

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

*“Προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος κίνησης για δίκαιη
διαμοίραση πόρων σε δίκτυα διαφοροποιημένων υπηρεσιών”*

Θεοχάρης Μ. Μαρινάκης
Μεταπτυχιακή Εργασία

Ηράκλειο Φεβρουάριος 2004

Πανεπιστήμιο Κρήτης
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών

**Προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος κίνησης για
δίκαιη διαμοίραση πόρων σε δίκτυα διαφοροποιημένων
υπηρεσιών**

Εργασία που υποβλήθηκε από τον
Θεοχάρη Μ. Μαρινάκη
ως μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για την απόκτηση
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Συγγραφέας:

Θεοχάρης Μ. Μαρινάκης
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Εισηγητική Επιτροπή:

Βασίλειος Σύρης,
Επίκουρος Καθηγητής, Επόπτης

Απόστολος Τραγανίτης,
Καθηγητής, Μέλος

Παναγιώτης Τσακαλίδης,
Αναπληρωτής Καθηγητής, Μέλος

Δεκτή:

Δημήτρης Πλεξουσάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής
Πρόεδρος Επιτροπής Μεταπτυχιακών Σπουδών

Ηράκλειο Φεβρουάριος 2004

Στον θείο μου Νίκο...

Προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος κίνησης για δίκαιη διαμοίραση πόρων σε δίκτυα διαφοροποιημένων υπηρεσιών

Θεοχάρης Μ. Μαρινάκης
Μεταπτυχιακή Εργασία

Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Περίληψη

Η παροχή ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS), δηλαδή η παροχή κάποιου είδους εγγυήσεων όσο αφορά την ποιότητα της εξυπηρέτησης της κίνησης σε δίκτυα IP, αποτελεί ένα πρόβλημα που έχει προκαλέσει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Μεταξύ των διαφόρων λύσεων που έχουν προταθεί για να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα, η αρχιτεκτονική των διαφοροποιημένων υπηρεσιών (Differentiated Services – DiffServ ή DS) έχει συγκεντρώσει ίσως την μεγαλύτερη προσοχή, προτείνοντας ένα μικρό σύνολο μηχανισμών, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας απ’ άκρη σ’ άκρη πάνω από το Internet ή άλλα δίκτυα IP. Μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων εξυπηρέτησης πακέτων που εισάγει η αρχιτεκτονική DiffServ, το μοντέλο εξυπηρέτησης Assured Forwarding (AF) προσφέρεται για την παροχή υπηρεσιών σε εφαρμογές με “ελαστικές” απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Έχει αποδειχτεί όμως ότι με χρήση των υπάρχοντων μηχανισμών παροχής υπηρεσιών τύπου AF, εμφανίζονται φαινόμενα ανισότητας τόσο σε δίκτυα με περίσσειμα χωρητικότητας κατά τη διαμοίραση αυτού μεταξύ των διαφόρων εφαρμογών, όσο και σε δίκτυα όπου η χωρητικότητα δεν επαρκεί για την εξυπηρέτηση του συνόλου των εφαρμογών, και στα οποία η ανισότητα αφορά την υποβάθμιση της διαπερατότητας (throughput) που βιώνει ξεχωριστά κάθε εφαρμογή.

Δύο βασικοί μηχανισμοί της αρχιτεκτονικής DiffServ είναι το μαρκάρισμα πακέτων στις εισόδους του δικτύου σύμφωνα με το συμβόλαιο κίνησης (traffic contract), και η διαφορετική μεταχείριση μαρκαρισμένων πακέτων στο εσωτερικό του δικτύου. Η παρούσα εργασία προτείνει και μελετάει “προσαρμόσιμους αλγορίθμους μαρκαρίσματος”, στους οποίους ο ρυθμός μαρκαρίσματος προσαρμόζεται στις αλλαγές του μίγματος κίνησης ώστε να επιτυγχάνεται δίκαιη διαμοίραση της χωρητικότητας, σε διαφορετικά σενάρια κίνησης. Μελετούνται δύο διαφορετικά μοντέλα δίκαιης διαμοίρασης πόρων, η διαμοίραση μεγιστοποίησης του ελαχίστου (μοντέλο max-min fairness) και η αναλογική διαμοίραση με βάση το ύψος της δεσμευμένης χωρητικότητας κάθε εφαρμογής, και προτείνονται διαφορετικοί μηχανισμοί μαρκαρίσματος για κάθε μοντέλο. Εξετάζεται επίσης η υλοποίηση των προσαρμόσιμων μηχανισμών μαρκαρίσματος με τη χρήση κεντρικοποιημένων “μεσιτών εύρους ζώνης” (Bandwidth Brokers) που θα λαμβάνουν τις αποφάσεις προσαρμογής των μηχανισμών μαρκαρίσματος. Εκτενή πειράματα προσομοίωσης για διαφορετικά σενάρια κίνησης δείχνουν ότι οι προτεινόμενοι μηχανισμοί επιτυγχάνουν

πολύ υψηλή απόδοση όσο αφορά την ισότητα διαμοίρασης πόρων, και αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά όλους τους διαφορετικούς παράγοντες που προκαλούν τα φαινόμενα ανισότητας, καταφέροντας ταυτόχρονα να διατηρούν την πολυπλοκότητά τους σε χαμηλά επίπεδα.

Επόπτης:

Βασίλειος Α. Σύρης
Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Adaptive markers for achieving fairness in Differentiated Services networks

Theoharris M. Marinakis
Master of Science Thesis

Computer Science Department
University Of Crete

Abstract

Providing Quality of Service (QoS) in IP networks has drawn the attention of the scientific world over the last years. Among various solutions proposed, the Differentiated Services (DiffServ) architecture suggests the use of a small number of mechanisms, which can be used for providing end-to-end QoS over the Internet or other IP networks, in a simple and scalable way. The DiffServ framework introduces a few additional packet-handling schemes (Per-Hop Behaviors – PHBs), among which is the Assured Forwarding PHB, used to build “elastic” services that impose requirements only on throughput. In the common AF architecture, unfairness among heterogeneous traffic sources is observed, concerning sharing of the excess capacity in under-subscribed networks, and degradation of throughput in over-subscribed networks.

DiffServ architecture is based on differential packet marking at the network edge based on traffic contracts and differential handling of the marked packets at the core of the network. This study suggests modifications to current marking techniques at the network edge, proposing the use of “adaptive markers” which adapt the marking rate when the traffic mix changes, in order to improve fairness. Two different source sharing models are studied, max-min fairness and proportional sharing based on reserved throughputs, and different adaptive markers are suggested for each case. Finally this paper examines techniques for implementing adaptive markers, and suggests the use of centralized Bandwidth Brokers to adaptively adjust the parameters of the marking algorithms. Extended simulation experiments for various traffic scenarios indicate that the proposed mechanisms achieve to distribute network capacity in a fair way, dealing effectively with every different factor that cause unfairness phenomena, while at the same time they keep their complexity at low levels.

Tutor:

Vasilios A. Siris
Assistant Professor
Computer Science Department
University Of Crete

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους στάθηκαν δίπλα μου και με βοήθησαν στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Θα ήθελα κατ' αρχήν να ευχαριστήσω τον επόπτη καθηγητή μου κ. Βασίλειο Σύρη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και τη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας τα τελευταία χρόνια. Ευχαριστώ επίσης του καθηγητές κ. Απόστολο Τραγανίτη και κ. Παναγιώτη Τσακαλίδη για την συμμετοχή τους στην εισηγητική επιτροπή της εργασίας αυτής.

Ευχαριστώ την ομάδα Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, της οποίας είχα την τύχη να είμαι μέλος τα τελευταία χρόνια, για τις εμπειρίες και τις γνώσεις που μου προσέφερε, οι οποίες αποτέλεσαν τη βάση για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ τους φορείς του Τμήματος Επιστήμης Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Κρήτης, και του Ινστιτούτου Πληροφορικής του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας που με βοήθησαν σε θέματα υλικοτεχνικής υποδομής και σε διάφορα άλλα διαδικαστικά θέματα, και ιδιαίτερα τους Γιάννη Σουρλατζή, Μαρία Μαμαλάκη, Χριστίνα Βαλίνη, Φώτη Κίτσο, και Ρένα Καλαϊτζάκη.

Η ακαδημαϊκή μου πορεία που οδήγησε στην εκπόνηση αυτής της εργασίας, οφείλεται κατά ένα μεγάλο μέρος στους γονείς μου Ματθαίο και Αικατερίνη και την αδερφή μου Παντελεία, τους οποίους ευχαριστώ βαθύτατα για την στήριξη και την υπομονή που δείχνουν προς το πρόσωπό μου.

Τελευταίους, αλλά όχι λιγότερο από τους υπόλοιπους, ευχαριστώ τους φίλους και συμφοιτητές μου, τόσο για την βοήθειά τους σε θέματα που αφορούσαν την υλοποίηση της εργασίας μου, όσο και για την συμπαράσταση και την ηθική υποστήριξη που μου προσέφεραν. Χωρίς αυτούς, πολύ δύσκολα θα κατάφερνα να ολοκληρώσω την εργασία αυτή. Λόγω του ότι ο αριθμός των ατόμων στους οποίους επιθυμώ να αναφερθώ είναι πολύ μεγάλος και υπό το φόβο ότι ίσως παραλείψω ορισμένους, διστάζω να παραθέσω ονομαστικά καθέναν απ' αυτούς. Εύχομαι σε όλους ότι καλύτερο επιθυμούν.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Περιγραφή Προβλήματος	2
1.2	Συνεισφορά παρούσας εργασίας.....	3
2	Αρχιτεκτονική Differentiated Services (DiffServ)	5
2.1	Γενικά Χαρακτηριστικά.....	5
2.2	Ο Ελεγκτής Κυκλοφορίας (Traffic Conditioner).....	5
2.3	Per Hop Behaviors (PHBs).....	6
2.3.1	Assured Forwarding (AF) Per Hop Behavior	7
2.3.1.1	Μετρητές (Meters) στην AF PHB	8
2.3.1.2	Μηχανισμοί μαρκαρίσματος κίνησης.....	9
2.3.1.3	Πολιτική απόρριψης πακέτων Random Early Detection (RED)	10
2.3.1.4	Υλοποίηση υπηρεσιών τύπου AF	11
2.3.1.5	Αδυναμίες των υπαρχόντων AF τεχνολογιών	13
2.3.1.5.1	Θέματα Ισότητας.....	14
2.3.1.5.2	Αιτίες της ανισότητας μεταξύ εφαρμογών που ζητάνε AF υπηρεσίες	15
2.4	Ο μεσίτης εύρους ζώνης (Bandwidth Broker).....	17
3	Προσεγγίσεις του προβλήματος	19
3.1	“Έξυπνο” Traffic Conditioning στις άκρες του δικτύου	19
3.2	Έλεγχος ροής (flow control) στην άκρη του δικτύου	19
3.3	Αλλαγή της πολιτικής απόρριψης πακέτων στο κέντρο του δικτύου	20
3.4	Αλλαγές των πρωτοκόλλων επιπέδου μεταφοράς (TCP, UDP)	20
3.5	Επιλογή της παρούσας εργασίας.....	21
4	Σχετικές Εργασίες	23
4.1	Memory-Based Marker (MBM) [11].....	23
4.2	Equation-Based Packet Marking (EBPM) [3]	24
4.3	Intelligent Traffic Conditioners [4].....	26
4.4	Rate Adaptive Marker (RAM) [5]	27
4.5	Αδυναμίες των σχετικών εργασιών – στόχοι της δικής μας εργασίας.....	28
5	Περιγραφή Εργασίας	31
5.1	Κίνητρο των επιλογών της εργασίας (Motivation).....	31
5.2	Ισόποση διαμοίραση της δικτυακής χωρητικότητας	32
5.2.1	Προσαρμόσιμοι (adaptive) αλγόριθμοι μαρκαρίσματος που επιδιώκουν ισόποση διαμοίραση της δικτυακής χωρητικότητας.....	33
5.2.2	Περιγραφή και αποτελέσματα πειραμάτων που εξετάζουν την μέγιστη ισότητα που επιτυγχάνουν οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος	35
5.2.2.1	TCP πηγές: Διαφορετικό μέγεθος πακέτου	37
5.2.2.2	TCP πηγές: Διαφορετικό αριθμός TCP ροών στα aggregates των πηγών	38
5.2.2.3	TCP πηγές: Διαφορετικά Round Trip Times (RTTs).....	39
5.2.2.4	TCP πηγές: Διαφορετική έκδοση του TCP πρωτοκόλλου (TCP Stack)	40
5.2.2.5	TCP πηγές: Διαφορετικά Target Rates	41
5.2.2.6	TCP πηγές: Διαφορετικά μεγέθη πακέτου και διαφορετικός αριθμός ροών στα aggregates των πηγών.....	45
5.2.2.7	TCP πηγές: Διαφορετικά μεγέθη πακέτου σε over-subscribed δίκτυο	45
5.2.2.8	UDP πηγές: Διαφορετικοί ρυθμοί αποστολής.....	46

5.2.2.9	Αλληλεπίδραση UDP και TCP πηγών.....	47
5.2.2.10	Συμπεράσματα πειραμάτων ελέγχου της μέγιστης ισότητας που επιτυγχάνουν οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος.....	48
5.2.3	Εντοπισμός βέλτιστης τιμής της παραμέτρου των συναρτήσεων μαρκαρίσματος	48
5.2.3.1	Επιλογή τιμής της παραμέτρου: Διαφορετικοί ρυθμοί αποστολής μεταξύ UDP πηγών.....	50
5.2.3.2	Επιλογή τιμής της παραμέτρου: Διαφορετικά μεγέθη πακέτου και διαφορετικός αριθμός ροών στα aggregates μεταξύ TCP πηγών.....	51
5.2.3.3	Επιλογή τιμής της παραμέτρου: Αλληλεπίδραση UDP και TCP πηγών	52
5.2.3.4	Επιλογή τιμής της παραμέτρου: Συμπεράσματα	53
5.2.4	Ευαισθησία στην επιλογή τιμής παραμέτρου	54
5.2.4.1	Διαφορετικά μεγέθη πακέτου μεταξύ TCP πηγών	56
5.2.4.2	Διαφορετικοί ρυθμοί αποστολής μεταξύ UDP πηγών.....	57
5.2.4.3	Ευαισθησία στην επιλογή τιμής παραμέτρου: Συμπεράσματα.....	58
5.2.5	Εκμετάλλευση δικτυακής χωρητικότητας (Utilization)	58
5.2.6	Επιλογή RIO παραμέτρων της AF ουράς στο κέντρο του δικτύου	60
5.2.7	Ισόποση διαμοίραση: Συμπεράσματα.....	63
5.3	Αναλογική διαμοίραση του περισσευόμενου εύρους ζώνης (και αντίστοιχα αναλογική υποβάθμιση σε over – subscribed δίκτυο)	64
5.3.1	Προσαρμόσιμοι (adaptive) αλγόριθμοι μαρκαρίσματος που επιδιώκουν αναλογική διαμοίραση της δικτυακής χωρητικότητας	64
5.3.2	Περιγραφή και αποτελέσματα πειραμάτων	66
5.3.2.1	TCP πηγές: Διαφορετικά Target Rates (I)	66
5.3.2.2	TCP πηγές: Διαφορετικά Target Rates (II).....	67
5.3.2.3	TCP πηγές: Διαφορετικά Target Rates σε over-subscribed δίκτυο	68
5.3.2.4	Συμπεράσματα πειραμάτων ελέγχου της απόδοσης των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος της αναλογικής διαμοίρασης πόρων	69
5.3.3	Αναλογική διαμοίραση: Συμπεράσματα.....	69
5.4	Πολλαπλοί συμφορημένοι κόμβοι.....	70
5.4.1	Πείραμα σε δίκτυο με πολλαπλούς συμφορημένους συνδέσμους: TCP πηγές με διαφορετικό μέγεθος πακέτου.....	71
5.5	Μέθοδος υλοποίησης των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος ..	74
6	Συμπεράσματα.....	77
7	Αναφορές.....	81

Κατάλογος Σχημάτων

Σχ. 1	Πιθανότητα απόρριψης RED ουράς συναρτήσει του μέσου μεγέθους της.....	10
Σχ. 2	Πιθανότητα απόρριψης in και out πακέτων στον RIO μηχανισμό.....	11
Σχ. 3	Απλό DiffServ δίκτυο	12
Σχ. 4	Συνάρτηση πιθανότητας μαρκαρίσματος του αλγορίθμου A (Step)	33
Σχ. 5	Συνάρτηση πιθανότητας μαρκαρίσματος του αλγορίθμου B (Linear)	34
Σχ. 6	Συνάρτηση πιθανότητας μαρκαρίσματος του αλγορίθμου C (Adaptive TSW2CM).....	34
Σχ. 7	Η δικτυακή τοπολογία που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων	36
Σχ. 8	Συνάρτηση πιθανότητας μαρκαρίσματος του αλγορίθμου A (Step)	65
Σχ. 9	Συνάρτηση πιθανότητας μαρκαρίσματος του αλγορίθμου B (Adaptive TSW2CM).....	65
Σχ. 10	Δικτυακή τοπολογία που περιλαμβάνει δύο συμφορημένους κόμβους	70
Σχ. 11	Αρχιτεκτονική Bandwidth Broker (BB) που χρησιμοποιείται για υλοποίηση προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος.....	75

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. TCP πηγές με διαφορετικά μεγέθη πακέτου. 5 πηγές με μέγεθος πακέτου 100bytes.....	38
Διάγραμμα 2. TCP πηγές με διαφορετικό αριθμό ροών ανά aggregate. 5 πηγές με 5 TCP ροές.....	39
Διάγραμμα 3. TCP πηγές με διαφορετικά RTTs. 5 πηγές με 7msec propagation delay και	40
Διάγραμμα 4. Διαφορετική έκδοση TCP πρωτοκόλλου. 5 πηγές TCP Sack	41
Διάγραμμα 5. TCP πηγές με διαφορετικά Target Rates. 5 πηγές με 100kbps Target Rate	42
Διάγραμμα 6. TCP πηγές με διαφορετικά Target Rates. 5 πηγές με 100kbps Target Rate	43
Διάγραμμα 7. TCP πηγές με διαφορές σε μεγέθη πακέτου και αριθμό ροών στα aggregates	45
Διάγραμμα 8. TCP πηγές με διαφορετικά μεγέθη πακέτου σε over-subscribed δίκτυο. 800kbps Target Rate για όλες τις πηγές, 5 πηγές με μέγεθος πακέτου 100bytes και 5 πηγές με μέγεθος πακέτου 1500bytes.....	46
Διάγραμμα 9. UDP πηγές με διαφορετικούς ρυθμούς αποστολής. 5 πηγές με 600kbps ρυθμό αποστολής και 5 πηγές με 2Mbps.....	47
Διάγραμμα 10. Αλληλεπίδραση TCP και UDP πηγών. 5 TCP πηγές και 5 UDP πηγές.	48
Διάγραμμα 11. Απόδοση των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος για διάφορες τιμές της παραμέτρου (h)	49
Διάγραμμα 12. UDP πηγές με διαφορετικούς ρυθμούς αποστολής. Απόδοση των αλγορίθμων με βέλτιστη τιμή της παραμέτρου, και με την θεωρητικά υπολογισμένη Fair Share τιμή. Σε παρένθεση αναφέρεται η ακριβής τιμή της παραμέτρου (σε kbps) που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση	51
Διάγραμμα 13. TCP πηγές με διαφορετικό μέγεθος πακέτου και αριθμό ροών στα aggregates. Απόδοση των αλγορίθμων με βέλτιστη τιμή της παραμέτρου, και με την θεωρητικά υπολογισμένη Fair Share τιμή. Σε παρένθεση αναφέρεται η ακριβής τιμή της παραμέτρου (σε kbps) που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση	52
Διάγραμμα 14. Αλληλεπίδραση UDP και TCP πηγών. Απόδοση των αλγορίθμων με βέλτιστη τιμή της παραμέτρου, και με την θεωρητικά υπολογισμένη Fair Share τιμή. Σε παρένθεση αναφέρεται η ακριβής τιμή της παραμέτρου (σε kbps) που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση.....	53
Διάγραμμα 15. Ευαισθησία των αλγορίθμων στο πείραμα των διαφορετικών μεγεθών πακέτου μεταξύ TCP πηγών. Ο αριθμός των πηγών μειώνεται, η τιμή της παραμέτρου, βέλτιστη για δέκα πηγές, παραμένει σταθερή.....	56
Διάγραμμα 16. Ευαισθησία των αλγορίθμων στο πείραμα των διαφορετικών ρυθμών αποστολής μεταξύ UDP πηγών. Ο αριθμός των πηγών μειώνεται, η τιμή της παραμέτρου, βέλτιστη για δέκα πηγές, παραμένει σταθερή.....	57
Διάγραμμα 17. Ισότητα που επιτυγχάνουν οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος σε 4 διαφορετικές επιλογές RIO παραμέτρων	61
Διάγραμμα 18. Utilization με τους προσαρμόσιμους αλγορίθμους μαρκαρίσματος σε 4 διαφορετικές επιλογές RIO παραμέτρων	62
Διάγραμμα 19. TCP πηγές με διαφορετικά Target Rates. 5 πηγές με Target Rate 100kbps και 5 πηγές με Target Rate 700kbps. Απόδοση των αλγορίθμων με βέλτιστη τιμή της παραμέτρου, και με την θεωρητική αναμενόμενη τιμή. Σε	

παρένθεση αναφέρεται η ακριβής τιμή της παραμέτρου (καθαρός αριθμός, χωρίς μονάδες) που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση	67
Διάγραμμα 20. TCP πηγές με διαφορετικά Target Rates. 5 πηγές με Target Rate 10kbps και 5 πηγές με Target Rate 490kbps. Απόδοση των αλγορίθμων με βέλτιστη τιμή της παραμέτρου, και με την θεωρητική αναμενόμενη τιμή. Σε παρένθεση αναφέρεται η ακριβής τιμή της παραμέτρου (καθαρός αριθμός, χωρίς μονάδες) που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση	68
Διάγραμμα 21. TCP πηγές με διαφορετικά Target Rates σε over-subscribed δίκτυο. 5 πηγές με Target Rate 500kbps και 5 πηγές με Target Rate 1500kbps. Απόδοση των αλγορίθμων με βέλτιστη τιμή της παραμέτρου, και με την θεωρητική αναμενόμενη τιμή. Σε παρένθεση αναφέρεται η ακριβής τιμή της παραμέτρου (καθαρός αριθμός, χωρίς μονάδες) που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση	69
Διάγραμμα 22. Ισότητα μεταξύ TCP πηγών με διαφορετικό μέγεθος πακέτου. Δύο ομάδες πηγών μεταξύ των οποίων επιζητείται ισότητα, μια ομάδα 3 πηγών που διεκδικούν 1190kbps η καθεμιά, και μια ομάδα 7 πηγών που διεκδικούν 714kbps η καθεμιά.	73

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Επιλογή RIO παραμέτρων.....	37
Πίνακας 2. Επιτυγχανόμενη ισότητα και ποσοστό εκμετάλλευσης (%) δικτυακής χωρητικότητας στο σενάριο των διαφορετικών μεγεθών πακέτου μεταξύ TCP πηγών.....	59
Πίνακας 3. Τέσσερα διαφορετικά σύνολα RIO παραμέτρων (RIO-A, RIO-B, RIO-C και RIO-D) που εξετάστηκαν στο πείραμα των διαφορετικών μεγεθών πακέτου μεταξύ TCP πηγών.....	60
Πίνακας 4. Utilization που επιτυγχάνεται με κάθε επιλογή παραμέτρου (h) των προσαρμόσιμων συναρτήσεων μαρκαρίσματος, στις τέσσερις περιπτώσεις διαφορετικών επιλογών RIO παραμέτρων – σε παρένθεση η μέτρηση με βέλτιστη τιμή παραμέτρου (h).....	62

1 Εισαγωγή

Η παροχή ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS), δηλαδή η παροχή κάποιου είδους εγγυήσεων όσο αφορά την ποιότητα της εξυπηρέτησης της κίνησης εκφρασμένη συνήθως σε παραμέτρους διαπερατότητας (throughput) καθυστέρησης (delay) μεταβλητότητα καθυστέρησης (delay jitter) πιθανότητα απώλειας πακέτων (packet loss probability) κ.α., σε IP δίκτυα, αποτελεί ένα πρόβλημα που έχει προκαλέσει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Μεταξύ των διαφόρων λύσεων που έχουν προταθεί για αυτό το ζήτημα, η αρχιτεκτονική των διαφοροποιημένων υπηρεσιών (Differentiated Services – DiffServ ή DS) έχει συγκεντρώσει ίσως την μεγαλύτερη προσοχή, προτείνοντας ένα μικρό (αλλά αποτελεσματικό) σύνολο από υπηρεσίες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας απ’ άκρη σ’ άκρη πάνω από το Internet ή άλλα IP δίκτυα. Λόγω της απλότητας και της επεκτασιμότητας που προσφέρει αυτό το μοντέλο υπηρεσιών, φαίνεται να αποτελεί προτιμότερη λύση σε σχέση με άλλα ανάλογα μοντέλα που κατά καιρούς έχουν προταθεί.

Κατά βάση, η DiffServ αρχιτεκτονική προτείνει δύο επιπρόσθετα μοντέλα εξυπηρέτησης πακέτων στο δίκτυο (Per-Hop Behaviors – PHBs) πέραν του βασικού best-effort μηχανισμού που υλοποιείται στο σημερινό Internet, και ο οποίος δεν προσφέρει τη δυνατότητα παροχής ποιότητας υπηρεσίας. Οι δυο αυτές PHBs που ορίζονται στο DiffServ μοντέλο, είναι οι *Expedited Forwarding* (EF) και *Assured Forwarding* (AF) [12] PHBs. Η EF PHB χρησιμοποιείται για την προσφορά υπηρεσιών σε εφαρμογές που απαιτούν μικρές καθυστερήσεις, μικρή μεταβλητότητα καθυστέρησης, χαμηλό ρυθμό απώλειας πακέτων και εγγυημένη ποσότητα εύρους ζώνης (bandwidth) όπως οι υπηρεσίες τύπου Virtual Leased Line (VLL). Από την άλλη η AF PHB χρησιμοποιείται για την προσφορά πιο “ελαστικών” υπηρεσιών σε εφαρμογές που έχουν απαιτήσεις μόνο σε διαπερατότητα, και δεν έχουν απαιτήσεις σε καθυστέρηση ή jitter.

Η ιδέα που προτείνεται για την υλοποίηση της AF PHB είναι η διαφοροποίηση των πακέτων, ανάλογα με το κατά πόσο ο ρυθμός αποστολής τους συμμορφώνεται σε κάποιες παραμέτρους που ορίζει το συμβόλαιο (Service Level Agreement – SLA) που συνάπτει ο πελάτης / εφαρμογή με τον διαχειριστή του DiffServ δικτύου, σχετικά με την κίνηση που επιθυμεί να εισάγει ο πελάτης και την εξυπηρέτηση που επιθυμεί να λάβει από το δίκτυο. Στις περιπτώσεις των εφαρμογών που ζητάνε υπηρεσίες τύπου AF, τα SLAs ορίζουν συνήθως κάποια τιμή για τη διαπερατότητα (throughput) της κίνησης, η οποία ορίζει ένα κάτω φράγμα για το throughput που το δίκτυο οφείλει να παρέχει στην εφαρμογή. Η τιμή αυτή, επιλέγεται με βάση τον μέσο ρυθμό αποστολής δεδομένων που επιθυμεί να επιτύχει η εφαρμογή για την κίνηση που δημιουργεί, και αναφέρεται συνήθως ως ρυθμός “στόχος” ή Target Rate. Κίνηση που εισάγεται από την εφαρμογή με ρυθμό μικρότερο ή ίσο με το Target Rate της θεωρείται συμμορφούμενη στο συμβόλαιό της και προστατεύεται (με τρόπο που εξηγείται παρακάτω) από την παρουσία τυχόν μη συμμορφούμενης κίνησης, λαμβάνοντας με αυτόν τον τρόπο την προβλεπόμενη από το συμβόλαιο εξυπηρέτηση.

Τα πακέτα λοιπόν των διαφόρων εφαρμογών που επιθυμούν να λάβουν υπηρεσίες τύπου AF, μαρκάρονται διαφορετικά ανάλογα με το κατά πόσο συμμορφώνονται στις παραμέτρους του συμβολαίου τους – η οποία συμμόρφωση συνήθως μεταφράζεται στο κατά πόσο ο ρυθμός αποστολής τους υπερβαίνει το προβλεπόμενο Target Rate. Πακέτα που συμμορφώνονται ονομάζονται συνήθως *in-*

profile (IN) ενώ τα πακέτα που δεν συμμορφώνονται ονομάζονται *out-of-profile* (OUT). IN πακέτα, και OUT πακέτα “μαρκάρονται” διαφορετικά (η διαδικασία του μαρκαρίσματος προβλέπει την ανάθεση κάποιας κωδικής τιμής στο πεδίο *Type of Service* (TOS) στην επικεφαλίδα των IP πακέτων. Έτσι διαφορετική τιμή του πεδίου TOS συνιστά και διαφορετικό μαρκαρίσμα). Με τη χρήση κατάλληλου μηχανισμού απόρριψης κίνησης (π.χ RIO [8]), σε περιόδους συμφόρησης τα OUT πακέτα απορρίπτονται με μεγαλύτερη πιθανότητα από ότι τα IN πακέτα. Σαν αποτέλεσμα του γεγονότος αυτού, τα IN πακέτα “προστατεύονται” από την παρουσία των OUT πακέτων, προσφέροντας έτσι στις διάφορες εφαρμογές το εύρος ζώνης που απαιτούν μη επιτρέποντας σε κάποιες άλλες να καταναλώνουν επιπλέον εύρος ζώνης εις βάρος τους.

1.1 Περιγραφή Προβλήματος

Σε DiffServ δίκτυα που προσφέρουν υπηρεσίες τύπου AF, πέρα από το ζήτημα της παροχής στις εφαρμογές της δυνατότητας να επιτύχουν τους ρυθμούς αποστολής που αναγράφονται στο συμβόλαιό τους, προκύπτουν και ορισμένα άλλα ζητήματα που χρίζουν διερεύνησης.

Ένα από αυτά είναι το ζήτημα της διαμοίρασης της επιπλέον διαθέσιμης χωρητικότητας του δικτύου. Πέρα από τη δυνατότητα που έχει το δίκτυο να εξυπηρετήσει το σύνολο των Target Rates των πελατών του, συχνά υπάρχει η δυνατότητα εξυπηρέτησης επιπλέον κίνησης (τέτοια δίκτυα λέγονται *under-subscribed* ή *over-provisioned*) ή αντ’ αυτού η παροχή στις ήδη υπάρχουσες εφαρμογές της δυνατότητας να στείλουν δεδομένα με ρυθμό μεγαλύτερο από το Target Rate τους. Σε αυτή τη περίπτωση θα ήταν καλό η διαμοίραση αυτής της επιπλέον χωρητικότητας να γίνει με τρόπο δίκαιο μεταξύ των διαφόρων πελατών/εφαρμογών, ειδάλλως υπάρχει η περίπτωση εμφάνισης ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως για παράδειγμα φαινόμενα όπου πελάτες με χαμηλότερα συμβόλαια (και κατά συνέπεια που χρεώνονται πιο φθηνά για τις δικτυακές υπηρεσίες) να επιτυγχάνουν τελικούς ρυθμούς αποστολής υψηλότερους από άλλους πελάτες με υψηλότερα συμβόλαια, πράγμα που αφήνει τους δεύτερους δυσαρεστημένους και αφαιρεί τα κίνητρα από τους πελάτες να συνάπτουν υψηλότερα συμβόλαια.

Ένα άλλο ζήτημα που αξίζει τον κόπο διερεύνησης είναι τι συμβαίνει όταν το δίκτυο (ίσως λόγω κακής διαχείρισης ή βλάβης) αδυνατεί να εξυπηρετήσει το σύνολο των Target Rates των πελατών του (*over-subscribed* ή *under-provisioned* δίκτυα). Και σε αυτήν την περίπτωση θα ήταν καλό να ακολουθηθεί μια στρατηγική δίκαιας υποβάθμισης του throughput όλων των πελατών, αντί να ακολουθηθεί μια στρατηγική η οποία θα οδηγήσει σε καταστάσεις όπου ο βαθμός υποβάθμισης του throughput μεταξύ των διαφόρων εφαρμογών θα είναι διαφορετικός.

Στις συνηθισμένες DiffServ δικτυακές τοπολογίες που προσφέρουν AF υπηρεσίες (metering, marking στην άκρη του δικτύου με κάποιο συνηθισμένο Token Bucket ή TSW αλγόριθμο μαρκαρίσματος, και κάποιο είδος Active Queue Management (AQM) στο κέντρο του δικτύου όπως RED/RIO), παρατηρούνται συχνά τέτοια φαινόμενα ανισότητας μεταξύ των διαφόρων εφαρμογών, τόσο σε περιπτώσεις κατανομής του περισσευούμενου εύρους ζώνης (*excess bandwidth distribution*) σε *under-subscribed* δίκτυα, όσο και σε περιπτώσεις υποβάθμισης του εύρους ζώνης (*throughput degradation*) σε *over-subscribed* δίκτυα. Οι αιτίες των φαινομένων ανισότητας έχουν εντοπιστεί στις διαφορές σε παραμέτρους των πρωτοκόλλων

μεταφοράς (TCP, UDP) ανάμεσα στις διάφορες πηγές κίνησης. Μεταξύ TCP πηγών (που παράγουν aggregates TCP ροών) δημιουργείται ανισότητα λόγω της επιθετικής φύσης του TCP, που τείνει να καταλάβει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της χωρητικότητας του δικτύου, οδηγώντας τις TCP πηγές σε ανταγωνισμό για την κατάληψη ενός μεριδίου αυτής. Διαφορές μεταξύ των TCP πηγών σε παραμέτρους όπως Round Trip Times (RTTs), Target Rates, αριθμός TCP ροών στα aggregates, μέγεθος πακέτου, έκδοση TCP πρωτοκόλλου κ.α. οδηγούν σε άνιση κατανομή της συνολικής δικτυακής χωρητικότητας μεταξύ των πηγών.

Μεταξύ UDP πηγών, διαφορές στους ρυθμούς αποστολής προκαλεί ανάλογα φαινόμενα ανισότητας.

Τέλος, όταν UDP και TCP πηγές ανταγωνίζονται για την κατάληψη δικτυακής χωρητικότητας, ανισότητας προκαλείται προς όφελος των μη-αλληλεπιδραστικών UDP ροών, οι οποίες ευνοούνται καθώς δεν ελαττώνουν τον ρυθμό αποστολής τους σε καταστάσεις συμφόρησης.

1.2 Συνεισφορά παρούσας εργασίας

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων ανισότητας που περιγράψαμε, η παρούσα εργασία προτείνει μηχανισμούς που στηρίζονται στην εφαρμογή προσαρμόσιμων (adaptive) αλγορίθμων μαρκαρίσματος κίνησης στην άκρη του δικτύου. Λέγοντας ότι οι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος προσαρμόζονται, εννοούμε ότι μεταβάλλουν τις τιμές των παραμέτρων τους όταν μεταβάλλεται το μίγμα της κίνησης, έτσι ώστε σε κάθε διαφορετικό μίγμα κίνησης να χρησιμοποιούνται οι παράμετροι που έχουν σαν αποτέλεσμα την βέλτιστη απόδοση του δικτύου, ως προς την ισότητα που επιτυγχάνεται μεταξύ των εκάστοτε πηγών κίνησης. Άλλες αντίστοιχες εργασίες προτείνουν συνήθως στατικούς αλγόριθμους μαρκαρίσματος, συχνά με αμφίβολη αποτελεσματικότητα, αυξημένη πολυπλοκότητα και δυσκολία υλοποίησης. Αντί αυτού, η δική μας εργασία προτείνει μια διαφορετική προσέγγιση με τους προσαρμόσιμους αλγορίθμους μαρκαρίσματος, για την οποία εξετάζουμε επίσης τους τρόπους με τους οποίους μπορεί αυτή να εφαρμοστεί στα σημερινά πραγματικά δίκτυα που προσφέρουν τέτοιου είδους υπηρεσίες, διαπιστώνοντας ότι η χρήση ορισμένων ήδη υπάρχοντων αρχιτεκτονικών και τεχνολογιών (χρήση κεντρικών Bandwidth Broker) μπορούν να βοηθήσουν στην εφαρμογή της ιδέας που προτείνουμε. Επιπλέον μελετάμε ορισμένες επεκτάσεις των δικτυακών μοντέλων σε πιο πολύπλοκα από αυτά που εξετάζουν άλλες αντίστοιχες μελέτες που ασχολούνται με την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων, και παρατηρούμε ότι οι λύσεις που προτείνουμε μπορούν να εφαρμοστούν και σε αυτά τα επεκταμένα δίκτυα με μικρές τροποποιήσεις δίνοντας εξίσου καλά αποτελέσματα.

Η εργασία επικεντρώνεται στα ζητήματα ισότητας, εξετάζοντας διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους αυτή ορίζεται και μπορεί να εφαρμοστεί στα δικτυακά συστήματα που εξετάζουμε. Συγκεκριμένα εξετάζονται δύο διαφορετικά μοντέλα δίκαιης διαμοίρασης πόρων: 1) ισόποση διαμοίραση (τύπου max-min fairness) και 2) διαμοίραση αναλογική στα Target Rate των πηγών. Για αυτούς τους διαφορετικούς τρόπους δίκαιης διαμοίρασης, εξετάζονται και προτείνονται διαφορετικές αλγοριθμικές λύσεις.

Η αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων λύσεων επιβεβαιώνεται μέσω προσομοιώσεων σε διάφορα σενάρια κίνησης στα οποία παρατηρούνται φαινόμενα ανισότητας όταν χρησιμοποιούνται οι συνηθισμένοι μηχανισμοί παροχής υπηρεσιών τύπου Assured Forwarding.

2 Αρχιτεκτονική Differentiated Services (DiffServ)

2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Η αρχιτεκτονική υπηρεσιών Differentiated Services (DiffServ) παρέχει ένα περιβάλλον στο οποίο οι παροχείς δικτύων μπορούν να προσφέρουν στους πελάτες τους ένα εύρος υπηρεσιών που διαφοροποιούνται ως προς την ποιότητα και την χρέωσή τους. Μετά από μια αίτηση παροχής ποιότητας υπηρεσίας σε μια ροή κίνησης ενός χρήστη, τα πακέτα των ροών του 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 ορίζεται από τον 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).

2.2 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:

- Τον 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.
- Τον μηχανισμό μαρκαρίσματος (Marker) που σημαδεύει τα ασημάδευτα πακέτα (το πεδίο DS) ανάλογα με τη ροή κίνησης στην οποία ανήκουν και την πολιτική εξυπηρέτησης που εφαρμόζει ο διαχειριστής του δικτύου.

