάθηκε με διάφορους τρόπους, ώστε να δεσμεύει πόρους για ομαδοποιημένες ροές κίνησης [22], να ορίζει συγκεκριμένα μονοπάτια (Explicit Routes) με απαιτήσεις για παροχή ποιότητας υπηρεσίας, και να κάνει κάποιες άλλες λειτουργίες σηματοδοσίας για διαχείριση κυκλοφορίας [24]. Οι Integrated Services αποτελούνται από τέσσερα λειτουργικά μέρη:

- Το πρωτόκολλο σηματοδοσίας (π.χ. RSVP),
- τη διαδικασία ελέγχου αποδοχής κλήσης,
- τη διαδικασία διαχωρισμού της κυκλοφορίας ανά ροή, και
- τη διαδικασία χρονοπρογραμματισμού αποστολής κίνησης.

Το πρωτόκολλο σηματοδοσίας μεταφέρει την αίτηση δέσμευσης πόρων. Η διαδικασία ελέγχου αποδοχής κλήσης καθορίζει αν θα γίνει αποδεκτή η αίτηση δέσμευσης πόρων σε κάθε δρομολογητή. Κάθε δρομολογητής που λαμβάνει ένα πακέτο πραγματοποιεί μια ανάλυση πολλαπλών πεδίων του προκειμένου να εξετάσει αν έχουν δεσμευθεί πόροι για τη ροή κίνησης στην οποία ανήκει, δηλαδή διαχωρίζει τη κυκλοφορία ανά ροή. Η διαδικασία τοποθετεί το πακέτο στην κατάλληλη ουρά εξυπηρέτησης και προγραμματίζει χρονικά την αποστολή του σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ροής κίνησης για ποιότητα υπηρεσίας.

2.2.2.2 Μειονεκτήματα

Η αρχιτεκτονική Integrated Services, αφού χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο RSVP για τη σηματοδοσία και τη δέσμευση πόρων κληρονομεί τα προβλήματα που αυτό έχει. Επίσης, η κλάση ποιότητας υπηρεσίας Guaranteed πρέπει να υλοποιείται σε όλους τους ενδιάμεσους

δρομολογητές προκειμένου να παρέχεται. Η κλάση ποιότητας υπηρεσίας Controlled Load μπορεί να παρέχεται αν υλοποιηθεί μόνο σε σημεία πιθανής συμφόρησης και δρομολογώντας τα πακέτα του RSVP από μη πιθανά να συμφορηθούν μονοπάτια του δικτύου. Επίσης, η κλάση ποιότητας υπηρεσίας Guaranteed είναι πολύ δύσκολο να παρασχεθεί σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις για δέσμευση πόρων είναι μεγάλες (της τάξης T1/E1, δηλαδή της τάξης Mbps).

2.2.3 Differentiated Services

2.2.3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Η αρχιτεκτονική υπηρεσιών Differentiated Services (DiffServ) παρέχει ένα περιβάλλον στο οποίο οι παροχείς υπηρεσιών μπορούν να παρέχουν σε κάθε πελάτη ένα εύρος υπηρεσιών δικτύου που διαφοροποιούνται τόσο στην ποιότητα υπηρεσίας όσο και στη χρέωσή τους. Μετά από μια αίτηση παροχής ποιότητας υπηρεσίας σε μια ροή κίνησης ενός χρήστη τα πακέτα της ροής σημαδεύονται ανάλογα στην είσοδο του δικτύου. Συγκεκριμένα ανατίθεται στο Type Of Service (TOS) byte της επικεφαλίδας του πρωτοκόλλου IPv4 μια συγκεκριμένη κωδική τιμή (Differentiated Services Code Point - DSCP). Σύμφωνα με την τιμή του DSCP τα πακέτα έχουν διαφορετική αντιμετώπιση στους δρομολογητές του δικτύου. Η αντιμετώπιση αυτή ονομάζεται Per Hop Behavior (PHB) και αφορά στην προτεραιότητα της προώθησης των πακέτων, στις πιθανές απώλειες πακέτων και στις εγγυήσεις σε εύρος ζώνης. Ο τρόπος χρήσης του TOS byte ορίζεται από την αρχιτεκτονική DiffServ και σε αυτή αναφέρεται ως πεδίο DS. Σε κάθε τιμή DSCP αντιστοιχεί μια συγκεκριμένη PHB. Η αντιστοιχία μεταξύ των DSCP και των PHB αφορά το διαχειριστή του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να υλοποιηθούν διάφορες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας, στις οποίες κατηγοριοποιείται ένα πακέτο βάσει της τιμής του πεδίου DS της επικεφαλίδας του. Στην πραγματικότητα, οι διάφορες PHB είναι μόνο συστατικά για το χτίσιμο ολοκληρωμένων κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας. Οι παροχείς υπηρεσιών δικτύου (ISP) συνδυάζοντας τις υλοποιήσεις των PHB με ελεγκτές κυκλοφορίας (που μορφοποιούν, σημαδεύουν ή απορρίπτουν κίνηση ανάλογα), με στρατηγικές παροχής υπηρεσιών και με μοντέλα χρέωσης, μπορούν να δώσουν ολοκληρωμένες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας στους πελάτες τους.

Για να παρέχονται σε ένα πελάτη διαφοροποιημένες υπηρεσίες είναι αναγκαίο να υπάρχει μεταξύ του πελάτη και του ISP μια συμφωνία για το επίπεδο υπηρεσίας (Service Level Agreement – SLA). Το SLA αποτελεί συμφωνία σχετικά με το ποιες διαφοροποιημένες υπηρεσίες παρέχονται σε έναν συγκεκριμένο πελάτη, τα κριτήρια ελέγχου (προσδιορισμός ροής, προγραμματισμός παροχής, το κόστος και άλλα) της κίνησης που εισάγεται στο δίκτυο και τις παραμέτρους της κίνησης. Ένα υποσύνολο του SLA ορίζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά (π.χ. τις παραμέτρους ελέγχου κίνησης του μοντέλου Leaky Bucket, τις εγγυήσεις σε εύρος ζώνης και σε καθυστέρηση) των υπηρεσιών που παρέχονται και ονομάζεται Service Level Specification (SLS). Η δομή του SLS περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 3.2. Οι υπηρεσίες DiffServ παρέχονται μόνο για κίνηση μιας κατεύθυνσης. Για το λόγο αυτό η συμπεριφορά του δικτύου για κάθε κατεύθυνση ορίζεται από διαφορετικά SLA. Ένα SLA μπορεί να είναι στατικό ή δυναμικό. Για τα στατικά SLA η διαπραγμάτευση μεταξύ του πελάτη και του ISP γίνεται ανά μεγάλα χρονικά διαστήματα, για παράδειγμα μηνιαίως ή ετησίως. Οι πελάτες με δυναμικά SLA πρέπει να χρησιμοποιούν κάποιο πρωτόκολλο σηματοδότησης (π.χ. RSVP), προκειμένου να ζητούν άλλες υπηρεσίες κατά βούληση.

2.2.3.2 Ο Ελεγκτής Κυκλοφορίας (Traffic Conditioner)

Ο ελεγκτής κυκλοφορίας περιλαμβάνει τις απαραίτητες λειτουργίες για την εφαρμογή των SLA στα πακέτα των διαφόρων ροών κίνησης στο δίκτυο. Αποτελείται από:

- Το διαχωριστή κίνησης (Classifier) ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία ενός ή περισσότερων πεδίων του πακέτου προκειμένου να το μεταχειριστεί σύμφωνα με το SLA της ροής κίνησης στην οποία ανήκει. Αν η κίνηση διαχωρίζεται στο επίπεδο ομαδοποιημένων ροών κίνησης με βάση το πεδίο DS των πακέτων της κυκλοφορίας, τότε ο διαχειριστής κίνησης ονομάζεται Bandwidth Aggregate (BA) Classifier. Αν ο διαχωρισμός της κίνησης περιλαμβάνει επεξεργασία πολλών πεδίων του πακέτου προκειμένου να βρεθεί η ροή στην οποία ανήκει, τότε ο διαχωριστής κίνησης ονομάζεται Micro-Flow (MF) Classifier.
- Το λειτουργικό τμήμα (Marker) που σημαδεύει τα ασημάδευτα πακέτα (το πεδίο DS) ανάλογα με τη ροή κίνησης στην οποία ανήκουν ή τα σημαδεμένα πακέτα σύμφωνα με την τιμή του DSCP που έχουν ήδη (σε περίπτωση αντιστοίχισης μεταξύ DSCP από τον διαχειριστή του δικτύου ή όπως ορίζει η πολιτική που ακολουθείται τοπικά).
- Το μετρητή κίνησης (Meter) ο οποίος συλλέγει στοιχεία για την κυκλοφορία σε κάθε PHB και άλλα στατιστικά στοιχεία για την κίνηση.
- Το λειτουργικό τμήμα (Conditioner) που εφαρμόζει σε κάθε πακέτο μιας ροής κίνησης τη PHB που του αντιστοιχεί. Η συμπεριφορά που αντιστοιχεί σε κάθε πακέτο μπορεί να περιλαμβάνει μαρκάρισμα ή μέτρηση (από τα προηγούμενα λειτουργικά τμήματα), αλλά μπορεί να περιλαμβάνει και επιλογή της ουράς εξυπηρέτησης όπου θα τοποθετηθεί το πακέτο. Επίσης, σε αυτό το λειτουργικό τμήμα μπορεί να εφαρμόζεται μορφοποίηση ή απόρριψη κίνησης ανά ροή κίνησης ή σε επίπεδο ομαδοποιημένων ροών προκειμένου να συμμορφώνεται η κίνηση με τους όρους του SLA της και με τη συνολική χωρητικότητα ανά PHB.

Η παραπάνω λειτουργικότητα του ελεγκτή κίνησης πραγματοποιείται σε επίπεδο ροών ή ομαδοποιημένων ροών σε κάθε δρομολογητή ενός δικτύου DiffServ. Ο διαχωρισμός κίνησης τύπου MF είναι εξαιρετικά επιβαρυντικός σε υπολογιστικό φόρτο για ένα δρομολογητή. Επίσης, το μαρκάρισμα της κίνησης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, πρέπει να γίνεται στην είσοδο του δικτύου DiffServ. Η συμμόρφωση της κίνησης στους όρους των συμβολαίων που τη διέπουν ανά ροή είναι και αυτή εξαιρετικά επιβαρυντική σε υπολογιστικό φόρτο για τους δρομολογητές. Για τους λόγους αυτούς οι παραπάνω λειτουργίες πρέπει να λαμβάνουν χώρα στους δρομολογητές εισόδου του δικτύου ή ακόμα και στους υπολογιστές των πελατών που αποστέλλουν την κίνηση, αν είναι δυνατό και μπορεί το δίκτυο να τους εμπιστευθεί. Στο εσωτερικό του δικτύου πρέπει να λαμβάνουν χώρα μόνο διαχωρισμός κίνησης τύπου BA και συμμόρφωση της κίνησης στο επίπεδο ομαδοποιημένων ροών. Με τον τρόπο αυτό ο υπολογιστικός φόρτος δεν επιβαρύνει το εσωτερικό ενός δικτύου DiffServ. Τα παραπάνω πρέπει να γίνουν και για έναν επιπλέον λόγο. Τα δίκτυα των ISP αποτελούνται από δρομολογητές πρόσβασης και από δρομολογητές κορμού. Οι δρομολογητές κορμού πρέπει να προωθούν τα πακέτα πολύ γρήγορα και γι' αυτό οι λειτουργίες που κάνουν πρέπει να είναι απλές, ενώ οι δρομολογητές πρόσβασης δεν είναι ανάγκη να προωθούν τα πακέτα τόσο γρήγορα λόγω του ότι οι γραμμές πρόσβασης των πελατών είναι σχετικά αργές. Οπότε οι δρομολογητές πρόσβασης είναι σε θέση να ξοδέψουν υπολογιστικό χρόνο για να κάνουν επεξεργασία (μαρκάρισμα, μορφοποίηση, απόρριψη) της κίνησης ανά ροή. Όταν ένα πακέτο εξέρχεται από ένα διαχειριζόμενο περιβάλλον δικτύου και εισέρχεται σε ένα άλλο το πεδίο DS της επικεφαλίδας του μπορεί να μαρκαιστεί ξανά και σύμφωνα με το SLA μεταξύ των διαχειριζόμενων δικτύων.

2.2.3.3 Κλάσεις Υπηρεσίας και PHB

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω μηχανισμούς για διαχωρισμό, απόρριψη, μορφοποίηση και χρονοπρογραμματισμό προώθησης κίνησης σε συνδυασμό με τις υλοποιημένες PHB σε ένα δίκτυο DiffServ μπορούμε να ορίσουμε έναν μεγάλο αριθμό από κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας. Για παράδειγμα μπορούμε να ορίσουμε τις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας:

- 1) *Premium* για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση και διακύμανση καθυστέρησης,
- 2) *Assured* για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη αξιοπιστία από τη κλάση ποιότητας υπηρεσίας Best Effort, και
- 3) *Olympic* που παρέχει τρεις διαφορετικές προτεραιότητες στην προώθηση των πακέτων *Gold*, *Silver* και *Bronze* με μειούμενη ποιότητα υπηρεσίας μεταξύ τους. Η διαφορά αυτής της κλάσης από τις *Premium* και *Assured* είναι η διαφορετική αντιμετώπιση των πακέτων με βάση την προτεραιότητά τους χωρίς να παρέχονται ποσοτικές εγγυήσεις.

Όπως έχει αναφερθεί, οι PHB είναι οι υλοποιημένες διαφορετικές μεταχειρίσεις των πακέτων από το δίκτυο. Πρόκειται, γενικά, για διαφορετικές ουρές εξυπηρέτησης που μεταχειρίζονται με διαφορετικό τρόπο η καθεμιά τα πακέτα που κατευθύνονται σ' αυτές. Από την IETF έχουν ορισθεί οι εξής PHB (ή ομάδες PHB):

- Expedited Forwarding (EF): Μόνο ένα συγκεκριμένο DSCP αντιστοιχεί σε αυτή τη PHB. Η EF ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση και τη διακύμανση καθυστέρησης και παρέχει την ανώτατη ποιότητας υπηρεσίας στις ομαδοποιημένες ροές κίνησης. Η κίνηση μορφοποιείται στην είσοδο της PHB, προκειμένου ο ρυθμός της κυκλοφορίας να είναι σταθερός. Η κυκλοφορία που υπερβαίνει τις παραμέτρους κίνησής της απορρίπτεται. Η EF εγγυάται μηδενική απώλεια πακέτων για ροές κίνησης που συμμορφώνονται στις παραμέτρους κίνησής τους.
- Assured Forwarding (AF): Αποτελείται από τέσσερις διαφορετικές κλάσεις προτεραιότητας (AF1, AF2, AF3, AF4), σε καθεμιά από τις οποίες ορίζονται τρεις διαφορετικές προτεραιότητες (low, medium, high) απόρριψης πακέτων. Οπότε για την κατηγοριοποίηση της κίνησης σε μια κλάση προτεραιότητας της AF και με συγκεκριμένη προτεραιότητα απόρριψης πακέτων χρησιμοποιούνται δώδεκα DSCP. Η κυκλοφορία που υπερβαίνει τις παραμέτρους κίνησής της προωθείται με μικρότερη προτεραιότητα από αυτή που είχε και στη χειρότερη περίπτωση απορρίπτεται.

Αν κάποιες PHB ταξινομούνται ως προς την ποιότητα υπηρεσίας που παρέχουν με βάση ένα χαρακτηριστικό τους, τότε αυτές αποτελούν μια ομάδα από PHB (PHB group). Επίσης, αν ομαδοποιούνται βάσει μιας κοινής προτεραιότητας που παρέχουν στα πακέτα που μεταχειρίζονται αποτελούν μια κλάση PHB (PSC). Για παράδειγμα οι AF1, AF2, AF3, AF4 αποτελούν μια ομάδα PHB, ενώ η AF1 είναι μια κλάση PHB.

Στο μοντέλο υπηρεσιών DiffServ η παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε ομαδοποιημένες ροές κίνησης με βάση την PHB EF απαιτεί την υλοποίηση της EF σε όλους τους δρομολογητές του δικτύου DiffServ από τους οποίους θα περάσει η κίνηση. Όμως στην περίπτωση της AF, είναι δυνατό να την υλοποιήσουμε μόνο σε κάποιους δρομολογητές και οι άλλοι να προωθούν τα πακέτα με αντιμετώπιση Best Effort. Τότε, συνολικά, η ποιότητα υπηρεσίας σε ομαδοποιημένες ροές κίνησης με βάση την PHB AF θα είναι καλύτερη από την ποιότητα υπηρεσίας της κλάσης Best Effort.

Η αρχιτεκτονική DiffServ δεν ορίζει ούτε τους πόρους ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας, αλλά ούτε και τον τρόπο που αυτοί δεσμεύονται. Επίσης, οι δεσμευμένοι πόροι ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας μπορεί να είναι σταθεροί ή δυναμικοί. Έτσι, παρέχεται στον ISP η ευελιξία να δεσμεύει τους πόρους του δικτύου του με τον τρόπο που επιθυμεί και να εφαρμόζει την πολιτική διαχείριση που εξυπηρετεί τα συμφέροντά του.

Σημειώστε ότι η αρχιτεκτονική DiffServ ορίζει μόνο τη χρήση του πεδίου DS των πακέτων και ότι πρέπει να αντιστοιχίζονται σε κάποιες υλοποιημένες PHB. Είναι αποκλειστική αρμοδιότητα του ISP ποιες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας θα προσφέρει στο δίκτυο του. Οι διαφοροποιημένες υπηρεσίες (DiffServ) διαφέρουν σημαντικά από τις ολοκληρωμένες υπηρεσίες (IntServ). Στην αρχιτεκτονική DiffServ προσφέρεται μόνο ένας περιορισμένος αριθμός κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας που προσδιορίζονται από την τιμή του πεδίου DS των πακέτων. Στις IntServ ο πελάτης μπορεί να ζητήσει απεριόριστο αριθμό διαφορετικών μεταχειρίσεων για κάθε ροή κίνησής του. Εφόσον το εσωτερικό του δικτύου DiffServ επιφορτίζεται μόνο με το διαχωρισμό κίνησης BA σε κάθε δρομολογητή και οι υπηρεσίες προσφέρονται σε επίπεδο κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας και όχι σε επίπεδο ροών κίνησης, η αρχιτεκτονική DiffServ υλοποιείται πολύ πιο εύκολα και είναι πολύ πιο επεκτάσιμη από ό,τι η αρχιτεκτονική IntServ. Ωστόσο, οι εγγυήσεις για ποιότητα υπηρεσίας στην αρχιτεκτονική DiffServ προσφέρονται σε επίπεδο ομαδοποιημένων ροών κίνησης ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας και όχι σε καθεμία ροή κίνησης ξεχωριστά, όπως συμβαίνει στην αρχιτεκτονική IntServ. Σημειώστε, τέλος, ότι ενώ η αρχιτεκτονική IntServ είναι προσανατολισμένη για τις εφαρμογές που λαμβάνουν κίνηση, δηλαδή η ποιότητα υπηρεσίας παρέχεται στη λαμβανόμενη κίνηση για λογαριασμό των παραληπτών της, η αρχιτεκτονική DiffServ είναι προσανατολισμένη για τις εφαρμογές που στέλνουν κίνηση, δηλαδή η ποιότητα υπηρεσίας παρέχεται στην αποστελλόμενη κίνηση για λογαριασμό των αποστολέων της κίνησης.

2.2.4 Το πρωτόκολλο MPLS

Το πρωτόκολλο Multi-Protocol Label Switching (MPLS) αποτελεί ένα τρόπο προώθησης πακέτων. Το MPLS δίνει τη δυνατότητα στους δρομολογητές να προωθούν τα πακέτα της κίνησης στο επίπεδο τρία (του μοντέλου επιπέδων OSI) βάσει μιας ετικέτας (label) στην επικεφαλίδα τους. Κάθε πακέτο του πρωτοκόλλου MPLS ενθυλακώνει τα πακέτα επιπέδου δικτύου ή σύνδεσης σε ένα νέο πακέτο MPLS με επικεφαλίδα που αποτελείται από μια ετικέτα 20 bit, ένα πεδίο 3 bit που ονομάζεται Experimental (EXP), μια ένδειξη στοίβας ετικετών 1 bit, και ένα πεδίο 8 bit που ονομάζεται Time To Live (TTL).

Το πρωτόκολλο MPLS μπορεί να λειτουργήσει κάτω από πολλά πρωτόκολλα επιπέδου δικτύου (όπως τα IP, IPX, ATM, PPP, Frame Relay) ή σύνδεσης (όπως τα CSMA-CD, Token Ring). Αυτός είναι και ο λόγος που χαρακτηρίζεται ως Multi-Protocol Label Switching.

Το MPLS απλοποιεί τη διαδικασία δρομολόγησης (μειώνει τον υπολογιστικό φόρτο για την προώθηση των πακέτων), ενώ αυξάνει την ευελιξία στις αποφάσεις δρομολόγησης. Το MPLS είναι ένα πρωτόκολλο που λειτουργεί μόνο στους δρομολογητές. Οι δρομολογητές του MPLS που ονομάζονται Label Switching Routers (LSR) έχουν την ακόλουθη λειτουργικότητα:

- Ο δρομολογητής εισόδου ενός δικτύου MPLS παίρνει μια απόφαση προώθησης κάθε πακέτου που βασίζεται στη διεύθυνση προορισμού (ή άλλες πληροφορίες της επικεφαλίδας του, όπως ορίζεται από τις οδηγίες που έχει λάβει). Έπειτα, αποφασίζει την ετικέτα που προσδιορίζει την κλάση ισοδυναμίας προώθησης (FEC) ή κατεύθυνση του πακέτου στο MPLS δίκτυο. Στη συνέχεια, ενθυλακώνει το πακέτο σε ένα πακέτο MPLS και θέτει στην επικεφαλίδα του πακέτου MPLS την ετικέτα.
- Κάθε ενδιάμεσος δρομολογητής ενός δικτύου MPLS χρησιμοποιεί την ετικέτα ενός πακέτου MPLS σαν δείκτη σε έναν πίνακα ετικετών και από αυτόν βρίσκει τον επόμενο κόμβο στον οποίο θα προωθήσει το πακέτο MPLS με τη νέα του ετικέτα.
- Ο δρομολογητής εξόδου ενός δικτύου MPLS αφαιρεί την επικεφαλίδα MPLS από τα πακέτα MPLS και προωθεί τα πακέτα σύμφωνα με τα πεδία της επικεφαλίδας τους.

Το μονοπάτι που ακολουθεί ένα πακέτο σε ένα δίκτυο MPLS ονομάζεται Label Switched Path (LSP). Κάθε LSP είναι μονοπάτι μιας κατεύθυνσης από τον αποστολέα κίνησης προς τον παραλήπτη. Ένα LSP μπορεί να είναι αποτέλεσμα των αποφάσεων προώθησης των πακέτων σε κάθε δρομολογητή χωριστά ή μπορεί να είναι προκαθορισμένο (Explicit Route LSP – ER-LSP). Η δυνατότητα δημιουργίας προκαθορισμένων μονοπατιών είναι από τα χρησιμότερα χαρακτηριστικά του MPLS, γιατί δίνει στο διαχειριστή του δικτύου ευελιξία δρομολόγησης (για παράδειγμα βάσει κάποιας πολιτικής ή βάσει της ποιότητας υπηρεσίας). Επίσης, ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να επιλέξει μονοπάτια βάσει κάποιων κριτηρίων και να κάνει καλύτερη διαχείριση της κίνησης στο δίκτυό του. Για τη διάδοση των ετικετών στους δρομολογητές και τη δημιουργία ER-LSP χρησιμοποιείται είτε το πρωτόκολλο Label Distribution Protocol (LDP) [28], είτε μια διευρυμένη έκδοση του πρωτοκόλλου RSVP [24]. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάδοση των ετικετών και τα πρωτόκολλα δρομολόγησης του Internet. Επίσης, τα πρωτόκολλα ConstRaint-based LDP (CR-LDP) [29] και το διευρυμένο RSVP μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ER-LSP με δεσμευμένους πόρους που παρέχουν μια ορισμένη ποιότητα υπηρεσίας στα πακέτα που περνούν από αυτά.

Το MPLS μοιάζει με την αρχιτεκτονική DiffServ στο ότι και αυτό σημαδεύει την κίνηση στους δρομολογητές εισόδου του δικτύου και την ξεσημαδεύει στους δρομολογητές εξόδου. Παρόλο που μπορεί σε κάθε δρομολογητή να καθορίζει την ποιότητα υπηρεσίας με βάση το σημάδεμα της κίνησης, η κύρια χρησιμότητα του σημαδέματος για το πρωτόκολλο MPLS είναι η μεταγωγή της κίνησης. Για το λόγο αυτό το πρωτόκολλο MPLS χαρακτηρίζεται πιο πολύ ως ένα πρωτόκολλο διαχείρισης κίνησης και λιγότερο ως ένα πρωτόκολλο για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας.

Η χρησιμοποίηση της αρχιτεκτονικής DiffServ για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας και του πρωτοκόλλου MPLS για την διαχείριση της κίνησης σε ένα δίκτυο IP προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα:

- 1) Καθορίζοντας LSP βάσει κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας και δρομολογώντας την ομαδοποιημένη κίνηση μιας κλάσης ποιότητας υπηρεσίας DiffServ μέσα από αυτά ελέγχουμε την ροή της κυκλοφορίας της κλάσης ποιότητας υπηρεσίας στο δίκτυο, τη διαφοροποιούμε από την υπόλοιπη κυκλοφορία και παρέχουμε εγγυήσεις για την ποιότητα υπηρεσίας κατά μήκος των LSP.
- 2) Μπορούμε να διαχειριστούμε την κίνηση κάθε κλάσης ποιότητας υπηρεσίας κατάλληλα, ώστε να χρησιμοποιούμε αποδοτικά τους πόρους του δικτύου.
- 3) Παρέχεται η δυνατότητα για δημιουργία βοηθητικών LSP στα οποία εισάγεται η κίνηση κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας με υψηλές εγγυήσεις για ποιότητα υπηρεσίας, σε περίπτωση καταστροφής των αρχικών LSP στα οποία δρομολογείται.
- 4) Η συνολική αρχιτεκτονική είναι πολύ επεκτάσιμη, αφού ο επιπλέον φόρτος που εισάγεται στο δίκτυο είναι μικρός. Επίσης, παρέχει διαλειτουργικότητα με δίκτυα που υποστηρίζουν μόνο την αρχιτεκτονική DiffServ.

Για τους παραπάνω λόγους έχει ορισθεί ο τρόπος με τον οποίο το πρωτόκολλο MPLS υποστηρίζει την αρχιτεκτονική DiffServ 0. Θα εξηγήσουμε αναλυτικά πώς αυτό είναι δυνατό, αφού η αρχιτεκτονική που προτείνουμε στην παρούσα εργασία υλοποιείται σε πραγματικό περιβάλλον δικτύου με βάση το [9]. Συγκεκριμένα, το [9] ορίζει τον τρόπο με τον οποίο το DSCP (η τιμή του πεδίου DS) ενός πακέτου είναι αναγνωρίσιμο σε ένα δρομολογητή του MPLS δικτύου, προκειμένου να το αντιμετωπίσει με την κατάλληλη PHB. Για το σκοπό αυτό έχουν ορισθεί δύο λύσεις. Η πρώτη λύση ονομάζεται EXP-Inferred-PSC LSP (E-LSP). Σύμφωνα με αυτή, η πληροφορία που σχετίζεται με το DSCP περικλείεται στο πεδίο EXP της επικεφαλίδας του πακέτου MPLS. Έτσι, ένα E-LSP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη το πολύ οκτώ διαφορετικών ενοποιημένων ροών της ίδιας ισοδύναμης κλάσης

προώθησης (Forwarding Equivalence Class – FEC). Η τιμή του πεδίου EXP αντιστοιχεί σε μια PHB του δρομολογητή, δηλαδή καθορίζει τόσο την PSC, όσο και την προτεραιότητα απόρριψης του πακέτου. Η ακριβής αντιστοιχία μεταξύ EXP και PHB είναι είτε στατικά προκαθορισμένη, είτε καθορίζεται με τη σηματοδότηση για την κατασκευή του E-LSP. Η δεύτερη λύση ονομάζεται Label-Only-Inferred-PSC LSP (L-LSP). Σύμφωνα με αυτή η PHB Scheduling Class (PSC) για ένα πακέτο σε ένα δρομολογητή του δικτύου MPLS καθορίζεται ταυτόχρονα με τη διάδοση των ετικετών για ένα LSP. Έτσι, μετά τη δημιουργία του L-LSP η PSC συμπεραίνεται από την ετικέτα της επικεφαλίδας ενός πακέτου MPLS σε κάθε δρομολογητή. Η προτεραιότητα απόρριψης ενός πακέτου καθορίζεται από το πεδίο EXP της επικεφαλίδας του MPLS πακέτου. Το ζεύγος τιμών ετικέτας και πεδίου EXP καθορίζουν μοναδικά τη PHB που θα έχει ένα πακέτο σε ένα δρομολογητή.

Σε ένα δίκτυο MPLS που υποστηρίζει DiffServ μπορούν να χρησιμοποιηθούν κανένα ή οσαδήποτε E-LSP και κανένα ή οσαδήποτε L-LSP. Είναι αρμοδιότητα του διαχειριστή του δικτύου να διαλέξει το συνδυασμό των LSP που θα κατασκευάσει στο δίκτυο και το πώς θα μοιράσει την κίνηση των ομαδοποιημένων ροών κίνησης σε αυτά, προκειμένου να εξυπηρετήσει καλύτερα τα συμφέροντα του δικτύου του, όσον αφορά την υποστήριξη υπηρεσιών DiffServ, τη διαχείριση κυκλοφορίας και τη γρήγορη αποκατάσταση βλάβης.

2.2.5 Ο Μεσίτης Εύρους Ζώνης (Bandwidth Broker)

Η ιδέα του Bandwidth Broker (BB) πρωτοδιατυπώθηκε από τους K. Nichols et al. στο [26] σαν τη λογική οντότητα που είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση των πόρων σε ένα διαχειριζόμενο δίκτυο DiffServ. Ο BB είναι το σημείο ελέγχου για τη διαχείριση των πόρων σε ένα διαχειριζόμενο δίκτυο και έχει διπλό ρόλο:

- Ο BB είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση των πόρων στο εσωτερικό του διαχειριζόμενου δικτύου. Όλες οι αποφάσεις για την ικανοποίηση ή όχι των αιτήσεων δέσμευσης πόρων στο εσωτερικό του διαχειριζόμενου δικτύου του παίρνονται από αυτόν, σύμφωνα με την πολιτική που ακολουθείται αλλά και τις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο τη στιγμή κάθε αιτήσεως δέσμευσης πόρων.
- Επίσης, ο BB είναι υπεύθυνος για τη δέσμευση των πόρων μεταξύ διαχειριζόμενων δικτύων. Κάθε BB διατηρεί SLA με τους BB των γειτονικών του διαχειριζόμενων δικτύων για τη δέσμευση πόρων, σε επίπεδο ομαδοποιημένων ροών κίνησης ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας, στα δίκτυα αυτά. Αυτοί οι πόροι είναι απαραίτητοι για τις ροές κίνησης ενός διαχειριζόμενου δικτύου που διασχίζουν κάποιο από τα γειτονικά διαχειριζόμενα δίκτυα.

Αν οι συμφωνίες για δέσμευση πόρων μεταξύ διαχειριζόμενων δικτύων γίνονταν σε επίπεδο ροών κίνησης, τότε το ποσό της πληροφορίας που θα έπρεπε να αποθηκεύουν οι ακραίοι δρομολογητές και οι BB των δικτύων θα αύξανε γραμμικά με τον αριθμό των ροών κίνησης. Επιπροσθέτως, οι συμφωνίες αυτές θα έπρεπε να αλλάζουν συχνότατα ανάλογα με την δημιουργία νέων ροών κίνησης που διασχίζουν τα δίκτυα και τον τερματισμό παλαιών. Κάτι τέτοιο θα έβλαπτε πολύ την επεκτασιμότητα και τη χρησιμότητα του μοντέλου χρήσης του BB.

Στα καθήκοντα των BB συμπεριλαμβάνονται τόσο η υλοποίηση των SLA που παρέχουν στους πελάτες ή άλλα διαχειριζόμενα δίκτυα, όσο και η τήρηση των όρων που προβλέπουν τα SLA. Για το σκοπό αυτό πρέπει οι BB να δίνουν τις κατάλληλες εντολές στους δρομολογητές του δικτύου για το διαχωρισμό, τη μορφοποίηση ή απόρριψη, και το μαρκάρισμα των πακέτων των διαφόρων ροών κίνησης για τις οποίες υπάρχουν SLA. Επίσης, ο BB είναι υπεύθυνος για τον ορισμό των κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας που προσφέρονται από ένα

διαχειριζόμενο δίκτυο.

Ο BB μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερα λειτουργικά τμήματα που συνθέτουν τη λειτουργικότητά του. Εφόσον, ο BB είναι υπεύθυνος για τις συμφωνίες δέσμευσης πόρων και αυτές είναι πολλές φορές άμεσα συνδεδεμένες με οικονομικές συμφωνίες, πρέπει να πιστοποιεί την εγκυρότητα των μηνυμάτων τα οποία λαμβάνει. Για το σκοπό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πρωτόκολλο IPsec 0. Ένα άλλο θέμα είναι η εύρεση με ασφάλεια των γειτονικών BB, αλλά και των δρομολογητών του δικτύου τους στους οποίους αποστέλλουν εντολές. Αυτό μπορεί να γίνεται με στατικό καθορισμό, ενώ η εύρεσή τους με δυναμικό τρόπο είναι κάτι που ερευνάται. Τέλος, ο BB μπορεί να αποτελέσει μοναδικό σημείο αποτυχίας λειτουργίας του συστήματος δέσμευσης πόρων και είναι καλό η λειτουργικότητά του να υποστηρίζεται από δευτερεύοντες BB, οι οποίοι αναλαμβάνουν τα καθήκοντα του αρχικού BB σε περίπτωση που διακοπεί η λειτουργία του για κάποιο λόγο. Όταν υπάρχουν πολλοί BB σε ένα διαχειριζόμενο δίκτυο, αυξάνεται η αξιοπιστία του συστήματος, αλλά γίνεται δυσκολότερο να κρατηθεί συνεπής η πληροφορία που διατηρούν.

2.2.6 RSVP over DiffServ/MPLS

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται ολοκληρωμένες λύσεις για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας από-άκρη-σε-άκρη σε ανεξάρτητες ροές κίνησης. Θα τις μελετήσουμε λεπτομερώς, προκειμένου να είναι φανερές στον αναγνώστη οι ομοιότητες και οι διαφορές μεταξύ αυτών των λύσεων και της αρχιτεκτονικής που προτείνουμε στην παρούσα εργασία.

2.2.6.1 Ορισμός Προβλήματος

Οι εγγυήσεις για ποιότητα υπηρεσίας στην αρχιτεκτονική DiffServ (αλλά και στο πρωτόκολλο MPLS) προσφέρονται σε επίπεδο ομαδοποιημένων ροών κίνησης ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας και όχι σε καθεμία ροή κίνησης ιδιαίτερα, όπως συμβαίνει στην αρχιτεκτονική IntServ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να παρέχονται οι εγγυήσεις σε επίπεδο ομαδοποιημένων ροών κίνησης σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας και να μην παρέχονται οι εγγυήσεις αυτές για τις ροές κίνησης ξεχωριστά. Για να γίνει αντιληπτό το γιατί συμβαίνει αυτό αναφέρουμε το εξής παράδειγμα. Θεωρούμε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας με εγγυήσεις για χαμηλή καθυστέρηση και χαμηλή διακύμανση καθυστέρησης χωρητικότητας 640 Kbps. Έστω ότι δέκα τηλεφωνικές συνδέσεις των 64 Kbps η καθεμία εξυπηρετούνται από αυτή την κλάση ποιότητας υπηρεσίας που περιγράψαμε. Τότε όλες οι ροές κίνησης εξυπηρετούνται κανονικά, αφού καθεμία παίρνει το εύρος ζώνης που χρειάζεται. Αν μια ενδέκατη τηλεφωνική σύνδεση θελήσει να εξυπηρετηθεί από την ίδια κλάση ποιότητας υπηρεσίας, τότε καμία από τις τηλεφωνικές συνδέσεις δεν παίρνει το εύρος ζώνης που χρειάζεται παρόλο που σε επίπεδο ομαδοποιημένων ροών τα χαρακτηριστικά της κλάσης ποιότητας υπηρεσίας δεν έχουν αλλάξει. Προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα αυτό έχουν προταθεί δύο διαφορετικές προσεγγίσεις που περιλαμβάνουν διαλειτουργικότητα μεταξύ των αρχιτεκτονικών DiffServ και IntServ και μια προσέγγιση που περιλαμβάνει διαλειτουργικότητα μεταξύ των πρωτοκόλλων RSVP και MPLS. Οι προσεγγίσεις αυτές περιγράφονται παρακάτω.

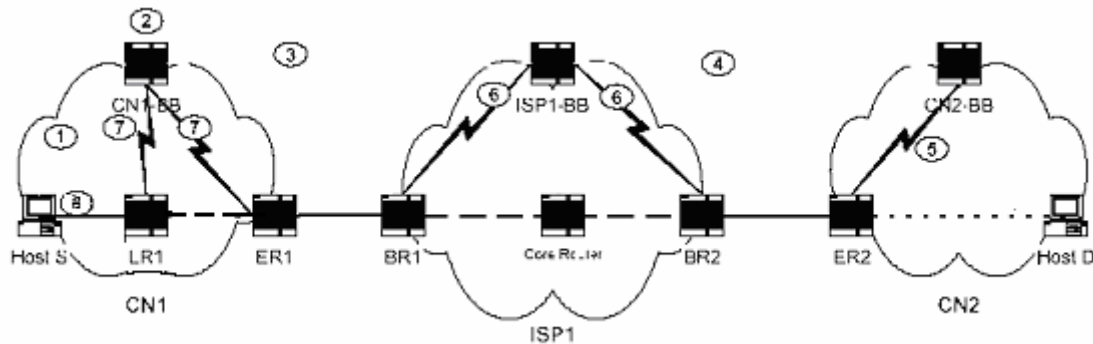
2.2.6.2 Πρώτη Προσέγγιση (IntServ over DiffServ)

Η πρώτη προσέγγιση [6] αναφέρεται στη χρήση της αρχιτεκτονικής IntServ στα περιβάλλοντα διαχειριζομένων δικτύων του αποστολέα και του παραλήπτη κίνησης και της αρχιτεκτονικής DiffServ στα ενδιάμεσα διαχειριζόμενα περιβάλλοντα. Σύμφωνα με αυτή για

τη δέσμευση των πόρων στα περιβάλλοντα διαχειριζομένων δικτύων του αποστολέα και του παραλήπτη κίνησης χρησιμοποιείται η σηματοδότηση του πρωτοκόλλου RSVP. Στα ενδιάμεσα περιβάλλοντα δικτύων οι πόροι δεσμεύονται μόνο στο δρομολογητή εισόδου της κίνησης σε καθένα από αυτά, ενώ η σηματοδότηση του RSVP περνά διαφανώς από τους υπόλοιπους δρομολογητές. Στους δρομολογητές εισόδου των ενδιάμεσων δικτύων DiffServ η κίνηση των συμβολαίων IntServ μαρκάρεται, ώστε να εξυπηρετείται από την κατάλληλη κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Οι πόροι δεσμεύονται μόνο στο δρομολογητή εισόδου κάθε ενδιάμεσου περιβάλλοντος διαχειριζομένου δικτύου, προκειμένου να διασφαλίζεται ότι η διαθέσιμη χωρητικότητα της κλάσης ποιότητας υπηρεσίας για την οποία μαρκάρεται η κίνηση επαρκεί ώστε να εξυπηρετηθεί η κίνηση από τη κλάση αυτή. Έτσι, η συνολική λειτουργία της αρχιτεκτονικής μοιάζει με το μοντέλο του RSVP με τη διαφορά ότι κάθε ενδιάμεσο περιβάλλον δικτύου DiffServ, μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη της κίνησης, αντιμετωπίζεται σαν ένας κόμβος στη σηματοδότηση του RSVP. Αυτή η λύση είναι σαφώς πιο επεκτάσιμη από την αρχιτεκτονική IntServ, ενώ παρέχει εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας σε επίπεδο ροών κίνησης. Ωστόσο, υπάρχουν θέματα ανοικτά προς έρευνα όσον αφορά στην αντιστοιχία των κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας IntServ στις DiffServ, αλλά και στη διατήρηση των εγγυήσεων υπηρεσίας στο εσωτερικό των δικτύων DiffServ. Επίσης, επειδή η αρχιτεκτονική αυτή βασίζεται σε ένα μεγάλο βαθμό στη δέσμευση πόρων με βάση το πρωτόκολλο RSVP, χαρακτηρίζεται από τα προβλήματα του πρωτοκόλλου αυτού.

2.2.6.3 Δεύτερη Προσέγγιση (RSVP over DiffServ με χρήση BB)

Στη δεύτερη προσέγγιση {[5], 0, [37]} περιγράφονται αρχιτεκτονικές στις οποίες χρησιμοποιώντας τη σηματοδότηση του πρωτοκόλλου RSVP και έναν Bandwidth Broker (BB) ανά διαχειριζόμενο δικτυακό περιβάλλον DiffServ μπορούμε να παρέχουμε δυναμικά SLA σε ροές κίνησης, αλλά και μεταξύ διαχειριζομένων δικτύων DiffServ. Ορίζονται τόσο η παροχή SLA για μια ροή κίνησης που περνά από πολλά διαφορετικά διαχειριζόμενα περιβάλλοντα, όσο και η παροχή SLA για μια ροή κίνησης στο εσωτερικό ενός διαχειριζόμενου περιβάλλοντος.



Σχήμα 2: Η χρήση RSVP και Bandwidth Broker για παροχή δυναμικών SLA από-άκρη-σε-άκρη πάνω από δίκτυα DiffServ.

Η παροχή SLA για μια ροή κίνησης που περνά από πολλά διαφορετικά διαχειριζόμενα περιβάλλοντα [26] στο παράδειγμα που φαίνεται στο Σχήμα 2 και συνοψίζεται στα εξής:

- 1) Η εφαρμογή αποστολέα S στέλνει ένα μήνυμα RSVP PATH στον τοπικό BB του διαχειριζόμενου δικτύου CN1.
- 2) Ο BB του δικτύου CN1 λαμβάνει μια απόφαση αποδοχής κλήσης. Αν η απόφασή του είναι αρνητική, τότε ένα μήνυμα λάθους επιστρέφεται στην εφαρμογή αποστολέα S και η διαδικασία σηματοδότησης τερματίζεται.
- 3) Σε περίπτωση, όμως, που η απόφαση αποδοχής κλήσης από τον BB του δικτύου CN1 είναι θετική, ο BB στέλνει το μήνυμα RSVP PATH που είχε λάβει στον BB του δικτύου ISP1.

- 4) Ο BB του δικτύου ISP1 λαμβάνει μια απόφαση αποδοχής κλήσης. Αν η απόφασή του είναι αρνητική, τότε ένα μήνυμα λάθους επιστρέφεται στον BB του δικτύου CN1. Στη συνέχεια, ο BB του δικτύου CN1 ενημερώνει την εφαρμογή αποστολέα S και η διαδικασία σηματοδοσίας τερματίζεται. Αν η αίτηση δέσμευσης πόρων γίνεται δεκτή, τότε ο BB του δικτύου ISP1 στέλνει το μήνυμα RSVP PATH στον BB του δικτύου CN2.
- 5) Ο BB του δικτύου CN2 λαμβάνει μια απόφαση αποδοχής κλήσης. Αν η απόφασή του είναι αρνητική, τότε ένα μήνυμα λάθους επιστρέφεται στον BB του δικτύου ISP1, ο οποίος ενημερώνει τον BB του CN1 και τελικά ενημερώνεται η εφαρμογή αποστολέα S και τερματίζεται η διαδικασία σηματοδοσίας. Αν η απόφαση του BB του δικτύου CN2 είναι θετική, τότε ο BB θα χρησιμοποιήσει κάποιο από τα πρωτόκολλα LDAP ή RSVP, προκειμένου να θέσει τους κανόνες διαχωρισμού και ελέγχου κίνησης για τη νέα ροή κίνησης στο δρομολογητή ER2. Στη συνέχεια, ο BB του δικτύου CN2 θα στείλει ένα μήνυμα RSVP RESV στον BB του δικτύου ISP1.
- 6) Όταν ο BB του δικτύου ISP1 λάβει το μήνυμα RSVP RESV, χρησιμοποιώντας ένα από τα πρωτόκολλα LDAP και RSVP, θα θέσει τους κανόνες διαχωρισμού και ελέγχου κίνησης για τη νέα ροή κίνησης στο δρομολογητή BR1 και τους κανόνες ελέγχου και μορφοποίησης κίνησης για τη νέα ροή κίνησης στο δρομολογητή BR2. Στη συνέχεια, ο BB του δικτύου ISP1 θα στείλει ένα μήνυμα RSVP RESV στον BB του δικτύου CN1.
- 7) Όταν ο BB του δικτύου CN1 λάβει το μήνυμα RSVP RESV, χρησιμοποιώντας ένα από τα πρωτόκολλα LDAP και RSVP, θα θέσει τους κανόνες διαχωρισμού και μορφοποίησης κίνησης για τη νέα ροή κίνησης στο δρομολογητή LR1, ούτως ώστε να μορφοποιήσει την κίνηση της νέας ροής αν υπερβαίνει τις παραμέτρους κίνησης του SLA της. Επίσης, θα θέσει τους κανόνες ελέγχου και επαναμορφοποίησης κίνησης για τη νέα ροή κίνησης στο δρομολογητή ER1. Στη συνέχεια, ο BB του δικτύου CN1 στέλνει το μήνυμα RSVP RESV στην εφαρμογή του αποστολέα S.
- 8) Όταν η εφαρμογή του αποστολέα λαμβάνει το μήνυμα RSVP RESV αρχίζει την αποστολή της κίνησης.

Σε περίπτωση που υπήρχαν πολλαπλά διαχειριζόμενα δίκτυα μεταξύ των CN1 και CN2, τότε τα βήματα 4 και 6 επαναλαμβάνονται για καθένα από τα παρεμβαλλόμενα διαχειριζόμενα δίκτυα.

Σημειώστε ότι η διαδικασία σηματοδοσίας που περιγράφηκε διαφέρει σημαντικά από τη διαδικασία σηματοδοσίας της αρχιτεκτονικής IntServ, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο RSVP. Εδώ, αντίθετα με ότι ισχύει για την αρχιτεκτονική IntServ/RSVP, ο αποστολέας κίνησης είναι αυτός που κάνει αίτηση δέσμευσης πόρων και όχι ο παραλήπτης. Επίσης, μια αίτηση δέσμευσης πόρων μπορεί να απορριφθεί όταν ένας BB λαμβάνει ένα μήνυμα RSVP PATH. Στην αρχιτεκτονική IntServ/RSVP μια αίτηση δέσμευσης πόρων μπορεί να απορριφθεί από ένα δρομολογητή μόνο μετά τη λήψη ενός μηνύματος RSVP RESV. Άλλη μια διαφορά είναι ότι ένας BB μπορεί να ενοποιήσει πολλές αιτήσεις δέσμευσης πόρων και να κάνει μια αίτηση για τη δέσμευση των συνολικών πόρων από τον επόμενο BB. Τέλος, κάθε διαχειριζόμενο δίκτυο στη διαδικασία σηματοδοσίας που περιγράφηκε αντιμετωπίζεται σαν ένας κόμβος του RSVP, αφού αντιπροσωπεύεται σε αυτή τη διαδικασία σηματοδοσίας μόνο από τον BB του και δε συμμετέχει σε αυτή κανένας δρομολογητής του.

Ένα πρόβλημα της αρχιτεκτονικής που περιγράφηκε είναι ότι ένας BB ενός διαχειριζόμενου δικτύου πρέπει να εντοπίζει τους δρομολογητές εισόδου και εξόδου της νέας ροής κίνησης στο δίκτυο του. Κάτι τέτοιο δεν είναι εύκολο, και προϋποθέτει συμφωνίες μεταξύ διαχειριζόμενων δικτύων για τη δρομολόγηση της κίνησης μεταξύ τους, αλλά και τη χρήση κατάλληλων πρωτοκόλλων για τον ορισμό των μονοπατιών. Επίσης, χρησιμοποιώντας την

αρχιτεκτονική αυτή ο παραλήπτης της κίνησης, ο οποίος ενδέχεται να πληρώσει για αυτή, δε συμμετέχει στη διαδικασία σηματοδότησης για την κίνηση που θα λάβει.

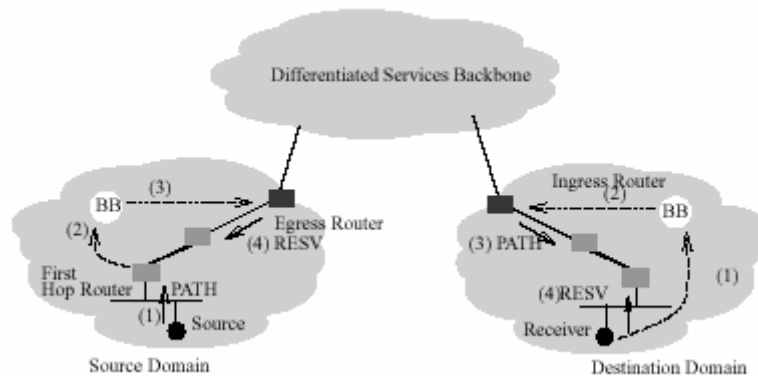
Μια παραλλαγή της παραπάνω αρχιτεκτονικής {[5], [26]} είναι να γίνονται αιτήσεις δέσμευσης και απελευθέρωσης πόρων μεταξύ των BB των διαχειριζόμενων δικτύων ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας ανάλογα με τη ζήτηση. Για τις αιτήσεις αυτές μπορεί να χρησιμοποιείται το RSVP ή κάποιο άλλο πρωτόκολλο σηματοδότησης. Έτσι εξασφαλίζεται ότι η κίνηση νέων ροών κίνησης που εισέρχεται σε ένα διαχειριζόμενο δίκτυο και προέρχεται από δίκτυα με τα οποία έχει συνάψει SLA, μπορεί να εξυπηρετηθεί κατάλληλα. Στο εσωτερικό των διαχειριζόμενων δικτύων οι πόροι δεσμεύονται με μια διαφορετική διαδικασία σηματοδότησης από αυτή που περιγράφηκε στην παραπάνω αρχιτεκτονική. Αυτή η διαδικασία σηματοδότησης συνοψίζεται στο παρακάτω παράδειγμα (βλέπε Σχήμα 3):

- 1) Η εφαρμογή αποστολής κίνησης που βρίσκεται στο διαχειριζόμενο δίκτυο πηγής ξεκινά την αποστολή μηνυμάτων RSVP PATH προς την εφαρμογή του παραλήπτη κίνησης. Τα μηνύματα RSVP PATH περιέχουν την αίτηση δέσμευσης πόρων του αποστολέα της κίνησης.
- 2) Τα μηνύματα RSVP PATH γίνονται αντιληπτά από το δρομολογητή εισόδου της κίνησης στο διαχειριζόμενο δίκτυο πηγής και προωθούνται στον BB που είναι υπεύθυνος για το δίκτυο αυτό. Ο BB εξετάζει αν ο αποστολέας της κίνησης επιτρέπεται να στείλει την κίνηση, σύμφωνα με την πολιτική διαχείρισης που ακολουθείται για το δίκτυο αυτό, και αν υπάρχουν οι απαραίτητοι δεσμευμένοι πόροι προς το διαχειριζόμενο δίκτυο που πρόκειται να κατευθυνθεί η κίνηση της νέας ροής. Αν ο αποστολέας κίνησης δεν επιτρέπεται να στείλει την κίνηση, στέλνεται σε αυτόν ένα μήνυμα λάθους. Αν δεν υπάρχουν οι απαραίτητοι δεσμευμένοι πόροι στο διαχειριζόμενο δίκτυο στο οποίο πρόκειται να κατευθυνθεί η κίνηση, τότε μπορεί να λάβει χώρα μια διαδικασία διαπραγμάτευσης για το νέο SLA μεταξύ των διαχειριζόμενων δικτύων.
- 3) Αν τελικά η αίτηση δέσμευσης πόρων δεν απορρίπτεται για κάποιο λόγο, ο BB ενημερώνει τον δρομολογητή εισόδου να προωθήσει το μήνυμα RSVP PATH και το δρομολογητή εξόδου της κίνησης από το δίκτυο προς τον προορισμό της να στείλει μηνύματα RSVP RESV προς την εφαρμογή αποστολής κίνησης
- 4) Ο δρομολογητής εξόδου από το δίκτυο της πηγής κυκλοφορίας στέλνει μηνύματα RSVP RESV προς την εφαρμογή αποστολής κίνησης. Αν το δίκτυο δεν έχει τους απαραίτητους πόρους για να γίνει η δέσμευση πόρων για τη νέα ροή κίνησης, ένα μήνυμα λάθους στέλνεται στο δρομολογητή εξόδου, ο οποίος στη συνέχεια ενημερώνει την εφαρμογή αποστολής κίνησης. Διαφορετικά, το μήνυμα RSVP RESV το οποίο περιέχει και ένα αντικείμενο DCLASS με τον κατάλληλο DSCP φτάνει στην εφαρμογή αποστολής κίνησης. Τα πακέτα της νέας ροής σηματοδοτούνται από το δρομολογητή εισόδου στο δίκτυο.

Αφού τα μηνύματα RSVP PATH δε φτάνουν στην εφαρμογή του παραλήπτη της κίνησης πρέπει να υπάρχει ένας μηχανισμός για να μαθαίνει τις παραμέτρους κίνησης της κυκλοφορίας που πρόκειται να στείλει ο αποστολέας. Αυτή η πληροφορία μπορεί να είναι διαθέσιμη σε επίπεδο εφαρμογών. Οπότε:

- a) Η εφαρμογή του παραλήπτη κίνησης, ξέροντας την πληροφορία αυτή, στέλνει μια αίτηση λήψης κίνησης στον BB του διαχειριζόμενου δικτύου στο οποίο ανήκει. Ο BB εξετάζει αν ο παραλήπτης κίνησης έχει δικαίωμα να λάβει την κίνηση και έπειτα αν έχει δεσμευμένους, μέσω SLA, τους απαραίτητους πόρους στο δίκτυο από το οποίο πρόκειται να έρθει η κίνηση στο δίκτυο για το οποίο είναι υπεύθυνος. Αν κάποιο από αυτά δεν ισχύει, ενημερώνει την εφαρμογή του παραλήπτη κίνησης για την αποτυχία της αίτησης λήψης κίνησης.
- b) Διαφορετικά, ο BB δίνει εντολή στον δρομολογητή εισόδου από τον οποίο θα εισαχθεί η κίνηση στο δίκτυο να στείλει μηνύματα RSVP PATH προς την εφαρμογή του παραλήπτη κίνησης.

- c) Ο δρομολογητής εισόδου από τον οποίο θα εισαχθεί η κίνηση στο δίκτυο στέλνει μηνύματα RSVP PATH προς την εφαρμογή του παραλήπτη κίνησης.
- d) Όταν η εφαρμογή του παραλήπτη κίνησης λάβει τα μηνύματα RSVP PATH, στέλνει μηνύματα RSVP RESV προς τον δρομολογητή εισόδου από τον οποίο θα εισαχθεί η κίνηση στο δίκτυο. Αν δεν υπάρχουν οι διαθέσιμοι πόροι στο δίκτυο, τότε επιστρέφεται μήνυμα λάθους στην εφαρμογή του παραλήπτη κίνησης. Διαφορετικά, οι πόροι για τη λήψη της κίνησης στο δίκτυο προορισμού δεσμεύονται.



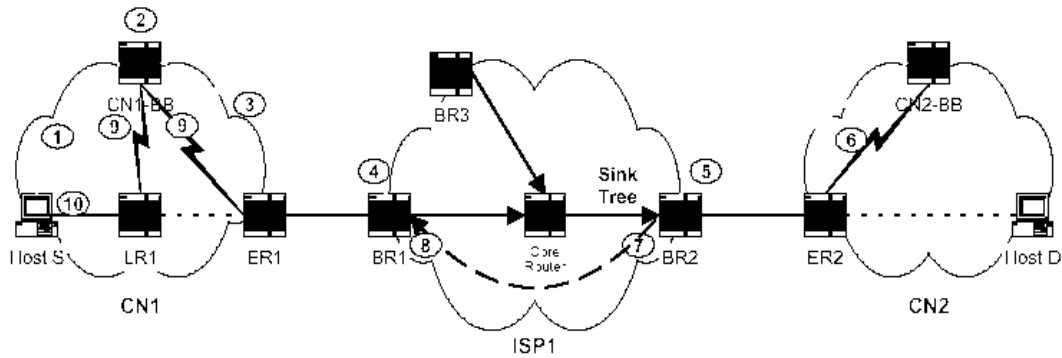
Σχήμα 3: Το μοντέλο διαχείρισης πόρων Two-Tier.

Ένα πρόβλημα της παραπάνω αρχιτεκτονικής είναι τα πολλά μηνύματα σηματοδότησης που ανταλλάσσονται, προκειμένου να δεσμευθούν οι πόροι στα δίκτυα πηγής και προορισμού της κίνησης. Επίσης, ο BB του δικτύου προορισμού είναι πολύ δύσκολο να γνωρίζει από ποιον ακραίο δρομολογητή θα εισαχθεί η κίνηση στο δίκτυό του. Το μοντέλο επικοινωνίας μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη κίνησης έχει κενά, αφού μπορεί οι απαραίτητοι πόροι να δεσμευθούν στο δίκτυο πηγής και να μη δεσμευθούν στο δίκτυο προορισμού και το αντίστροφο.

2.2.6.4 Τρίτη Προσέγγιση (RSVP over MPLS)

Η προσέγγιση που περιλαμβάνει διαλειτουργικότητα μεταξύ των πρωτοκόλλων RSVP και MPLS μοιάζει πολύ με τη δεύτερη προσέγγιση, όπως αυτή περιγράφηκε στο Σχήμα 2. Υπάρχουν οι εξής διαφορές:

- Οι δρομολογητές εισόδου εκτός από τις λειτουργίες που έκαναν στην περίπτωση του DiffServ δικτύου (διαχωρισμός κίνησης ανά ροή, μορφοποίηση, απόρριψη και μαρκάρισμα κίνησης), προσθέτουν την επικεφαλίδα του πρωτοκόλλου MPLS.
- Οι δρομολογητές στο εσωτερικό του δικτύου μεταχειρίζονται κάθε πακέτο βάσει της ετικέτας του και του πεδίου COS και όχι βάσει του πεδίου DS.
- Στους δρομολογητές εξόδου από ένα διαχειριζόμενο δίκτυο MPLS η επικεφαλίδα του MPLS αφαιρείται, εκτός εάν υπάρχουν LSP μεταξύ διαχειριζομένων δικτύων.



Σχήμα 4: Η χρήση RSVP και Bandwidth Broker για παροχή δυναμικών SLA από άκρη-σε-άκρη πάνω από δίκτυα MPLS.

Η λειτουργικότητα της προσέγγισης αυτής συνοψίζεται στο παράδειγμα που φαίνεται στο Σχήμα 4 που περιγράφεται παρακάτω:

- 1) Η εφαρμογή αποστολής κίνησης S στέλνει ένα μήνυμα RSVP PATH με την αίτηση δέσμευσης πόρων στον BB του τοπικού διαχειριζόμενου δικτύου CN1.
- 2) Ο BB λαμβάνει μια απόφαση ελέγχου αποδοχής κλήσης. Αν η απόφασή του είναι αρνητική ένα μήνυμα λάθους επιστρέφεται στην εφαρμογή αποστολής κίνησης S και η διαδικασία σηματοδοσίας τερματίζεται.
- 3) Αν η απόφαση του BB είναι θετική, τότε αυτός στέλνει το μήνυμα RSVP PATH στο δρομολογητή BR1.
- 4) Ο δρομολογητής BR1 εξετάζει αν υπάρχουν διαθέσιμοι οι απαραίτητοι πόροι στο LSP από το οποίο πρόκειται να περάσει η κίνηση για τον προορισμό της για την ικανοποίηση της αίτησης δέσμευσης πόρων. Αν υπάρχουν διαθέσιμοι οι απαραίτητοι πόροι, τότε η αίτηση δέσμευσης πόρων ικανοποιείται και το μήνυμα RSVP PATH προωθείται, μέσω του LSP, στο δρομολογητή BR2. Αν δεν υπάρχουν οι διαθέσιμοι πόροι ένα μήνυμα λάθους στέλνεται με την αντίστροφη πορεία στην εφαρμογή αποστολής κίνησης.
- 5) Ο δρομολογητής BR2 στέλνει το μήνυμα RSVP PATH που έλαβε στο BB του διαχειριζόμενου δικτύου CN2.
- 6) Ο BB του διαχειριζόμενου δικτύου CN2, εξετάζοντας αν το δίκτυό του έχει σε κάποιο LSP προς την εφαρμογή προορισμού της κίνησης διαθέσιμους τους απαραίτητους πόρους, λαμβάνει μια απόφαση ελέγχου αποδοχής κλήσης. Αν οι πόροι δεν είναι διαθέσιμοι, τότε η αίτηση δέσμευσης πόρων απορρίπτεται, ένα μήνυμα λάθους ακολουθεί την αντίστροφη πορεία προς την εφαρμογή αποστολής κίνησης, και η διαδικασία σηματοδοσίας τερματίζεται. Όμως, αν οι πόροι είναι διαθέσιμοι, τότε ο BB θέτει τους κανόνες διαχωρισμού και ελέγχου της κίνησης στο δρομολογητή ER2, χρησιμοποιώντας ένα από τα πρωτόκολλα LDAP και RSVP. Στη συνέχεια, ο BB στέλνει ένα μήνυμα RSVP RESV στο δρομολογητή BR2.
- 7) Ο δρομολογητής BR2, λαμβάνοντας το μήνυμα RSVP RESV, καθορίζει τους κανόνες για την αναμορφοποίηση της κίνησης. Στη συνέχεια, προωθεί το μήνυμα RSVP RESV προς το δρομολογητή BR1, μέσω του LSP που τους συνδέει.
- 8) Ο δρομολογητής BR1, λαμβάνοντας το μήνυμα RSVP RESV, καθορίζει τους κανόνες διαχωρισμού και ελέγχου της κίνησης και προωθεί το μήνυμα RSVP RESV στο BB του διαχειριζόμενου δικτύου CN1.
- 9) Όταν ο BB του διαχειριζόμενου δικτύου CN1 λάβει το μήνυμα RSVP RESV, θέτει τους κανόνες διαχωρισμού και μορφοποίησης κίνησης στο δρομολογητή LR1, ούτως ώστε η κυκλοφορία που εισάγεται στο δίκτυο από τη νέα ροή κίνησης να είναι συμμορφώνεται με τις παραμέτρους κίνησης του SLA της. Επίσης, ο BB θέτει τους κανόνες αναμορφοποίησης της κίνησης στο δρομολογητή ER1. Στη συνέχεια, ο BB προωθεί το μήνυμα RSVP RESV στην

εφαρμογή αποστολής κίνησης.

- 10) Η εφαρμογή αποστολής κίνησης, λαμβάνοντας το μήνυμα RSVP RESV, αποστέλλει την κίνησή της.

Σε περίπτωση που υπήρχαν πολλαπλά διαχειριζόμενα δίκτυα μεταξύ των CN1 και CN2, τότε τα βήματα 4-5 και 7-8 επαναλαμβάνονται για καθένα από τα παρεμβαλλόμενα διαχειριζόμενα δίκτυα.

Στην τελευταία αρχιτεκτονική που περιγράφηκε η αίτηση δέσμευσης πόρων γίνεται από τον αποστολέα και όχι από τον παραλήπτη, όπως στην αρχιτεκτονική IntServ. Επίσης, η αίτηση δέσμευσης πόρων μπορεί να απορριφθεί με τη λήψη ενός μηνύματος RSVP PATH. Όμως, η δέσμευση των πόρων γίνεται μόνο με τη λήψη ενός μηνύματος RSVP RESV, όπως και στην αρχιτεκτονική IntServ. Για να λειτουργήσει η παραπάνω αρχιτεκτονική προϋποτίθεται ότι όλα τα διαχειριζόμενα δίκτυα θα υλοποιούνται βάσει του πρωτοκόλλου MPLS.

2.2.7 Παραλείψεις των Παραπάνω Προσεγγίσεων

Σε όλες τις παραπάνω προσεγγίσεις δε μελετάται η διαδικασία του χρήστη για την αίτηση δέσμευσης πόρων. Όμως σε όλες τις περιπτώσεις οι αιτήσεις δέσμευσης πόρων περιλαμβάνουν τον καθορισμό παραμέτρων που είναι δυσνόητες για το χρήστη. Επίσης, δεν ορίζεται σαφής τρόπος με τον οποίο κάποια εφαρμογή του χρήστη θα αποστείλει κάποια αίτηση δέσμευσης πόρων στο δίκτυο. Αυτά έχουν σαν συνέπεια η διαδικασία της παροχής ποιότητας υπηρεσίας στις λύσεις που περιγράφηκαν να μην είναι διαφανής για τον χρήστη.

Επίσης, οι παραπάνω προσεγγίσεις δε μελετούν τον ορισμό μιας κατάλληλης διεπιφάνειας διαπραγμάτευσης, αλλά ούτε και ορίζουν κάποια διαδικασία για την διαπραγμάτευση των συμβολαίων κίνησης των χρηστών. Αυτά είναι απαραίτητο να ορισθούν, αφού σε ένα μεταβαλλόμενο περιβάλλον δικτύου (νέες εφαρμογές, νέες κλάσεις υπηρεσίας, αυξανόμενος αριθμός χρηστών) πρέπει να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των χρηστών για παροχή ποιότητας υπηρεσίας, αλλά και με αποδοτικό τρόπο για το δίκτυο. Επιπλέον, η διεπιφάνεια διαπραγμάτευσης συμβολαίων κίνησης πρέπει να είναι σαφής και ανεξάρτητη τόσο από το είδος των εφαρμογών όσο και από το είδος και τον αριθμό των κλάσεων υπηρεσίας που παρέχονται από το δίκτυο.

Ο έλεγχος συμμόρφωσης των ροών κίνησης είναι αναγκαίος, προκειμένου να μη γίνεται κατάχρηση των πόρων του δικτύου από κάποιες ροές σε βάρος άλλων. Στην περίπτωση του πρωτοκόλλου RSVP, αυτό γίνεται σε κάθε κόμβο με αποτέλεσμα το πρωτόκολλο αυτό να μην είναι επεκτάσιμο. Απεναντίας, στις διαφοροποιημένες υπηρεσίες (DiffServ) δε γίνεται έλεγχος στον αριθμό των ροών κίνησης που εισάγονται στο δίκτυο με αποτέλεσμα, να μην παρέχονται εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας σε επίπεδο ροών.

Το πρωτόκολλο MPLS είναι πολύ χρήσιμο για λειτουργίες σχετικές με αποδοτική διαχείριση κίνησης, αλλά αν δε συνδυαστεί με άλλα πρωτόκολλα δεν αποτελεί επεκτάσιμη λύση για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε επίπεδο ροών κίνησης.

Τέλος, οι προσεγγίσεις που περιγράφονται στην ενότητα 2.2.6 χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο RSVP προκειμένου να πραγματοποιήσουν τις αιτήσεις δέσμευσης πόρων σε δίκτυα DiffServ ή MPLS. Όμως, ενώ το πρωτόκολλο RSVP είναι προσανατολισμένο προς τους παραλήπτες κίνησης, εκεί χρησιμοποιείται από τους αποστολείς κίνησης για να τους παρέχεται ποιότητα υπηρεσίας στην κίνηση που αποστέλλουν. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανταλλαγή πολλών μηνυμάτων για την επικοινωνία μεταξύ του αποστολέα, του παραλήπτη κίνησης και του παροχέα του δικτύου σε μια πολύπλοκη και μη επεκτάσιμη διαδικασία.

Η προσέγγιση που προτείνουμε στην παρούσα εργασία αντιμετωπίζει τις παραλείψεις που περιγράψαμε.

2.3 Εγγύηση Ποιότητας Υπηρεσίας

Το Internet, σήμερα, παρέχει μόνο την κλάση ποιότητας υπηρεσίας Best Effort. Σύμφωνα με αυτήν την κλάση παρέχεται επικοινωνία χωρίς σύνδεση, δηλαδή δεν παρέχονται εγγυήσεις όσον αφορά στη παράδοση των πακέτων και στη σειρά με την οποία παραδίδονται. Επίσης, δεν παρέχονται εγγυήσεις ούτε για το ρυθμό παράδοσης των πακέτων, ούτε για την καθυστέρηση που θα υποστούν τα πακέτα. Σύμφωνα με το [012], αν υπάρχουν εγγυήσεις για το εύρος ζώνης που θα χρησιμοποιήσει μία ροή κίνησης, τότε για τη ροή αυτή υπάρχουν και εγγυήσεις για ένα άνω φράγμα στη συνολική καθυστέρηση παράδοσης των πακέτων της.

Πράγματι, η συνολική καθυστέρηση που αντιμετωπίζουν τα πακέτα μιας ροής αποτελείται από δύο μέρη:

- Την σταθερή καθυστέρηση που είναι το άθροισμα της καθυστέρηση μετάδοσης, της καθυστέρησης διάδοσης, των καθυστερήσεων επεξεργασίας (χωρισμός της κίνησης σε πακέτα, επεξεργασία επικεφαλίδας πακέτων, πέρασμα της στοίβας των πρωτοκόλλων, ενθυλάκωση και αποθυλάκωση των πακέτων κτλ.) σε έναν αριθμό κόμβων των μονοπατιών που ακολουθούν τα πακέτα στο δίκτυο και άλλες καθυστερήσεις που ισχύουν για κάθε πακέτο από μια πηγή προς ένα προορισμό.
- Την καθυστέρηση ενταμίευσης (χρόνος αναμονής) στις ουρές των δρομολογητών. Αυτή η καθυστέρηση είναι μεταβλητή για κάθε πακέτο από μια πηγή προς ένα προορισμό.

Οι εγγυήσεις για το εύρος ζώνης που θα χρησιμοποιήσει μία ροή κίνησης που συμμορφώνεται με τις παραμέτρους κίνησης του συμβολαίου της, παρέχουν και εγγυήσεις για ένα άνω φράγμα στην καθυστέρηση των πακέτων της ροής και για καμιά απώλεια πακέτων της ροής στις ουρές των δρομολογητών.

Το παραπάνω ορίζεται από το μοντέλο υπηρεσίας ροής υγρού (Fluid Model). Αυτό το μοντέλο υπηρεσίας για μια υπηρεσία με ρυθμό εξυπηρέτησης R , είναι η υπηρεσία που θα παρείχεται στη ροή κίνησης από ένα καλώδιο του δικτύου εύρους ζώνης R αφοσιωμένο στην υπηρεσία αυτή. Άρα, στο μοντέλο υπηρεσίας ροής υγρού η υπηρεσία που παρέχεται σε μια ροή κίνησης είναι ανεξάρτητη από τις υπηρεσίες που παρέχονται στις υπόλοιπες ροές κίνησης του δικτύου. Σύμφωνα με το αυτό το μοντέλο υπηρεσίας σε κάθε ροή κίνησης αντιστοιχεί ένα εύρος ζώνης R σε κάθε στοιχείο του δικτύου. Το R αντιπροσωπεύει το μέρος του εύρους ζώνης κάθε συνδέσμου που καταλαμβάνει μια ροή κίνησης και το χώρο ενταμίευσης που μπορεί να καταναλώσει μια ροή κίνησης στα στοιχεία του δικτύου. Το ότι μπορούμε να δώσουμε εγγυημένη υπηρεσία βασίζεται στο θεωρητικό αποτέλεσμα για το μοντέλο υπηρεσίας ροής υγρού ότι για μια ροή κίνησης που συμμορφώνεται στις παραμέτρους κίνησης (ρ, β) και εξυπηρετείται από μια γραμμή σύνδεσης εύρους ζώνης R , η ανώτατη καθυστέρηση των πακέτων της ροής αυτής είναι β/R , αν το R είναι μεγαλύτερο ή ίσο του ρ . Σε ένα πραγματικό δίκτυο, όπου το R είναι το μέρος του εύρους ζώνης κάθε συνδέσμου που καταλαμβάνει μια ροή κίνησης, η ανώτατη καθυστέρηση ενταμίευσης στις ουρές των δρομολογητών των πακέτων της ροής αυτής προσεγγίζει το παραπάνω θεωρητικό αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, αν το συμβόλαιο κίνησης μιας ροής περιλαμβάνει τις παραμέτρους του πακέτου σηματοδότησης RESV του πρωτοκόλλου RSVP δηλαδή τις h, ρ, β, m, M , τότε το ανώτατο όριο της συνολικής καθυστέρησης D_R από την πηγή στον προορισμό δίνεται από τον τύπο:

$$D_R = \left(\frac{\beta - M}{R} \cdot \frac{h - R}{h - \rho} \right) + \frac{M + C_{tot}}{R} + D_{tot} \quad \text{για } h > R \geq \rho$$

$$D_{des} = D_R + S$$

όπου C_{tot} είναι ένα περιθώριο σφάλματος στη συνολική καθυστέρηση που σχετίζεται με τις καθυστερήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να αποσταλεί η κίνηση με τις παραμέτρους LB του συμβολαίου. Το D_{tot} είναι το άθροισμα όλων των υπολοίπων σταθερών καθυστερήσεων που δε σχετίζονται με τις παραμέτρους κίνησης της ροής. Αν το S είναι θετικό, τότε μια εφαρμογή που απαιτεί εύρος ζώνης R ανέχεται καθυστέρηση D_{des} που είναι μεγαλύτερη από αυτή (D_R) που αντιστοιχεί σε αυτό το εύρος ζώνης. Άρα, είναι δυνατό να υπολογίσουμε το εύρος ζώνης που πρέπει να έχει μια ροή κίνησης προκειμένου να επιτευχθεί ένα επιθυμητό ανώτατο όριο στη συνολική καθυστέρηση των πακέτων της.

Πρέπει να τονίσουμε ότι η εγγύηση για την ανώτατη συνολική καθυστέρηση ανά πακέτο δεν περιλαμβάνει καμιά εγγύηση για τη μέση καθυστέρηση ή τη διακύμανση στην καθυστέρηση των πακέτων μιας ροής κίνησης, πέραν του προφανούς ότι η μέση καθυστέρηση είναι επίσης

μικρότερη ή ίση του D_R . Συνεπώς, χαμηλή τιμή για την ανώτατη συνολική καθυστέρηση συνεπάγεται χαμηλές τιμές τόσο για τη μέση καθυστέρηση, όσο και τη διακύμανση στην καθυστέρηση των πακέτων.

Σύμφωνα με όσα αναφέραμε είναι δυνατό να παρέχουμε αυστηρές εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας σε εύρος ζώνης, σε απώλειες πακέτων και σε ανώτατη καθυστέρηση σε ανεξάρτητες ροές κίνησης μέσα σε ένα περιβάλλον δικτύου DiffServ, αρκεί να ισχύουν τα παρακάτω:

- Κάθε ροή κίνησης πρέπει να συμμορφώνεται με τις παραμέτρους κίνησης του συμβολαίου της.
- Πρέπει να δεσμεύουμε το συνολικό εύρος ζώνης κάθε κλάσης ποιότητας υπηρεσίας καλύτερης από Best Effort, προκειμένου να προστατεύσουμε την ομαδοποιημένη κίνησή της από τον ανταγωνισμό λόγω της κίνησης των άλλων κλάσεων.
- Πρέπει να ελέγχουμε το πόσο φορτώνουμε με κίνηση κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας ανώτερη της Best Effort. Μπορούμε, έτσι, να ρυθμίσουμε την αυστηρότητα ή τη χαλαρότητα στις εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας που παρέχονται από κάθε τέτοια κλάση.

Όταν ο παράγοντας υπερφόρτωσης μιας κλάσης ποιότητας υπηρεσίας είναι μεγάλος, τότε η κλάση αυτή παρέχει χαλαρές εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας στις ροές που περνούν από αυτή.

2.4 Χρέωση με Βάση τη Χρήση

2.4.1 Χρέωση Ελαστικών Υπηρεσιών

Ένας αριθμός εφαρμογών, των οποίων η κίνηση κυριαρχεί στο Internet, είναι ελαστικές δηλαδή προσαρμόζουν τον ρυθμό αποστολής κίνησης στην ανάδραση του ελέγχου ροής, και συνεπώς στις συνθήκες συμφόρησης που επικρατούν. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι η μεταφορά ηλεκτρονικών μηνυμάτων (μέσω του πρωτοκόλλου SMTP), η μεταφορά αρχείων (μέσω των πρωτοκόλλων FTP, HTTP) και η απομακρυσμένη πρόσβαση σε τερματικό (Telnet). Η ελαστική κίνηση επιτρέπει ένα εύκαμπτο συμβόλαιο κίνησης μεταξύ του πελάτη και του παροχέα του δικτύου, στο οποίο δεν παρέχονται εγγυήσεις σχετικά με την καθυστέρηση και την πιθανότητα απώλειας των πακέτων της κίνησης. Οι ελαστικές εφαρμογές δεν έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις για εύρος ζώνης, αλλά χρησιμοποιούν όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου για την εξυπηρέτησή τους. Είναι κατάλληλες για την εξυπηρέτηση των ελαστικών εφαρμογών. Παραδείγματα τέτοιων υπηρεσιών είναι η υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας μεταφοράς (Best Effort) του Internet με το πρωτόκολλο μεταφοράς TCP και η υπηρεσία Available Bit Rate (ABR) του πρωτοκόλλου δικτύου ATM. Η απόδοση των ελαστικών υπηρεσιών μειώνεται δραστικά στις περιόδους υπερφόρτωσης του δικτύου.

Αν στην παροχή των ελαστικών υπηρεσιών δε λαμβάνεται υπόψη η ζήτηση δικτυακών πόρων (δηλαδή εύρους ζώνης και χώρου ενταμίευσης) για τη χρέωσή τους, ο διαμοιρασμός των πόρων στους διάφορους χρήστες δε γίνεται με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση αυτή, γιατί ενώ κάποιοι διατίθενται να πληρώσουν περισσότερα για να χρησιμοποιήσουν περισσότερους πόρους, πληρώνουν το ίδιο και οι πόροι που χρησιμοποιούν δεν είναι οι ίδιοι (εξαρτώνται από την εκάστοτε εφαρμογή). Προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη η ζήτηση δικτυακών πόρων από τους χρήστες και να πραγματοποιείται οικονομικά αποδοτικός διαμοιρασμός των πόρων του δικτύου, έχει προταθεί η χρέωση των ελαστικών υπηρεσιών με βάση τη συμφόρηση του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή, οι τιμές ανά μονάδα χρησιμοποιούμενων δικτυακών πόρων μπορεί να υπολογίζονται δυναμικά (ανάλογα με τη

συμφόρηση του δικτύου), ή να προκύπτουν από προηγούμενες μετρήσεις της συμφόρησης (π.χ. διαφορετικές τιμές ανά ώρα της ημέρας). Κατά την περίοδο συμφόρησης του δικτύου, οι χρήστες που πληρώνουν περισσότερο διατηρούν ικανή ποσότητα πόρων και άρα έχουν καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας. Η οικονομικά βέλτιστη τιμή ανά μονάδα χρήσης δικτυακών πόρων είναι αυτή για την οποία ισχύει ότι η μοναδιαία αύξηση ή μείωση στην ωφελιμότητα ενός χρήστη ισούται με τη μοναδιαία αύξηση ή μείωση στο κοινωνικό κόστος λόγω συμφόρησης στο δίκτυο (σημειώστε ότι για να ισχύει αυτό η ζήτηση είναι περίπου ίση με τη χωρητικότητα).

Έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις για την υλοποίηση αυτού του τρόπου χρέωσης. Μια από αυτές είναι κάθε χρήστης να υπολογίζει τις απαιτήσεις του σε δικτυακούς πόρους, να πληροφορεί το δίκτυο σχετικά, και το δίκτυο να υπολογίζει την τιμή ανά μονάδα χρήσης δικτυακών πόρων με βάση τη συνολική ζήτηση και να πληροφορεί τους χρήστες. Μια άλλη προσέγγιση είναι το δίκτυο να δημοπρατεί τους πόρους του στους χρήστες. Σύμφωνα με αυτή, οι χρήστες πληροφορούν το δίκτυο για τη μέγιστη τιμή ανά μονάδα χρήσης πόρων που διατίθενται να πληρώσουν. Το δίκτυο επιτρέπει την αποστολή της κίνησης σε κάποιο χρήστη, μόνο όταν η τιμή ανά μονάδα χρήσης πόρων που υπολογίζεται από το δίκτυο είναι μικρότερη από αυτή που διατίθεται να πληρώσει ο χρήστης. Τέλος, σύμφωνα με μια τρίτη προσέγγιση, ο ρυθμός των ροών κίνησης των χρηστών ελέγχεται με βάση το ρυθμό χρέωσης από το δίκτυο με βάση τη συμφόρησή του κάθε χρονική στιγμή, αλλά και το συνολικό ποσό που διατίθεται να πληρώσει κάθε χρήστης, επιτυγχάνοντας έτσι αναλογική δικαιοσύνη (proportional fairness 0). Στην προσέγγισή μας, η οποία θα περιγραφεί στη συνέχεια της παρούσας εργασίας, υποθέτουμε ότι η ελαστική υπηρεσία του Internet (Best Effort) παρέχεται δωρεάν, γιατί δεν παρέχει καμιά εγγύηση χρήσης δικτυακών πόρων παρά μόνο συνδεσιμότητα. Στην περίπτωση αυτή, οι απαιτήσεις των χρηστών για δικτυακούς πόρους ικανοποιούνται από κλάσεις υπηρεσίας ανώτερες της κλάσης Best Effort.

2.4.2 Χρέωση Εγγυημένων Υπηρεσιών

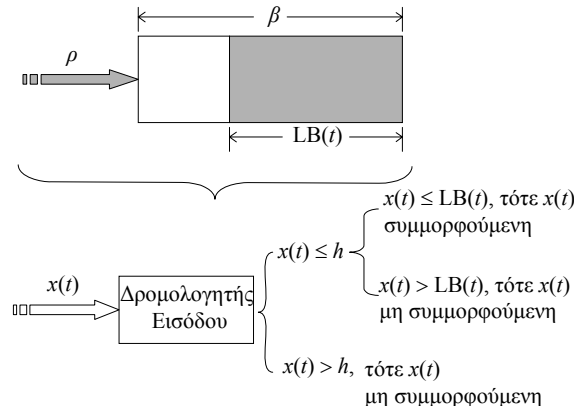
Οι εφαρμογές που έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις παροχής QoS από το δίκτυο για την κίνηση που στέλνουν ή λαμβάνουν ονομάζονται υπηρεσίες εγγυημένης ποιότητας ή απλώς εγγυημένες υπηρεσίες. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι η μεταφορά κίνησης πολυμέσων πραγματικού χρόνου, η τηλεφωνία και η συνδιάσκεψη μέσω video. Εγγυημένες υπηρεσίες δικτύου είναι αυτές που παρέχουν στις εγγυημένες εφαρμογές τις αντίστοιχες εγγυήσεις ποιότητας (καθυστέρηση, διακύμανση καθυστέρησης, εύρος ζώνης, πιθανότητα απώλειας πακέτου) είτε στατιστικές είτε ντετερμινιστικές. Το συμβόλαιο κίνησης μιας εγγυημένης υπηρεσίας καθορίζεται από τους πόρους που δεσμεύονται στο δίκτυο για την παροχή της υπηρεσίας αυτής. Επειδή οι συνολικοί πόροι του δικτύου είναι περιορισμένοι, κάθε νέο συμβόλαιο κίνησης υπόκειται σε έλεγχο αποδοχής κλήσης και αν γίνει δεκτό η κίνησή του ελέγχεται, ώστε να συμμορφώνεται με τους όρους του.

Μια διαδεδομένη μέθοδος για τον έλεγχο της εισερχόμενης κίνησης στο δίκτυο και τη συμμόρφωσή της σύμφωνα με το συμβόλαιο κίνησής της είναι το μοντέλο «τρύπιου» Leaky Bucket (LB) που υλοποιείται ως κυλιόμενο χρονικό παράθυρο. Χρησιμοποιείται ευρέως σε δικτυακές τεχνολογίες που δίνουν εγγυήσεις για την ποιότητα υπηρεσίας μεταφοράς όπως είναι το ATM (σύμφωνα με τον αλγόριθμο Generic Cell Rate Algorithm), το Frame Relay, αλλά και οι Differentiated Services.

Σύμφωνα με τη μέθοδο LB (συνεχούς χρόνου) των Differentiated Services για κάθε ροή εισερχόμενης κίνησης στο δίκτυο ορίζονται οι παρακάτω παράμετροι ελέγχου της:

- Token Bucket Rate ρ , είναι ο ρυθμός με τον οποίο το κυλιόμενο χρονικό παράθυρο «γεμίζει» με υγρό. Εκφράζει το μέγιστο μέσο ρυθμό αποστολής κίνησης σε όλα τα χρονικά παράθυρα. Μετράται σε μονάδες εύρους ζώνης.

- Token Bucket Size β , είναι το μέγεθος του κυλιόμενου χρονικού παραθύρου. Εκφράζει τη μέγιστη χρονική διάρκεια ενός «ξεσπάσματος» κίνησης, δηλαδή συνεχόμενης αποστολής κίνησης με το μέγιστο ρυθμό αποστολής. Μετράται σε μονάδες χωρητικότητας.
- Peak Rate h , είναι ο μέγιστος ρυθμός αποστολής κίνησης σε όλα τα χρονικά παράθυρα. Μετράται σε μονάδες εύρους ζώνης.



Σχήμα 5: Το μοντέλο ελέγχου κυκλοφορίας κυλιόμενου χρονικού παράθυρου (LB).

Η λειτουργία του μοντέλου LB για τις Differentiated Services σε κάποιο δρομολογητή εισόδου της κίνησης στο δίκτυο DiffServ φαίνεται στο Σχήμα 5. Το κυλιόμενο χρονικό παράθυρο «γεμίζει» με ρυθμό ρ . Σε κάθε χρονική στιγμή t σε κάποιο δρομολογητή εισόδου του δικτύου DiffServ φθάνει κίνηση $x(t)$. Αν η κίνηση $x(t)$ είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη ποσότητα κίνησης $h\Delta t$ που μπορεί να αποσταλεί, τότε η κίνηση είναι μη συμμορφούμενη με το SLS της και είτε κατηγοριοποιείται σε κατώτερη κλάση ποιότητας υπηρεσίας από αυτή που ορίζει το SLS της και προωθείται, είτε απορρίπτεται, είτε μορφοποιείται (αποθηκεύεται έως ότου γίνει συμμορφούμενη). Διαφορετικά, αν η κίνηση $x(t)$ είναι μικρότερη από τη μέγιστη ποσότητα κίνησης $h\Delta t$ που μπορεί να αποσταλεί, τότε συγκρίνεται με την ποσότητα $LB(t)$ που εκφράζει το πόσο «γεμάτο» είναι το χρονικό παράθυρο. Αν $x(t) > LB(t)$, τότε η κίνηση η κίνηση είναι μη συμμορφούμενη και αντιμετωπίζεται όπως περιγράψαμε παραπάνω. Αν, όμως, $x(t) \leq LB(t)$, τότε η κίνηση είναι συμμορφούμενη με το SLS της, κατηγοριοποιείται στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας που ορίζει το SLS και προωθείται.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας για τη μέτρηση της χρήσης/κατανάλωσης των πόρων σε ευρυζώνια δίκτυα, η μέτρηση των πόρων που καταλαμβάνει μια πηγή κυκλοφορίας δεν μπορεί να γίνει με ακρίβεια, αν δε ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά του συνδέσμου του δικτύου στον οποίο εισέρχεται. Στα [30], [31] προτείνεται ο ορισμός του ισοδύναμου εύρους ζώνης για τη μέτρηση των πόρων που καταναλώνονται από μια ροή κυκλοφορίας σε ένα σύνδεσμο. Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό τα χαρακτηριστικά ενός συνδέσμου εκφράζονται από δυο παραμέτρους: τη χωρική παράμετρο s και τη χρονική παράμετρο t , οι οποίες εξαρτώνται από τους πόρους (χωρητικότητα και μέγεθος ενταμιευτή) και τα στατιστικά χαρακτηριστικά της πολυπλεκόμενης κίνησης του συνδέσμου. Οι παράμετροι s , t μαζί ορίζουν ένα σημείο λειτουργίας ενός συνδέσμου του δικτύου. Το ισοδύναμο εύρος ζώνης για μια πηγή τύπου j που παράγει συνολικό φόρτο κυκλοφορίας $X_j(t)$ σε χρόνο t , δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\alpha_j(s, t) = \frac{1}{st} \log E \left[e^{sX_j(t)} \right]$$

Το ισοδύναμο εύρος ζώνης παρέχει ένα μέτρο της ισοδύναμης χρήσης των πόρων του δικτύου από μια πηγή σε ένα ορισμένο σημείο λειτουργίας του (s, t) . Η χωρική παράμετρος s (μετριέται σε Mbit^{-1}) ενός συνδέσμου εκφράζει τη δυνατότητα που έχει για πολυπλεξία ο σύνδεσμος και εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από τη σχέση της χωρητικότητας του συνδέσμου με το μέγιστο ρυθμό των πολυπλεκομένων πηγών κυκλοφορίας. Όταν ο μέγιστος ρυθμός των πολυπλεκομένων πηγών σε ένα σύνδεσμο είναι πολύ μικρότερος από τη χωρητικότητα του συνδέσμου, τότε ο σύνδεσμος έχει μεγάλες δυνατότητες πολυπλεξίας, το s τείνει στο 0 και το ισοδύναμο εύρος ζώνης των ροών κυκλοφορίας προσεγγίζει το μέσο ρυθμό τους (δηλαδή το $X(t)/t$). Αντίθετα, αν η χωρητικότητα ενός συνδέσμου δεν είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με τον μέγιστο ρυθμό των πολυπλεκομένων πηγών, τότε ο σύνδεσμος δεν έχει μεγάλες δυνατότητες για πολυπλεξία, το s τείνει στο άπειρο και το ισοδύναμο εύρος ζώνης των πολυπλεκομένων ροών κυκλοφορίας προσεγγίζει το μέγιστο ρυθμό τους. Η χρονική παράμετρος t ενός συνδέσμου εκφράζει την πιο πιθανή χρονική διάρκεια που γεμίζει ο ενταμιευτής του συνδέσμου μέχρι να συμβεί υπερχειλίση.

Το ισοδύναμο εύρος ζώνης ορίζεται για ένα σύνδεσμο του δικτύου, αλλά μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να γενικευτεί για ολόκληρο το δίκτυο, αφού αποδεικνύεται ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά μιας ροής κυκλοφορίας παραμένουν αναλλοίωτα κατά το πέρασμά της από ένα μεταγωγέα του δικτύου, και ότι η συμπεριφορά του μεταγωγέα εξαρτάται μόνο από το ισοδύναμο εύρος ζώνης των ροών που διέρχονται από αυτόν [32]. Επίσης, μετρήσεις με πραγματική κίνηση [11] έχουν δείξει ότι ο παραπάνω ορισμός του ισοδύναμου εύρους ζώνης είναι ακριβής. Επίσης, έχουν δείξει ότι οι παράμετροι s, t δεν επηρεάζονται για μικρές μεταβολές στο μείγμα των πολυπλεκομένων ροών κυκλοφορίας ενός συνδέσμου.

Για να διατηρήσει ο παροχέας του δικτύου το επίπεδο ποιότητας που υπόσχεται για την εγγυημένη κίνηση, σε ένα σύνδεσμο ορισμένης χωρητικότητας και μεγέθους ενταμιευτή, θα πρέπει να ισχύει ο περιορισμός:

$$\sum_i \alpha(x_i) \leq K$$

όπου $\alpha(x_i)$ είναι το ισοδύναμο εύρος ζώνης που καταναλώνεται από το συμβόλαιο κίνησης x_i στο σύνδεσμο που εξετάζουμε. K είναι η ισοδύναμη χωρητικότητα του συνδέσμου, η οποία εξαρτάται από τη χωρητικότητα του συνδέσμου, το μέγεθος του ενταμιευτή και το επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας που εγγυάται ο παροχέας για την εγγυημένη κυκλοφορία. Όπως εξηγείται στο [11], αν κάθε ροή κυκλοφορίας ελέγχεται σύμφωνα με το μοντέλο LB, τότε το K ορίζεται πλήρως από έναν περιορισμένο αριθμό γραμμικών συνθηκών.

Όπως έχει αναφερθεί, διαφορετικά είδη πηγών κυκλοφορίας έχουν διαφορετικό ισοδύναμο εύρος ζώνης. Για κάποια είδη πηγών ο υπολογισμός του ισοδύναμου εύρους ζώνης είναι εξαιρετικά πολύπλοκος. Το εύρος ζώνης μιας πηγής υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο που αποκαλείται “inf-sup”, και παράγεται από τεχνικές “Large Deviations” [11]. Επίσης, ο έλεγχος αποδοχής κλήσης για την είσοδο μιας νέας ροής κυκλοφορίας στο δίκτυο, προϋποθέτει ότι το δίκτυο γνωρίζει το είδος της πηγής της ροής αυτής. Προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη, για μια τυχαία πηγή κυκλοφορίας $X(t)$, η μέγιστη χρήση/κατανάλωση πόρων του δικτύου κατά τον έλεγχο αποδοχής της στο δίκτυο, έχει ορισθεί το «απλό» φράγμα στο ισοδύναμο εύρος ζώνης μιας πηγής [3]. Το απλό φράγμα για μια ροή κυκλοφορίας μιας πηγής σε ένα σύνδεσμο του δικτύου με σημείο λειτουργίας (s, t) δίνεται από τον παρακάτω τύπο: όπου $\alpha(x_i)$ είναι το ισοδύναμο εύρος ζώνης που καταναλώνεται από το συμβόλαιο κίνησης x_i στο σύνδεσμο που εξετάζουμε. K είναι η ισοδύναμη χωρητικότητα του συνδέσμου, η οποία εξαρτάται από τη χωρητικότητα του συνδέσμου, το μέγεθος του ενταμιευτή και το επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας που εγγυάται ο παροχέας για την εγγυημένη κυκλοφορία. Όπως

εξηγείται στο [11]0, αν κάθε ροή κυκλοφορίας ελέγχεται σύμφωνα με το μοντέλο LB, τότε το K ορίζεται πλήρως από έναν περιορισμένο αριθμό γραμμικών συνθηκών.

Όπως έχει αναφερθεί, διαφορετικά είδη πηγών κυκλοφορίας έχουν διαφορετικό ισοδύναμο εύρος ζώνης. Για κάποια είδη πηγών ο υπολογισμός του ισοδύναμου εύρους ζώνης είναι εξαιρετικά πολύπλοκος. Το εύρος ζώνης μιας πηγής υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο που αποκαλείται “inf-sup”, και παράγεται από τεχνικές “Large Deviations” [11]. Επίσης, ο έλεγχος αποδοχής κλήσης για την είσοδο μιας νέας ροής κυκλοφορίας στο δίκτυο, προϋποθέτει ότι το δίκτυο γνωρίζει το είδος της πηγής της ροής αυτής. Προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη, για μια τυχαία πηγή κυκλοφορίας $X(t)$, η μέγιστη χρήση/κατανάλωση πόρων του δικτύου κατά τον έλεγχο αποδοχής της στο δίκτυο, έχει οριστεί το «απλό» φράγμα στο ισοδύναμο εύρος ζώνης μιας πηγής [3]. Το απλό φράγμα για μια ροή κυκλοφορίας μιας πηγής σε ένα σύνδεσμο του δικτύου με σημείο λειτουργίας (s, t) δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\bar{\alpha}(x, m) = \frac{1}{st} \log \left[1 + \frac{m}{H(t)} (e^{stH(t)} - 1) \right]$$

όπου x είναι το συμβόλαιο κίνησης της πηγής κυκλοφορίας με το δίκτυο εκφρασμένο με παραμέτρους LB (h, ρ, β) , $H(t) = \min\{h, \rho + \beta/t\}$, m είναι ο μέσος ρυθμός της ροής κυκλοφορίας σε χρόνο t . $H(t)t$ είναι ο μέγιστος όγκος κυκλοφορίας που μπορεί να στείλει η πηγή κυκλοφορίας σε χρονικό διάστημα t . Το απλό φράγμα αντιστοιχεί στο ισοδύναμο εύρος ζώνης της ροής κυκλοφορίας μιας πηγής τύπου δύο καταστάσεων (ON-OFF), όταν οι αλλαγές καταστάσεων γίνονται σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από t . Για αυτό το λόγο το $H(t)$ αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως ισοδύναμος μέγιστος ρυθμός. Η συνάρτηση $\bar{\alpha}(x, m)$ είναι αύξουσα στο $H(t)$, και αύξουσα και κοίλη στο m .

Έχουν προταθεί δύο προσεγγίσεις για τη χρέωση των συμβολαίων κίνησης των εγγυημένων υπηρεσιών με βάση το ισοδύναμο εύρος ζώνης: η προσέγγιση των Courcoubetis and Siris [3], και η προσέγγιση του Kelly ([30], [33]). Οι προσεγγίσεις αυτές περιγράφονται παρακάτω.

2.4.2.1 Προσέγγιση Courcoubetis and Siris

Η προσέγγιση αυτή [3] ασχολείται με τη χρέωση συμβολαίων κίνησης (καθένα είναι μέρος ενός SLA) για υπηρεσίες Differentiated Services. Η προσέγγιση αυτή υιοθετήθηκε στην παρούσα εργασία και για το λόγο αυτό θα μελετηθεί αναλυτικά. Ο σκοπός του δικτύου είναι να δεσμεύσει τα SLA των χρηστών του, έτσι ώστε να μεγιστοποιήσει την κοινωνική ευημερία των χρηστών του, διατηρώντας παράλληλα τις εγγυήσεις των SLA που παρέχει, κάνοντας έλεγχο αποδοχής κλήσης. Δηλαδή να μεγιστοποιήσει το άθροισμα της *ωφελιμότητας* (utility) των χρηστών από τα SLA που συνάπτουν με το δίκτυο. Για i χρήστες οι οποίοι συνάπτουν SLA με το δίκτυο το πρόβλημα περιγράφεται μαθηματικά ως εξής:

$$\begin{aligned} & \max_{\{x_i\}} \sum_i U_i(x_i) \\ & \text{υπό τη συνθήκη } \sum_i \alpha(x_i) \leq K \end{aligned}$$

όπου $\alpha(x_i)$ είναι το ισοδύναμο εύρος ζώνης ενός SLA x_i και K είναι η ισοδύναμη χωρητικότητα του συνδέσμου πρόσβασης της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Το παραπάνω πρόβλημα μεγιστοποίησης είναι ισοδύναμο με το

m καλύπτουν το σύνολο τυπικών υπηρεσιών ($\bar{a}(x, m)$ είναι το απλό φράγμα στο ισοδύναμο εύρος ζώνης). Αυτό σημαίνει ότι για αυτές τις υπηρεσίες $\bar{a}(x, m)/a(x, m) \approx k$, όπου k ένας σταθερός αριθμός. Σε αυτή την περίπτωση η χρέωση ανάλογα με το απλό φράγμα στο ισοδύναμο εύρος ζώνης μιας πηγής κυκλοφορίας ισοδυναμεί με τη χρέωση με βάση το πραγματικό ισοδύναμο εύρος ζώνης της πηγής, αν θέσουμε την τιμή ανά μονάδα ισοδύναμης χρήσης (εκπεφράσμενη μέσω του $\bar{a}(x, m)$) ίση με p/k .