- Τον μετρητή κίνησης (Meter) ο οποίος συλλέγει στοιχεία για την κυκλοφορία σε κάθε PHB και άλλα στατιστικά στοιχεία για την κίνηση. Οι μετρήσεις που συλλέγονται χρησιμοποιούνται συνήθως σε εκτιμήσεις συμμόρφωσης της κίνησης στις παραμέτρους του SLA της, και εν συνεχεία – και ανάλογα με τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων – σε κατηγοριοποίηση αυτής, σε διάφορες κλάσεις υπηρεσίας.
- Διάφορους άλλους προαιρετικούς μηχανισμούς, μεταξύ των οποίων μηχανισμούς επιλογής της ουράς εξυπηρέτησης όπου θα τοποθετηθεί το πακέτο, μηχανισμούς μορφοποίησης ή απόρριψης (shaping ή dropping) κίνησης προκειμένου αυτή να συμμορφώνεται με τους όρους του SLA της και ανάλογα 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. 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 λειτουργίες εφαρμογής των PHBs στις ομαδοποιημένες ροές κίνησης των πελατών. 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. Όταν ένα πακέτο εξέρχεται από ένα διαχειριζόμενο περιβάλλον δικτύου και εισέρχεται σε ένα άλλο το πεδίο DS της επικεφαλίδας του μπορεί να μαρκαριστεί ξανά και σύμφωνα με το SLA μεταξύ των διαχειριζόμενων δικτύων.

2.3 Per Hop Behaviors (PHBs)

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): Η EF προσφέρει αυστηρές εγγυήσεις σε παραμέτρους όπως εύρος ζώνης (bandwidth), καθυστέρηση (delay) και διακύμανση καθυστέρησης (delay jitter). Η κίνηση συνήθως μορφοποιείται στην είσοδο της PHB, προκειμένου ο ρυθμός της κυκλοφορίας να είναι σταθερός. Με τον τρόπο αυτό, το μήκος των ουρών της EF κίνησης διατηρείται σταθερό και μικρό, και έτσι ο παροχέας δικτύου μπορεί και προσφέρει εγγυήσεις σε παραμέτρους καθυστέρησης.

Η EF εγγυάται μηδενική απώλεια πακέτων για ροές κίνησης που συμμορφώνονται στις παραμέτρους κίνησής τους.

- Assured Forwarding (AF): Η AF προσφέρει πιο “ελαστικές” υπηρεσίες σε εφαρμογές που έχουν απαιτήσεις μόνο σε εύρος ζώνης. Οι εφαρμογές που ζητάνε υπηρεσίες τύπου AF, γνωρίζουν ότι η ποσότητα της χωρητικότητας που θα διατεθεί σε αυτές, δεν είναι απόλυτη και εκ των προτέρων καθορισμένη, αλλά εξαρτάται εν πολλοίς και από την ποσότητα της κίνησης που εισάγει στο δίκτυο το σύνολο των εφαρμογών στο ίδιο χρονικό διάστημα – για αυτό λέμε ότι προσφέρονται ελαστικές υπηρεσίες. Παρότι συχνά αυτή η ελαστικότητα δημιουργεί προβλήματα, όσο αφορά την δυνατότητα εγγύησης στις εφαρμογές κάποιας συγκεκριμένης ποσότητας εύρους ζώνης, είναι περιπτώσεις που αποδεικνύεται πλεονέκτημα, καθώς επιτρέπει στις AF εφαρμογές να επωφελούνται από τυχόν διαθέσιμο επιπλέον εύρος ζώνης του δικτύου.

Από τον IETF έχουν οριστεί τέσσερις διαφορετικές κλάσεις προτεραιότητας (AF1, AF2, AF3, AF4) για γενική χρήση (παραπάνω κλάσεις μπορούν να οριστούν για τοπική χρήση), 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 στη γενική περίπτωση μέχρι δώδεκα τιμές 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. 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.

2.3.1 Assured Forwarding (AF) Per Hop Behavior

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η AF PHB χρησιμοποιείται για την παροχή ελαστικών υπηρεσιών σε εφαρμογές με απαιτήσεις μόνο σε εύρος ζώνης. Στην απλή (και συνηθισμένη) εκδοχή τους, τα SLAs για AF υπηρεσίες που συνάπτουν οι πελάτες με τον διαχειριστή του δικτύου, ορίζουν απλώς μια τιμή για τον ρυθμό με τον οποίο επιθυμούν να εισάγουν κίνηση στο δίκτυο οι εφαρμογές του πελάτη. Η συμφωνία προβλέπει ότι όσο η κίνηση του πελάτη εισάγεται στο δίκτυο με ρυθμό μικρότερο ή ίσο από τον συμφωνηθέντα ρυθμό, θα προστατεύεται και θα διασχίζει το δίκτυο δίχως να απορρίπτεται. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο εγγυάται στον πελάτη μια ελάχιστη τιμή για την διαπερατότητα (throughput) που επιτυγχάνει το σύνολο των ροών του. Η τιμή αυτή του throughput (που ορίζει το συμβόλαιο – SLA) ονομάζεται “ρυθμός στόχος” ή Target Rate.

Παρακάτω περιγράφουμε τους μηχανισμούς και τους τρόπους που αυτοί χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση τέτοιου είδους υπηρεσιών.

2.3.1.1 Μετρητές (Meters) στην AF PHB

Δύο τύποι μετρητών που χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε DiffServ δίκτυα που παρέχουν AF (και όχι μόνο) υπηρεσίες, για την εκτίμηση της συμμόρφωσης της κίνησης σε κάποιο SLA είναι:

- Token Bucket Meters
- Time Sliding Window (TSW) Meters

Οι μετρητές τύπου Token Bucket χρησιμοποιούνται συνήθως όταν ο τύπος της κίνησης του δικτύου έχει εκρηκτική (bursty) φύση, καθώς έχουν τη δυνατότητα να λάβουν υπ’ όψιν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τέτοιου είδους κίνησης. Ορίζονται από δύο παραμέτρους που ονομάζονται Token Rate A, και Bucket Size B. Σε ένα αφαιρετικό μοντέλο για τους Token Bucket μετρητές, ορίζεται ένα “δοχείο” μεγέθους B, που γεμίζει με κουπόνια με ρυθμό A. Η μετάδοση ενός πακέτου αντιστοιχεί σε κάποια ποσότητα κουπονιών τα οποία αφαιρούνται από το δοχείο. Το πακέτο θεωρείται συμμορφούμενο στο συμβόλαιό του, εφ’ όσον υπάρχει στο δοχείο επαρκής αριθμός κουπονιών για την μετάδοσή του. Σε αντίθετη περίπτωση, το πακέτο θεωρείται μη συμμορφούμενο στο συμβόλαιό του. Η παράμετρος A συνήθως τίθεται ίση με τον μέσο ρυθμό αποστολής κίνησης από τον πελάτη, ενώ η κατάλληλη τιμή της παραμέτρου B, η οποία εκφράζει το μέγεθος των bursts κίνησης που επιτρέπεται να εισάγει η εφαρμογή, συχνά δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί

Οι μετρητές τύπου Time Sliding Window (TSW) [8] χρησιμοποιούν ένα μηχανισμό που υπολογίζει το μέσο ρυθμό αποστολής της κίνησης σε κάποιο χρονικό παράθυρο T, το μέγεθος του οποίου εκφράζει το παρελθόν που ο μετρητής λαμβάνει υπ’ όψιν, για τον υπολογισμό του μέσου ρυθμού. Ο ακριβής αλγόριθμος υπολογισμού μέσου ρυθμού αποστολής έχει ως εξής

Αρχικά:

$$\begin{aligned} \text{Win_length} &= \text{μια σταθερά} \\ \text{Avg_rate} &= \text{Target Rate } R \text{ της σύνδεσης} \\ \text{T_front} &= 0 \end{aligned}$$

Με την άφιξη κάθε νέου πακέτου – μεγέθους $Packet_size$, τη χρονική στιγμή now –, έχουμε ανανέωση των TSW μεταβλητών ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Bytes_in_TSW} &= \text{Avg_rate} * \text{Win_length} \\ \text{New_bytes} &= \text{Bytes_in_TSW} + \text{Packet_size} \\ \text{Avg_rate} &= \text{New_bytes} / (\text{now} - \text{T_front} + \text{Win_length}) \\ \text{T_front} &= \text{now} \end{aligned}$$

Η τιμή της μεταβλητής *Avg_rate* δίνει τον υπολογισμό για τον μέσο ρυθμό αποστολής της κίνησης μιας σύνδεσης, και η σύγκριση αυτής με το Target Rate τους, δείχνει το κατά πόσο τα πακέτα συμμορφώνονται στις παραμέτρους του SLA τους.

Μελέτες [13], έχουν δείξει ότι η χρήση Token Bucket μετρητών σε ορισμένους τύπους κίνησης (π.χ TCP), εμφανίζει προβλήματα για ορισμένες επιλογές τιμών των Token Bucket παραμέτρων, εμφανίζοντας φαινόμενα όπου εφαρμογές δεν καταφέρνουν να επιτύχουν επιδόσεις σε throughput ανάλογα υψηλές του Target Rate τους. Για το λόγο αυτό οι TSW μετρητές φαίνεται να συγκεντρώνουν περισσότερη προσοχή και να χρησιμοποιούνται ευρύτερα.

2.3.1.2 Μηχανισμοί μαρκαρίσματος κίνησης

Ανάλογα με τον έλεγχο συμμόρφωσης που πραγματοποιείται από τους μηχανισμούς metering στους δρομολογητές εισόδου του δικτύου, τα πακέτα μαρκάρονται με διαφορετικές κωδικές τιμές που υποδεικνύουν το επίπεδο συμμόρφωσής τους στις παραμέτρους του συμβολαίου τους, και τα αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλάσεις κίνησης.

Εφ' όσον ο μηχανισμός metering υποδείξει ότι κάποιο πακέτο είναι μη συμμορφούμενο, ο μηχανισμός μαρκαρίσματος καλείται να πάρει μια απόφαση για την κλάση κίνησης που θα το κατατάξει. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος με τον οποίο λαμβάνονται τέτοιες αποφάσεις είναι ο πιθανοκρατικός, ο οποίος λειτουργεί με το να μαρκάρονται τα μη συμμορφούμενα πακέτα με τιμή που τα αντιστοιχεί σε κλάσεις κατώτερης εξυπηρέτησης, με μια πιθανότητα η οποία αυξάνει όσο μεγαλύτερο είναι το επίπεδο μη συμμόρφωσης της κίνησης. Όταν υπάρχουν δύο κλάσεις κίνησης (μια για συμμορφούμενα και μια για μη συμμορφούμενα πακέτα) και η συμμόρφωση ορίζεται ως ρυθμός αποστολής που δεν υπερβαίνει το Target Rate, τότε όταν εμφανίζονται μη συμμορφούμενα πακέτα (με ρυθμό αποστολής μεγαλύτερο του Target Rate) ο μηχανισμός μαρκαρίσματος θα τα κατατάξει στην κλάση μη συμμορφούμενων πακέτων, με μια πιθανότητα, η οποία μεταξύ μη συμμορφούμενων πακέτων είναι μεγαλύτερη για αυτά που ο ρυθμός αποστολής τους υπερβαίνει περισσότερο το Target Rate τους.

Ο μηχανισμός μαρκαρίσματος [8] που έχει προταθεί για χρήση με τον TSW μετρητή που περιγράψαμε παραπάνω δουλεύει ως εξής. Με την άφιξη ενός πακέτου, ο TSW μετρητής υπολογίζει ένα μέσο ρυθμό αποστολής με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω. Αν αυτός ο ρυθμός υπερβαίνει το Target Rate που έχει οριστεί για την εφαρμογή που ανήκει το πακέτο, τότε το πακέτο μαρκάρεται σαν μη συμμορφούμενο με πιθανότητα:

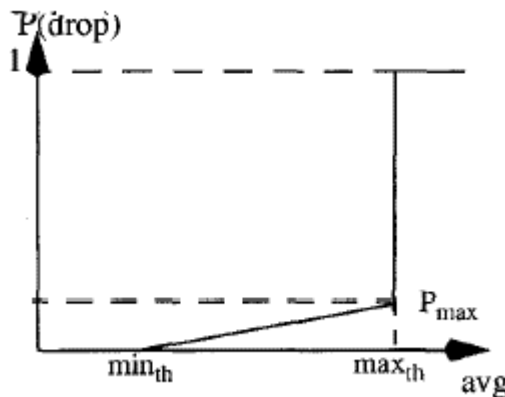
$$P_{TSW2CM}(\text{avg rate}) = \frac{\text{avg rate} - \text{Target Rate}}{\text{avg rate}} \quad (1)$$

όπου “avg rate” είναι ο μέσος ρυθμός που υπολογίζει ο TSW μετρητής. Όσο περισσότερο το “avg rate” υπερβαίνει το Target Rate, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα μαρκαρίσματος του πακέτου σαν μη συμμορφούμενο. Όταν ο μετρούμενος μέσος ρυθμός δεν υπερβαίνει το Target Rate, τα πακέτα μαρκάρονται πάντα με την κωδική τιμή που τα κατατάσσει στην κλάση συμμορφούμενων πακέτων. Ο μετρητής αυτός που μαρκάρει τα πακέτα με δύο “χρώματα” (IN και OUT) ονομάζεται **TSW 2 Color Marker (TSW2CM)**.

2.3.1.3 Πολιτική απόρριψης πακέτων Random Early Detection (RED)

Ο μηχανισμός Random Early Detection για απόρριψη πακέτων, αποτελεί ένα τρόπο υλοποίησης της γενικότερης ιδέας που ονομάζεται Active Queue Management (AQM) και η οποία προτείνει την ενημέρωση των αποστολέων κίνησης για επερχόμενη συμφόρηση (congestion) σε κάποιο δικτυακό κόμβο, πριν οι ενταμιευτές του κόμβου υπερχειλίσουν (buffer overflow), στοχεύοντας έτσι στην πρόβλεψη και αντιμετώπιση καταστάσεων συμφόρησης πριν αυτές ουσιαστικά συμβούν.

Δρομολογητές που χρησιμοποιούν RED ουρές λειτουργούν ως εξής. Υπολογίζεται ένα μέσο μέγεθος για κάθε ουρά (Average Queue Size) και όταν αυτό ξεπεράσει κάποια τιμή κατώφλι (threshold value - min_{th}), τα επερχόμενα πακέτα απορρίπτονται με μια πιθανότητα γραμμικά αυξανόμενη με το μέγεθος της ουράς. Αν επιπλέον το μέσο μέγεθος ουράς ξεπεράσει και μια δεύτερη τιμή (max_{th}) τότε όλα τα επερχόμενα πακέτα απορρίπτονται (η πιθανότητα απόρριψης ισούται με 1). Το παρακάτω σχήμα δείχνει την πιθανότητα απόρριψης μιας RED ουράς σε συνάρτηση με το μέσο μέγεθός της.



Σχ. 1 Πιθανότητα απόρριψης RED ουράς συναρτήσει του μέσου μεγέθους της

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, ορίζονται 3 παράμετροι σε μια RED ουρά, min_{th} , max_{th} , P_{max} . Ο οριζόντιος άξονας δείχνει το μέσο μέγεθος της ουράς, και ο κάθετος την πιθανότητα απόρριψης πακέτων. Όσο το μέσο μέγεθος ουράς παραμένει μικρότερο από την τιμή min_{th} κανένα πακέτο δεν απορρίπτεται. Για μέσο μέγεθος ουράς μεταξύ min_{th} και max_{th} η πιθανότητα απόρριψης πακέτων αυξάνει γραμμικά με το μέσο μέγεθος της ουράς μεταξύ των τιμών 0 και P_{max} . Όταν το μέσο μέγεθος ουράς είναι μεγαλύτερο από την τιμή max_{th} , όλα τα πακέτα απορρίπτονται (η πιθανότητα απόρριψης είναι 1).

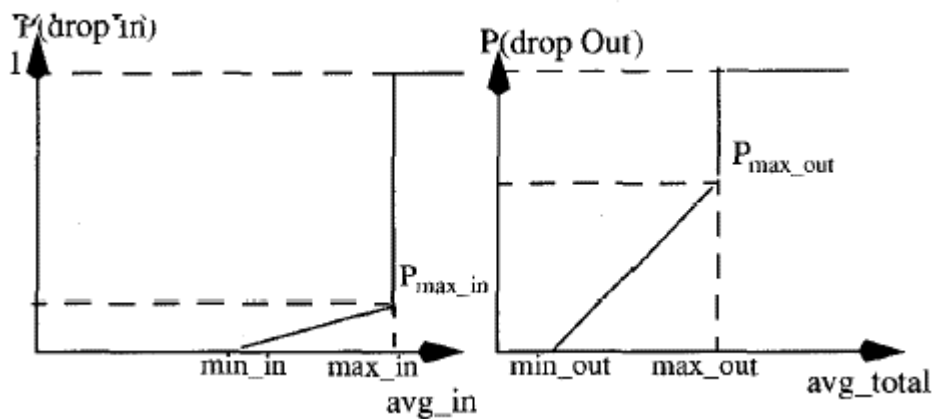
Έχειδειχτεί ότι δρομολογητές που χρησιμοποιούν RED ουρές διατηρούν σε υψηλά επίπεδα το συνολικό throughput, κρατώντας ταυτόχρονα σε χαμηλά επίπεδα το μέσο μέγεθος των ουρών τους. Επιπλέον, έχειδειχτεί ότι η απόδοσή τους δεν επηρεάζεται σε καταστάσεις παροδικής συμφόρησης (transient congestion).

Ο απλός αυτός RED μηχανισμός που περιγράφηκε, χρησιμοποιείται ως βάση για την κατασκευή πιο πολύπλοκων μηχανισμών που μπορούν να προσφέρουν διαφοροποιημένες υπηρεσίες τύπου AF, σε διάφορες κλάσεις κίνησης, δίνοντας διαφορετική πιθανότητα απόρριψης πακέτων σε καθεμιά.

Ένας τέτοιος, ευρέως χρησιμοποιημένος μηχανισμός είναι ο μηχανισμός RIO [8], τα αρχικά του οποίου σημαίνουν RED with In and Out bit. Χρησιμοποιεί τον ίδιο

μηχανισμό με τον RED, αλλά ορίζεται με δύο διαφορετικά σύνολα RED παραμέτρων, ένα σύνολο για πακέτα μαρκαρισμένα σαν *IN* (ή αλλιώς της κλάσης *IN*), και ένα άλλο σύνολο για πακέτα μαρκαρισμένα σαν *OUT* (της κλάσης *OUT*). Με την άφιξη ενός πακέτου, ο δρομολογητής ελέγχει αν είναι μαρκαρισμένο σαν *IN* ή *OUT*. Αν είναι *IN* πακέτο, ο δρομολογητής υπολογίζει το μέσο μέγεθος ουράς για *IN* πακέτα avg_IN . Αν το πακέτο είναι μαρκαρισμένο σαν *OUT* ο δρομολογητής υπολογίζει το μέσο μέγεθος ουράς για όλα τα πακέτα (*IN* και *OUT*) avg_total . Η πιθανότητα απόρριψης *IN* πακέτων εξαρτάται μόνο από το μέσο μέγεθος ουράς των *IN* πακέτων avg_IN , ενώ για τα *OUT* πακέτα εξαρτάται από το μέσο μέγεθος ουράς όλων των πακέτων avg_total .

Με τη χρήση των δύο διαφορετικών συνόλων RED παραμέτρων όπως περιγράφηκε παραπάνω, μπορούν να προσφερθούν εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας τύπου AF διαχωρίζοντας την κίνηση στις κλάσεις *IN* και *OUT*, και προστατεύοντας τα πακέτα της κλάσης *IN* από την παρουσία των πακέτων της κλάσης *OUT*, όπως θα εξηγηθεί καλύτερα στην επόμενη παράγραφο. Το σχ. 2 δείχνει τις αντίστοιχες συναρτήσεις απόρριψης του RIO μηχανισμού



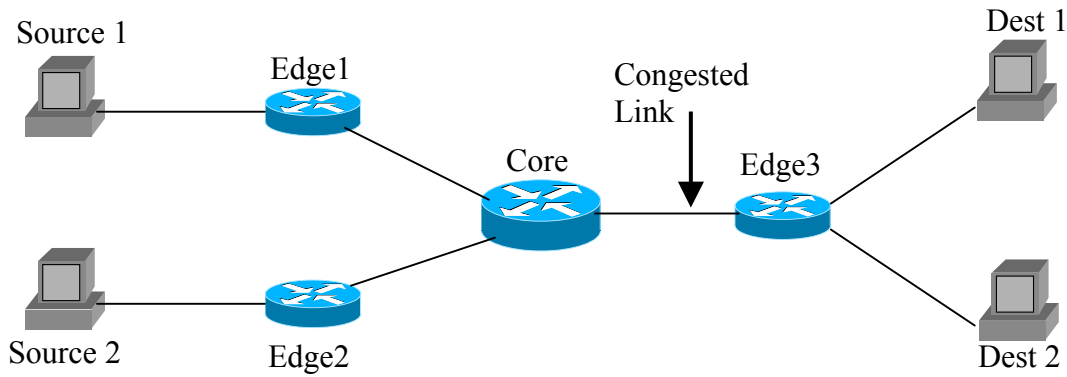
Σχ. 2 Πιθανότητα απόρριψης in και out πακέτων στον RIO μηχανισμό

Όπως δείχνει το σχήμα, ορίζεται ένα σύνολο RED παραμέτρων για τα *IN* πακέτα (min_in , max_in , P_{max_in}) και ένα σύνολο για τα *OUT* πακέτα (min_out , max_out , P_{max_out}) επιλεγμένα με τρόπο κατάλληλο ώστε τα *IN* πακέτα να λαμβάνουν καλύτερη εξυπηρέτηση από τα *OUT*.

Άλλοι ανάλογοι μηχανισμοί έχουν κατά καιρούς προταθεί, εισάγοντας της χρήση μεγαλύτερου αριθμού συνόλων RED παραμέτρων που διαχωρίζουν την κίνηση σε περισσότερες από δύο κλάσεις, και ονομάζονται γενικά μηχανισμοί Multi-RED ή M-RED.

2.3.1.4 Υλοποίηση υπηρεσιών τύπου AF

Το σχήμα 3 δείχνει μια συνηθισμένη DiffServ δικτυακή τοπολογία, που υλοποιεί τους μηχανισμούς που απαιτούνται για την παροχή AF υπηρεσιών.



Σχ. 3 Απλό DiffServ δίκτυο

Δύο χρήστες / πελάτες συνάπτουν με το διαχειριστή του δικτύου συμβόλαια/SLAs για την εξυπηρέτηση της κίνησης που στέλνουν οι κόμβοι Source1 και Source2, προς τους κόμβους Dest1 και Dest2 αντίστοιχα. Οι δύο χρήστες ανταγωνίζονται για την κατάληψη όσο το δυνατόν περισσότερων δικτυακών πόρων (στην προκειμένη περίπτωση για κατάληψη της χωρητικότητας του μοναδικού συμφορημένου συνδέσμου μεταξύ των δρομολογητών 'Core' και 'Edge3').

Τα πακέτα των διαφόρων ροών κίνησης των πελατών του δικτύου μαρκάρονται στις άκρες του δικτύου (δρομολογητές Edge1 και Edge2) με διαφορετική κωδική τιμή, ανάλογα με το αν ο ρυθμός με τον οποίο εισάγονται στο δίκτυο υπερβαίνει το Target Rate τους, ανάλογα δηλαδή με το αν συμμορφώνονται ή όχι στο συμβόλαιο/SLA που τους αντιστοιχεί. Πακέτα συμμορφούμενα, που ο ρυθμός τους δεν υπερβαίνει το Target Rate τους μαρκάρονται κατά την είσοδό τους στο δίκτυο με μια κωδική τιμή που δηλώνει ότι είναι *in-profile* (IN), ενώ πακέτα που ο ρυθμός τους υπερβαίνει το Target Rate τους μαρκάρονται με διαφορετική κωδική τιμή που δηλώνει ότι πρόκειται για πακέτα *out-of-profile* (OUT).

Στο κέντρο του δικτύου (δρομολογητής Core) τα πακέτα που ανήκουν στην ίδια AF κλάση εισέρχονται σε μια μοναδική ουρά, στην οποία χρησιμοποιείται ο RIO μηχανισμός απόρριψης πακέτων με δύο διαφορετικά σύνολα RED παραμέτρων για IN και OUT πακέτα όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Η επιλογή των RIO παραμέτρων, γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε τα OUT πακέτα να απορρίπτονται με μεγαλύτερη πιθανότητα από τα IN, και μάλιστα με τρόπο ώστε να μην απορρίπτονται IN πακέτα, προτού απορριφθούν όλα τα OUT. Αυτό επιτυγχάνεται με τον εξής τρόπο. Θεωρώντας τα σύνολα RED παραμέτρων (min_in , max_in , $Pmax_in$) και (min_out , max_out , $Pmax_out$) για IN και OUT πακέτα αντίστοιχα, επιλέγουμε γενικά τις τιμές ως εξής

- Τιμή για το min_out μικρότερη από την τιμή του min_in προκειμένου να απορρίπτονται τα OUT πακέτα νωρίτερα από τα IN.
- Τιμή για το $Pmax_out$ μεγαλύτερη από την τιμή του $Pmax_in$, προκειμένου τα OUT πακέτα να απορρίπτονται με μεγαλύτερη πιθανότητα από τα IN πακέτα όταν τα μέση μεγέθη των ουρών βρίσκονται μεταξύ των threshold τιμών min και max .
- Τιμή για το max_out αρκετά μικρότερη από την τιμή max_in , προκειμένου να φτάνει στην κατάσταση απόρριψης όλων των OUT πακέτων πολύ νωρίτερα από την κατάσταση απόρριψης των IN πακέτων

Γενικά ο RIO μηχανισμός ξεκινάει να απορρίπτει OUT πακέτα όταν συναισθάνεται επερχόμενη συμφόρηση και αν η συμφόρηση επιμείνει απορρίπτει όλα τα OUT πακέτα. Σαν τελευταία λύση, και μόνο εφόσον ο δρομολογητής πλημμυρίσει με IN πακέτα (σε well-provisioned δίκτυα, με χωρητικότητα δηλαδή αρκετή για την εξυπηρέτηση του συνόλου των SLAs του, κάτι τέτοιο δεν πρέπει να συμβαίνει) απορρίπτει IN πακέτα προκειμένου να ελέγξει την συμφόρηση.

Έτσι, με τέτοια χρήση του RIO μηχανισμού, τα IN πακέτα που εκφράζουν τα πακέτα που συμμορφώνονται στο SLA που τους αντιστοιχεί (έχουν ρυθμό αποστολής μικρότερο ή ίσο του Target Rate τους), προστατεύονται από την παρουσία μη-συμμορφούμενων OUT πακέτων. Έτσι, τουλάχιστον όταν το δίκτυο έχει αρκετή χωρητικότητα για την εξυπηρέτηση του συνόλου των πελατών του, όλες οι εφαρμογές έχουν την εγγύηση από το δίκτυο ότι θα επιτύχουν επιδόσεις σε throughput κατά την αποστολή των δεδομένων τους τουλάχιστον ίσες με την τιμή του Target Rate τους, πράγμα που προσφέρει τις απαιτούμενες εγγυήσεις εύρους ζώνης και επιτυγχάνει τον στόχο των διαχειριστών δικτύου που προσφέρουν υπηρεσίες τύπου Assured Forwarding.

2.3.1.5 Αδυναμίες των υπαρχόντων AF τεχνολογιών

Είδαμε με ποιο τρόπο και ποιους μηχανισμούς οι διαχειριστές DiffServ δικτύων προσφέρουν υπηρεσίες τύπου AF, καταφέροντας να εγγυηθούν ότι όλοι πελάτες τους, εφ' όσον το δίκτυο έχει αρκετή χωρητικότητα, θα επιτύχουν επιδόσεις σε throughput κατά την αποστολή των δεδομένων τους τουλάχιστον ίσες με το Target Rate τους. Πέρα όμως από την εγγύηση μιας ελάχιστης ποσότητας εύρους ζώνης, υπάρχουν και ορισμένα άλλα ζητήματα που πρέπει να απασχολούν του διαχειριστές δικτύων που προσφέρουν υπηρεσίες AF.

Ένα τέτοιο ζήτημα είναι ο τρόπος εκμετάλλευσης του περισσευόμενου εύρους ζώνης του δικτύου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι διαχειριστές των δικτύων φροντίζουν ώστε το δίκτυο να είναι under-subscribed, φροντίζουν δηλαδή ώστε η συνολική χωρητικότητα του δικτύου να είναι μεγαλύτερη από αυτήν που απαιτείται για την εξυπηρέτηση του συνόλου των SLAs στο domain τους. Περισεύει έτσι ένα κομμάτι της χωρητικότητας του δικτύου, το οποίο δεν χρειάζεται να μένει αχρησιμοποίητο, αλλά μπορεί να δοθεί προς διάθεση στους πελάτες του δικτύου, δίνοντάς τους έτσι την δυνατότητα να επιτύχουν υψηλότερους ρυθμούς αποστολής από το Target Rate τους. Σε αυτή την περίπτωση είναι σημαντικό, ιδιαίτερα όταν η ποσότητα της διαθέσιμης χωρητικότητας είναι μεγάλη, η διαμοίραση της χωρητικότητας αυτής μεταξύ των διαφόρων πελατών να γίνει με τρόπο δίκαιο. Σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει φόβος να εμφανιστούν ανεπιθύμητα φαινόμενα, όπως εφαρμογές με χαμηλότερα (και κατά συνέπεια φτηνότερα) συμβόλαια να επιτυγχάνουν υψηλότερους τελικούς ρυθμούς αποστολής από άλλες εφαρμογές με υψηλότερα συμβόλαια. Κάτι τέτοιο είναι προφανές ότι αφήνει ορισμένους πελάτες δυσαρεστημένους και τους στερεί τα κίνητρα για σύναψη υψηλών συμβολαίων.

Ένα άλλο ζήτημα που πρέπει να απασχολεί τους διαχειριστές των δικτύων είναι τι συμβαίνει όταν το δίκτυό τους για κάποιο λόγο (κακή διαχείριση ή βλάβη ίσως) φτάνει σε κατάσταση over-subscribed, όπου η χωρητικότητά του δεν επαρκεί για την εξυπηρέτηση του συνόλου των SLAs του domain του. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι εφαρμογές, όπως είναι λογικό, αδυνατούν να επιτύχουν ρυθμούς αποστολής αντίστοιχα υψηλούς με το Target Rate τους. Σημαντικό σε αυτή τη περίπτωση είναι να υπάρχει μια δίκαιη υποβάθμιση του throughput μεταξύ όλων των πελατών, αντί να εμφανιστούν φαινόμενα όπου ορισμένες εφαρμογές μένουν ανεπηρέαστες και άλλες

υπόκεινται σε μεγάλες υποβαθμίσεις του throughput τους, πράγμα που επίσης προκαλεί τη δυσαρέσκεια ορισμένων πελατών.

Αυτά τα ζητήματα ισότητας σε DiffServ δίκτυα που προσφέρουν υπηρεσίες τύπου AF με τους μηχανισμούς που συζητήσαμε παραπάνω έχουν μελετηθεί, και έχει παρατηρηθεί ότι παρουσιάζονται ευρέως φαινόμενα ανισότητας τόσο όσο αφορά στη διαμοίραση του επιπλέον throughput σε under-subscribed δίκτυα, όσο και στην υποβάθμιση του throughput σε over-subscribed δίκτυα. Η παρούσα εργασία μελετάει και αυτή με τη σειρά της αντίστοιχα φαινόμενα ανισότητες και προτείνει μηχανισμούς που τα αντιμετωπίζουν.

2.3.1.5.1 Θέματα Ισότητας

Η ισότητα, όσο αφορά τη διαμοίραση της δικτυακής χωρητικότητας μεταξύ εφαρμογών που ζητάνε υπηρεσίες τύπου AF, μπορεί να οριστεί ποικιλοτρόπως. Η παρούσα εργασία εξετάζει δύο διαφορετικά μοντέλα δίκαιης κατανομής πόρων.

- Ισόποση διαμοίραση (Max-Min Fairness)

Σε under-subscribed δίκτυα όλες οι εφαρμογές πετυχαίνουν επιδόσεις σε throughput ίση με το Target Rate τους, και το επιπλέον bandwidth του δικτύου διαμοιράζεται εξίσου σε όλες τις εφαρμογές ανεξάρτητα από το Target Rate τους. Σε over-subscribed δίκτυα όλες οι εφαρμογές πετυχαίνουν ρυθμούς αποστολής μειωμένους εξίσου από το Target Rate τους – δηλαδή όλες οι εφαρμογές πετυχαίνουν επιδόσεις σε throughput ίσες με Target Rate + Fair_Share, όπου Fair_Share είναι το μερίδιο του επιπλέον bandwidth ή η υποβάθμιση σε throughput που αντιστοιχεί στις εφαρμογές. Το “δίκαιο μερίδιο” – Fair Share – είναι το ίδιο για όλες τις εφαρμογές και ισούται με

$$\text{Fair Share} = \frac{\text{Capacity} - \sum \text{Target Rates}}{\text{Number of Sources}} \quad (2) \quad , \quad \text{όπου 'Capacity' η}$$

θεωρητική δικτυακή χωρητικότητα, ‘ $\sum \text{Target Rates}$ ’ είναι το άθροισμα των Target Rates των εφαρμογών που εισάγουν κίνηση κάθε στιγμή στο δίκτυο ($\text{Capacity} - \sum \text{Target Rates}$ είναι δηλαδή κάθε στιγμή το περισσευούμενο ή το έλλειμμα σε εύρος ζώνης), και ‘Number_of_Sources’ είναι ο αριθμός των αντίστοιχων εφαρμογών. Ο τύπος του δίκαιου μεριδίου ‘Fair Share’ δείχνει ότι το περίσσευμα ή έλλειμμα του δικτύου σε εύρος ζώνης διαμοιράζεται εξίσου σε όλες τις εφαρμογές, ανεξάρτητα από το Target Rate καθεμιάς.

- Διαμοίραση αναλογική των Target Rates (Proportional Fairness)

Η αναλογική διαμοίραση ορίζει ότι η συνολική δικτυακή χωρητικότητα διαμοιράζεται μεταξύ των διαφόρων εφαρμογών με τρόπο ώστε η κάθε εφαρμογή να λαμβάνει μια ποσότητα δικτυακής χωρητικότητας ανάλογης του Target Rate της. Έτσι ο τρόπος διαμοίρασης του επιπλέον εύρους ζώνης των under-subscribed δικτύων, όπως και η υποβάθμιση του throughput στα over-subscribed δίκτυα γίνεται μεταξύ των εφαρμογών με τρόπο αναλογικό του Target Rate της κάθε μιας, θεωρώντας δηλαδή ότι το Target Rate ορίζει κατά κάποιον τρόπο το “βάρος” της κάθε εφαρμογής σε σχέση με τις

υπόλοιπες και ορίζει την αναλογία του επιπλέον throughput ή της υποβάθμισης του throughput μεταξύ τους (π.χ. Μια εφαρμογή με διπλάσιο Target Rate από μια άλλη, θα λάβει και διπλάσια ποσότητα από το επιπλέον throughput του over-provisioned δικτύου, και θα δεχτεί διπλάσια υποβάθμιση του throughput της στις δύο περιπτώσεις, έτσι ώστε πάντοτε το τελικό της throughput να είναι το διπλάσιο από αυτό της άλλης πηγής). Ο αντίστοιχος τύπος για το δίκαιο μερίδιο των εφαρμογών με κάποιο Target Rate στην αναλογική διαμοίραση είναι:

$$\text{Fair Share} = \frac{\text{Capacity} - \sum \text{Target Rates}}{\sum \text{Target Rates}} * \text{Target Rate} \quad (3), \quad \text{από τον}$$

οποίο προκύπτει ότι το συνολικό throughput που δικαιούται κάθε εφαρμογή $(\text{Target Rate} + \text{Fair Share})$ ισούται με

$$\text{Target Rate} + \text{Fair Share} = \frac{\text{Capacity}}{\sum \text{Target Rates}} * \text{Target Rate} \quad (4). \quad \text{Οι τύποι}$$

δείχνουν ότι τόσο το δίκαιο μερίδιο – Fair Share – όσο και το συνολικό throughput κάθε εφαρμογής είναι ανάλογο του Target Rate της.

2.3.1.5.2 Αιτίες της ανισότητας μεταξύ εφαρμογών που ζητάνε AF υπηρεσίες

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, στα σημερινά DiffServ δίκτυα στα οποία προσφέρονται υπηρεσίες τύπου AF, παρότι παρέχονται κάποιες ελάχιστες εγγυήσεις σε εύρος ζώνης, εμφανίζονται φαινόμενα ανισότητας (με όποιο τρόπο και αν οριστεί η ισότητα στη διαμοίραση πόρων), τα οποία έχουν να κάνουν κυρίως με τη διαμοίραση του περισσευόμενου εύρους ζώνης των δικτύων. Επιπλέον στα over-subscribed δίκτυα η υποβάθμιση του throughput μεταξύ των διαφόρων εφαρμογών των πελατών δεν γίνεται με τρόπο δίκαιο.

Το πρόβλημα αυτό έχει απασχολήσει αρκετές μελέτες ([1],[2]) οι οποίες εξετάζουν τις αιτίες που προκαλούν τα φαινόμενα ανισότητας. Από τις μελέτες αυτές προκύπτει ότι τα φαινόμενα ανισότητας δημιουργούν διαφορές στην επιλογή πρωτοκόλλου επιπέδου μεταφοράς (π.χ. TCP, UDP), ενώ επιπλέον, μεταξύ εφαρμογών που χρησιμοποιούν το ίδιο πρωτόκολλο μεταφοράς, ανισότητα προκαλείται από διαφορές σε παραμέτρους των πρωτοκόλλων αυτών, οι ακριβείς τιμές των οποίων έχουν επίδραση στην εν γένει απόδοση και λειτουργία τους. Συγκεκριμένα οι πιο σημαντικές αιτίες που προκαλούν ανισότητα όπως αυτές έχουν κατά καιρούς παρατηρηθεί συνοψίζονται παρακάτω

- **Συνδυασμός αλληλεπιδραστικών (π.χ. TCP) και μη-αλληλεπιδραστικών (π.χ. UDP) ροών**

Όταν μη-αλληλεπιδραστικές (UDP) ροές ανταγωνίζονται με αλληλεπιδραστικές (TCP) ροές για την κατάληψη δικτυακών πόρων, δημιουργούνται φαινόμενα ανισότητας προς όφελος των μη-αλληλεπιδραστικών ροών, οι οποίες σε καταστάσεις συμφόρησης δεν χαμηλώνουν τον ρυθμό αποστολής τους σε αντίθεση με τις αλληλεπιδραστικές ροές, με αποτέλεσμα οι πρώτες να καταλαμβάνουν μεγαλύτερο κομμάτι δικτυακών πόρων.