Για τη χρέωση και διαχείριση των πόρων του το δίκτυο, δημοσιοποιεί τη χρονική παράμετρο t του συνδέσμου πρόσβασης στο εσωτερικό του δικτύου Differentiated Services, και ένα σύνολο από καμπύλες χρέωσης παραμετροποιημένες στον ισοδύναμο μέγιστο ρυθμό $H(t)$, ο οποίος στο εξής θα συμβολίζεται με H . Η χρονική παράμετρος t χρησιμεύει στους χρήστες για την επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων κίνησης LB που ελαχιστοποιούν τη χρέωσή του για το συμβόλαιο αυτό. Οι καμπύλες χρέωσης δίνονται από τον τύπο $f_H(m) = p\bar{a}(x, m)$, όπου p είναι η τιμή ανά μονάδα ισοδύναμης χρήσης και $\bar{a}(x, m)$ είναι το απλό φράγμα στο ισοδύναμο εύρος ζώνης ενός συμβολαίου κίνησης. Αν $x = \{h, (\rho, \beta)\}$ είναι το συμβόλαιο κίνησης που επιλέγει ένας χρήστης, τότε θα χρεωθεί με βάση την καμπύλη χρέωσης $f_H(m)$ με $H = \min\{h, \rho + \beta/t\}$, και η χρέωσή του για μια χρονική περίοδο διάρκειας T θα είναι $f_H(V/T)T$, όπου V είναι ο όγκος της κυκλοφορίας που μεταφέρεται σε διάστημα T . Ο χρήστης θα πρέπει σύμφωνα με την πληροφορία που δημοσιοποιείται από το δίκτυο να επιλέξει το συμβόλαιο κίνησης $x = \{h, (\rho, \beta)\}$, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η παράμετρος H που καθορίζει την καμπύλη χρέωσης με την οποία θα χρεωθούν. Αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι το απλό φράγμα στο ισοδύναμο εύρος ζώνης αυξάνεται συναρτήσει του ισοδύναμου μεγίστου ρυθμού. Ο ακριβής τρόπος επιλογής του βέλτιστου συμβολαίου κίνησης, όσον αφορά στη χρέωση, έχει αναπτυχθεί στον κορμό της εργασίας και περιγράφεται στην ενότητα 4.1.4.

Ο έλεγχος αποδοχής κλήσης σε αυτή την προσέγγιση πραγματοποιείται αυξομειώνοντας την τιμή ανά μονάδα ισοδύναμης χρήσης σε κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας συναρτήσει της ζήτησης για παροχή υπηρεσιών σε καθεμιά από αυτές. Δηλαδή, όταν αυξάνεται η ζήτηση για ισοδύναμο εύρος ζώνης σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας, τότε αυξάνεται και η τιμή ανά μονάδα ισοδύναμης χρήσης σε αυτή την κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Αντίστροφα, όταν μειώνεται η ζήτηση για ισοδύναμο εύρος ζώνης σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας, τότε μειώνεται και η τιμή ανά μονάδα ισοδύναμης χρήσης σε αυτή την κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι οι τιμές ανά μονάδα ισοδύναμης χρήσης σε κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας να αυξομειώνονται ανάλογα με τις αυξομειώσεις στην παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας κάθε κλάσης.

Με αυτό τον τρόπο χρέωσης παρέχονται στο χρήστη τα κατάλληλα κίνητρα, ώστε να επιλέξει το συμβόλαιο κίνησης που θα προσεγγίζει καλύτερα τις απαιτήσεις μεταφοράς της πραγματικής κίνησης. Επίσης, η τιμή του απλού φράγματος στο ισοδύναμο εύρος ζώνης για ένα τέτοιο συμβόλαιο κίνησης προσεγγίζει περισσότερο το πραγματικό ισοδύναμο εύρος ζώνης της κίνησης από ότι τα άλλα δυνατά συμβόλαια κίνησης, τα οποία θα μπορούσε να επιλέξει ο χρήστης. Οπότε, η χρήση του απλού φράγματος στο ισοδύναμο εύρος ζώνης για τη χρέωση της κατανάλωσης των πόρων του δικτύου γίνεται δικαιότερη, όταν οι χρήστες επιλέγουν τα συμβόλαια κίνησης με βάση τα παραπάνω κίνητρα.

Η προσέγγιση αυτή είναι περισσότερο κατάλληλη για τη χρέωση και τον έλεγχο αποδοχής κλήσης ροών κυκλοφορίας που έχουν απαιτήσεις για στατιστικές εγγυήσεις στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Σε αυτή την περίπτωση, ο μέσος ρυθμός κυκλοφορίας μιας ροής δεν χρειάζεται να είναι γνωστός εκ των προτέρων, δεδομένου ότι το δίκτυο μπορεί να μετρήσει το ρυθμό αυτό μετά την αποδοχή της κλήσης και να προσφέρει τα κίνητρα στους χρήστες για τη σωστή χρήση των πόρων του δικτύου μέσω της χρέωσης.

2.4.2.2 Προσέγγιση Kelly

Η προσέγγιση αυτή ([30], [33]) ασχολείται με τη χρέωση συμβολαίων κίνησης εγγυημένων υπηρεσιών που παρέχουν ποσοτικές εγγυήσεις για την παροχή QoS. Στην προσέγγιση αυτή, δεδομένου ενός συμβολαίου κίνησης $\{h, (\rho, \beta)\}$ για ένα χρήστη, το δίκτυο παρέχει στο χρήστη μια σειρά από ταρίφες $a_h(m), b_h(m)$ για τη χρέωσή του, που εξαρτώνται από την πρόβλεψη του χρήστη για το μέσο ρυθμό της κίνησής του m . Ο χρήστης, επιλέγοντας ένα μέσο ρυθμό κυκλοφορίας m , χρεώνεται με βάση τη συνάρτησή:

$$p \cdot f\left(m; \frac{V}{T}\right)T = p\{a_h(m)T + b_h(m)V\}$$

όπου V είναι ο όγκος της κυκλοφορίας που μεταφέρεται από το δίκτυο σε χρόνο T . $f(m; V/T)$ είναι η εφαπτομένη της καμπύλης του απλού φράγματος του ισοδύναμου εύρους ζώνης της κυκλοφορίας στο σημείο m , $a_h(m)$ και $b_h(m)$ είναι οι συντελεστές της εξίσωσης της εφαπτομένης στο m , και p είναι η τιμή ανά μονάδα ισοδύναμης χρήσης. Αν ο χρήστης επιλέξει m ίσο με V/T , τότε η χρέωσή του είναι ανάλογη με το απλό φράγμα στο ισοδύναμο εύρος ζώνης της μεταφερόμενης κυκλοφορίας. Επιλέγοντας $m > V/T$, ο χρήστης επιλέγει να έχει μεγαλύτερη χρέωση ανά μονάδα χρόνου και μικρότερη χρέωση ανά μονάδα όγκου. Αντίθετα, επιλέγοντας $m < V/T$ θα έχει μεγαλύτερη χρέωση ανά μονάδα όγκου και μικρότερη χρέωση ανά μονάδα χρόνου.

Ο χρήστης ελαχιστοποιεί τη χρέωσή του, όταν η πρόβλεψή του για το μέσο ρυθμό m είναι ίση με τον πραγματικό μέσο ρυθμό αποστολής της κυκλοφορίας του. Άρα, ο χρήστης έχει κίνητρο να είναι ειλικρινής και κατά το δυνατόν πιο ακριβής στην πρόβλεψη του μέσου ρυθμού του. Επίσης, με βάση αυτή την επιλογή, το δίκτυο πραγματοποιεί τον έλεγχο αποδοχής κλήσης και για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να είναι ακριβής. Συγκεκριμένα, ελέγχεται για κάθε συμβόλαιο κίνησης για την είσοδο μιας νέας ροής κυκλοφορίας στο δίκτυο, ότι ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\sum_{j=1}^J a_h^j + b_h^j M_j \leq Th$$

όπου J είναι οι υπάρχουσες ροές κίνησης στο δίκτυο (μαζί με τη νέα ροή), a_h^j και b_h^j είναι οι συντελεστές της χρέωσης των συμβολαίων αυτών των ροών, M_j είναι ο μέσος ρυθμός κυκλοφορίας της ροής j , και Th είναι ένα κατώφλι που εξαρτάται από τους πόρους του δικτύου και τις εγγυήσεις για παροχή QoS που παρέχονται στις ροές κίνησης. Το παραπάνω άθροισμα ονομάζεται *ισοδύναμος φόρτος* των πόρων του δικτύου.

Η προσέγγιση αυτή είναι κατάλληλη για υπηρεσίες που απαιτούν πραγματικές μετρήσιμες εγγυήσεις παροχής QoS, όπως είναι οι υπηρεσίες ATM. Σε αυτή την περίπτωση, ο μέσος ρυθμός των ροών κυκλοφορίας που πρόκειται να εισαχθούν στο δίκτυο πρέπει να είναι γνωστός πριν την είσοδό τους, και χρησιμοποιούνται στον έλεγχο αποδοχής κλήσης.

2.5 Χρήση Προσωπικών Αντιπροσώπων

Για πολύπλοκες εργασίες, όπως είναι η επιλογή κατάλληλων ταριφών χρέωσης (βλέπε ενότητα 2.4.2.1) ή η επιλογή κατάλληλου μέσου ρυθμού αποστολής κίνησης (βλέπε ενότητα 2.4.2.2), έχει προταθεί η χρήση συστατικών μερών λογισμικού αντιπροσώπων που θα εκτελούν τις εργασίες αυτές για λογαριασμό του χρήστη. Η χρήση λογισμικού αντιπροσώπων

για διάφορες εργασίες στις τηλεπικοινωνίες, όπως διαχείριση δικτύου, δέσμευση πόρων, υποστήριξη κινητικότητας χρηστών και άλλα [35], έχει γίνει πολύ δημοφιλής τα τελευταία χρόνια. Εκτεταμένη έρευνα πάνω στο θέμα έγινε στα πλαίσια του CLIMATE που ήταν η ερευνητική κοινότητα η οποία εκπόνησε έργα στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος ACTS (Advanced Communications Technologies & Services) τα οποία μελέτησαν και ανέπτυξαν λογισμικό αντιπροσώπων. Ένα άλλο ενδιαφέρον θέμα, σχετικά, είναι η ανάλυση ανταγωνιστικών αγορών τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών βασισμένων στη χρήση λογισμικού αντιπροσώπων. Επίσης, έχει προταθεί η χρήση λογισμικού αντιπροσώπων για την απόκτηση ή τη διαπραγμάτευση αγαθών για λογαριασμό των χρηστών σε διάφορες εφαρμογές, όπως είναι η επίσκεψη ιστοσελίδων του WWW, η αγορά προϊόντων, η διαπραγμάτευση υπηρεσίας ABR που χρεώνεται δυναμικά [39], η αποδοτική διαπραγμάτευση ποιότητας υπηρεσίας επιπέδου εφαρμογής και άλλες. Όταν το λογισμικό αντιπροσώπου χρησιμοποιείται για να παίρνει αποφάσεις για λογαριασμό του χρήστη ονομάζεται Προσωπικός Αντιπρόσωπος (UA) του χρήστη. Οι UA βασίζονται συχνά σε τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, σε στατιστικές μεθόδους, σε μεθόδους εκμάθησης κτλ. Στην παρούσα εργασία, αναπτύσσουμε έναν προσωπικό αντιπρόσωπο, ο οποίος είναι επιφορτισμένος με την επιλογή του βέλτιστου συμβολαίου κίνησης για τον εκάστοτε χρήστη κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης με τον παροχέα του δικτύου, όπως ορίζεται στο κεφάλαιο 4 και υλοποιείται στο κεφάλαιο 5.

3 Αξιοποίηση Υπάρχουσας Τεχνολογίας

3.1 Χρήση Χαρακτηριστικών DiffServ

Στην παρούσα ενότητα θα αναφέρουμε τα χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής DiffServ που χρησιμοποιούμε στην αρχιτεκτονική που προτείνουμε στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήσαμε την έννοια της ομαδοποίησης των ροών κίνησης και την αντιστοίχιση κάθε ομαδοποιημένης ροής σε μια συγκεκριμένη αντιμετώπιση του δικτύου (PHB). Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική που προτείνουμε στο εσωτερικό του δικτύου DiffServ πραγματοποιούμε διαχωρισμό κυκλοφορίας σε επίπεδο ενοποιημένων ροών κίνησης, ενώ όπως θα περιγράψουμε στο κεφάλαιο 5 ο διαχωρισμός της κίνησης σε επίπεδο ανεξάρτητων ροών κίνησης πραγματοποιείται στους σταθμούς εργασίας των χρηστών.

Η αρχιτεκτονική DiffServ είναι πολύ επεκτάσιμη, αφού δεν απαιτεί μεγάλες αλλαγές στην υπάρχουσα υποδομή των δικτύων IP. Η υλοποίησή της είναι πολύ απλή, αφού όλη η πληροφορία για την ποιότητα εξυπηρέτησης ενός πακέτου περιέχεται στο πεδίο DS των πακέτων για το εσωτερικό του δικτύου. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική DiffServ παρέχει στον παροχέα του δικτύου ευελιξία τόσο στην υλοποίηση των διαφόρων PHB, όσο και στον ορισμό των κλάσεων υπηρεσίας με βάση αυτές τις PHB. Διατηρούμε τα χαρακτηριστικά αυτά στην αρχιτεκτονική που προτείνουμε και επιπλέον παρέχουμε εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας σε επίπεδο ανεξάρτητων ροών.

3.2 Ορισμός Παραμέτρων SLS

Όπως, έχει αναφερθεί το συμβόλαιο κίνησης SLA μιας ροής για παροχή ποιότητας υπηρεσίας περιγράφει τους όρους της συμφωνίας μεταξύ του παροχέα του δικτύου και του χρήστη για τη μεταφορά της κίνησης της ροής. Το SLA περιλαμβάνει το SLS που καθορίζει τους τεχνικούς όρους για τη μεταφορά της κίνησης με κάποια ποιότητα υπηρεσίας. Οι ακριβείς παράμετροι που θα περιλαμβάνει το SLS δεν έχουν καθορισθεί πλήρως και αποτέλεσαν πρόσφατα αντικείμενο ερευνητικής εργασίας [21] για την αρμόδια ομάδα της IETF. Το θέμα ερευνήθηκε και στην παρούσα εργασία στο βαθμό που ήταν αναγκαίο προκειμένου να καθορισθούν οι παράμετροι για τις οποίες ορίσαμε τη διαδικασία διαπραγμάτευσης των συμβολαίων κίνησης.

Κοινή διαπίστωση με το [21] είναι ότι το SLS πρέπει να περιέχει παραμέτρους που θα καθορίζουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας σύμφωνα με αυτό:

- Το δικτυακό περιβάλλον για το οποίο ισχύει (το SLS).
- Τον ακριβή προσδιορισμό της ροής κίνησης για την οποία ισχύει.
- Τις παραμέτρους κίνησης με τις οποίες θα πρέπει να συμμορφώνεται η ροή κίνησης.
- Τη συμπεριφορά του δικτύου στην κυκλοφορία της ροής που δεν συμμορφώνεται στις παραμέτρους κίνησης.
- Τις ποσοτικές εγγυήσεις (εύρος ζώνης, άνω φράγμα στην καθυστέρηση και στις απώλειες πακέτων) που παρέχονται από το δίκτυο για την κίνηση αυτής της ροής.
- Τις ποιοτικές εγγυήσεις (κλάση ποιότητας υπηρεσίας, προτεραιότητα εξυπηρέτησης) που παρέχονται από το δίκτυο για την κίνηση αυτής της ροής.
- Τις χρονικές περιόδους στις οποίες προγραμματίζεται να παρασχεθεί η υπηρεσία (π.χ. τις ώρες μη αιχμής).

- Την αξιοπιστία που παρέχει το δίκτυο στην εκτέλεση των όρων του συμβολαίου.

Στην παρούσα εργασία θεωρήσαμε ότι το δικτυακό περιβάλλον για το οποίο ισχύουν τα συμβόλαια κίνησης είναι ένα διαχειριζόμενο δίκτυο DiffServ/MPLS. Χρησιμοποιήσαμε τις παραμέτρους (διεύθυνση πηγής, διεύθυνση προορισμού, πόρτα εξόδου της πηγής, πόρτα εισόδου του προορισμού, πρωτόκολλο μεταφοράς) του πακέτου σηματοδότησης RESV του πρωτοκόλλου RSVP, προκειμένου να προσδιορίσουμε μοναδικά τη ροή κίνησης. Θεωρώντας το μοντέλο του LB για τον έλεγχο της κίνησης, χρησιμοποιήσαμε τις παραμέτρους του αντικειμένου TSPEC (βλέπε ενότητα 2.2.1.1) του πακέτου RESV για να ορίσουμε τους όρους συμμόρφωσης της κίνησης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε:

- Το Token Rate ρ ,
- το Token Bucket β ,
- το Peak Rate h ,
- το Maximum Policed Unit M , και
- το Minimum Policed Unit m .

Τα m , M αφορούν το ελάχιστο και το μέγιστο μέγεθος πακέτου αντίστοιχα, στα οποία επιτρέπεται η είσοδος στο δίκτυο και εφαρμόζεται ο έλεγχος του μοντέλου LB.

Η συμπεριφορά που ορίζεται για την κυκλοφορία της ροής κίνησης που δε συμμορφώνεται στις παραμέτρους κίνησης του συμβολαίου καθορίζεται από την κλάση ποιότητας υπηρεσίας που επιλέγεται για την κυκλοφορία. Έτσι, ανάλογα με την κλάση ποιότητας υπηρεσίας η επιπλέον κυκλοφορία μιας ροής κίνησης μπορεί να μορφοποιείται ώστε να υπακούει στις παραμέτρους κίνησης, να απορρίπτεται ή να κατηγοριοποιείται στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας Best Effort.

Οι ποσοτικές εγγυήσεις που παρέχονται για ποιότητα υπηρεσίας, όσον αφορά στη διέλευση (throughput) πακέτων, καθορίζονται από τις παραμέτρους κίνησης ρ , β , h , m , M του μοντέλου LB. Οι εγγυήσεις σε εύρος ζώνης, σε ανώτατη καθυστέρηση και σε απώλειες πακέτων καθορίζονται από τις παραμέτρους R και S του αντικειμένου RSPEC του πακέτου σηματοδότησης RESV του πρωτοκόλλου RSVP, αλλά και την κλάση ποιότητας υπηρεσίας του RSVP (βλέπε ενότητα 2.3). Αρχικά, οι εγγυήσεις αυτές δε χρησιμοποιούνται, για να μην περιπλακεί περισσότερο η διαδικασία διαπραγμάτευσης που θα περιγραφεί στο κεφάλαιο 4. Σχετικά με το ζήτημα αυτό επανερχόμαστε στην ενότητα 4.2.3.

Οι ποιοτικές εγγυήσεις για την κυκλοφορία μιας ροής κίνησης αφορούν στις εγγυήσεις στη μεταχείριση που θα έχει από το δίκτυο η ροή σε σχέση με τη μεταχείριση που θα έχουν οι υπόλοιπες ροές κίνησης που περνούν από το δίκτυο. Οι ποιοτικές εγγυήσεις για την κυκλοφορία μιας ροής κίνησης εξαρτώνται μόνο από την κλάση ποιότητας υπηρεσίας που επιλέγεται. Η συμπεριφορά που παρέχεται από κάθε PHB και η σχέση μεταξύ τους καθορίζεται σύμφωνα με τον ορισμό των διαφόρων PHB του δικτύου. Οπότε, το αν θα έχει καλύτερη (και πόσο) αντιμετώπιση (χρονοπρογραμματισμό αποστολής κίνησης, αυστηρότητα ποσοτικών εγγυήσεων) η κίνηση μιας ροής από την κίνηση μιας άλλης ροής εξαρτάται από την σχέση των PHB που επιλέγεται για καθεμιά τους.

Η χρονική περίοδος στην οποία προγραμματίζεται η παροχή της υπηρεσίας είναι στην περίπτωσή μας το συντομότερο δυνατό. Δηλαδή για κάθε ροή κίνησης η παροχή της υπηρεσίας ακολουθεί άμεσα την επιλογή του κατάλληλου συμβολαίου κίνησης και λαμβάνει χώρα σύμφωνα με αυτό.

Στην παρούσα εργασία ορίζουμε ένα νέο παράγοντα ποιότητας υπηρεσίας που αφορά στην αξιοπιστία που παρέχει το δίκτυο όσον αφορά στην εκτέλεση των όρων του συμβολαίου που τον ονομάζουμε *κίνδυνο ασυνέπειας (noncompliance risk (r))*. Ο κίνδυνος ασυνέπειας υποδηλώνει μια εκ των προτέρων διαβεβαίωση από τη πλευρά του δικτύου σχετικά με το άνω φράγμα στο ποσοστό της κίνησης που δε θα έχει την αντιμετώπιση που ορίζεται από το

συμβόλαιο κίνησης μιας ροής. Ο κίνδυνος ασυνέπειας καθορίζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και απαιτήσεις για τις κατανομές των παραμέτρων QoS ενός SLS. Συγκεκριμένα, ο κίνδυνος ασυνέπειας ενός SLS εκφράζει ένα άνω φράγμα στις άνω ουρές των κατανομών των παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας του SLS. Για παράδειγμα, ο κίνδυνος ασυνέπειας μπορεί να καθορίζει ότι ένα άνω όριο που έχει οριστεί για την καθυστέρηση μεταφοράς ενός πακέτου στο SLS μιας ροής κίνησης, μπορεί να παραβιασθεί από ένα ποσοστό της κυκλοφορίας της ροής που είναι μικρότερο ή ίσο με r . Σημειωτέον ότι, παρόλο που ο κίνδυνος ασυνέπειας είναι ένας παράγοντας που υπολογίζεται από το δίκτυο, είναι κατανοητός και από τους χρήστες. Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου (διαθέσιμη χωρητικότητα σε κάθε κλάση, διαθέσιμα μονοπάτια δρομολόγησης για κάθε κλάση), αλλά και από τις απαιτήσεις του χρήστη για παροχή εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας.

3.3 Χρήση Λειτουργιών RSVP

Χρησιμοποιούμε το πρωτόκολλο RSVP για την αποστολή αιτήσεων παροχής ποιότητας υπηρεσίας για τις διάφορες ροές κίνησης. Όμως, αυτές οι αιτήσεις γίνονται αντικείμενο επεξεργασίας και διαπραγμάτευσης μόνο για τον Policy Server και όχι για τους ενδιάμεσους δρομολογητές. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούμε το πακέτο σηματοδοσίας RESV του πρωτοκόλλου RSVP. Δεν κάνουμε δέσμευση πόρων ανά ροή με βάση το πρωτόκολλο RSVP στους δρομολογητές του δικτύου DiffServ, προκειμένου να αποφύγουμε τα μειονεκτήματα του πρωτοκόλλου RSVP. Για το σκοπό αυτό οι δρομολογητές του δικτύου DiffServ πρέπει να μην υποστηρίζουν/εκτελούν το πρωτόκολλο RSVP. Με τις παραμέτρους του πακέτου σηματοδοσίας RESV προσδιορίζουμε απόλυτα τη ροή κίνησης στην οποία θα παρασχεθεί η υπηρεσία. Επίσης, γνωρίζουμε με σαφήνεια τις απαιτήσεις του χρήστη για παροχή ποιότητας υπηρεσίας στη ροή κίνησης που θα λάβει. Έτσι, είμαστε σε θέση να δεσμεύουμε για κάθε ροή κίνησης τους πόρους που χρειάζεται.

Επίσης, το πρωτόκολλο RSVP δίνει τη δυνατότητα παρεμβολής στα πακέτα της σηματοδοσίας του, μέσω του πρωτοκόλλου COPS (βλέπε ενότητα 5.2), επεξεργασίας τους και αποδοχής ή όχι της αιτήσεως που μεταφέρουν. Για να μπορεί να γίνει αυτό πρέπει οι δρομολογητές στα άκρα του δικτύου DiffServ να υποστηρίζουν το πρωτόκολλο COPS. Σε συνδυασμό με τη στοίβα πρωτοκόλλων του λειτουργικού συστήματος Windows 2000, η σηματοδοσία του πρωτοκόλλου RSVP μπορεί να επιβάλλει τη μορφοποίηση, την απόρριψη και το μαρκάρισμα του πεδίου DS των πακέτων μιας ροής κίνησης από τον αποστολέα της.

Για το μαρκάρισμα του πεδίου DS των πακέτων μιας ροής κίνησης χρησιμοποιήσαμε το αντικείμενο DCLASS του πρωτοκόλλου RSVP. Το αντικείμενο αυτό μεταφέρει πληροφορία για την τιμή του DSCP των πακέτων μιας ροής από ένα δίκτυο DiffServ προς τους κόμβους του δικτύου που βρίσκονται στο μονοπάτι που ακολουθεί μέχρι τον αποστολέα. Το αντικείμενο DCLASS με την κατάλληλη τιμή DSCP εισάγεται από μια οντότητα υπεύθυνη για τη διαχείριση του δικτύου μέσα σε ένα πακέτο σηματοδοσίας RESV που μεταφέρει την αίτηση παροχής υπηρεσίας για μια ροή κίνησης. Το πακέτο σηματοδοσίας RESV κατευθύνεται προς τον αποστολέα της κυκλοφορίας μιας ροής κίνησης και μεταφέρει, αφού του προστεθεί το αντικείμενο DCLASS, την αίτηση για μαρκάρισμα των πακέτων στον κόμβο που είναι ικανός για αυτό στην είσοδο του δικτύου.

4 Περιγραφή Αρχιτεκτονικής

4.1 Η Αρχιτεκτονική

4.1.1 Οι Οντότητες

Θεωρούμε ένα περιβάλλον διαχειριζόμενου δικτύου DiffServ πολλαπλών κόμβων στο οποίο παρέχονται τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες με διάφορα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας. Αυτό το περιβάλλον δικτύου λειτουργεί σαν ελεύθερη αγορά υπηρεσιών επιπέδου εφαρμογής, η οποία υλοποιείται από μια αγορά υπηρεσιών δικτύου. Οι διαφοροποιημένες υπηρεσίες του DiffServ δικτύου είναι υλοποιημένες με το πρωτόκολλο MPLS. Πολλαπλοί παροχείς συνδεσιμότητας μοιράζονται τον έλεγχο και την ιδιοκτησία των πόρων του δικτύου. Η συνολική ευθύνη, όμως, για την παροχή μιας υπηρεσίας δικτύου από άκρη σε άκρη ανήκει κάθε φορά σε ένα παροχέα υπηρεσιών δικτύου (NSP) που δραστηριοποιείται στο δίκτυο αυτό. Κάθε NSP είναι συμβεβλημένος με έναν ή περισσότερους παροχείς συνδεσιμότητας προκειμένου να παρέχει στους πελάτες του υπηρεσίες δικτύου από άκρη σε άκρη. Κάθε χρήστης του δικτύου γίνεται συνδρομητής σε έναν NSP για να έχει πρόσβαση στις υπηρεσίες του δικτύου. Για λόγους απλότητας και χωρίς απώλεια της γενικότητας θα θεωρήσουμε στο εξής ότι ένας και μόνο NSP δραστηριοποιείται στο περιβάλλον δικτύου που αναφέραμε. Κατά την εγγραφή του, ένας χρήστης αρχικοποιεί το αρχείο προσωπικών προτιμήσεων (user profile), το οποίο περιέχει πληροφορίες για τις προτιμήσεις του χρήστη για τις υπηρεσίες δικτύου που πρόκειται να χρησιμοποιήσει, π.χ. για το βαθμό αξιοπιστίας που απαιτεί από το δίκτυο ή το ποσό που είναι διατεθειμένος να πληρώσει για να λάβει την υπηρεσία στο καλύτερο επίπεδο QoS. Το προφίλ του χρήστη ενημερώνεται κατάλληλα κατά τη διάρκεια της συνδρομής, ώστε οι πληροφορίες που περιέχει να ανταποκρίνονται στις αλλαγές των επιλογών του χρήστη. Επίσης κατά την εγγραφή, ο NSP διαθέτει σε κάθε χρήστη έναν ευφυή προσωπικό αντιπρόσωπο (User Agent, UA) για να διαπραγματεύεται τα SLS του χρήστη για λογαριασμό του χρήστη, με βάση το προφίλ του. Ένας UA βρίσκεται σε κάθε σταθμό εργασίας στον οποίο έχουν πρόσβαση οι εγγεγραμμένοι χρήστες στις υπηρεσίες δικτύου. Το αρχείο προτιμήσεων κάθε χρήστη αποθηκεύεται σε μια υπηρεσία καταλόγου (directory service) και επαναφέρεται και αποθηκεύεται στο σταθμό εργασίας του χρήστη όταν αυτός αρχίζει την εργασία του.

Ήδη αναφέραμε ότι για την επιλογή του SLS ενός χρήστη την παροχή μιας υπηρεσίας δικτύου λαμβάνει χώρα διαδικασία διαπραγμάτευσης μεταξύ του χρήστη και του NSP στον οποίο είναι εγγεγραμμένος ο χρήστης. Ο αντιπρόσωπος του NSP σε αυτή τη διαδικασία είναι ο Policy Server (PS). Ο PS είναι υπεύθυνος για τη λήψη των κατάλληλων αποφάσεων για τη διάθεση των πόρων του δικτύου, έτσι ώστε να εγγυάται την αποδοτικότητα στη χρήση του δικτύου σύμφωνα με την πολιτική που ακολουθείται για τη διαχείριση των πόρων του. Η επιλογή του κατάλληλου SLS για κάθε χρήστη λαμβάνεται από τον UA του. Οι κατευθύνσεις πολιτικής για τη διαχείριση των πόρων του δικτύου αποθηκεύονται σε μια υπηρεσία καταλόγου, μοναδική για το δίκτυο του NSP, που στο εξής θα ονομάζεται υπηρεσία καταλόγου πολιτικής (Policy Directory, PD). Επίσης, μια υπηρεσία καταλόγου, η οποία στο εξής θα ονομάζεται υπηρεσία καταλόγου πληροφοριών (Information Directory, ID), χρησιμοποιείται για την αποθήκευση πληροφοριών που αφορούν στην τρέχουσα κατάσταση του δικτύου, όσον αφορά τη χρήση των πόρων του. Θεωρούμε την ύπαρξη κατάλληλων οντοτήτων λογισμικού που ενημερώνουν την ID όσο συχνά χρειάζεται, ώστε η πληροφορία που περιέχει να προσεγγίζει την πραγματικότητα. Έτσι, ο PS είναι σε θέση να εφαρμόζει την πολιτική του NSP για τη διαχείριση των πόρων του δικτύου, αλλά και την κίνηση που προέρχεται από συγκεκριμένες εφαρμογές ή χρήστες. Για λόγους απόδοσης, είναι προτιμότερο να υπάρχουν περισσότεροι από έναν PS στο δίκτυο. Η επιλογή του κατάλληλου PS, αλλά και το ζήτημα συνέπειας της πληροφορίας που αποθηκεύει ο κάθε PS μελετώνται

στην ενότητα 6.3. Στο εξής, για λόγους απλότητας, θα υποθέτουμε την ύπαρξη ενός μόνο PS στο διαχειριζόμενο δίκτυο DiffServ.

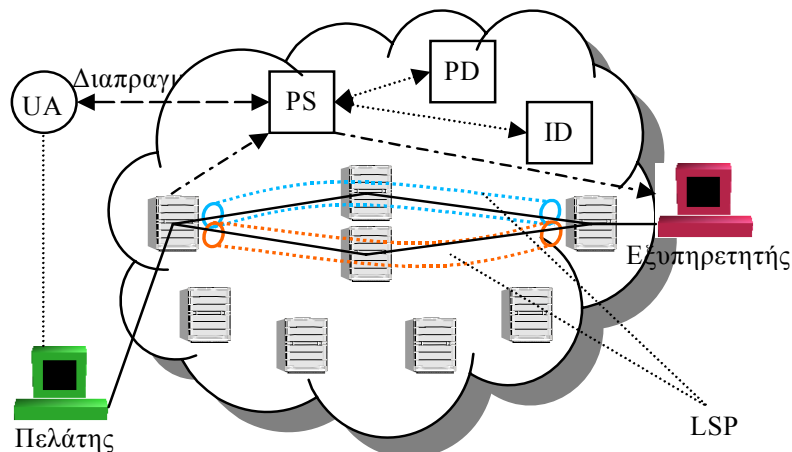
4.1.2 Λειτουργικότητα των Οντοτήτων

Ο UA ενός χρήστη επιλέγει το κατάλληλο SLS για το χρήστη κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης. Ο PS χρεώνει κατάλληλα τα SLS, ώστε να ωθήσει τους χρήστες να επιλέξουν το SLS που πραγματικά χρειάζονται για την άρτια εξυπηρέτησή τους (συμβατότητα με κίνητρα, incentive compatibility) και αυτό να είναι ένα από τα SLS που εξυπηρετούν την πολιτική διαχείρισης του δικτύου. Κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης, ο UA ενός χρήστη επιλέγει το SLS x που μεγιστοποιεί το *καθαρό όφελος* του χρήστη, δηλαδή λύνει το παρακάτω πρόβλημα μεγιστοποίησης:

$$\max_x \{u(x) - c(x)\}$$

όπου $u(\cdot)$ είναι η *συνάρτηση ωφελιμότητας* του χρήστη [18], και $c(\cdot)$ είναι μια συνάρτηση που δίνει την αναμενόμενη χρέωση για την παροχή μιας υπηρεσίας που συμμορφώνεται στις παραμέτρους ελέγχου κίνησης (LB) ενός SLS. Το $u(\cdot)$ εκφράζεται και το $c(\cdot)$ εκφράζονται σε χρηματικές μονάδες. Η συνάρτηση ωφελιμότητας του χρήστη εκφράζει τη χρησιμότητα ή την ικανοποίηση του χρήστη από την παροχή μιας υπηρεσίας. Η χρέωση αποφασίζεται από τον κοντινότερο, προς την εφαρμογή ενός χρήστη, PS με τον οποίο διαπραγματεύεται ο UA του χρήστη για την επιλογή κατάλληλου SLS. Ο PS είναι σε θέση να υπολογίζει και την πραγματική χρέωση του χρήστη.

Για απλότητα, έχουμε θεωρήσει ότι ο παραλήπτης της κυκλοφορίας απολαμβάνει την ωφελιμότητα που παράγεται από τις διάφορες υπηρεσίες που παρέχονται. Για τη μεταφορά των αιτήσεων των χρηστών για παροχή QoS (το περιεχόμενο των οποίων θα διευκρινιστεί κατωτέρω) από τις εφαρμογές τους στο δίκτυο χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο RSVP. Με αυτό τον τρόπο, μια εφαρμογή ζητά QoS με ένα σαφή, λεπτομερή και τυποποιημένο τρόπο που είναι απαραίτητος για τη διαδικασία δέσμευσης των πόρων του δικτύου. Όμως, ο κάθε χρήστης ζητά ένα επίπεδο QoS με έναν αφηρημένο τρόπο: μετακινώντας το δείκτη μιας κυλιόμενης μπάρας στη διεπιφάνεια της εφαρμογής που εκφράζει τις προτιμήσεις του (για αύξηση ή μείωση του QoS), και δηλώνοντας το ποσό που είναι διατεθειμένος να πληρώσει και τον άνω κίνδυνο ασυνέπειας που μπορεί να ανεχθεί από το δίκτυο. Θα δούμε στις επόμενες ενότητες πώς πραγματοποιείται η αίτηση από το χρήστη για παροχή QoS με τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Μια λαμβάνουσα εφαρμογή ενός χρήστη στέλνει ένα μήνυμα RESV για να στέλνει τις απαιτήσεις της, σύμφωνα και με τις προτιμήσεις του χρήστη για παροχή QoS, προς την εφαρμογή του εξυπηρετητή που έχει επιλέξει. Η αίτηση αυτή γίνεται αντιληπτή από τον εκάστοτε δρομολογητή εισόδου της αίτησης στο δίκτυο και προωθείται στον PS (δηλαδή, στον αντιπρόσωπο του NSP). Ακολουθεί διαδικασία διαπραγμάτευσης μεταξύ του PS και του UA της λαμβάνουσας εφαρμογής του χρήστη. Μετά το πέρας της διαδικασίας διαπραγμάτευσης και την επιλογή SLS, ο PS αναθέτει στη ροή κίνησης αυτού του SLS τους κατάλληλους πόρους του δικτύου μέσω του πρωτοκόλλου MPLS, και ενημερώνει την εφαρμογή του αποστολέα της πληροφορίας αυτής της ροής κίνησης, ζητώντας της να αρχίσει την αποστολή της πληροφορίας με βάση το επιλεγμένο SLS. Στο Σχήμα 6, βλέπουμε ένα παράδειγμα της αρχιτεκτονικής που ορίσαμε στο οποίο ο χρήστης του σταθμού εργασίας στον οποίο βρίσκεται ένας «πελάτης» επιθυμεί να λάβει κίνηση πολυμέσων από το σταθμό εργασίας στον οποίο βρίσκεται ένας «εξυπηρετητής».



Σχήμα 6: Η αρχιτεκτονική γενικά.

Ο NSP του δικτύου παρέχει ορισμένες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας σε κάθε μονοπάτι (LSP) του δικτύου. Ο παροχέας του δικτύου πρέπει να εξασφαλίζει ομοιόμορφα χαρακτηριστικά για καθεμιά κλάση ποιότητας υπηρεσίας, σε όλα τα μονοπάτια τα οποία υλοποιούν κάθε κλάση. Αυτό σημαίνει, ότι μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας παρέχει το ίδιο επίπεδο QoS σε όλα τα μονοπάτια που την υλοποιούν. Προκειμένου αυτό να επιτυγχάνεται, ο NSP πρέπει να υλοποιεί κάποιους μηχανισμούς για ισοκατανομή του φόρτου κυκλοφορίας ανάμεσα στις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας στα διάφορα LSP. Ωστόσο, ο NSP θα μπορούσε να επιτρέψει διαφορετικά χαρακτηριστικά για την ίδια κλάση ποιότητας υπηρεσίας σε διαφορετικά μονοπάτια, και να αφήσει τους χρήστες (μέσω της διαδικασίας επιλογής SLS) να πραγματοποιήσουν την ισοκατανομή του φόρτου κυκλοφορίας. Σε αυτή την περίπτωση, θα είχαν δεσμευθεί διαφορετικοί πόροι (σε χωρητικότητα και σε μέγεθος ενταμιευτή) σε διαφορετικά μονοπάτια για μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας, και για το λόγο αυτό θα παρέχονταν διαφορετικό επίπεδο QoS από την ίδια κλάση ποιότητας υπηρεσίας σε διαφορετικά μονοπάτια. Οι παράμετροι λειτουργίας (δηλαδή η παράμετρος *χώρου s* και η παράμετρος *χρόνου t*) [9] και άλλα στατιστικά χαρακτηριστικά είναι διαφορετικά ανά επίπεδο QoS. Προκειμένου να παρέχονται στους χρήστες τα σωστά κίνητρα για την επιλογή SLS, διαφορετικά επίπεδα QoS χρεώνονται διαφορετικά και πιθανώς έχουν διαφορετικό κίνδυνο ασυνέπειας για την ίδια ροή κίνησης. Ο PS πρέπει να ορίσει τα κατάλληλα συμβόλαια υπηρεσίας που είναι ικανά να εξυπηρετήσουν την κίνηση κάθε νέου SLS και να τα χρεώσει κατάλληλα, επικοινωνώντας με τους παροχείς συνδεσιμότητας. Ο UA πρέπει να επιλέξει το SLS (που αντιστοιχεί σε ένα επίπεδο υπηρεσίας) που μεγιστοποιεί το καθαρό όφελος του χρήστη. Για λόγους απλότητας, υποθέτουμε ότι ο παροχέας του δικτύου υλοποιεί κάποιους μηχανισμούς για ισοκατανομή της κυκλοφορίας μεταξύ των κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας στα διάφορα μονοπάτια που υλοποιείται η καθεμιά. Έτσι η επιλογή του μονοπατιού από το οποίο θα περάσει η ροή κίνησης ενός νέου SLS καθίσταται ανεξάρτητη με το χρήστη αυτού του SLS. Οπότε, στο εξής, ο όρος κλάση ποιότητας υπηρεσίας αναφέρεται απαραίτητα σε ένα επίπεδο υπηρεσίας. Πρέπει να σημειώσουμε ότι οι εξυπηρετητές αποστέλλουν μηνύματα PATH του πρωτοκόλλου RSVP που μεταφέρουν τις παραμέτρους κίνησης για την αποστολή της πληροφορίας στην ανώτατη κλάση ποιότητας υπηρεσίας του δικτύου στην οποία παρέχεται και χαρακτηριστικά για το μονοπάτι που ακολουθούν μέχρι τον προορισμό τους. Όμως, αυτά δεν χρησιμοποιούνται από τις εφαρμογές των παραληπτών της κίνησης και δεν γίνονται αντιληπτά από τους δρομολογητές εισόδου τους στο δίκτυο, οπότε δεν προωθούνται στον PS και δεν πραγματοποιείται διαδικασία διαπραγματεύσεως για αυτά. Επίσης, πρέπει να τονίσουμε ότι όλα τα μηνύματα της σηματοδότησης του πρωτοκόλλου RSVP δεν πραγματοποιούν δέσμευση πόρων βάσει του πρωτοκόλλου RSVP (βλέπε ενότητα 2.2.1), αλλά χρησιμοποιούνται μόνο για τη μεταφορά των αιτήσεων δέσμευσης πόρων (μηνύματα RESV).

4.1.3 Η Μέθοδος Χρέωσης

Ο Policy Server υπολογίζει τη χρέωση για κάθε προσφερόμενο SLS με βάση το ισοδύναμο εύρος ζώνης για αυτό, χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο (βλέπε [3]):

$$c_i(x) = \bar{a}_i(x; m) p_i T_i$$

$$\bar{a}_i(x; m) = \frac{1}{s_i t_i} \log \left[1 + \frac{m}{H(t_i)} (e^{s_i t_i H(t_i)} - 1) \right]$$

$$H(t_i) = \min \{ h, \rho + \beta / t_i \}$$

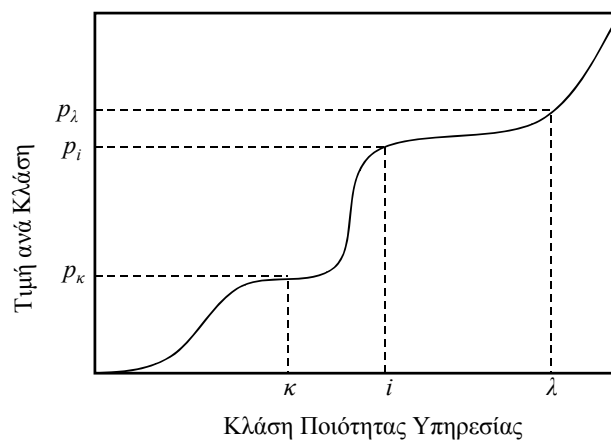
Το x στον παραπάνω τύπο είναι το SLS (όπως ορίστηκε στην Ενότητα 3.2) που έχει ισοδύναμο μέγιστο ρυθμό $H(t)$ και μέσο ρυθμό αποστολής κίνησης $m \in [0, \rho]$. Ο δείκτης i προσδιορίζει μια συγκεκριμένη κλάση ποιότητας υπηρεσίας i . Το T_i είναι η χρονική διάρκεια του περιεχομένου μιας υπηρεσίας σε μια κλάση υπηρεσίας i , η οποία είτε είναι γνωστή εκ των προτέρων σε μια εφαρμογή εξυπηρετητή (π.χ. για μια ταινία), είτε μπορεί να εκτιμάται από τον UA βάσει παλαιότερης πληροφορίας (π.χ. τη διάρκεια μιας υπηρεσίας παρόμοιου περιεχομένου). Στη συνέχεια, για λόγους απλότητας, το T_i θα αναφέρεται ως T . Το p_i είναι η τιμή ανά μονάδα ισοδύναμου εύρους ζώνης $\bar{a}_i(x; m)$ της κλάσης ποιότητας υπηρεσίας i . Οι παράμετροι s_i , t_i περιγράφουν το σημείο λειτουργίας μιας κλάσης ποιότητας υπηρεσίας i , δηλαδή το σημείο λειτουργίας της συμφορημένης σύνδεσης του μονοπατιού ή των μονοπατιών, στα οποία υλοποιείται η κλάση ποιότητας υπηρεσίας i . Υπενθυμίζεται ότι το $\bar{a}_i(x; m)$ είναι ένα άνω φράγμα στο πραγματικό ισοδύναμο εύρος ζώνης μιας ροής κίνησης και αντιστοιχεί στο ισοδύναμο εύρος ζώνης της ροής κίνησης που αποστέλλει μια πηγή δύο καταστάσεων ON-OFF (βλέπε Ενότητα 2.4.2). Η παραπάνω μέθοδος χρέωσης βασίζεται στην υπόθεση ότι όλες οι ροές κίνησης ενός μονοπατιού σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας διασχίζουν μια συγκεκριμένη σύνδεση, η οποία είναι η πιο συμφορημένη από όλες τις συνδέσεις του μονοπατιού για αυτή την κλάση ποιότητας υπηρεσίας, και χρεώνονται σύμφωνα με τη χρήση πόρων σε αυτή τη σύνδεση. Η υπόθεση αυτή δε θεωρείται δεσμευτική, γιατί και σε αυτή την περίπτωση η αναμενόμενη χρέωση μπορεί να υπολογιστεί όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.2.4.

Αυτή η μέθοδος χρέωσης εφαρμόζεται για τον υπολογισμό τόσο της αναμενόμενης χρέωσης ανά μονάδα χρόνου για μια νέα ροή κίνησης, όσο και της πραγματική χρέωσης ανά μονάδα χρόνου που καλείται να πληρώσει ένας χρήστης μετά την παροχή μιας υπηρεσίας σε αυτόν από το δίκτυο. Τα ποσά της αναμενόμενης και της πραγματικής χρέωσης ενός χρήστη για μια ροή κίνησης αναμένεται να διαφέρουν ελάχιστα. Ο μόνος λόγος διαφοροποίησης μεταξύ τους είναι η όποια διαφορά του υπολογισμένου από στατιστικές μετρήσεις μέσου ρυθμού (για τον υπολογισμό της αναμενόμενης χρέωσης) από τον πραγματικό μέσο ρυθμό αποστολής της κίνησης από έναν εξυπηρετητή. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι το σημείο λειτουργίας (s , t) ενός συνδέσμου δεν επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη μιας νέας ροής κίνησης στην υπάρχουσα κυκλοφορία του συνδέσμου, όταν το μίγμα των ειδών της υπάρχουσας κυκλοφορίας δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την προσθήκη της νέας ροής σε αυτό. Αυτές οι διαφορές δεν είναι σημαντικές, γιατί:

- i) στην αρχιτεκτονική υπηρεσιών DiffServ, όπως έχει οριστεί από την IETF, οι εγγυήσεις για παροχή QoS μπορούν να μην είναι αυστηρές.
- ii) τελικά οι χρήστες χρεώνονται για τους πόρους του δικτύου που πραγματικά καταναλώνουν, δηλαδή σύμφωνα με τον πραγματικό μέσο ρυθμό που αποστέλλεται σε αυτούς κυκλοφορία, και το πραγματικό σημείο λειτουργίας της κλάσης ποιότητας υπηρεσίας στο μονοπάτι από το οποίο περνά η κίνηση.

Τα κίνητρα που παρέχονται με αυτή τη μέθοδο χρέωσης ωθούν τους χρήστες να επιλέγουν τις πιο συντηρητικές παραμέτρους κίνησης $\{h, (\rho, \beta)\}$ για τη μεταφορά της κυκλοφορίας μιας υπηρεσίας σε μια συγκεκριμένη κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Αυτό γίνεται προκειμένου να ελαχιστοποιείται το ισοδύναμο εύρος ζώνης και κατά συνέπεια το ποσό χρέωσης των χρηστών για την υπηρεσία αυτή.

Θεωρούμε ότι έχουμε ένα συνεχές διατεταγμένο σύνολο I από κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας στο δίκτυο DiffServ. Η μεταβλητή $i \in I$ έχει τιμή 0 για τη χαμηλότερη κλάση ποιότητας υπηρεσίας και τιμή 1 για την υψηλότερη. Έτσι, η τιμή i μιας ενδιάμεσης κλάσης ποιότητας υπηρεσίας μπορεί να θεωρηθεί ως η ποιότητα υπηρεσίας που παρέχεται από αυτή σε σχέση με την υψηλότερη κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Σε αυτή την περίπτωση, η τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης p_i για κάθε επίπεδο QoS i μπορεί να δίνεται από μια συνάρτηση $P(i)$. Γενικά, για δεδομένο x , η συνάρτηση χρέωσης $c_i(x)$ πρέπει να είναι αύξουσα όταν η QoS αυξάνει, ώστε να παρέχονται ορθά κίνητρα στους χρήστες. Το ισοδύναμο εύρος ζώνης είναι αύξουσα συνάρτηση της παραμέτρου t (σημειώστε ότι η παράμετρος s παραμένει σταθερή για περίπου το ίδιο μίγμα ειδών κίνησης σε κάποια κλάση ποιότητας υπηρεσίας). Έτσι, η συνάρτηση $P(i)$ πρέπει να είναι αύξουσα (όχι απαραίτητα γνησίως). Αν οι τιμές είναι στατικά ορισμένες για κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας i που έχει υλοποιηθεί και παρέχεται σε ένα δίκτυο DiffServ, τότε αυτές πρέπει να προκύπτουν από τη συνάρτηση $P(i)$. Αν όμως οι τιμές μεταβάλλονται δυναμικά, τότε κάθε τιμή p_i μιας υλοποιημένης κλάσης ποιότητας υπηρεσίας i που παρέχεται από ένα δίκτυο DiffServ πρέπει να παίρνει τιμές στο διάστημα $[p_\kappa, p_\lambda]$ με $\kappa < i < \lambda$, όπου κ, λ οι γειτονικές ως προς την i υλοποιημένες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας, ούτως ώστε η μονοτονία της συνάρτησης $P(i)$ να διατηρείται. Επίσης, αν βελτιώνοντας την κλάση ποιότητας υπηρεσίας αλλάζουν και άλλες παράμετροι του συμβολαίου κίνησης, δηλαδή αλλάζει το x (και βελτιώνεται), τότε η συνάρτηση $c_i(x)$ θα είναι αύξουσα όταν η $P(i)$ είναι αύξουσα, αφού βελτιώνοντας το x το ισοδύναμο εύρος ζώνης προφανώς θα αυξάνει..



Σχήμα 7: Το εύρος των τιμών όταν ορίζονται δυναμικά, αλλά και οι στατικές τιμές τους πρέπει να διατηρούν τη μονοτονία της συνάρτησης $P(\cdot)$.

4.1.4 Κατανομή Πληροφορίας

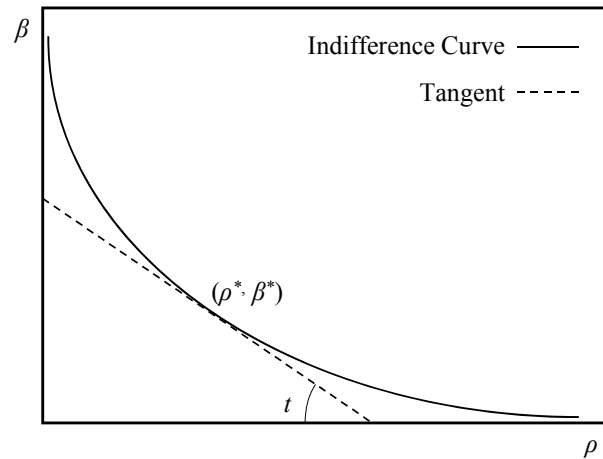
Προκειμένου η αρχιτεκτονική που περιγράψαμε να είναι εφικτή και επεκτάσιμη και να γίνεται η κατηγοριοποίηση της κίνησης μιας ροής πληροφορίας σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας με τη διαδικασία διαπραγμάτευσης του συμβολαίου της που θα περιγράψουμε στην ενότητα 4.1.6, πρέπει να υπάρχει διαθέσιμη η απαραίτητη πληροφορία και να ανταλλάσσεται με κατάλληλο τρόπο μεταξύ των οντοτήτων της αρχιτεκτονικής. Σε αυτή την ενότητα, περιγράφουμε την πληροφορία που χρειάζεται, το πώς διαμοιράζεται αυτή για την εξυπηρέτηση των παραπάνω στόχων, και αιτιολογούμε την προσέγγισή μας.

Ο UA, ως αντιπρόσωπος του χρήστη, αποθηκεύει το μοντέλο ωφελιμότητας του χρήστη και έχει πρόσβαση στο αρχείο προτιμήσεών του. Από αυτό μπορεί να πάρει πληροφορία για τον ανεκτό κίνδυνο ασυνέπειας για το χρήστη και το ανώτατο ποσό που είναι διατεθειμένος να πληρώσει για αυτή την υπηρεσία στο ανώτερο επίπεδο QoS. Επιπροσθέτως, ο UA μπορεί να επικοινωνεί με την εφαρμογή του χρήστη για την ανταλλαγή οποιασδήποτε χρήσιμης πληροφορίας. Ο PS έχει τον πλήρη έλεγχο της διαχείρισης των πόρων του δικτύου. Οπότε, ο PS είναι σε θέση να γνωρίζει το σημείο λειτουργίας (s, t) , το διαθέσιμο εύρος ζώνης, τον κίνδυνο ασυνέπειας και την τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης για κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Προκειμένου ο PS να δίνει στους χρήστες κάποια πληροφορία για τις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας που παρέχονται από το δίκτυο, δημοσιοποιεί τις τιμές της παραμέτρου t ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Ωστόσο, το πώς η εφαρμογή του χρήστη γνωρίζει τις κατώτατες ανεκτές απαιτήσεις του χρήστη για παροχή QoS προκειμένου να κάνει την αίτηση για κατηγοριοποίηση της κίνησης (νέο SLS) δεν είναι προφανές. Επίσης, αποτελεί ερωτηματικό ο τρόπος με τον οποίο ο PS υπολογίζει τις παραμέτρους κίνησης για τα δυνατά SLS σε κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Αυτά τα ερωτήματα απαντιούνται στις επόμενες παραγράφους.

Θεωρούμε ότι κάθε εξυπηρετητής που ανήκει σε ένα παροχέα υπηρεσιών επιπέδου εφαρμογής, υπολογίζει, αποθηκεύει και δημοσιοποιεί στατιστικά όσον αφορά στην απόδοση στο δίκτυο των υπηρεσιών που παρέχει. Αυτό είναι λογικό να συμβαίνει (και συμβαίνει σε αρκετές περιπτώσεις), προκειμένου ένας εξυπηρετητής να αποδειξει την αξιοπιστία του και να προσελκύσει νέους πελάτες. Ένας εξυπηρετητής δημοσιοποιεί τα εξής: τις εφικτές παραμέτρους κίνησης, δηλαδή τις παραμέτρους $\{h, (\rho, \beta)\}$ του μοντέλου LB, και το μέσο ρυθμό m , με τις οποίες η κίνηση κάθε αποθηκευμένου περιεχομένου (π.χ. ταινία) της υπηρεσίας αποστέλλεται σε κάποια κλάση ποιότητας υπηρεσίας από έναν εξυπηρετητή, και τη χρονική διάρκεια του περιεχομένου της υπηρεσίας T στην κλάση αυτή.

Επιπροσθέτως, ένας εξυπηρετητής έχει το κίνητρο, λόγω ανταγωνισμού, να υπολογίζει, να δημοσιοποιεί και να χρησιμοποιεί για την αποστολή της κίνησης τις παραμέτρους κίνησης που ελαχιστοποιούν τη χρέωση του χρήστη για μια παρεχόμενη υπηρεσία σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Ένας εξυπηρετητής είναι σε θέση να το κάνει αυτό αν γνωρίζει τον τρόπο που χρεώνει ο NSP. Όπως έχει ήδη εξηγηθεί στην προηγούμενη ενότητα, ο NSP χρεώνει ανάλογα με το ισοδύναμο εύρος ζώνης για το SLS ενός χρήστη. Ένας εξυπηρετητής πρέπει να υπολογίσει παραμέτρους αποστολής κίνησης $\{h, (\rho, \beta)\}$ που ελαχιστοποιούν τη χρέωση του χρήστη για την παροχή της υπηρεσίας σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Ο μέγιστος ρυθμός αποστολής κίνησης h για κάθε παρεχόμενο περιεχόμενο σε κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας εξαρτάται το ποσό της μορφοποίησης που πραγματοποιεί ένας εξυπηρετητής για την αποστελλόμενη κίνηση του περιεχομένου. Ένας μικρότερος μέγιστος ρυθμός αποστολής κίνησης είναι αποτέλεσμα περισσότερης μορφοποίησης της κίνησης, δηλαδή μεγαλύτερης καθυστέρησης μέχρι την αποστολή της κίνησης στο δίκτυο. Όπως εξηγείται στο [3], δεδομένου ενός μέγιστου ρυθμού αποστολής κίνησης, υπάρχουν ζεύγη τιμών (ρ, β) για τα οποία όλη η αποστελλόμενη κίνηση συμμορφώνεται στις παραμέτρους κίνησης αυτές. Αυτά τα ζεύγη τιμών σχηματίζουν μια καμπύλη αδιαφορίας σαν αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 8. Το ισοδύναμο εύρος ζώνης για ένα SLS σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας αυξάνει όσο αυξάνει ο ισοδύναμος μέγιστος ρυθμός $H(t) = \min\{h, \rho + \beta/t\}$. Ένας εξυπηρετητής πρέπει να επιλέξει από την καμπύλη αδιαφορίας το ζεύγος τιμών (ρ, β) που ελαχιστοποιεί το H . Αν ο παράγοντας που ελαχιστοποιεί το H είναι ο μέγιστος ρυθμός αποστολής h , τότε η επιλογή του ζεύγους τιμών (ρ, β) δεν επηρεάζει τη χρέωση ενός χρήστη. Διαφορετικά, αν ο παράγοντας που ελαχιστοποιεί το H είναι το $\rho + \beta/t$, τότε το ζεύγος τιμών (ρ^*, β^*) που ελαχιστοποιεί τη χρέωση ενός χρήστη δίνεται από το σημείο όπου η εφαπτομένη στην καμπύλη αδιαφορίας έχει κλίση $-t$. Έτσι, ένας εξυπηρετητής υπολογίζει τις παραμέτρους αποστολής κίνησης $\{h, (\rho^*, \beta^*)\}$ που ελαχιστοποιούν τη χρέωση για ένα χρήστη για μια παρεχόμενη πληροφορία σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας ενός μονοπατιού που

χαρακτηρίζεται από την τιμή του t . Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι αναγκαίο για τον PS να δημοσιοποιεί τις τιμές της χωρικής παραμέτρου s . Επιπλέον, η παραπάνω διαδικασία για την επιλογή των παραμέτρων (ρ, β) είναι έγκυρη, ανεξάρτητα από το αν η διάρκεια του περιεχομένου της υπηρεσίας T είναι γνωστή στον PS ή πρέπει να εκτιμηθεί από τον UA βάσει παλαιότερων εκτελέσεων της υπηρεσίας προκειμένου να υπολογισθεί το ποσό που διατίθεται να πληρώσει ο χρήστης ανά μονάδα χρόνου της υπηρεσίας. Στο εξής θεωρούμε ότι για κάθε τριάδα παραμέτρων $\{h, (\rho, \beta)\}$ που προσφέρει ο PS τα (ρ, β) είναι βέλτιστα δεδομένου του h .



Σχήμα 8: Η καμπύλη αδιαφορίας των ζευγαριών τιμών (ρ, β) για μια καθυστέρηση μορφοποίησης (ένα μέγιστο ρυθμό h) και για ένα ορισμένο ποσοστό της κίνησης που συμμορφώνεται στις παραμέτρους $\{h, (\rho, \beta)\}$.

Στη συνέχεια, εξηγείται πώς μια λαμβάνουσα εφαρμογή χρήστη είναι σε θέση να υπολογίζει τις κατώτατες ανεκτές απαιτήσεις του χρήστη για παροχή QoS. Ο χρήστης προσδιορίζει την κατώτατη ανεκτή κλάση ποιότητας υπηρεσίας με έναν αφηρημένο τρόπο: μέσω μιας κυλιόμενης μπάρας στη διεπιφάνεια χρήσης της εφαρμογής. Επίσης, ο χρήστης προσδιορίζει ένα ανώτατο ποσό W_{max} που διατίθεται να πληρώσει προκειμένου να λάβει το περιεχόμενο μιας υπηρεσίας στην ανώτατη κλάση ποιότητας υπηρεσίας, και ένα άνω φράγμα στον κίνδυνο ασυνέπειας r_{user} που μπορεί να ανεχθεί από το δίκτυο. Τα W_{max} , r_{user} , και η κατώτατη κλάση ποιότητας υπηρεσίας δίνονται από την εφαρμογή του χρήστη στο UA του, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης. Από αυτά, η αίτηση δέσμευσης πόρων περιέχει μόνο την κατώτατη ανεκτή κλάση υπηρεσίας σε κάποιο πεδίο (π.χ. Token Rate) του μηνύματος RESV.

Στην περίπτωση που ο εξυπηρετητής δεν έχει αποθηκευμένο το περιεχόμενο μιας υπηρεσίας, τότε δε γνωρίζει (και επομένως δε δημοσιεύει) το μέσο ρυθμό αποστολής της κίνησής του m , και τη χρονική διάρκειά του T σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Τότε τα m , T εκτιμώνται από τον UA του χρήστη που ζητά την υπηρεσία αυτή, ως στατιστικοί μέσοι όροι προηγούμενων εκτελέσεων της υπηρεσίας με παρόμοιο περιεχόμενο στις διάφορες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας από το χρήστη αυτόν. Οι παράμετροι αυτές γνωστοποιούνται στον PS κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης, προκειμένου αυτός να υπολογίσει την αναμενόμενη χρέωση της υπηρεσίας σε κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Σημειοτέον ότι οι παράμετροι κίνησης $\{h, (\rho, \beta)\}$ εξακολουθούν να είναι γνωστές στους εξυπηρετητές, και ότι οι εξυπηρετητές έχουν κίνητρα λόγω ανταγωνισμού να δημοσιεύουν τις βέλτιστες παραμέτρους κίνησης αυτές για κάθε μη αποθηκευμένο περιεχόμενο σε κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας.

Μέχρι στιγμής, έχουμε περιγράψει μια κατανομή πληροφορίας, στην οποία κάθε τμήμα της πληροφορίας αποθηκεύεται από το συστατικό μέρος της αρχιτεκτονικής το οποίο έχει κάποιο κίνητρο να το κάνει. Στις επόμενες ενότητες, θα εξηγήσουμε τον τρόπο που τα συστατικά

μέρη της αρχιτεκτονικής ενεργούν και επικοινωνούν, προκειμένου ο UA να κάνει αποδοτική επιλογή για κάθε SLS.

4.1.5 Το Μοντέλο Ωφελιμότητας του Χρήστη (User Utility Model)

Σε αυτή την ενότητα θα δούμε πώς ο UA αντιπροσωπεύει τον χρήστη στη διαδικασία διαπραγμάτευσης, επιλέγοντας ένα SLS που προσεγγίζει τις πραγματικές προτιμήσεις του χρήστη όσο το δυνατόν περισσότερο. Για το λόγο αυτό, μοντελοποιούμε την ωφελιμότητα του χρήστη ως συνάρτηση των διαφόρων παραμέτρων που περιέχονται σε ένα SLS. Η πληροφορία για τα χαρακτηριστικά της κίνησης που περιέχονται σε ένα SLS περιλαμβάνει μερικές από τις παραμέτρους ενός μηνύματος RESV του πρωτοκόλλου RSVP, όπως είναι ο μέγιστος ρυθμός αποστολής κίνησης h και οι άλλες παράμετροι του μοντέλου LB (ρ , β). Σημειώτεον ότι μια ροή κίνησης με τις ίδιες παραμέτρους LB $\{h, (\rho, \beta)\}$ εξυπηρετείται διαφορετικά από διαφορετικές κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας, όσον αφορά στη διέλευση (throughput), την καθυστέρηση, τη διακύμανση καθυστέρησης και τις απώλειες των πακέτων της. Μια λαμβάνουσα εφαρμογή ενός χρήστη ζητά μια ορισμένη κατώτατη κλάση ποιότητας υπηρεσίας για το SLS της κίνησης που θα λάβει. Συγκεκριμένα, το SLS χαρακτηρίζεται πλήρως από την επιλογή μια πεντάδας παραμέτρων (h , ρ , β , κλάση ποιότητας υπηρεσίας (QoS_{class}), κίνδυνος ασυνέπειας (r)) που μεγιστοποιεί το καθαρό όφελος του χρήστη του οποίου η εφαρμογή του έκανε την αίτηση δέσμευσης πόρων. Το να προσπαθήσει κανείς να υπολογίσει ταυτόχρονα αυτές τις πέντε παραμέτρους είναι πολύ πολύπλοκο. Ευτυχώς, όπως είδαμε στην ενότητα 4.1.4, μπορεί βέβαια να υποθεθεί ότι μόνο οι βέλτιστες τριάδες παραμέτρων $\{h, (\rho^*, \beta^*)\}$ ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας αποτελούν τις διαθέσιμες επιλογές. Οπότε, μένει να επιλεγούν η κλάση ποιότητας υπηρεσίας και ο κίνδυνος ασυνέπειας του βέλτιστου SLS.

Όπως εξηγήθηκε ήδη, οι εξυπηρετητές έχουν κίνητρα να δημοσιεύουν τις παραμέτρους κίνησης για την παροχή κάποιου περιεχομένου σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας, οι οποίες ελαχιστοποιούν τη χρέωση των χρηστών. Προκειμένου να εξυπηρετηθεί ένας χρήστης με αυτές τις βέλτιστες για αυτόν παραμέτρους κίνησης, πρέπει να πληρώσει κάποιο ποσό για κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Θεωρούμε ότι το μέγιστο ποσό που είναι διατεθειμένος να πληρώσει ένας χρήστης για μια υπηρεσία χρονικής διάρκειας T δίνεται από την μεταβλητή W_{max} και ότι περιέχεται στο αρχείο προτιμήσεων του χρήστη. Το W_{max} εκφράζει το ποσό που είναι διατεθειμένος να πληρώσει ένας χρήστης, αν εξυπηρετηθεί με την ανώτατη κλάση ποιότητας υπηρεσίας καθόλη τη χρονική διάρκεια της υπηρεσίας. Με βάση τις υποθέσεις αυτές, ο UA ενός χρήστη χρειάζεται να επιλέξει μόνο την κλάση ποιότητας υπηρεσίας και τον κίνδυνο ασυνέπειας για ένα SLS, τα οποία μεγιστοποιούν το καθαρό όφελος του χρήστη. Υποθέτοντας ότι η ωφελιμότητα του χρήστη δεν εξαρτάται από το συγκεκριμένο περιεχόμενο της υπηρεσίας που επιθυμεί να λάβει, προτείνουμε ένα απλό μοντέλο συνάρτησης ωφελιμότητας που ικανοποιεί τους στόχους μας. Έτσι, η ωφελιμότητα ενός χρήστη για ένα SLS x δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

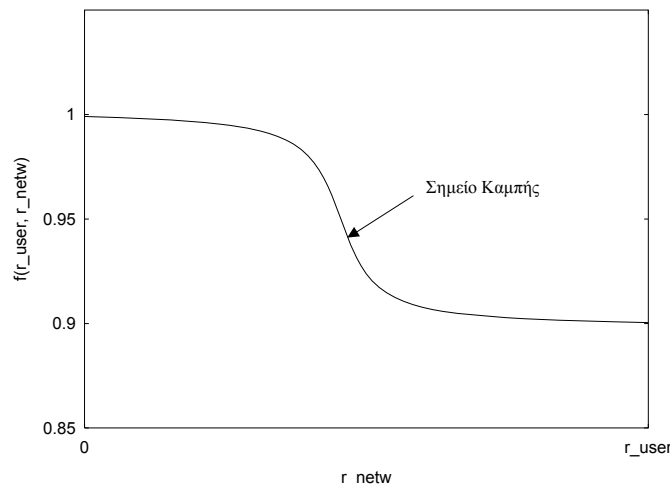
$$u(x) = W(x)f(r_{user}, r_{netw}), \quad r_{netw} \leq r_{user}$$

$$\text{where } W(x) = U(QoS_{DF})W_{max}$$

Το x στον τύπο αυτόν εκφράζει τα χαρακτηριστικά του SLS, δηλαδή το μέγιστο ρυθμό αποστολής κίνησης h , τις παραμέτρους κίνησης (ρ , β), την κλάση ποιότητας υπηρεσίας QoS_{class} και τον κίνδυνο ασυνέπειας r_{netw} . Η συνάρτηση $W(\cdot)$ εκφράζει το ποσό που είναι διατεθειμένος να πληρώσει ο χρήστης για αυτό το SLS (για την κλάση ποιότητας υπηρεσίας που παρέχεται το SLS). Ο παράγοντας r_{user} είναι ο μέγιστος ανεκτός από το χρήστη κίνδυνος ασυνέπειας με το SLS και είναι μια παράμετρος που είτε περιέχεται στο προφίλ του χρήστη, είτε προσδιορίζεται από το χρήστη μέσω της διεπιφάνειας χρήσης της εφαρμογής του (αφού η

σημασία του είναι κατανοητή για το χρήστη). Ο κίνδυνος ασυνέπειας r_{netw} είναι το άνω φράγμα στην ασυνέπεια με το SLS που εγγυάται ότι θα παρέχει το δίκτυο για το συγκεκριμένο SLS. Τέλος, στον τύπο που δίνει το $u(x)$, η συνάρτηση $U(QoS_{DF})$ είναι ο κανονικοποιημένος παράγοντας ωφελιμότητας που αντιστοιχεί σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας, και που εκφράζει τη σχετική ωφελιμότητα που έχει ένας χρήστης από αυτή την κλάση ποιότητας υπηρεσίας σε σχέση με την υψηλότερη. Η συνάρτηση $U(QoS_{DF})$ καθορίζει το ποσοστό του W_{max} που είναι διαθέσιμος να πληρώσει ένας χρήστης για μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας QoS_{DF} .

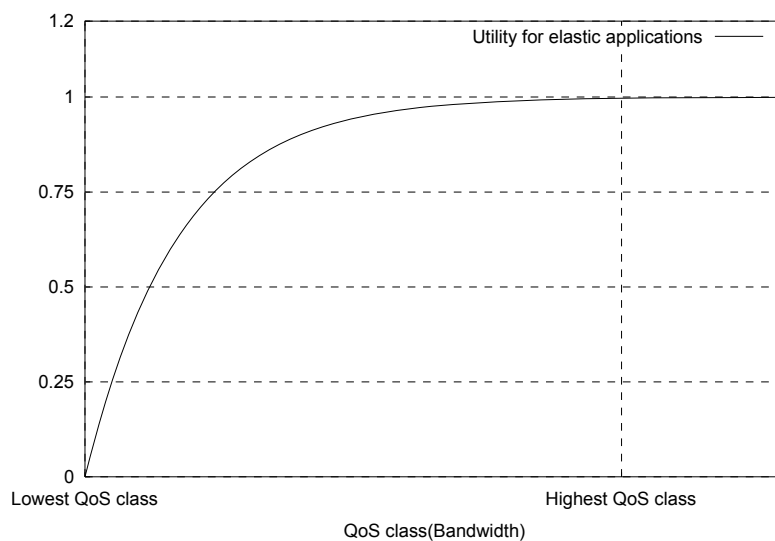
Ως προς τον κίνδυνο ασυνέπειας, η συνάρτηση $f(r_{user}, r_{netw})$ εκφράζει την ικανοποίηση του χρήστη για τιμές του r_{netw} χαμηλότερες του r_{user} . Η ικανοποίηση του χρήστη μεγιστοποιείται όταν $r_{netw} = 0$ ($f = 1$) και μειώνεται όσο ο r_{netw} προσεγγίζει τον r_{user} . Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της υπόθεσης, ότι ένας χρήστης είναι ικανοποιημένος σε κάποιο βαθμό από την υπηρεσία για οποιαδήποτε τιμή του r_{netw} που είναι μικρότερη ή ίση με τον r_{user} . Ωστόσο, όταν ο r_{netw} αυξάνεται και προσεγγίζει τον r_{user} , η ικανοποίηση του χρήστη θα πρέπει να μειώνεται. Οπότε, αναμένεται ότι η f θα έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 9: . Για κάθε συγκεκριμένο χρήστη, η θέση και η κλίση του τμήματος που εκφράζει την απότομη μείωση στην καμπύλη, η θέση του σημείου καμπής και η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης f θα εξαρτώνται από την ευαισθησία του χρήστη στον κίνδυνο ασυνέπειας που προσφέρεται από το δίκτυο για κάθε SLS.



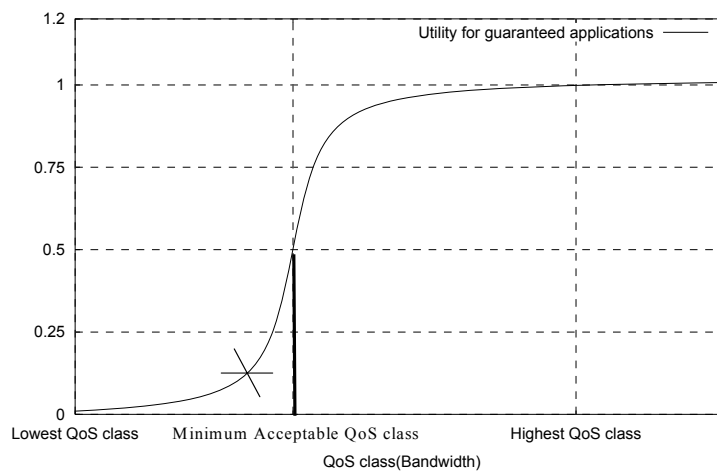
Σχήμα 9: Η μορφή της συνάρτησης $f(r_{user}, r_{netw})$.

Τέλος, εξετάζεται το σχήμα της συνάρτησης $U(\cdot)$. Οι υπηρεσίες δικτύου που ζητά ένας χρήστης είναι ή ελαστικές ή εγγυημένες. Γενικά, μια ανώτερη κλάση ποιότητας υπηρεσίας για μια ροή κίνησης σημαίνει μια μεγαλύτερη προτεραιότητα στον χρονοπρογραμματισμό προώθησης της κίνησης ή μια μικρότερη πιθανότητα απόρριψης πακέτων της κίνησης ή και τα δυο. Αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη κατανάλωση εύρους ζώνης για μια ανώτερη κλάση ποιότητας υπηρεσίας για τη μεταφορά ενός ποσού πληροφορίας με τις ίδιες παραμέτρους κίνησης. Οπότε, το σχήμα της $U(\cdot)$ (συναρτήσεως των κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας των DiffServ) είναι απαραίτητα ίδιο με αυτό της ωφελιμότητας του χρήστη, όταν εκφράζεται σαν συνάρτηση του εύρους ζώνης. Για τις ελαστικές υπηρεσίες η συνάρτηση ωφελιμότητας είναι κοίλη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10, εξαιτίας της μειούμενης επιπλέον ωφελιμότητας που προκαλείται από μια επιπλέον μονάδα εύρους ζώνης, όταν αυξάνει το ποσό του ήδη δεσμευμένου εύρους ζώνης. Όμως, για τις εγγυημένες υπηρεσίες η συνάρτηση ωφελιμότητας είναι αρχικά κυρτή και έπειτα κοίλη (βλέπε Σχήμα 11). Ωστόσο, όπως εξηγείται στο [10], για εγγυημένες υπηρεσίες δεν είναι πολύ λογικό να θεωρήσει κανείς το κυρτό μέρος της καμπύλης ως αποδεκτό, διότι σε αυτό ο ρυθμός αύξησης στην ωφελιμότητα

αυξάνεται, όσο αυξάνεται το δεσμευμένο εύρος ζώνης. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι ένας χρήστης έχει την τάση να ζητά όλο και περισσότερο εύρος ζώνης με αποτέλεσμα να καταργεί το κυρτό τμήμα της καμπύλης. Γι' αυτό η συνάρτηση ωφελιμότητας για τις εγγυημένες υπηρεσίες, προσεγγιστικά, μπορεί να θεωρηθεί της ίδιας μορφής (κοίλη) με αυτή για τις ελαστικές υπηρεσίες ως προς τις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας ενός δικτύου DiffServ, με εξαίρεση το γεγονός ότι θα πρέπει να αρχίζει από μια τιμή κλάσης ποιότητας υπηρεσίας μεγαλύτερη από το 0. Ο UA ενός χρήστη μιας εγγυημένης εφαρμογής θα πρέπει να γνωρίζει αυτό το σημείο εκκίνησης (minimum acceptable QoS class), το οποίο το καθορίζει ο χρήστης (βλέπε ενότητα 5.5). Αυτός ο καθορισμός αποτελεί τη μόνη πληροφορία που εισάγει ο χρήστης σχετικά με τις απαιτήσεις του σε ποιότητα υπηρεσίας. Είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι παρόλο που για όσα είπαμε υποθέσαμε ότι οι παράμετροι κίνησης θα είναι ίδιες για τη μεταφορά ενός ποσού πληροφορίας σε κάθε κλάση, οι παράμετροι κίνησης γενικά είναι μεγαλύτερες για ανώτερες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας. Το γεγονός αυτό ενισχύει ακόμη περισσότερο τους ισχυρισμούς μας για υψηλότερη κατανάλωση εύρους ζώνης σε ανώτερες κλάσεις για τη μεταφορά μιας συγκεκριμένης ποσότητας πληροφορίας.



Σχήμα 10: Μια πιθανή συνάρτηση ωφελιμότητας $U(.)$ ως προς την παρεχόμενη κλάση ποιότητας υπηρεσίας για ελαστικές υπηρεσίες.

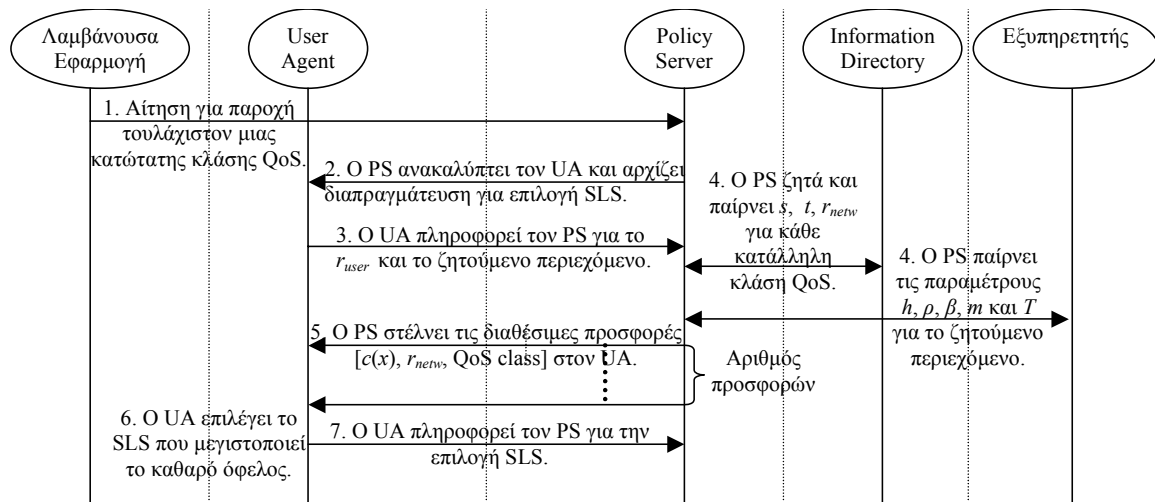


Σχήμα 11: Μια πιθανή συνάρτηση ωφελιμότητας $U(.)$ ως προς την παρεχόμενη κλάση ποιότητας υπηρεσίας για εγγυημένες υπηρεσίες.

4.1.6 Η Διαδικασία Διαπραγμάτευσης (Negotiation Process)

Στην παρούσα ενότητα περιγράφουμε την ακολουθία των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ των συστατικών μερών της αρχιτεκτονικής κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης. Αν το ζητούμενο περιεχόμενο της υπηρεσίας είναι αποθηκευμένο στον εξυπηρετητή, ο οποίος δημοσιεύει το μέσο ρυθμό αποστολής του m και τη χρονική διάρκειά του T , τότε η διαδικασία διαπραγμάτευσης είναι η εξής (βλέπε Σχήμα 12):

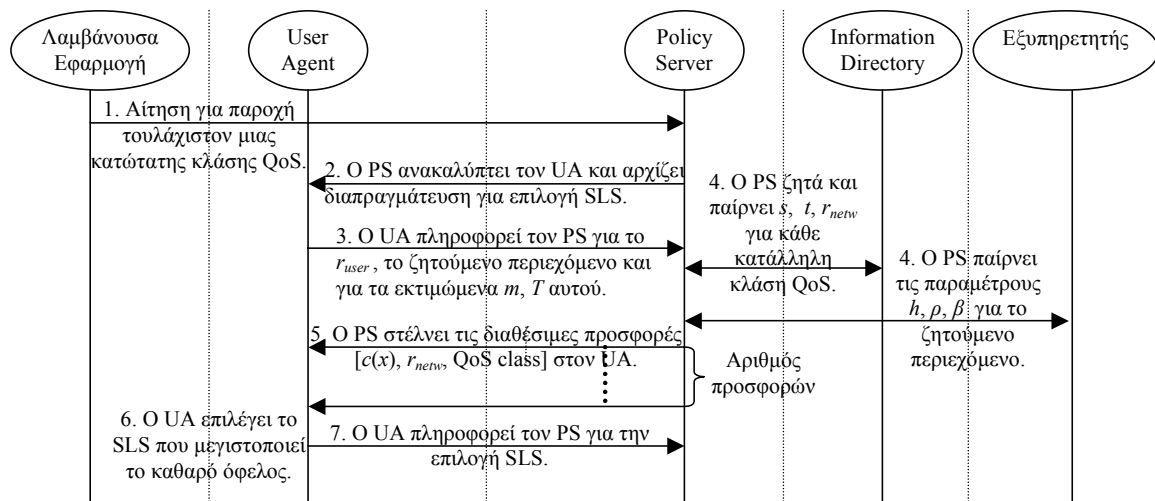
1. Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.1.1 η απαίτηση ενός χρήστη για παροχή μιας κατώτατης κλάσης υπηρεσίας στη ροή κίνησης για τη λήψη κάποιου περιεχομένου από μια εφαρμογή του, μεταφέρονται μέσω ενός μηνύματος RESV του πρωτοκόλλου RSVP στον κοντινότερο Policy Server (PS).
2. Μόλις ο PS λάβει την αίτηση δέσμευσης πόρων ανακαλύπτει τον UA του χρήστη, χρησιμοποιώντας πληροφορία εντοπισμού από το μήνυμα RESV, και αρχίζει τη διαδικασία διαπραγμάτευσης για το SLS που θα προσφερθεί τελικά από το δίκτυο στη νέα ροή κίνησης.
3. Κατά την έναρξη της διαπραγμάτευσης ο UA ενημερώνει τον PS για το αντίστοιχο άνω φράγμα στον κίνδυνο ασυνέπειας r_{user} για ένα SLS που είναι ανεκτός από τον χρήστη. Με αυτή την παράμετρο ο PS είναι σε θέση, επικοινωνώντας με τις υπηρεσίες καταλόγου ID (και PD), να καθορίσει τα προσφερόμενα SLS που ικανοποιούν τις κατώτατες απαιτήσεις του χρήστη για παροχή QoS στη νέα ροή κίνησης. Κάθε προσφερόμενο SLS χαρακτηρίζεται από τη κλάση ποιότητας υπηρεσίας του QoS_{class} , τον προβλεπόμενο, από το δίκτυο, κίνδυνο ασυνέπειας με το SLS r_{netw} , το σημείο λειτουργίας (s, t) της κλάσης ποιότητας υπηρεσίας του (στο μονοπάτι που παρέχεται) και το προβλεπόμενο κόστος του $c(\cdot)$ ανά μονάδα χρόνου.
4. Ο PS υπολογίζει την αναμενόμενη χρέωση ανά προσφερόμενο SLS χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους κίνησης (h, ρ, β, m) και τη χρονική διάρκεια T που δημοσιεύει ο εξυπηρετητής για τη μεταφορά του ζητούμενου περιεχομένου υπηρεσίας σε κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας, και τις πληροφορίες της υπηρεσίας καταλόγου ID. Η υπηρεσία καταλόγου ID περιέχει πληροφορίες για το διαθέσιμο εύρος ζώνης, το διαθέσιμο χώρο στους ενταμιευτές, το σημείο λειτουργίας (s, t) για μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας και άλλα στοιχεία που αφορούν τη χρήση των πόρων του δικτύου.
5. Για κάθε προσφερόμενο SLS ο PS στέλνει το αναμενόμενο κόστος $c(\cdot)$, τον προβλεπόμενο κίνδυνο ασυνεπείας του και την κλάση ποιότητας υπηρεσίας του QoS_{class} , δηλαδή την τριάδα παραμέτρων $[c(\cdot), r_{netw}, QoS_{class}]$. Ο UA υπολογίζει για κάθε προσφερόμενο SLS το καθαρό όφελος και επιλέγει το SLS που το μεγιστοποιεί, με την προϋπόθεση ότι αυτό θα είναι θετικό. Για λόγους απλότητας, θεωρούμε ότι αυτή η διαδικασία βελτιστοποίησης εκτελείται εξαντλητικά για το πεπερασμένο σύνολο των κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας που προσφέρονται για την ικανοποίηση μιας αίτησης δέσμευσης πόρων. Η πολυπλοκότητα αυτής της διαδικασίας μπορεί να βελτιωθεί αν μελετηθούν η μονοτονία και η κυρτότητα των συναρτήσεων που εμπλέκονται.



Σχήμα 12: Τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ των συστατικών μερών της αρχιτεκτονικής κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης, αν το ζητούμενο περιεχόμενο είναι αποθηκευμένο από τον εξυπηρετητή.

Αν το ζητούμενο περιεχόμενο της υπηρεσίας δεν είναι αποθηκευμένο στον εξυπηρετητή, τότε οι παράμετροι m, T για αυτό δε δημοσιεύονται από τον εξυπηρετητή αλλά εκτιμώνται από τον UA με βάση προηγούμενες εκτελέσεις της υπηρεσίας με παρόμοιο περιεχόμενο. Σε αυτή την περίπτωση η ακολουθία των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης απεικονίζεται στο Σχήμα 13. Στο σχήμα αυτό, τα βήματα 3 και 4 διαφοροποιούνται από αυτά που απεικονίζονται στο Σχήμα 12 ως εξής:

- Στο βήμα 3, ο UA πληροφορεί τον PS για τον ανώτατο ανεκτό από το χρήστη κίνδυνο ασυνέπειας r_{users} , για το ζητούμενο περιεχόμενο, για τον εκτιμώμενο μέσο ρυθμό αποστολής m και την εκτιμώμενη χρονική διάρκεια T του περιεχομένου. Κατά τα άλλα το βήμα αυτό έχει όπως προηγουμένως.
- Στο βήμα 4, ο PS υπολογίζει την αναμενόμενη χρέωση ανά προσφερόμενο SLS χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους κίνησης (h, ρ, β) που δημοσιεύει ο εξυπηρετητής για τη μεταφορά του ζητούμενου περιεχομένου υπηρεσίας σε κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας, το μέσο ρυθμό m και τη χρονική διάρκεια του περιεχομένου T που πληροφορήθηκε από τον UA, και τις πληροφορίες της υπηρεσίας καταλόγου ID. Κατά τα άλλα το βήμα αυτό έχει όπως προηγουμένως.



Σχήμα 13: Τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ των συστατικών μερών της αρχιτεκτονικής κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης, αν το ζητούμενο περιεχόμενο δεν είναι αποθηκευμένο

στον εξυπηρετητή.

Το μέγιστο καθαρό όφελος ενός χρήστη είναι αρνητικό ή μηδέν, αν η διαδικασία διαπραγμάτευσης δεν βρίσκει κάποιο SLS από τα προσφερόμενα που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του χρήστη για παροχή QoS σε μια ροή κίνησης, δεδομένου ενός σχετικά χαμηλού ποσού που διατίθεται να πληρώσει ο χρήστης, ή αν το δίκτυο έχει υψηλό φόρτο κυκλοφορίας στις απαιτούμενες από το χρήστη κλάσεις ποιότητας, δηλαδή δεν υπάρχουν προσφερόμενα SLS που να ικανοποιούν τις κατώτατες απαιτήσεις του χρήστη για QoS. Αν το μέγιστο καθαρό όφελος του χρήστη είναι αρνητικό ή δεν υπάρχουν προσφερόμενα SLS, τότε η διαδικασία διαπραγμάτευσης αποτυγχάνει και η νέα ροή κίνησης για τη λαμβάνουσα εφαρμογή του χρήστη εξυπηρετείται με την κλάση ποιότητας υπηρεσίας Best Effort και είναι δωρεάν (όσον αφορά στη χρέωση μεταφοράς της κίνησης από το δίκτυο).

4.2 Επεκτάσεις

4.2.1 Προσανατολισμός Υπηρεσίας

Σε όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, οι υπηρεσίες δικτύου είναι προσανατολισμένες προς την εφαρμογή προορισμού της κίνησης. Δηλαδή, η εφαρμογή του παραλήπτη κάνει την αίτηση δέσμευσης πόρων, ο UA του παραλήπτη διαπραγματεύεται με τον αντιπρόσωπο του δικτύου (PS) για την παροχή QoS και επιλέγει το SLS της κίνησης που θα λάβει, και ο παραλήπτης χρεώνεται για την παροχή της υπηρεσίας δικτύου για τη μεταφορά της κίνησης με κάποια QoS. Αυτό συμβαίνει, γιατί θεωρούμε ότι η ωφελιμότητα από την λήψη μιας πληροφορίας ανήκει στον παραλήπτη της κίνησης. Αυτή η προσέγγιση ιδεατά ταιριάζει σε όλες τις περιπτώσεις εφαρμογών του μοντέλου παροχής υπηρεσιών πελάτη-εξυπηρετητή. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι η παροχή ταινιών video μετά από αίτηση των χρηστών, η λήψη αρχείων από εξυπηρετητές FTP και η λήψη πληροφοριών ιστοσελίδων από εξυπηρετητές WWW.

Υπάρχουν, όμως, περιπτώσεις στις οποίες είναι επιθυμητή από τον αποστολέα της κίνησης η μεταφορά της κίνησης του από το δίκτυο να γίνεται με κάποια ποιότητα υπηρεσίας. Για παράδειγμα αναφέρουμε την αποστολή διαφημιστικών video μικρού μήκους από τους εξυπηρετητές στους πελάτες τους (χωρίς αυτοί να χρεώνονται για αυτά) κατά τη διάρκεια άλλων υπηρεσιών. Αυτά τα διαφημιστικά μηνύματα θα πρέπει να παρέχονται με ποιότητα υπηρεσίας καθορισμένη από τους εξυπηρετητές και να είναι ανεξάρτητη από την ποιότητα εξυπηρέτησης των πελατών που αποφασίζεται από τους πελάτες. Σε αυτή και σε άλλες τέτοιες περιπτώσεις η εφαρμογή του αποστολέα της κίνησης πρέπει να κάνει την αίτηση δέσμευσης πόρων, ο UA του εξυπηρετητή πρέπει να διαπραγματεύεται με έναν PS του δικτύου και να επιλέγει το SLS, και ο εξυπηρετητής να χρεώνεται για την παροχή της υπηρεσίας δικτύου για τη μεταφορά της κίνησης με κάποιο QoS. Για το σκοπό αυτό μπορεί να αποστέλλεται η αίτηση δέσμευσης πόρων της εφαρμογής του εξυπηρετητή με τις κατώτατες απαιτήσεις σε QoS του χρήστη της για τη μεταφορά της κίνησης, με κάποιο ειδικό μήνυμα PATH του πρωτοκόλλου RSVP που να εντοπίζεται από τους δρομολογητές και να προωθείται σε κάποιον PS του δικτύου. Με βάση το μήνυμα PATH ο PS μπορεί να εντοπίσει τον UA του εξυπηρετητή και να διαπραγματευτεί μαζί του με τη διαδικασία διαπραγμάτευσης που περιγράψαμε. Μετά την επιλογή SLS από τον UA, ο PS θα πρέπει να αποστείλει ένα μήνυμα RESV που ειδοποιεί την εφαρμογή του εξυπηρετητή να αποστείλει την κίνηση με βάση το επιλεγμένο SLS από αυτόν. Οι εφαρμογές που αποστέλλουν κίνηση γνωρίζουν ή μπορούν να υπολογίζουν (βλέπε ενότητα 4.3) τις βέλτιστες (όσον αφορά στη χρέωση) παραμέτρους $\{h, (\rho, \beta)\}$ για την κίνηση που αποστέλλουν και οπότε μπορούν να τις δημοσιεύουν. Επίσης, μπορούν να καθορίζουν το μέσο ρυθμό αποστολής κίνησης m και τη

χρονική διάρκεια αποστολής T ενός περιεχομένου. Η κατώτατη απαιτούμενη κλάση ποιότητας υπηρεσίας ενός χρήστη για την εξυπηρέτηση της αποστελλόμενης κίνησης μεταφέρεται σε ένα πεδίο του μηνύματος PATH (π.χ. στο πεδίο Token Rate).

4.2.2 Κόστος Εξυπηρέτησης

Έχουμε ορίσει μια αρχιτεκτονική στην οποία λαμβάνει χώρα διαπραγμάτευση για την επιλογή ενός SLS για την παροχή μιας υπηρεσίας επιπέδου δικτύου. Για τη χρέωση των παρεχομένων υπηρεσιών στο επίπεδο δικτύου έχουμε επιλέξει τη μέθοδο χρέωσης που περιγράψαμε στην ενότητα 4.1.3. Δεν αναφέραμε, όμως, τίποτα για τον τρόπο χρέωσης των υπηρεσιών σε επίπεδο εφαρμογών, δηλαδή για τη χρέωση της μεταφερόμενης πληροφορίας. Αυτό έγινε σκόπιμα, αφού η χρέωση σε επίπεδο εφαρμογών δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Ωστόσο, θεωρούμε ότι η παροχή κάποιας πληροφορίας από έναν εξυπηρετητή μπορεί είτε να είναι δωρεάν, είτε να χρεώνεται ανάλογα με το περιεχόμενο, τη ζήτησή της και άλλα χαρακτηριστικά της. Σε περίπτωση που η παροχή κάποιας πληροφορίας d χρεώνεται από κάποιον εξυπηρετητή με το ποσό C_d , τότε το συνολικό κόστος της υπηρεσίας παροχής του d με SLS x για έναν πελάτη θα είναι το άθροισμα του κόστους της υπηρεσίας σε επίπεδο δικτύου $c(x) + C_d$.

4.2.3 Χρήση Παραμέτρων R και S

Μέχρι στιγμής η αίτηση παροχής ποιότητας υπηρεσίας περιγράφεται από την κατώτατη ανεκτή κλάση υπηρεσίας για ένα χρήστη. Αυτή η κλάση υπηρεσίας περιορίζει το σύνολο των κλάσεων υπηρεσίας που εξυπηρετούν το χρήστη. Στην περίπτωση που μια εφαρμογή έχει συγκεκριμένες κατώτατες απαιτήσεις για εύρος ζώνης και ανώτατη καθυστέρηση, αυτές είναι δυνατό να συμπεριληφθούν στην αίτηση του χρήστη χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους R και S του μηνύματος RESV (βλέπε ενότητα 2.3). Με βάση τις παραμέτρους αυτές, ο PS περιορίζει επιπλέον το σύνολο των κατάλληλων κλάσεων υπηρεσίας για την ικανοποίηση της αίτησης παροχής ποιότητας υπηρεσίας σε αυτές που ικανοποιούν τις απαιτήσεις μιας εφαρμογής για εγγύηση κάποιου εύρους ζώνης και κάποιας ανώτατης καθυστέρησης. Αυτό είναι δυνατό να γίνει, αφού ο PS γνωρίζει τις παραμέτρους αποστολής της κίνησης $\{h, (\rho, \beta)\}$ ενός περιεχομένου σε κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας και την αντιμετώπιση που παρέχεται στην κυκλοφορία από κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας.

4.2.4 Χρέωση Βάσει Συνολικής Χρήσης Πόρων

Για τη μέθοδο χρέωσης υποθέσαμε ότι όλες οι ροές κίνησης ενός μονοπατιού σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας διασχίζουν μια συγκεκριμένη σύνδεση, η οποία είναι η πιο συμφορημένη από όλες τις συνδέσεις του μονοπατιού για αυτή την κλάση ποιότητας υπηρεσίας, και χρεώνονται σύμφωνα με τη χρήση πόρων σε αυτή μόνο τη σύνδεση. Οπότε, το σημείο λειτουργίας του μονοπατιού για αυτή την κλάση υπηρεσίας μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι αυτό του πιο συμφορημένου συνδέσμου. Στην περίπτωση που αυτό δεν ισχύει, τότε η αναμενόμενη χρέωση για την εξυπηρέτηση μιας ροής κίνησης από μια κλάση υπηρεσίας i μπορεί να υπολογισθεί αθροίζοντας τη χρέωση για κάθε σύνδεσμο l του μονοπατιού που διασχίζει η ροή κίνησης:

$$c_i(x) = p_i^l T_i \sum_l \bar{a}_i^l(x, m)$$

όπου p_i^l η τιμή ανά μονάδα ισοδύναμης χρήσης του συνδέσμου l του μονοπατιού που

διασχίζει η κίνηση στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας i , T_i η χρονική διάρκεια του περιεχομένου στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας i , και $\bar{a}_i^l(x; m)$ το ισοδύναμο εύρος ζώνης της ροής κίνησης με συμβόλαιο κίνησης x και μέσο ρυθμό m στην κλάση υπηρεσίας i του συνδέσμου l . Σε αυτή την περίπτωση, η διαδικασία υπολογισμού των βέλτιστων παραμέτρων αποστολής κίνησης από τους εξυπηρετητές ισχύει, αλλά υφίσταται η εξής επιπλέον πολυπλοκότητα: ενώ η καμπύλη αδιαφορίας των παραμέτρων (ρ, β) (βλέπε Σχήμα 8) εξακολουθεί να ισχύει η επιλογή βελτιστοποιημένου συμβολαίου από τον PS δε γίνεται με βάση τον απλό κανόνα που περιγράφηκε στην ενότητα 4.1.4. Όμως, η βελτιστοποίηση είναι εφικτή και σε αυτή την περίπτωση, οπότε η διαδικασία διαπραγμάτευσης που προτείνουμε λειτουργεί. Μια άλλη προτεινόμενη λύση είναι να υπολογίζουμε την αναμενόμενη χρέωση με βάση τον πιο συμφόρημένο σύνδεσμο του μονοπατιού που διασχίζει η ροή κίνησης και την πραγματική χρέωση βάσει του παραπάνω αθροίσματος. Τότε, στην περίπτωση του υπολογισμού της αναμενόμενης χρέωσης για μια ροή κίνησης, το p_i θα εκφράζει την τιμή ανά μονάδα ισοδύναμης χρήσης για όλο το μονοπάτι που διασχίζει η ροή κίνησης στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας i , ενώ στην περίπτωση της πραγματικής χρέωσης το p_i^l θα εκφράζει την τιμή ανά μονάδα ισοδύναμης χρήσης του συνδέσμου l του μονοπατιού που διασχίζει η κίνηση στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας i .