- **Διαφορά σε τιμές των TCP παραμέτρων**

Μεταξύ συνόλων TCP ροών (TCP aggregates) που ανταγωνίζονται μεταξύ τους, διαφορές σε τιμές διαφόρων παραμέτρων έχουν ως αποτέλεσμα ορισμένα TCP aggregates να ευνοούνται ως προς την ποιότητα της εξυπηρέτησης που λαμβάνουν, όπως αυτή εκφράζεται σε επιδόσεις throughput, και άλλες να αδικούνται. Οι πιο σημαντικοί από αυτούς τους παράγοντες, όπως έχουν παρατηρηθεί, αναφέρονται παρακάτω:

Round Trip Time (RTT): Το TCP υλοποιεί ένα μηχανισμό sliding window για την αποστολή πακέτων στον οποίο το παράθυρο αυξάνεται με ρυθμό αντιστρόφως ανάλογο του RTT. Έτσι σε over-provisioned δίκτυα παρατηρείται άνιση διαμοίραση του επιπλέον bandwidth προς όφελος των ροών με μικρότερα RTTs, ενώ και σε under-provisioned δίκτυα, οι ροές αυτές παρατηρούν μικρότερη υποβάθμιση στο throughput τους.

Μέγεθος πακέτου: TCP ροές με μεγαλύτερο μέγεθος πακέτου καταναλώνουν μεγαλύτερο ποσοστό από το διαθέσιμο εύρος ζώνης, γιατί το congestion window σε αυτές τις ροές αυξάνει με μεγαλύτερο ρυθμό – αφού κάθε ACK επιβεβαιώνει μεγαλύτερη ποσότητα δεδομένων.

Μέγεθος του Target Rate: Σε under-subscribed δίκτυα όπου το μαρκάρισμα των πακέτων σαν OUT ξεκινάει όταν ο μέσος μετρούμενος ρυθμός ξεπερνάει το Target Rate, πηγές με μικρότερο Target Rate καταναλώνουν μεγαλύτερο ποσοστό του περισσευόμενου εύρους ζώνης γιατί μετά την απώλεια κάποιου πακέτου και την μείωση του congestion window, φτάνουν γρηγορότερα σε ρυθμό αποστολής ίσο με το Target Rate τους, με αποτέλεσμα να εισάγουν μεγαλύτερο αριθμό OUT πακέτων – τα οποία είναι αυτά που καταναλώνουν το περισσευούμενο εύρος ζώνης. Αυτό δεν είναι αποδεκτή λύση, καθώς οι ροές με υψηλό Target Rate (ακριβότερα συμβόλαια/SLAs) περιμένουν να λάβουν αν όχι μεγαλύτερη, τουλάχιστον ίση ποσότητα περισσευόμενου εύρους ζώνης.

Αριθμός ροών ανά aggregate: Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ροών στο aggregate, τόσο μεγαλύτερο ποσοστό δικτυακής χωρητικότητας καταναλώνεται, έτσι μεταξύ πηγών με διαφορετικό αριθμό ροών στα aggregates, δημιουργείται ανισότητα προς όφελος των πηγών με τον μεγαλύτερο αριθμό ροών.

Διαφορές στο TCP stack: Διαφορετικές εκδόσεις του TCP (Reno, Tahoe, SACK, etc) αντιμετωπίζουν με διαφορετικό τρόπο την απώλεια πακέτων. Έτσι χρήστες με διαφορετική έκδοση TCP παρατηρούν διαφορές στο throughput που επιτυγχάνουν.

- **Διαφορές στο ρυθμό αποστολής μεταξύ UDP ροών**

Μεταξύ UDP ροών που ανταγωνίζονται για την κατάληψη μεγαλύτερης ποσότητας εύρους ζώνης, οι ροές με μεγαλύτερο ρυθμό αποστολής πετυχαίνουν και καλύτερη εξυπηρέτηση (καλύτερες επιδόσεις σε throughput) καθώς εισάγουν στο δίκτυο μεγαλύτερη ποσότητα μη-συμμορφούμενων (OUT) πακέτων, καταναλώνοντας έτσι και μεγαλύτερο ποσοστό του περισσευόμενου εύρους ζώνης.

2.4 Ο μεσίτης εύρους ζώνης (Bandwidth Broker)

Η ιδέα του Bandwidth Broker (BB) πρωτοδιατυπώθηκε από τους K. Nichols et al. στο [14] το 1997, σαν την λογική κεντρική 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.

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. Επειδή ο BB μπορεί να αποτελέσει μοναδικό σημείο αποτυχίας λειτουργίας του συστήματος δέσμευσης πόρων, 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.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες υλοποιήσεις Bandwidth Broker οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα σημερινά DiffServ δίκτυα.

3 Προσεγγίσεις του προβλήματος

Αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο τους υπάρχοντες μηχανισμούς για την υλοποίηση AF υπηρεσιών σε DiffServ δίκτυα, οι οποίοι προσφέρουν κάποιες ελάχιστες εγγυήσεις σε εύρος ζώνης στους πελάτες, αλλά δεν εγγυώνται την δίκαιη κατανομή της συνολικής δικτυακής χωρητικότητας μεταξύ των πελατών.

Μελέτες έχουν ασχοληθεί με το πρόβλημα και έχουν εξετάσει τρόπους που θα μπορούσαν να εξομαλύνουν ή και να επιλύσουν το πρόβλημα. Οι κατά καιρούς προτάσεις αφορούν στην αλλαγή των μηχανισμών που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση AF υπηρεσιών (βλ. π. 2.3.1), με αντίστοιχους μηχανισμούς οι οποίοι στοχεύουν να αντιμετωπίσουν τα φαινόμενα ανισότητας. Οι προτεινόμενες λύσεις, ανάλογα με τον μηχανισμό που προτείνουν να αλλαχτεί και το σημείο του δικτύου που αυτοί εφαρμόζονται, χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

3.1 “Έξυπνο” Traffic Conditioning στις άκρες του δικτύου

Αυτή η κατηγορία λύσεων προτείνει αλλαγές σε ορισμένους από τους μηχανισμούς του ελεγκτή κυκλοφορίας (Traffic Conditioner), στους μηχανισμούς δηλαδή κατηγοριοποίησης, μέτρησης, μαρκαρίσματος αστυνόμευσης κ.λ.π. που λαμβάνουν χώρα στους ακραίους δρομολογητές κατά την είσοδο της κίνησης στο δίκτυο. Οι νέοι μηχανισμοί που εισάγονται ονομάζονται “έξυπνοι” με την έννοια ότι αντιλαμβάνονται την ανισότητα και αντιδρούν προσπαθώντας να την αντιμετωπίσουν. Στην πλειοψηφία τους, οι λύσεις αυτής της κατηγορίας προτείνουν νέες τεχνικές και αλγορίθμους μαρκαρίσματος της κίνησης με τρόπο που λαμβάνει υπ’ όψιν τις ιδιαίτερες παραμέτρους του πρωτοκόλλου επιπέδου μεταφοράς (TCP, UDP) που αποτελούν την αιτία των φαινομένων ανισότητας, και μεταβάλλουν τις διάφορες πιθανότητες μαρκαρίσματος των πακέτων σαν συμμορφούμενα και μη-συμμορφούμενα, ανάλογα με το αν η εκάστοτε ροή κίνησης καταναλώνει παραπάνω ή λιγότερους δικτυακούς πόρους από το δίκαιο μερίδιό τους. Συνήθως τα πακέτα των ευνοημένων ροών (δηλαδή των ροών που λαμβάνουν μεγαλύτερο μερίδιο στο bandwidth του δικτύου από ότι τους αναλογεί) μαρκάρονται με μεγαλύτερη πιθανότητα σαν μη συμμορφούμενα, με σκοπό να χαμηλώσουν τις επιδόσεις τους, βοηθώντας ταυτόχρονα τις αδικημένες ροές να ανεβάσουν τις δικές τους. Η αλλαγή των τεχνικών μαρκαρίσματος δείχνει πιο δημοφιλής λύση σε σχέση με την αλλαγή των υπολοίπων αντίστοιχων μηχανισμών (classification, metering κ.λ.π) καθώς φαίνεται ότι αντιμετωπίζει πιο αποτελεσματικά τα φαινόμενα ανισότητας, και ταυτόχρονα είναι (συνήθως) πιο εύκολα υλοποιήσιμες.

3.2 Έλεγχος ροής (flow control) στην άκρη του δικτύου

Οι προσεγγίσεις αυτού του είδους, προτείνουν τον έλεγχο της ποσότητας κίνησης που εισάγεται στο δίκτυο με τη χρήση διαφόρων τεχνικών, με σκοπό να μην επιτρέπουν σε ορισμένες ροές να εισάγουν κίνηση πέρα από αυτή που καταναλώνει τους δικτυακούς πόρους που της αναλογούν. Η επιπλέον κίνηση υπόκειται σε μορφοποίηση (shaping) ή απορρίπτεται στους ακραίους δρομολογητές του δικτύου. Μελέτες που προτείνουν τέτοιου είδους λύσεις [15] δείχνουν ότι επιτυγχάνουν

ικανοποιητικά αποτελέσματα όσο αφορά την τελική επιτυγχανόμενη ισότητα μεταξύ των διαφόρων εφαρμογών, με κόστος όμως την δυσκολία υλοποίησης – απαιτούνται αρκετές αλλαγές στην δικτυακή υποδομή με την εισαγωγή νέων μηχανισμών – , καθώς επίσης και την επιβάρυνση του δικτύου με επιπλέον φόρτο, καθώς απαιτούν την χρήση βοηθητικών ροών κίνησης που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ποσότητας κίνησης που εισάγει κάθε εφαρμογή.

3.3 Αλλαγή της πολιτικής απόρριψης πακέτων στο κέντρο του δικτύου

Προτείνεται η αλλαγή του μηχανισμού απόρριψης, ο οποίος αποτελείται από μια μοναδική RED (ή RIO, M-RED) ουρά και η οποία απορρίπτει πακέτα με πιθανότητα που εξαρτάται από το μήκος της ουράς (βλ. π. 2.3.1.2). Ορισμένες εργασίες [16] προτείνουν την αντ' αυτού χρήση μηχανισμών που ορίζουν διαφορετικές πιθανότητες απόρριψης μεταξύ των διαφόρων εφαρμογών, στοχεύοντας να δώσει μεγαλύτερες πιθανότερες απόρριψης στις εφαρμογές που καταναλώνουν περισσότερους δικτυακούς πόρους από αυτούς που τους αναλογούν, και μικρότερες πιθανότητες απόρριψης στις εφαρμογές που αδικούνται και δεν καταφέρνουν να επωφεληθούν από τους πόρους που τους αντιστοιχούν.

Άλλες (δαπανηρές) προτάσεις εξετάζουν την χρήση περισσότερων ουρών αναμονής (αντί της μοναδικής RED ουράς) στις οποίες θα ανατίθενται (σε κάθε μια ξεχωριστά) τα πακέτα των διαφόρων εφαρμογών. Η εξυπηρέτηση των διαφόρων ουρών θα γίνεται με ένα scheduler τύπου Weighted Fair Queuing (WFQ) στον οποίο τα βάρη της κάθε ουράς θα είναι ανάλογα των Target Rates των αντίστοιχων εφαρμογών. Τέτοιου είδους λύσεις είναι αρκετά αποτελεσματικές, αλλά όπως αναφέραμε είναι ιδιαίτερα δαπανηρές (απαιτούν την χρήση μιας ουράς για κάθε πελάτη / εφαρμογή) και μη επεκτάσιμες. Πέραν αυτών έχουν παρατηρηθεί και άλλα προβλήματα (όπως για παράδειγμα ότι δεν μπορούν να υποστηρίξουν εύκολα συμβόλαια τύπου leaky bucket, και γενικά δεν εξυπηρετούν καλά bursty κίνηση καθώς ο WFQ scheduler έχει την τάση να ομαλοποιεί τα bursts). Για τους λόγους αυτούς, τέτοιου είδους λύσεις δεν συνηθίζουν να εφαρμόζονται.

3.4 Αλλαγές των πρωτοκόλλων επιπέδου μεταφοράς (TCP, UDP)

Ορισμένες εργασίες προτείνουν αλλαγές στα πρωτόκολλα επιπέδου μεταφοράς (TCP, UDP). Στόχος των αλλαγών αποτελεί το να μειωθεί ή και να εξαλειφθεί η επίδραση που έχουν στην απόδοση των πρωτοκόλλων οι διάφοροι παράμετροι που προκαλούν τα φαινόμενα ανισότητας. Προτείνονται έτσι π.χ. αλλαγές στο TCP πρωτόκολλο όπου οι μεταβολές του μεγέθους του congestion window δεν θα εξαρτάται από παράγοντες όπως το RTT και το μέγεθος πακέτου, και ανάλογα για το UDP προτείνεται η χρήση μηχανισμών που θα του δώσει αλληλεπιδραστικό χαρακτήρα και θα υποχρεώνει τις UDP ροές να ελαττώνουν το ρυθμό τους σε καταστάσεις συμφόρησης. Τέτοιες λύσεις αντιμετωπίζουν τα φαινόμενα ανισότητας, εν τούτοις οι ήδη υπάρχουσες μορφές των πρωτοκόλλων είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες από πολλές εφαρμογές και δίκτυα, και η παρούσα εργασία θεωρεί ότι ανάλογες προτάσεις για μετατροπές των πρωτοκόλλων δεν είναι εύκολο να γίνουν ευρέως αποδεκτές και να εφαρμοστούν.

3.5 Επιλογή της παρούσας εργασίας

Η παρούσα εργασία θεωρεί πιο ενδεδειγμένες λύσεις, αυτές της πρώτης κατηγορίας (“Εξυπνο” Traffic Conditioning) και πιο συγκεκριμένα επιλέγει να ασχοληθεί με μηχανισμούς μαρκαρίσματος, θεωρώντας ότι τέτοιου είδους λύσεις είναι (σε σχέση με τις υπόλοιπες λύσεις) πιο εύκολα υλοποιήσιμες σε πραγματικά δίκτυα, δεν απαιτούν σημαντικές μετατροπές στην ήδη υπάρχουσα δικτυακή υποδομή, ενώ ταυτόχρονα δείχνουν να αποτελούν μια επιλογή που μπορεί να οδηγήσει σε αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος της δίκαιης κατανομής της συνολικής δικτυακής χωρητικότητας.

4 Σχετικές Εργασίες

Αρκετές εργασίες έχουν ασχοληθεί με το πρόβλημα της ανισότητας σε DiffServ δίκτυα που προσφέρουν υπηρεσίες AF, ορισμένες εκ των οποίων προτείνουν, όπως και η δική μας εργασία, αλλαγές στους μηχανισμούς μαρκαρίσματος κίνησης στις άκρες του δικτύου. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες από τις πιο σημαντικές εξ αυτών.

4.1 Memory-Based Marker (MBM) [11]

Στην εργασία αυτή, προτείνεται ένας μηχανισμός μαρκαρίσματος που στοχεύει να αντιμετωπίσει την ανισότητα μεταξύ TCP ροών με διαφορετικά RTTs και διαφορετικά μεγέθη παραθύρου. Στόχος της εργασίας είναι επίσης η κατασκευή ενός μηχανισμού που δεν είναι πολύ ευαίσθητος στις δικές του παραμέτρους – οι Token Bucket Traffic Conditioners είναι ευαίσθητοι στην επιλογή των bucket παραμέτρων, ενώ οι TSW Traffic Conditioners είναι ευαίσθητοι στην επιλογή του χρονικού παραθύρου T_w (το παρελθόν που “θυμάται” ο μετρητής). Ο MBM χρησιμοποιεί τον TSW μετρητή για τον υπολογισμό μέσου ρυθμού αποστολής πακέτων, αλλά χρησιμοποιεί διαφορετικό μηχανισμό μαρκαρίσματος, η λειτουργία του οποίου συνοψίζεται παρακάτω.

Με κάθε άφιξη πακέτου:

```
If avg_rate ≤ cir
then
  mp = mp + (1 - avg_rate/cir) + (par - avg_rate)/avg_rate;
  par = avg_rate;
```

```
mark the packet using:
  cp 11 w.p. mp
  cp 00 w.p. (1-mp)
```

```
else if avg_rate > cir
then
  mp = mp + (par - avg_rate)/avg_rate;
  par = avg_rate;
```

```
mark the packet using:
  cp 11 w.p. mp
  cp 00 w.p. (1-mp)
```

where,

avg_rate = the rate estimate upon each packet arrival

mp = marking probability (≤ 1)

cir = committed information rate (i.e., the target rate)

par = previous average rate

cp denotes ‘codepoint’ and *w.p.* denotes ‘with probability’.

Τα συμμορφούμενα (IN) πακέτα μαρκάρονται με την κωδική τιμή '11', και τα μη συμμορφούμενα με την κωδική τιμή '00'. Ο MBM, με κάθε καινούρια άφιξη πακέτου υπολογίζει τον νέο ρυθμό αποστολής και τον συγκρίνει με τον προηγούμενο προκειμένου να συμπεράνει αλλαγές στο RTT και στο μέγεθος του TCP παραθύρου. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις αλλαγές αυτές, αλλά και το πόσο κοντά βρίσκεται ο μετρούμενος ρυθμός στο Target Rate, αυξάνει ή μειώνει ανάλογα τις πιθανότητες μαρκαρίσματος.

Μετρήσεις δείχνουν ότι ο MBM παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση όσο αφορά την ισότητα των TCP ροών, σε περιπτώσεις διαφορετικών RTTs, διαφορετικών TCP παραθύρων, αλλά και σε περιπτώσεις αλληλεπίδρασης UDP κίνησης, ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις η βελτίωση που παρουσιάζει δεν είναι σημαντική, και η απόδοση του απέχει αισθητά από την βέλτιστη δυνατή. Επιπλέον, ο μηχανισμός αυτός δεν εξετάζει άλλες σημαντικές παραμέτρους που προκαλούν φαινόμενα ανισότητας (π.χ. διαφορετικά μεγέθη TCP πακέτων, κ.α.).

4.2 Equation-Based Packet Marking (EBPM) [3]

Η εργασία αυτή προτείνει ένα μηχανισμό μαρκαρίσματος της κίνησης (EBPM) για την απονομή δικαιοσύνης σε TCP πηγές, ο οποίος ανά τακτά χρονικά διαστήματα παρατηρεί τις συνθήκες του δικτύου όπως RTT, μέσο μέγεθος πακέτου και μέγιστο μέγεθος TCP παραθύρου. Στη συνέχεια συνεκτιμώντας την πιθανότητα απώλειας πακέτων που παρατηρεί κάθε ροή, υπολογίζει τις πιθανότητες μαρκαρίσματος των πακέτων με κάποιο από τρία δυνατά χρώματα – πράσινο, κίτρινο, κόκκινο (3 color marker). Στόχος του αλγορίθμου μαρκαρίσματος είναι να μαρκάρει με τρόπο ώστε οι ροές με μικρότερη πιθανότητα απώλειας πακέτων (ροές που επιτυγχάνουν υψηλές επιδόσεις) να μαρκάρονται με περισσότερα κίτρινα και κόκκινα πακέτα από τις ροές με μεγαλύτερη πιθανότητα απώλειας. Η εργασία στοχεύει στην εξυπηρέτηση συμβολαίων – SLA – που ορίζουν μέσο (CIR) και μέγιστο ρυθμό αποστολής (PIR), για αυτό και χρησιμοποιεί μαρκαρίσμα τριών χρωμάτων.

Η διαδικασία που ακολουθείται σε κάθε διάστημα για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων μαρκαρίσματος των πακέτων είναι η εξής: Αρχικά αντιστοιχίζονται ο μέσος (CIR) και ο μέγιστος (PIR) ρυθμός που ορίζει το συμβόλαιο κάθε πηγής, σε κάποιες πιθανότητες απώλειας πακέτων (P_{cir} και P_{pir} αντίστοιχα) με τη χρήση κάποιου TCP μοντέλου που συσχετίζει τις δύο μετρικές (throughput και πιθανότητα απώλειας πακέτων) και συνυπολογίζοντας τις συνθήκες δικτύου (RTT, μέσο μέγεθος πακέτου, μέγιστο μέγεθος TCP παραθύρου) σε αυτό το διάστημα. Στη συνέχεια εκτιμάται η πιθανότητα απώλειας πακέτου (loss_rate) που παρατηρεί η πηγή στο ίδιο διάστημα. Τέλος συγκρίνοντας αυτήν την πιθανότητα με τις πιθανότητες P_{cir} και P_{pir} , υπολογίζονται οι πιθανότητες μαρκαρίσματος των πακέτων της ροής ως πράσινα, κίτρινα ή κόκκινα. Ο ακριβής αλγόριθμος μαρκαρίσματος φαίνεται παρακάτω

```

if(loss_rate ≥ PCIR)
  Mark packet as GREEN
else if (PCIR > loss_rate ≥ PPIR)
  calculate Pyellow =  $\frac{P_{CIR} - loss\_rate}{P_{CIR}} \times (P_{CIR} \times YScale)$ 
  with probability Pyellow mark packet as YELLOW and
  with probability (1 - Pyellow) mark packet as GREEN
else if (loss_rate < PPIR)
  calculate Pred =  $\frac{P_{PIR} - loss\_rate}{P_{PIR}} \times (P_{PIR} \times RScale)$ 
  calculate Pyellow =  $\frac{P_{CIR} - P_{PIR}}{P_{PIR}} \times (P_{PIR} \times YScale)$ 
  with probability Pred mark packet as RED and
  with probability Pyellow mark packet as YELLOW and
  with probability (1 - (Pyellow + Pred)) mark packet as
  GREEN

```

Οι τιμές των παραμέτρων *YScale* και *RScale* εξαρτώνται από τις εκάστοτε συνθήκες δικτύου.

Ο αλγόριθμος δείχνει ότι αν η πιθανότητα απώλειας *loss_rate* είναι μεγαλύτερη από την πιθανότητα *P_{CIR}* (πράγμα που σημαίνει ότι ο ρυθμός που πέτυχε η ροή ήταν χαμηλότερος του CIR της) τότε τα πακέτα της ροής μαρκάρονται πάντα σαν πράσινα. Αν η πιθανότητα απώλειας είναι μεταξύ των *P_{PIR}* και *P_{CIR}*, τότε τα πακέτα της ροής μαρκάρονται σαν κίτρινα με πιθανότητα που είναι ανάλογη της απόστασης της *P* από την *P_{CIR}* (δηλαδή όσο περισσότερο απέχει η *loss_rate* από την *P_{CIR}*, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα μαρκαρίσματος των πακέτων σαν κίτρινα), ενώ τα πακέτα που δεν μαρκάρονται σαν κίτρινα μαρκάρονται σαν πράσινα. Τέλος, αν η πιθανότητα απώλειας *loss_rate* είναι μικρότερη της *P_{PIR}* (που σημαίνει ότι η ροή πέτυχε ρυθμό υψηλότερο του PIR της) τότε τα πακέτα της μαρκάρονται σαν κόκκινα με πιθανότητα ανάλογη της απόστασης του *loss_rate* από το *P_{PIR}*, μαρκάρονται σαν κίτρινα με πιθανότητα ανάλογη της διαφοράς των *P_{CIR}* και *P_{PIR}*, ενώ τα πακέτα που δεν μαρκάρονται σαν κόκκινα ή κίτρινα μαρκάρονται σαν πράσινα.

Μετρήσεις δείχνουν ότι ο μηχανισμός αυτός αντιμετωπίζει αποτελεσματικά το πρόβλημα της ανισότητας μεταξύ TCP πηγών, ελαττώνοντας την επίδραση του RTT και του μεγέθους πακέτου. Μεταξύ πηγών με διαφορετικά Target Rates προσφέρει αναλογική διαμοίραση του excess bandwidth σε over-provisioned δίκτυα. Δεν εξετάζεται η περίπτωση διαφορετικού αριθμού TCP ροών ανά πηγή, και διατηρούμε αμφιβολίες για την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου σε τέτοιες περιπτώσεις (εξετάζονται μόνο σενάρια κίνησης με 1 TCP ροή ανά πηγή). Επιπλέον, η εφαρμογή του φαίνεται να αυξάνει αισθητά το overhead στο δίκτυο, λόγω των απαιτήσεων που έχει για συνεχή ενημέρωση σχετικά με την κατάσταση του δικτύου, έχει αυξημένη πολυπλοκότητα καθώς απαιτεί τον διαρκή υπολογισμό πολλών παραμέτρων (πιθανότητες απόρριψης, RTTs, κ.α.) ενώ ορισμένοι από αυτούς τους παραμέτρους υπολογίζονται δύσκολα (π.χ. για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων απόρριψης απαιτείται η παρατήρηση από τους ακραίους δρομολογητές των απωλειών σε πακέτα στο κέντρο του δικτύου, το οποίο συχνά δεν είναι εύκολο να γίνει – περιπτώσεις με 3 duplicate acknowledgments θα μπορούσαν να παρατηρηθούν, είναι πιο δύσκολο όμως σε περιπτώσεις λήξης των timeouts).

4.3 Intelligent Traffic Conditioners [4]

Η εργασία αυτή προτείνει κάποιους μηχανισμούς μαρκαρίσματος που αντιμετωπίζουν ορισμένα προβλήματα ανισότητας του TCP. Συγκεκριμένα τα προβλήματα που αντιμετωπίζει είναι η ανισότητα μεταξύ πηγών με διαφορετικά RTTs, η ανισότητα στην εξυπηρέτηση των TCP πηγές όταν αλληλεπιδρούν UDP πηγές, και η μη αναλογική διαμοίραση του excess bandwidth μεταξύ TCP πηγών με διαφορετικά Target Rates.

Ο μηχανισμός για την αντιμετώπιση της επίδρασης του RTT μαρκάρει τα πακέτα με δύο χρώματα (2 color marker – IN, OUT) και λειτουργεί ως εξής. Υπολογίζεται ο ρυθμός αποστολής κάθε πηγής, και συγκρίνεται με το Target Rate αυτής. Αν ο ρυθμός αυτός, είναι μικρότερος του target rate, τότε τα πακέτα μαρκάρονται σαν IN. Σε αντίθετη περίπτωση, τα πακέτα μαρκάρονται σαν OUT με μια πιθανότητα που είναι ανάλογη της απόστασης του ρυθμού αποστολής από το Target Rate (έτσι ώστε όσο περισσότερο ξεφεύγει ο ρυθμός αποστολής από το Target Rate, τόσο περισσότερα πακέτα να μαρκάρονται σαν OUT) και αντιστρόφως ανάλογη του RTT κάθε ροής (έτσι ώστε οι αδικημένες ροές που έχουν μεγάλα RTTs, να μαρκάρονται με λιγότερα πακέτα σαν OUT). Παρακάτω περιγράφεται ο ακριβής αλγόριθμος – *minRTT* είναι ένα ελάχιστο RTT στο DiffServ domain, και *aggregateRTT* είναι το RTT του εκάστοτε aggregate της πηγής.

```

If (measuredRate <= TargetRate)
    /* i.e., IN-profile */
    Map Packets to “dp0”
Else /* i.e., OUT-of-profile */
    Map Packets to “dp0” with probability (1-p)
    Map Packets to “dp1” with probability p

```

Where: $\mathbf{p} = \mathbf{q} * \mathbf{r}$

$$\mathbf{q} = \frac{(\text{MeasuredRate} - \text{TargetRate})}{\text{MeasuredRate}}$$

$$\mathbf{r} = \left(\frac{\text{min RTT}}{\text{aggregateRTT}} \right)^2$$

Για την εξάλειψη των προβλημάτων που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση TCP και UDP προτείνονται κάποιοι μηχανισμοί, όπως μαρκάρισμα των UDP πακέτων με χαμηλότερη προτεραιότητα από των TCP πακέτων. Ένας άλλος μηχανισμός προτείνει την ανάθεση της UDP κίνησης σε διαφορετική ουρά. Οι δυο ουρές (με TCP και UDP κίνηση) εξυπηρετούνται με ένα σχήμα τύπου WFQ.

Για την αναλογική διαμοίραση του excess bandwidth μεταξύ ροών με διαφορετικά Target Rates, προτείνεται ένας μηχανισμός μαρκαρίσματος ανάλογος αυτού που εξαλείφει την επίδραση του RTT (περιγράφηκε παραπάνω). Έτσι, τα πακέτα μαρκάρονται σαν OUT με πιθανότητα ανάλογη της διαφοράς του ρυθμού

αποστολής της ροής από το Target Rate αυτής, και αντιστρόφως ανάλογη με το Target Rate κάθε ροής (έτσι ώστε ροές με υψηλό Target Rate να έχουν λιγότερα OUT πακέτα και να λαμβάνουν μεγαλύτερο μερίδιο του excess bandwidth). Παρακάτω φαίνεται ο αντίστοιχος αλγόριθμος

```

If (measuredRate <= TargetRate)
    /* i.e., IN-profile */
    Map Packets to “dp0”
Else /* i.e., OUT-of-profile */
    Map Packets to “dp0” with probability (1-p);
    Map Packets to “dp1” with probability p;

```

Where: $\mathbf{p} = \mathbf{q} * \mathbf{r}$:

$$\mathbf{q} = \frac{(\textit{MeasuredRate} - \textit{TargetRate})}{\textit{MeasuredRate}}$$

$$\mathbf{r} = \left(\frac{\textit{minTrgetRate}}{\textit{aggregateTrgetRates}} \right)^2$$

Αποτελέσματα δείχνουν ότι οι προτεινόμενες λύσεις αντιμετωπίζουν αρκετά αποτελεσματικά τα προβλήματα της ανισότητας που εξετάζουμε. Εν τούτοις η εφαρμογή τους είναι σχετικά δύσκολη, καθώς απαιτεί κάποιου είδους συνεργασία μεταξύ των διαφόρων ακραίων δρομολογητών του DiffServ Domain στους οποίους εφαρμόζονται οι Intelligent Traffic Conditioners, προκειμένου να γίνουν γνωστές σε όλους οι τιμές των παραμέτρων *minRTT* ή *minTrgetRate*. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι προτείνονται λύσεις, κάθε μια από τις οποίες αντιμετωπίζει μεμονωμένα κάποιον παράγοντα που προκαλεί ανισότητα (π.χ. διαφορετική λύση για RTTs, Target Rates, κ.λ.π.). Δεν προτείνεται επομένως μία ενιαία λύση που να αντιμετωπίζει όλους τους παράγοντες που ευθύνονται για τα φαινόμενα ανισότητας.

4.4 Rate Adaptive Marker (RAM) [5]

Η εργασία αυτή ασχολείται με την ανισότητα ανάμεσα σε TCP ροές (αποκαλείται “inter-SLA unfairness” σε αυτήν την εργασία) και μεταξύ ομαδοποιημένων – aggregates – TCP ροών (“intra-SLA unfairness” αντίστοιχα) που προκαλείται από διαφορές σε Target Rates, RTTs, χωρητικότητες συνδέσμων και επίπεδα συμφόρησης που παρατηρούν οι ροές.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος προτείνουν την αλλαγή του γενικού μηχανισμού μαρκαρίσματος που ορίζει ότι ο ρυθμός των IN πακέτων είναι περίπου ίσος με το Target Rate. Ο μηχανισμός που προτείνουν είναι ο εξής: Τα πακέτα μαρκάρονται σαν IN με ρυθμό ανάλογο του Target Rate της ροής, και αντιστρόφως ανάλογο του κέρδους σε throughput (throughput gain, το επιπλέον throughput από το

Target Rate) κάθε ροής. Συγκεκριμένα, ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα υπολογίζεται ο νέος ρυθμός μαρκαρίσματος πακέτων σαν IN σύμφωνα με τον τύπο:

$$marking_rate = \frac{Th_{max} - Th_{avg}}{Th_{max} - RsvRate} * RsvRate$$

όπου Th_{max} και Th_{avg} είναι το μέγιστο στιγμιαίο throughput και το μέσο throughput αντίστοιχα όπως αυτά μετρήθηκαν κατά την προηγούμενο χρονική περίοδο μέτρησης, ενώ $RsvRate$ είναι το Target Rate της πηγής. Σύμφωνα με τον τύπο, όταν ο μετρούμενος μέσος ρυθμός Th_{avg} είναι ίσος του $RsvRate$ ο ρυθμός μαρκαρίσματος σαν IN ισούται με $RsvRate$, όταν ο ρυθμός Th_{avg} είναι μεγαλύτερος του $RsvRate$, ο ρυθμός μαρκαρίσματος σαν IN είναι μικρότερος του $RsvRate$, ενώ όταν ο ρυθμός Th_{avg} είναι μικρότερος του $RsvRate$, ο ρυθμός μαρκαρίσματος σαν IN είναι μεγαλύτερος του $RsvRate$. Έτσι, ανάλογα αν ο μετρούμενος μέσος ρυθμός είναι μικρότερος ή μεγαλύτερος του Target Rate, ο ρυθμός μαρκαρίσματος πακέτων σαν IN γίνεται αντίστοιχα μεγαλύτερος ή μικρότερος του ρυθμού που ορίζει ο γενικός κανόνας μαρκαρίσματος.

Τα αποτελέσματά στην περίπτωση ανισότητας μεταξύ ομαδοποιημένων ροών κίνησης (“intra-SLA unfairness”), δείχνουν ότι ο μηχανισμός αυτός ελαττώνει την ανισότητα, σε σύγκριση με αυτήν που παρατηρείται με χρήση του απλού TSW2CM αλγορίθμου μαρκαρίσματος. Εντούτοις, η βελτίωση του ποσοστού ισότητας που επιτυγχάνεται και που παρουσιάζεται στα αποτελέσματα (κατά πέντε περίπου ποσοστιαίες μονάδες από 93% σε 98%) δεν θεωρούμε ότι είναι ιδιαίτερα σημαντική (όπως θα δούμε στις επόμενες παραγράφους, ο μηχανισμός που προτείνουμε στη δική μας εργασία επιτυγχάνει πολύ μεγαλύτερη βελτίωση). Επιπλέον, καθώς δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα σε περιπτώσεις όπου ο απλός TSW2CM αλγόριθμος να επιτυγχάνει χαμηλότερες επιδόσεις σε ισότητα (σε σχέση με το 93% που εμφανίζει στο σενάριο που παρουσιάζεται), μας κάνει να αμφισβητούμε την αποτελεσματικότητα του μηχανισμού αυτού σε δυσκολότερα σενάρια, όπου τα φαινόμενα ανισότητας είναι εντονότερα.

4.5 Αδυναμίες των σχετικών εργασιών – στόχοι της δικής μας εργασίας

Παρουσιάσαμε τις σημαντικότερες εργασίες που ασχολούνται με μηχανισμούς μαρκαρίσματος, στοχεύοντας να αντιμετωπίσουν τα φαινόμενα ανισότητας των AF υπηρεσιών σε DiffServ δίκτυα. Μεταξύ των εργασιών αυτών, είδαμε ότι κάποιες, μπορεί μεν να εξομαλύνουν την ανισότητα που παρατηρείται με χρήση των συνηθισμένων μηχανισμών μαρκαρίσματος, εν τούτοις και οι δικές τους επιδόσεις δεν είναι πάντοτε υψηλές, με τον βαθμό ανισότητας να παραμένει συχνά σε υψηλά επίπεδα. Επιπλέον, ορισμένοι από τους μηχανισμούς αυτούς στοχεύουν να αντιμετωπίσουν ένα περιορισμένο μόνο σύνολο παραγόντων, από αυτούς που προκαλούν τα φαινόμενα ανισότητας (π.χ διαφορετικά RTTs, Target Rates κ.λ.π.), και ως εκ τούτου είναι αναποτελεσματικοί σε περιπτώσεις όπου η ανισότητα προκαλείται από διαφορετικούς παράγοντες. Τέλος είδαμε ότι κάποιοι από αυτούς, παρουσιάζουν δυσκολία στην εφαρμογή, έχουν αυξημένη πολυπλοκότητα, και η υλοποίηση των επιμέρους μηχανισμών τους δείχνει σε ορισμένες περιπτώσεις ανέφικτη.

Στόχος της δικής μας εργασίας είναι η κατασκευή ενός μηχανισμού μαρκαρίσματος που θα εμφανίζει τη μέγιστη δυνατή απόδοση, όσο αφορά την ισότητα που θα επιτυγχάνει, εξαιρέοντας αν είναι δυνατόν τα φαινόμενα ανισότητας ακόμα και στα δυσκολότερα σενάρια κίνησης, όπου τα φαινόμενα αυτά εμφανίζονται εντονότερα. Επιπλέον, επιθυμούμε ο μηχανισμός που θα προτείνουμε να αντιμετωπίζει το φαινόμενο της ανισότητας στη γενική του μορφή, δίχως να χρειάζεται να εξετάζει τις ξεχωριστές αιτίες και παραμέτρους που το προκαλούν, διατηρώντας υψηλά την απόδοσή του σε όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις. Τέλος, θα ήταν επιθυμητό η πολυπλοκότητά του να κρατηθεί σε όσο το δυνατόν πιο χαμηλά επίπεδα, και η υλοποίησή του να μπορεί να στηριχθεί στην ήδη υπάρχουσα δικτυακή υποδομή.

5 Περιγραφή Εργασίας

Οι πλειοψηφία των μηχανισμών μαρκαρίσματος, που έχουν προταθεί με σκοπό την αντιμετώπιση των φαινομένων ανισότητας των AF υπηρεσιών σε DiffServ δίκτυα, δεν αντιδρούν κατά τις αλλαγές του μίγματος κίνησης που εισέρχεται στο δίκτυο κάθε στιγμή. Στη δική μας εργασία προτείνουμε τη χρήση απλών, αλλά προσαρμόσιμων (adaptive) αλγορίθμων μαρκαρίσματος που θα προσαρμόζονται κατάλληλα όταν αλλάζει το μίγμα της κίνησης. Η προσαρμογή αυτή, όπως θα δούμε αναλυτικά αργότερα, γίνεται με σκοπό την προστασία πέραν του Target Rate, επιπλέον και του δίκαιου μεριδίου της αδέσμευτης δικτυακής χωρητικότητας (την χωρητικότητα του δικτύου δηλαδή, πέραν αυτής που έχει δεσμευτεί από το σύνολο των συμβολαίων / SLAs που έχει συνάψει το δίκτυο με τους πελάτες του) που αντιστοιχεί σε κάθε πηγή, η οποία αφορά είτε περίσσειμα δικτυακής χωρητικότητας στην περίπτωση under-subscribed δικτύου, είτε υποβάθμιση εύρους ζώνης στην περίπτωση over-subscribed δικτύου. Έτσι, η πρότασή μας είναι η χρήση προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος, προσαρμόσιμων με την έννοια ότι αλλάζουν τιμές των παραμέτρων τους όταν αλλάζει το μίγμα της κίνησης, με τρόπο που επιτυγχάνει κάθε στιγμή τη μέγιστη δυνατή δικαιοσύνη μεταξύ των πηγών.

Όπως έχουμε ήδη συζητήσει, εξετάζουμε δύο διαφορετικά μοντέλα δίκαιης διαμοίρασης πόρων. Ο πρώτος είναι η ισόποση διαμοίραση του περισσευόμενου εύρους ζώνης σε όλες τις πηγές, ανεξάρτητα από το Target Rate τους (και αντίστοιχα ισόποση υποβάθμιση του throughput σε over – subscribed δίκτυα) και ο δεύτερος είναι η διαμοίραση του περισσευόμενου εύρους ζώνης σε κάθε πηγή αναλογικά με το Target Rate της (αντίστοιχα και η υποβάθμιση του throughput). Η εργασία μας εξετάζει και τις δύο περιπτώσεις και προτείνει διαφορετικούς αλγορίθμους μαρκαρίσματος για κάθε μια.