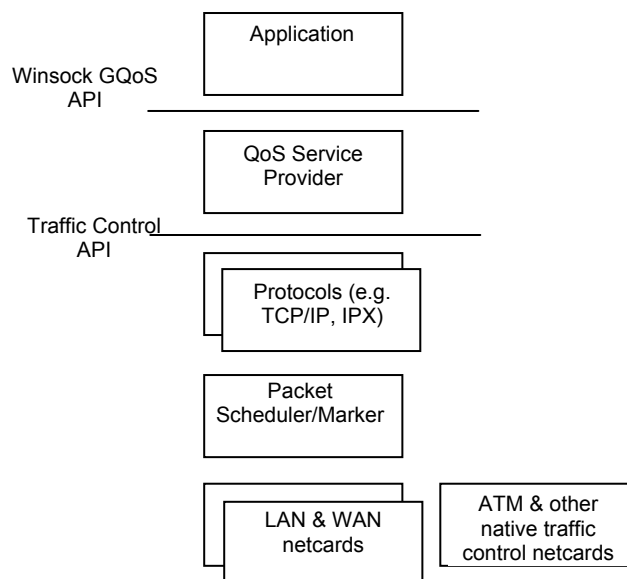
5 Υλοποίηση Αρχιτεκτονικής και Επίδειξη

Σχεδιάσαμε και υλοποιήσαμε ένα πραγματικό σύστημα στο οποίο αφενός θα μπορούσαμε να εφαρμόσουμε τις θεωρητικές διαπιστώσεις μας και να εξετάσουμε την ορθότητά τους στην πράξη, και αφετέρου να δείξουμε αν το σύστημα μας είναι υλοποιήσιμο και με πιο προγραμματιστικό ή άλλο κόστος.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε κάποιες λειτουργίες για παροχή ποιότητας υπηρεσίας του λειτουργικού συστήματος Windows 2000 της Microsoft, και συγκεκριμένα τη στοίβα πρωτοκόλλων του υπολογιστή (Host Protocol Stack) [4]. Επίσης, χρησιμοποιήσαμε το πρωτόκολλο Common Open Policy Service (COPS) [16], και συγκεκριμένα υλοποιήσαμε εξ' ολοκλήρου έναν πρωτότυπο εξυπηρετητή COPS. Στο δίκτυο μας χρησιμοποιήσαμε κάτω από το επίπεδο δικτύου το πρωτόκολλο Multi-Protocol Label Switching (MPLS) για την υλοποίηση των διαφοροποιημένων κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας σύμφωνα με το IETF Internet Draft για το σκοπό αυτό [9].

5.1 Η στοίβα πρωτοκόλλων του υπολογιστή (Host Protocol Stack)

Η στοίβα πρωτοκόλλων [4] ενός υπολογιστή που έχει ως λειτουργικό σύστημα τα Windows 2000 της Microsoft φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 14: Η στοίβα πρωτοκόλλων ενός σταθμού εργασίας που εκτελεί το λειτουργικό σύστημα Windows 2000.

Οι εφαρμογές εκτελούνται στο επίπεδο εφαρμογών της στοίβας. Αυτές μπορεί να είναι ή όχι ενήμερες για παροχή QoS και να απαιτούν ένα ευρύ φάσμα εγγυήσεων. Οι εφαρμογές που μπορούν να ωφεληθούν από την παροχή QoS μπορούν να ζητήσουν κάποιο επίπεδο QoS μέσω του Generic QoS Application Programming Interface (GQoS API). Σκοπός του GQoS API είναι να παρέχει στις εφαρμογές τη δυνατότητα να ζητούν τα χαρακτηριστικά QoS που χρειάζονται ανεξάρτητα από το είδος του δικτύου όπου είναι συνδεδεμένο το μηχάνημα στο οποίο εκτελούνται. Το API αυτό είναι πολύ γενικό και χρειάζονται μόνο απλές οδηγίες από την εφαρμογή για να κληθεί. Για την απλοποίηση της προγραμματιστικής διεπιφάνειας το GQoS API δεν αποκαλύπτει κανένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο (RSVP, DiffServ, 802.1p) ή

μηχανισμό για παροχή QoS στον προγραμματιστή. Συγκεκριμένα του δίνει τρεις επιλογές όσον αφορά στην επιλογή υπηρεσίας:

- Η εγγυημένη (Guaranteed) υπηρεσία είναι ορισμένη για εφαρμογές που χρειάζονται μικρή και αυστηρά περιορισμένη εγγύηση καθυστέρησης, όπως η τηλεφωνική συνομιλία. Η υπηρεσία αυτή αντιστοιχεί στην εγγυημένη υπηρεσία των ολοκληρωμένων υπηρεσιών (IntServ, βλέπε ενότητα 2.2.2).
- Η υπηρεσία ελεγχόμενου φόρτου (Controlled Load) είναι ορισμένη για εφαρμογές που είναι κάπως ανεκτικές σε διακύμανση καθυστέρησης, αλλά απαιτούν συμπεριφορά όμοια με αυτή που θα είχαν από ένα ελαφρά φορτωμένο δίκτυο, όπως ρέον (streaming) video. Αντιστοιχεί στην υπηρεσία ελεγχόμενου φόρτου των ολοκληρωμένων υπηρεσιών (IntServ, βλέπε ενότητα 2.2.2).
- Qualitative (ορισμένη για εφαρμογές που απαιτούν συμπεριφορά «καλύτερη» από αυτή της υπηρεσίας best-effort, αλλά αδυνατούν να ποσοτικοποιήσουν τις απαιτήσεις τους)

Εκτός από τον προσδιορισμό μιας εκ των παραπάνω οι αποστολές κίνησης είναι απαραίτητο να παρέχουν μια ένδειξη του μέσου ρυθμού με τον οποίο πρόκειται να στείλουν την κίνηση στο GQoS API. Οι παραλήπτες κίνησης πρέπει τουλάχιστον να παρέχουν μια ένδειξη για το αν επιθυμούν ή όχι QoS για την κίνηση την οποία θα λάβουν.

Ο QoS Service Provider (QoS SP) είναι το επόμενο επίπεδο της στοίβας και είναι υπεύθυνος για την οργάνωση των διαφόρων μηχανισμών για παροχή QoS, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Αυτοί οι μηχανισμοί περιλαμβάνουν τη σηματοδότηση του πρωτοκόλλου RSVP, το χρονικό προγραμματισμό αποστολής της κίνησης (traffic scheduling), καθώς και το σημάδεμα του πεδίου DSCP των πακέτων ή το σημάδεμα των πακέτων με βάση το πρωτόκολλο 802.1p (που είναι ένα πρωτόκολλο επιπέδου σύνδεσης για τη διαφοροποίηση της αντιμετώπισης των πακέτων στους μεταγωγείς του δικτύου) που βασίζονται στα αποτελέσματα της σηματοδότησης του RSVP. Συγκεκριμένα, ο QoS SP παρέχει τις ακόλουθες υπηρεσίες:

- Σηματοδότηση RSVP
- Υποστήριξη παροχής QoS με βάση συγκεκριμένες πολιτικές (QoS policy support)
- Κλήση του επιπέδου ελέγχου κίνησης (Traffic Control).

Η σηματοδότηση του RSVP αρχίζει και τερματίζεται από τον QoS Service Provider για λογαριασμό των εφαρμογών. Αυτές ειδοποιούνται για τα αποτελέσματα της σηματοδότησης, αλλά μπορούν και να μην αντιλαμβάνονται καθόλου τη σηματοδότηση του RSVP. Για την υποστήριξη παροχής QoS με βάση συγκεκριμένες πολιτικές (QoS policy support) ο QoS SP εισάγει ένα κρυπτογραφημένο μήνυμα (Kerberos) στα πακέτα της σηματοδότησης του RSVP σχετικά με την ταυτότητα του χρήστη του υπολογιστή που η εφαρμογή του απαιτεί κάποια QoS. Επίσης, ο QoS SP επιβάλλει τα αποτελέσματα της σηματοδότησης (μαρκάρισμα, απόρριψη ή μορφοποίηση κίνησης) καλώντας για το σκοπό αυτό το επίπεδο ελέγχου κίνησης (Packet Scheduler/Marker), μέσω του Traffic Control API.

Ο Packet Scheduler/Marker είναι υπεύθυνος για όλες τις λειτουργίες που σχετίζονται με τον έλεγχο της κίνησης. Αναλυτικότερα, παρέχεται η εξής λειτουργικότητα:

- Μορφοποίηση κίνησης / Απόρριψη κίνησης
- Μαρκάρισμα με βάση το πρωτόκολλο 802.1p
- Μαρκάρισμα του πεδίου DSCP των πακέτων IP
- Κατακερματισμό πακέτων (για πολλαπλούς συνδέσμους PPP) σε επίπεδο σύνδεσης σύμφωνα με το πρωτόκολλο ISSLOW για μείωση της καθυστέρησης σε αργούς δεσμούς
- Έλεγχο των ATM VCs και χρονικός προγραμματισμός αποστολής cell, όταν χρησιμοποιείται σε δίκτυο ATM.

Είναι υλοποιημένος σαν ενδιάμεσος οδηγός συσκευής και παρέχει λειτουργικότητα ελέγχου κίνησης πάνω από διεπιφάνειες δικτύου LAN, LANE καθώς και από οδηγούς κάρτας δικτύου WAN και NDISWAN. Ο Packet Scheduler/Marker δεν είναι προσβάσιμος απευθείας από το

επίπεδο εφαρμογών. Έτσι, δεν μπορεί μια εφαρμογή να προσπεράσει τις αποφάσεις του Packet Scheduler/Marker που έχουν ληφθεί σαν αποτέλεσμα της κλήσης του GQoS API και της σηματοδότησης του πρωτοκόλλου RSVP.

Όσον αφορά το μαρκάρισμα του πεδίου DSCP των πακέτων IP, ο Packet Scheduler/Marker σηματοδοτεί τα πακέτα σύμφωνα με τον τύπο υπηρεσίας της ροής κίνησης στην οποία ανήκουν. Η αντιστοιχία μεταξύ τύπου υπηρεσίας και πεδίου DSCP φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Service Type	DSCP
Network Control	30 (6)
Guaranteed Service	28 (5)
Controlled Load	18 (3)
Qualitative	0 (0)
All other traffic	0 (0)

Πίνακας 1: Οι τιμές DSCP που αντιστοιχούν σε κάθε τύπο υπηρεσίας του RSVP.

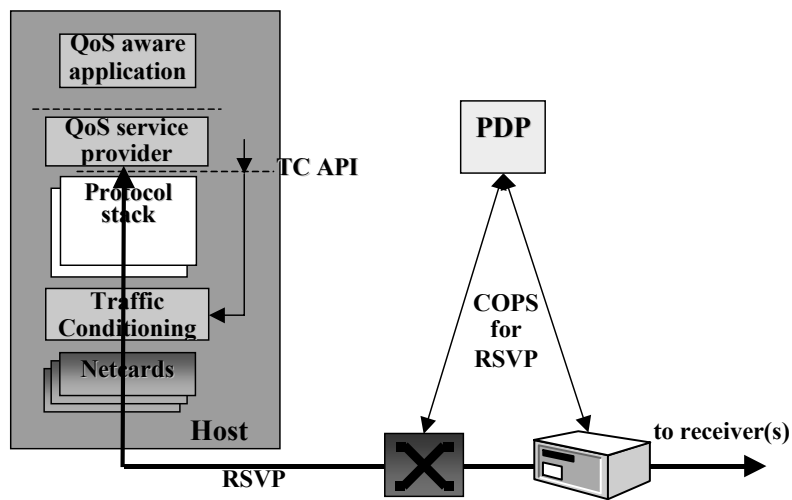
Σημείωση: Το DSCP είναι ένα πεδίο των 6 bits στο οποίο περιέχεται η εκάστοτε τιμή του πίνακα. Τα τρία λιγότερο σημαντικά bits του DSCP αποτελούν ένα υποσύνολο του που ονομάζεται πεδίο προτεραιότητας IP (IP Precedence). Οι αντίστοιχες τιμές του πεδίου IP Precedence φαίνονται στις παρενθέσεις.

Η παραπάνω αντιστοιχία δεν ισχύει για τρεις περιπτώσεις που περιγράφονται παρακάτω:

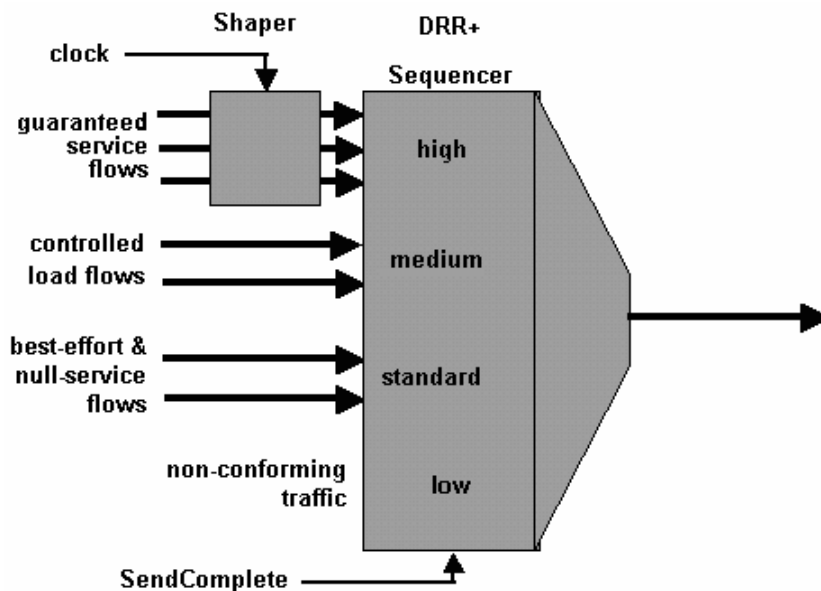
- Μη συμμόρφωση των πακέτων με τις παραμέτρους κίνησης της συνόδου σύνδεσης της ροής. Σε αυτή την περίπτωση τα πακέτα μπορεί να μαρκαριστούν με διαφορετικό DSCP από ότι αυτό που αντιστοιχεί στον τύπο υπηρεσίας. Αυτό το διαφορετικό DSCP θα δηλώνει σίγουρα μικρότερη προτεραιότητα από αυτή που θα έχουν τα συμμορφωμένα πακέτα της ίδιας ροής κίνησης.
- Μέσω του Registry του μηχανήματος. Είναι δυνατόν να ορίσει κανείς νέες στατικές αντιστοιχίσεις μεταξύ των τύπων υπηρεσιών και τιμών DSCP. Οι αντιστοιχίσεις μπορούν να γίνουν τόσο για τα συμμορφωμένα όσο και για τα μη συμμορφωμένα πακέτα μιας ροής κίνησης.
- Μέσω των αντικειμένων TCLASS και DCLASS. Τα αντικείμενα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, και μέσω του Traffic Control API να ορισθούν νέες αντιστοιχίσεις μεταξύ τύπων υπηρεσιών και τιμών DSCP δυναμικά. Αυτά τα αντικείμενα δεν είναι απευθείας προσβάσιμα από τις εφαρμογές μέσω του GQoS API. Αντί γι' αυτό, το δίκτυο αναμένεται να στείλει τέτοια αντικείμενα στο επίπεδο QoS Service Provider, μέσω σηματοδότησης, και στη συνέχεια ο QoS SP να τα δώσει στον Packet Scheduler/Marker, μέσω του Traffic Control API.

Χρησιμοποιήσαμε την τρίτη προσέγγιση στην υλοποίηση του συστήματός μας σύμφωνα με το Σχήμα 14. Δηλαδή, χρησιμοποιήσαμε τη σηματοδότηση του πρωτοκόλλου RSVP προκειμένου να μαρκάρουμε δυναμικά τα πακέτα μιας ροής κίνησης, σύμφωνα με τις αποφάσεις που παίρνουμε μέσω της διαδικασίας διαπραγμάτευσης του συμβολαίου κίνησης της ροής. Επίσης, χρησιμοποιούμε το πρωτόκολλο COPS προκειμένου να επεξεργαζόμαστε τις παραμέτρους κίνησης των πακέτων RSVP RESV και να εισάγουμε σε αυτά το αντικείμενο DCLASS με το κατάλληλο DSCP για τα πακέτα κάθε νέας ροής κίνησης. Το πρωτόκολλο COPS και ο τρόπος που το χρησιμοποιούμε θα συζητηθούν αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο. Επίσης, ο Packet Scheduler/Marker υλοποιεί το χρονικό προγραμματισμό αποστολής κίνησης (scheduling) των ροών ανά τύπο υπηρεσίας. Το υπεύθυνο κομμάτι λογισμικού για αυτή τη δουλειά είναι ο Packet Scheduler. Ο Packet Scheduler αποτελείται από ένα στάδιο μορφοποίησης της κίνησης (shaper) ακολουθούμενο

από ένα στάδιο αποστολής της κίνησης (sequencer). Το στάδιο μορφοποίησης της κίνησης μορφοποιεί την κίνηση των ροών του τύπου υπηρεσίας Guaranteed Service, ώστε να συμμορφώνεται στις παραμέτρους κίνησης των επιμέρους ροών της και κατόπιν την προωθεί στο στάδιο αποστολής της κίνησης. Στο στάδιο αποστολής της κίνησης οι μορφοποιημένες ροές αναμειγνύονται με τις υπόλοιπες ροές κίνησης άλλων τύπων υπηρεσίας και αποστέλονται με βάση το μηχανισμό χρονικού προγραμματισμού αποστολής κίνησης DRR+ (deficit round robin plus). Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές προτεραιότητες αποστολής κίνησης. Υψηλότερη προτεραιότητα έχουν οι ροές κίνησης που ανήκουν στον τύπο υπηρεσίας Guaranteed Service, ακολουθούν οι ροές κίνησης του τύπου υπηρεσίας Controlled Load, στη συνέχεια είναι οι ροές κίνησης των τύπων υπηρεσιών Best Effort και Qualitative, και τέλος τη χαμηλότερη προτεραιότητα έχει η κίνηση που δε συμμορφώνεται με τις παραμέτρους κίνησης των επιμέρους ροών που ανήκουν σε κάθε τύπο υπηρεσίας.



Σχήμα 15: Η χρήση της στοίβας πρωτοκόλλων των Windows 2000 σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο COPS.



Σχήμα 16: Τα στάδια μορφοποίησης και χρονοπρογραμματισμού αποστολής κίνησης του Packet Scheduler.

Οι ροές κίνησης που ανήκουν στον τύπο υπηρεσίας Guaranteed Service κατά κανόνα μορφοποιούνται, στο στάδιο μορφοποίησης της κίνησης, στις παραμέτρους κίνησης (μηχανισμού LB) που έχουν ορισθεί για καθεμιά τους (βλέπε ενότητα 2.3.2). Το στάδιο μορφοποίησης της κίνησης εξασφαλίζει ότι ο ρυθμός με τον οποίο στέλνεται η κίνηση μιας τέτοιας ροής στο στάδιο αποστολής της κίνησης θα είναι το πολύ ίσος με τον ρυθμό αποστολής κίνησης (token rate) που έχει ορισθεί για τη ροή. Έτσι, οι ροές κίνησης του τύπου υπηρεσίας Guaranteed Service είναι κατάλληλα μορφοποιημένες για υπηρεσίες που απαιτούν υψηλή ποιότητα, όπως ορίζεται από την EF PHB (και όχι μόνο για αυτή).

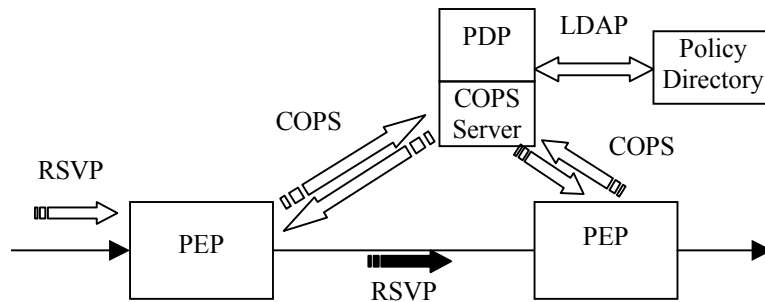
Από την άλλη, οι ροές κίνησης των υπολοίπων τύπων υπηρεσιών κατά κανόνα δεν μορφοποιούνται και άρα δεν περνούν από το στάδιο μορφοποίησης της κίνησης. Αυτές οι ροές φθάνουν κατευθείαν στο στάδιο αποστολής κίνησης και αποστέλλονται σύμφωνα με την προτεραιότητα που σχετίζεται με τον τύπο υπηρεσίας στον οποίο ανήκουν. Σε αυτή την κίνηση, κάθε ροή επιτρέπεται να εκμεταλλεύεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης από τις υπόλοιπες ροές κίνησης. Όμως, σε περίπτωση συμφόρησης, η επιπλέον από την ορισμένη από τις παραμέτρους κίνησης (βάση του μοντέλου LB) κίνηση κάθε τέτοιας ροής θα αντιμετωπιστεί χειρότερα από όλη την υπόλοιπη κίνηση του Packet Scheduler. Επιπλέον, αυτή η μη συμμορφούμενη κίνηση θα μαρκαριστεί με το DSCP που αντιστοιχεί σε μη συμμορφούμενη κίνηση. Η κίνηση των ροών τύπου υπηρεσίας Controlled Load έχουν τη δεύτερη μεγαλύτερη προτεραιότητα αποστολής και τα παραπάνω χαρακτηριστικά και γι' αυτό είναι κατάλληλη για υπηρεσίες ανάλογες με αυτές του AF PHB group (και όχι μόνο).

5.2 Το πρωτόκολλο Common Open Policy Service (COPS)

Προκειμένου να δώσουμε σε ορισμένες ροές κίνησης καλύτερη αντιμετώπιση από ότι σε κάποιες άλλες, εκτός από τον ορισμό και την υλοποίηση κάποιων κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας που να παρέχουν καλύτερη αντιμετώπιση στην κίνηση από ότι η Best Effort κλάση, χρειάζεται ένας μηχανισμός ελέγχου αποδοχής κίνησης σε κάθε κλάση. Αυτό συμβαίνει, γιατί κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας έχει περιορισμένη χωρητικότητα και παρέχει κάποια ορισμένη αντιμετώπιση για την κίνηση που περνά από αυτή. Έτσι, αν η κίνηση που προορίζεται για μια κλάση υπερβεί τη χωρητικότητα της, τότε παύει να μεταχειρίζεται την κίνηση αυτή με τον τρόπο που είχε ορισθεί. Το πρωτόκολλο RSVP και οι Integrated Services κάνουν έλεγχο αποδοχής κλήσης με βάση τη χωρητικότητα. Ωστόσο, στον έλεγχο αποδοχής κλήσης υπεισέρχονται και άλλα θέματα που έχουν να κάνουν με τη διαχείριση του δικτύου, την παρακολούθηση των συμβολαίων κίνησης των ροών κάθε κλάσης στο δίκτυο και τον έλεγχο συμμόρφωσής τους με αυτά, την επιβολή κατάλληλης χρήσης των διαθέσιμων πόρων και υπηρεσιών, και τέλος την επιβολή όλων των αποφάσεων που έχουν ληφθεί για τα θέματα αυτά, με βάση κάποιες πολιτικές, στις επιμέρους ροές του δικτύου.

Για το σκοπό αυτό, έχει ορισθεί από την IETF ένα περιβάλλον ελέγχου (βλέπε Σχήμα 17) των αποφάσεων αποδοχής κίνησης με βάση κάποιες πολιτικές [15]. Σύμφωνα με το [15], τα κυριότερα μέρη της αρχιτεκτονικής είναι το Policy Enforcement Point (PEP) και το Policy Decision Point (PDP). Το PEP είναι το σημείο (κόμβος δικτύου), όπου εφαρμόζονται οι αποφάσεις οι οποίες παίρνονται στο PDP. Το PDP μπορεί να επικοινωνεί με μια βάση δεδομένων, όπου αποθηκεύονται συγκεκριμένες πολιτικές με βάση τις οποίες παίρνονται οι αποφάσεις. Το PEP βρίσκεται συνήθως σε έναν (ή περισσότερους) δρομολογητές του δικτύου, ενώ το PDP στο τμήμα λογισμικού που υλοποιεί τον Policy Server. Ο Policy Server μπορεί να εκτελείται σε οποιοδήποτε σταθμό εργασίας ενός διαχειριζόμενου δικτυακού περιβάλλοντος (administrative domain). Κάθε διαχειριζόμενο δικτυακό περιβάλλον έχει τουλάχιστον έναν Policy Server. Όλες οι συνομιλίες μεταξύ του PEP και του PDP ξεκινούν

από τον PEP και είναι αποτέλεσμα μιας αίτησης παροχής ποιότητας υπηρεσίας σε μια νέα ροή κίνησης που φτάνει στον PEP.



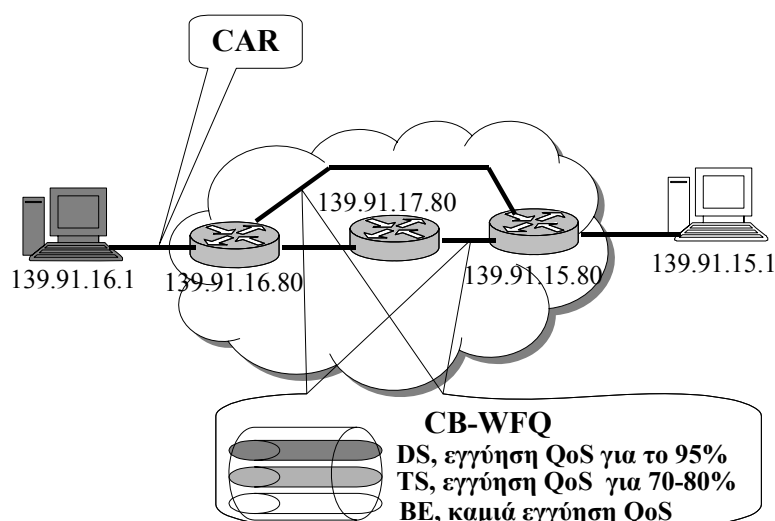
Σχήμα 17: Το περιβάλλον ελέγχου δέσμωσης πόρων που προτείνεται από την IETF.

Η αίτηση για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε μια νέα ροή φτάνει στον PEP μέσω της σηματοδότησης κάποιου πρωτοκόλλου, όπως είναι το RSVP. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ των PEP και PDP πρέπει να είναι κάποιο με το οποίο μπορούν να σταλούν οι αποφάσεις του PDP (με βάση κάποιες πολιτικές που υλοποιεί) προς τον PEP. Ένα τέτοιο πρωτόκολλο είναι το COPS. Με το πρωτόκολλο COPS στέλνονται οι αιτήσεις παροχής ποιότητας υπηρεσίας σε νέες ροές, οι αιτήσεις ανανέωσης και διακοπής των συμβολαίων κίνησης από τον PEP προς τον PDP, και οι αποφάσεις του PDP προς τον PEP. Το πρωτόκολλο COPS χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο TCP για την αξιόπιστη μετάδοση των μηνυμάτων μεταξύ του PDP και του PEP. Το PEP έχει τη λειτουργικότητα πελάτη COPS, ενώ το PDP ενεργεί ως εξυπηρετητής COPS. Το COPS παρέχει ανεξαρτησία όσον αφορά το πρωτόκολλο σηματοδότησης που μεταφέρει τις αιτήσεις στον PEP, καθώς μπορεί να υποστηρίξει και άλλα πρωτόκολλα σηματοδότησης εκτός του RSVP. Το COPS δημιουργήθηκε για γενική διαχείριση, καθορισμό και επιβολή πολιτικών. Παρέχει ασφάλεια στο επίπεδο μηνυμάτων για πιστοποίηση της αυθεντικότητάς τους, προστασία από αντικανονική αναπαραγωγή μηνυμάτων και ακεραιότητα μηνυμάτων. Επίσης, το COPS μπορεί να χρησιμοποιήσει τα υπάρχοντα πρωτόκολλα για ασφάλεια, όπως είναι το IPSEC [20] ή το TLS προκειμένου να καταστήσει ασφαλές το κανάλι επικοινωνίας μεταξύ του PEP και του PDP. Οι αιτήσεις από τον PEP προς τον PDP κρατούνται στη μνήμη του PDP μέχρι να διαγραφούν ρητά με εντολή του PEP. Ο PDP λαμβάνει υπόψη τις προηγούμενες αιτήσεις για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε ροές κίνησης που έχει κάνει δεκτές, προκειμένου να πάρει τις αποφάσεις του για τις νέες αιτήσεις. Επίσης, το πρωτόκολλο επιτρέπει στον PDP να στέλνει εντολές για ρυθμίσεις στον PEP και να τις διαγράφει αργότερα από αυτόν όταν πια πρέπει να αναθεωρηθούν.

Στο σύστημά μας χρησιμοποιούμε το παραπάνω περιβάλλον ελέγχου αποδοχής αιτήσεων για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε μια νέα ροή. Κάθε δρομολογητής εισόδου στο δίκτυό μας λειτουργεί σαν PEP. Επίσης, έχουμε έναν Policy Server στο δίκτυό μας ο οποίος περιέχει και τη λειτουργικότητα ενός PDP. Σαν πρωτόκολλο σηματοδότησης για να φτάσουν οι αιτήσεις για παροχή ποιότητας υπηρεσίας στους δρομολογητές χρησιμοποιείται το RSVP. Για την επικοινωνία μεταξύ των PEP και του PDP χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο COPS. Το PDP, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διαδικασίας διαπραγμάτευσης, κατηγοριοποιεί την κίνηση στις διαφοροποιημένες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας που παρέχει το δίκτυό μας, στέλνοντας εντολή στον PEP να εισάγει ένα αντικείμενο DCLASS με το κατάλληλο DSCP στο μήνυμα RSVP RESV της αίτησης για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε μια νέα ροή. Δηλαδή, η κίνηση κάθε νέας ροής πρόκειται τελικά να περάσει από το δίκτυό μας, αλλά το σύστημά μας αποφασίζει από ποια κλάση ποιότητας υπηρεσίας θα γίνει αυτό, δηλαδή τι μεταχείριση θα έχει αυτή η κίνηση από το δίκτυό μας.

5.3 Το δίκτυο MPLS

Το δίκτυο MPLS που έχουμε χρησιμοποιήσει φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το δίκτυο αυτό υλοποιήθηκε από τον Γ. Γκίκα στο Ινστιτούτο Πληροφορικής (Ι.Π.) του Ινστιτούτου Τεχνολογίας και Έρευνας (Ι.Τ.Ε.) ως πειραματικό περιβάλλον δικτύου για την εκπόνηση της μεταπτυχιακής εργασίας του στο Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Κρήτης και το ΠΠ-ΙΤΕ τον Νοέμβριο του 2000 [41]. Μέρος της παρούσας εργασίας αποτέλεσαν κάποιες ρυθμίσεις (όσον αφορά τη λειτουργία του πρωτοκόλλου CAR) στο δίκτυο αυτό, και η προσθήκη της λειτουργικότητας των πρωτοκόλλων RSVP, COPS (Client και Server) για την εφαρμογή της αρχιτεκτονικής μας. Σημειωτέον ότι η υλοποίηση του COPS Server πραγματοποιήθηκε εξ' ολοκλήρου από το συγγραφέα της παρούσας εργασίας. Το δίκτυο αποτελείται από δύο δρομολογητές CISCO 3660 και έναν δρομολογητή CISCO 3640 συνδεδεμένους ανά δύο μεταξύ τους. Το δίκτυό μας υποστηρίζει την παροχή διαφοροποιημένων υπηρεσιών (Differentiated Services) σύμφωνα με το [9]. Συγκεκριμένα, το [9] περιγράφει δύο εναλλακτικές επιλογές για την κωδικοποίηση του πεδίου DSCP των πακέτων IP στο εσωτερικό του δικτύου MPLS. Χρησιμοποιούμε την προσέγγιση EXP-Inferred-PSC LSP, σύμφωνα με την οποία σε κάθε Label Switched Path (LSP) διαχωρίζουμε κάθε ενοποιημένη ροή (με κάποια τιμή DSCP) με μια τιμή του πεδίου EXP της επικεφαλίδας των πακέτων MPLS στα οποία ενθυλακώνονται τα πακέτα IP στην είσοδο του δικτύου MPLS και αποθυλακώνονται στην έξοδό του. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να διαφοροποιήσουμε τη συμπεριφορά του δικτύου σε 8 διαφορετικά BA ανά LSP, αφού το πεδίο EXP είναι 3 bits. Για να αντιστοιχίσουμε την τιμή του πεδίου DSCP των πακέτων στο πεδίο EXP, στη διεπαφή εισόδου του δρομολογητή εισόδου του δικτύου υλοποιούμε Committed Access Rate (CAR). Σε καθένα από τα δύο δυνατά μονοπάτια από τον δρομολογητή με διεύθυνση IP 139.91.16.80 προς τον δρομολογητή με διεύθυνση IP 139.91.15.80 έχουμε εγκαταστήσει ένα LSP. Στο εσωτερικό κάθε LSP υλοποιούμε Class-based Weighted Fair Queuing (CB-WFQ). Με το CB-WFQ ορίζουμε τρεις διαφορετικές κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας ή τρεις διαφορετικές PHB: τη "Delay Sensitive", τη "Throughput Sensitive" και την κλάση "Best Effort".



Σχήμα 18: Το δίκτυο στο οποίο υλοποιήσαμε την αρχιτεκτονική και τη διαδικασία αποδοτικής επιλογής SLS που προτείνουμε.

Το CB-WFQ δημιουργεί για κάθε PHB μια ουρά εξόδου με μια ορισμένη χωρητικότητα και ένα συγκεκριμένο μέγεθος ενταμιευτή. Επίσης, σε κάθε ουρά ξεχωριστά εφαρμόζεται

Weighted Random Early Detection (WRED) σε περιπτώσεις συμφόρησης. Η κλάση “Delay Sensitive” προορίζεται για εφαρμογές που απαιτούν αυστηρές εγγυήσεις εύρους ζώνης και καθυστέρησης για την εξυπηρέτησή τους. Συγκεκριμένα, εγγυάται τουλάχιστον το 95% του συνολικού εύρους ζώνης των ροών κίνησης που αποφασίστηκε, μέσω διαπραγμάτευσης, να περάσουν από αυτή την κλάση ποιότητας υπηρεσίας στη χειρότερη περίπτωση. Παραδείγματα εφαρμογών που θα χρησιμοποιούσαν αυτή την κλάση είναι οι εφαρμογές για βίντεο-συνομιλία, για τηλεφωνία, αλλά και οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή που η μεταφορά της κίνησής της με αυστηρές εγγυήσεις ποιότητας θα αξιολογείτο ως ιδιαίτερα σημαντική από τους χρήστες. Η κλάση “Throughput Sensitive” προορίζεται για εφαρμογές που εξυπηρετούνται με χαλαρές εγγυήσεις εύρους ζώνης και καθυστέρησης. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι η μετάδοση βίντεο με περιεχόμενο όχι μεγάλης σημασίας μετά από αίτηση του χρήστη, εφαρμογές FTP μεταφοράς αρχείων, και άλλες εφαρμογές που η μεταφορά της κίνησής τους με κάποιες εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας χαρακτηρίζεται σημαντική από τους χρήστες. Συγκεκριμένα, εγγυάται τουλάχιστον το 70% και το πολύ το 80% (σε φορτωμένο με κίνηση δίκτυο) του συνολικού εύρους ζώνης των ροών κίνησης που αποφασίστηκε, μέσω διαπραγμάτευσης, να περάσουν από αυτή την κλάση ποιότητας υπηρεσίας στη χειρότερη περίπτωση. Τέλος, η κλάση “Best Effort” προορίζεται για ελαστικές εφαρμογές που δεν απαιτούν καμιά εγγύηση ποιότητας υπηρεσίας, όπως είναι το MAIL, το IRC και άλλες. Ο κίνδυνος ασυνέπειας στην περίπτωση του δικτύου αυτού αφορά στη διαφοροποίηση του ποσοστού του εύρους ζώνης που εγγυάται κάθε κλάση υπηρεσίας. Για παράδειγμα, αν στην κλάση “Delay Sensitive” έχουμε κίνδυνο ασυνέπειας 0.05, τότε η κλάση αυτή εγγυάται το $90.25\% = (1-0.05)*95\%$ του συνολικού εύρους ζώνης που περνά από αυτή.

Για να κατηγοριοποιήσουμε την κίνηση σε αυτές τις τρεις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας, χρησιμοποιούμε τρεις τιμές DSCP που όπως προαναφέραμε αντιστοιχίζονται σε τρεις τιμές EXP. Σύμφωνα με τις τιμές του πεδίου EXP των πακέτων MPLS, περνούν από τις αντίστοιχες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας. Έτσι, συνολικά από κάθε LSP περνούν το πολύ τρία BA, στα οποία αντιστοιχεί PHB ανάλογη με την κλάση ποιότητας υπηρεσίας στην οποία ανήκουν. Η διαδικασία της κατηγοριοποίησης της κίνησης, δηλαδή της ανάθεσής του πεδίου EXP με βάση το πεδίο DSCP γίνεται στη διεπαφή εξόδου του εκάστοτε δρομολογητή εισόδου στο MPLS δίκτυο με βάση την πληροφορία για το DSCP από τη διεπαφή εισόδου. Σε κάθε δρομολογητή, σύμφωνα με το πεδίο EXP που έχουν τα πακέτα αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη PHB στη διεπαφή εξόδου του δρομολογητή.

Το δίκτυο μας δεν επεξεργάζεται την κίνηση όσον αφορά στην κατηγοριοποίηση / μορφοποίηση / απόρριψη ανά ροή (Micro-flow Classification) και δε σημαδεύει το πεδίο DSCP των πακέτων IP. Αυτές οι λειτουργίες γίνονται έξω από το δίκτυο στους σταθμούς εργασίας από τη στοιβή πρωτοκόλλων των Windows 2000. Έτσι, όλες οι ροές κίνησης που προορίζονται για τη Delay Sensitive PHB έχουν συμπεριφορά ανάλογη με τις ροές που ανήκουν στον τύπο υπηρεσίας Guaranteed, όλες όσες προορίζονται για την Throughput Sensitive PHB έχουν συμπεριφορά ανάλογη με τις ροές που ανήκουν στον τύπο υπηρεσίας Controlled Load, και όλες όσες προορίζονται για την Best Effort PHB έχουν συμπεριφορά ανάλογη με τις ροές που ανήκουν στους τύπους υπηρεσιών Best Effort ή Qualitative από το σταθμό εργασίας που αποστέλλει κίνηση. Το μαρκάρισμα της κίνησης γίνεται επίσης στο σταθμό εργασίας που αποστέλλει κίνηση σύμφωνα με το αντικείμενο DCLASS που μεταφέρεται σ’ αυτόν με τη σηματοδότηση του RSVP. Για το σκοπό αυτό, όλοι οι δρομολογητές του δικτύου μας, οι οποίοι είναι εν δυνάμει δρομολογητές εισόδου στο δίκτυο, λειτουργούν σαν PEP, έχουν τη λειτουργικότητα COPS Client και γνωρίζουν τη θέση του COPS Server, τον οποίο έχουμε υλοποιήσει. Μέσω του πρωτοκόλλου COPS, οι PEP στέλνουν στον COPS Server τα μηνύματα RSVP και παίρνουν από αυτόν εντολές για το νέο περιεχόμενό τους και το αν θα τα προωθήσουν ή όχι. Επαναλαμβάνουμε ότι οι δρομολογητές δεν εκτελούν το πρωτόκολλο RSVP δηλαδή δεν δεσμεύουν πόρους με βάση τη σηματοδότηση του RSVP. Τα πακέτα της σηματοδότησης του RSVP περνούν μέσα από τη Delay Sensitive PHB σαν απλά πακέτα IP κίνησης.

Ωστόσο, όλοι οι δρομολογητές του δικτύου μας, οι οποίοι είναι εν δυνάμει δρομολογητές εισόδου στο δίκτυο, επεξεργάζονται την κίνηση για κατηγοριοποίηση σε PHB με βάση το πεδίο DSCP (ή το πεδίο EXP) και πραγματοποιούν απόρριψη κίνησης (στη διεπαφή εισόδου) και μορφοποίηση (στη διεπαφή εξόδου) στο επίπεδο ομαδοποιημένων ροών (Bandwidth Aggregate Classification) με το ίδιο DSCP (ή EXP).

Η επεξεργασία για ένα πακέτο IP που εισέρχεται στο δίκτυό μας έχει ως εξής:

- 1) Στο δρομολογητή εισόδου και στη διεπαφή εισόδου εξετάζεται το πεδίο DSCP που καθορίζει από ποια κλάση ποιότητας υπηρεσίας θα περάσει, δηλαδή η ουρά εξόδου στην οποία θα εισαχθεί. Στη διεπαφή εξόδου του ίδιου δρομολογητή προστίθεται στο πακέτο IP μια επικεφαλίδα του δικτύου MPLS. Στο πεδίο EXP αυτής της επικεφαλίδας καθορίζεται το PHB που θα έχει το πακέτο με βάση την κλάση ποιότητας υπηρεσίας στην οποία ανήκει.
- 2) Ο ενδιάμεσος δρομολογητής του δικτύου επεξεργάζεται το πακέτο σύμφωνα με το πεδίο EXP αντί για το πεδίο DS. Έτσι, σύμφωνα με το πεδίο EXP που έχουν τα πακέτα στη διεπαφή εισόδου του δρομολογητή αποφασίζεται η ουρά εξόδου στην οποία θα εισαχθούν και το πεδίο EXP που θα τους ανατεθεί στη διεπαφή εξόδου.
- 3) Ο δρομολογητής εξόδου από το δίκτυό μας εξάγει από το πακέτο IP την επικεφαλίδα του δικτύου MPLS και το μεταδίδει προς τον προορισμό του.

5.4 Το Σύστημά μας

5.4.1 Γενική Περιγραφή

Θεωρούμε το παραπάνω περιβάλλον δικτύου (IP/MPLS) στο οποίο παρέχονται διαφοροποιημένες υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων (DiffServ). Σε αυτό το περιβάλλον δραστηριοποιούνται παροχείς-αποστολείς ταινιών video στις διάφορες ποιότητες που παρέχονται από το δίκτυο μετά από αίτηση των χρηστών. Οι χρήστες ζητούν να δουν κάποια ταινία video από έναν παροχέα ταινιών video ορίζοντας ένα κατώτατο ανεκτό επίπεδο κλάσης υπηρεσίας και το ποσό που είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν γι' αυτό. Εφαρμόζοντας τη θεωρία του κεφαλαίου 4, όλοι οι συμβαλλόμενοι σε αυτό το δίκτυο έχουν κάποιες απαιτήσεις να ικανοποιήσουν και κάποια συμφέροντα να προστατέψουν. Επίσης, στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται γενικά και ο τρόπος που θα πρέπει να ενεργήσουν. Παρακάτω, θα δούμε ποια μέρη του λογισμικού και με πιο τρόπο ικανοποιούν τις απαιτήσεις και τα συμφέροντα αυτά.

Τα κύρια συστατικά μέρη του συστήματος μας είναι ο Policy Server, ο COPS Server, ο User Agent, ο εξυπηρετητής video (Video Server), και η εφαρμογή του παραλήπτη video (Video Applet).

5.4.2 Ο Policy Server

Ο Policy Server (PS) είναι ο αντιπρόσωπος του δικτυακού περιβάλλοντος, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Γενικά, είναι υπεύθυνος για τη λήψη των κατάλληλων αποφάσεων για την κατηγοριοποίηση της αποστελλόμενης κίνησης. Ταυτόχρονα, είναι υπεύθυνος για την κατάλληλη χρέωση των χρηστών, ώστε να τους δίνονται τα κίνητρα να ζητούν από το δίκτυο την ποιότητα υπηρεσίας που πραγματικά έχουν ανάγκη, και αυτό να οδηγεί σε γενικότερη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου. Αλλά για να πετύχει αυτούς τους στόχους πρέπει να είναι σε θέση να γνωρίζει τις απαιτήσεις του χρήστη με ακρίβεια με έναν διαφανή

για τον χρήστη τρόπο, να γνωρίζει τη θέση του User Agent (UA) του χρήστη και να επιβάλλει τις αποφάσεις του για την κατηγοριοποίηση της αποστέλλομενης κίνησης. Για τα παραπάνω, ο PS χρησιμοποιεί τον COPS Server ο οποίος περιγράφεται παρακάτω. Η θέση του UA είναι απαραίτητη προκειμένου να αποκτηθεί ένα αντικείμενο αναφοράς σε αυτόν μέσω της CORBA Naming Service. Με αυτό το αντικείμενο αναφοράς στον UA, ο PS διαπραγματεύεται μαζί του.

Ο PS ενεργοποιείται όταν φθάσει σε αυτόν (μέσω του COPS Server) μια αίτηση για παροχή QoS από κάποια εφαρμογή ενός χρήστη. Η αίτηση αυτή εκφράζει το κατώτατο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας μεταφοράς της κίνησης κάποιου περιεχομένου μέσω των πεδίων $\{h, (\rho, \beta)\}$ του μηνύματος RESV για το οποίο ο χρήστης θα ήταν διατεθειμένος να πληρώσει κάποιο ποσό, δεδομένου ενός άνω φράγματος στον κίνδυνο ασυνέπειας του δικτύου που αποδέχεται. Οι παράμετροι $\{h, (\rho, \beta)\}$ είναι αυτές που δημοσιεύονται από τον εξυπηρετητή για το ζητούμενο περιεχόμενο στην κατώτατη κλάση υπηρεσίας που ικανοποιεί το χρήστη (Η υλοποίηση σε αυτό το σημείο δεν αντιστοιχεί απόλυτα σε όσα περιγράφονται στο κεφάλαιο 4, λόγω τελικών βελτιώσεων στην προτεινόμενη διαδικασία διαπραγμάτευσης.). Το ποσό που είναι διατεθειμένος να πληρώσει ο χρήστης και το φράγμα στον κίνδυνο ασυνέπειας δεν περιλαμβάνονται στην αίτηση παροχής ποιότητας υπηρεσίας, αλλά γνωστοποιούνται από τον UA στον PS κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης (βλέπε ενότητα 5.4.7). Ο PS κρατά πληροφορία μόνο για το ποιες είναι οι ενεργές συνόδοι (δηλαδή οι εξυπηρετούμενες ροές κίνησης) και ποια είναι τα χαρακτηριστικά κίνησης τους, προκειμένου να διαπραγματεύεται νέες αιτήσεις για παροχή QoS σε νέες ροές κίνησης. Έτσι, όταν ο PS δεχτεί μια αίτηση για παροχή QoS σε μια νέα ροή κίνησης ή για αναδιαπραγμάτευση της QoS μιας υπάρχουσας ροής, κατασκευάζει μια λίστα από δύο το πολύ προσφορές για παροχή QoS, όπως θα εξηγήσουμε πιο κάτω.

Κάθε προσφορά περιέχει πληροφορία για την κλάση ποιότητας υπηρεσίας στην οποία θα κατηγοριοποιηθεί η κίνηση της νέας ροής κίνησης, τις παραμέτρους κίνησης (ρ, β, h, m) και τη χρονική διάρκεια της ροής, την τιμή ή ανά μονάδα εύρους ζώνης, τα στατιστικά χαρακτηριστικά (s, t) της κλάσης υπηρεσίας, και τέλος τον κίνδυνο ασυνέπειας r της συγκεκριμένης κλάσης υπηρεσίας σε αυτό το LSP. Την πληροφορία όσον αφορά στις παραμέτρους κίνησης την παίρνει από τον παροχέα της ταινίας video, ο οποίος τη δημοσιεύει. Ο PS μπορεί να γνωρίζει τον παροχέα της ταινίας video εφόσον έχει όλη την πληροφορία για τη ροή κίνησης (IP flow) κάθε συνόδου. Επίσης, ο PS επικοινωνώντας με ένα αρχείο δεδομένων που λέγεται Information Directory, παίρνει την τρέχουσα πληροφορία όσον αφορά το διαθέσιμο εύρος ζώνης ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας, τα στατιστικά χαρακτηριστικά κάθε κλάσης και τον κίνδυνο ασυνέπειας κάθε κλάσης σε κάθε διαθέσιμο μονοπάτι από τον παροχέα video προς την εφαρμογή του χρήστη. Ο τρόπος που ενημερώνεται το Information Directory δεν αποτελεί αντικείμενο ανάλυσης της παρούσας εργασίας.

Όπως είδαμε στη παράγραφο 5.3 το δίκτυο μας μπορεί να έχει μόνο τρεις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας: τη Delay Sensitive, τη Throughput Sensitive και τη Best Effort. Η κατώτατη απαίτηση του χρήστη για κλάση ποιότητας υπηρεσίας μπορεί να είναι η Delay Sensitive ή η Throughput Sensitive. Αυτό συμβαίνει, γιατί η υπηρεσία Best Effort παρέχεται δωρεάν και είναι η κλάση ποιότητας υπηρεσίας στην οποία κατηγοριοποιείται η κίνηση ενός χρήστη αν δε γίνεται να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του για κάποια καλύτερη κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Έτσι, διατηρούμε το μοντέλο του Internet στο οποίο, ως γνωστόν, η κλάση ποιότητας υπηρεσίας είναι Best Effort και η μεταφορά της κίνησης πάνω από το δίκτυο είναι δωρεάν. Οπότε, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το πολύ δύο προσφορές μπορούμε να έχουμε που είναι να μεταφερθεί η κίνηση της νέας συνόδου μέσω της κλάσης ποιότητας υπηρεσίας Delay Sensitive ή της κλάσης ποιότητας υπηρεσίας Throughput Sensitive με τις παραμέτρους κίνησης που αντιστοιχούν στις κλάσεις αυτές.

Αφού συγκεντρώσει τις διαθέσιμες προσφορές απορρίπτει αυτές που έχουν noncompliance risk μεγαλύτερο από αυτό που επιθυμεί ο χρήστης. Την πληροφορία αυτή την παίρνει ο PS από τον UA, μέσω του αντικειμένου αναφοράς που έχει γι' αυτόν. Στη συνέχεια, υπολογίζει για κάθε προσφορά τη χρέωση της ανά μονάδα εύρους ζώνης. Αφού γίνει αυτό είναι έτοιμος να διαπραγματευτεί με τον UA την επιλογή μιας προσφοράς. Για το σκοπό αυτό δίνει στον UA για κάθε προσφορά x τη χρέωσή της $c(x)$, τον κίνδυνο ασυνέπειας r και την κλάση ποιότητας υπηρεσίας QoS Class της προσφοράς. Αφού ο UA επιλέξει κάποια προσφορά, ο PS του δίνει τις παραμέτρους κίνησης $\{h, (\rho, \beta)\}$ της επιλεγμένης προσφοράς, ώστε να είναι είτε διαθέσιμες στον χρήστη αν ζητηθούν ή για έλεγχο από τον UA της λαμβανόμενης κίνησης ή για στατιστικούς υπολογισμούς από τον UA. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι παράμετροι κίνησης δεν είναι απαραίτητα να είναι γνωστές ούτε και αντιληπτές στον χρήστη και τον UA.