Ο υπολογισμός του δίκαιου μεριδίου (Fair Share) από την αδέσμευτη δικτυακή χωρητικότητα που αντιστοιχεί σε κάθε πηγή, απαιτεί την γνώση ορισμένων παραμέτρων όπως είναι η συνολική θεωρητική χωρητικότητα του δικτύου και τα Target Rates του συνόλου των πηγών του δικτύου. Τις τιμές αυτές, μπορεί να τις γνωρίζει ένα κεντρικό στοιχείο του DiffServ δικτύου, το οποίο συλλέγει στοιχεία από τις συσκευές του domain του. Αρκετές εργασίες έχουν ασχοληθεί με ανάλογες αρχιτεκτονικές, όπου ένα κεντρικό στοιχείο (που το ονομάζουν Bandwidth Broker, βλ. π. 2.4) συλλέγει μετρήσεις στο δίκτυο και ορίζει τιμές σε παραμέτρους διαφόρων μηχανισμών. Η αρχιτεκτονική αυτή των Bandwidth Brokers φαίνεται να εξυπηρετεί άριστα το σκοπό μας, καθώς τέτοια στοιχεία μπορούν να συλλέγουν στοιχεία για την κίνηση που υπάρχει κάθε στιγμή στο δίκτυο, και να προσαρμόζουν κατάλληλα τους αλγορίθμους μαρκαρίσματος στους ακραίους δρομολογητές όταν αλλάζει το μίγμα της κίνησης.

Για την επιλογή του ακριβούς αλγορίθμου μαρκαρίσματος στους ακραίους δρομολογητές, εξετάστηκαν διάφοροι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι ως προς την απόδοσή τους και τα αποτελέσματα έδειξαν σαν καλύτερη επιλογή έναν αλγόριθμο που βασίζεται στον απλό TSW2CM αλγόριθμο ([8] βλ. π. 2.3.1.2).

Παρουσιάζουμε και εξηγούμε τις επιλογές μας στις επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου.

5.1 Κίνητρο των επιλογών της εργασίας (Motivation)

Τα αποτελέσματα ορισμένων αρχικών μετρήσεων μας υπέδειξαν ότι η απόδοση (όσο αφορά την επιτυγχανόμενη ισότητα) των αλγορίθμων μαρκαρίσματος μεταβάλλεται αισθητά όταν αλλάζει η επιλογή της τιμής του ρυθμού αποστολής των πηγών κίνησης, πάνω από την οποία τα πακέτα αρχίζουν να μαρκάρονται σαν μη συμμορφούμενα. Ενώ δηλαδή, οι περισσότεροι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος προτείνουν το μαρκάρισμα των πακέτων σαν μη συμμορφούμενα να ξεκινάει όταν ο ρυθμός των πακέτων ξεπερνάει το Target Rate τους, φαίνεται ότι η απόδοση μπορεί να βελτιωθεί αν το μαρκάρισμα γίνεται όταν ο ρυθμός αποστολής των πακέτων ξεπεράσει κάποια τιμή διαφορετική του Target Rate. Οι μετρήσεις δείχνουν επίσης ότι για διαφορετικά σενάρια κίνησης και δικτύου οι τιμές αυτές του ρυθμού αποστολής, για τις οποίες επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση, είναι διαφορετικές. Οι παρατηρήσεις αυτές, μας ώθησαν να εξετάσουμε παραμετροποιημένους αλγορίθμους μαρκαρίσματος πακέτων, με παράμετρο που θα ορίζει το σημείο του ρυθμού αποστολής, πάνω από το οποίο θα ξεκινάει το μαρκάρισμα των πακέτων ως μη συμμορφούμενα, και στους οποίους θα εξετάζουμε να βρούμε την τιμή της παραμέτρου που οδηγεί σε βέλτιστη απόδοση.

Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος θα χρησιμοποιούν δύο χρώματα (IN και OUT) για το μαρκάρισμα και την διαφοροποίηση των πακέτων – η χρήση δύο χρωμάτων είναι αρκετή στις περιπτώσεις SLAs που διαπραγματεύονται μόνο επιθυμητό μέσο ρυθμό αποστολής (*Target Rate*). Για μετρητή (meter) κίνησης στην είσοδο του δικτύου, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε τον TSW μετρητή μέσου ρυθμού αποστολής ([8] βλ. π. 2.3.1.1), και όχι κάποιον μετρητή τύπου Token Bucket, καθώς όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη παράγραφο (π. 2.3.1.1) μελέτες έδειξαν αδυναμίες εγγυήσεων παροχής εύρους ζώνης σε ορισμένες περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται τέτοιου τύπου μετρητές.

5.2 Ισόποση διαμοίραση της δικτυακής χωρητικότητας

Όπως περιγράψαμε στη παράγραφο 2.3.1.5.1 (εξίσωση (2)), όταν στόχος είναι η ισόποση διαμοίραση της αδέσμευτης δικτυακής χωρητικότητας, τότε κάθε πηγή, ανεξάρτητα από το *Target Rate* της, δικαιούται ένα ίσο μερίδιο της χωρητικότητας αυτής, η ακριβής τιμή του οποίου δίνεται από τον τύπο:

$$Fair\ Share = \frac{Excess\ Bandwidth}{Number\ of\ Sources} = \frac{Capacity - \sum Target\ Rates}{Number\ of\ Sources}$$

Όπως δείχνει ο τύπος, η τιμή του δίκαιου μεριδίου εξαρτάται από την συνολική θεωρητική χωρητικότητα του δικτύου, τον αριθμό των πηγών που εισάγουν κίνηση κάθε στιγμή, και το άθροισμα των Target Rates αυτών.

Στην περίπτωση της ισόποσης διαμοίρασης, η συνολική ποσότητα δικτυακής χωρητικότητας που δικαιούται κάθε πηγή ισούται με “Target Rate + Fair Share”, όπου όπως είπαμε η ποσότητα “Fair Share” είναι ίση για όλες τις πηγές. Με βάση την παρατήρηση αυτή, προτείνουμε την χρήση παραμετροποιημένων αλγορίθμων μαρκαρίσματος, που ξεκινάνε να μαρκάρουν πακέτα σαν OUT, όταν ο ρυθμός αποστολής των πακέτων ξεπερνάει την τιμή “Target Rate + h”, όπου *h* η παράμετρος του αλγορίθμου στην οποία αναφερόμαστε, η τιμή της οποίας, ορίζει και το ακριβές σημείο του ρυθμού αποστολής των πακέτων, στο οποίο ξεκινάει το μαρκάρισμα των πακέτων σαν OUT. Καθώς η παράμετρος *h* είναι προσθετική της τιμής *Target Rate*, μεταξύ πηγών με διαφορετικά Target Rates, μια συγκεκριμένη επιλογή τιμής για την παράμετρο *h* έχει ως αποτέλεσμα, η απόσταση του σημείου εκκίνησης του

μαρκαρίσματος πακέτων σαν OUT, από το Target Rate, να είναι ίση για όλες τις πηγές. Η επιλογή αυτή έγινε με τη σκέψη, ότι τιμές της παραμέτρου h κοντά στην τιμή *Fair Share*, με την οποία τα πακέτα με ρυθμό αποστολής μικρότερο του “Target Rate + Fair Share” μαρκάρονται πάντα σαν IN και κατ’ επέκταση προστατεύονται από την παρουσία OUT πακέτων, θα πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα την δίκαιη κατανομή πόρων που επιθυμούμε.

Στη συνέχεια περιγράφουμε τους ακριβείς αλγόριθμους μαρκαρίσματος που εξετάσαμε, τα πειράματα που εκτελέσαμε για να ελέγξουμε την αποτελεσματικότητά τους, και καταλήγουμε με τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

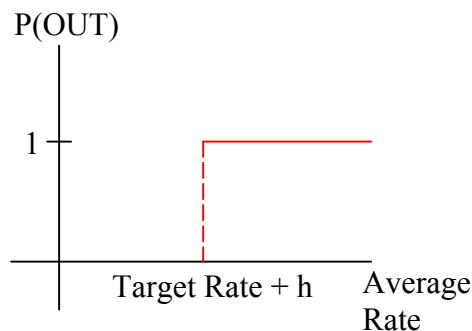
5.2.1 Προσαρμόσιμοι (adaptive) αλγόριθμοι μαρκαρίσματος που επιδιώκουν ισόποση διαμοίραση της δικτυακής χωρητικότητας

Οι αλγόριθμοι που εξετάσαμε είναι οι εξής:

A) (Step) – Με την άφιξη κάθε πακέτου υπολόγισε τον μέσο ρυθμό αποστολής χρησιμοποιώντας τον TSW μετρητή. Αν ο μετρούμενος ρυθμός αποστολής είναι μικρότερος από “Target Rate + h ” όπου h μια παράμετρος, τότε μάρκαρε το πακέτο σαν συμμορφούμενο (IN). Αλλιώς μάρκαρε το πακέτο σαν μη συμμορφούμενο (OUT).

Ο αλγόριθμος αυτός είναι ένας απλός αλγόριθμος μαρκαρίσματος, στον οποίο η πιθανότητα μαρκαρίσματος των πακέτων σαν OUT είναι 0 ή 1 ανάλογα αν ο ρυθμός αποστολής είναι μικρότερος ή μεγαλύτερος της τιμής “Target Rate + h ”. Το h είναι η παράμετρος που ορίζει το σημείο του ρυθμού αποστολής πέραν του οποίου τα πακέτα μαρκάρονται σαν OUT, και σε κάθε σενάριο κίνησης εξετάζεται η τιμή που προκαλεί βέλτιστη απόδοση του συστήματος.

Η συνάρτηση της πιθανότητας μαρκαρίσματος σαν OUT συναρτήσει του μέσου ρυθμού αποστολής για τον αλγόριθμο αυτό, φαίνεται στο σχήμα 4.



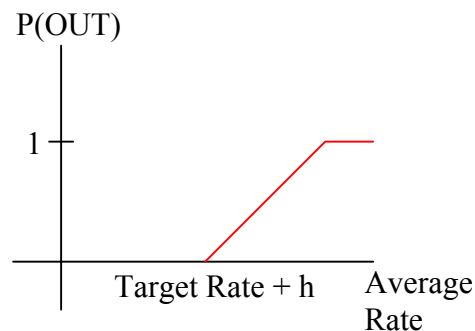
Σχ. 4 Συνάρτηση πιθανότητας μαρκαρίσματος του αλγορίθμου A (Step)

Λόγω της μορφής της συνάρτησης μαρκαρίσματος, αποκαλούμε τον αλγόριθμο αυτό, ‘Step’ αλγόριθμο μαρκαρίσματος.

B) (Linear) – Με την άφιξη κάθε πακέτου υπολόγισε τον μέσο ρυθμό αποστολής χρησιμοποιώντας τον TSW μετρητή. Αν ο μετρούμενος ρυθμός αποστολής είναι μικρότερος από “Target Rate + h ” όπου h μια παράμετρος, τότε μάρκαρε το πακέτο σαν συμμορφούμενο (IN). Αλλιώς μάρκαρε το πακέτο σαν μη συμμορφούμενο (OUT) με

πιθανότητα $P(\text{avg rate}) = d * (\text{avg rate} - \text{Target Rate} - h)$, όπου d είναι μια σταθερά και “avg rate” ο μετρούμενος μέσος ρυθμός αποστολής.

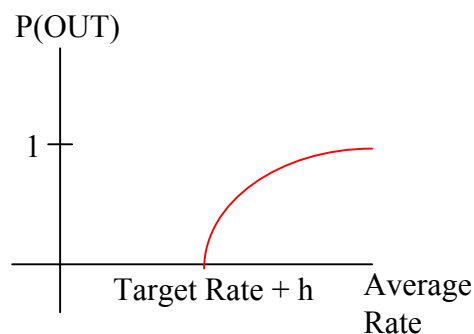
Η αντίστοιχη συνάρτηση της πιθανότητας μαρκαρίσματος φαίνεται στο σχήμα 5. Όπως φαίνεται πρόκειται για μια γραμμική (Linear) συνάρτηση μαρκαρίσματος, στην οποία όπως και πριν η τιμή της παραμέτρου h ελέγχει την θέση της συνάρτησης κατά μήκος του άξονα του ρυθμού αποστολής, καθορίζοντας το σημείο το ρυθμού πέραν του οποίου τα πακέτα ξεκινούν να μαρκάρονται σαν OUT. Η τιμή της σταθεράς d ορίζει την κλίση της συνάρτησης, και όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο περισσότερο η συνάρτηση αυτή προσεγγίζει την (STEP) συνάρτηση του αλγορίθμου A.



Σχ. 5 Συνάρτηση πιθανότητας μαρκαρίσματος του αλγορίθμου B (Linear)

C) (Adaptive TSW2CM) – Με την άφιξη κάθε πακέτου υπολόγισε τον μέσο ρυθμό αποστολής χρησιμοποιώντας τον TSW μετρητή. Αν ο μετρούμενος ρυθμός αποστολής είναι μικρότερος από “Target Rate + h” όπου h μια παράμετρος, τότε μάρκαρε το πακέτο σαν συμμορφούμενο (IN). Αλλιώς μάρκαρε το πακέτο σαν μη συμμορφούμενο (OUT) με πιθανότητα $P(\text{avg rate}) = \frac{\text{avg rate} - \text{Target Rate} - h}{\text{avg rate} - h}$

Η συνάρτηση μαρκαρίσματος αποτελεί μια κοίλη (concave) συνάρτηση του ρυθμού αποστολής στην οποία οι παράμετροι που αναφέρονται έχουν την ίδια έννοια με προηγουμένως. Η γραφική της παράσταση φαίνεται στο σχήμα 6.



Σχ. 6 Συνάρτηση πιθανότητας μαρκαρίσματος του αλγορίθμου C (Adaptive TSW2CM)

Η συνάρτηση αυτή, προκύπτει από την συνάρτηση μαρκαρίσματος του απλού TSW2CM αλγορίθμου, που περιγράφεται στην παράγραφο 2.3.1.2 και την εξίσωση (1), ο οποίος ορίζει ότι όταν ο μετρούμενος μέσος ρυθμός αποστολής, που

υπολογίζεται κατά την άφιξη ενός πακέτου, είναι μεγαλύτερος από το Target Rate της πηγής, τότε το πακέτο μαρκάρεται σαν OUT με πιθανότητα $P_{TSW2CM}(avg\ rate) = \frac{avg\ rate - Target\ Rate}{avg\ rate}$. Η συνάρτηση που εξετάζουμε αποτελεί

ουσιαστικά τη συνάρτηση $P_{TSW2CM}(avg\ rate - h)$, με την οποία για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου h η συνάρτηση P_{TSW2CM} μετακινείται σε διαφορετικά σημεία του άξονα του ρυθμού αποστολής, προκαλώντας την εκκίνηση της διαδικασίας μαρκαρίσματος πακέτων σαν OUT από διάφορα σημεία του άξονα. Για τον λόγο αυτό, θα αποκαλούμε τον αλγόριθμο αυτόν “Adaptive TSW2CM” αλγόριθμο. Όπως σε όλες τις περιπτώσεις, έτσι και εδώ, η έρευνά μας εστιάζεται στην εύρεση της τιμής της παραμέτρου h που σε κάθε σενάριο κίνησης έχει ως αποτέλεσμα την βέλτιστη απόδοση του συστήματος.

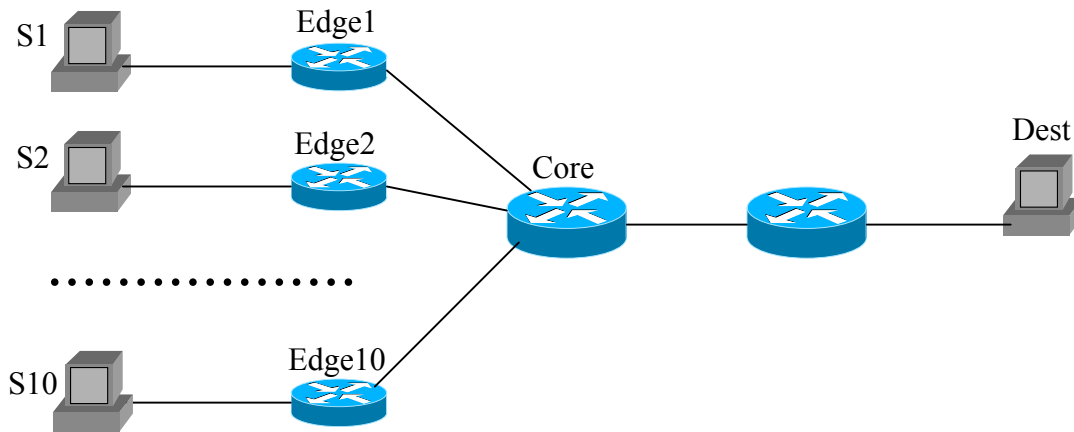
Τα πειράματα που περιγράφουμε στη συνέχεια, στοχεύουν να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητα των παραπάνω αλγορίθμων διαπιστώνοντας αν υπάρχουν κατάλληλες τιμές για την παράμετρο των συναρτήσεων μαρκαρίσματος που βελτιώνουν (και πόσο) την απόδοση του δικτύου, και αν ναι, με ποιο τρόπο και πόσο εύκολα μπορούν οι τιμές αυτές να εντοπιστούν. Πιο συγκεκριμένα, για την αξιολόγηση των αλγορίθμων μαρκαρίσματος λήφθηκαν υπ’ όψιν οι παρακάτω παράγοντες:

- Επιτυγχανόμενη ισότητα μεταξύ των πηγών
- Προβλεψιμότητα στον εντοπισμό της βέλτιστης τιμής της παραμέτρου των συναρτήσεων μαρκαρίσματος
- Ευαισθησία της απόδοσης του αλγορίθμου στην τιμή της παραμέτρου της συνάρτησης μαρκαρίσματος.
- Εκμετάλλευση της δικτυακής χωρητικότητας (utilization)

5.2.2 Περιγραφή και αποτελέσματα πειραμάτων που εξετάζουν την μέγιστη ισότητα που επιτυγχάνουν οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος

Η αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων μαρκαρίσματος που περιγράψαμε παραπάνω, εξετάστηκε με τη βοήθεια μιας σειράς πειραμάτων, η διεξαγωγή των οποίων έγινε σε περιβάλλον προσομοίωσης, με τη βοήθεια του προσομοιωτή NS-2 [17]. Χρησιμοποιήθηκε η έκδοση ns-2.1b9a, σε περιβάλλον FreeBSD 4.0. Η χρήση του προσομοιωτή απαιτεί την εγκατάσταση επιπλέον λογισμικού, έτσι στο ίδιο περιβάλλον εγκαταστάθηκαν επίσης τα παρακάτω: Tcl / Tk εκδόσεις Tcl-8.3.2 και Tk-8.3.2, Otel έκδοση otel-1.0a8, TclCL (lib Tcl) έκδοση telcl-1.0b12.

Για τις ανάγκες των πειραμάτων κατασκευάστηκε στον προσομοιωτή η δικτυακή τοπολογία που φαίνεται σχήμα 7.



Σχ. 7 Η δικτυακή τοπολογία που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων

Η χωρητικότητα όλων των συνδέσεων έχει τεθεί στα 5Mbps, και κάθε ένας από αυτούς εισάγει μια επιπλέον καθυστέρηση 1msec. Δέκα πηγές (S1 μέχρι S10) παράγουν FTP/TCP ή CBR/UDP κίνηση με συγκεκριμένο Target Rate και προορισμό τον κόμβο Dest. Η κίνηση κάθε πηγής διέρχεται από ένα αντίστοιχο ακραίο δρομολογητή (Edge1 μέχρι Edge10) στους οποίους επιτελούνται οι διεργασίες μέτρησης (metering) και μαρκαρίσματος (marking). Για την διαδικασία του metering χρησιμοποιείται ο TSW μετρητής μέσου ρυθμού (βλ. π. 2.3.1.1), ενώ το μαρκάρισμα επιτελείται με χρήση κάποιου εκ των αλγορίθμων μαρκαρίσματος που περιγράψαμε προηγουμένως (π. 5.2.1). Η συνολική κίνηση εισέρχεται μέσω του κεντρικού δρομολογητή Core, σε μια μοναδική RIO ουρά με δύο καθορισμένα σύνολα RED παραμέτρων (για IN και OUT πακέτα).

Στο τέλος κάθε πειράματος, μετράται το throughput που πέτυχε κάθε πηγή προκειμένου να συλλεχθεί πληροφορία για την αποτελεσματικότητα των μηχανισμών μαρκαρίσματος που εξετάζονται. Στα πειράματά μας υπολογίζουμε το throughput των πηγών στον παραλήπτη (κόμβος 'Dest'). Να σημειωθεί εδώ ότι οι μηχανισμοί μαρκαρίσματος χρησιμοποιούν μετρήσεις throughput υπολογισμένες από τους TSW μετρητές στους ακραίους δρομολογητές, οι οποίοι δεν λαμβάνουν γνώση για τις απώλειες πακέτων στο κέντρο του δικτύου. Έτσι, οι μετρήσεις αυτές είναι υψηλότερες από τις πραγματικές (το οποίο όπως θα δούμε παρακάτω δημιουργεί προβλήματα σε ορισμένες περιπτώσεις).

Η εκτίμηση της ισότητας που επιτυγχάνεται, γίνεται με τη βοήθεια του Fairness Index [18] η τιμή του οποίου δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Fairness Index (F.I.)} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n * \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (5),$$

όπου n ο αριθμός των πηγών, και x_i το επιπλέον (του Target Rate) throughput (ή η υποβάθμιση του throughput στην περίπτωση over-subscribed δικτύου) της πηγής i . Η τιμή του Fairness Index κυμαίνεται από 0 (πλήρης ανισότητα) μέχρι 1 (πλήρης ισότητα).

Η τιμή του παραθύρου (Win_length) των TSW μετρητών έχει τεθεί στα 20sec. Το μέγεθος της RIO ουράς στον κεντρικό δρομολογητή τίθεται στα 70 πακέτα, και οι RIO παράμετροι φαίνονται παρακάτω στον πίνακα 1

	Min th	Max th	Max _p
OUT	20	40	1.0
IN	40	60	1.0

Πίνακας 1. Επιλογή RIO παραμέτρων

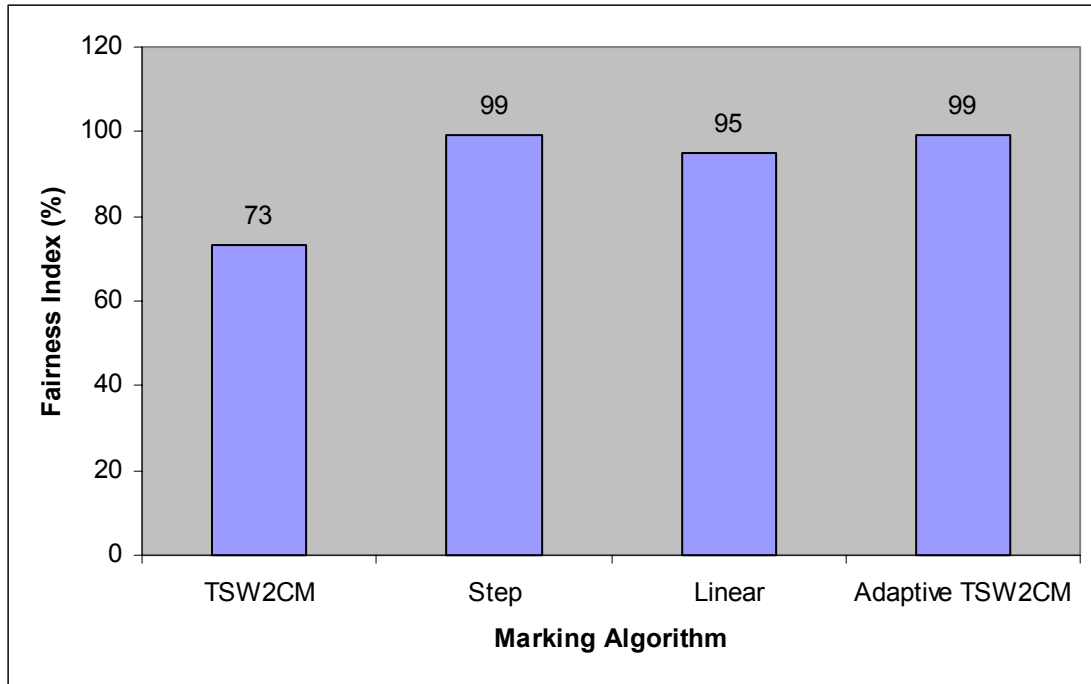
Στα πειράματα που εκτελέστηκαν, αν δεν αναφέρεται κάτι διαφορετικό, ισχύουν τα παρακάτω. Οι πηγές που παράγουν FTP κίνηση δημιουργούν ένα σύνολο (aggregate) από πέντε TCP Tahoe ροές, το μέγεθος πακέτου τίθεται στα 500 bytes, και το Target Rate κάθε πηγής τίθεται στα 200kbps. Η διάρκεια όλων των πειραμάτων είναι 80 sec, κατά τη διάρκεια των οποίων όλες οι πηγές στέλνουν ταυτόχρονα κίνηση με τους παραμέτρους που περιγράψαμε προηγουμένως. Η σταθερά d της συνάρτησης μαρκαρίσματος του αλγόριθμου B (Linear) τίθεται ίση με 10^{-5} . Η τιμή αυτή υπολογίστηκε εμπειρικά, με βάση τις παραμέτρους και τις ρυθμίσεις του δικτύου που επιλέξαμε.

Τα πειράματα που εκτελούμε εξετάζουν την απόδοση των προτεινόμενων αλγορίθμων μαρκαρίσματος, σε καταστάσεις που επιδρούν διάφοροι παράγοντες που προκαλούν φαινόμενα ανισότητας (βλ. π. 2.3.1.5.2). Σε κάθε πείραμα, χρησιμοποιείται μια βέλτιστη τιμή της παραμέτρου (οδηγεί σε βέλτιστη απόδοση του αλγορίθμου) των προσαρμόσιμων συναρτήσεων μαρκαρίσματος, τις οποίες εντοπίζουμε με τυχαίες δοκιμές (όπως θα δούμε αργότερα ο εντοπισμός δεν είναι εντελώς τυχαίος).

Στα πειράματα συμπεριλαμβάνουμε και τη χρήση του απλού TSW2CM μηχανισμού μαρκαρίσματος (π. 2.3.1.2) και τα αποτελέσματά του χρησιμοποιούνται ως μέτρο σύγκρισης για την απόδοση των αλγορίθμων που προτείνουμε.

5.2.2.1 TCP πηγές: Διαφορετικό μέγεθος πακέτου

TCP πηγές με διαφορετικό μέγεθος πακέτου δεν διαμοιράζονται ισότιμα την δικτυακή χωρητικότητα. Πηγές με μεγαλύτερο μέγεθος πακέτου, καταναλώνουν μεγαλύτερο κομμάτι της δικτυακής χωρητικότητας καθώς το congestion window για τις ροές αυτών των πηγών αυξάνει πιο γρήγορα – κάθε ACK επιβεβαιώνει περισσότερα bytes δεδομένων. Για την εξέταση της επίδρασης των διαφορετικών μεγεθών πακέτου στην επιτυγχάνομενη ισότητα εκτελούμε το εξής πείραμα. Οι πηγές παράγουν aggregates TCP ροών, πέντε εκ των οποίων με μέγεθος πακέτου 100bytes, και οι άλλες πέντε με μέγεθος πακέτου 1500bytes (οι υπόλοιπες παράμετροι τίθενται στις συνηθισμένες τιμές που ορίσαμε στην προηγούμενη παράγραφο). Το διάγραμμα 1 δείχνει την ισότητα που επιτυγχάνεται με τη χρήση καθενός προσαρμόσιμου αλγορίθμου μαρκαρίσματος.

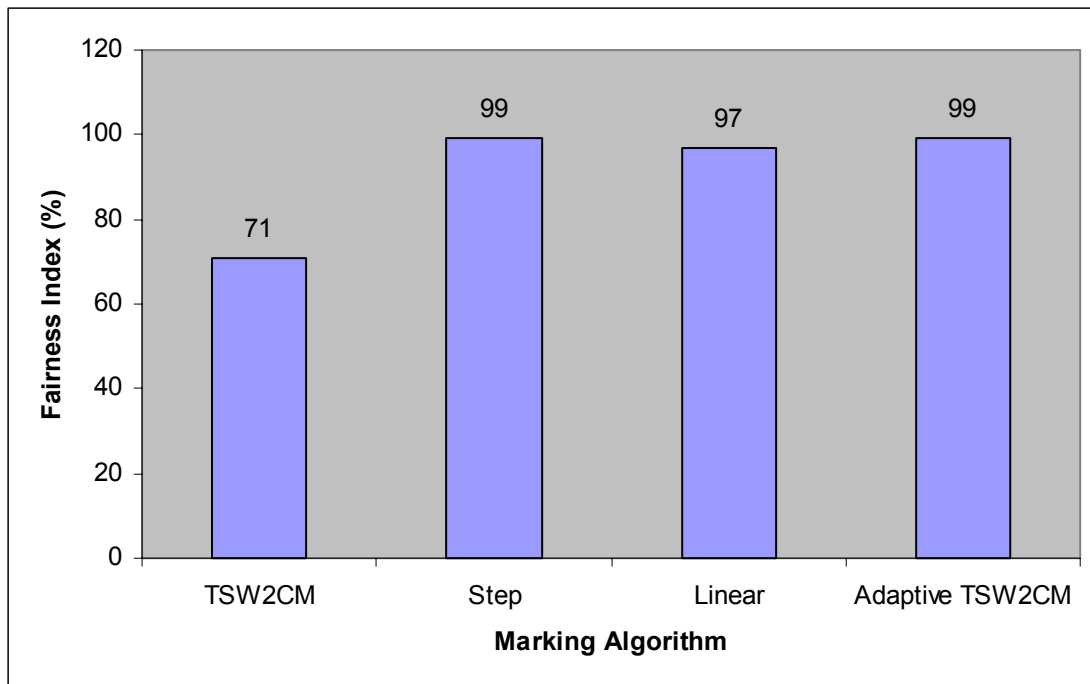


Διάγραμμα 1. TCP πηγές με διαφορετικά μεγέθη πακέτου. 5 πηγές με μέγεθος πακέτου 100bytes και 5 πηγές με μέγεθος πακέτου 1500bytes.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επιτυγχανόμενη ισότητα με χρήση των προσαρμοσίμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος, είναι σαφώς ανώτερη από την ισότητα που επιτυγχάνεται από τον απλό TSW2CM αλγόριθμο. Για να δώσουμε μια περιγραφική εξήγηση των επιδόσεων που αναγράφονται σε τιμές Fairness Index, εξηγούμε ότι με χρήση του απλού TSW2CM αλγόριθμος που επιτυγχάνει τιμή F.I. = 73%, οι πηγές με μέγεθος πακέτου 100bytes επιτυγχάνουν επιδόσεις throughput περίπου ίσες με 320kbps, ενώ οι πηγές με μέγεθος πακέτου 1500bytes, επιτυγχάνουν τιμές σε throughput περίπου ίσες με 660kbps (υπερδιπλάσιες), τη στιγμή που ιδανικά (για F.I.=100%) θα έπρεπε όλες οι πηγές να πετυχαίνουν τιμές σε throughput κοντά στα 500kbps ($500\text{kbps} \cdot 10\text{πηγές} = 5\text{Mbps}$ – θεωρητική χωρητικότητα του δικτύου). Το πρόβλημα σχεδόν εξαλείφεται με χρήση των προσαρμοσίμων αλγορίθμων, και κυρίως με χρήση των αλγορίθμων ‘Step’ και ‘Adaptive TSW2CM’ με τους οποίους οι πηγές με 100bytes πακέτο επιτυγχάνουν throughput περίπου ίσο με 483kbps, και οι πηγές με 1500bytes πακέτο περίπου ίσο με 493kbps, δίνοντας τιμές Fairness της τάξης του 99%. Ελαφρώς μειωμένη είναι η απόδοση του αλγορίθμου ‘Linear’ του οποίου η ισότητα φτάνει στο επίπεδο του 95%.

5.2.2.2 TCP πηγές: Διαφορετικό αριθμός TCP ροών στα aggregates των πηγών

Μια άλλη παράμετρος που επηρεάζει την ισότητα μεταξύ των TCP πηγών και που εξετάζεται σε αυτή τη παράγραφο είναι ο διαφορετικός αριθμός των TCP ροών μεταξύ των aggregates των πηγών. Πηγές με μεγαλύτερο αριθμό ροών στο aggregate τους καταναλώνουν και μεγαλύτερο κομμάτι της δικτυακής χωρητικότητας. Για την εξέταση της παραμέτρου αυτής, εκτελούμε πείραμα στο οποίο οι 5 TCP πηγές παράγουν ένα aggregate από 5 TCP ροές, και οι υπόλοιπες 5 TCP πηγές παράγουν ένα aggregate από 100 TCP ροές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα 2.

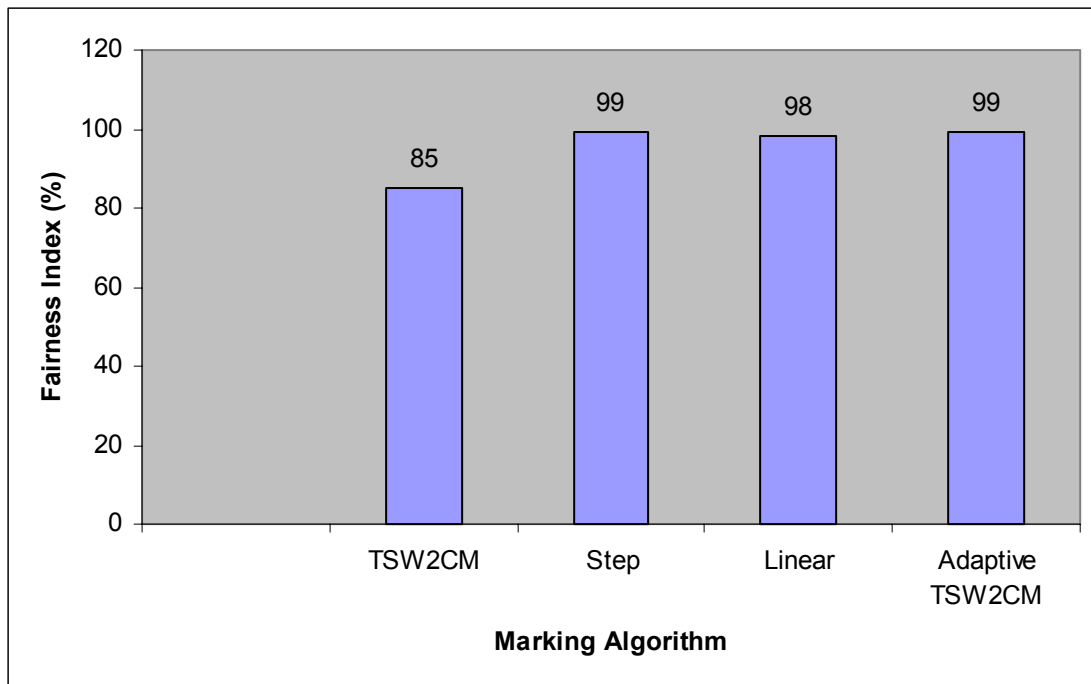


Διάγραμμα 2. TCP πηγές με διαφορετικό αριθμός ροών ανά aggregate. 5 πηγές με 5 TCP ροές στο aggregate, και 5 πηγές με 100 TCP ροές

Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα είναι παρόμοια με προηγουμένως, και δείχνουν ότι και σε αυτή τη περίπτωση η απόδοση των προσαρμοσμένων αλγορίθμων μαρκαρίσματος είναι κατά πολύ ανώτερες του απλού TSW2CM αλγόριθμου, και η ισότητα που επιτυγχάνουν πλησιάζει την ιδανική.

5.2.2.3 TCP πηγές: Διαφορετικά Round Trip Times (RTTs)

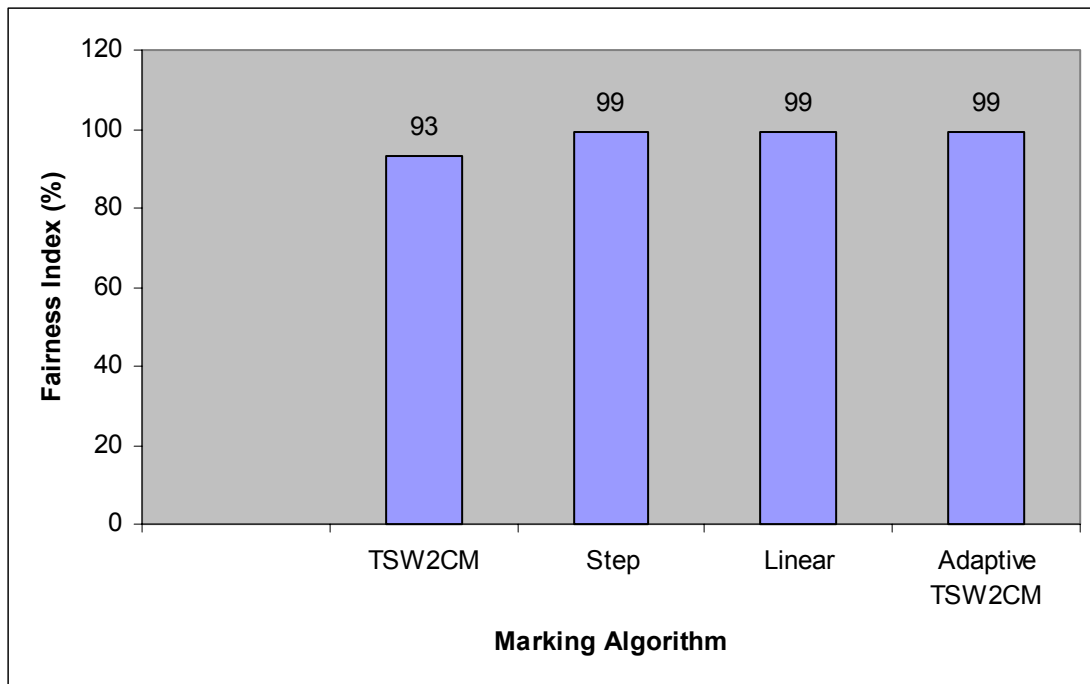
Σε αυτό το πείραμα εξετάζουμε την ισότητα μεταξύ TCP πηγών με διαφορετικά RTTs. Πηγές με μεγαλύτερα RTTs, αυξάνουν με μικρότερο ρυθμό το μέγεθος του TCP congestion window, καθώς απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος για την άφιξη των επιβεβαιώσεων, και έτσι οι πηγές με μικρότερα RTTs επωφελούνται και επιτυγχάνουν υψηλότερους τελικούς ρυθμούς. Ελέγχουμε την επίδραση των διαφορετικών RTTs, ρυθμίζοντας τις καθυστερήσεις διάδοσης στους συνδέσμους, θέτοντας την συνολική καθυστέρηση διάδοσης για πέντε πηγές ίση με 7msec, και των υπόλοιπων πέντε ίση με 107msec. Το διάγραμμα 3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος, τα συμπεράσματα από τα οποία είναι όμοια με προηγουμένως.



Διάγραμμα 3. TCP πηγές με διαφορετικά RTTs. 5 πηγές με 7msec propagation delay και 5 πηγές με 107msec

5.2.2.4 TCP πηγές: Διαφορετική έκδοση του TCP πρωτοκόλλου (TCP Stack)

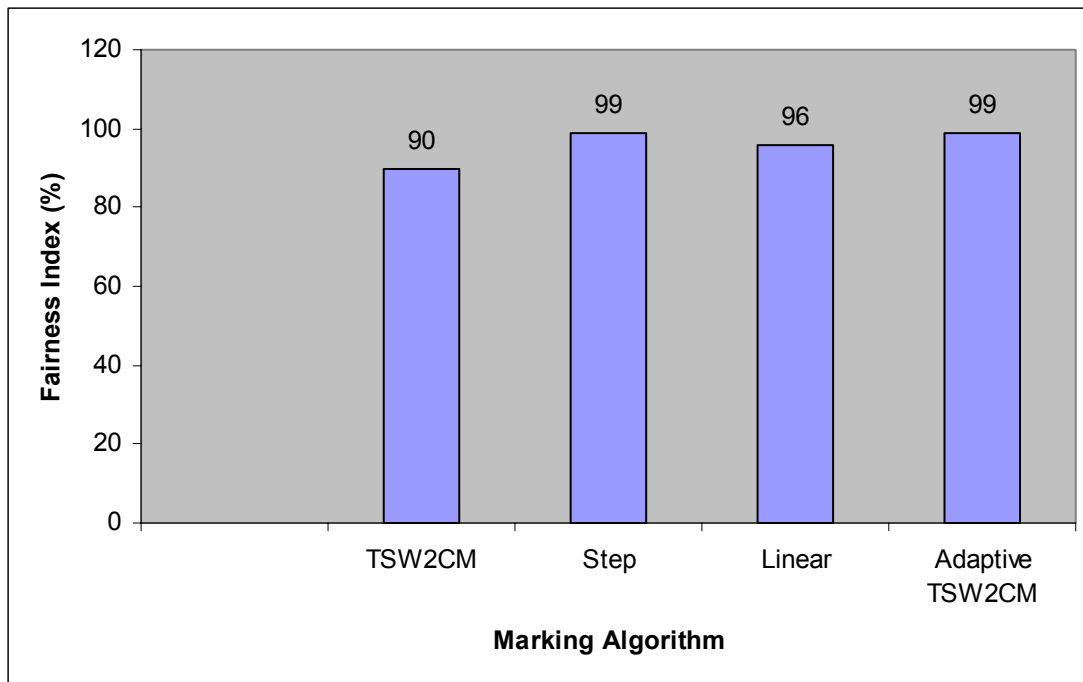
Οι διάφορες εκδόσεις του TCP που έχουν προταθεί κατά καιρούς (Tahoe, Reno, Sack, κ.λ.π.) αντιμετωπίζουν με διαφορετικό τρόπο την απώλεια ενός πακέτου, μεταβάλλοντας η καθεμιά με διαφορετικό τρόπο το ρυθμό αποστολής που καθορίζεται από το μέγεθος του congestion window. Έτσι μεταξύ πηγών που χρησιμοποιούν διαφορετικές εκδόσεις TCP, παρατηρείται ανισότητα που εξετάζουμε σε αυτήν την παράγραφο. Ορίζουμε για πέντε πηγές να χρησιμοποιούν TCP Sack, και αφήνουμε τις υπόλοιπες πέντε να χρησιμοποιούν TCP Tahoe. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα 3, όπου και πάλι φαίνεται ότι οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος επιτυγχάνουν το στόχο τους.



Διάγραμμα 4. Διαφορετική έκδοση TCP πρωτοκόλλου. 5 πηγές TCP Sack και 5 πηγές TCP Tahoe

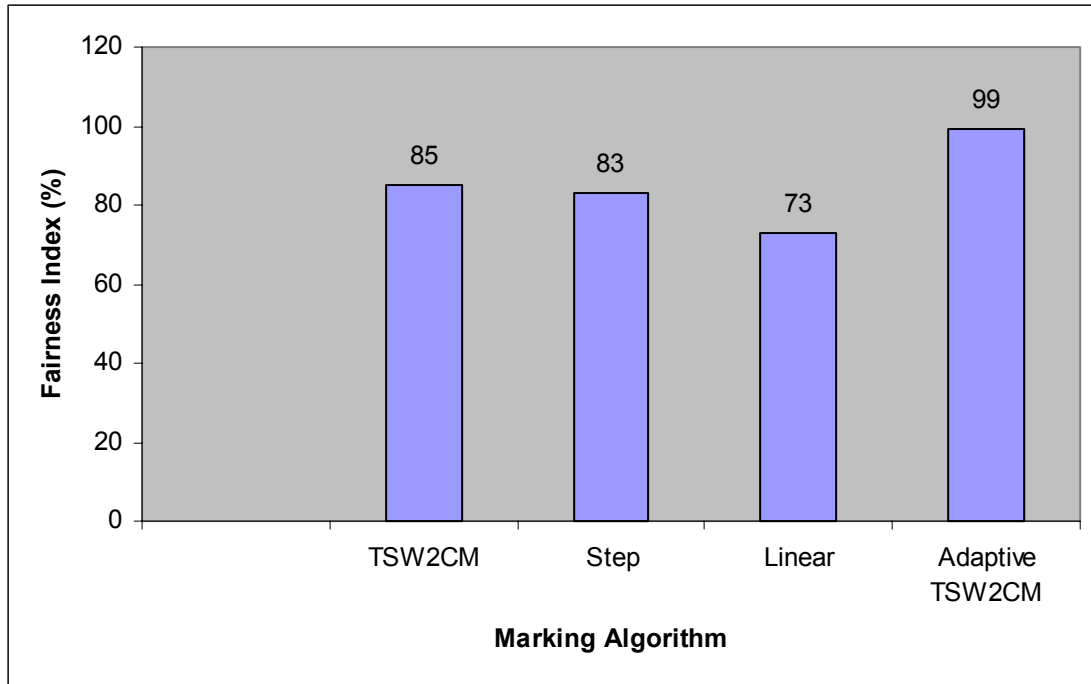
5.2.2.5 TCP πηγές: Διαφορετικά Target Rates

Μεταξύ TCP πηγών με διαφορετικά Target Rates, οι πηγές με χαμηλότερο Target Rate καταναλώνουν μεγαλύτερο ποσοστό του επιπλέον εύρους ζώνης, καθώς μετά την απώλεια ενός πακέτου και τη μείωση του congestion window, θέλουν λιγότερο χρόνο για να αυξήσουν ξανά το ρυθμό τους στα επίπεδα του Target Rate τους. Στο διάγραμμα 5, φαίνονται τα αποτελέσματα ενός πειράματος που εξετάζει την περίπτωση διαφορετικών Target Rates μεταξύ TCP πηγών, κατά το οποίο πέντε πηγές έχουν Target Rate 100kbps, και οι άλλες πέντε 400kbps. Τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα είναι όμοια με προηγουμένως.



Διάγραμμα 5. TCP πηγές με διαφορετικά Target Rates. 5 πηγές με 100kbps Target Rate και 5 πηγές με 400kbps

Ανάλογα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα περισσότερα σενάρια διαφορετικών Target Rates. Υπάρχουν ωστόσο σενάρια, στα οποία η απόδοση ορισμένων αλγορίθμων είναι μειωμένη, καταδεικνύοντας κάποιες αδυναμίες. Μια τέτοια περίπτωση είναι αυτή που παρουσιάζουμε στο επόμενο πείραμα, όπου πέντε πηγές έχουν 100kbps Target Rate, και πέντε πηγές 700kbps. Σε τέτοια 'δύσκολα' σενάρια, όπου υπάρχει μεγάλη διαφορά στα Target Rates, και το περισευούμενο εύρος ζώνης είναι σχετικά περιορισμένο (στο σενάριο αυτό, αντιστοιχούν επιπλέον 100kbps σε κάθε πηγή) παρουσιάζονται αποτελέσματα ανάλογα αυτών που φαίνονται στο διάγραμμα 6.



Διάγραμμα 6. TCP πηγές με διαφορετικά Target Rates. 5 πηγές με 100kbps Target Rate και 5 πηγές με 700kbps

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι στο σενάριο αυτό η απόδοση των αλγορίθμων Step και Linear, είναι αισθητά μειωμένη, και μάλιστα είναι χειρότερη από την απόδοση του απλού TSW2CM αλγορίθμου.

Στα σενάρια αυτά γίνεται αισθητή η επίδραση του γεγονότος ότι το μαρκάρισμα στους ακραίους δρομολογητές, βασίζεται σε μετρήσεις μέσου ρυθμού οι οποίες δεν είναι ακριβείς καθώς οι ακραίοι δρομολογητές δεν έχουν γνώση για τις απώλειες πακέτων στο κέντρο του δικτύου, με αποτέλεσμα να υπολογίζουν υψηλότερο throughput από το πραγματικό. Το γεγονός αυτό, επηρεάζει περισσότερο τις πηγές με υψηλότερα Target Rates, προκαλώντας επιπλέον ανισότητα εις βάρος τους. Αυτό συμβαίνει γιατί η διαφορά του πραγματικού throughput από το throughput που υπολογίζουν οι TSW μετρητές μέσου ρυθμού στους ακραίους δρομολογητές, είναι μεγαλύτερη για μεγαλύτερα Target Rates. Για να γίνει κατανοητό αυτό, επεξηγήσουμε τι περίπου συμβαίνει στο σενάριο του διαγράμματος 6.

Το επιπλέον εύρος ζώνης του δικτύου ($Capacity - \sum Target Rates$) στο σενάριο αυτό ισούται με 1Mbps το οποίο ιδανικά μοιράζεται ισόποσα στις 10 πηγές (Fair Share = 100kbps), με αποτέλεσμα οι πηγές με 100kbps Target Rate να πρέπει να λάβουν συνολικά 200kbps, και οι πηγές με 700kbps Target Rate συνολικά 800kbps. Όπως θα εξηγήσουμε αναλυτικά σε επόμενες παραγράφους, οι συναρτήσεις μαρκαρίσματος χρησιμοποιούν τέτοιες παραμέτρους, ώστε να προστατεύουν πέραν του Target Rate, και το μερίδιο του επιπλέον εύρους ζώνης κάθε πηγής, ξεκινώντας το μαρκάρισμα πακέτων σαν OUT, περίπου όταν ο μετρούμενος ρυθμός ξεπεράσει την τιμή Target Rate + Fair Share (στην περίπτωση μας 200kbps και 800kbps για τους δύο τύπους πηγών). Έστω ότι αυτές είναι ακριβώς οι τιμές, πέρα από τις οποίες ξεκινάει το μαρκάρισμα πακέτων σαν OUT (βέλτιστη τιμή παραμέτρου = Fair Share = 100kbps). Το πρόβλημα όμως είναι ότι οι μετρήσεις μέσου ρυθμού στους ακραίους δρομολογητές, βάσει των οποίων λαμβάνονται οι αποφάσεις μαρκαρίσματος, δεν είναι ακριβείς γιατί οι μετρητές δεν λαμβάνουν γνώση για τις απώλειες πακέτων στο

κέντρο του δικτύου. Έτσι, έστω ότι για τις πηγές με Target Rate 700kbps, κάποια στιγμή οι μετρητές μετράνε ένα μέσο ρυθμό ίσο με 824kbps > 800kbps ξεκινώντας έτσι να μαρκάρουν πακέτα σαν OUT, τη στιγμή που ο πραγματικός ρυθμός είναι μόλις 776kbps (6% πιθανότητα απώλειας) < 800kbps. Από την άλλη μεριά για τις πηγές με 100kbps Target Rate, που παρατηρούν απώλειες της τάξης του 9,5% (η πιθανότητα απώλειας είναι μεγαλύτερη για τις πηγές με μικρότερα Target Rates γιατί εισάγουν αναλογικά περισσότερα OUT πακέτα), έστω ότι οι μετρητές μετράνε ένα μέσο ρυθμό περίπου ίσο με 224kbps τη στιγμή που ο πραγματικός ρυθμός είναι 203kbps. Επειδή η μετρούμενη τιμή (224kbps) είναι μεγαλύτερη από το όριο των 200kbps τα πακέτα και σε αυτή τη περίπτωση μαρκάζονται σαν OUT με μια πιθανότητα που εξαρτάται από την συνάρτηση μαρκαρίσματος. Επειδή οι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος Step και Linear, λαμβάνουν τις αποφάσεις μαρκαρίσματος βασιζόμενοι μόνο στην απόσταση του μετρούμενου μέσου ρυθμό από το όριο μαρκαρίσματος, χωρίς να λαμβάνουν υπ' όψιν τις ακριβείς τιμές των μετρήσεων, η πιθανότητα μαρκαρίσματος σαν OUT στις δύο περιπτώσεις είναι η ίδια (οι μετρήσεις δίνουν 824kbps και 224kbps, τα οποία απέχουν εξίσου – 24kbps – από τα όρια των 800kbps και 200kbps αντίστοιχα). Στη πρώτη περίπτωση όμως ο πραγματικός ρυθμός είναι 776kbps, ενώ στη δεύτερη 203 kbps, παρότι δηλαδή οι πηγές των υψηλών Target Rate βρίσκονται μακριά από το στόχο των 800kbps, τη στιγμή που οι πηγές των χαμηλών Target Rate έχουν ήδη ξεπεράσει το δικό τους στόχο των 200kbps, εντούτοις όλες οι πηγές τιμωρούνται το ίδιο καθώς έχουν την ίδια πιθανότητα μαρκαρίσματος των πακέτων τους σαν OUT.

Το γεγονός αυτό, δημιουργεί επιπλέον ανισότητα εις βάρος των πηγών με υψηλά Target Rate, η οποία δεν αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά από τους αλγόριθμους Step και Linear, και έτσι οι αλγόριθμοι αυτοί εμφανίζουν μειωμένη απόδοση σε ορισμένες περιπτώσεις σαν και αυτή που παρουσιάσαμε.

Από την άλλη μεριά, παρατηρούμε ότι η απόδοση του Adaptive TSW2CM αλγόριθμου παραμένει εξίσου υψηλή και σε τέτοιου είδους πειράματα. Αυτό συμβαίνει γιατί η συνάρτηση μαρκαρίσματος του αλγόριθμου αυτού, διαφοροποιεί τις πηγές με διαφορετικά Target Rates, κατά τις αποφάσεις μαρκαρίσματος, ευνοώντας τις πηγές με υψηλά Target Rates, βοηθώντας τις έτσι να ξεπεράσουν το πρόβλημα που δημιουργείται με του άλλους δύο αλγόριθμους. Γυρνώντας στο παράδειγμα που περιγράψαμε προηγουμένως όπου οι μετρούμενοι ρυθμοί είναι 824kbps και 224kbps στους δύο τύπου πηγών, και που με τους αλγόριθμους Step και Linear έχουν ίδια πιθανότητα μαρκαρίσματος σαν OUT, με χρήση του Adaptive TSW2CM αλγόριθμου οι πιθανότητες μαρκαρίσματος διαφοροποιούνται. Σύμφωνα με την συνάρτηση μαρκαρίσματος του αλγόριθμου αυτού, η πιθανότητα μαρκαρίσματος σαν OUT για τις πηγές με 700kbps Target Rate, είναι ίση με

$$\frac{824kbps - 700kbps - 100kbps}{824kbps - 100kbps} = \frac{24}{724} \approx 0.03$$

ενώ για τις πηγές των 100kbps Target Rate η αντίστοιχη πιθανότητα ισούται με

$$\frac{224kbps - 100kbps - 100kbps}{224kbps - 100kbps} = \frac{24}{124} \approx 0.2.$$

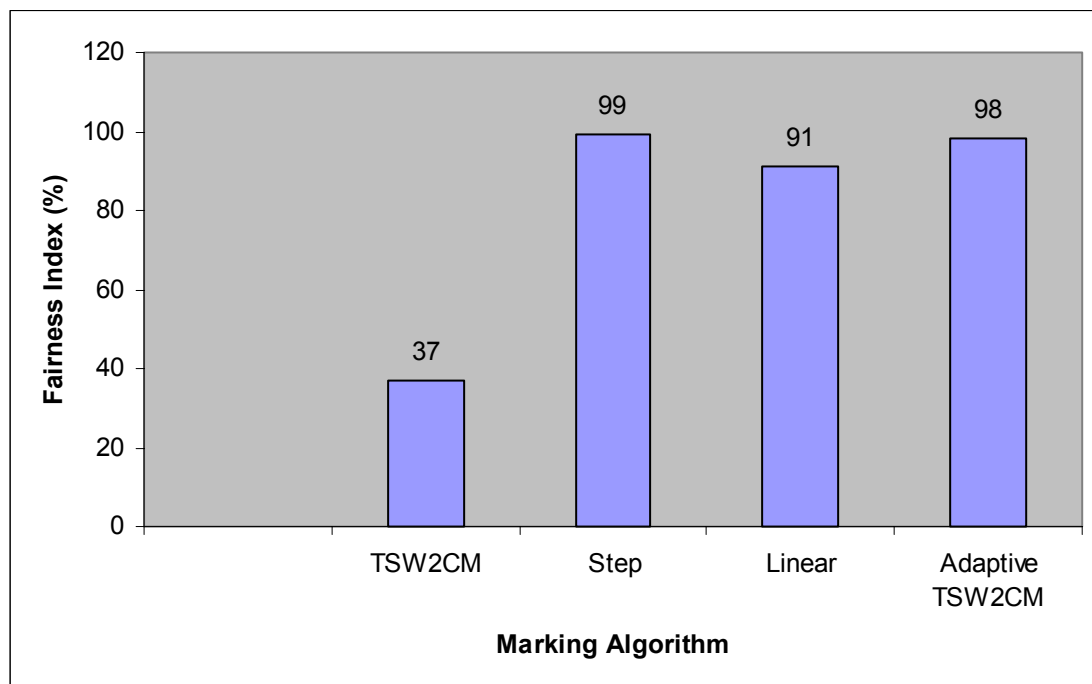
Παρατηρούμε δηλαδή ότι με χρήση αυτού του αλγόριθμου η πιθανότητα μαρκαρίσματος σαν OUT είναι μικρότερη για τις πηγές με υψηλά Target Rates, και λόγω αυτού του γεγονότος, αντιμετωπίζονται τα προβλήματα που εμφανίζονται λόγω των ανακριβών μετρήσεων μέσου ρυθμού, με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος αυτός να εμφανίζει και σε αυτές τις περιπτώσεις υψηλή απόδοση.

Η απόδοση του αλγόριθμου Linear, η οποία είναι σε αυτή τη περίπτωση η χειρότερη μεταξύ όλων των αλγόριθμων, βελτιώνεται αν αυξήσουμε την κλίση της

γραμμικής συνάρτησης μαρκαρίσματος, αυξάνοντας δηλαδή την τιμή της σταθεράς d (βλ. π. 5.2.1), προσεγγίζοντας σταδιακά την απόδοση του αλγορίθμου Step – όπως έχουμε εξηγήσει νωρίτερα η συνάρτηση μαρκαρίσματος του αλγορίθμου Linear προσεγγίζει αυτήν του αλγορίθμου Step όσο αυξάνει η τιμή της σταθεράς d . Σε επόμενη παράγραφο αναλύουμε εκτενέστερα το θέμα της κλίσης της συνάρτησης Linear, και εξηγούμε τους λόγους που δεν επιλέγουμε μεγαλύτερη τιμή για αυτή.

5.2.2.6 TCP πηγές: Διαφορετικά μεγέθη πακέτου και διαφορετικός αριθμός ροών στα aggregates των πηγών

Στη παράγραφο αυτή, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα ενός πιο πολύπλοκου σεναρίου, όπου οι πηγές παρουσιάζουν διαφορές σε περισσότερους του ενός παραμέτρους. Ορίζουμε πέντε πηγές με 5 TCP ροές στο aggregate και μέγεθος πακέτου 100bytes, τρεις άλλες πηγές με 5 TCP ροές στο aggregate και μέγεθος πακέτου 1500bytes, και τις τελευταίες δύο πηγές με 100 TCP ροές στο aggregate και μέγεθος πακέτου 1500bytes. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα 7. Επισημαίνουμε την ιδιαίτερα χαμηλή απόδοση που εμφανίζεται με χρήση του απλού TSW2CM αλγορίθμου, τη στιγμή που η απόδοση των προσαρμοσμένων αλγορίθμων παραμένει στα γνωστά υψηλά επίπεδα.

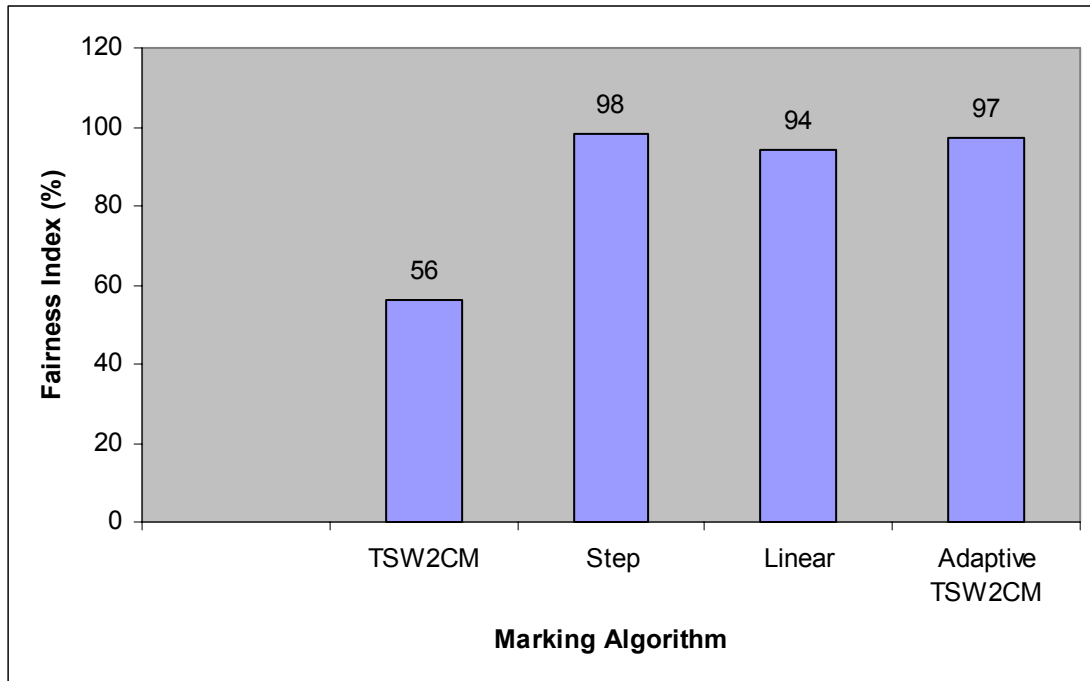


Διάγραμμα 7. TCP πηγές με διαφορές σε μεγέθη πακέτου και αριθμό ροών στα aggregates

5.2.2.7 TCP πηγές: Διαφορετικά μεγέθη πακέτου σε over-subscribed δίκτυο

Εξετάζουμε την περίπτωση over-subscribed δικτύου, όπου η δικτυακή χωρητικότητα δεν επαρκεί για να εξυπηρετήσει το σύνολο των Target Rates. Σ' αυτή τη περίπτωση η ισότητα έχει την έννοια ότι οι πηγές θα πρέπει να λάβουν ένα κομμάτι της δικτυακής χωρητικότητας, το οποίο θα είναι μικρότερο του Target Rate τους κατά μια ίση ποσότητα. Επιζητούμε δηλαδή ισόποση υποβάθμιση των throughputs των πηγών. Για το σκοπό αυτό θέτουμε όλα τα Target Rates στα

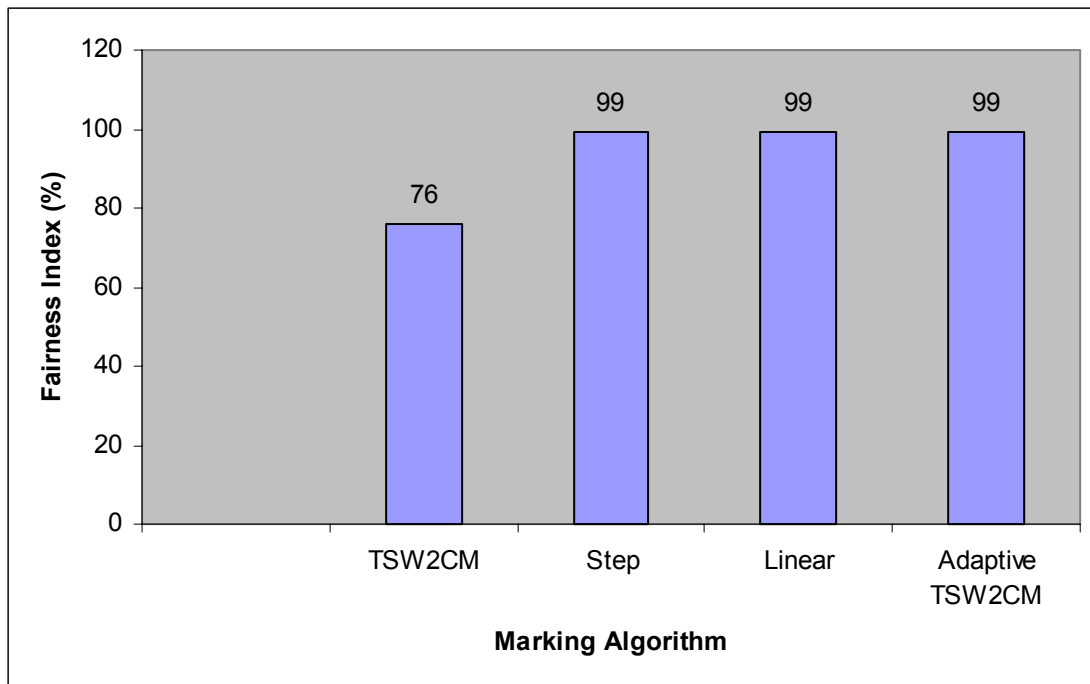
800Kbps (σύνολο 8Mbps δηλαδή, τη στιγμή που το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει το πολύ 5Mbps). Πέντε πηγές έχουν μέγεθος πακέτου 100bytes, και πέντε πηγές 1500bytes. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα 8, στο οποίο φαίνεται ότι και σε αυτή τη περίπτωση οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος είναι εξίσου αποτελεσματικοί.



Διάγραμμα 8. TCP πηγές με διαφορετικά μεγέθη πακέτου σε over-subscribed δίκτυο. 800kbps Target Rate για όλες τις πηγές, 5 πηγές με μέγεθος πακέτου 100bytes και 5 πηγές με μέγεθος πακέτου 1500bytes.

5.2.2.8 UDP πηγές: Διαφορετικοί ρυθμοί αποστολής

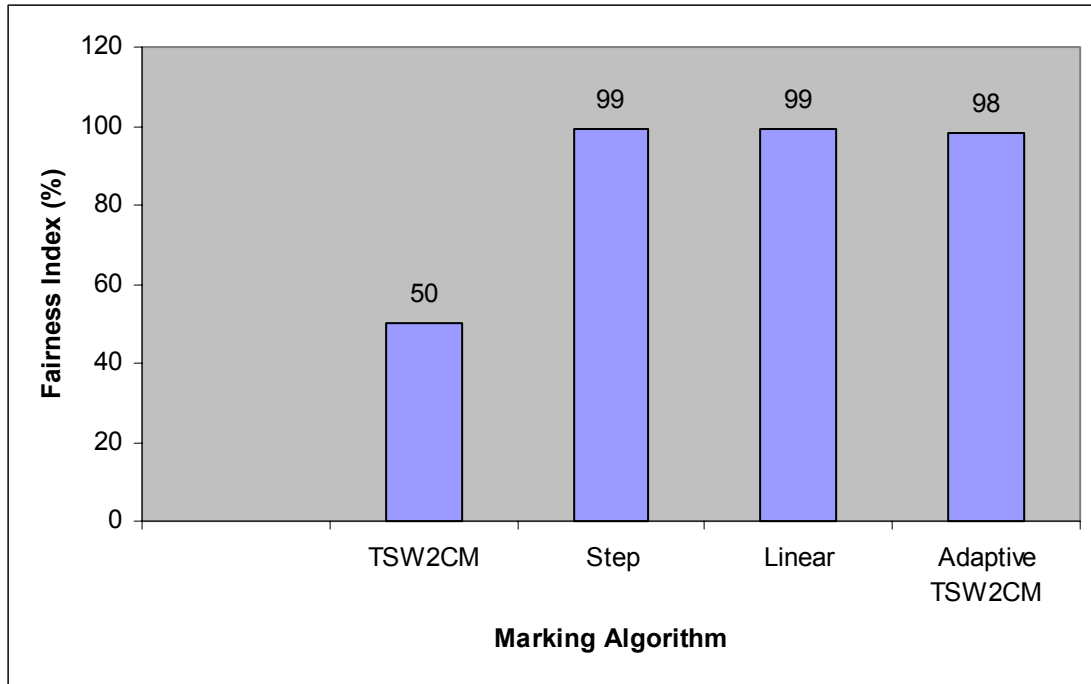
Μεταξύ UDP πηγών με διαφορετικούς ρυθμούς αποστολής, οι πηγές με υψηλότερους ρυθμούς εισάγουν περισσότερα ΟΥΤ πακέτα, με αποτέλεσμα να καταναλώνουν μεγαλύτερο ποσοστό του επιπλέον εύρους ζώνης του δικτύου. Για να εξετάσουμε αυτή τη περίπτωση, θέτουμε τις δέκα πηγές να παράγουν UDP κίνηση. Πέντε πηγές παράγουν από 1 UDP ροή με ρυθμό αποστολής 600kbps, και πέντε πηγές παράγουν από 1 UDP ροή με ρυθμό 2Mbps. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα 9, το οποίο δείχνει ότι οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος είναι εξίσου αποτελεσματικοί στις περιπτώσεις ετερογενών UDP πηγών.



Διάγραμμα 9. UDP πηγές με διαφορετικούς ρυθμούς αποστολής. 5 πηγές με 600kbps ρυθμό αποστολής και 5 πηγές με 2Mbps

5.2.2.9 Αλληλεπίδραση UDP και TCP πηγών

Όταν TCP πηγές αλληλεπιδρούν με UDP πηγές, παρατηρείται ανισότητα προς όφελος των UDP πηγών, οι οποίες δεν ελαττώνουν τον ρυθμό τους σε καταστάσεις συμφόρησης, σε αντίθεση με τις TCP πηγές. Η περίπτωση αυτή εξετάζεται σε αυτή τη παράγραφο με ένα πείραμα όπου πέντε πηγές παράγουν ένα τυπικό aggregate από 5 TCP ροές, και οι άλλες πέντε πηγές παράγουν από 1 UDP ροή με ρυθμό αποστολής 5Mbps. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα 10 και τα συμπεράσματα που βγαίνουν είναι ανάλογα με προηγουμένως.



Διάγραμμα 10. Αλληλεπίδραση TCP και UDP πηγών. 5 TCP πηγές και 5 UDP πηγές.

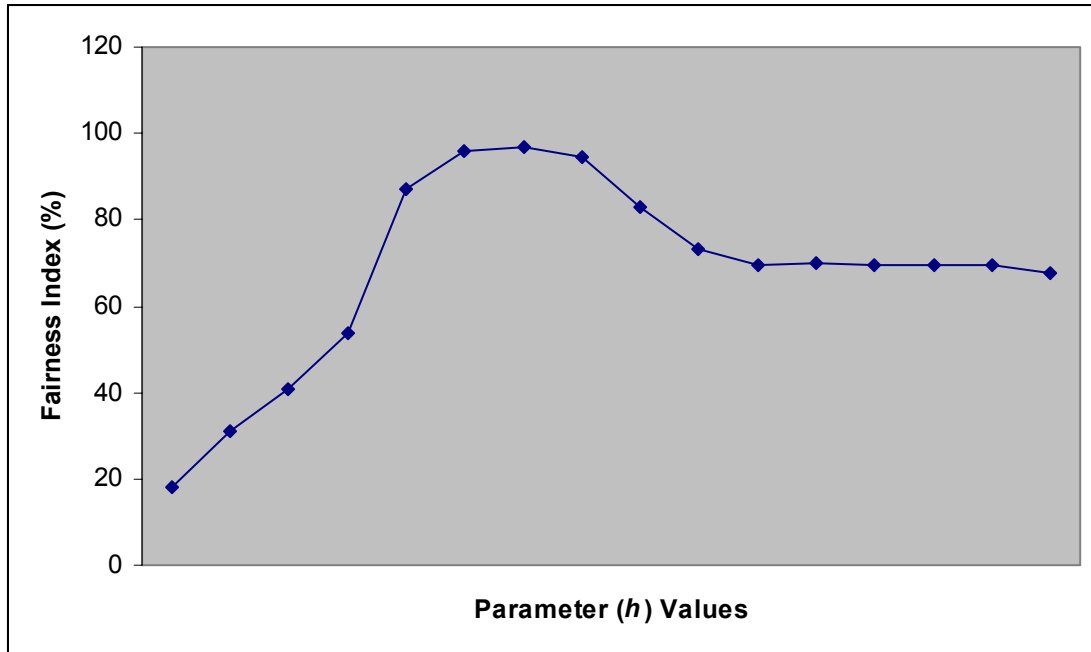
5.2.2.10 Συμπεράσματα πειραμάτων ελέγχου της μέγιστης ισότητας που επιτυγχάνουν οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος

Με τα παραπάνω πειράματα επιδείξαμε την αποτελεσματικότητα των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος, σε διάφορες καταστάσεις που ευνοούν την εμφάνιση φαινομένων ανισότητας. Είδαμε ότι με κατάλληλη επιλογή της παραμέτρου των συναρτήσεων μαρκαρίσματος, η απόδοσή των αλγορίθμων είναι γενικά πολύ υψηλή, και (γενικά) ανώτερη από την απόδοση του απλού TSW2CM αλγορίθμου. Παρατηρήσαμε ότι η απόδοση των αλγορίθμων Step και Adaptive TSW2CM, αγγίζει το τέλειο τις περισσότερες φορές, ενώ η απόδοση του αλγορίθμου Linear εμφανίζεται ελαφρώς κατώτερη. Σε ορισμένες περιπτώσεις διαφορετικών Target Rates, η απόδοση των αλγορίθμων Step και Linear είναι χειρότερη από τις συνηθισμένες επιδόσεις (χειρότερη και από την απόδοση του απλού TSW2CM αλγορίθμου), πράγμα που οφείλεται κυρίως στις ανακριβείς μετρήσεις μέσου ρυθμού στους ακραίους δρομολογητές, με βάση τις οποίες πραγματοποιείται το μαρκάρισμα. Οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει η συνάρτηση μαρκαρίσματος του αλγορίθμου Adaptive TSW2CM, έχουν σαν αποτέλεσμα η απόδοση αυτού του αλγορίθμου να μην επηρεάζεται από τον παράγοντα αυτόν όπως οι υπόλοιποι αλγόριθμοι, και έτσι διατηρεί την απόδοσή του σε υψηλά επίπεδα σε όλες τις περιπτώσεις.

5.2.3 Εντοπισμός βέλτιστης τιμής της παραμέτρου των συναρτήσεων μαρκαρίσματος

Μιλήσαμε στις προηγούμενες παραγράφους για την απόδοση των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος, όταν χρησιμοποιείται κάποια βέλτιστη τιμή της παραμέτρου (h) των συναρτήσεων μαρκαρίσματος. Σε αυτή τη παράμετρο εξετάζουμε το ζήτημα του εντοπισμού τέτοιων βέλτιστων τιμών.

Προκειμένου να βγάλουμε συμπεράσματα για τη θέση των βέλτιστων τιμών, μελετάμε τη μεταβολή της απόδοσης των προσαρμόσιμων αλγορίθμων όταν μεταβάλλεται η τιμή της παραμέτρου h . Η γραφική παράσταση που προκύπτει έχει τη γενική μορφή που δείχνει το διάγραμμα 11.



Διάγραμμα 11. Απόδοση των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος για διάφορες τιμές της παραμέτρου (h)

Από το διάγραμμα 11, παρατηρούμε ότι η απόδοση των αλγορίθμων (σε επιτυγχάνομενη ισότητα) αυξάνοντας την τιμή της παραμέτρου, αυξάνεται αρχικά ομαλά μέχρι ένα σημείο όπου δημιουργείται ένα διάστημα μέγιστων τιμών, και στη συνέχεια η απόδοση πέφτει ομαλά μέχρι ενός σημείου μέχρι να σταθεροποιηθεί. Οι τιμές των παραμέτρων στο διάστημα που η απόδοση μεγιστοποιείται, αποτελούν ένα σύνολο από βέλτιστες τιμές παραμέτρου, τις οποίες θέλουμε να μπορούμε να εντοπίζουμε σε κάθε διαφορετικό σενάριο.

Στα πειράματα που παρουσιάσαμε στις προηγούμενες παραγράφους, εντοπίσαμε τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων με τυχαίες δοκιμές. Παρατηρήσαμε ότι οι βέλτιστες αυτές τιμές βρίσκονται σε κάποιο σημείο κοντά στην τιμή που εκφράζει το δίκαιο μερίδιο (Fair Share) πέραν του Target Rate που αντιστοιχεί σε κάθε πηγή. Αυτό ήταν κάτι που αναμέναμε εκ των προτέρων να συμβεί, καθώς γνωρίζουμε ότι σε όλους τους προσαρμόσιμους αλγορίθμους μαρκαρίσματος, το μαρκάρισμα των πακέτων σαν OUT, ξεκινάει όταν ο μετρούμενος μέσος ρυθμός των πακέτων ξεπεράσει την τιμή “Target Rate + h ”, όπου h είναι η εκάστοτε επιλεγμένη τιμή της παραμέτρου. Έτσι, περιμέναμε ότι επιλογή μιας τιμής κοντά στην τιμή

$$\text{Fair Share} = \frac{\text{Capacity} - \sum \text{Target Rates}}{\text{Number of Sources}} \quad (\text{εξ. (2), π. 2.3.1.5.1}), \text{ που θα έχει ως}$$

αποτέλεσμα τα πακέτα, με ρυθμό όχι μεγαλύτερο από (περίπου) “Target Rate + Fair Share”, να μαρκάρονται πάντα σαν IN, και έτσι πέραν του Target Rate να προστατεύεται επιπλέον και το Fair Share κάθε πηγής, θα δίνει βέλτιστη απόδοση. Τα πειράματα μας επιβεβαίωσαν ότι όντως συμβαίνει κάτι τέτοιο.