Ο PS φροντίζει ώστε να επιβάλει τα χαρακτηριστικά της επιλεγμένης προσφοράς (αν υπάρχει τέτοια) στη ροή της κίνησης της νέας συνόδου. Το κάνει αυτό χρησιμοποιώντας τον COPS Server και το επίπεδο Packet Scheduler/Marker της στοίβας πρωτοκόλλων των υπολογιστών των αποστολέων και των παραληπτών κίνησης ταινιών video. Το πώς επιτυγχάνεται αυτό θα συζητηθεί στην επόμενη παράγραφο.

5.4.3 Ο COPS Server

Ο COPS Server είναι η διεπαφή του Policy Server με το δίκτυο. Μέσω αυτού φθάνουν οι αιτήσεις των εφαρμογών των παραληπτών ταινιών video για παροχή QoS στον Policy Server. Οι αιτήσεις των χρηστών για παροχή QoS φτάνουν στον COPS Server με απόλυτη σαφήνεια, αφού περιέχονται στις παραμέτρους RSVP RESV μηνυμάτων. Ο COPS Server πρέπει να βγάλει τις παραμέτρους αυτές μέσα από τα αντικείμενα FLOWSPEC των RSVP RESV μηνυμάτων και να τις μεταδώσει στον PS.

Επίσης, μέσω του RSVP RESV μηνύματος οι αιτήσεις των εφαρμογών των παραληπτών ταινιών video για παροχή QoS φτάνουν στον PS με έναν διαφανή για το χρήστη τρόπο και χωρίς να χρειάζεται οι εφαρμογές να γνωρίζουν τη θέση του PS. Αυτό συμβαίνει, γιατί ορίσαμε ότι οι δρομολογητές στις εισόδους του δικτύου θα λειτουργούν ως COPS Clients. Σύμφωνα με τη λειτουργικότητα αυτή προωθούν κάθε μήνυμα RSVP που φτάνει σε αυτούς στον COPS Server, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο COPS. Οι δρομολογητές περιμένουν από τον COPS Server να τους απαντήσει για το αν πρέπει ή όχι να προωθήσουν αυτό το μήνυμα στον επόμενο κόμβο (και για το αν θα κάνουν ή όχι δέσμευση πόρων χαρακτηριστικό που στην περίπτωση μας δε χρησιμοποιείται).

Όταν ο PS πληροφορηθεί από τον UA την επιλεγμένη προσφορά για παροχή QoS, τότε επιβάλλει τα χαρακτηριστικά της στη ροή της νέας συνόδου. Για το σκοπό αυτό, ενημερώνει τον COPS Server για τα χαρακτηριστικά της επιλεγμένης προσφοράς. Έχοντας τα χαρακτηριστικά αυτά ο COPS Server, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο COPS και συγκεκριμένα το αντικείμενο του πρωτοκόλλου COPS Decision: Replacement Data, κατασκευάζει εντολή για τον COPS Client (δρομολογητή) προκειμένου να αντικαταστήσει τις αρχικές παραμέτρους κίνησης του αρχικού αντικειμένου FLOWSPEC του μηνύματος RSVP RESV με τις παραμέτρους κίνησης της επιλεγμένης προσφοράς. Επίσης, χρησιμοποιώντας το ίδιο αντικείμενο του COPS, κατασκευάζει εντολή για τον COPS Client (δρομολογητή) προκειμένου να προσθέσει ένα νέο αντικείμενο DCLASS του πρωτοκόλλου RSVP στο μήνυμα RSVP RESV που περιέχει την τιμή του DSCP που πρέπει να έχουν τα πακέτα που αποστέλλονται, ώστε να κατηγοριοποιηθούν στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας της επιλεγμένης προσφοράς. Κατόπιν, ο COPS Server χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο COPS στέλνει τις εντολές του PS, πίσω στο δρομολογητή που είχε στείλει το μήνυμα RSVP RESV, ο οποίος το αλλάζει σύμφωνα με τις εντολές που δέχθηκε. Κατόπιν, ο δρομολογητής προωθεί το μήνυμα RSVP RESV στον επόμενο κόμβο προς τον παροχέα των ταινιών video.

Όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο, ο αποστολέας ταινιών video τις στέλνει σύμφωνα με το μήνυμα RSVP RESV που δέχεται.

Η δυνατότητα που έχει ο COPS Server να λειτουργεί με έναν διαφανή τρόπο και στο εσωτερικό του δικτύου ως σημείο ελέγχου για την αποδοχή ή όχι των ροών νέων ροών κίνησης σε μια ορισμένη κλάση ποιότητας υπηρεσίας είναι ο κυριότερος λόγος που χρησιμοποιήθηκε. Με τον τρόπο αυτό διατηρείται η απλότητα του μοντέλου επικοινωνίας και διασφαλίζεται η συμβατότητα των εφαρμογών με τις επιλογές μας (λόγω και της στοίβας πρωτοκόλλων των Windows 2000 που χρησιμοποιούν οι υπολογιστές των αποστολέων και των παραληπτών κίνησης).

5.4.4 Ο Προσωπικός Αντιπρόσωπος (User Agent)

Ο User Agent, όπως ορίζεται από την αρχιτεκτονική υπηρεσιών TINA, είναι αντιπρόσωπος του χρήστη στο περιβάλλον του παροχέα υπηρεσιών δικτύου (NSP). Είναι το σημείο από όπου καθορίζονται τα χαρακτηριστικά κάθε νέας συνόδου δικτυακών υπηρεσιών, οποιασδήποτε εφαρμογής, με βάση τις προτιμήσεις του χρήστη και τη συνάρτηση ωφελιμότητάς του, μετά από διαπραγμάτευση με τον PS. Οι προτιμήσεις του χρήστη (επιθυμητή κλάση υπηρεσίας, ποσό που είναι διαθεσιμότερος να πληρώσει ο χρήστης, κίνδυνος ασυνέπειας) αποθηκεύονται σε ένα αρχείο που ονομάζεται αρχείο προτιμήσεων, κατά την εγγραφή του χρήστη στον NSP και μπορούν να μεταβάλλονται από το χρήστη κατά βούληση (μέσω της διεπιφάνειας της εφαρμογής του). Ο UA έχει πρόσβαση στο αρχείο προτιμήσεων του χρήστη και από εκεί μπορεί να πάρει πληροφορία όσον αφορά στο ποσό που διατίθεται να πληρώσει και στον κίνδυνο ασυνέπειας ανά ταινία video που προτιμά ο χρήστης. Ο UA αποθηκεύει το μοντέλο ωφελιμότητας του χρήστη. Έτσι, για κάθε προσφορά που δέχεται από τον PS υπολογίζει το καθαρό όφελος και επιλέγει την προσφορά που το μεγιστοποιεί, ενημερώνοντας γι' αυτήν τον PS. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση, η λειτουργικότητα του UA είναι ανεξάρτητη από το είδος της υπηρεσίας που πρόκειται να λάβει ο χρήστης, δηλαδή είναι ανεξάρτητη από τη συγκεκριμένη εφαρμογή του χρήστη.

Ο UA είναι ένας CORBA Agent που παρέχει μια διεπιφάνεια προγραμματισμού IDL, ώστε να μπορούν να καλούνται οι λειτουργίες του από τον PS. Ο UA εγγράφεται στη CORBA Naming Service με το όνομα 'UA:<διεύθυνση IP του υπολογιστή στον οποίο εκτελείται>'. Χρησιμοποιώντας την CORBA Naming Service επικοινωνούν μαζί του άλλα προγράμματα, όπως ο PS και η εφαρμογή του παραλήπτη ταινιών video. Ο UA δεν γνωρίζει, ούτε αποκτά αντικείμενο αναφοράς σε οποιοδήποτε άλλο πρόγραμμα. Τα άλλα προγράμματα (που έχουν πιστοποιημένη ταυτότητα) έρχονται σε επαφή μαζί του και ανταλλάσσουν πληροφορία. Είναι μοναδικός ανά προσωπικό υπολογιστή και αρχίζει την εκτέλεσή του με την είσοδο του χρήστη στον υπολογιστή.

5.4.5 Ο Εξυπηρετητής Video (Video Server)

Ο εξυπηρετητής video αντιπροσωπεύει τον παροχέα της υπηρεσίας αποστολής αποθηκευμένων ταινιών video κατόπιν αιτήσεως (video-on-demand). Για κάθε ταινία δημοσιεύει τις βέλτιστες παραμέτρους κίνησης $\{h, (\rho, \beta), m\}$ ανά κλάση υπηρεσίας και τη χρονική διάρκεια T του περιεχομένου (βλέπε ενότητα 4.1.4). Είναι προσβάσιμος μέσω του WWW και προσφέρει στους παραλήπτες ταινιών video την κατάλληλη εφαρμογή (Video Applet) για να επικοινωνούν μαζί του, αλλά και για να βλέπουν την ταινία που έχουν επιλέξει. Για την εφαρμογή Video Applet θα μιλήσουμε στην επόμενη παράγραφο.

Ο Video Server χρησιμοποιεί το GQoS API για τις νέες συνδέσεις αποστολής κίνησης που δημιουργεί. Περιμένει σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση για νέες αιτήσεις σύνδεσης. Όταν

δέχεται μια αίτηση σύνδεσης με ορισμένες απαιτήσεις QoS, τότε το επίπεδο Service Provider (ο RSVP Service Provider) της στοίβας πρωτοκόλλων του υπολογιστή του στέλνει μηνύματα RSVP PATH με τις καλύτερες δυνατές παραμέτρους αποστολής κίνησης (στην ανώτατη κλάση υπηρεσίας) πριν ανοίξει η νέα σύνδεση αποστολής κίνησης. Αφού ανοίξει η σύνδεση αποστολής κίνησης, στέλνει την κίνηση κάθε ταινίας σύμφωνα με τα αποτελέσματα της σηματοδότησης του RSVP. Δηλαδή στέλνει την κίνηση της ταινίας σύμφωνα με τις παραμέτρους κίνησης του socket, και σημαδεύει τα πακέτα της κίνησης σύμφωνα με την επιλεγμένη κλάση υπηρεσίας. Ο Packet Scheduler/Marker του υπολογιστή, στον οποίο εκτελείται η εφαρμογή του Video Server, μεταχειρίζεται την επιπλέον κίνηση σύμφωνα με την επιλεγμένη κλάση υπηρεσίας. Αν έχει επιλεγθεί η κλάση ποιότητας υπηρεσίας “Throughput Sensitive”, τότε η επιπλέον κίνηση χρησιμοποιεί επιπλέον πόρους από αυτούς που καθορίζονται από τις παραμέτρους κίνησης του socket, αν αυτοί είναι διαθέσιμοι. Από την άλλη, αν έχει επιλεγθεί η κλάση ποιότητας υπηρεσίας “Delay Sensitive”, όλη η κίνηση μορφοποιείται ώστε να είναι σύμφωνη με τις παραμέτρους κίνησης του socket που έχει ανοιχθεί.

Ο Video Server μπορεί να δεχθεί ταυτόχρονες αιτήσεις για αποστολή ταινιών video και αποστέλλει κίνηση ταυτόχρονα σε πολλές εφαρμογές. Πρόκειται για εφαρμογή multi-threaded στην οποία κάθε πελάτης εξυπηρετείται από διαφορετικό thread.

5.4.6 Η Εφαρμογή του Παραλήπτη Video (Video Applet)

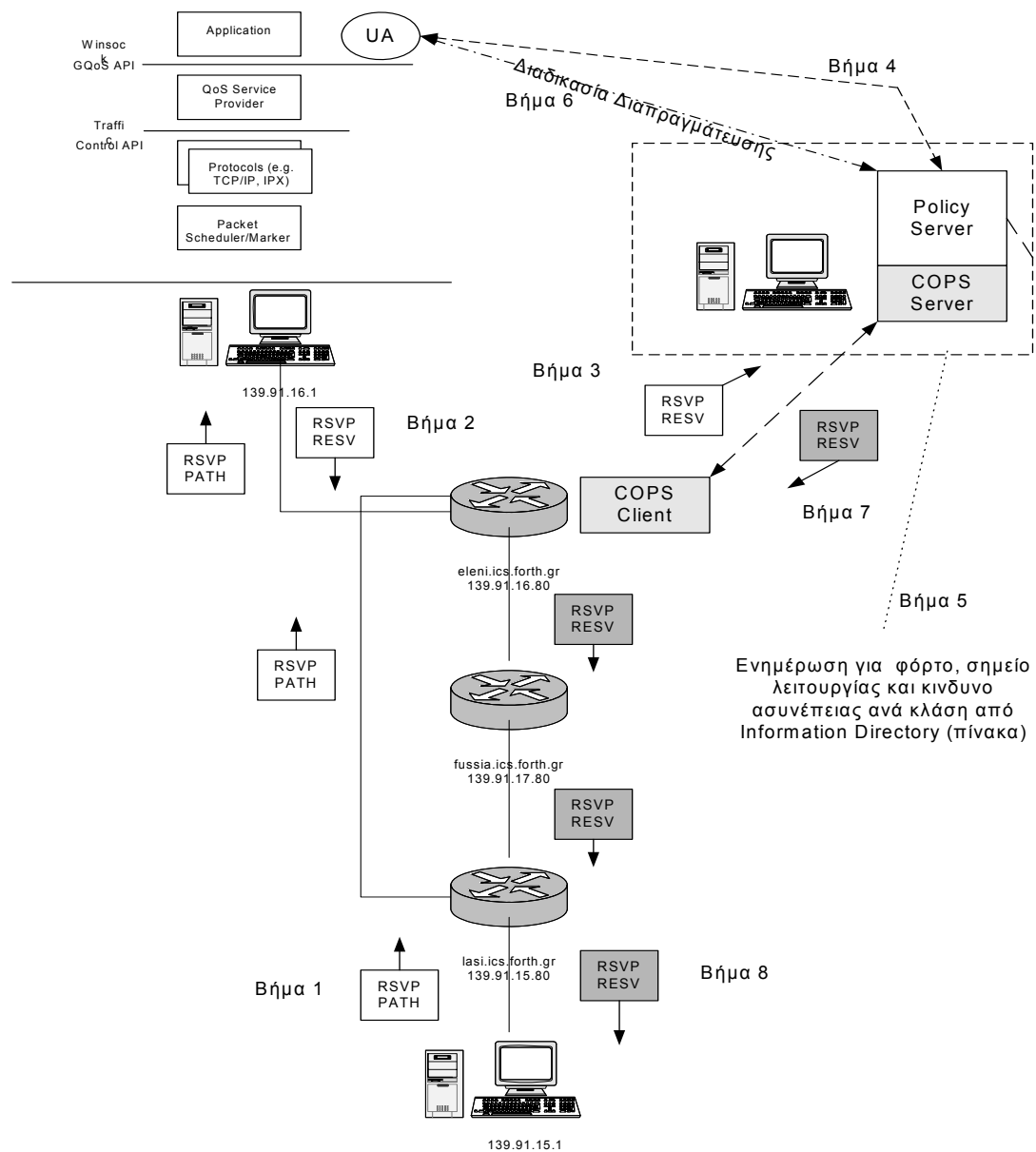
Το Video Applet είναι εφαρμογή του παροχέα video, προσπελάσιμη μέσω WWW, που χρησιμοποιείται προκειμένου οι χρήστες να επικοινωνούν με τον Video Server, αλλά και για να βλέπουν την ταινία που επιλέγουν. Δηλαδή, είναι το σημείο πρόσβασης των χρηστών-παραληπτών ταινιών video στο σύστημα. Παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον στους χρήστες μέσω του οποίου, μπορούν να επιλέξουν ποια ταινία επιθυμούν να δουν, την κατώτατη κλάση ποιότητας υπηρεσίας μεταφοράς της ταινίας για την οποία είναι διαθεσιμότητα να πληρώσουν, το ποσό το οποίο είναι διαθεσιμότητα να πληρώσουν, τον ανώτατο κίνδυνο ασυνέπειας που ανέχονται από το δίκτυο, και να δουν την ταινία που επέλεξαν. Ο ανεκτός κίνδυνος ασυνέπειας και το ποσό που διατίθεται να πληρώσει ο χρήστης δίνονται στον UA προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία της διαπραγμάτευσης με τον PS. Το Video Applet αποκτά μια αναφορά αντικειμένου στον UA, μέσω της CORBA Naming Service, με την οποία του περνά αυτές τις παραμέτρους. Η ταινία που επιθυμούν να δουν επιλέγεται μέσα από μια λίστα που περιέχει τις διαθέσιμες ταινίες του παροχέα ταινιών video. Μεταξύ του Video Applet και του Video Server υπάρχει ένα κανάλι επικοινωνίας (εκτός από το κανάλι παροχής της υπηρεσίας) μέσω του οποίου μεταφέρεται η λίστα των ταινιών που παρέχονται και επιλέγεται μια ταινία video από τον χρήστη. Η κατώτατη κλάση ποιότητας υπηρεσίας στη μεταφορά της κίνησης της ταινίας καθορίζεται από τον χρήστη μέσω μιας απλής κυλιόμενης μπάρας που αναφέρεται στο επίπεδο γενικά της ποιότητας υπηρεσίας που επιθυμεί ο χρήστης.

Το Video Applet, όπως όλα τα applets, μεταφέρεται αυτόματα στον υπολογιστή του χρήστη ο οποίος το κάλεσε, όπου και εκτελείται. Εκεί χρησιμοποιεί το GQoS API για τις συνδέσεις (sockets) που δημιουργεί, προκειμένου να αποστέλλονται RSVP RESV μηνύματα με τις κατώτατες απαιτήσεις των χρηστών για ποιότητα υπηρεσίας στη μεταφορά της κίνησης μιας ταινίας. Η εφαρμογή των παραληπτών video γνωρίζει τον τρόπο (βλέπε ενότητα 4.3) με τον οποίο θα θέσει τις παραμέτρους σε μια αίτηση παροχής ποιότητας υπηρεσίας (RSVP RESV), βάσει της επιλογής από το χρήστη μιας κατώτατης ανεκτής κλάσης υπηρεσίας με αόριστο τρόπο.

5.4.7 Επικοινωνία και Διαπραγμάτευση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τελικός σκοπός του συστήματός μας είναι να κατηγοριοποιήσουμε την κίνηση μιας νέας σύνδεσης σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας, δηλαδή το δίκτυο να παρέχει σ' αυτή κατάλληλη αντιμετώπιση, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διαδικασίας διαπραγμάτευσης του συμβολαίου της με τον παροχέα του δικτύου. Σε αυτή την παράγραφο θα περιγράψουμε αναλυτικά τον τρόπο με τον οποίο συμβαίνει αυτό, δηλαδή την ακολουθία των μηνυμάτων και των λειτουργιών που λαμβάνουν χώρα από όταν γίνεται αίτηση για νέα σύνδεση μέχρι τη στιγμή που η κίνηση της σύνδεσης αυτής κατηγοριοποιείται σε μια από τις τρεις διαθέσιμες κλάσεις του δικτύου μας.

Ο Video Server, όπως έχει αναφερθεί, περιμένει σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση (139.91.15.1:10000) για νέες αιτήσεις σύνδεσης. Όταν ένας πελάτης επιχειρήσει, μέσω του Video Applet, να συνδεθεί με τον Video Server, τότε αρχίζει η όλη διαδικασία για την κατηγοριοποίηση της κίνησης της νέας αυτής κίνησης σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Τα μηνύματα και η σειρά με την οποία ανταλλάσσονται φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



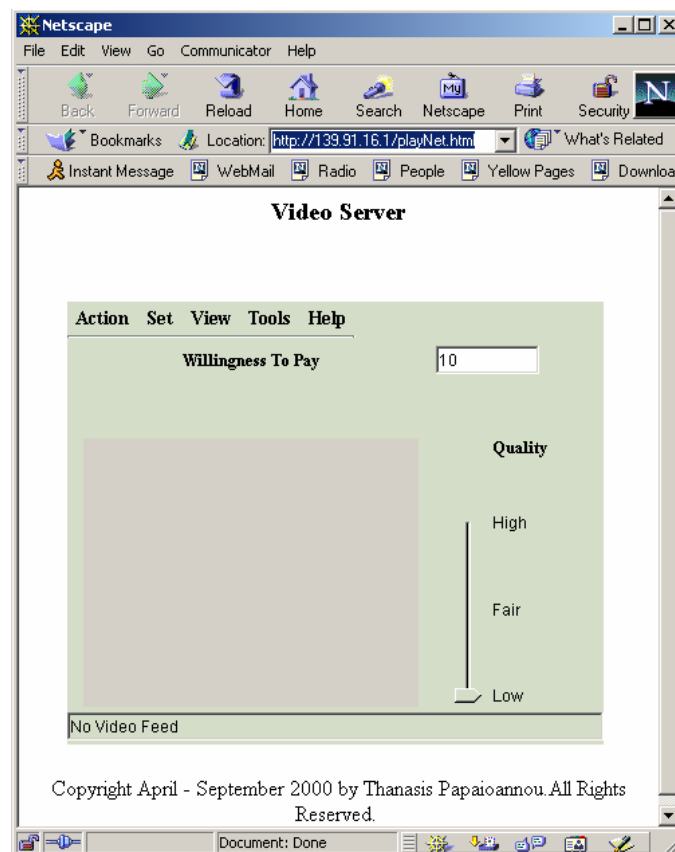
Σχήμα 19: Η ακολουθία μηνυμάτων προκειμένου να κατηγοριοποιηθεί η κίνηση μιας νέας σύνδεσης.

Αναλυτικά, ανά βήμα της διαδικασίας συμβαίνουν τα εξής:

- Βήμα 1. Όταν ο Video Server δέχεται την αίτηση νέας σύνδεσης με ορισμένες απαιτήσεις για QoS, τότε το επίπεδο Service Provider (ο RSVP Service Provider) της στοίβας πρωτοκόλλων του υπολογιστή του, στέλνει ένα μήνυμα RSVP PATH με τις παραμέτρους αποστολής κίνησης $\{h, (\rho, \beta)\}$ στην ανώτατη δυνατή κλάση υπηρεσίας πριν ανοίξει η νέα σύνδεση αποστολής κίνησης. Τα μηνύματα αυτά περνούν από το δίκτυό μας χωρίς παρεμβολές σαν απλά πακέτα κίνησης IP και φτάνουν στον υπολογιστή του παραλήπτη. Υπενθυμίζουμε ότι δεν είναι ενεργοποιημένο το πρωτόκολλο RSVP στους ενδιάμεσους δρομολογητές.
- Βήμα 2. Στον υπολογιστή του παραλήπτη, το επίπεδο Service Provider (RSVP Service Provider) της στοίβας των πρωτοκόλλων του αναλαμβάνει να απαντήσει στα μηνύματα RSVP PATH που δέχεται. Στέλνει μηνύματα RSVP RESV προς τον αποστολέα κίνησης ταινιών video, με τις παραμέτρους κίνησης $\{h, (\rho, \beta)\}$ που εκφράζουν την κατώτατη κλάση ποιότητας υπηρεσίας που είναι ανεκτή από το χρήστη.
- Βήμα 3. Τα μηνύματα RSVP RESV γίνονται αντιληπτά από τον δρομολογητή εισόδου (με διεύθυνση 139.91.16.80) στο δίκτυο, ο οποίος εκτελεί τη λειτουργικότητα ενός COPS Client. Αυτός, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο COPS στέλνει το μήνυμα RSVP RESV που δέχτηκε στον COPS Server.
- Βήμα 4. Ο COPS Server επεξεργάζεται το μήνυμα COPS που δέχτηκε (το οποίο περιέχει το μήνυμα RSVP RESV) και εξάγει από αυτό τις κατώτατες απαιτήσεις του χρήστη για QoS καθώς και άλλα χαρακτηριστικά της νέας σύνδεσης (π.χ. την ταυτότητα του χρήστη ή τον προσδιορισμό της ροής κίνησης), τις οποίες δίνει στον Policy Server. Ο Policy Server, χρησιμοποιώντας τη διεύθυνση του παραλήπτη της κίνησης, αποκτά μέσω της CORBA Naming Service ένα αντικείμενο αναφοράς στον UA του παραλήπτη. Ο Policy Server ενημερώνεται από τον UA για το ζητούμενο ανώτατο κίνδυνο ασυνέπειας r_{user} και τη ζητούμενη ταινία video του παραλήπτη.
- Βήμα 5. Κατόπιν επικοινωνεί με ένα εικονικό Information Directory (πίνακα) και πληροφορείται όσον αφορά στο διαθέσιμο εύρος ζώνης, στο σημείο λειτουργίας (s, t) κάθε κλάσης ποιότητας υπηρεσίας και στον κίνδυνο ασυνέπειας κάθε κλάσης ποιότητας υπηρεσίας. Επίσης, πληροφορείται τη δημοσιευμένη πληροφορία για τη ζητούμενη ταινία video από το Video Server, και με βάση το r_{user} κατασκευάζει έναν πίνακα από δύο το πολύ προσφορές.
- Βήμα 6. Στη συνέχεια, ο Policy Server διαπραγματεύεται με τον UA δίνοντάς του μία προς μία όλες τις προσφορές. Στο τέλος της διαπραγμάτευσης ο UA ενημερώνει τον Policy Server για την επιλογή του.
- Βήμα 7. Με βάση την επιλογή του UA, ο Policy Server δίνει εντολή στον δρομολογητή εισόδου στο δίκτυο (με διεύθυνση IP 139.91.16.80) να αλλάξει τις παραμέτρους κίνησης $\{h, (\rho, \beta)\}$ στο μήνυμα RSVP RESV και να προσθέσει στο μήνυμα RSVP RESV ένα αντικείμενο DCLASS με το κατάλληλο DSCP, μέσω του COPS Server. Το νέο μήνυμα RSVP RESV προωθείται ανενόχλητα από τους υπόλοιπους δρομολογητές του δικτύου μέχρι τον αποστολέα της κίνησης.
- Βήμα 8. Στον υπολογιστή του παραλήπτη, το επίπεδο Service Provider (RSVP Service Provider) της στοίβας των πρωτοκόλλων του, ανοίγει τη νέα σύνδεση με τον παραλήπτη με τις παραμέτρους κίνησης του μηνύματος RSVP RESV. Το επίπεδο Traffic Scheduler/Marker αναλαμβάνει να ελέγχει ότι οι παράμετροι αποστολής κίνησης συμφωνούν με τις παραμέτρους της νέας σύνδεσης και να μορφοποιεί ή να απορρίπτει την επιπλέον κίνηση. Επίσης, το επίπεδο Traffic Scheduler/Marker σημαδεύει την αποστελλόμενη κίνηση με το DSCP που περιείχε το αντικείμενο DCLASS.

5.5 Επίδειξη Συστήματος

Σε αυτή την ενότητα θα περιγράψουμε την υπηρεσία που παρέχεται από ένα σενάριο εκτέλεσης του συστήματος που υλοποιήσαμε. Θεωρούμε έναν πελάτη, ο οποίος εργάζεται στον υπολογιστή με διεύθυνση IP 139.91.15.1 και επιθυμεί να δει κάποια βίντεο-ταινία από έναν παροχέα που ονομάζεται “playNet” και οποίος είναι εγκατεστημένος στον υπολογιστή με διεύθυνση IP 139.91.16.1. Η υπηρεσία είναι προσβάσιμη μέσω του WWW, οπότε ο πελάτης χρησιμοποιεί μια εφαρμογή πλοήγησης στο WWW (π.χ. Netscape), προκειμένου να επισκεφτεί την ιστοσελίδα του παροχέα. Όταν ο πελάτης επισκεπτεται την ιστοσελίδα βλέπει στην οθόνη του την Εικόνα 1.

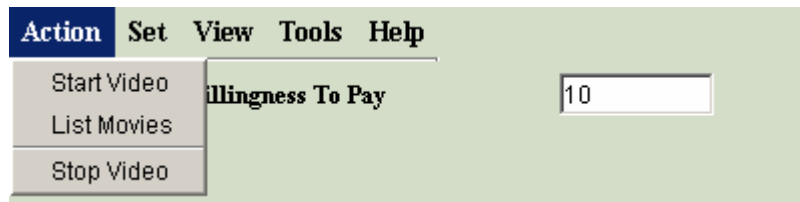


Εικόνα 1: Η ιστοσελίδα του παροχέα βίντεο-ταινιών.

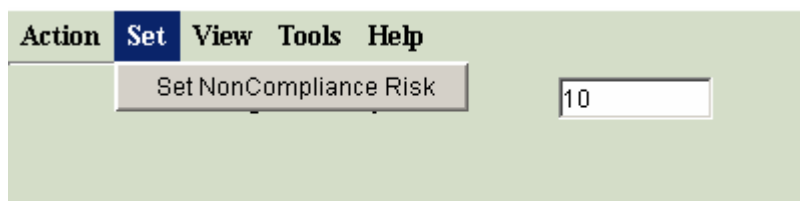
Συγκεκριμένα, ο πελάτης βλέπει τις επικεφαλίδες των καταλόγων προσφερόμενων επιλογών λειτουργιών (“Action”, “Set”, “Tools” και “Help”):

- Ο κατάλογος λειτουργιών “Action” περιλαμβάνει τη λειτουργία “Start Video” με την οποία αρχίζει η αποστολή κάποιας επιλεγμένης ταινίας video, τη λειτουργία “List Movies” με την οποία επιλέγεται κάποια ταινία video, και τη λειτουργία “Stop Video” με την οποία διακόπτεται η αποστολή μιας ταινίας video (βλέπε Εικόνα 2).
- Ο κατάλογος λειτουργιών “Set” περιλαμβάνει τη λειτουργία “Set NonCompliance Risk” με την οποία ο χρήστης καθορίζει τον ανεκτό κίνδυνο ασυνέπειας (βλέπε Εικόνα 3).
- Ο κατάλογος λειτουργιών “View” περιλαμβάνει τη λειτουργία “Status Bar” (βλέπε Εικόνα 4) η οποία εμφανίζει ή όχι μια μπάρα με την τρέχουσα κατάσταση στην αποστολή της ταινίας στο κάτω μέρος της Εικόνας 1.

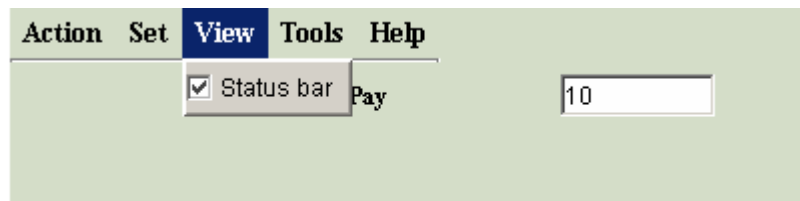
- Ο κατάλογος λειτουργιών “Tools” περιλαμβάνει τη λειτουργία “Options” με την οποία ο χρήστης μπορεί να δει και να μεταβάλλει λεπτομέρειες που αφορούν στην κατώτατη ποιότητα υπηρεσίας που τον ικανοποιεί (βλέπε Εικόνα 5).
- Ο κατάλογος λειτουργιών “Help” περιλαμβάνει τη λειτουργία “Readme” η οποία παρέχει βοήθεια στην εκτέλεση της εφαρμογής και τη λειτουργία “About” που η οποία παρέχει πληροφορίες για το σκοπό που δημιουργήθηκε η εφαρμογή (βλέπε Εικόνα 6).



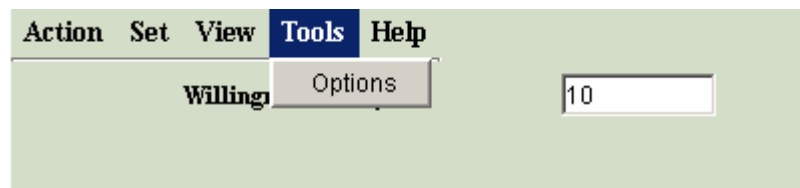
Εικόνα 2: Ο κατάλογος λειτουργιών “Action”.



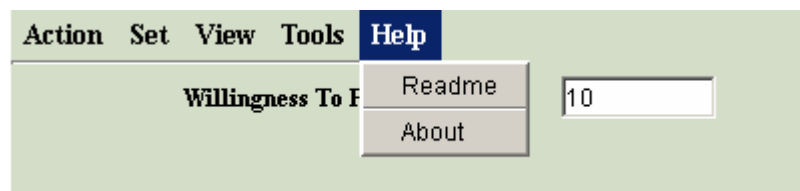
Εικόνα 3: Ο κατάλογος λειτουργιών “Set”.



Εικόνα 4: Ο κατάλογος λειτουργιών “View”.



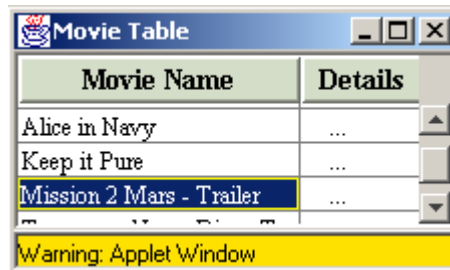
Εικόνα 5: Ο κατάλογος λειτουργιών “Tools”.



Εικόνα 6: Ο κατάλογος λειτουργιών “Help”.

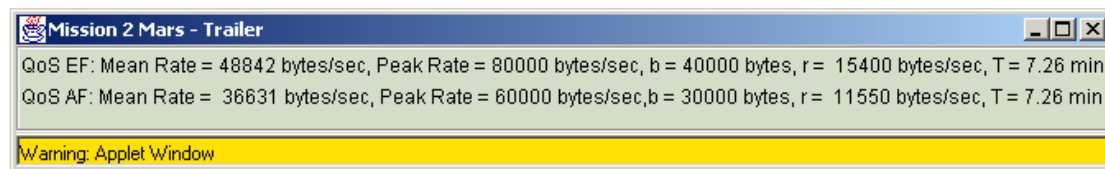
Στο κέντρο της ιστοσελίδας είναι η οθόνη όπου πρόκειται να προβληθεί η ταινία. Επίσης, υπάρχει μια κυλιόμενη μπάρα με την οποία ο χρήστης δηλώνει την κατώτατη κλάση υπηρεσίας που επιθυμεί. Επιλέγοντας τη λειτουργία “Action” → “List Table Movies”

εμφανίζεται στην οθόνη ένα «παράθυρο» (βλέπε Εικόνα 7) που περιέχει έναν πίνακα με τις ταινίες που παρέχονται. Ο πίνακας αυτός έχει δύο στήλες που περιέχουν το όνομα κάθε ταινίας (“Movie Name”) και λεπτομέρειες για το αντίστοιχο περιεχόμενο (“Details”). Έστω, ότι από τις ταινίες επιλέγει να δει το “Mission 2 Mars – Trailer”.



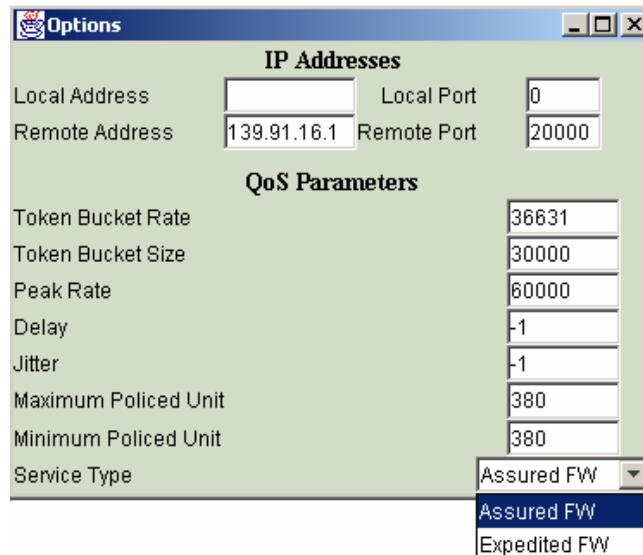
Εικόνα 7: Το «παράθυρο» που περιέχει τον πίνακα με τις ταινίες που παρέχονται.

Αν ο πελάτης κάνει διπλό χτύπημα με το ποντίκι στη διπλανή στήλη της γραμμής που βρίσκεται η επιλεγμένη ταινία εμφανίζεται στην οθόνη του το «παράθυρο» που φαίνεται στην Εικόνα 8 (ενημερώνεται σχετικά από μια βοηθητική ετικέτα όταν κινεί το ποντίκι επάνω από το «παράθυρο» της Εικόνα 8). Αυτό περιέχει την πληροφορία που δημοσιεύει ο παροχέας για την ταινία $\{m, h, (\rho, \beta)$ και $T\}$ ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας του δικτύου.



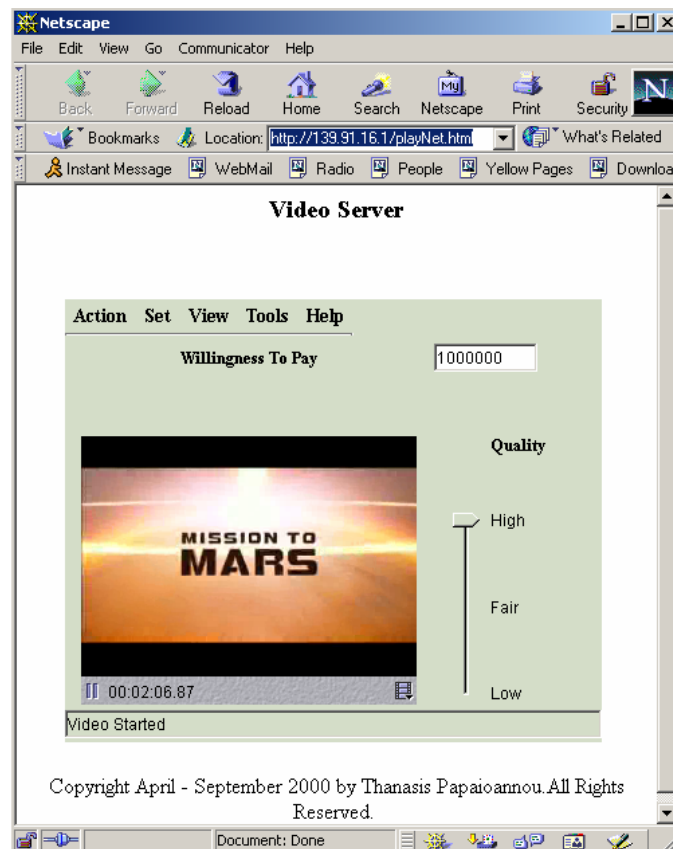
Εικόνα 8: Η πληροφορία που δημοσιεύει ο Video Server για την ταινία “Mission 2 Mars – Trailer” ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας του δικτύου.

Επίσης, επιλέγοντας από την ιστοσελίδα “View” → “Options” εμφανίζεται στην οθόνη του ένα «παράθυρο» που περιέχει λεπτομέρειες για τις απαιτήσεις του χρήστη για παροχή QoS από το δίκτυο στην μεταφορά της ταινίας (βλέπε Εικόνα 9). Το «παράθυρο» αυτό αρχικοποιείται από το αρχείο προτιμήσεων του χρήστη με κάποιες μέσες τιμές, αλλά στη συνέχεια τίθενται από την εφαρμογή του χρήστη με βάση την κατώτατη κλάση υπηρεσίας που επιλέγεται και την πληροφορία που δημοσιεύει ο εξυπηρετητής για τη ζητούμενη ταινία video σε αυτή την κλάση υπηρεσίας. Τα πεδία “Delay” και “Jitter” (δεν αποτελούν παραμέτρους του μηνύματος RESV, αλλά καθορίζουν τις παραμέτρους R, S) μπορούν να τίθενται από το χρήστη και επηρεάζουν την επιλογή του χρήστη όσον αφορά στην κατώτατη κλάση υπηρεσίας που επιθυμεί (βλέπε ενότητα 4.2.3). Το πεδίο “Service Type” αποτελεί ρητή δήλωση της κατώτατης επιθυμητής κλάσης υπηρεσίας, που επηρεάζει τις άλλες παραμέτρους του μηνύματος RESV. Τα πεδία “Token Bucket Rate”, “Token Bucket Size”, “Peak Rate”, “Maximum Policed Unit”, “Minimum Policed Unit” αφορούν στις παραμέτρους (ρ, β, h, M, m) του μηνύματος RESV αντίστοιχα (βλέπε ενότητα 2.2.1). Ο πελάτης είναι σε θέση να αγνοήσει αυτές τις λεπτομέρειες στις ρυθμίσεις ή να τις μεταβάλλει κατά βούληση.



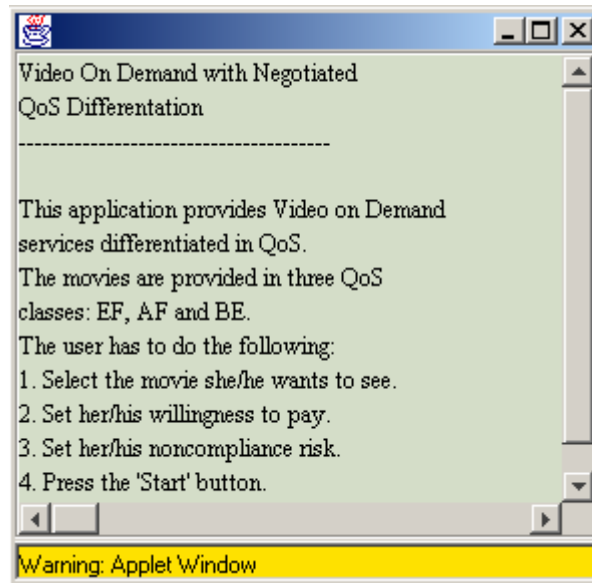
Εικόνα 9: Οι ακριβείς απαιτήσεις του πελάτη για παροχή QoS από το δίκτυο κατά τη μεταφορά της ταινίας.

Αφού, ο πελάτης έχει επιλέξει την ταινία που επιθυμεί να δει, και έχει θέσει το ποσό που είναι διαθεσιμότενος να πληρώσει για αυτή την υπηρεσία και τον ανεκτό κίνδυνο ασυνέπειας του δικτύου, τότε επιλέγει “Action” → “Start Video” για να αρχίσει η αποστολή της ταινίας από τον παροχέα προς την εφαρμογή του. Τότε, λαμβάνει χώρα η διαδικασία επιλογής SLS και η ταινία φθάνει στην εφαρμογή του πελάτη, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής. Ένα στιγμιότυπο από την προβολή της ταινίας φαίνεται στην Εικόνα 10.



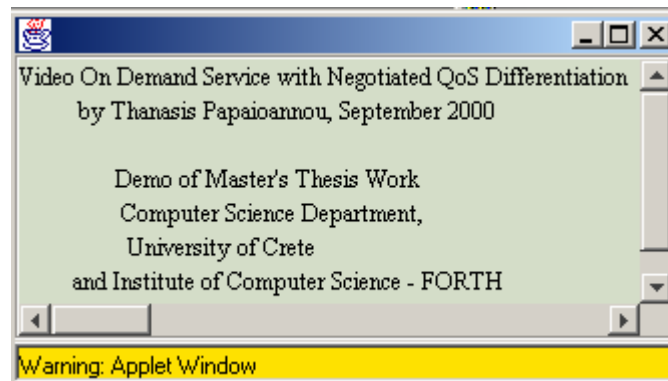
Εικόνα 10: Η ζητούμενη ταινία προβάλλεται στην οθόνη του πελάτη σύμφωνα με το SLS που έχει επιλεγεί για αυτή με τη διαδικασία διαπραγμάτευσης που προτείνουμε.

Αν ο πελάτης επιλέξει “Help” → “Readme”, τότε στην οθόνη του χρήστη εμφανίζεται ένα «παράθυρο» (βλέπε Εικόνα 11) που περιέχει πληροφορίες για το σύστημα (όπως υλοποιήθηκε), καθώς και οδηγίες για την εκτέλεση της εφαρμογής.



Εικόνα 11: Το «παράθυρο» αυτό περιέχει πληροφορίες για το σύστημα που υλοποιήσαμε, καθώς και οδηγίες για την εκτέλεση της εφαρμογής.

Τέλος, αν ο πελάτης επιλέξει “Help” → “About”, τότε στην οθόνη του χρήστη εμφανίζεται ένα «παράθυρο» (βλέπε Εικόνα 12) που περιέχει πληροφορίες, όσον αφορά τον κατασκευαστή του συστήματος και την ημερομηνία κατασκευής του.



Εικόνα 12: Το «παράθυρο» αυτό περιέχει πληροφορίες για τον κατασκευαστή του συστήματος και την ημερομηνία κατασκευής του.

6 Αποτίμηση Προσέγγισης Διαπραγμάτευσης και Αρχιτεκτονικής

6.1 Γενικά

Στην παρούσα εργασία, σχεδιάσαμε και υλοποιήσαμε μια αρχιτεκτονική για τη διαπραγμάτευση SLA, την υλοποίηση SLA και τον έλεγχο συμμόρφωσης της κίνησης σύμφωνα με τους κανόνες των SLA για αυτή σε ένα διαχειριζόμενο δίκτυο DiffServ. Επίσης, σχεδιάσαμε και προτείνουμε μια διαδικασία για την αποδοτική επιλογή SLS από τους χρήστες. Στο κεφάλαιο αυτό, θα δικαιολογήσουμε τις επιλογές μας, αναλύοντας τα χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής και της διαδικασίας επιλογής SLS, και θα εξηγήσουμε τα πλεονεκτήματα που παρέχει η προσέγγισή μας.

6.2 Ποιοτική Αποτίμηση

Σε ένα διαχειριζόμενο δικτυακό περιβάλλον (administrative domain), όπως το σύστημά μας, αφού διαλέξουμε μέσω διαπραγμάτευσης την κλάση ποιότητας υπηρεσίας στην οποία θα κατηγοριοποιήσουμε την κίνηση μιας νέας ροής, το δίκτυο πρέπει να επιλέξει το LSP στο οποίο θα εισάγει την νέα κυκλοφορία. Αυτό μπορεί να γίνει με πολλά κριτήρια όπως την ισοκατανομή της κίνησης στα LSP, το κόστος χρήσης του καθενός LSP (σε περίπτωση που μισθώνονται τμήματα ενός LSP), το *συνεγόμενο κόστος* (implied cost) ενός LSP [38] και άλλα. Επίσης, σε κάθε περίπτωση η ποιότητα υπηρεσίας που θα έχει ο χρήστης σε κάθε κλάση πρέπει να είναι περίπου ίδια ανά LSP για λόγους δικαιοσύνης και ομοιομορφίας του δικτύου. Αν η τιμή p_i ανά μονάδα ισοδύναμου εύρους ζώνης μιας κλάσης ποιότητας υπηρεσίας i εκφράζει και κάποιο από τα παραπάνω κριτήρια και επομένως είναι διαφορετική ανά LSP, τότε η διαδικασία διαπραγμάτευσης έχει σαν αποτέλεσμα την επιλογή τόσο κλάσης ποιότητας υπηρεσίας όσο και μονοπατιού LSP από το οποίο θα περάσει η κίνηση μιας νέας ροής. Σε αυτή την περίπτωση δηλαδή, βρίσκουμε την κλάση ποιότητας υπηρεσίας που εξυπηρετεί καλύτερα τις απαιτήσεις του χρήστη για ποιότητα υπηρεσίας, και ταυτόχρονα το LSP που εξυπηρετεί καλύτερα τα κριτήρια που θέσαμε για την εισαγωγή κίνησης στα διάφορα LSP. Με αυτόν τον τρόπο, αν τα κριτήρια που θέσαμε για την εισαγωγή κίνησης στα διάφορα LSP έχουν σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη και καλύτερη χρησιμοποίηση του δικτύου, κάνουμε δρομολόγηση με βάση κριτήρια (Constraint-based Routing), δηλαδή:

- επιλέγουμε τα μονοπάτια που ικανοποιούν τις απαιτήσεις των χρηστών για ποιότητα υπηρεσίας, και
- συμβάλουμε στην μεγαλύτερη και καλύτερη χρησιμοποίηση του δικτύου.

Επίσης, αν τα κριτήρια με τα οποία επιλέγουμε την τιμή ανά μονάδα ισοδύναμου εύρους ζώνης ανά κλάση έχουν σαν αποτέλεσμα την ισοκατανομή του φόρτου κάθε κλάσης στα διάφορα LSP, τότε η διαδικασία διαπραγμάτευσης λειτουργεί και ως μηχανισμός διαχείρισης κυκλοφορίας (Traffic Engineering) ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Αυτό συμβαίνει, γιατί με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αποφευχθεί η συμφόρηση μιας κλάσης ποιότητας υπηρεσίας, λόγω κακής κατανομής της κίνησης που προορίζεται γι' αυτή στα διάφορα LSP.

Οι ροές κινήσεις που δεν είναι απαιτητικές για κάποια ποιότητα υπηρεσίας δεν αποστέλλουν σηματοδότηση RSVP και δε γίνεται γι' αυτές διαπραγμάτευση συμβολαίου κίνησης. Γι' αυτές τις ροές ισχύει το μοντέλο του σημερινού Internet, όπου η μοναδική κλάση ποιότητας υπηρεσίας είναι η Best Effort και δεν υπάρχουν συμβόλαια κίνησης. Επίσης, στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας Best Effort κατηγοριοποιούνται και οι ροές κίνησης που η διαδικασία

διαπραγμάτευσης γι' αυτές δεν κατέληξε στην επιλογή κάποιας καλύτερης κλάσης ποιότητας υπηρεσίας. Γι' αυτό το λόγο στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας Best Effort είναι πιθανή η συμφόρηση κάτι που σπάνια συμβαίνει για τις άλλες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας και σε μικρό βαθμό. Η συμφόρηση της κλάσης ποιότητας υπηρεσίας Best Effort έχει σαν αποτέλεσμα την απόρριψη πακέτων αυτής της κλάσης, αλλά δεν επηρεάζει τα χαρακτηριστικά των άλλων κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας, αφού αυτές έχουν δεσμευμένους πόρους. Πρέπει να τονιστεί, επίσης, ότι στο σύστημα μας δεν κάνουμε έλεγχο αποδοχής συνδέσεων στο δίκτυο, αλλά σε κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Δηλαδή δεν απορρίπτουμε μια αίτηση σύνδεσης που εισέρχεται στο δίκτυο σε καμιά περίπτωση, αλλά αποφασίζουμε από ποια κλάση ποιότητας υπηρεσίας θα περάσει. Έτσι, διατηρούμε το χαρακτηριστικό του σημερινού Internet της ελεύθερης αποστολής κίνησης σε κάθε περίπτωση.