Αφού βεβαιωθήκαμε ότι οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων βρίσκονται σε κάποιο σημείο κοντά στην τιμή Fair Share, το επόμενο ερώτημα που κληθήκαμε να εξετάσουμε είναι ποια είναι η απόδοση των αλγορίθμων, όταν επιλέγεται η ακριβής τιμή Fair Share, όπως προκύπτει από τον θεωρητικό τύπο $\frac{Capacity - \sum Target Rates}{Number of Sources}$. Παρατηρώντας από το διάγραμμα 11, ότι η απόδοση

μεταβάλλεται ομαλά και σταδιακά συναρτήσει της τιμής της παραμέτρου, και αφού γνωρίζουμε πλέον ότι η τιμή αυτή εντοπίζεται κάπου κοντά στις βέλτιστες, τότε πιθανώς η απόδοση με την τιμή αυτή να είναι εξίσου υψηλή. Αν όντως η απόδοση των αλγορίθμων με χρήση αυτής της τιμής της παραμέτρου είναι κοντά στην βέλτιστη, τότε θα μπορούσαμε να χρησιμοποιούμε την τιμή αυτή σε κάθε σενάριο κίνησης, έχοντας έτσι τη δυνατότητα του εκ των προτέρων υπολογισμού μιας βέλτιστης τιμής της παραμέτρου, εφ' όσον γνωρίζουμε την δικτυακή χωρητικότητα, τον αριθμό και το σύνολο των Target Rates των πηγών που εισάγουν κίνηση κάθε στιγμή στο δίκτυο.

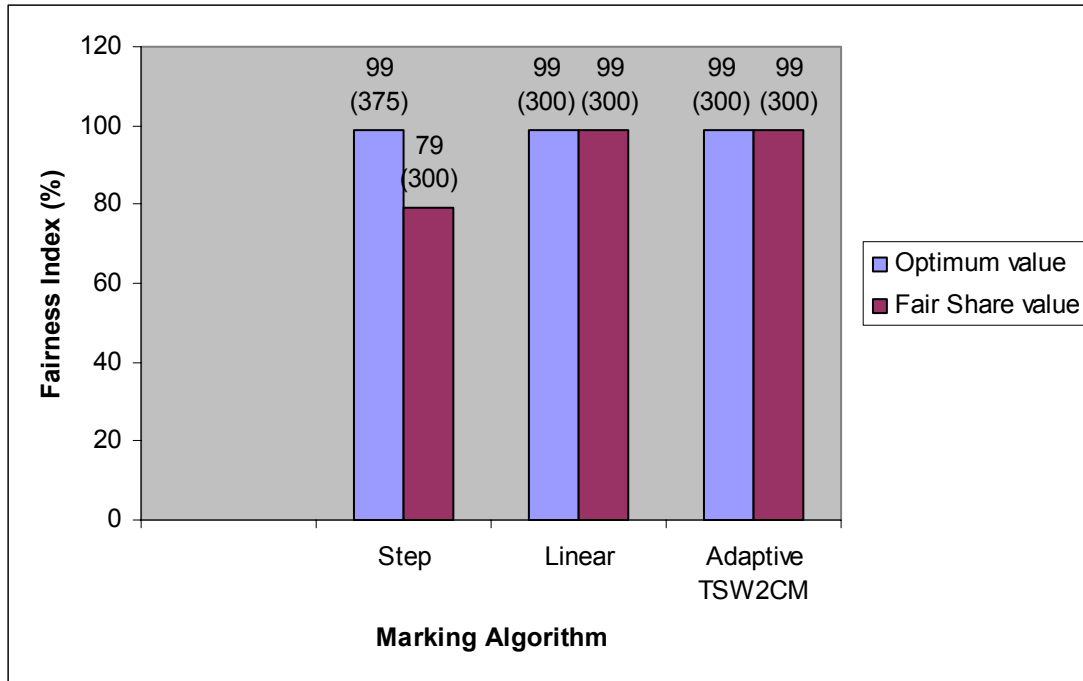
Προκειμένου να επιβεβαιώσουμε αν ισχύει το παραπάνω, επαναλαμβάνουμε τα πειράματα που περιγράψαμε στις προηγούμενες παραγράφους 5.2.2.1 μέχρι 5.2.2.9 (όπου χρησιμοποιούνται βέλτιστες τιμές των παραμέτρων) χρησιμοποιώντας τώρα την θεωρητικά υπολογισμένη "Fair Share" τιμή ως τιμή της παραμέτρου, και συγκρίνουμε την απόδοση που προκύπτει με την βέλτιστη, προκειμένου να διαπιστώσουμε αν και κατά πόσο είναι κοντά. Παρακάτω παρουσιάζουμε τα πιο σημαντικά πειράματα, με βάση τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματά τους.

5.2.3.1 Επιλογή τιμής της παραμέτρου: Διαφορετικοί ρυθμοί αποστολής μεταξύ UDP πηγών.

Εξετάζουμε ξανά το σενάριο των διαφορετικών ρυθμών αποστολής μεταξύ UDP πηγών (βλ. π. 5.2.2.8) συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της απόδοσης, με τα αποτελέσματα που προκύπτουν με χρήση της τιμής "Fair Share" ως τιμής της παραμέτρου. Έχουμε δέκα πηγές με Target Rate 200kbps η κάθε μια, οπότε ο τύπος για το δίκαιο μερίδιο κάθε πηγής δίνει:

$$Fair\ Share = \frac{Capacity - \sum Target\ Rates}{Number\ of\ Sources} = \frac{5Mbps - 10 * 200kbps}{10} = 300kbps$$

Το διάγραμμα 12 δείχνει την απόδοση για τους τρεις προσαρμόσιμους αλγορίθμους μαρκαρίσματος, όταν χρησιμοποιείται η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου και επιπλέον όταν χρησιμοποιείται η τιμή Fair Share, όπως υπολογίστηκε πριν. Σε παρένθεση αναγράφεται η ακριβής τιμή της παραμέτρου (εκφρασμένη σε kbps) που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση



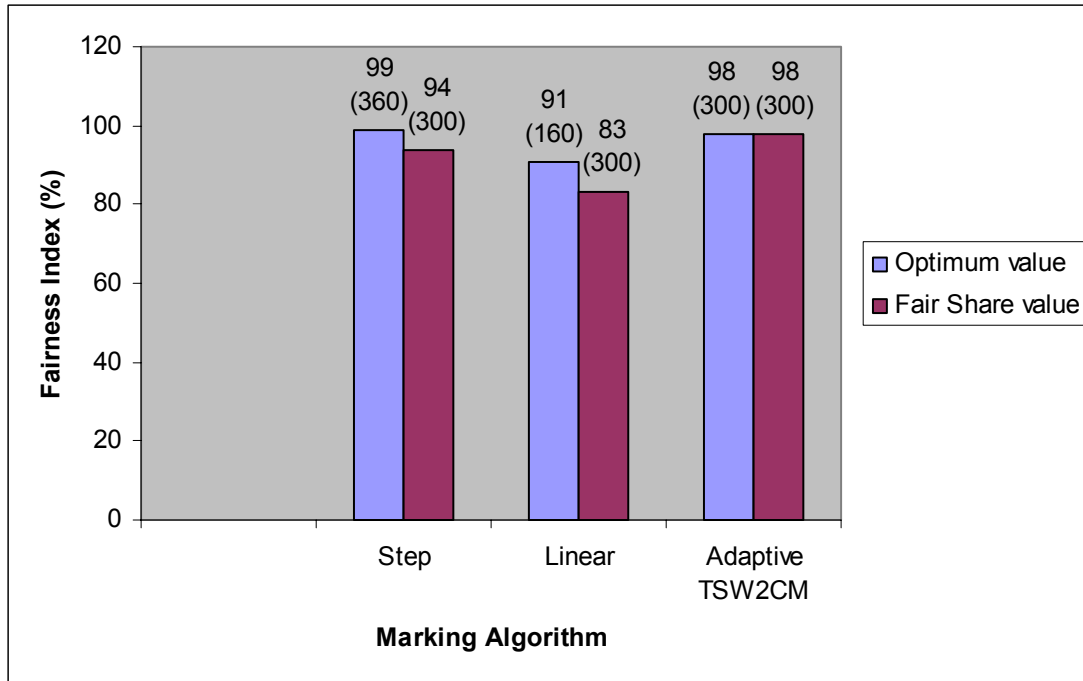
Διάγραμμα 12. UDP πηγές με διαφορετικούς ρυθμούς αποστολής. Απόδοση των αλγορίθμων με βέλτιστη τιμή της παραμέτρου, και με την θεωρητικά υπολογισμένη Fair Share τιμή. Σε παρένθεση αναφέρεται η ακριβής τιμή της παραμέτρου (σε kbps) που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για τον Step αλγόριθμο, με επιλογή τιμής της παραμέτρου 375kbps, ο αλγόριθμος παρουσιάζει βέλτιστη απόδοση δίνοντας ισότητα της τάξης του 99%. Αντίθετα με επιλογή της Fair Share τιμής 300kbps, η απόδοση του αλγορίθμου είναι αισθητά μικρότερη, δίνοντας ισότητα μόλις 79%. Επομένως για τον αλγόριθμο αυτόν, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η χρήση της τιμής “Fair Share” ως τιμή της παραμέτρου, έχει ως αποτέλεσμα η απόδοση του αλγορίθμου να είναι σημαντική μειωμένη σε σχέση με τη μέγιστη δυνατή. Επομένως, για τον αλγόριθμο αυτόν η επιλογή της ακριβούς τιμής “Fair Share” ως τιμή της παραμέτρου του (h) δεν είναι κατάλληλη.

Για τους αλγορίθμους Linear και Adaptive TSW2CM, παρατηρούμε ότι στο σενάριο αυτό, η ακριβής τιμή “Fair Share” αποτελεί μια βέλτιστη επιλογή παραμέτρου, οδηγώντας σε βέλτιστη απόδοση.

5.2.3.2 Επιλογή τιμής της παραμέτρου: Διαφορετικά μεγέθη πακέτου και διαφορετικός αριθμός ροών στα aggregates μεταξύ TCP πηγών

Στη παράγραφο αυτή, παρουσιάζουμε το πείραμα όπου TCP πηγές εμφανίζουν διαφορές σε μέγεθος πακέτου και αριθμό ροών στα aggregates (βλ. π. 5.2.2.6). Και πάλι συγκρίνουμε τη βέλτιστη απόδοση όπως την παρουσιάσαμε στη παράγραφο 5.2.2.6, με την απόδοση όταν χρησιμοποιείται η θεωρητικά υπολογισμένη τιμή του δίκαιου μεριδίου, η οποία και πάλι υπολογίζεται στα 300kbps. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα 13. Σε παρενθέσεις αναγράφονται, όπως και πριν, οι ακριβείς τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται σε κάθε πείραμα.



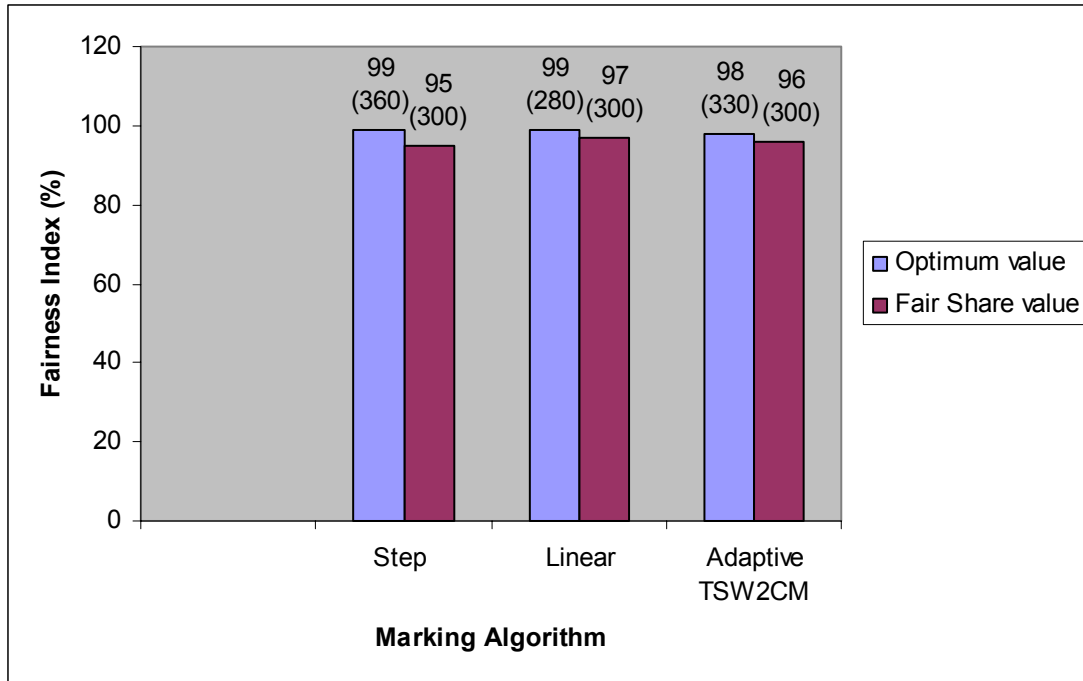
Διάγραμμα 13. TCP πηγές με διαφορετικό μέγεθος πακέτου και αριθμό ροών στα aggregates. Απόδοση των αλγορίθμων με βέλτιστη τιμή της παραμέτρου, και με την θεωρητικά υπολογισμένη Fair Share τιμή. Σε παρένθεση αναφέρεται η ακριβής τιμή της παραμέτρου (σε kbps) που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση

Στο σενάριο αυτό, παρατηρούμε ότι τόσο για τον αλγόριθμο Step όσο και για τον αλγόριθμο Linear, εμφανίζονται σημαντικές διαφορές στην απόδοση όταν χρησιμοποιείται η “Fair Share” τιμή της παραμέτρου, σε σχέση με την βέλτιστη. Επομένως, από το πείραμα αυτό συμπεραίνουμε επιπλέον, ότι και για τον αλγόριθμο Linear ισχύει αυτό που διαπιστώσαμε στο προηγούμενο πείραμα για τον αλγόριθμο Step, ότι δηλαδή υπάρχουν περιπτώσεις όπου η χρήση της “Fair Share” τιμής ως τιμή της παραμέτρου, οδηγεί σε αισθητά μειωμένη απόδοση, και ως εκ τούτου δεν είναι η πλέον κατάλληλη.

Από την άλλη για το αλγόριθμο Adaptive TSW2CM παρατηρούμε ότι και σε αυτό το πείραμα η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου συμπίπτει με την “Fair Share” τιμή.

5.2.3.3 Επιλογή τιμής της παραμέτρου: Αλληλεπίδραση UDP και TCP πηγών

Μια τελευταία περίπτωση που παρουσιάζουμε είναι το πείραμα όπου αλληλεπιδρούν UDP και TCP πηγές (βλ. π. 5.2.2.9). Όπως και πριν, συγκρίνουμε τις αποδόσεις με βέλτιστη τιμή παραμέτρου και την “Fair Share” τιμή – 300kbps και πάλι. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα 14.



Διάγραμμα 14. Αλληλεπίδραση UDP και TCP πηγών. Απόδοση των αλγορίθμων με βέλτιστη τιμή της παραμέτρου, και με την θεωρητικά υπολογισμένη Fair Share τιμή. Σε παρένθεση αναφέρεται η ακριβής τιμή της παραμέτρου (σε kbps) που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση

Τα αποτελέσματα δείχνουν και για τους τρεις αλγορίθμους μια απόκλιση των αποδόσεων όταν χρησιμοποιείται η βέλτιστη τιμή και η “Fair Share” τιμή.

Για τους αλγορίθμους Step και Linear έχουμε ήδη διαπιστώσει ανάλογες περιπτώσεις στα πειράματα που παρουσιάσαμε στις προηγούμενες παραγράφους, όπου καταλήξαμε ότι η επιλογή της τιμής “Fair Share” ως τιμή της παραμέτρου δεν είναι κατάλληλη.

Για τον αλγόριθμο Adaptive TSW2CM, η περίπτωση αυτή όπου εμφανίζεται διαφορά από την μέγιστη απόδοση με χρήση της “Fair Share” τιμής, είναι από τις σπάνιες. Μάλιστα η απόκλιση που παρατηρείται στο πείραμα που παρουσιάζουμε εδώ, είναι η μέγιστη απόκλιση που εντοπίσαμε μεταξύ όλων των ανάλογων πειραμάτων που εκτελέσαμε. Θεωρούμε ότι τέτοιες διαφορές στην απόδοση (της τάξης του 2% περίπου) δεν είναι ιδιαίτερος σημαντικές, ώστε να συμπεράνουμε ότι η επιλογή της “Fair Share” τιμής παραμέτρου δεν είναι κατάλληλη για τον αλγόριθμο αυτόν. Αντιθέτως, πιστεύουμε ότι το κέρδος του εκ των προτέρων υπολογισμού είναι ιδιαίτερα σημαντικό για να το παραβλέψουμε λόγω τέτοιων αποκλίσεων. Θεωρούμε λοιπόν ότι η απόδοση του αλγορίθμου Adaptive TSW2CM με επιλογή τιμής παραμέτρου την τιμή “Fair Share” είναι πάντοτε ικανοποιητικά κοντά στη βέλτιστη, και επομένως μπορεί να χρησιμοποιείται με σιγουριά σε κάθε σενάριο κίνησης.

5.2.3.4 Επιλογή τιμής της παραμέτρου: Συμπεράσματα

Τα πειράματα που παρουσιάσαμε παραπάνω, στόχευαν να ελέγξουν το κατά πόσο οι προτεινόμενοι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος είναι προβλέψιμοι όσο αφορά τον εντοπισμό βέλτιστης τιμής της παραμέτρου τους, τιμής δηλαδή που οδηγεί τον αλγόριθμο σε βέλτιστη απόδοση όσο αφορά την ισότητα μεταξύ των πηγών που επιτυγχάνει. Τα αποτελέσματα που παρουσιάσαμε οδηγούν σε ορισμένα συμπεράσματα τα οποία συνοψίζουμε εδώ.

- Οι βέλτιστες τιμές της παραμέτρου για τους αλγορίθμους Step και Linear, εντοπίζονται κάπου κοντά στη θεωρητική “Fair Share” τιμή, εντούτοις η απόδοσή τους με χρήση αυτής της τιμής της παραμέτρου, συχνά απέχει σημαντικά από τη βέλτιστη. Έτσι, η τιμή αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την ασφάλεια ότι η επιτυγχανόμενη ισότητα θα είναι πάντοτε υψηλή. Το γεγονός αυτό, καθιστά τους αλγόριθμους αυτούς δύσκολους στην υλοποίηση και εφαρμογή. Η εφαρμογή τους θα απαιτούσε πιθανώς την χρήση ενός βοηθητικού αλγορίθμου εντοπισμού μεγίστου, ο οποίος σε πραγματικό χρόνο θα δοκίμαζε τιμές της παραμέτρου (όχι εντελώς τυχαία, καθώς όπως αναφέραμε έχουμε κάποιες ενδείξεις για την θέση των βέλτιστων τιμών – κοντά στην τιμή “Fair Share”), θα μετρούσε την απόδοση για κάθε επιλογή (χρησιμοποιώντας περιοδικές μετρήσεις throughput των πηγών, και υπολογίζοντας την ισότητα μεταξύ τους με χρήση του Fairness Index), ψάχνοντας να βρει κάποιο μέγιστο σημείο στην απόδοση, οπότε και θα επέλεγε την αντίστοιχη τιμή της παραμέτρου. Ακόμα και με χρήση τέτοιας μεθόδου πάντως, η εφαρμογή των αλγορίθμων Step και Linear παραμένει πολύπλοκη και παρουσιάζει δυσκολίες υλοποίησης.
- Ο αλγόριθμος Adaptive TSW2CM από την άλλη, είναι προβλέψιμος στον εντοπισμό βέλτιστης τιμής της παραμέτρου του. Η απόδοσή του με χρήση της τιμής $Fair Share = \frac{Capacity - \sum Target Rates}{Number of Sources}$, είναι σε κάθε

περίπτωση πολύ κοντά στην βέλτιστη, και έτσι αν το δικτυακό σύστημα έχει τη γνώση που απαιτείται για να υπολογίζει την τιμή αυτήν, μπορεί να την χρησιμοποιεί ως τιμή της παραμέτρου της συνάρτησης μαρκαρίσματος. Καθώς λοιπόν ο αλγόριθμος Adaptive TSW2CM δεν απαιτεί τη χρήση βοηθητικού αλγορίθμου που να πραγματοποιεί δοκιμές σε πραγματικό χρόνο για τον εντοπισμό βέλτιστης τιμής παραμέτρου όπως οι άλλοι δύο αλγόριθμοι, η υλοποίηση και εφαρμογή του γίνεται ευκολότερα.

5.2.4 Ευαισθησία στην επιλογή τιμής παραμέτρου

Όπως δείξαμε, όταν επιλεγθεί μια βέλτιστη τιμή για την παράμετρο των συναρτήσεων μαρκαρίσματος των προσαρμόσιμων αλγορίθμων, επιτυγχάνεται ο στόχος της ισότητας στην διαμοίραση της δικτυακής χωρητικότητας μεταξύ των πηγών κίνησης. Σε ένα πραγματικό δίκτυο όμως, όπου οι πηγές που στέλνουν κάθε στιγμή κίνηση δεν είναι σταθερές, αλλά έρχονται και φεύγουν εκκινώντας και σταματώντας την αποστολή κίνησης σε απρόβλεπτα διαστήματα, η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου μεταβάλλεται (όταν αλλάζει το μίγμα της κίνησης) και απαιτείται προσαρμογή των αλγορίθμων μαρκαρίσματος, με τον ορισμό μιας νέας βέλτιστης τιμής παραμέτρου. Μέχρι να γίνει όμως γνωστή η αλλαγή του μίγματος κίνησης στους μηχανισμούς του δικτύου που είναι υπεύθυνοι για την προσαρμογή των αλγορίθμων, και εν συνεχεία να εφαρμοστεί η προσαρμογή αυτή, μεσολαβεί κάποιο χρονικό διάστημα (σεβαστό ή όχι) κατά το οποίο οι αλγόριθμοι λειτουργούν με μη βέλτιστη τιμή παραμέτρου (την προηγούμενη βέλτιστη τιμή δηλαδή, που αντιστοιχεί στο μίγμα της κίνησης πριν αυτό αλλάξει). Κατά τη διάρκεια τέτοιων διαστημάτων, θα μας ενδιέφερε να μην πέφτει σημαντικά η απόδοση των αλγορίθμων, να μην

πέφτει δηλαδή σημαντικά το ποσοστό της επιτυγχανόμενης ισότητας μεταξύ των πηγών.

Το μέγεθος της μείωσης στην απόδοση ενός αλγορίθμου, όταν χρησιμοποιείται μια μη βέλτιστη τιμή παραμέτρου, υποδεικνύει την “ευαισθησία” του αλγορίθμου στην επιλογή της τιμής. Όταν η απόδοση δεν πέφτει σημαντικά με λανθασμένη επιλογή παραμέτρου, τότε ο αλγόριθμος έχει μικρή ευαισθησία στην επιλογή τιμής παραμέτρου, και είναι κάτι που είναι επιθυμητό να συμβαίνει καθώς στα διαστήματα μεταξύ της αλλαγής του μίγματος κίνησης, και της ενημέρωσης των νέων βέλτιστων τιμών των παραμέτρων, το επίπεδο ισότητας δεν θα επηρεάζεται σημαντικά. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου η επιλογή μη βέλτιστης τιμής παραμέτρου έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη μείωση της απόδοσης, λέμε ότι ο αλγόριθμος έχει μεγάλη ευαισθησία στην επιλογή τιμής παραμέτρου, κάτι που δεν επιθυμούμε να ισχύει στους αλγόριθμους που εξετάζουμε.

Η ευαισθησία μας ενδιαφέρει και για ένα επιπλέον λόγο. Μικρή ευαισθησία, συνεπάγεται συχνά μεγάλο διάστημα βέλτιστων τιμών παραμέτρου. Αυτό ισχύει γιατί όταν το εύρος των βέλτιστων τιμών παραμέτρου είναι μεγάλο, σε μικρές σχετικά αλλαγές του μίγματος κίνησης η προηγούμενη βέλτιστη τιμή παραμέτρου έχει μεγάλες πιθανότητες να περιλαμβάνεται επιπλέον και στο νέο διάστημα βέλτιστων τιμών που αντιστοιχεί στο καινούριο μίγμα κίνησης, οδηγώντας σε βέλτιστη απόδοση του αλγορίθμου τόσο πριν όσο και μετά την αλλαγή (πράγμα που υποδεικνύει μικρή ευαισθησία του αλγορίθμου). Το να υπάρχει μεγάλο εύρος βέλτιστων τιμών παραμέτρου, είναι κάτι που μας ενδιαφέρει, ειδικά σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται ευριστικές μέθοδοι εντοπισμού βέλτιστων τιμών παραμέτρου μέσω δοκιμών, που όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο μπορεί να απαιτείται για την εφαρμογή των αλγορίθμων Step και Linear. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος των βέλτιστων τιμών παραμέτρου, τόσο πιο εύκολο και γρήγορο είναι για τέτοιες μεθόδους ο εντοπισμός μιας βέλτιστης τιμής.

Για να εξετάσουμε την ευαισθησία των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος, πειραματιζόμαστε ως εξής. Χρησιμοποιούμε την βέλτιστη τιμή της παραμέτρου που αντιστοιχεί στα πειράματα με δέκα πηγές κίνησης που περιγράψαμε παραπάνω, σε ανάλογα πειράματα όπου μειώνουμε σταδιακά τον αριθμό των πηγών. Προσομοιώνουμε δηλαδή ένα σύστημα, που λειτουργεί ιδανικά όταν δέκα πηγές παράγουν κίνηση, και κάποια στιγμή ο αριθμός των πηγών αρχίζει να μειώνεται (ορισμένες πηγές σταματάνε να στέλνουν κίνηση), ενώ η τιμή της παραμέτρου της εκάστοτε συνάρτησης μαρκαρίσματος παραμένει αμετάβλητη. Με τη μείωση του αριθμού των πηγών, μειώνεται και η απόδοση των αλγορίθμων καθώς η τιμή της παραμέτρου που χρησιμοποιείται – βέλτιστη για δέκα πηγές – δεν είναι βέλτιστη για διαφορετικό αριθμό πηγών, για διαφορετικό μίγμα κίνησης δηλαδή (αρκεί να σκεφτεί κανείς ότι μείωση του αριθμού των πηγών συνεπάγεται αύξηση της τιμής του δίκαιου

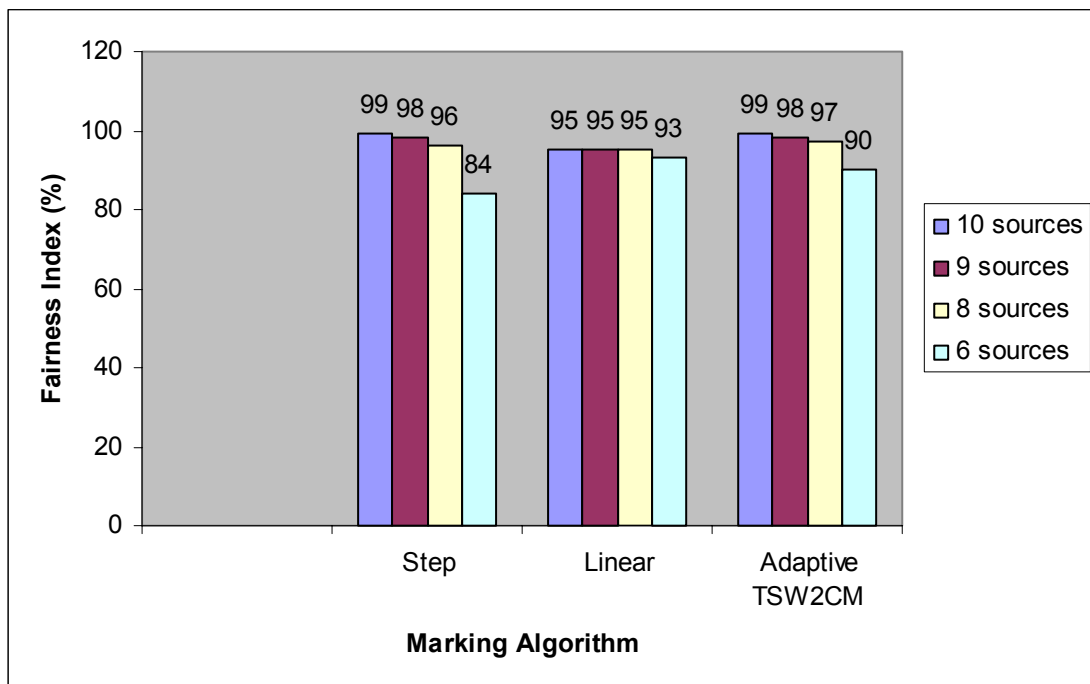
μεριδίου $Fair Share = \frac{Capacity - \sum Target Rates}{Number of Sources}$ εφόσον μειώνονται οι παράγοντες

“ $\sum Target Rates$ ” και “ $Number of Sources$ ”, και όπως είδαμε παραπάνω (π. 5.2.3), η τιμή “Fair Share” συνδέεται άμεσα με τη θέση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων).

Καθώς ο αριθμός των πηγών μειώνεται, καταγράφουμε την μείωση της απόδοσης των αλγορίθμων υπολογίζοντας σε κάθε περίπτωση την επιτυγχανόμενη ισότητα, και παρατηρούμε με αυτό τον τρόπο την ευαισθησία κάθε αλγορίθμου στην επιλογή τιμής παραμέτρου.

5.2.4.1 Διαφορετικά μεγέθη πακέτου μεταξύ TCP πηγών

Εξετάζουμε ξανά το σενάριο των διαφορετικών μεγεθών πακέτου μεταξύ TCP πηγών (βλ. π. 5.2.2.1) με σκοπό να βγάλουμε συμπεράσματα για την ευαισθησία των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος. Στα εδώ πειράματα χρησιμοποιούνται οι βέλτιστες τιμές παραμέτρου που υπολογίστηκαν για τις δέκα πηγές στο αντίστοιχο σενάριο των προηγούμενων παραγράφων. Ο αριθμός των πηγών μειώνεται σταδιακά από δέκα σε εννιά (φεύγει μια πηγή με μέγεθος πακέτου 1500bytes), οχτώ (φεύγει επιπλέον άλλη μια πηγή με μέγεθος πακέτου 100bytes) και τελικά έξι (φεύγουν άλλες δύο πηγές, μία από κάθε διαφορετικό τύπο πηγής). Η τιμή της παραμέτρου, παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Σε κάθε περίπτωση διαφορετικού αριθμού πηγών, υπολογίζεται η ισότητα που επιτυγχάνεται. Τα αποτελέσματα του πειράματος παρατίθενται στο διάγραμμα 15.



Διάγραμμα 15. Ευαισθησία των αλγορίθμων στο πείραμα των διαφορετικών μεγεθών πακέτου μεταξύ TCP πηγών. Ο αριθμός των πηγών μειώνεται, η τιμή της παραμέτρου, βέλτιστη για δέκα πηγές, παραμένει σταθερή

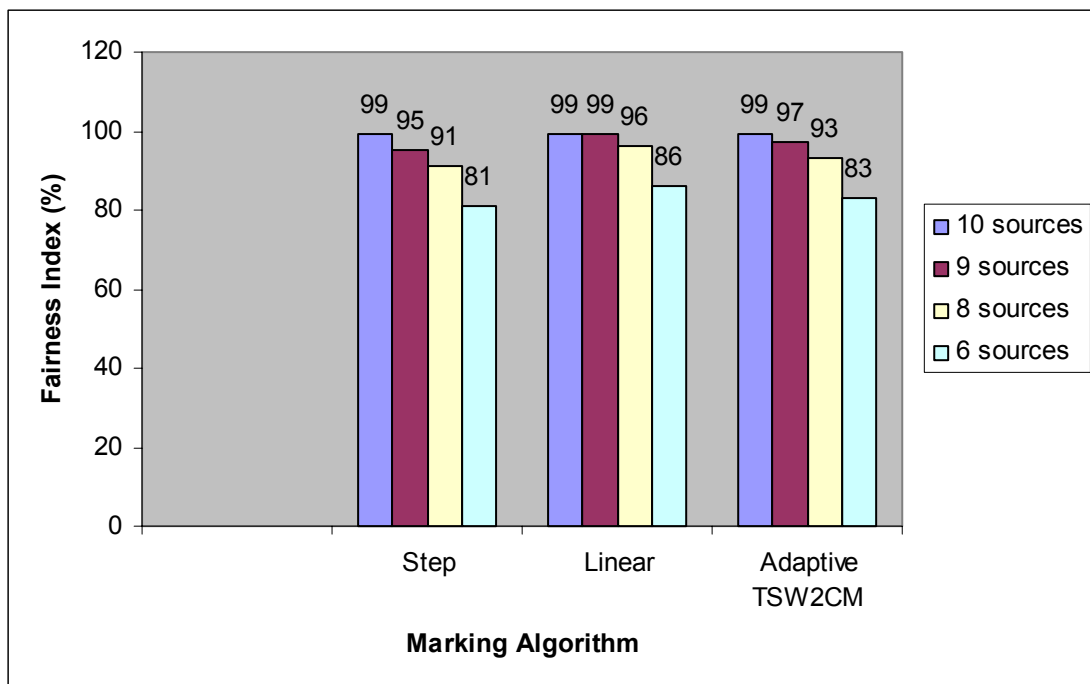
Τα αποτελέσματα του διαγράμματος 15, δείχνουν με ποιο τρόπο η απόδοση των τριών αλγορίθμων μειώνεται, όσο μειώνεται ο αριθμός των πηγών που εισάγει κίνηση κάθε στιγμή. Παρατηρούμε την ισότητα που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος Step να μειώνεται όσο μειώνονται οι πηγές από 99% διαδοχικά σε 98%, 96% και τελικά 84%. Από την άλλη παρατηρούμε την απόδοση του αλγορίθμου Linear να μένει σταθερή στο 95% καθώς ο αριθμός των πηγών μειώνεται σε 9 και 8, και στη συνέχεια να μειώνεται ελαφρώς σε 93% όταν ο αριθμός των πηγών μειώνεται σε 6. Η αντίστοιχη μείωση για τον αλγόριθμο Adaptive TSW2CM, δείχνει μικρότερη από αυτή του αλγορίθμου Step και μεγαλύτερη από του αλγορίθμου Linear, με τις ακριβείς τιμές της ισότητας που επιτυγχάνονται να είναι διαδοχικά 99%, 98%, 97% και τελικά 90%.

Παρατηρούμε δηλαδή τον αλγόριθμο Linear (ο οποίος γενικά παρουσιάζει την χειρότερη μέγιστη απόδοση – απόδοση με βέλτιστη επιλογή παραμέτρου – σε σχέση

με τους άλλους αλγόριθμους, πράγμα που φαίνεται και σε αυτό το πείραμα συγκρίνοντας τις αρχικές επιδόσεις όταν στέλνουν και οι δέκα πηγές κίνηση) να έχει την μικρότερη ευαισθησία καθώς η απόδοσή του επηρεάζεται λιγότερο από την αλλαγή του μίγματος κίνησης σε σχέση με τους άλλους αλγόριθμους. Από την άλλη παρατηρούμε τον αλγόριθμο Step, ο οποίος συχνά παρουσιάζει την καλύτερη επίδοση με βέλτιστη επιλογή παραμέτρου, να εμφανίζει την μεγαλύτερη ευαισθησία καθώς η απόδοσή του παρουσιάζει τη σημαντικότερη μείωση όσο μειώνεται ο αριθμός των πηγών. Παρατηρούμε έτσι, ότι όταν ο αριθμός των πηγών μειωθεί σε έξι, ο αλγόριθμος Linear είναι πλέον αυτός που επιτυγχάνει την καλύτερη απόδοση (ισότητα 93%), ακολουθεί η απόδοση του αλγορίθμου Adaptive TSW2CM (ισότητα 90%) και χειρότερη επίδοση εμφανίζει ο αλγόριθμος Step (ισότητα 84%).

5.2.4.2 Διαφορετικοί ρυθμοί αποστολής μεταξύ UDP πηγών.

Εκτελούμε το ίδιο πείραμα στο σενάριο των UDP πηγών με διαφορετικούς ρυθμούς αποστολής (βλ. π. 5.2.2.8). Όπως και προηγουμένως ξεκινάμε με δέκα πηγές και βέλτιστη τιμή παραμέτρου, και μειώνουμε σταδιακά τις πηγές σε εννιά, οχτώ και έξι, ενώ διατηρούμε σταθερή την τιμή της παραμέτρου. Για κάθε διαφορετικό αριθμό πηγών, υπολογίζουμε την επιτυγχανόμενη ισότητα και παρατηρούμε την μείωση της απόδοσης από την αρχική βέλτιστη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα 16.



Διάγραμμα 16. Ευαισθησία των αλγορίθμων στο πείραμα των διαφορετικών ρυθμών αποστολής μεταξύ UDP πηγών. Ο αριθμός των πηγών μειώνεται, η τιμή της παραμέτρου, βέλτιστη για δέκα πηγές, παραμένει σταθερή

Το διάγραμμα 16, δείχνει ότι ενώ στο σενάριο αυτό, οι τρεις αλγόριθμοι παρουσιάζουν την ίδια βέλτιστη απόδοση της τάξης του 99% για δέκα πηγές, στη συνέχεια με τη μείωση του αριθμού των πηγών σε εννιά, η απόδοση του αλγορίθμου Linear παραμένει σταθερή, του αλγορίθμου Adaptive TSW2CM πέφτει στο 97% και

του αλγορίθμου Step πέφτει στο 95%, με την περαιτέρω μείωση των πηγών σε οχτώ, οι αποδόσεις των αλγορίθμων Linear, Adaptive TSW2CM και Step μειώνονται περισσότερο αντίστοιχα σε 96%, 93% και 91%, και τέλος όταν έχουν απομείνει μόνο έξι πηγές οι αντίστοιχες αποδόσεις πέφτουν στα επίπεδα των 86%, 83% και 81%.

Και πάλι δηλαδή σε αυτό το σενάριο φαίνεται ότι ο λιγότερο ευαίσθητος αλγόριθμος είναι ο αλγόριθμος Linear, ακολουθεί ο αλγόριθμος Adaptive TSW2CM και περισσότερο ευαίσθητος είναι ο αλγόριθμος Step.

5.2.4.3 Ευαισθησία στην επιλογή τιμής παραμέτρου: Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων που εξετάζουν την ευαισθησία των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος, μας υποδεικνύουν την ύπαρξη κάποιου είδους *trade-off*, μεταξύ της μέγιστης απόδοσης και της ευαισθησίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο αλγόριθμος Linear, ο οποίος συνήθως παρουσιάζει την χειρότερη μέγιστη απόδοση (απόδοση με βέλτιστη επιλογή παραμέτρου), είναι και ο λιγότερο ευαίσθητος αλγόριθμος σε σχέση με τους άλλους δύο. Από την άλλη ο αλγόριθμος Step, ο οποίος εμφανίζει σαφώς καλύτερη μέγιστη απόδοση (συνήθως την καλύτερη όλων), είναι και ο πιο ευαίσθητος αλγόριθμος σε μη βέλτιστη επιλογή της παραμέτρου, καθώς παρατηρούμε την απόδοση του να επηρεάζεται περισσότερο από οποιονδήποτε άλλο αλγόριθμο στις αλλαγές του μίγματος κίνησης.

Καθώς, όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενη παράγραφο, η συνάρτηση μαρκαρίσματος του αλγορίθμου Linear (σχ. 5) προσεγγίζει την αντίστοιχη συνάρτηση του αλγορίθμου Step (σχ. 4) όσο μεγαλώνει η κλίση της (σταθερά d του τύπου της συνάρτησης μαρκαρίσματος), συμπεραίνουμε πλέον ότι αυξάνοντας την κλίση της συνάρτησης κερδίζουμε σε μέγιστη απόδοση, χάνουμε όμως σε ευαισθησία. Αντίστροφα, παίρνοντας την συνάρτηση του αλγορίθμου Step, και κάνοντάς την λιγότερο απότομη στο σημείο που ξεκινάει το μαρκάρισμα πακέτων σαν OUT (ουσιαστικά ελαττώνοντας την κλίση στο σημείο αυτό) η μέγιστη απόδοση ελαττώνεται, αλλά κερδίζουμε σε ευαισθησία. Για τους λόγους αυτούς, επιλέξαμε μια συντηρητική τιμή για την κλίση της συνάρτησης του αλγορίθμου Linear στα πειράματα που εκτελέσαμε, παρ' ότι γνωρίζαμε ότι μεγαλύτερη κλίση θα οδηγούσε σε καλύτερες επιδόσεις όσο αφορά τη βέλτιστη απόδοση. Ένας διαχειριστής δικτύου θα μπορούσε να εκτιμήσει το πόσο απρόβλεπτη και ευμετάβλητη είναι η κίνηση στο δίκτυό του, και αναλόγως να προτιμήσει να χρησιμοποιήσει ένα αλγόριθμο μαρκαρίσματος ανάλογο του αλγορίθμου Linear, αντί του αλγορίθμου Step, προτιμώντας να πετυχαίνει ελαφρώς μειωμένη μέγιστη απόδοση κατά την βέλτιστη επιλογή παραμέτρου, με κέρδος η απόδοση αυτή να μην μεταβάλλεται σημαντικά κατά τις μεταβολές του μίγματος κίνησης στο δίκτυό του.

Η ευαισθησία του αλγορίθμου Adaptive TSW2CM σε μη βέλτιστη επιλογή της τιμής της παραμέτρου, είναι, όπως δείχνουν τα πειράματα, μικρότερη από την ευαισθησία του αλγορίθμου Step, αλλά μεγαλύτερη από αυτήν του αλγορίθμου Linear με την συγκεκριμένη επιλογή για την κλίση.

5.2.5 Εκμετάλλευση δικτυακής χωρητικότητας (Utilization)

Είδαμε στις προηγούμενες παραγράφους ότι οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος επιτυγχάνουν ικανοποιητικά το στόχο της ισότητας μεταξύ πηγών στις AF υπηρεσίες. Όμως είναι σημαντικό να διαπιστώσουμε ότι η ισότητα δεν επιτυγχάνεται εις βάρος του συνολικού επιτυγχανόμενου ποσοστού εκμετάλλευσης

της δικτυακής χωρητικότητας (utilization). Αν η ισότητα επιτυγχάνεται απλά με το να μειώνεται ο ρυθμός των ‘ευνοημένων’ πηγών (των πηγών δηλαδή που σε συνθήκες ανισότητας επιτυγχάνουν υψηλότερους ρυθμούς από ότι τους αναλογεί) στα επίπεδα των ‘αδικημένων’ πηγών (αντίστοιχα οι πηγές με χαμηλότερο ρυθμό από ότι τους αναλογεί) και ταυτόχρονα ο ρυθμός των τελευταίων παραμένει το ίδιο χαμηλός, τότε ο μηχανισμός που προτείνουμε δεν προσφέρει κάτι θετικό, αντιθέτως έχει αρνητική επίδραση, μη επιτρέποντας αποδοτική εκμετάλλευση της δικτυακής χωρητικότητας. Ο σωστός τρόπος για την επίτευξη ισότητας ορίζει ότι η ποσότητα εύρους ζώνης που αντιστοιχίζεται στις ευνοημένες πηγές πρέπει να μειωθεί, και ταυτόχρονα αυτή των αδικημένων πηγών να αυξηθεί κατά μια αντίστοιχη ποσότητα, έτσι ώστε όλες οι πηγές να επιτύχουν μέσες τιμές σε throughput περίπου ίσες του Target Rate + Fair Share, διατηρώντας το ποσοστό εκμετάλλευσης της δικτυακής χωρητικότητας σε ανάλογα υψηλά επίπεδα.

Στο δίκτυο που εξετάζουμε (σχ. 7) υπάρχει ένας μοναδικός συμφορημένος σύνδεσμος στο κέντρο του δικτύου (δρομολογητής Core) από τον οποίο διέρχεται το σύνολο της κίνησης, και που επομένως ορίζει το μέγεθος της δικτυακής χωρητικότητας (στα 5Mbps). Εξετάζουμε το άθροισμα των throughputs που επιτυγχάνουν οι πηγές στα διάφορα πειράματα με τους εκάστοτε αλγορίθμους μαρκαρίσματος, και ελέγχουμε κατά πόσο το άθροισμα αυτό προσεγγίζει την τιμή της θεωρητικής δικτυακής χωρητικότητας.

Στον παρακάτω πίνακα 2 φαίνονται αποτελέσματα για το συνολικό utilization που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εξέτασης των διαφορετικών μεγεθών πακέτου μεταξύ TCP πηγών (βλ. π. 5.2.2.1).

	TSW2CM	Step	Linear	Adaptive TSW2CM
Μέγιστη ισότητα (%)	73	99	95	99
Utilization σε μέγιστη ισότητα (%)	97	99	99	99
Utilization με κάθε διαφορετική επιλογή παραμέτρου (%)	-	≥ 96	≥ 99	≥ 97

Πίνακας 2. Επιτυχανόμενη ισότητα και ποσοστό εκμετάλλευσης (%) δικτυακής χωρητικότητας στο σενάριο των διαφορετικών μεγεθών πακέτου μεταξύ TCP πηγών

Για τους τρεις προσαρμόσιμους αλγόριθμους μαρκαρίσματος (Step, Linear και Adaptive TSW2CM) η πρώτη γραμμή του πίνακα 2 αναφέρει την μέγιστη ισότητα που επιτυγχάνεται με χρήση βέλτιστης τιμής παραμέτρου στο πείραμα των διαφορετικών μεγεθών πακέτου μεταξύ TCP πηγών, η δεύτερη γραμμή αναγράφει στην ίδια περίπτωση το αντίστοιχο επιτυχανόμενο utilization, ενώ η τρίτη γραμμή αναγράφει τις τιμές utilization που μετρήθηκαν για ένα σύνολο διαφορετικών τιμών παραμέτρου κάθε αλγορίθμου (βέλτιστες και μη) που εξετάστηκαν στο ίδιο πείραμα. Για τον απλό TSW2CM αλγόριθμο, αναφέρονται αντίστοιχα η ισότητα και το utilization που επιτυγχάνεται στο πείραμα αυτό, στην πρώτη και δεύτερη γραμμή του πίνακα.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του πίνακα 2, βλέπουμε ότι με χρήση των προσαρμόσιμων αλγορίθμων το επιτυχανόμενο utilization είναι πάντοτε υψηλό (μεγαλύτερο του 96%, 99% και 97% αντίστοιχα για τους τρεις αλγορίθμους), και

μάλιστα αγγίζει τις υψηλότερες τιμές του (99%) στην περίπτωση που παρουσιάζεται και η μέγιστη ισότητα. Βλέπουμε δηλαδή ότι με χρήση των προσαρμόσιμων αλγορίθμων σε κάθε περίπτωση διαφορετικής επιλογής παραμέτρου (όπου μπορεί να επιτυγχάνεται ή όχι ο στόχος της ισότητας) η εκμετάλλευση της δικτυακής χωρητικότητας βρίσκεται πάντοτε σε υψηλά επίπεδα, ενώ επιπλέον, η επιλογή βέλτιστης τιμής παραμέτρου που οδηγεί σε μέγιστη ισότητα, όχι μόνο δεν έχει αρνητικές συνέπειες στο utilization, αλλά αντιθέτως οδηγεί και σε βέλτιστη εκμετάλλευση της χωρητικότητας, η οποία αγγίζει το ιδανικό (100%). Οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι επιτυγχάνουν επομένως την ισότητα με τον επιθυμητό τρόπο, προσφέροντας δηλαδή σε κάθε πηγή κίνησης ένα κομμάτι από το συνολικό εύρος ζώνης περίπου ίσο με Target Rate + Fair Share.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα των υπόλοιπων πειραμάτων είναι εντελώς ανάλογα με αυτά που παραθέσαμε στον πίνακα 2, και επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα που αναφέραμε.

5.2.6 Επιλογή RIO παραμέτρων της AF ουράς στο κέντρο του δικτύου

Ένα άλλο ζήτημα που μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε, είναι το κατά πόσο η διαφορετική επιλογή RIO παραμέτρων στην AF ουρά στο κέντρο του δικτύου, επηρεάζει την τελική επιτυγχανόμενη ισότητα και το ποσοστό εκμετάλλευσης της δικτυακής χωρητικότητας. Μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε, αν με διαφορετική επιλογή RIO παραμέτρων μπορούμε να βελτιώσουμε τις επιδόσεις σε ισότητα και utilization, και επιπλέον αν υπάρχουν επιλογές για τους RIO παραμέτρους που οδηγούν σε χαμηλή απόδοση των αλγορίθμων και πρέπει να αποφεύγονται.

Για το σκοπό αυτό επαναλαμβάνουμε το πείραμα των διαφορετικών μεγεθών πακέτου μεταξύ TCP πηγών (βλ. π. 5.2.2.1) χρησιμοποιώντας διαφορετικά σύνολα RIO παραμέτρων στο κέντρο του δικτύου. Ο πίνακας 3 δείχνει τις διαφορετικές επιλογές σε RIO παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν.

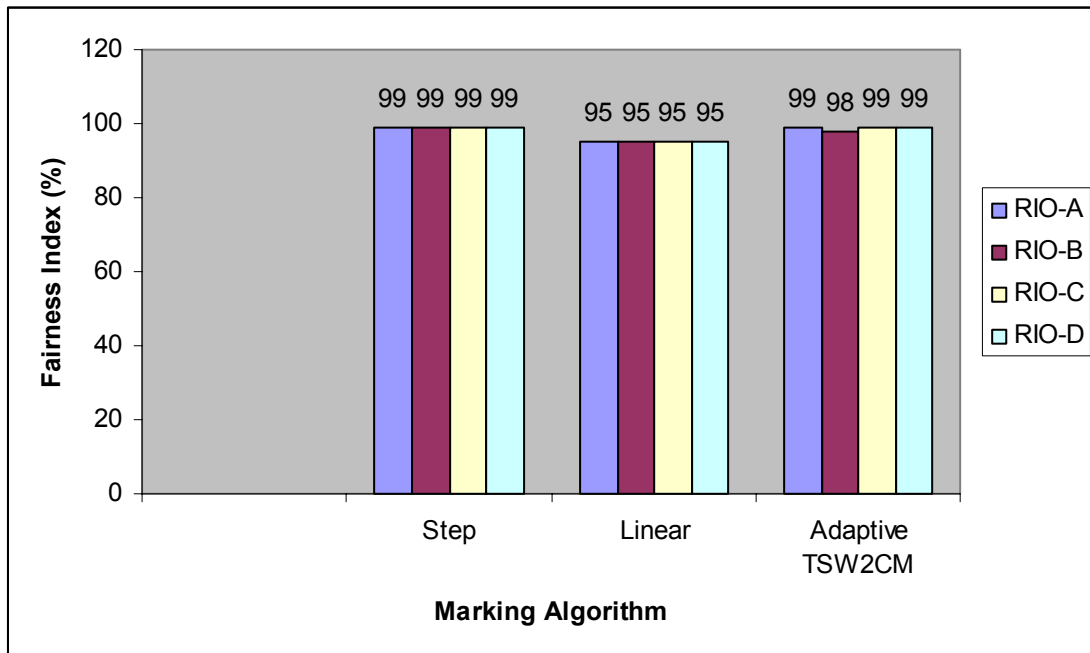
		Min_{th}	Max_{th}	Max_p	Μήκος RIO ουράς
RIO-A	OUT	20	40	1.0	70
	IN	40	60	1.0	
RIO-B	OUT	5	15	1.0	70
	IN	15	25	1.0	
RIO-C	OUT	20	80	0.2	400
	IN	80	320	0.01	
RIO-D	OUT	40	40	1.0	70
	IN	60	60	1.0	

Πίνακας 3. Τέσσερα διαφορετικά σύνολα RIO παραμέτρων (RIO-A, RIO-B, RIO-C και RIO-D) που εξετάστηκαν στο πείραμα των διαφορετικών μεγεθών πακέτου μεταξύ TCP πηγών

Οι τιμές των παραμέτρων Min_{th} , Max_{th} καθώς και το μήκος της RIO ουράς είναι εκφρασμένες σε αριθμό πακέτων. Η πιθανότητα Max_p παίρνει τιμές στο διάστημα (0,1).

Το σύνολο RIO παραμέτρων RIO-A, αποτελείται από τις τιμές RIO παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο σύνολο των προηγούμενων και υπόλοιπων πειραμάτων που εκτελούμε σ' αυτήν την εργασία (οι τιμές είναι ίδιες με αυτές που περιγράφονται στον πίνακα 1, π. 5.2.2). Το σύνολο RIO-B περιλαμβάνει μικρότερες τιμές για τις παραμέτρους Min_{th} και Max_{th} . Το σύνολο RIO-C περιλαμβάνει μεγαλύτερες τιμές για τις παραμέτρους Min_{th} και Max_{th} , και επιπλέον διαφορετικές τιμές για την πιθανότητα Max_p , δίνοντας μεγαλύτερη τιμή για τα OUT πακέτα σε σχέση με την αντίστοιχη πιθανότητα για τα IN. Το σύνολο RIO-D περιλαμβάνει παραμέτρους που επιχειρούν να προσομοιώσουν κατά κάποιο τρόπο drop-tail ουρά με δύο διαφορετικά μεγέθη για IN και OUT πακέτα.

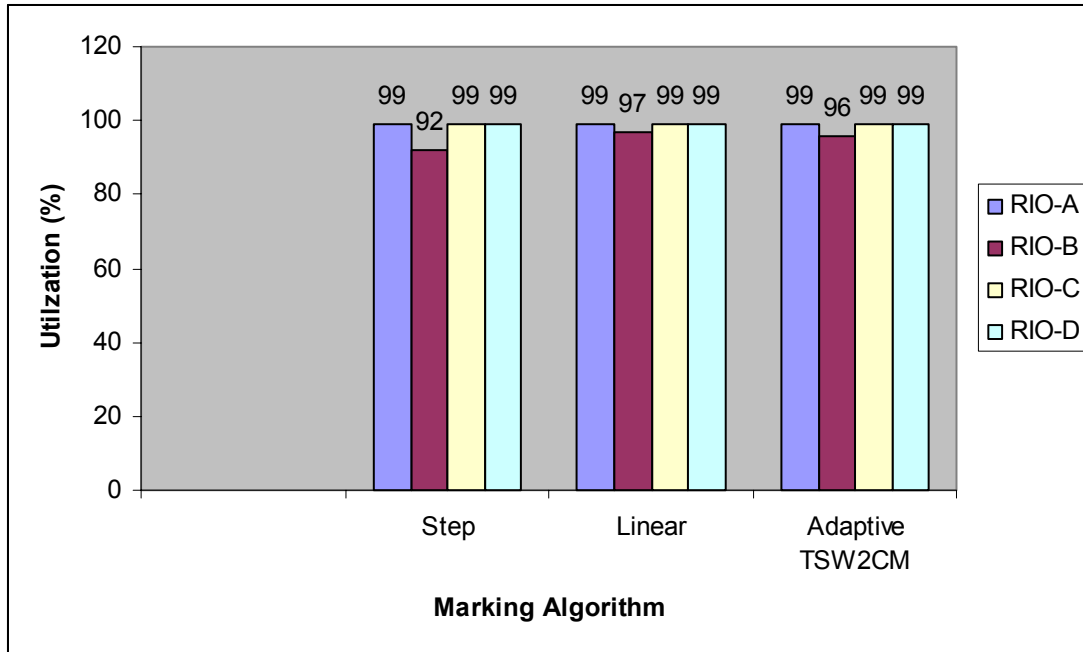
Το διάγραμμα 17 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για την ισότητα που επιτυγχάνεται στο πείραμα των διαφορετικών μεγεθών πακέτου με χρήση των τεσσάρων διαφορετικών συνόλων RIO παραμέτρων και βέλτιστη επιλογή παραμέτρου (h) των συναρτήσεων μαρκαρίσματος.



Διάγραμμα 17. Ισότητα που επιτυγχάνουν οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος σε 4 διαφορετικές επιλογές RIO παραμέτρων

Παρατηρούμε ότι η ισότητα δεν επηρεάζεται αισθητά με την αλλαγή στις επιλογές των τιμών RIO παραμέτρων.

Το διάγραμμα 18 παρουσιάζει τα αντίστοιχα ποσοστά εκμετάλλευσης της δικτυακής χωρητικότητας (utilization) που μετρώνται σε κάθε πείραμα διαφορετικής επιλογής RIO παραμέτρων.



Διάγραμμα 18. Utilization με τους προσαρμόσιμους αλγορίθμους μαρκαρίσματος σε 4 διαφορετικές επιλογές RIO παραμέτρων

Παρατηρούμε ότι το utilization αγγίζει το ιδανικό σε όλες τις περιπτώσεις, εκτός από την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται το σύνολο παραμέτρων RIO-B, το οποίο ορίζει χαμηλές τιμές για τις παραμέτρους Min_{th} και Max_{th} , και έχει ως αποτέλεσμα μειωμένο ποσοστό χρησιμοποίησης της δικτυακής χωρητικότητας.

Ο πίνακας 4 παρουσιάζει επιπλέον τα ποσοστά utilization που καταγράφονται κατά τη χρήση όλων των δυνατών τιμών παραμέτρου (h) των συναρτήσεων μαρκαρίσματος (βέλτιστες και μη), στα προηγούμενα πειράματα.

	RIO-A	RIO-B	RIO-C	RIO-D
Step	$\geq 96\%$ (opt. 99%)	77% – 97% (opt. 92%)	$\geq 99\%$ (opt. 99%)	$\geq 99\%$ (opt. 99%)
Linear	$\geq 99\%$ (opt. 99%)	90% – 99% (opt. 97%)	$\geq 99\%$ (opt. 99%)	$\geq 99\%$ (opt. 99%)
Adaptive TSW2CM	$\geq 97\%$ (opt. 99%)	84% – 97% (opt. 96%)	$\geq 99\%$ (opt. 99%)	$\geq 99\%$ (opt. 99%)

Πίνακας 4. Utilization που επιτυγχάνεται με κάθε επιλογή παραμέτρου (h) των προσαρμόσιμων συναρτήσεων μαρκαρίσματος, στις τέσσερις περιπτώσεις διαφορετικών επιλογών RIO παραμέτρων – σε παρένθεση η μέτρηση με βέλτιστη τιμή παραμέτρου (h)

Ο πίνακας επαληθεύει τη διαπίστωση που κάναμε από τα αποτελέσματα του διαγράμματος 18, ότι δηλαδή εκτός της περίπτωσης της επιλογής του RIO-B συνόλου παραμέτρων που ορίζει χαμηλές τιμές για τις παραμέτρους Min_{th} και Max_{th} , το επιτυγχάνόμενο utilization είναι πάντοτε σε υψηλές τιμές. Με χρήση του συνόλου RIO-B το utilization εμφανίζεται αισθητά μειωμένο.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα που συλλέξαμε, παρατηρούμε ότι η επιλογή RIO παραμέτρων γενικά, δεν επηρεάζει σημαντικά την επιτυγχανόμενη ισότητα, η οποία όπως είδαμε σε προηγούμενες παραγράφους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αλγόριθμο μαρκαρίσματος που επιλέγεται. Από την άλλη φαίνεται ότι εξαιρετικά συντηρητικές επιλογές για τις τιμές των RIO παραμέτρων Min_{th} και Max_{th} , που έχουν ως αποτέλεσμα την απόρριψη των πακέτων πολύ νωρίς (με μικρό μέγεθος ουράς) μπορεί να οδηγήσει σε υποχρησιμοποίηση του δικτύου (underutilization).

5.2.7 Ισόποση διαμοίραση: Συμπεράσματα

Παρουσιάσαμε στις προηγούμενες παραγράφους τη δυνατότητα των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος να προσφέρουν ισόποση διαμοίραση της δικτυακής χωρητικότητας μεταξύ ετερογενών πηγών κίνησης. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην κατάλληλη επιλογή της τιμής μιας παραμέτρου στις συναρτήσεις μαρκαρίσματος η οποία ορίζει το σημείο του μετρούμενου μέσου ρυθμού αποστολής των πηγών, πάνω από το οποίο ξεκινάει το μαρκαρίσμα των πακέτων σαν OUT. Η κατάλληλη επιλογή της τιμής της παραμέτρου είναι διαφορετική για κάθε διαφορετικό μίγμα κίνησης, και εντοπίζεται κοντά σε σημείο που οι αλγόριθμοι να προστατεύουν πέρα από το Target Rate, επιπλέον και το δίκαιο μερίδιο (Fair Share) από την αδέσμευτη δικτυακή χωρητικότητα που αντιστοιχεί σε κάθε πηγή, με το να μαρκάρει αντίστοιχο αριθμό πακέτων σαν IN.

Με βάση την τεχνική αυτή, παρατηρούμε ότι η χρήση ακόμα και πολύ απλών αλγορίθμων μαρκαρίσματος (που όμως προσαρμόζουν την τιμή της παραμέτρου τους) οδηγεί σε ιδιαίτερα υψηλή απόδοση όσο αφορά την ισότητα που επιτυγχάνεται, πολύ υψηλότερη από αυτή που επιτυγχάνεται με άλλους ήδη υπάρχοντες μηχανισμούς μαρκαρίσματος όπως ο απλός TSW2CM αλγόριθμος. Αξιολογούμε την λειτουργία τριών τέτοιων απλών αλγορίθμων μαρκαρίσματος (Step, Linear και Adaptive TSW2CM) ελέγχοντας πέρα από την επιτυγχανόμενη ισότητα και μια σειρά άλλων μετρικών όπως είναι η προβλεψιμότητα στον εντοπισμό βέλτιστης τιμής παραμέτρου, η ευαισθησία σε μη βέλτιστη επιλογή τιμής παραμέτρου, εκμετάλλευση της συνολικής δικτυακής χωρητικότητας. Επιπλέον, εξετάστηκε η απόδοση των αλγορίθμων σε διαφορετικές επιλογές RIO παραμέτρων στην μοναδική AF ουρά στο κέντρο του δικτύου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μεταξύ των τριών αλγορίθμων, καλύτερη επιλογή αποτελεί ο αλγόριθμος Adaptive TSW2CM ο οποίος επιτυγχάνει πάντα υψηλό ποσοστό ισότητας (ακόμα και σε περιπτώσεις που οι υπόλοιποι αλγόριθμοι εμφανίζουν αισθητά μειωμένη απόδοση), και προσφέρει μεγαλύτερη προβλεψιμότητα στον εντοπισμό βέλτιστης τιμής αλγορίθμου, με αποτέλεσμα η εφαρμογή και υλοποίησή του να είναι ευκολότερη. Από εκεί και πέρα, είδαμε ότι με κατάλληλη επιλογή RIO παραμέτρων όλοι οι αλγόριθμοι επιτυγχάνουν υψηλό utilization, οι αλγόριθμοι Linear και Step δεν είναι ιδιαίτερα προβλέψιμοι στον εντοπισμό βέλτιστης τιμής παραμέτρου, ο αλγόριθμος Linear εμφανίζει την μικρότερη ευαισθησία στην επιλογή τιμής παραμέτρου αλλά το ποσοστό ισότητας που επιτυγχάνει είναι συνήθως το χαμηλότερο σε σχέση με τους άλλους αλγορίθμους, και τέλος ο αλγόριθμος Step εμφανίζει υψηλή απόδοση όσο αφορά την επιτυγχανόμενη ισότητα, που προσεγγίζει και συχνά ξεπερνάει αυτή του αλγορίθμου Adaptive TSW2CM, αλλά εμφανίζει και την μεγαλύτερη ευαισθησία στην επιλογή τιμής παραμέτρου.

5.3 Αναλογική διαμοίραση του περισσευόμενου εύρους ζώνης (και αντίστοιχα αναλογική υποβάθμιση σε over – subscribed δίκτυο)

Τα αποτελέσματα της ισόποσης διαμοίρασης (π. 5.2) έδειξαν ότι οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι επιτυγχάνουν τον στόχο τους, όταν με κατάλληλη επιλογή παραμέτρου προστατεύουν πέρα από το Target Rate, επιπλέον και το δίκαιο μερίδιο Fair Share της υπόλοιπης δικτυακής χωρητικότητας που αντιστοιχεί κάθε πηγή. Έτσι είδαμε ότι οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων εντοπίζονται συνήθως σε κάποιο σημείο κοντά στην τιμή που εκφράζει το “Fair Share” κάθε πηγής, έτσι ώστε το μαρκάρισμα των πακέτων σαν OUT, να ξεκινάει όταν ο μέσος μετρούμενος ρυθμός αποστολής ξεπερνάει μια τιμή περίπου ίση “Target Rate + Fair Share”.

Με βάση αυτή τη παρατήρηση προτείνουμε σε αυτή τη παράγραφο αντίστοιχους αλγορίθμους μαρκαρίσματος που στοχεύουν να προσφέρουν στις πηγές αναλογική (proportional) διαμοίραση των δικτυακών πόρων, σύμφωνα με την οποία, η ποσότητα του επιπλέον εύρους ζώνης ή η υποβάθμιση του εύρους ζώνης για κάθε πηγή θα είναι ανάλογη με το Target Rate της. Όπως αναφέρουμε σε προηγούμενη παράγραφο, στην αναλογική διαμοίραση κάθε πηγή πρέπει να λάβει μια ποσότητα επί του συνολικού εύρους ζώνης του δικτύου ίση με:

$$\text{Target Rate} + \text{Fair Share} = \frac{\text{Capacity}}{\sum \text{Target Rates}} * \text{Target Rate} \text{ (εξίσωση (4) π. 2.3.1.5.1).}$$

Ο τύπος αυτός μας δείχνει ότι οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι που θα μαρκάρουν σαν OUT όταν ο ρυθμός αποστολής των πηγών ξεπερνάει την τιμή “Target Rate + Fair Share”, μπορούν να υλοποιηθούν με παραμετροποιημένους αλγορίθμους που ξεκινούν το μαρκάρισμα των πακέτων σαν OUT από μια τιμή “ $h * \text{Target Rate}$ ”, όπου h η αντίστοιχη παράμετρος, η βέλτιστη τιμή της οποίας αναμένεται (σύμφωνα με τον προηγούμενο τύπο) κάπου κοντά στην τιμή $\frac{\text{Capacity}}{\sum \text{Target Rates}}$. Στις επόμενες

παραγράφους περιγράφουμε τους ακριβούς αλγορίθμους που εξετάσαμε, τα πειράματα που εκτελέσαμε και τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα που συλλέξαμε.

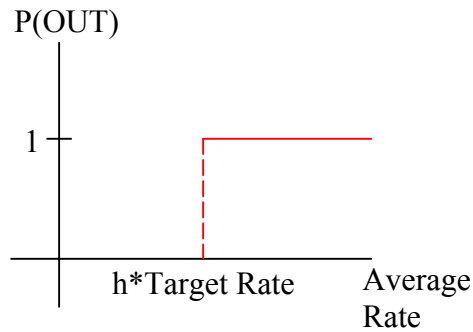
5.3.1 Προσαρμόσιμοι (adaptive) αλγόριθμοι μαρκαρίσματος που επιδιώκουν αναλογική διαμοίραση της δικτυακής χωρητικότητας

Δύο ανάλογοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος προτείνονται για αυτή τη περίπτωση και περιγράφονται αμέσως παρακάτω:

A) (Step) – Με την άφιξη κάθε πακέτου υπολόγισε τον μέσο ρυθμό αποστολής χρησιμοποιώντας τον TSW μετρητή. Αν ο μετρούμενος ρυθμός αποστολής είναι μικρότερος από $h * \text{Target Rate}$ όπου h μια παράμετρος, τότε μάρκαρε το πακέτο σαν συμμορφούμενο (IN). Αλλιώς μάρκαρε το πακέτο σαν μη συμμορφούμενο (OUT).

Με τον αλγόριθμο αυτόν, η πιθανότητα μαρκαρίσματος είναι 0 ή 1 αναλόγως αν ο μετρούμενος μέσος ρυθμός για κάθε πακέτο είναι μικρότερος ή μεγαλύτερος της τιμής $h * \text{Target Rate}$. Η τιμή της παραμέτρου h ορίζει την ακριβή τιμή του μετρούμενου μέσου ρυθμού αποστολής, πάνω από την οποία τα πακέτα μαρκάρονται σαν OUT. Σε κάθε διαφορετικό σενάριο κίνησης, στόχος είναι να βρεθεί η κατάλληλη

τιμή για την παράμετρο h η οποία οδηγεί σε βέλτιστη απόδοση του αλγορίθμου, δηλαδή στο μέγιστο δυνατό επίπεδο ισότητας μεταξύ των πηγών που μπορεί να επιτευχθεί. Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί τον Step αλγόριθμο της αναλογικής διαμοίρασης (ανάλογο αυτόν της ισόποσης διαμοίρασης) και η γραφική συνάρτηση της πιθανότητας μαρκαρίσματος των πακέτων σαν OUT που προκύπτει (η μορφή της οποίας δίνει το όνομά της στον αλγόριθμο) φαίνεται στο σχήμα 8.

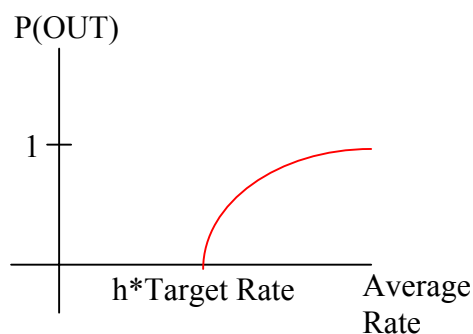


Σχ. 8 Συνάρτηση πιθανότητας μαρκαρίσματος του αλγορίθμου A (Step)

B) (Adaptive TSW2CM) – Με την άφιξη κάθε πακέτου υπολόγισε τον μέσο ρυθμό αποστολής χρησιμοποιώντας τον TSW μετρητή. Αν ο μετρούμενος ρυθμός αποστολής είναι μικρότερος από $h*Target Rate$ όπου h μια παράμετρος, τότε μάρκαρε το πακέτο σαν συμμορφούμενο (IN). Αλλιώς μάρκαρε το πακέτο σαν μη συμμορφούμενο (OUT) με

$$πιθανότητα \ P(avg\ rate) = \frac{avg\ rate - h * Target\ Rate}{avg\ rate - (h - 1) * Target\ Rate}$$

Πρόκειται για τον Adaptive TSW2CM αλγόριθμο της αναλογικής διαμοίρασης (αντίστοιχο του Adaptive TSW2CM αλγορίθμου της ισόποσης διαμοίρασης), ο οποίος χρησιμοποιεί επίσης μια κοίλη συνάρτηση μαρκαρίσματος που παρουσιάζεται στο σχήμα 9.



Σχ. 9 Συνάρτηση πιθανότητας μαρκαρίσματος του αλγορίθμου B (Adaptive TSW2CM)

Όπως και ο αντίστοιχος αλγόριθμος της ισόποσης διαμοίρασης, έτσι και αυτός προκύπτει από τον απλό TSW2CM αλγόριθμο δίνοντάς του επιπλέον τη δυνατότητα, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου h , να ολισθαίνει τη συνάρτηση μαρκαρίσματος πάνω στον οριζόντιο άξονα του μέσου ρυθμού αποστολής, ξεκινώντας το μαρκάρισμα πακέτων σαν OUT από το σημείο $h*Target Rate$. Πρόκειται ουσιαστικά για τη συνάρτηση $P_{TSW2CM}(avg\ rate - (h - 1) * Target\ Rate)$,

όπου $P_{TSW2CM}(avg\ rate) = \frac{avg\ rate - Target\ Rate}{avg\ rate}$, η συνάρτηση μαρκαρίσματος του απλού TSW2CM αλγορίθμου.

Όπως προηγουμένως εκτελούμε πειράματα με σκοπό να εντοπίσουμε την ύπαρξη κατάλληλων τιμών για την παράμετρο h των συναρτήσεων μαρκαρίσματος, οι οποίες οδηγούν σε αποτελεσματική αντιμετώπιση των φαινομένων ανισότητας μεταξύ πηγών κίνησης με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

5.3.2 Περιγραφή και αποτελέσματα πειραμάτων

Εξετάζουμε την αποτελεσματικότητα των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος με πειράματα ανάλογα αυτών που εκτελέστηκαν για την εξέταση των αλγορίθμων της ισόποσης διαμοίρασης (π. 5.2.2). Χρησιμοποιείται η ίδια δικτυακή τοπολογία (σχ. 2, π. 5.2.2) με τις ίδιες ρυθμίσεις. Να σημειωθεί ότι οι δύο αλγόριθμοι αναλογικής διαμοίρασης που εξετάζουμε, είναι εντελώς αντίστοιχοι με τους αλγόριθμους Step και Adaptive TSW2CM της ισόποσης διαμοίρασης, και στις περιπτώσεις όπου οι πηγές έχουν ίσα Target Rates, εμφανίζουν πανομοιότυπη συμπεριφορά (απόδοση, ευαισθησία, προβλεψιμότητα βέλτιστης τιμής). Διαφέρουν μόνο στις περιπτώσεις πηγών με διαφορετικά Target Rates, στις οποίες προσφέρουν διαφορετική διαμοίραση πόρων (αναλογική) από τους αντίστοιχους αλγόριθμους της ισόποσης διαμοίρασης.

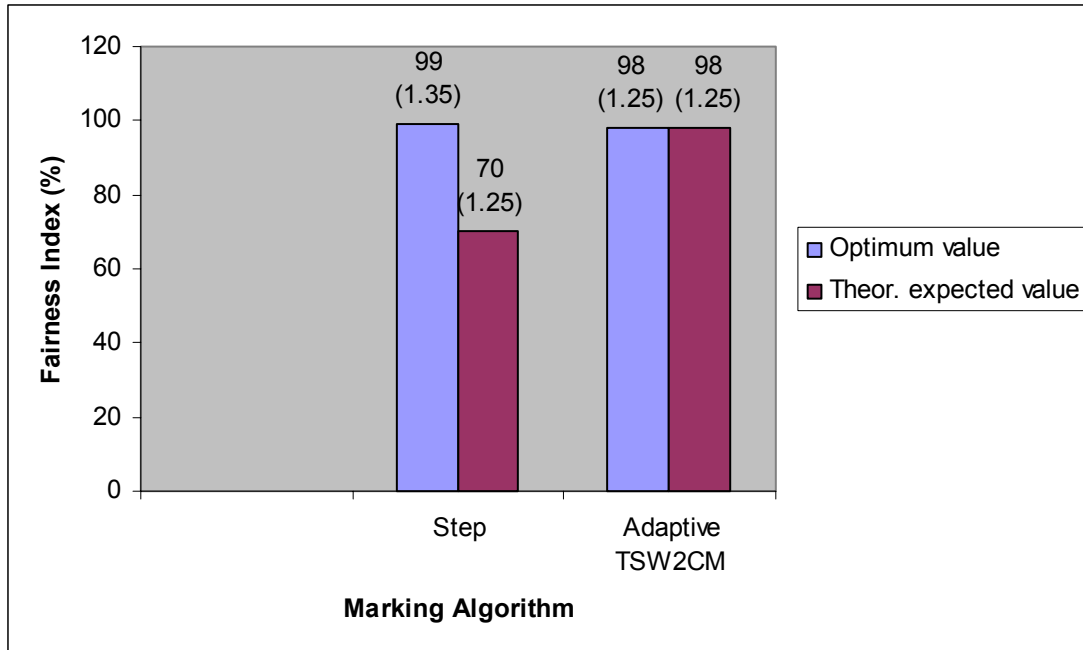
Παρακάτω παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα σχετικά με την ισότητα που επιτυγχάνουν οι αλγόριθμοι αυτοί, σε μερικά σενάρια με πηγές διαφορετικών Target Rates. Εκτιμούμε το επίπεδο ισότητας που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ξανά τον

τύπο του Fairness Index (F.I.) = $\frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n * \sum_{i=1}^n x_i^2}$ (εξίσωση (5), π. 5.2.2), με τη διαφορά ότι

με x_i συμβολίζουμε πλέον τον λόγο $\frac{excess\ (or\ degradation\ of)\ bandwidth}{Target\ Rate}$ της πηγής i .

5.3.2.1 TCP πηγές: Διαφορετικά Target Rates (I)

Εξετάζουμε το σενάριο όπου οι πηγές παράγουν τα συνηθισμένα TCP aggregates που χρησιμοποιήσαμε και στα πειράματα της ισόποσης διαμοίρασης (5 TCP ροές ανά aggregate, 500bytes πακέτο), με τη διαφορά ότι πέντε πηγές έχουν 100kbps Target Rate, και οι άλλες πέντε 700kbps. Σύμφωνα με τον τύπο που υπολογίζει το ακριβές μερίδιο εύρους ζώνης που αντιστοιχεί σε κάθε πηγή (εξίσωση (4) π. 2.3.1.5.1), στον συμφορημένο σύνδεσμο των 5Mbps, οι πηγές των 100kbps απαιτούν ένα συνολικό μερίδιο της τάξης των 125kbps (25kbps επιπλέον του Target Rate τους) η καθεμιά, ενώ οι πηγές των 700kbps αντίστοιχα ένα μερίδιο της τάξης των 875kbps (175kbps επιπλέον). Τα αποτελέσματα του διαγράμματος 19, δείχνουν το επίπεδο ισότητας που επιτυγχάνουν στο σενάριο αυτό οι δύο αλγόριθμοι, με χρήση της βέλτιστης και της θεωρητικά αναμενόμενης ($\frac{Capacity}{\sum Target\ Rates} = 1,25$ για το συγκεκριμένο πείραμα) τιμής παραμέτρου.