Στο σύστημά μας έχουμε υποθέσει για λόγους απλότητας ότι το εύρος ζώνης κάθε κλάσης είναι σταθερό. Λόγω του ότι όλες οι νέες αιτήσεις για δέσμευση πόρων περνούν από τον Policy Server ενός διαχειριζόμενου δικτυακού περιβάλλοντος, θα μπορούσαμε να κάνουμε δυναμική ανακατανομή του εύρους ζώνης κάθε κλάσης βάσει της ζήτησής τους. Πράγματι, αν υποθέσουμε ότι είχαμε προσφορά για την ικανοποίηση μιας αίτησης από κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας, τότε η διαδικασία διαπραγμάτευσης θα έδινε την επιλογή του χρήστη για την κλάση ποιότητας υπηρεσίας που θα επιθυμούσε να κατηγοριοποιηθεί η κίνησή του. Έτσι, το διαθέσιμο εύρος ζώνης στην επιλεγμένη κλάση ποιότητας υπηρεσίας θα μειωνόταν κατά το εύρος ζώνης που καταναλώνει η νέα ροή κίνησης. Όταν η διαθέσιμη χωρητικότητα ανά κλάση θα επέφτε κάτω από ένα όριο, για κάποιο χρονικό διάστημα, τότε θα δεσμεύαμε επιπλέον πόρους για αυτή την κλάση ποιότητας υπηρεσίας από ελεύθερους πόρους του δικτύου ή αφαιρώντας διαθέσιμους πόρους από κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας κατώτερης ποιότητας. Έτσι, θα προστατεύαμε τα ενεργά συμβόλαια κίνησης του δικτύου και θα διασφαλίσαμε τη μεγαλύτερη δυνατή διαθεσιμότητα για τις δημοφιλείς κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας σε βάρος των κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας κατώτερης ποιότητας. Επίσης, για κάθε κλάση θα μπορούσε να υπάρχει και ένα κάτω φράγμα στο χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης τους. Σε αυτή την περίπτωση, αν η πληρότητα μιας κλάσης ποιότητας υπηρεσίας ήταν μικρότερη από αυτό το κάτω φράγμα, για κάποιο χρονικό διάστημα, τότε θα αποδεσμεύαμε πόρους από την κλάση αυτή, προκειμένου να δεσμεύονταν από άλλες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας που θα τους χρειαζόνταν.

6.3 Τεχνικά Θέματα

Στο σύστημά μας χρησιμοποιήσαμε MPLS για την υλοποίηση του δικτυακού περιβάλλοντος διαφοροποιημένων υπηρεσιών. Αυτό έγινε λόγω των πλεονεκτημάτων που παρέχει η επιλογή αυτή:

- **Επεκτασιμότητα:** Χιλιάδες ροές κίνησης μπορούν να περνούν από το ίδιο LSP μεγάλου μήκους (πολλών συνδέσεων), με ταχύτατη δρομολόγηση και ταυτόχρονα τους παρέχεται η συμπεριφορά που καθορίζεται από το DSCP που έχει το κάθε πακέτο.
- **Ανεξαρτησία από υποκείμενο πρωτόκολλο επιπέδου σύνδεσης:** Το MPLS είναι πρωτόκολλο δικτύου που μπορεί να συνεργαστεί με ένα μεγάλο πλήθος πρωτοκόλλων επιπέδου σύνδεσης και αυτό είναι πλεονέκτημα τόσο για την ευρεία χρησιμοποίησή του όσο και για την αξιοποίηση της υπάρχουσας υποδομής του Internet.
- **Ευελιξία στην υλοποίηση των κλάσεων DiffServ:** Κάθε LSP μπορεί να εξυπηρετεί μία ή περισσότερες κλάσεις και κάθε κλάση μπορεί να εξυπηρετείται από διαφορετικά LSP ανά περίπτωση. Η υλοποίηση των PHB μπορεί να γίνεται με ένα πλήθος τρόπους όπως CR-LDP, RSVP, CB-WFQ, WRED και άλλους.
- **Νέες δυνατότητες:** Στο MPLS, λόγω του ότι η κίνηση ομαδοποιείται και ακολουθεί

ένα ή περισσότερα μονοπάτια ανά ομάδα, δίνονται δυνατότητες και με τη διαλειτουργία DiffServ με MPLS για δρομολόγηση βασισμένη σε περιορισμούς (*Constraint-based Routing*) και για διαχείριση κυκλοφορίας (*Traffic Engineering*) ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Στο MPLS δίνεται η δυνατότητα για δημιουργία επιπλέον βοηθητικών μονοπατιών για την ασφάλεια της δρομολόγησης κάποιων κλάσεων σε περίπτωση καταστροφής του μονοπατιού τους. Επίσης, είναι δυνατή η δυναμική ανακατανομή των δεσμευμένων πόρων για κάθε κλάση χωρίς μεγάλο υπολογιστικό φόρτο.

Για τους παραπάνω λόγους, αλλά και για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε πρωτοκόλλου χωριστά, η διαλειτουργία μεταξύ DiffServ και MPLS θεωρείται ο συνδυασμός τεχνολογιών με τα περισσότερα πλεονεκτήματα. Για το σκοπό αυτό, η αρμόδια ομάδα της IETF για το MPLS εργάζεται πάνω στον τρόπο που αυτό θα υποστηρίζει τις DiffServ υπηρεσίες 9.

Στο δίκτυό μας, όπως έχει αναφερθεί, χρησιμοποιήσαμε την προσέγγιση EXP-Inferred-PSC LSP (E-LSP) για την υποστήριξη των DiffServ υπηρεσιών. Σύμφωνα με αυτή, σε κάθε LSP μπορούμε να διαφοροποιήσουμε το PHB σε 8 διαφορετικά BA. Αυτή η προσέγγιση μάς επιτρέπει να διαφοροποιήσουμε με βάση το πεδίο EXP το PHB που θα έχουν τα τρία BA (λόγω των τριών κλάσεων υπηρεσίας) σε κάθε LSP δημιουργώντας μόνο ένα LSP ανά κατεύθυνση σε κάθε σύνδεσμο. Ουσιαστικά αυτό που κάνουμε είναι να συγχωνεύουμε σε κάθε δρομολογητή την κίνηση που προέρχεται από το LSP εισόδου με την κίνηση που προέρχεται από τις πηγές που εφάπτονται στον δρομολογητή αυτόν και να αποστέλλουμε τη συνολική κίνηση στο LSP εξόδου. Έτσι, δημιουργούμε ένα ανεστραμμένο δέντρο (Sink Tree) προς κάθε δυνατό δρομολογητή προορισμού και κάνουμε οικονομία στα LSP που χρειάζονται. Γενικά, είναι δυνατό να έχουμε ένα LSP ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας και ανά ζευγάρι δρομολογητών εισόδου-εξόδου κίνησης. Αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα για ένα δίκτυο N ακραίων δρομολογητών τη δημιουργία $C*N*(N-1)/2$ LSP συνολικά, όπου C ο αριθμός των διαφοροποιημένων κλάσεων. Άρα, η οικονομία που κάνουμε στη δημιουργία LSP είναι σημαντική, αφού σύμφωνα με αυτή θα έπρεπε για ένα δίκτυο N ακραίων δρομολογητών με C κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας να δημιουργήσουμε μόνο $N*\lceil C/8 \rceil$ ανεστραμμένα δέντρα, δεδομένου ότι σε κάθε LSP μπορούμε να έχουμε το πολύ 8 διαφορετικά BA (λόγω του ότι το πεδίο EXP είναι 3 bit). Αν χρησιμοποιούσαμε την άλλη προσέγγιση (Label-Only-Inferred-PSC LSP) για την υποστήριξη των DiffServ υπηρεσιών από ένα δίκτυο MPLS, τότε θα χρειαζόμασταν $C*N$ ανεστραμμένα δέντρα. Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω προσεγγίσεις για την υποστήριξη των ορισμένων PHB από την IETF [9], έχουμε ότι με E-LSP θα χρειαζόμασταν $2*N$ ανεστραμμένα δέντρα και με L-LSP $6*N$ ανεστραμμένα δέντρα. Σε κάθε περίπτωση, με την τεχνική των ανεστραμμένων δέντρων ο αριθμός των LSP είναι μικρός ανά σύνδεσμο και δεν αυξάνει όταν αυξάνει η κίνηση που διέρχεται μέσα από τα LSP (επεκτασιμότητα). Επίσης, διατηρούμε την απλότητα και την επεκτασιμότητα του μοντέλου DiffServ.

Όπως έχουμε αναφέρει, ο PS ελέγχει το συνολικό φόρτο κυκλοφορίας κάθε κλάσης ποιότητας υπηρεσίας δίνοντας ή όχι διαθέσιμες προσφορές γι' αυτές κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης. Όμως είναι αναγκαίο ο PS να μπορεί να λειτουργεί ως σημείο ελέγχου για την αποδοχή της κίνησης μιας ροής σε μια κλάση ή όχι και να μπορεί να επιβάλλει τις αποφάσεις του. Θυμίζουμε ότι η θέση του PS δεν χρειάζεται να είναι γνωστή στις εφαρμογές των χρηστών και στους UA τους, αλλά ούτε και ο PS να γνωρίζει τη θέση των UA. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε το πρωτόκολλο COPS, στους δρομολογητές εισόδου του δικτύου, με τη χρήση του οποίου κάθε πακέτο σηματοδοσίας RSVP που εισέρχεται στο δίκτυο γίνεται αντιληπτό από τους δρομολογητές αυτούς και στέλνεται για επεξεργασία στον PS. Έτσι, το συμβόλαιο κίνησης κάθε ροής, η οποία είναι έχει απαίτηση για κλάση ποιότητας υπηρεσίας καλύτερη της Best Effort, καθορίζεται μέσω του PS και της διαδικασίας διαπραγμάτευσης. Προτιμήσαμε τη χρήση του πρωτοκόλλου COPS, αντί κάποιου άλλου πρωτοκόλλου για το σκοπό αυτό (όπως είναι το SNMP ή το TelnetCLI), γιατί το COPS σε

συνδυασμό με το RSVP διευκολύνει την αυτόματη ανακάλυψη του PS από τις αιτήσεις δέσμευσης πόρων των χρηστών και την κατάλληλη αλλαγή της αίτησης δέσμευσης πόρων από τον PS, ώστε να επιβάλλονται οι αποφάσεις της διαδικασίας επιλογής SLS. Ο PS ανακαλύπτει τον UA και διαπραγματεύεται μαζί του από πληροφορία που περιέχεται στην αίτηση δέσμευσης πόρων. Επίσης, το πρωτόκολλο RSVP δίνει τη δυνατότητα πιστοποίησης της ταυτότητας του αποστολέα των μηνυμάτων της σηματοδότησης μέσω των πρωτοκόλλων IPSEC ή KerberosID.

Επίσης, είναι δυνατό να υπάρχουν περισσότεροι από ένας PS στο δίκτυο για λόγους καλύτερης απόδοσης και μεγαλύτερης ασφάλειας. Αυτό μπορεί επίσης να είναι επιθυμητό για να μην είναι ο μοναδικός PS, σε περίπτωση βλάβης του, σημείο κατάρρευσης του συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να μπορούν άλλοι PS να αναλάβουν τα καθήκοντά του PS που υπέστη βλάβη. Επίσης, ο αριθμός των αιτήσεων δέσμευσης πόρων που μπορεί να διαπραγματευτεί ταυτόχρονα ένας PS είναι περιορισμένος. Η ύπαρξη πολλαπλών PS έχει σαν αποτέλεσμα να μοιράζεται ο συνολικός υπολογιστικός φόρτος σε περισσότερους κόμβους του δικτύου. Επίσης, με την ύπαρξη πολλών PS, ένας δρομολογητής εισόδου μιας αίτησης δέσμευσης πόρων στο δίκτυο μπορεί να προωθήσει την αίτηση στον πλησιέστερο PS. Έτσι, θα υπάρχει μικρότερο κόστος επικοινωνίας μεταξύ του δρομολογητή και του PS, αλλά κυρίως μεταξύ του UA της εφαρμογής που έστειλε την αίτηση δέσμευσης πόρων και του PS, κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης. Όμως, καθώς όλοι οι PS θα ενημερώνουν την υπηρεσία καταλόγου ID για τα ενεργά SLS του συστήματος, μπορεί να υπάρξει πρόβλημα για τη συνέπεια των πληροφοριών που αποθηκεύονται στη βάση. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των PS, τόσο μεγαλύτερες είναι η απόδοση και η ασφάλεια του συστήματος, αλλά και τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος ασυνέπειας της πληροφορίας για τα ενεργά SLS του συστήματος.

6.4 Οικονομική Αποδοτικότητα

6.4.1 Μεγιστοποίηση Καθαρού Οφέλους και Πραγματικό Βέλτιστο SLS

Θυμίζουμε ότι κατά την διαδικασία επιλογής SLS που προτείνουμε, ο UA ενός χρήστη επιλέγει το SLS που μεγιστοποιεί το net benefit του χρήστη. Προκειμένου η επιλογή SLS να είναι η βέλτιστη, υποτίθεται ότι η κλάση ποιότητας υπηρεσίας του SLS επιλέγεται μέσα από ένα συνεχές διάστημα κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας (επιπέδων QoS) και ότι η κανονικοποιημένη συνάρτηση ωφελιμότητας $U(.)$ (βλέπε 4.1.5) εκφράζει τις πραγματικές προτιμήσεις του χρήστη. Όμως, σε ένα πραγματικό δίκτυο, οι κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας που παρέχονται δεν αποτελούν συνεχές διάστημα επιπέδων QoS. Επίσης, παρόλο που έχουμε υποθέσει ότι η κανονικοποιημένη συνάρτηση ωφελιμότητας $U(.)$ εκφράζει τις προτιμήσεις του μέσου ελαστικού ή εγγυημένου χρήστη, η $U(.)$ δεν εκφράζει απόλυτα τις προτιμήσεις κάποιου συγκεκριμένου χρήστη, ο οποίος απλώς τροφοδοτεί ένα δεδομένο παραμετροποιημένο μοντέλο με τις αντίστοιχες προσωπικές τιμές παραμέτρων. Όποτε, η επιλογή SLS με βάση τη διαδικασία που προτείνουμε δεν λειτουργεί απολύτως βέλτιστα στην πραγματικότητα, αλλά ουσιαστικά επιλέγει ένα SLS που αναμένεται να προσεγγίζει αυτό που πραγματικά μεγιστοποιεί το καθαρό όφελος ενός συγκεκριμένου χρήστη. Αυτή η επιλογή SLS είναι πιο κοντά στη βέλτιστη, όταν στο δίκτυο παρέχονται πολλές κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας, διαδοχικών σχεδόν επιπέδων QoS, και όταν η κανονικοποιημένη συνάρτηση ωφελιμότητας $U(.)$ είναι δυνατό να προεπιλέγεται από το χρήστη ή να μορφοποιείται δυναμικά [10], ώστε να εκφράζει τις πραγματικές προτιμήσεις ενός χρήστη. Όμως, τόσο το πώς μπορεί να γίνει η επιλογή μιας κατάλληλης συνάρτησης για κάθε χρήστη προσωπικά (π.χ. μέσω διαδικασίας εκμάθησης), όσο και πώς πρέπει να ορίζονται οι διακριτές κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας ώστε να προσφέρεται πάντοτε (ή σχεδόν πάντοτε) μια ικανοποιητική κλάση για ένα ευρύ σύνολο χρηστών εκφεύγουν των στόχων της παρούσας εργασίας.

6.4.2 Δικαιοσύνη και Κίνητρα

Όπως έχει ήδη εξηγηθεί στις ενότητες 2.3.1 και 4.1.3, η μέθοδος χρέωσης που χρησιμοποιούμε είναι δίκαιη, δηλαδή αντανακλά, με κάποιες υποθέσεις που περιγράφηκαν, την πραγματική χρήση των δικτυακών πόρων από τους χρήστες. Επίσης, δεδομένης της επιλεγμένης κλάσης ποιότητας υπηρεσίας (από τη διαδικασία διαπραγμάτευσης), δίνει τα κίνητρα στους χρήστες να επιλέξουν το πιο συντηρητικό SLS από αυτά που ικανοποιούν τις απαιτήσεις τους για παροχή QoS από αυτή τη συγκεκριμένη κλάση υπηρεσίας. Έτσι, οι χρήστες εκφράζουν τις πραγματικές απαιτήσεις τους για παροχή QoS, κατά τη διαδικασία επιλογής SLS που προτείνουμε. Μια τέτοια μέθοδος χρέωσης είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία της διαδικασίας επιλογής SLS που προτείνουμε, αφού διαφορετικά η διαδικασία μεγιστοποίησης του καθαρού οφέλους του χρήστη δεν λειτουργεί σωστά.

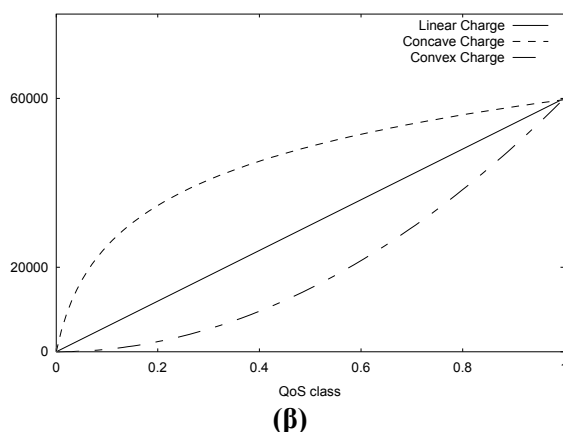
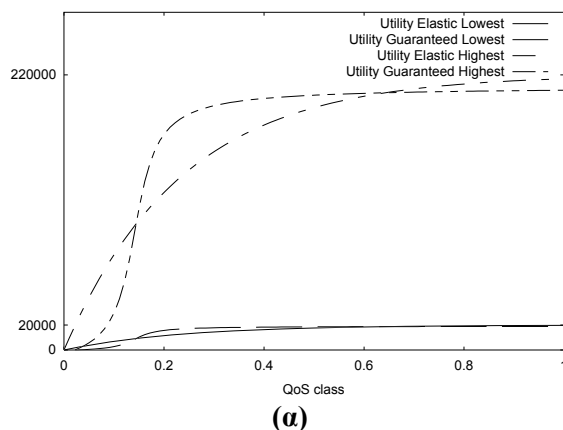
6.4.3 Κοινωνική Ευημερία

Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.1.3, η μέθοδος χρέωσης που χρησιμοποιούμε στην παρούσα εργασία παρέχει στους χρήστες τα σωστά κίνητρα για την επιλογή ενός SLS που ικανοποιεί τις πραγματικές ανάγκες τους για παροχή QoS. Ωστόσο, χαρακτηρίζεται η επιλογή SLS (βάσει της διαδικασίας διαπραγμάτευσης που προτείνουμε) για τον κάθε χρήστη ξεχωριστά από συμβατότητα κινήτρων; Δηλαδή, η *κοινωνική ευημερία* (δηλ. το άθροισμα των ωφελιμοτήτων των χρηστών) βελτιώνεται επίσης, όταν κάθε χρήστης πραγματοποιεί επιλογή SLS ιδιαιτέρως, μεγιστοποιώντας το καθαρό όφελος του (ατομική βελτιστοποίηση);

Προκειμένου να διερευνήσουμε το παραπάνω ερώτημα, πραγματοποιήσαμε το εξής πείραμα: Υπολογίζουμε την κοινωνική ευημερία που προκύπτει χρησιμοποιώντας τη διαδικασία διαπραγμάτευσης που προτείνουμε για το διαμοιρασμό συνολικών δικτυακών πόρων K σε N χρήστες, και τη συγκρίνουμε με την κοινωνική ευημερία που προκύπτει διαμοιράζοντας εξίσου τους ίδιους δικτυακούς πόρους στον ίδιο αριθμό χρηστών. Στο πείραμα αυτό, υποθέτουμε ότι όλοι οι χρήστες ζητούν την παροχή της ίδιας υπηρεσίας και το ίδιο περιεχόμενο (π.χ. την ίδια ταινία video). Θεωρήσαμε ότι οι μισοί χρήστες είναι ελαστικοί και οι άλλοι μισοί εγγωημένοι. Επιπλέον, οι συναρτήσεις ωφελιμότητας των χρηστών είναι παραμετροποιημένες και οι χρήστες διατίθενται να πληρώσουν διαφορετικά ποσά. Όλες οι παράμετροι στις συναρτήσεις ωφελιμότητας των χρηστών και το ποσό που είναι διαθεσιμότες να πληρώσει κάθε χρήστης είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν ομοιόμορφες κατανομές διαφόρων μέσων τιμών και διασπορών. Η ακριβής παραμετροποίηση των συναρτήσεων ωφελιμότητας, και οι κατανομές που ακολουθούν οι παράμετροι αυτές και το ποσό που διατίθενται να πληρώσουν οι χρήστες περιγράφονται παρακάτω. Η διαδικασία διαπραγμάτευσης που περιγράψαμε επιλέγει κάποια κλάση ποιότητας υπηρεσίας (και, επομένως, κάποια κατανάλωση δικτυακών πόρων) για την εξυπηρέτηση κάθε χρήστη, μεγιστοποιώντας το καθαρό όφελος αυτού. Χρησιμοποιούμε τη μέθοδο χρέωσης που αναφέραμε στην ενότητα 4.1.3. Επειδή πρόκειται για τη χρέωση του ίδιου περιεχομένου, και στη χρέωση $c_i(x_i)$, ως προς τη κλάση ποιότητας υπηρεσίας i , λαμβάνουμε βελτιστοποιημένο συμβόλαιο x_i για καθεμιά, εξετάζουμε τη μορφή της καμπύλης χρέωσης μόνο ως προς τη κλάση υπηρεσίας i . Η καμπύλη αυτή της συνάρτησης χρέωσης c_i μπορεί να είναι οποιαδήποτε αύξουσα γραμμή, όπως ευθεία (αν, για παράδειγμα, ο παράγοντας που διαφοροποιεί τις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας είναι το εύρος ζώνης), ή κυρτή καμπύλη (αν, για παράδειγμα, ο παράγοντας που διαφοροποιεί την κλάση ποιότητας υπηρεσίας είναι η πιθανότητα απώλειας πακέτων), ή κοίλη καμπύλη (σύμφωνα με μια ορισμένη πολιτική χρέωσης), ή ένα μείγμα των καμπυλών αυτών. Υπολογίζουμε την κοινωνική ευημερία U_{NB} που προκύπτει χρησιμοποιώντας τη διαδικασία επιλογής των SLS που μεγιστοποιεί το net benefit κάθε χρήστη. Αυτές οι επιλογές καθορίζουν, επίσης, το συνολικό ποσό δικτυακών

πόρων K που θα πρέπει να δεσμευθούν για την εξυπηρέτηση όλων των χρηστών (όταν επιλέγουν τα συμβόλαια κίνησής τους χρησιμοποιώντας τη διαδικασία διαπραγμάτευσης) και το συνολικό ποσό που καλούνται να πληρώσουν οι χρήστες για τις υπηρεσίες που θα λάβουν από το δίκτυο.

Στη συνέχεια, διαμοιράζουμε τους δικτυακούς πόρους K εξίσου στους N χρήστες, παρέχοντας σε κάθε χρήστη την κλάση ποιότητας υπηρεσίας που χρεώνεται C_{tot}/N . Αυτή η διαμέριση παρέχει K/N δικτυακούς πόρους σε κάθε χρήστη, ορίζει μια κοινή κλάση ποιότητας υπηρεσίας, και τελικά οδηγεί σε μια νέα τιμή ωφελιμότητας για τον καθένα. Προσθέτοντας τις νέες τιμές ωφελιμότητας για τη νέα κλάση ποιότητας υπηρεσίας που παρέχεται σε κάθε χρήστη (η οποία κλάση ποιότητας υπηρεσίας δεν είναι αναγκαστικά διαφορετική από αυτή που παρείχετο), υπολογίζουμε τη νέα κοινωνική ευημερία U_{fair} . Για τον υπολογισμό του U_{fair} χρησιμοποιούμε τις ίδιες συναρτήσεις ωφελιμότητας των χρηστών που είχαν χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό του U_{NB} . Παρατηρήσαμε ότι ισχύει $U_{NB} > U_{fair}$ για όλες τις μορφές της συνάρτησης χρέωσης (δηλ. ευθεία, κυρτή καμπύλη και κοίλη καμπύλη), και για διάφορες παραμέτρους της ομοιόμορφης κατανομής του ποσού που διατίθενται να πληρώσουν οι χρήστες. Το γεγονός αυτό υποστηρίζει την άποψη ότι η επιλογή SLS για τους χρήστες, όταν γίνεται με τη διαδικασία διαπραγμάτευσης που προτείνουμε στην παρούσα εργασία, χαρακτηρίζεται από συμβατότητα κινήτρων.



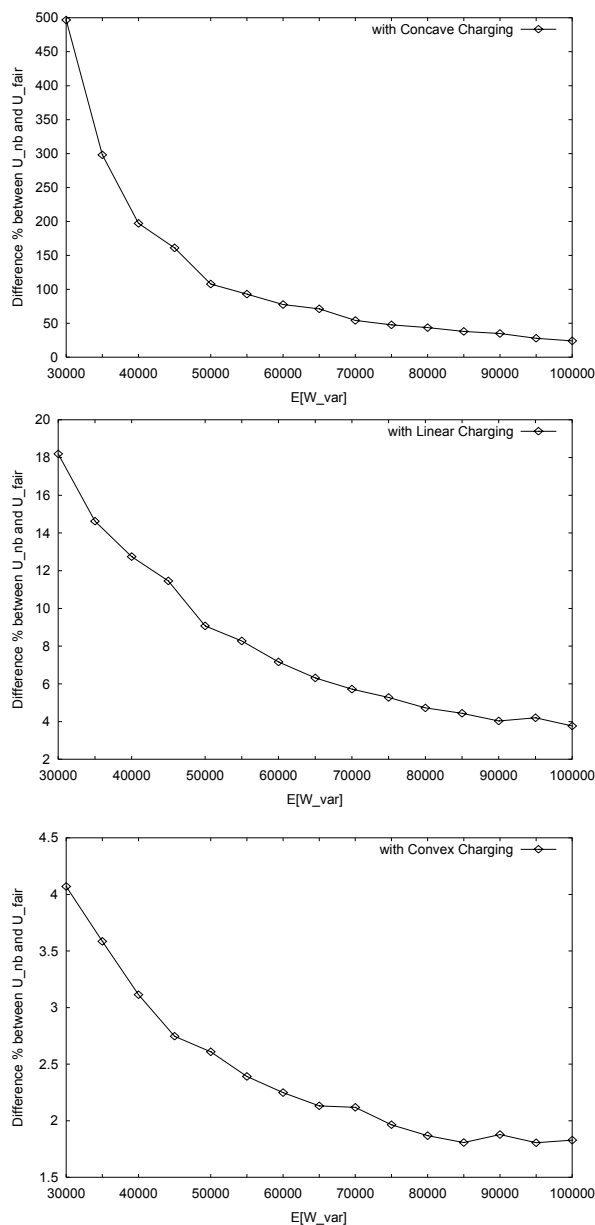
Σχήμα 20: (α) Το εύρος των συναρτήσεων ωφελιμότητας των εγγυημένων και των ελαστικών χρηστών, και (β) οι διάφορες μορφές της συνάρτησης χρέωσης (κοίλη καμπύλη, ευθεία, κυρτή καμπύλη).

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήσαμε τους παρακάτω τύπους στα πειράματά μας:

$$\begin{aligned}
 U_{elastic}(x) &= (1 - e^{-\lambda x}) W_{max} \\
 U_{guaranteed}(x) &= \left\{ \left[\tan^{-1}(30x - \lambda) + 1.3 \right] / 3 \right\} W_{max} \\
 C_{linear}(x) &= x C_{max} \\
 C_{concave}(x) &= [\log(1 + 35x) / 3.6] C_{max} \\
 C_{convex}(x) &= x^2 C_{max} \\
 W_{max} &= W_{var} + W_c
 \end{aligned}$$

όπου x είναι η κλάση ποιότητας υπηρεσίας ενός SLS, και λ είναι μια τυχαία μεταβλητή που είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[2.25, 10]$. W_{max} είναι το ποσό που είναι διαθέσιμος να πληρώσει ένας χρήστης και ισούται με το άθροισμα ενός σταθερού όρου $W_c = 20000$ και ενός μεταβλητού όρου W_{var} , ο οποίος είναι μια τυχαία μεταβλητή που κατανέμεται ομοιόμορφα στο διάστημα $[0, 2E[W_{var}]]$. Το $E[W_{var}]$ είναι σταθερό (για όλους τους χρήστες που προσομοιώνουμε) για κάθε διαφορετικό πείραμα, και σε διαδοχικά πειράματα λαμβάνει τις τιμές 30000, 35000, ..., 100000. Επίσης, $C_{max} = 60000$ είναι η χρέωση για την παρεχόμενη υπηρεσία στην υψηλότερη κλάση ποιότητας υπηρεσίας, και $N = 100$ είναι ο αριθμός των χρηστών. Το Σχήμα 20α απεικονίζει το εύρος των δυνατών συναρτήσεων ωφελιμότητας των χρηστών και το Σχήμα 20β τις διάφορες μορφές της συνάρτησης χρέωσης, σύμφωνα με τους παραπάνω τύπους και για τις παραμέτρους που αναφέραμε. Στο Σχήμα 21 απεικονίζονται οι ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ της κοινωνικής ευημερίας που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τη διαδικασία επιλογής SLS που μεγιστοποιεί

το καθαρό όφελος κάθε χρήστη (U_{NB}), και αυτής που επιτυγχάνεται ισοκατανέμοντας (δίκαιη διαμέριση) τους δικτυακούς πόρους στους χρήστες (U_{fair}), για τις τρεις συναρτήσεις (τρεις διαφορετικές μορφές) χρέωσης που περιγράφονται στους παραπάνω τύπους και για το $E[W_{var}]$ να παίρνει τιμές μεταξύ 30000 και 100000. Σημειωτέον ότι, στα πειράματα αυτά, έχει θεωρηθεί ένα συνεχές διάστημα κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας. Τα πειράματα που περιγράψαμε έχουν εκτελεστεί πολλές φορές (50 φορές το καθένα) και τα αποτελέσματα που παρουσιάζουμε αποτελούν τα μέσα αποτελέσματα αυτών.



Σχήμα 21: Οι ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των U_{NB} και U_{fair} για τις διάφορες συναρτήσεις χρέωσης, όταν το $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές μεταξύ 30000 και 100000, και $W_c = 20000$.

Στο Σχήμα 21, παρατηρούμε ότι οι ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των U_{NB} και U_{fair} είναι πάντα θετικές για τις διάφορες συναρτήσεις χρέωσης, και ότι οι μορφές τους είναι κυρτές καμπύλες συναρτήσει του $E[W_{var}]$. Συνεπώς, η διαδικασία επιλογής SLS που προτείνουμε είναι πάντα πιο αποδοτική από την ισοκατανομή των πόρων του δικτύου για τον ίδιο αριθμό χρηστών, και όταν οι τυπικές τιμές του ποσού που είναι διαθέσιμοι να πληρώσουν οι χρήστες W_{max} που δεν είναι πολύ μεγαλύτερες (τάξεις μεγέθους) από την τιμή που κοστίζει η

υπηρεσία στην υψηλότερη κλάση ποιότητας υπηρεσίας C_{max} . Πρέπει να σημειωθεί ότι όσο αυξάνει η διαφορά του W_{max} από το C_{max} , όλοι οι χρήστες διαλέγουν υψηλότερες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας, χρησιμοποιώντας τη διαδικασία που μεγιστοποιεί το καθαρό όφελος του χρήστη. Σε αυτή την περίπτωση, η απώλεια στην κοινωνική ευημερία ισοκατανέμοντας τους δικτυακούς πόρους στους χρήστες ελαττώνεται, αφού δεν διαφοροποιούνται σημαντικά οι κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας που επιλέγονται. Για πολύ μεγάλες τιμές του W_{max} σε σχέση με το C_{max} η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των U_{NB} και U_{fair} τείνει στο 0, αφού όλοι οι χρήστες θα έχουν επιλέξει την υψηλότερη κλάση ποιότητας υπηρεσίας με τη διαδικασία επιλογής SLS που προτείνουμε. Η επιλογή της υψηλότερης κλάσης ποιότητας υπηρεσίας από όλους τους χρήστες αποδεικνύεται θεωρητικά ως εξής: Η αύξηση του W_{max} είναι ισοδύναμη με μια «κανονικοποιημένη» συνάρτηση ωφελιμότητας των χρηστών $U(\cdot)$ με έναν αυξανόμενο συντελεστή α . Οπότε το πρόβλημα της επιλογής ενός SLS x μεγιστοποιώντας το καθαρό όφελος γίνεται:

$$\max_x \{ \alpha U(x) - c(x) \}$$

όπου $c(\cdot)$ η συνάρτηση χρέωσης του δικτύου. Αυτό το πρόβλημα λύνεται από το x^* που ικανοποιεί τη σχέση:

$$\alpha U'(x^*) = c'(x^*)$$

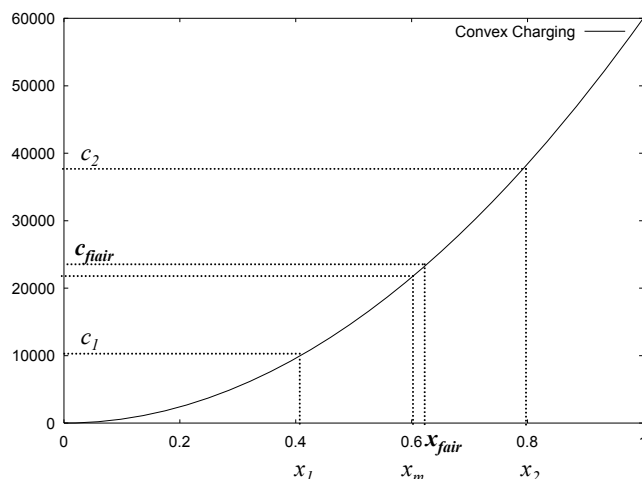
ή για $x = 1$, αν $\alpha U'(x) > c'(x)$ για κάθε $x \in [0, 1]$ (δηλαδή αν $\alpha U(x) - c(x)$ είναι αύξουσα). Αν θεωρήσουμε τη μέγιστη τιμή της κλίσης της συνάρτησης χρέωσης ίση με β ($c'(x) = \beta$), τότε

$$U'(x^*) \leq \frac{\beta}{\alpha}$$

Άρα, όταν $\alpha \rightarrow \infty$, τότε $U'(x^*) \rightarrow 0$. Επειδή η μορφή της $U(\cdot)$ είναι αύξουσα κοίλη καμπύλη, αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν δύο περιπτώσεις:

- i) Αν $\lim_{x \rightarrow 1} U'(x) = 0$, τότε $x^* \rightarrow 1$, δηλαδή το x^* τείνει στη μέγιστη τιμή του x .
- ii) Αν $\lim_{x \rightarrow 1} U'(x) \neq 0$, τότε $x^* = 1$ για $\alpha > \alpha_0$, δηλαδή η βέλτιστη επιλογή είναι η μέγιστη κλάση ποιότητας και για πεπερασμένες τιμές του α .

Η βελτίωση στην κοινωνική ευημερία που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τη διαδικασία επιλογής SLS που προτείνουμε, σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνεται ισοκατανέμοντας τους πόρους του δικτύου, είναι πολύ ουσιαστική στις περιπτώσεις που η συνάρτηση χρέωσης είναι κοίλη ή γραμμική. Όταν όμως η συνάρτηση χρέωσης είναι κυρτή, η μέση κλάση ποιότητας υπηρεσίας, από αυτές που επιλέγονται με τη διαδικασία επιλογής SLS που προτείνουμε, κοστίζει λιγότερο από το μέσο ποσό χρέωσης, γεγονός που συνεπάγεται ότι η ισοκατανομή των δικτυακών πόρων αντιστοιχεί σε καλύτερη κλάση ποιότητας υπηρεσίας από τη μέση. Για παράδειγμα, έστω δύο χρήστες που με τη διαδικασία επιλογής SLS που προτείνουμε, επιλέγουν τις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας x_1 και x_2 (βλέπε Σχήμα 22). Τότε η μέση κλάση ποιότητας υπηρεσίας που παρέχεται είναι η x_m . Ισοκατανέμοντας τους δικτυακούς πόρους κάθε χρήστης πληρώνει c_m , το οποίο αντιστοιχεί στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας x_{fair} , που όμως, είναι $x_{fair} > x_m$. Αν η συνάρτηση χρέωσης είναι γραμμική ή κοίλη, τότε έχουμε $x_{fair} = x_m$ και $x_{fair} < x_m$ αντίστοιχα. Άρα, στην περίπτωση που η συνάρτηση χρέωσης είναι κυρτή, η απώλεια στην κοινωνική ευημερία από την ισοκατανομή των δικτυακών πόρων είναι περιορισμένη.



Σχήμα 22: Δύο χρήστες με τη διαδικασία επιλογής SLS που προτείνουμε επιλέγουν τις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας x_1 και x_2 . Τότε η μέση κλάση ποιότητας υπηρεσίας που παρέχεται είναι η x_m . Ισοκατανέμοντας τους δικτυακούς πόρους κάθε χρήστης πληρώνει c_{fair} , το οποίο αντιστοιχεί στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας x_{fair} , που όμως, είναι $x_{fair} > x_m$.

Όπως προαναφέρθη, στα πειράματα θεωρήθηκε ένα συνεχές φάσμα κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας. Ομαδοποιώντας αυτές σε 11 κλάσεις 0, 0.1, ..., 1, διαπιστώσαμε ποιες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας επιλέγονται με τη διαδικασία επιλογής SLS που προτείνουμε και την ισοκατανομή δικτυακών πόρων στους χρήστες, για τις τρεις συναρτήσεις χρέωσης και για τις διάφορες τιμές του $E[W_{var}]$. Παρατηρήσαμε και πειραματικά, ότι οι χρήστες επιλέγουν όλο και υψηλότερες κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας, όσο αυξάνεται το $E[W_{var}]$. Η κατανομή των χρηστών στις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας σε κάθε περίπτωση περιγράφεται στο Παράρτημα Α. Στα σχήματα αυτά φαίνεται ότι στην περίπτωση της ισοκατανομής των πόρων κάποιοι παίρνουν διαφορετικά συμβόλαια από άλλους. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι σε κάθε πείραμα (για μια τιμή του $E[W_{var}]$) ένας χρήστης, όταν ισοκατανέμονται οι πόροι, κατατάσσεται σε μια από δύο μόνο κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας: σε μια διαφορετική από τη Best Effort αν το καθαρό όφελος του χρήστη είναι θετικό ή μηδέν και στη Best Effort αν το καθαρό όφελος του χρήστη είναι αρνητικό. Κάθε πείραμα εκτελείται 50 φορές και στα σχήματα παρουσιάζεται η μέση κατανομή των χρηστών στις διάφορες κλάσεις υπηρεσίας. Σημειοτέον ότι ο άξονας της κλάσης ποιότητας υπηρεσίας στα σχήματα παίρνει τιμές 1, 2, ..., 11, οι οποίες αντιστοιχούν στις τιμές 0, 0.1, ..., 1.

Τέλος, έχουμε επαναλάβει τα παραπάνω πειράματα για διάφορες τιμές όλων των παραμέτρων, και όλα τα αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ατομική βελτιστοποίηση κάθε χρήστη (βάσει της διαδικασίας μεγιστοποίησης του καθαρού οφέλους για την επιλογή βέλτιστου SLS) οδηγεί σε βελτίωση της κοινωνικής ευημερίας (συμβατότητα κινήτρων).

6.5 Πολυπλοκότητα – Φόρτος

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένα περιβάλλον δικτύου, στο οποίο ο παροχέας του δικτύου μπορεί να εφαρμόσει διάφορες πολιτικές διαχείρισης του δικτύου, μέσω της διαδικασίας επιλογής SLS που προτείνουμε και να επιβάλλει τα αποτελέσματα της στους χρήστες του δικτύου. Αυτά επιτυγχάνονται με ελάχιστες απαιτήσεις σε υπολογιστικό φόρτο και τροποποιήσεις στο εσωτερικό της υποδομής των διαχειριζόμενων

δικτύων IP, και εισάγοντας μικρό κόστος επικοινωνίας.

Οι υπολογιστικά δαπανηρές εργασίες του διαχωρισμού της κυκλοφορίας ανά ροή κίνησης και στη συνέχεια η απόρριψη ή η ενταμίευση και το μαρκάρισμα των πακέτων εκτελούνται στους σταθμούς εργασίας των χρηστών, οπότε στο εσωτερικό του δικτύου δε χρειάζεται να υποστηρίζονται αυτές οι λειτουργίες. Επίσης, χρησιμοποιώντας πολλαπλούς PS, το υπολογιστικό κόστος από την επεξεργασία των αιτήσεων δέσμευσης πόρων των χρηστών, κατανέμεται στους διάφορους PS. Οπότε οι απαιτήσεις για υπολογιστική δύναμη στους υπολογιστές όπου εκτελούνται οι PS ελαττώνονται.

Επίσης, το κόστος της σηματοδότησης του πρωτοκόλλου RSVP ελαχιστοποιείται, αφού οι αιτήσεις δέσμευσης πόρων γίνονται αντικείμενο επεξεργασίας μόνο από τον PS, και τα νέα SLS αποθηκεύονται μόνο μια φορά στο Information Directory (και όχι σε κάθε κόμβο του δικτύου, όπως συμβαίνει όταν εφαρμόζεται το πρωτόκολλο RSVP για τη δέσμευση των δικτυακών πόρων). Στην αρχιτεκτονική που προτείνουμε, κάθε νέα ροή κίνησης μαρκάρεται κατάλληλα και κατηγοριοποιείται σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας του δικτύου, δηλαδή δε συμβαίνει δέσμευση πόρων ειδικά για τη ροή αυτή. Η δέσμευση των πόρων γίνεται σε επίπεδο ενοποιημένων ροών κίνησης.

Το κόστος επικοινωνίας που εισάγεται είναι μικρό, γιατί, με την ύπαρξη πολλών PS, οι σύνδεσμοι που διασχίζουν τα μηνύματα κατά τη διαδικασία διαπραγμάτευσης είναι λίγοι. Επίσης, τα μηνύματα που ανταλλάσσονται κατά τη διαδικασία επιλογής SLS που προτείνουμε είναι λίγα (όσες περίπου είναι και τα διαθέσιμα SLS που ικανοποιούν τις απαιτήσεις του χρήστη για παροχή QoS).

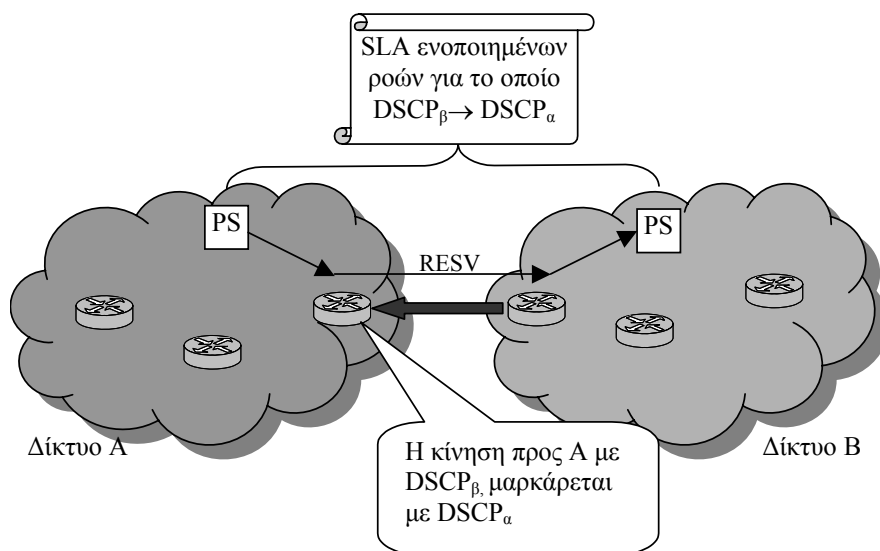
Με βάση τα παραπάνω, κρίνουμε ότι η αρχιτεκτονική που προτείνουμε είναι πολύ επεκτάσιμη για μεγάλα διαχειριζόμενα δίκτυα DiffServ.

7 Εφαρμογή της Αρχιτεκτονικής για Παροχή Υπηρεσιών από Άκρη-σε-Άκρη

Στην ενότητα αυτή, εξετάζουμε την εφαρμογή της αρχιτεκτονικής που προτείνουμε σε ένα περιβάλλον πολλαπλών διαχειριζόμενων δικτύων DiffServ, προκειμένου να παρέχουμε μια συνολική λύση για το περιβάλλον διαπραγμάτευσης, υλοποίησης και ελέγχου συμμόρφωσης της κίνησης των SLA για υπηρεσίες που διασχίζουν περισσότερα από ένα διαχειριζόμενα δίκτυα, δηλαδή προορίζονται από μια πηγή προς ένα προορισμό (από-άκρη-σε-άκρη) που ανήκει σε διαφορετικό διαχειριζόμενο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, επιθυμούμε να ορίσουμε την αρχιτεκτονική με την οποία κάποιος χρήστης θα διαπραγματεύεται και θα αποκτά ένα SLA για παροχή QoS στη μεταφορά του περιεχομένου μιας υπηρεσίας από έναν εξυπηρετητή που βρίσκεται σε διαφορετικό διαχειριζόμενο δίκτυο, με τρόπο ελεγχόμενο από τα δίκτυα που διασχίζει η ροή κίνησης του χρήστη. Σημειοτέον ότι, όπως θα περιγράψουμε, για το σκοπό αυτό δεν απαιτείται εισαγωγή καμιάς επιπλέον λειτουργίας στην αρχιτεκτονική που προτείνουμε στην παρούσα εργασία.

Και σε αυτή την περίπτωση, θεωρούμε ότι η ωφελιμότητα από την παροχή της υπηρεσίας απολαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από τον παραλήπτη του περιεχομένου της υπηρεσίας. Θεωρούμε την υλοποίηση της αρχιτεκτονικής παροχής υπηρεσιών DiffServ από τα διαχειριζόμενα δίκτυα στο Internet. Σε αυτή την περίπτωση, θεωρούμε δεδομένη την ύπαρξη SLA σε επίπεδο ενοποιημένων ροών κίνησης ανά κλάση ποιότητας υπηρεσίας μεταξύ των παροχέων των διαχειριζόμενων δικτύων. Αρχικά περιγράφουμε το πώς αναθεωρούνται αυτά τα SLA. Κάνουμε την παραδοχή ότι αυτά τα SLA θα είναι δυναμικά και θα ανανεώνονται με βάση τη ζήτηση. Ένα τέτοιο SLA μεταξύ δύο διαχειριζόμενων δικτύων ορίζει το άνω όριο στην ποσότητα της κυκλοφορίας που μπορεί να λαμβάνει το ένα δίκτυο από το άλλο (ή να στέλνει το ένα δίκτυο στο άλλο) σε κάποια κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Ο παροχέας κάθε διαχειριζόμενου δικτύου δέχεται αιτήσεις δέσμευσης δικτυακών πόρων και κατηγοριοποιεί (με βάση κάποια διαδικασία διαπραγμάτευσης, σαν αυτή που περιγράψαμε) την κυκλοφορία που εισάγεται στο δίκτυο σε κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας. Αν η κυκλοφορία που πρόκειται να λαμβάνει σε κάποια κλάση υπηρεσίας κάποιο διαχειριζόμενο δίκτυο A από ένα άλλο B πλησιάσει την ποσότητα που ορίζεται από το SLA μεταξύ τους, τότε ο παροχέας του A στέλνει μια αίτηση δέσμευσης επιπλέον πόρων για τη λαμβανόμενη κυκλοφορία σε αυτή την κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Αυτή η αίτηση αποστέλλεται με ένα μήνυμα RESV του πρωτοκόλλου RSVP από τον PS του A προς τον PS του B και περιέχει, εκτός από τις απαιτήσεις σε παραμέτρους κίνησης $\{h, (\rho, \beta)\}$, ένα αντικείμενο DCLASS με το DSCP με το οποίο ο παροχέας του δικτύου A επιθυμεί να κατηγοριοποιείται η κίνηση αυτού του SLA στο δίκτυό του. Αυτό το μήνυμα δε γίνεται αντικείμενο επεξεργασίας από τους δρομολογητές του δικτύου A , οι οποίοι αναγνωρίζουν ότι έχει αποσταλλεί από τον τοπικό PS. Όμως, όταν το μήνυμα φτάσει στο δρομολογητή εισόδου του δικτύου B , τότε προωθείται στον PS του δικτύου αυτού. Ακολουθεί κάποια διαδικασία διαπραγμάτευσης (η οποία μπορεί να είναι αυτή που προτείνουμε ή άλλη) μεταξύ των PS και τελικά αποφασίζεται η δέσμευση ή όχι των επιπλέον πόρων του δικτύου B για τη μεταφορά κυκλοφορίας που κατευθύνεται στο δίκτυο A με την κλάση ποιότητας υπηρεσίας που επιθυμεί το A . Αν τελικά αποφασιστεί η δέσμευση των επιπλέον πόρων στο B για την κλάση ποιότητας υπηρεσίας του A , τότε ο PS του B θέτει τους κανόνες κατηγοριοποίησης της εισερχόμενης κυκλοφορίας στο B που κατευθύνεται στο A , έτσι ώστε να σημαδεύεται κατάλληλα στους δρομολογητές εισόδου της στο δίκτυο B για να έχει την απαιτούμενη μεταχείριση στο εσωτερικό του B . Επίσης, ο PS του A θέτει τους κανόνες κατηγοριοποίησης της εισερχόμενης κυκλοφορίας στο A , ώστε η κίνηση που προέρχεται από το B και είναι σημαδεμένη για μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας, να σημαδεύεται κατάλληλα στους δρομολογητές εισόδου του δικτύου A , ώστε να κατηγοριοποιείται στην κλάση ποιότητας υπηρεσίας στην οποία απευθύνεται στο δίκτυο A .

Αυτά επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας το πεδίο DSCP των πακέτων της κυκλοφορίας που προορίζεται για μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας στο δίκτυο A . Τα πακέτα της κυκλοφορίας αυτής αποστέλλονται από τις πηγές τους σε οποιοδήποτε δίκτυο, μαρκαρισμένα με μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας που αντιστοιχεί σε αυτή για την οποία προορίζονται στο δίκτυο προορισμού A . Βάσει του πεδίου DSCP των πακέτων και το επόμενο δίκτυο στο οποίο κατευθύνονται, με το οποίο υπάρχει SLA για αυτή την κυκλοφορία, μαρκάρονται κατάλληλα κατά την είσοδο τους στο δίκτυο. Αυτά φαίνονται στο Σχήμα 23.

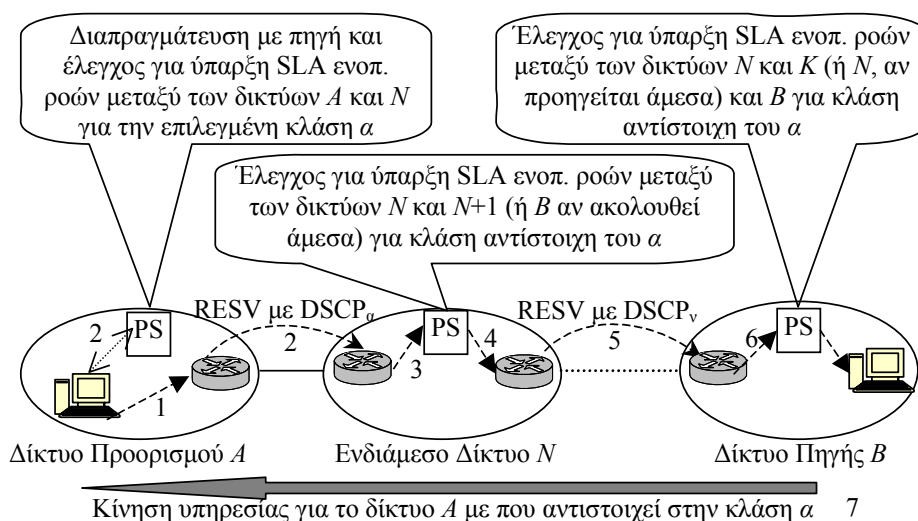


Σχήμα 23: Συμβόλαιο ενοποιημένων ροών για τη κίνηση που λαμβάνει το δίκτυο A από το B σε μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας που χαρακτηρίζεται από το $DSCP_\alpha$ και αντιστοιχεί στο $DSCP_\beta$ του δικτύου B .

Μέχρι τώρα περιγράψαμε πώς συνάπτονται SLA μεταξύ διαχειριζόμενων δικτύων. Στη συνέχεια περιγράφουμε τη διαδικασία που ακολουθείται για την παροχή δυναμικών SLA ανά ροή κίνησης για υπηρεσίες από-άκρη-σε-άκρη, όταν η πηγή και ο προορισμός βρίσκονται σε διαφορετικά διαχειριζόμενα δίκτυα. Η περιγραφή της διαδικασίας αυτής απεικονίζεται στο Σχήμα 24. Σε αυτό μια εφαρμογή που βρίσκεται στο δίκτυο A επιθυμεί να λάβει κυκλοφορία από έναν εξυπηρετητή που βρίσκεται στο δίκτυο B . Μεταξύ των δικτύων A και B παρεμβάλλεται το δίκτυο N , και ενδεχομένως και κάποια άλλα δίκτυα. Τα πακέτα δρομολογούνται βάσει των πρωτοκόλλων δρομολόγησης του IP (π.χ. OSPF, BGP).

- 1) Η εφαρμογή του A αποστέλλει την αίτηση δέσμευσης πόρων με ένα μήνυμα RESV και διαπραγματεύεται την παροχή QoS με τον τοπικό PS (μέσω της διαδικασίας αποδοτικής επιλογής SLS που περιγράψαμε).
- 2) Αν η διαδικασία επιλογής είναι επιτυχής, και υπάρχει SLA σε επίπεδο ενοποιημένων ροών για τη λήψη κίνησης σε αυτή την κλάση υπηρεσίας με το δίκτυο N από το οποίο θα εισέλθει η κυκλοφορία της νέας ροής στο δίκτυο A και διαθέσιμη χωρητικότητα σε αυτό, τότε το μήνυμα RESV με το DSCP της επιλεγμένης κλάσης ποιότητας υπηρεσίας από τη διαδικασία διαπραγμάτευσης προωθείται στον επόμενο κόμβο του μονοπατιού προς το δίκτυο N .
- 3) Το μήνυμα RESV γίνεται αντιληπτό από το δρομολογητή εισόδου του παρεμβαλλομένου δικτύου N και προωθείται στον PS του δικτύου αυτού, χάρη στη λειτουργικότητα COPS client στο δρομολογητή αυτό.
- 4) Ο PS του δικτύου N εξετάζει αν υφίσταται SLA για την εξυπηρέτηση της κυκλοφορίας που κατευθύνεται στο δίκτυο A με αυτή την κλάση υπηρεσίας. Αν όχι, τότε το DSCP του μηνύματος RESV γίνεται Best Effort (δηλαδή 0). Αν όμως έχει, τότε το DSCP του μηνύματος RESV γίνεται ίδιο με αυτό που αντιστοιχεί στην κλάση υπηρεσίας του SLA για την κυκλοφορία προς το A σε επίπεδο ενοποιημένων ροών

- κίνησης. Κατόπιν, το μήνυμα RESV προωθείται προς το δίκτυο B .
- 5) Για κάθε άλλο ενδιάμεσο δίκτυο μεταξύ των δικτύων A και B επαναλαμβάνονται τα βήματα 3 και 4.
 - 6) Όταν το μήνυμα RESV φτάσει στο δρομολογητή εισόδου του δικτύου B , τότε προωθείται στον PS του δικτύου, χάρη στη λειτουργικότητα COPS client του δρομολογητή αυτού. Αν ο PS διαθέτει SLA σε επίπεδο ενοποιημένων ροών με το δίκτυο από το οποίο ήρθε το μήνυμα για τη λήψη από αυτό κυκλοφορίας στην κλάση υπηρεσίας που δηλώνεται από το DSCP που περιέχεται στο μήνυμα RESV, τότε προωθεί το RESV με το DSCP του SLA αυτού προς τον εξυπηρετητή. Διαφορετικά, το DSCP του μηνύματος RESV γίνεται Best Effort (δηλαδή 0).
 - 7) Ο εξυπηρετητής αποστέλλει την κυκλοφορία της νέας ροής προς την εφαρμογή προορισμού μαρκάροντάς τη με το DSCP που περιέχεται στο μήνυμα RESV. Ανάλογα, με τα SLA μεταξύ των διαχειριζομένων δικτύων, οι δρομολογητές εισόδου της κίνησης σε κάθε δίκτυο αντιστοιχίζουν την τιμή του DSCP των πακέτων στην κατάλληλη τιμή με την οποία κατηγοριοποιείται η κίνηση στο εσωτερικό κάθε διαχειριζομένου δικτύου.



Σχήμα 24: Η σηματοδότηση για την παροχή δυναμικού SLA ανά ροή κίνησης σε περιβάλλον πολλών διαχειριζομένων δικτύων DiffServ.

8 Συμπεράσματα – Μελλοντική Εργασία

Στην παρούσα εργασία σχεδιάσαμε, υλοποιήσαμε και αξιολογήσαμε μια αρχιτεκτονική για διαπραγμάτευση, έλεγχο συμμόρφωσης της εισερχόμενης κίνησης και εφαρμογή Service Level Agreement (SLA) σε δίκτυα Differentiated Services (DiffServ) πάνω από Multi-Protocol Label Switching (MPLS), καθώς και έναν αποδοτικό μηχανισμό επιλογής Service Level Specification (SLS). Η αρχιτεκτονική που περιγράφηκε παρέχει μια σαφή διεπιφάνεια διαπραγμάτευσης SLA μεταξύ του παροχέα του δικτύου και των χρηστών, στο οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε μηχανισμός επιλογής SLS, και ο παροχέας του δικτύου να εφαρμόσει τα αποτελέσματα του, σύμφωνα με την πολιτική που ακολουθεί για τη διαχείριση των δικτυακών πόρων. Αυτά επιτυγχάνονται, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο ReSource reservation Protocol (RSVP) για τις αιτήσεις δέσμευσης πόρων και το πρωτόκολλο Common Open Policy Service (COPS) για την επεξεργασία τους. Ορίζουμε μια κατανομή της απαιτούμενης πληροφορίας (βλέπε ενότητα 4.1.4), τέτοια ώστε οι παράμετροι στις αιτήσεις δέσμευσης πόρων RESerVation (RESV) να τίθενται με μια απλή διαδικασία για το χρήστη. Εισάγουμε ελάχιστες απαιτήσεις για αλλαγές στην υπάρχουσα υποδομή ενός διαχειριζόμενου δικτύου IP. Οι αλλαγές αυτές συνοψίζονται στην υλοποίηση του πρωτοκόλλου MPLS στους δρομολογητές του δικτύου για την υποστήριξη διαφοροποιημένων υπηρεσιών DiffServ, και στην υποστήριξη της λειτουργικότητας COPS client στους δρομολογητές εισόδου του δικτύου. Επίσης, ο υπολογιστικός φόρτος που εισάγεται στο δίκτυο είναι ελάχιστος, αφού οι υπολογιστικά «ακριβές» λειτουργίες του διαχωρισμού της κυκλοφορίας ανά ροή, και ο έλεγχος για το αν συμμορφώνονται ή όχι οι ροές κίνησης με τα SLS που έχουν επιλεγεί για αυτές πραγματοποιούνται στους σταθμούς εργασίας των χρηστών, οι οποίοι εκτελούν το λειτουργικό σύστημα Windows 2000. Το υπολογιστικό κόστος της σηματοδότησης για τη δέσμευση πόρων δεν είναι σημαντικό, αφού τα πακέτα σηματοδότησης γίνονται αντικείμενο επεξεργασίας μόνο στους δρομολογητές εισόδου του δικτύου, και δεν γίνεται δέσμευση πόρων ανά ροή κίνησης, αλλά σε επίπεδο ενοποιημένων ροών κυκλοφορίας και σε πολύ μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα από αυτά στα οποία φθάνουν νέες αιτήσεις δέσμευσης πόρων. Σημειώτεον ότι στην αρχιτεκτονική που προτείνουμε οι νέες ροές κίνησης κατηγοριοποιούνται στις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας του δικτύου για τις οποίες έχουν προδεσμευθεί δικτυακοί πόροι. Η αρχιτεκτονική αυτή εισάγει κάποιο κόστος επικοινωνίας, το οποίο, όμως, περιορίζεται με την ύπαρξη περισσότερων του ενός Policy Server (PS) στο δίκτυο. Όλα τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αρχιτεκτονική που προτάθηκε στην παρούσα εργασία είναι εξαιρετικά επεκτάσιμη σε μεγάλης κλίμακας διαχειριζόμενα δίκτυα IP.

Η διαδικασία αποδοτικής επιλογής SLS που αναπτύχθηκε, δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να επιλέξουν το SLS του δικτύου που ικανοποιεί τις απαιτήσεις τους για παροχή ποιότητας υπηρεσίας, ενώ έχει και ικανοποιητικό κόστος. Αυτό επιτυγχάνεται μεγιστοποιώντας το καθαρό όφελος κάθε χρήστη κατά τη διαδικασία επιλογής SLS. Για το σκοπό αυτό, ορίστηκε μια συνάρτηση ωφελιμότητας του χρήστη, η οποία εκφράζει το βαθμό ικανοποίησης του χρήστη για τα διάφορα SLS με απλό και σαφή τρόπο. Χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος χρέωσης για τα SLS, το οποίο δίνει στους χρήστες σωστά κίνητρα, ώστε να ζητούν από το δίκτυο τους πόρους που πραγματικά επιθυμούν για μια παρεχόμενη υπηρεσία. Τα πειραματικά αποτελέσματα που εξηγήθηκαν (βλέπε ενότητα 6.4.3) συνηγορούν στο συμπέρασμα, ότι τα κίνητρα αυτά διατηρούνται, όταν χρησιμοποιούμε τη διαδικασία που προτείνουμε για την επιλογή SLS (incentive compatibility).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του συστήματός μας (αρχιτεκτονικής και διαδικασίας επιλογής SLS) είναι η απλότητα στη διαδικασία με την οποία οι χρήστες επιλέγουν τις βέλτιστες παραμέτρους κίνησης στα SLS. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι η κατανομή της πληροφορίας που κάνει εφικτή τη διαδικασία επιλογής SLS με επεκτάσιμο και αποδοτικό τρόπο. Σύμφωνα με την κατανομή αυτή της πληροφορίας, κάθε συστατικό μέρος της

αρχιτεκτονικής κατέχει μόνο πληροφορία για την οποία έχει κίνητρα να αποθηκεύει. Επίσης, η υλοποίηση του συστήματός μας, σε ένα πραγματικό περιβάλλον δικτύου, απέδειξε την εφικτότητα, αλλά και την αποδοτικότητα της προσέγγισης. Η προταθείσα προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συμπλήρωμα στους μηχανισμούς διαχείρισης κυκλοφορίας, μεταβάλλοντας την τιμή ανά μονάδα ισοδύναμης χρήσης για κάθε κλάση ποιότητας υπηρεσίας, είτε δυναμικά (ισοκατανέμοντας, έτσι, το φόρτο κυκλοφορίας μεταξύ των κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας), είτε στατικά (προσφέροντας, έτσι, στους χρήστες τα κίνητρα να επιλέξουν συγκεκριμένα μονοπάτια του δικτύου, αντί άλλων). Συμπερασματικά, η αρχιτεκτονική που αναπτύχθηκε παρέχει στον παροχέα του δικτύου ευελιξία για εφαρμογή διαφόρων πολιτικών χρέωσης και δέσμευσης πόρων, και για καθορισμό κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας και την αντιστοίχιση των απαιτήσεων των χρηστών για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε αυτές, προκειμένου να βελτιώσει την αποδοτικότητα του δικτύου του.

Ως μελλοντική εργασία, σχεδιάζουμε να εφαρμόσουμε και να αξιολογήσουμε διάφορες πολιτικές χρέωσης (για τις οποίες θα διαφοροποιείται και η διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων κίνησης ρ , β) και δέσμευσης πόρων στο σύστημα που υλοποιήσαμε. Επιθυμούμε έτσι να παρέχουμε μια διευρυμένη αρχιτεκτονική τόσο για την αποδοτική επιλογή και εφαρμογή SLA, αλλά και για την αποδοτική διαχείριση των πόρων σε ένα διαχειριζόμενο περιβάλλον δικτύου. Μια άλλη κατεύθυνση, είναι η εφαρμογή της διαδικασίας διαπραγμάτευσης για την αποδοτική επιλογή SLA μεταξύ διαχειριζομένων δικτύων. Τέλος, σκοπεύουμε να εφαρμόσουμε την αρχιτεκτονική μας, έτσι ώστε να παρέχει δυναμικά και αποδοτικά επιλεγμένα SLA στους χρήστες από άκρη-σε-άκρη διαμέσω διαχειριζομένων δικτύων DiffServ, όπως περιγράφεται στην ενότητα 7.

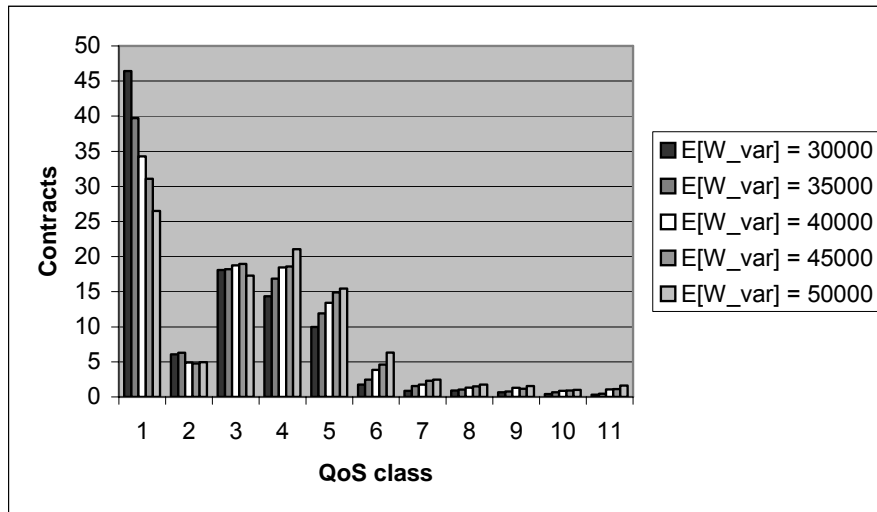
Αναφορές – Βιβλιογραφία

- [1] S. Blake *et al.* An Architecture for Differentiated Services. IETF RFC: 2475, December 1998.
- [2] R. Braden *et al.* RSVP Functional Specification. IETF RFC: 2205, September 1997.
- [3] C. Courcoubetis and V. Siris. Managing and Pricing Service Level Agreements for Differentiated Services. In *Proc. of IEEE/IFIP IWQoS'99*, UCL, London, May 31 – June 4, 1999.
- [4] Microsoft Technical Library. Quality of Service Technical White Paper. White Paper, September 03, 1999. URL: <http://www.microsoft.com/windows2000/library/howitworks/communications/trafficmgmt/QoSOver.asp>
- [5] F. Reichmeyer *et al.* A Two-Tier Resource Management Model for Differentiated Service Networks. IETF Internet Draft, November 1998.
- [6] Y. Bernet *et al.* A Framework For Integrated Services Operation Over Diffserv Networks. Work in progress, IETF Internet Draft, September 1999.
- [7] E. Crawley *et al.* A Framework for Integrated Services and RSVP over ATM. IETF RFC: 2382, August 1998.
- [8] E. Rosen *et al.* Multiprotocol Label Switching Architecture. IETF Internet Draft, Mar. 1998.
- [9] F. Le Faucheur *et al.* MPLS Support of Differentiated Services. IETF Internet Draft, March 2000.
- [10] G. D. Stamoulis, D. Kalopsikakis, A. Kirikoglou, and C. Courcoubetis. Efficient Agent-based Negotiation for Telecommunication Services. In *Proc. of Globecom'99*, Rio de Janeiro, Brazil, December 1999.
- [11] C. Courcoubetis, F. P. Kelly, and R. WWer. Measurement-based usage charges in communication networks. Statistical Laboratory Research Report 1997-19, University of Cambridge, 1999.
- [12] S. Shenker *et al.* Specification of Guarranteed Quality of Service. IETF RFC: 2212, Category: Standards Track, September 1997.
- [13] Y. Bernet *et al.* Winsock Generic QOS Mapping (draft). Microsoft Technical Library, 1998.
- [14] S. Herzog *et al.* COPS usage for RSVP. IETF RFC: 2749, Category: Standards Track, January 2000.
- [15] R. Yavatkar *et al.* A Framework for Policy-Based Admission Control. IETF RFC: 2753, Category: Informational, January 2000.

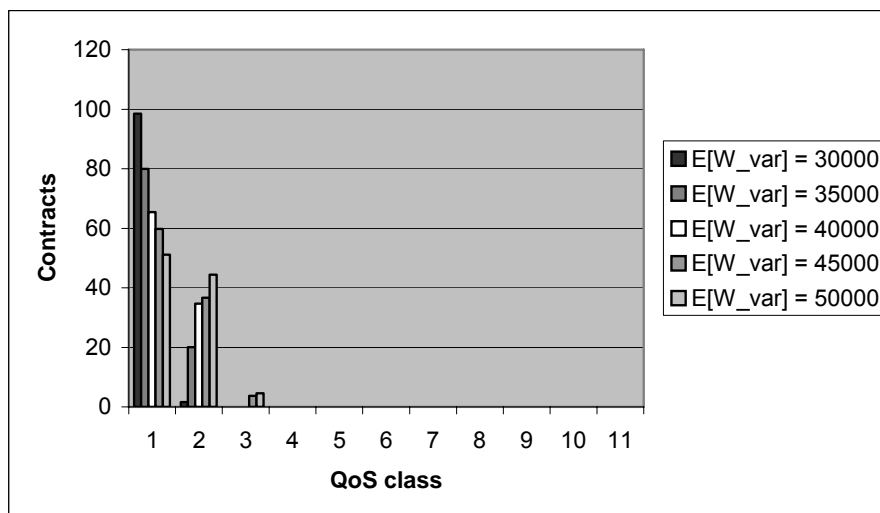
-
- [16] D. Durham *et al.* The COPS (Common Open Policy Service) Protocol. IETF RFC: 2748, Category: Standards Track, January 2000.
- [17] Y. Bernet. Format of the RSVP DCLASS Object. IETF Internet Draft, October 1999.
- [18] S. Shenker. Fundamental Design Issues for the Future Internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 13, no. 7, September 1995.
- [19] Microsoft Technical Library. Windows 2000 Features in Support of Differentiated Services. White Paper, July 2000. URL: <http://www.microsoft.com/windows2000/library/howitworks/communications/trafficmgmt/diffserv.asp>
- [20] R. Atkinson. Security Architecture for the Internet Protocol. IETF RFC: 2401, August 1995.
- [21] D. Goderis *et al.* Service Level Specification Semantics, Parameters and negotiation requirements. IETF Internet Draft, July 2000.
- [22] R. Guerin *et al.* Aggregating RSVP-based QoS Requests. IETF Internet Draft, November 1997.
- [23] T. Li and Y. Rekhter. Provider Architecture for Differentiated Services and Traffic Engineering (PASTE). IETF RFC: 2430, October 1998.
- [24] D. Awduche *et al.* Extensions to RSVP for Traffic Engineering. IETF Internet Draft, August 1998.
- [25] K. Nichols *et al.* Definition of Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers. IETF RFC: 2474, December 1998.
- [26] K. Nichols *et al.* A Two-bit Differentiated Services Architecture for the Internet. IETF Internet Draft, November 1997.
- [27] S. Kent and R. Atkinson. Security Architecture for the Internet Protocol. IETF RFC: 2401, November 1998.
- [28] L. Anderson *et al.* Label Distribution Protocol. IETF Internet Draft, November 1998.
- [29] B. Jamoussi. Constraint-Based LSP Setup using LDP. IETF Internet Draft, September 1999.
- [30] F. P. Kelly. Tariffs and effective bandwidths in multiservice networks. In J. Labetoulle and J. W. Roberts, eds., *The Fundamental Role of Teletraffic in the Evolution of Telecommunications Networks*, In *Proc. of the 14th International Teletraffic Congress – ITC 14*, vol. 1a of *Teletraffic Science and Engineering*, pp. 401-410. Elsevier Science B. V., Amsterdam, Antibes Juan-les-Pins, France, 1994.
- [31] F. P. Kelly. On tariffs, policing and admission control for multiservice networks. *Operations Research Letters*, 15:1-9, 1994.
- [32] D. Wischik. The output of a switch, or, effective bandwidths for networks. In *Proc. of Queueing Systems*, 1999.

-
- [33] F. P. Kelly. Charging and Accounting for Bursty Connections. In *Internet Economics* (Editors L. W. McKnight and J. P. Bailey), pp. 253-278, MIT Press, 1997.
- [34] F. P. Kelly, A. K. Maulloo, and D. K. H. Tan. Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of the Operational Research Society* 49, pp. 237-252, 1998.
- [35] *IEEE Communications Magazine*, Special Issue on Mobile Software Agents for Telecommunications, 36(7), July 1998.
- [36] AC325 project MONTAGE: Mobile Intelligent Agents in Accounting, Charging, and Personal Mobility Support; URL: <http://montage.ccrle.nec.de/>
- [37] A. Terzis, L. Wang, J. Ogawa, and L. Zhang. A Two-Tier Resource Management Model for the Internet. In *Global Internet 99*, Dec 1999.
- [38] M. Chatzaki, S. Sartzetakis, N. Papadakis, and C. Courcoubetis. Resource Allocation in Multiservice MPLS. In *Proc. of the 7th IEEE/IFIP IWQoS'99 International Workshop on Quality of Service*, UCL, London, UK, May 31 - June 4, 1999.
- [39] C. Courcoubetis, C. Manolakis, and G. D. Stamoulis. An Intelligent Agent for Negotiating QoS in Priced ABR Connections. In *Proc. of International Conference on Telecommunications (ICT'98)*, Halkidiki, Greece, June 1998.
- [40] T. Papaioannou, S. Sartzetakis, and G. D. Stamoulis. Efficient Agent-Based Selection of DiffServ SLAs over MPLS networks. In *Proc. of SPIE International Symposium on Information Technologies 2000 (Program on Internet Performance and Control)*, Boston, USA, November 2000.
- [41] G. Gikas. Flow routing and resource management in MPLS networks that support multiple QoS classes. MSc Thesis, Computer Science Department, University of Crete, Greece, November 2000.

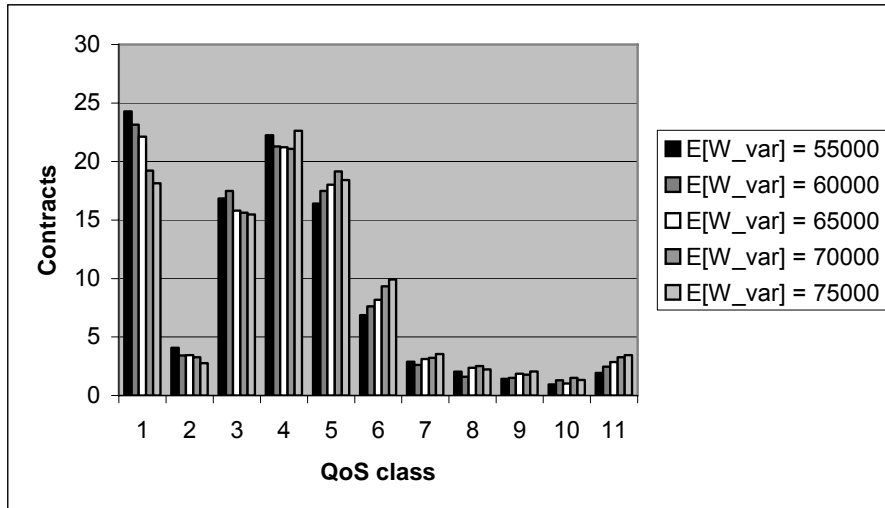
Παράρτημα Α



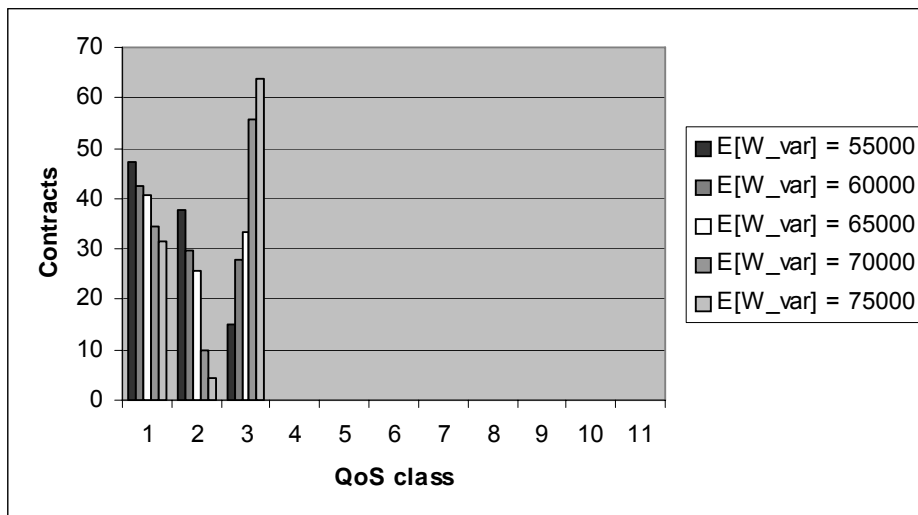
Σχήμα 25: Επιλογή συμβολαίων με κοίλη χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 30000 έως 50000.



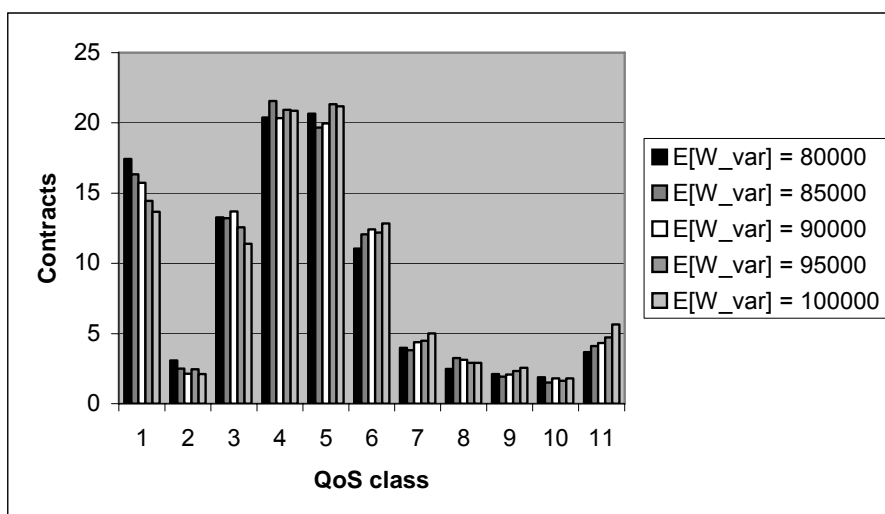
Σχήμα 26: Επιλογή συμβολαίων με κοίλη χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 30000 έως 50000.



Σχήμα 27: Επιλογή συμβολαίων με κοίλη χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 55000 έως 75000.

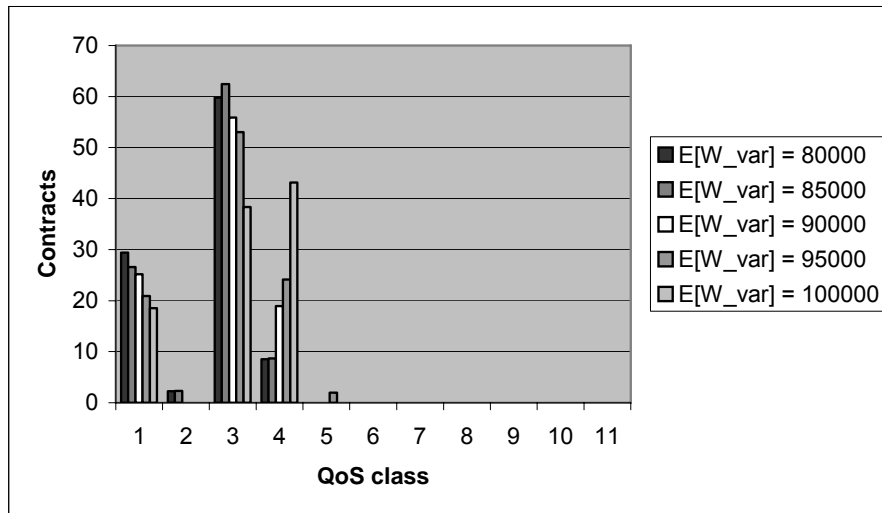


Σχήμα 28: Επιλογή συμβολαίων με κοίλη χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 55000 έως 75000.

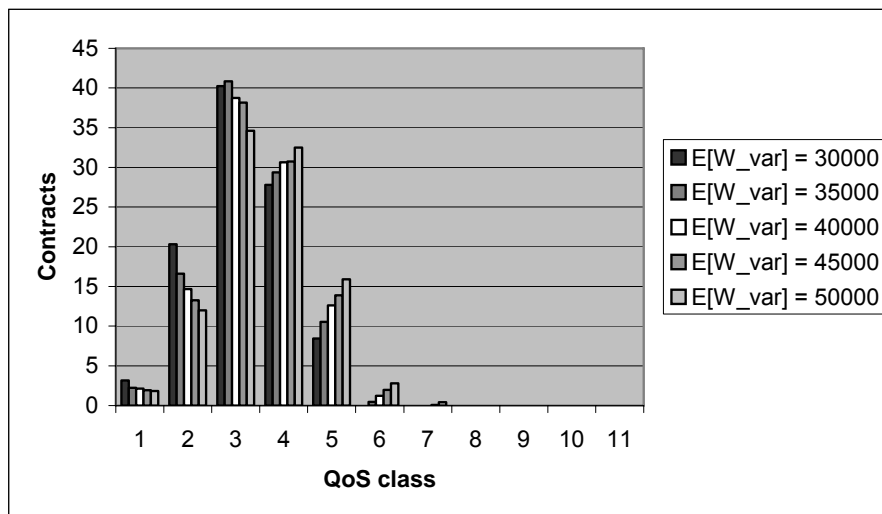


Σχήμα 29: Επιλογή συμβολαίων με κοίλη χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών,

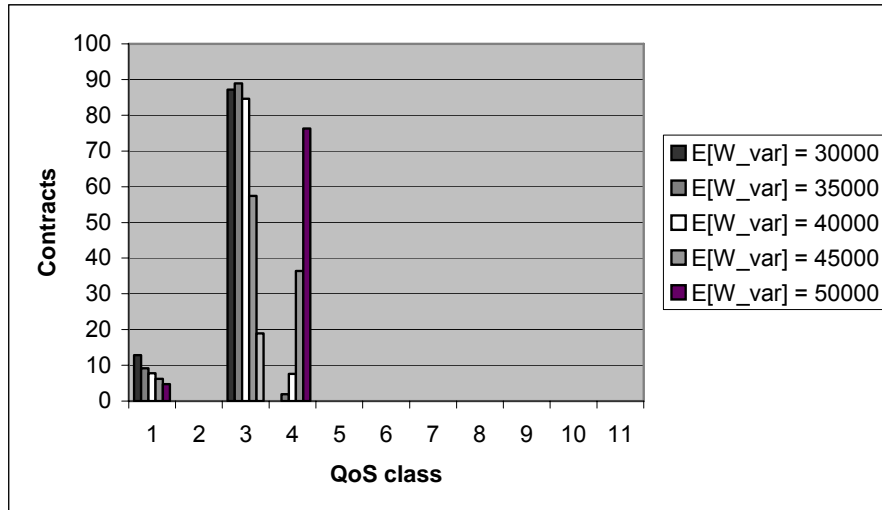
όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 80000 έως 100000.



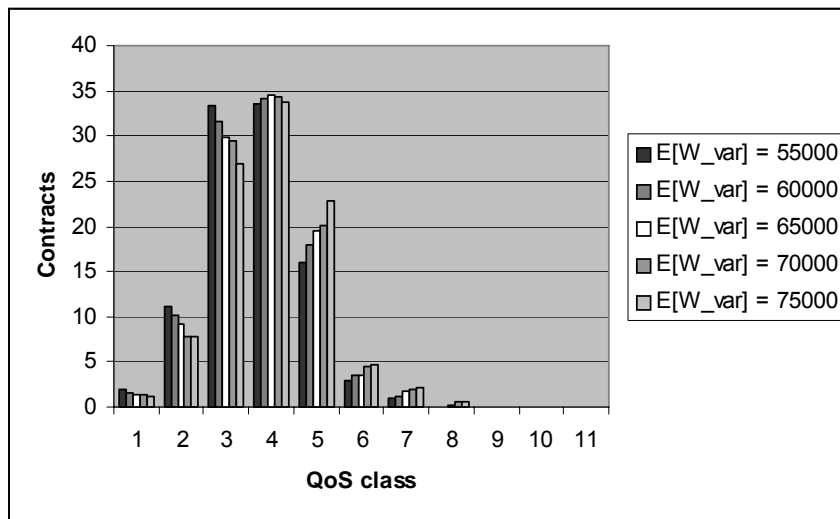
Σχήμα 30: Επιλογή συμβολαίων με κοίλη χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 80000 έως 100000.



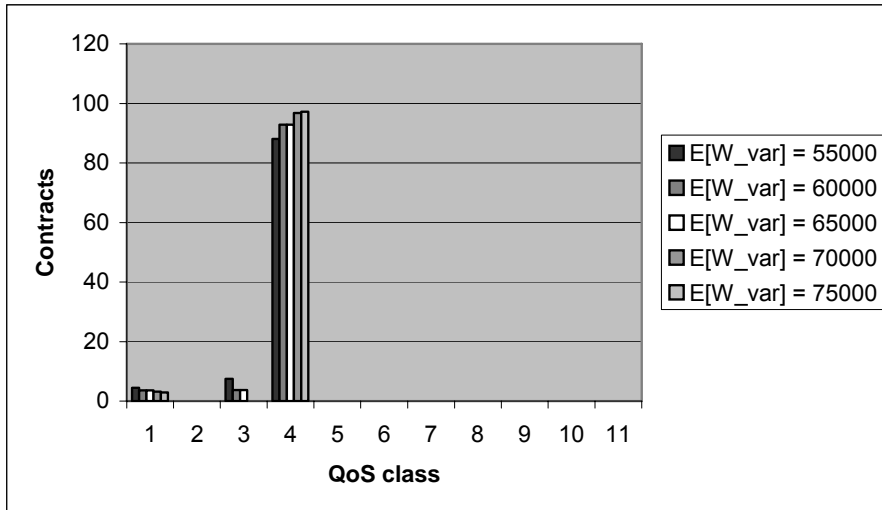
Σχήμα 31: Επιλογή συμβολαίων με γραμμική χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 30000 έως 50000.



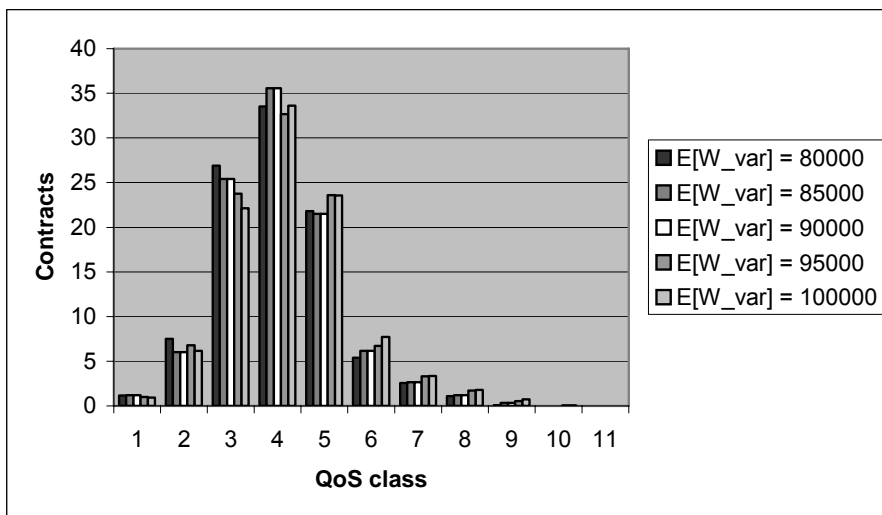
Σχήμα 32: Επιλογή συμβολαίων με γραμμική χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 30000 έως 50000.



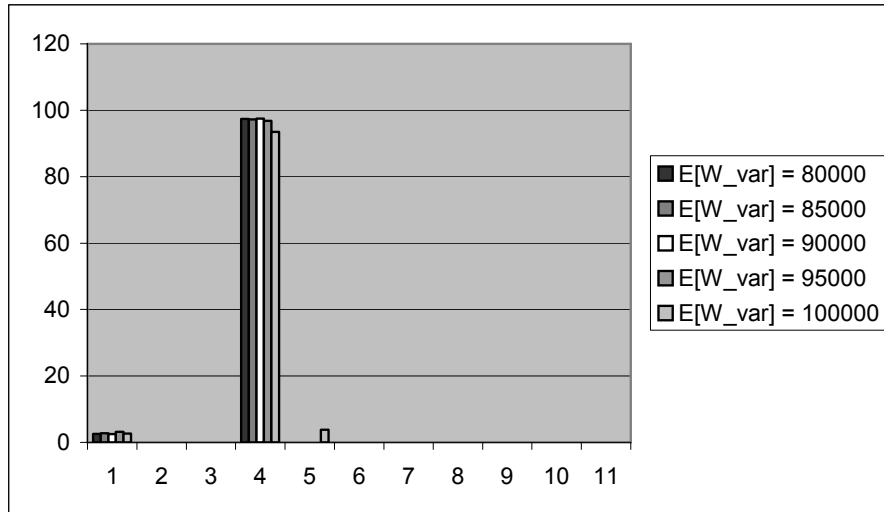
Σχήμα 33: Επιλογή συμβολαίων με γραμμική χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 55000 έως 75000.



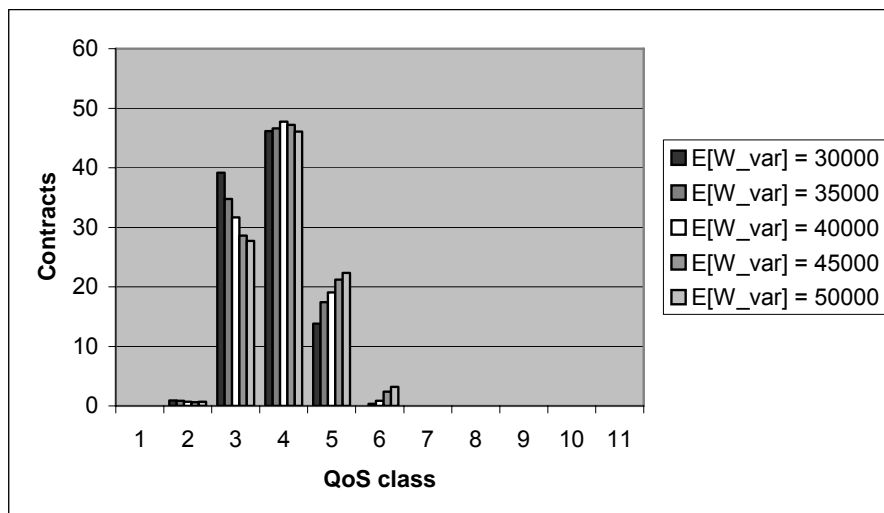
Σχήμα 34: Επιλογή συμβολαίων με γραμμική χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 55000 έως 75000.



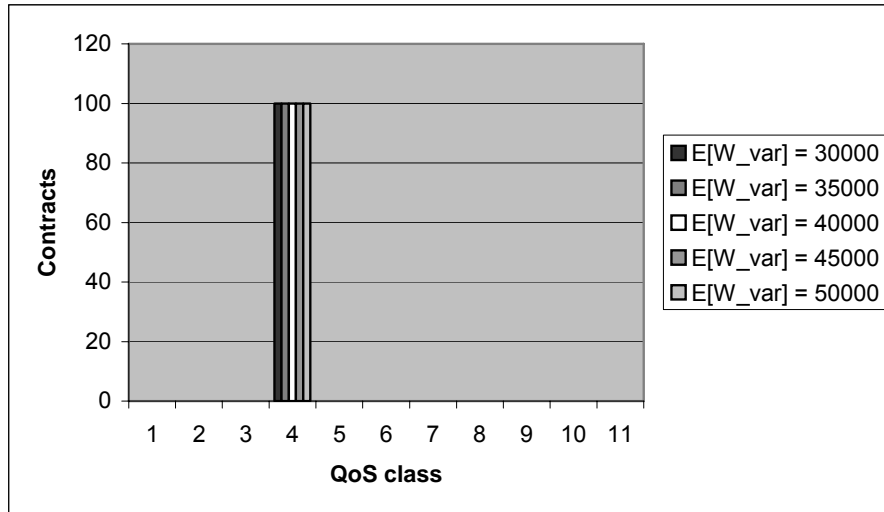
Σχήμα 35: Επιλογή συμβολαίων με γραμμική χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 80000 έως 100000.



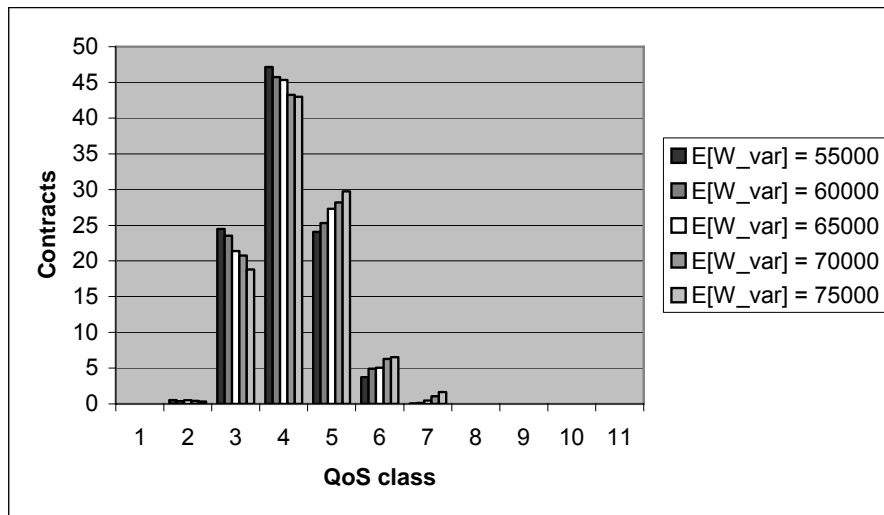
Σχήμα 36: Επιλογή συμβολαίων με γραμμική χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 80000 έως 100000.



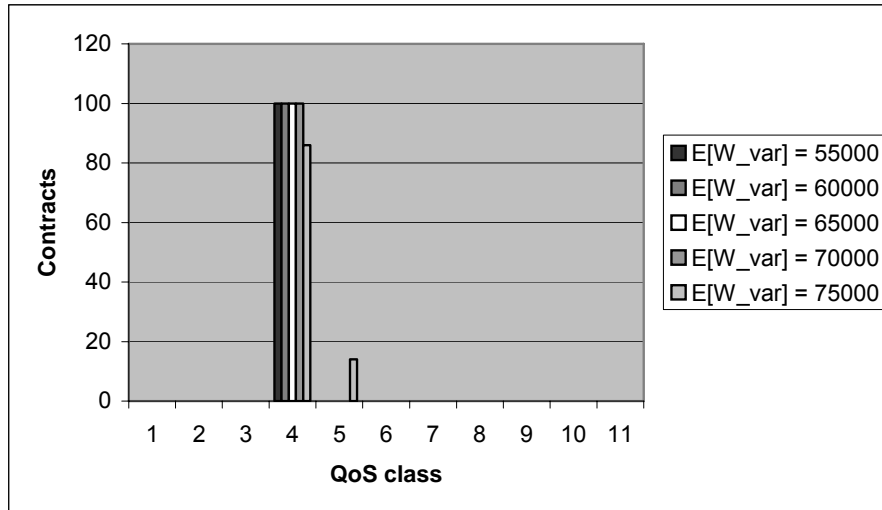
Σχήμα 37: Επιλογή συμβολαίων με κυρτή χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 30000 έως 50000.



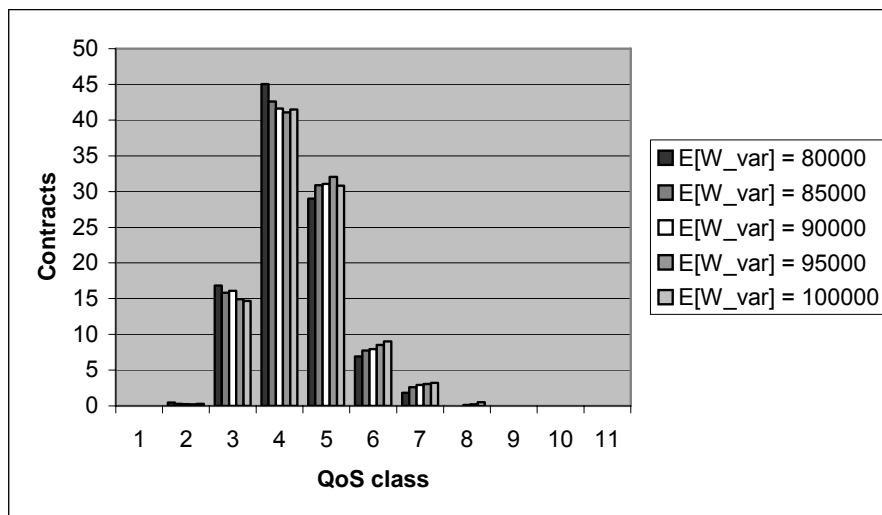
Σχήμα 38: Επιλογή συμβολαίων με κυρτή χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 30000 έως 50000.



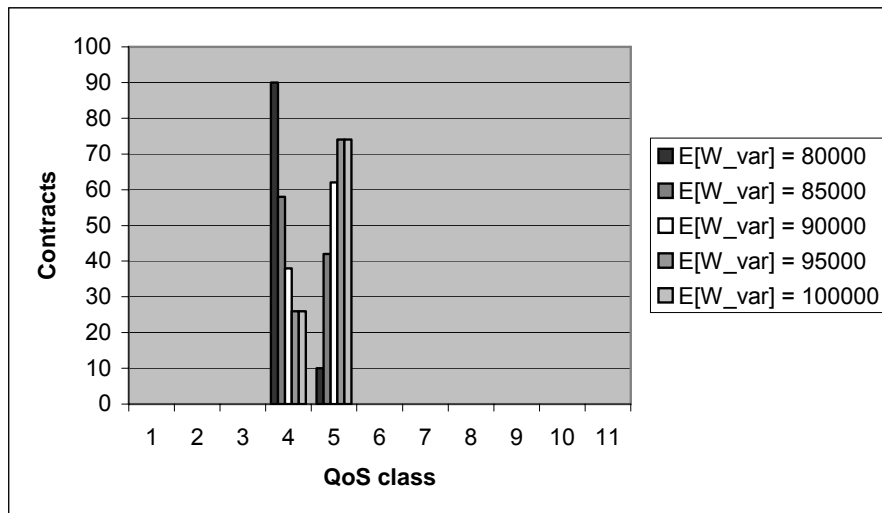
Σχήμα 39: Επιλογή συμβολαίων με κυρτή χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 55000 έως 75000.



Σχήμα 40: Επιλογή συμβολαίων με κυρτή χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 55000 έως 75000.



Σχήμα 41: Επιλογή συμβολαίων με κυρτή χρέωση μεγιστοποιώντας το net benefit των χρηστών, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 80000 έως 100000.



Σχήμα 42: Επιλογή συμβολαίων με κυρτή χρέωση με ισοκατανομή πόρων στους χρήστες, όταν $E[W_{var}]$ παίρνει τιμές από 80000 έως 100000.