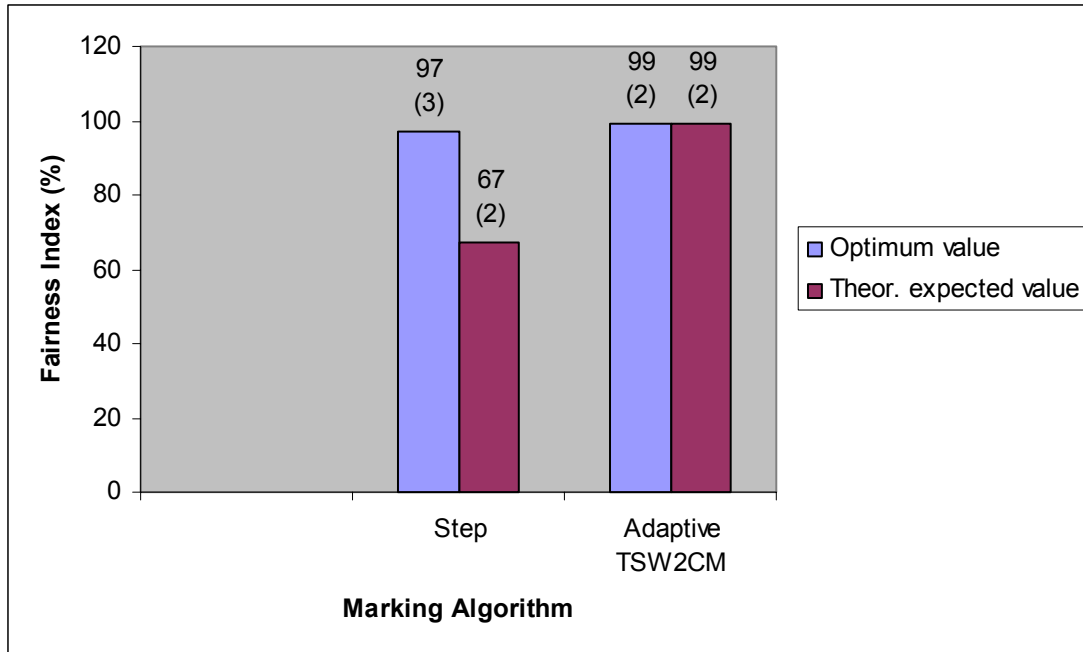


Διάγραμμα 19. TCP πηγές με διαφορετικά Target Rates. 5 πηγές με Target Rate 100kbps και 5 πηγές με Target Rate 700kbps. Απόδοση των αλγορίθμων με βέλτιστη τιμή της παραμέτρου, και με την θεωρητική αναμενόμενη τιμή. Σε παρένθεση αναφέρεται η ακριβής τιμή της παραμέτρου (καθαρός αριθμός, χωρίς μονάδες) που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση

Τα αποτελέσματα του πειράματος δείχνουν ότι με κατάλληλη επιλογή παραμέτρου και οι δύο αλγόριθμοι επιτυγχάνουν αποτελεσματικά το στόχο της ισότητας (99% ισότητα για τον Step αλγόριθμο, και 98% για τον Adaptive TSW2CM αλγόριθμο). Όμως, ο αλγόριθμος Adaptive TSW2CM επιτυγχάνει βέλτιστη απόδοση με χρήση της θεωρητικά αναμενόμενης τιμής παραμέτρου, σε αντίθεση με τον αλγόριθμο Step, του οποίου η απόδοση πέφτει αισθητά με χρήση της θεωρητικής τιμής.

5.3.2.2 TCP πηγές: Διαφορετικά Target Rates (II)

Παρουσιάζουμε ένα δεύτερο πείραμα διαφορετικών Target Rates μεταξύ TCP πηγών, ανάλογο με το προηγούμενο της παραγράφου 5.3.2.1, όπου πέντε πηγές έχουν 10kbps Target Rate και πέντε πηγές 490kbps Target Rate. Στην αναλογική διαμοίραση, οι πηγές των 10kbps θα πρέπει να επιτύχουν ρυθμούς της τάξης των 20kbps, και οι πηγές των 490kbps ρυθμούς της τάξης των 980kbps. Η θεωρητικά αναμενόμενη τιμή παραμέτρου ισούται με 2, και τα αποτελέσματα του πειράματος με βέλτιστη και θεωρητικά αναμενόμενη τιμή παραμέτρου για τους δύο προσαρμόσιμους αλγόριθμους φαίνονται στο διάγραμμα 20.



Διάγραμμα 20. TCP πηγές με διαφορετικά Target Rates. 5 πηγές με Target Rate 10kbps και 5 πηγές με Target Rate 490kbps. Απόδοση των αλγορίθμων με βέλτιστη τιμή της παραμέτρου, και με την θεωρητική αναμενόμενη τιμή. Σε παρένθεση αναφέρεται η ακριβής τιμή της παραμέτρου (καθαρός αριθμός, χωρίς μονάδες) που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση

Τα συμπεράσματα είναι όμοια με τα προηγούμενα. Και οι δύο αλγόριθμοι επιτυγχάνουν ικανοποιητικά το στόχο της ισότητας με κατάλληλη επιλογή παραμέτρου, η οποία επιλογή για τον αλγόριθμο Adaptive TSW2CM είναι η θεωρητικά αναμενόμενη τιμή, πράγμα που δεν ισχύει για τον αλγόριθμο Step.

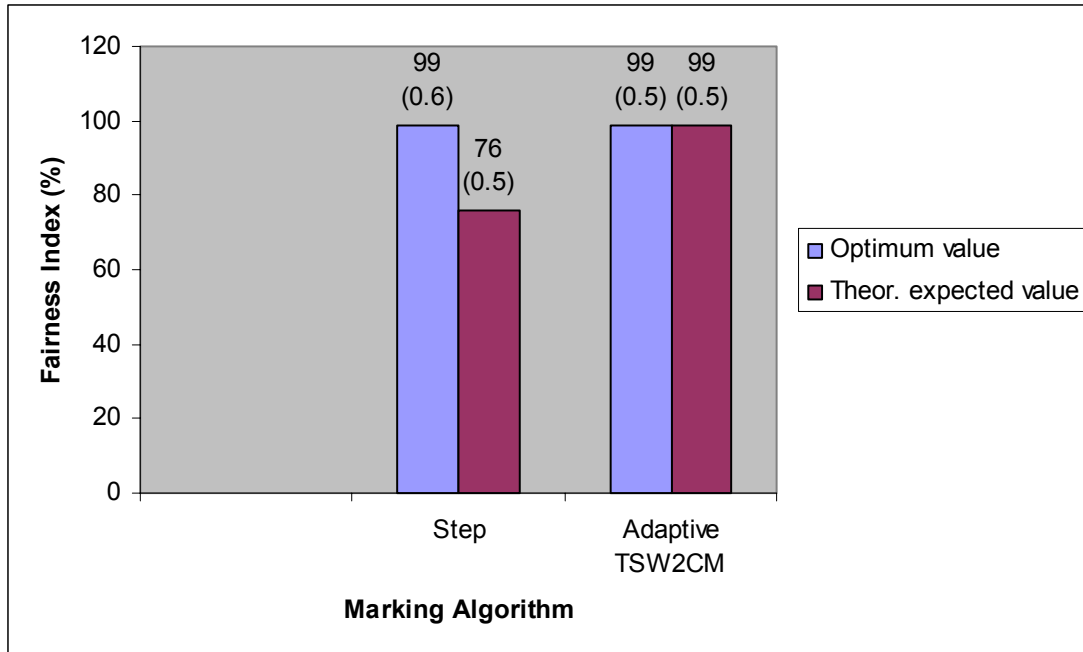
5.3.2.3 TCP πηγές: Διαφορετικά Target Rates σε over-subscribed δίκτυο

Στην περίπτωση over-subscribed δικτύου, επιθυμούμε η υποβάθμιση στο throughput των πηγών να είναι ανάλογη του Target Rate κάθε μιας. Για να εξετάσουμε αυτή τη περίπτωση, θέτουμε πέντε πηγές να έχουν Target Rate 500kbps και άλλες πέντε 1500kbps. Η εξυπηρέτηση του συνόλου της κίνησης θα απαιτούσε μια χωρητικότητα τουλάχιστον ίση με 10Mbps, τη στιγμή που το δίκτυό μας έχει τη δυνατότητα εξυπηρέτησης μέχρι 5Mbps κίνηση. Σύμφωνα με τον τύπο για την

αναλογική διαμοίραση ($Target\ Rate + Fair\ Share = \frac{Capacity}{\sum Target\ Rates} * Target\ Rate =$

$$= \frac{5Mbps}{10Mbps} * Target\ Rate = 0.5 * Target\ Rate)$$

κάθε πηγή πρέπει να υποστεί υποβάθμιση του throughput της κατά 50% μικρότερη από το προβλεπόμενο Target Rate, δηλαδή οι πηγές των 500kbps πρέπει να λάβουν περί τα 250kbps, και οι πηγές των 1500kbps περί τα 750kbps. Το διάγραμμα 21, παρουσιάζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα.



Διάγραμμα 21. TCP πηγές με διαφορετικά Target Rates σε over-subscribed δίκτυο. 5 πηγές με Target Rate 500kbps και 5 πηγές με Target Rate 1500kbps. Απόδοση των αλγορίθμων με βέλτιστη τιμή της παραμέτρου, και με την θεωρητική αναμενόμενη τιμή. Σε παρένθεση αναφέρεται η ακριβής τιμή της παραμέτρου (καθαρός αριθμός, χωρίς μονάδες) που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση

Όπως και στην περίπτωση under-subscribed δικτύου, έτσι και εδώ οι αλγόριθμοι επιτυγχάνουν το στόχο της ισότητας με κατάλληλη επιλογή παραμέτρου, που για τον αλγόριθμο Adaptive TSW2CM αποτελεί η επιλογή της θεωρητικής αναμενόμενης τιμής.

5.3.2.4 Συμπεράσματα πειραμάτων ελέγχου της απόδοσης των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος της αναλογικής διαμοίρασης πόρων

Όπως δείχνει το σύνολο των πειραμάτων, οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος της αναλογικής διαμοίρασης δικτυακής χωρητικότητας, επιτυγχάνουν το στόχο τους, που είναι να προσφέρουν ισότητα σε ετερογενείς πηγές κίνησης. Κατάλληλη επιλογή της παραμέτρου των συναρτήσεων μαρκαρίσματος, οδηγεί τους αλγόριθμους να επιτύχουν υψηλά επίπεδα ισότητας που αγγίζουν το ιδανικό. Για τον αλγόριθμο Adaptive TSW2CM, η επιλογή αυτή είναι η θεωρητικά αναμενόμενη που υπολογίζεται από τον όρο $\frac{Capacity}{\sum Target Rates}$, με την οποία ο αλγόριθμος ξεκινάει να

μαρκάρει πακέτα σαν OUT όταν ο μετρούμενος μέσος ρυθμός των πακέτων υπερβαίνει την τιμή “Target Rate + Fair Share”, όπως ακριβώς συνέβαινε και στην περίπτωση της ισόποσης διαμοίρασης.

5.3.3 Αναλογική διαμοίραση: Συμπεράσματα

Είδαμε πώς η ιδέα των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος, εφαρμόζεται και στην περίπτωση που επιθυμούμε να προσφέρουμε αναλογική

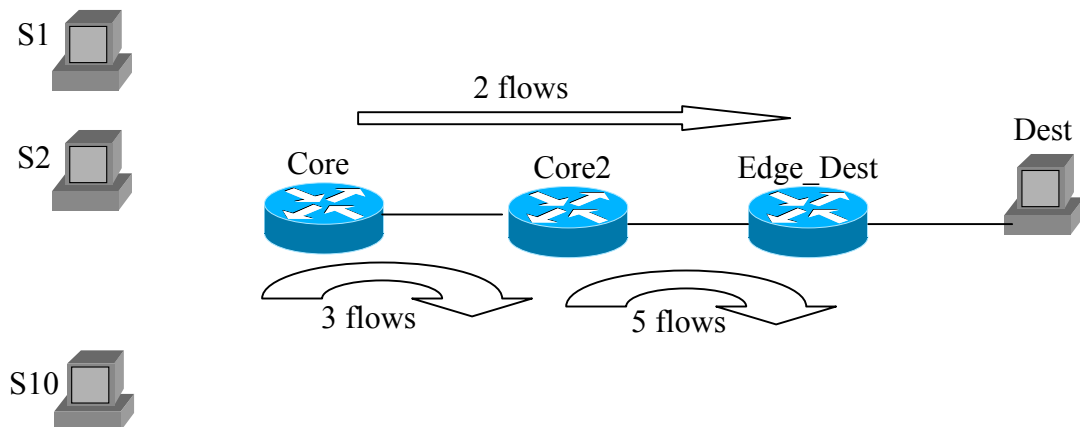
διαμοίραση της δικτυακής χωρητικότητας με βάση το Target Rate κάθε πηγής. Προτείνουμε δύο αλγόριθμους μαρκαρίσματος, αντίστοιχων των αλγορίθμων που προτείνουμε για την παροχή ισόποσης διαμοίρασης, και τα συμπεράσματα που εξάγαμε για τους αλγορίθμους της ισόποσης διαμοίρασης εξακολουθούν να ισχύουν και σ' αυτή τη περίπτωση. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι ότι οι προτεινόμενοι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος εμφανίζουν υψηλή απόδοση, ως προς το ποσοστό ισότητας που επιτυγχάνουν με κατάλληλη επιλογή τιμής της παραμέτρου τους, αντιμετωπίζοντας αποτελεσματικά τα φαινόμενα ανισότητας που παρατηρούνται με χρήση άλλων μηχανισμών μαρκαρίσματος. Συγκρίνοντας τους προτεινόμενους αλγόριθμους μεταξύ τους, ο αλγόριθμος Adaptive TSW2CM υπερτερεί, καθώς πέρα από υψηλή απόδοση, προσφέρει επιπλέον προβλεψιμότητα στην βέλτιστη τιμή της παραμέτρου του, πράγμα που επιτρέπει πιο εύκολα την υλοποίηση και εφαρμογή του.

Στις περιπτώσεις ετερογενών πηγών κίνησης με ίσα Target Rates, η συμπεριφορά των αλγορίθμων αναλογικής διαμοίρασης πόρων είναι ακριβώς ίδια με αυτήν των αντίστοιχων αλγορίθμων της ισόποσης διαμοίρασης, καθώς στις περιπτώσεις αυτές οι αντίστοιχες συναρτήσεις μαρκαρίσματος συμπίπτουν. Η διαφορά τους έγκειται σε περιπτώσεις πηγών με διαφορετικά Target Rates, στις οποίες ο τρόπος διαμοίρασης της δικτυακής χωρητικότητας είναι διαφορετικός με τους δύο τύπους αλγορίθμων.

5.4 Πολλαπλοί συμφορημένοι κόμβοι

Παρουσιάσαμε τη λειτουργία των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος σε μια συνηθισμένη δικτυακή τοπολογία όπου υπάρχει ένας μοναδικός συμφορημένος σύνδεσμος στο κέντρο του δικτύου. Στην περίπτωση δικτύων με περισσότερους συμφορημένους συνδέσμους, η ιδέα των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μπορεί επίσης να εφαρμοστεί, με τρόπο που περιγράφουμε σ' αυτήν την παράγραφο.

Θεωρούμε την δικτυακή τοπολογία του σχήματος 10 που περιλαμβάνει δύο συμφορημένους κόμβους.



Σχ. 10 Δικτυακή τοπολογία που περιλαμβάνει δύο συμφορημένους κόμβους

Σ' αυτό το δίκτυο των δύο συμφορημένων κόμβων, ορισμένες πηγές χρησιμοποιούν μόνο τον πρώτο συμφορημένο κόμβο (μεταξύ *Core* και *Core2*), άλλες χρησιμοποιούν μόνο τον δεύτερο (μεταξύ *Core2* και *Edge_Dest*) και άλλες χρησιμοποιούν και τους δύο. Σε τέτοιες περιπτώσεις επομένως, ο υπολογισμός του δίκαιου μεριδίου για κάθε πηγή διαφέρει, ανάλογα με την κατάσταση των συμφορημένων κόμβων που χρησιμοποιεί κάθε μια. Ο ακριβής αλγόριθμος για τον υπολογισμό του δίκαιου μεριδίου κάθε πηγής σε δίκτυο με περισσότερους του ενός συμφορημένους κόμβους έχει ως εξής

1. Μεταξύ των συμφορημένων συνδέσμων, εντόπισε αυτόν με το μεγαλύτερο επίπεδο συμφόρησης, αυτόν δηλαδή με τη λιγότερη αδέσμευτη χωρητικότητα ($Capacity - \sum Target Rates$)
2. Με βάση τη χωρητικότητα και το επίπεδο συμφόρησης αυτού του συνδέσου, υπολόγισε το δίκαιο μερίδιο που αντιστοιχεί στις πηγές που χρησιμοποιούν αυτόν τον σύνδεσμο, χρησιμοποιώντας τους τύπους που εφαρμόζονται στην περίπτωση των δικτύων με ένα μοναδικό συμφορημένο σύνδεσμο.
3. Για τις πηγές αυτές, και με βάση το δίκαιο μερίδιο που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα, εντόπισε μια βέλτιστη τιμή για την παράμετρο του εκάστοτε προσαρμόσιμου αλγορίθμου μαρκαρίσματος που χρησιμοποιείται, και χρησιμοποίησέ την για να προσφέρεις δίκαιη διαμοίραση πόρων μεταξύ αυτών των πηγών.
4. Αφαίρεσε από τους συνδέσμους που χρειάζεται τα ποσά δικτυακής χωρητικότητας που έχουν ήδη διανεμηθεί, και συνέχισε τον αλγόριθμο από το βήμα 1. με τον επόμενο πιο συμφορημένο κόμβο και τις υπόλοιπες πηγές.

Με τον αλγόριθμο αυτόν, βλέπουμε πώς η ιδέα των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση δικτύων με πολλαπλούς συμφορημένους κόμβους.

5.4.1 Πείραμα σε δίκτυο με πολλαπλούς συμφορημένους συνδέσμους: TCP πηγές με διαφορετικό μέγεθος πακέτου

Για να επιβεβαιώσουμε την ορθή λειτουργία των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος σε τέτοιες περιπτώσεις υλοποιούμε σε περιβάλλον προσομοίωσης (NS-2) μια δικτυακή τοπολογία ανάλογη του σχήματος 10, και εκτελούμε πειράματα που ελέγχουν την απόδοση των προσαρμόσιμων αλγορίθμων, ανάλογα με αυτά που παρουσιάστηκαν στην περίπτωση του δικτύου με μοναδικό συμφορημένο σύνδεσμο. Όπως και προηγουμένως, η χωρητικότητα όλων των συνδέσμων τίθεται στα 5Mbps και κάθε σύνδεσμος προσθέτει μια καθυστέρηση 1msec.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 10, από τις δέκα πηγές που παράγουν κίνηση, ο τρεις χρησιμοποιούν μόνο τον πρώτο συμφορημένο σύνδεσμο, πέντε πηγές χρησιμοποιούν μόνο τον δεύτερο, ενώ δύο πηγές χρησιμοποιούν και τους δύο. Θέτουμε τις πηγές να παράγουν η κάθε μια, ένα τυπικό aggregate από 5 TCP ροές και με 200kbps Target Rate. Θέτουμε σε πέντε πηγές ως μέγεθος πακέτου 100bytes, και στις άλλες πέντε 1500bytes. Μέγεθος πακέτου 1500bytes έχουν οι δύο πηγές που διασχίζουν και τους δύο συμφορημένους κόμβους, μία από τις πηγές που διασχίζουν

μόνο τον πρώτο συμφορημένο κόμβο, και δύο από τις πηγές που διασχίζουν μόνο τον δεύτερο. Εξετάζουμε την ισόποση διαμοίραση στο πείραμα που παρουσιάζουμε (εντελώς ανάλογη είναι η περίπτωση της αναλογικής διαμοίρασης).

Στο σενάριο αυτό, ο δεύτερος σύνδεσμος (μεταξύ *Core2* και *Edge_Dest*) είναι πιο συμφορημένος, έχοντας συνολική αδέσμευτη χωρητικότητα ίση με: $Capacity - \sum Target Rates = 5Mbps - 7 * 200kbps = 3,6Mbps$ (7 πηγές με 200kbps Target Rate η καθεμιά χρησιμοποιούν αυτόν τον σύνδεσμο), ενώ ο πρώτος σύνδεσμος (μεταξύ *Core* και *Core2*) είναι λιγότερο συμφορημένος με συνολική ελεύθερη χωρητικότητα ίση με: $Capacity - \sum Target Rates = 5Mbps - 5 * 200kbps = 4Mbps$ (5 συνολικά πηγές με 200kbps Target Rate χρησιμοποιούν αυτόν τον σύνδεσμο). Έτσι, σύμφωνα με τον αλγόριθμο της προηγούμενης παραγράφου, υπολογίζουμε αρχικά τα δίκαια μερίδια των πηγών που χρησιμοποιούν τον δεύτερο συμφορημένο σύνδεσμο. Στην ισόποση διαμοίραση, το δίκαιο μερίδιο κάθε πηγής ισούται με

$$Fair Share = \frac{Capacity - \sum Target Rates}{Number of Sources} \text{ (εξ. (2), π. 2.3.1.5.1), και δηλώνει ότι η}$$

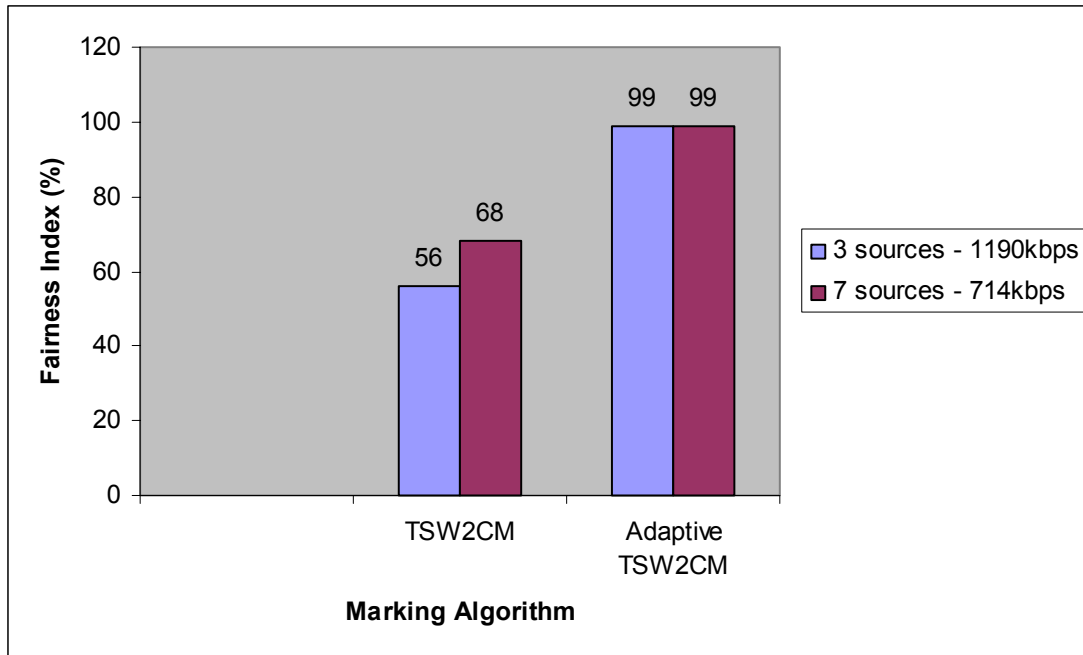
πλεονάζουσα χωρητικότητα του συνδέσμου, την οποία υπολογίσαμε στα 3.6Mbps, μοιράζεται ισότιμα στις επτά πηγές που χρησιμοποιούν τον σύνδεσμο, με αποτέλεσμα το δίκαιο μερίδιο κάθε πηγής είναι περίπου 514kbps. Συνυπολογίζοντας ένα Target Rate 200kbps για κάθε πηγή, συμπεραίνουμε ότι κάθε μια από τις πηγές αυτές, δικαιούται μια συνολική ποσότητα εύρους ζώνης περίπου ίση με 714kbps.

Αφού ολοκληρώσαμε τους υπολογισμούς για τον δεύτερο συμφορημένο σύνδεσμο, συνεχίζουμε με τον επόμενο (και τελευταίο) πιο συμφορημένο σύνδεσμο, τον σύνδεσμο μεταξύ των κόμβων *Core* και *Core2*. Δύο πηγές χρησιμοποιούν και τους δύο συμφορημένους κόμβους, και καθώς για τις πηγές αυτές έχουμε ήδη υπολογίσει το δίκαιο μερίδιό τους, αφαιρούμε αντίστοιχες ποσότητες χωρητικότητας από τη χωρητικότητα του συνδέσμου η οποία πλέον ισούται με $5Mbps - 2 * 714kbps = 3,572Mbps$. Η χωρητικότητα αυτή, πρέπει να διαμοιραστεί ισότιμα στις υπόλοιπες τρεις πηγές που χρησιμοποιούν αποκλειστικά αυτόν τον σύνδεσμο. Η αδέσμευτη χωρητικότητα του συνδέσμου, αφαιρώντας τα Target Rates των τριών πηγών, ισούται με $3,572Mbps - 3 * 200kbps = 2,972Mbps$, και πρέπει να μοιραστεί ισότιμα μεταξύ των τριών πηγών, δηλαδή σε κάθε μια από αυτές τις πηγές αντιστοιχούν $2972/3 \approx 990kbps$ επιπλέον του Target Rate τους, και επομένως συνολικά διεκδικούν μια ποσότητα συνολικού εύρους ζώνης ίση με $200kbps + 990kbps = 1190kbps$.

Στο σημείο αυτό, ολοκληρώθηκε ο υπολογισμός για την ποσότητα δικτυακής χωρητικότητας που αντιστοιχεί σε κάθε πηγή, ο οποίος έδειξε ότι επτά πηγές διεκδικούν μια ποσότητα της τάξης των 714kbps, και οι υπόλοιπες τρεις πηγές, μια ποσότητα της τάξης των 1190kbps. Με βάση το αποτέλεσμα αυτό, χρησιμοποιούμε τον Adaptive TSW2CM αλγόριθμο της ισόποσης διαμοίρασης, για να διαπιστώσουμε την ικανότητα των προσαρμόσιμων αλγορίθμων να διαμοιράζουν δίκαια την δικτυακή χωρητικότητα σε τέτοιες περιπτώσεις. Υπολογίζουμε την ισότητα ξεχωριστά για κάθε ομάδα πηγών που διεκδικεί διαφορετική ποσότητα δικτυακής χωρητικότητας (ξεχωριστά μεταξύ των πηγών που διεκδικούν 714kbps, και ξεχωριστά μεταξύ των πηγών που διεκδικούν 1190kbps). Όπως δείξαμε με τα πειράματα στον μοναδικό συμφορημένο κόμβο, η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου για τον αλγόριθμο Adaptive TSW2CM, εντοπίζεται στο σημείο που εκφράζει το "Fair Share", κάθε πηγής, και επομένως ισούται με 514kbps για τις επτά πηγές που διεκδικούν συνολικά 714kbps, και με 990kbps για τις τρεις πηγές που διεκδικούν 1190kbps. Βλέπουμε δηλαδή, ότι μεταξύ των διαφόρων υλοποιήσεων του αλγορίθμου στους ακραίους δρομολογητές, σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στην περίπτωση του

μοναδικού συμφορημένου συνδέσμου, η τιμή της παραμέτρου του αλγορίθμου που τίθεται σε καθεμιά, είναι διαφορετική ανάλογα με την πηγή που αντιστοιχεί σε κάθε ακραίο δρομολογητή (θεωρούμε ότι κάθε ακραίος δρομολογητής αντιστοιχεί σε μία μοναδική πηγή. Σε αντίθετη περίπτωση, πιθανώς να απαιτούνται πολλαπλές υλοποιήσεις του αλγορίθμου σε κάθε ακραίο δρομολογητή, με διαφορετική επιλογή παραμέτρου για κάθε πηγή που του αντιστοιχεί).

Παρουσιάζουμε στο διάγραμμα 22 τα αποτελέσματα για την ισότητα που προκύπτει στο πείραμα που περιγράψαμε, με χρήση του απλού TSW2CM αλγορίθμου, και του Adaptive TSW2CM αλγορίθμου με βέλτιστη επιλογή τιμής παραμέτρου.



Διάγραμμα 22. Ισότητα μεταξύ TCP πηγών με διαφορετικό μέγεθος πακέτου. Δύο ομάδες πηγών μεταξύ των οποίων επιζητείται ισότητα, μια ομάδα 3 πηγών που διεκδικούν 1190kbps η καθεμιά, και μια ομάδα 7 πηγών που διεκδικούν 714kbps η καθεμιά.

Από τα αποτελέσματα του διαγράμματος 22, παρατηρούμε ότι με χρήση του απλού TSW2CM αλγορίθμου και λόγω των διαφορών που παρουσιάζουν οι πηγές στο μέγεθος πακέτου, παρατηρείται ανισότητα στην διαμοίραση της δικτυακής χωρητικότητας τόσο ανάμεσα στις 3 πηγές που διεκδικούν 1190kbps, όσο και μεταξύ των 7 πηγών που διεκδικούν 714kbps. Από την άλλη μεριά, με χρήση του αλγορίθμου Adaptive TSW2CM και κατάλληλη επιλογή παραμέτρου, παρατηρούμε ότι το επίπεδο ισότητας μεταξύ των πηγών και στις δύο διαφορετικές ομάδες πηγών αγγίζει το ιδανικό, φτάνοντας στα επίπεδα του 99% και στις δύο περιπτώσεις. Επιβεβαιώνουμε επιπλέον, ότι το ποσοστό εκμετάλλευσης (utilization) και στους δύο συνδέσμους αγγίζει το 100%.

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η ιδέα των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος, βρίσκει εφαρμογή και στην περίπτωση πολλαπλών συμφορημένων συνδέσμων.

5.5 Μέθοδος υλοποίησης των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος

Παρουσιάσαμε στις προηγούμενες παραγράφους τη λειτουργία και αποτελεσματικότητα των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος. Είδαμε ότι με κατάλληλη επιλογή της τιμής της παραμέτρου των συναρτήσεων μαρκαρίσματος, οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι παρουσιάζουν υψηλή απόδοση, αντιμετωπίζοντας την ανισότητα που παρουσιάζεται στα DiffServ δίκτυα που προσφέρουν υπηρεσίες τύπου AF. Είδαμε επίσης, ότι η κατάλληλη επιλογή της παραμέτρου, εντοπίζεται σε κάποιο σημείο κοντά (αν όχι ακριβώς εκεί) σε μια τιμή που υπολογίζεται θεωρητικά μέσω μαθηματικού τύπου, και με την οποία οι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος αρχίζουν να μαρκάρουν πακέτα σαν OUT όταν ο μετρούμενος μέσος ρυθμός αποστολής ξεπερνάει μια τιμή περίπου ίση με “Target Rate + Fair Share”, όπου Target Rate ο προσυμφωνημένος μέσω SLA ρυθμός αποστολής που εγγυάται ο διαχειριστής του δικτύου, και “Fair Share” το δίκαιο μερίδιο από περισσευούμενο εύρος ζώνης ή η υποβάθμιση εύρους ζώνης που αντιστοιχεί σε κάθε πηγή. Η θεωρητική αυτή τιμή, στην περίπτωση που επιλέγεται μια πολιτική ισόποσης διαμοίρασης της αδέσμευτης

δικτυακής χωρητικότητας, ισούται με: $opt. param. value \approx \frac{Capacity - \sum Target Rates}{Number of Sources}$

(εξ. (2), π. 2.3.1.5.1), όπου ‘Capacity’ είναι η θεωρητική δικτυακή χωρητικότητα στο μονοπάτι που χρησιμοποιεί η πηγή, ‘ $\sum Target Rates$ ’ είναι το σύνολο των Target Rates των πηγών που χρησιμοποιούν τον ίδιο συμφορημένο σύνδεσμο, το πλήθος των οποίων είναι ‘Number of Sources’. Στην περίπτωση που επιλέγεται μια πολιτική διαμοίρασης της δικτυακής χωρητικότητας στις πηγές αναλογικά με το Target Rate κάθε μιας, τότε είδαμε ότι κάθε πηγή δικαιούται ένα συνολικό μερίδιο δικτυακής χωρητικότητας ίσο με $Target Rate + Fair Share = \frac{Capacity}{\sum Target Rates} * Target Rate$ (εξ.

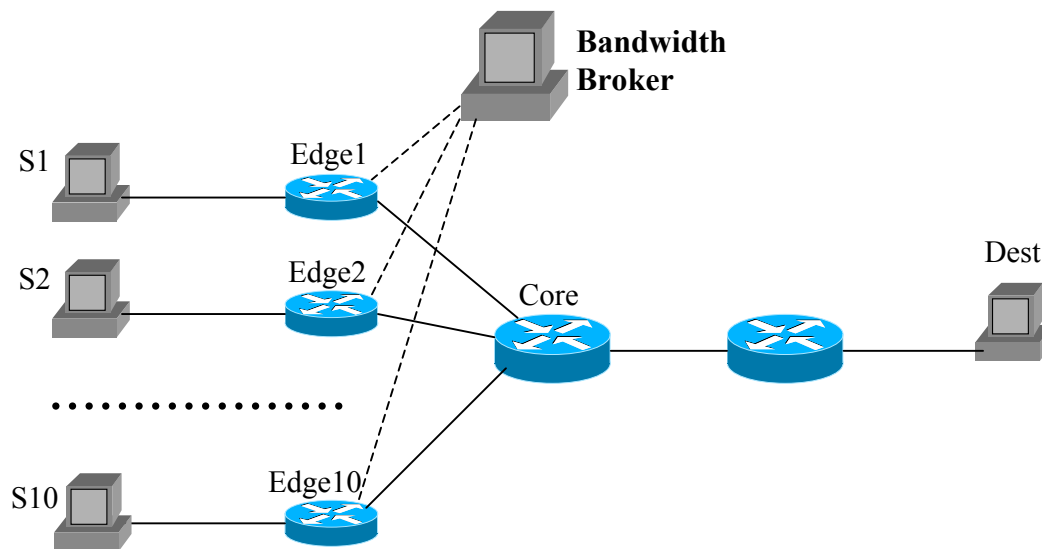
(4), π. 2.3.1.5.1) και η αντίστοιχη τιμή που προσδιορίζει τη θέση των βέλτιστων τιμών της παραμέτρου των προσαρμόσιμων συναρτήσεων μαρκαρίσματος ισούται με $opt. param. value \approx \frac{Capacity}{\sum Target Rates}$, όπου η έννοια των μεταβλητών είναι όμοια με

προηγούμενως.

Και στις δύο περιπτώσεις, παρατηρούμε ότι ο υπολογισμός των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων, απαιτεί κάποια γνώση σχετικά με τη δικτυακή χωρητικότητα και τα χαρακτηριστικά της κίνησης που χρησιμοποιεί το δίκτυο κάθε στιγμή. Επιπλέον, όπως βλέπουμε από τους τύπους της βέλτιστης τιμής παραμέτρου, όταν αλλάζει ο αριθμός των πηγών στο δίκτυο, ή η δεσμευμένη μέσω συμβολαίων χωρητικότητα (ο παράγοντα $\sum Target Rates$) τότε η βέλτιστη τιμή παραμέτρου μεταβάλλεται, με αποτέλεσμα να απαιτείται εκ νέου υπολογισμός των βέλτιστων τιμών, και ενημέρωση όλων των ακραίων δρομολογητών του δικτύου που υλοποιούν τους προσαρμόσιμους αλγορίθμους μαρκαρίσματος. Αυτό σημαίνει, ότι οποιαδήποτε αλλαγή στο μίγμα της κίνησης απαιτεί την προσαρμογή όλων των μηχανισμών μαρκαρίσματος που υλοποιούν προσαρμόσιμους αλγορίθμους, προκειμένου αυτοί να είναι αποδοτικοί. Το πρόβλημα όμως είναι ότι οι ακραίοι δρομολογητές, έχουν πληροφορία μόνο για την κίνηση που διέρχεται από αυτούς, και δεν έχουν γνώση για την συνολική κίνηση του δικτύου, την οποία χρειάζονται για τον υπολογισμό βέλτιστων τιμών παραμέτρου, και ως εκ τούτου δεν μπορούν να υλοποιήσουν ένα

αυτόνομο σύστημα που θα υπολογίζει και θα προσαρμόζει τις τιμές των παραμέτρων. Για την υλοποίηση προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος, απαιτείται η χρήση ενός κεντρικού στοιχείου στο δίκτυο, το οποίο πέρα από γνώση για τις δυνατότητες εξυπηρέτησης του δικτύου, θα πρέπει επιπλέον να έχει την δυνατότητα να παρακολουθεί το σύνολο της κίνησης που διασχίζει το δίκτυο κάθε στιγμή, και να μπορεί να επικοινωνεί με τους ακραίους δρομολογητές του δικτύου, προσαρμόζοντας όταν χρειάζεται τις παραμέτρους των αλγορίθμων μαρκαρίσματος.

Οι απαιτήσεις υλοποίησης των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος, υποδεικνύουν ότι η εφαρμογή τους ταιριάζει σε δίκτυα βασισμένα σε αρχιτεκτονική μεσίτη εύρους ζώνης (Bandwidth Broker – BB, βλ. π. 2.4). Σε δίκτυα όπου υπάρχει ένας κεντρικός BB που αναλαμβάνει τις διαχειριστικές λειτουργίες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το στοιχείο αυτό για να επικοινωνεί με τους ακραίους υπολογιστές του domain που είναι υπεύθυνος, με τρόπο που αναπαριστά το σχήμα 11, και να τροποποιεί όταν απαιτείται τους μηχανισμούς μαρκαρίσματος σε αυτούς



Σχ. 11 Αρχιτεκτονική Bandwidth Broker (BB) που χρησιμοποιείται για υλοποίηση προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος

Ο BB καθώς διαθέτει πληροφορία για τις δυνατότητες του δικτύου να εξυπηρετεί κίνηση (γνώση της θεωρητικής χωρητικότητας στα μονοπάτια του domain που ακολουθεί η κίνηση των πηγών), και έχει γνώση για τα συμβόλαια (SLAs) των πελατών που περιγράφουν τα συμφωνηθέντα Target Rates για κάθε πηγή κίνησης, αν ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε να παρακολουθεί τις πηγές (αν εισάγουν ή όχι κίνηση), να επικοινωνεί και να τροποποιεί τις παραμέτρους των μηχανισμών μαρκαρίσματος στους ακραίους δρομολογητές, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος που θα εφαρμόζει προσαρμόσιμους μηχανισμούς μαρκαρίσματος στην είσοδο του δικτύου.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει (π. 2.4) έχουν κατά καιρούς υλοποιηθεί και χρησιμοποιηθεί αρχιτεκτονικές Bandwidth Broker σε DiffServ δίκτυα για σκοπούς ανάλογους με το δικό μας (π.χ. παρακολούθηση (monitoring) δικτύων, ορισμό βαρών (weights) σε WFQ schedulers κ.α.), επομένως η πρόταση που κάνουμε για υλοποίηση των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος, προτείνει την χρήση της ήδη

υπάρχουσας δικτυακής υποδομής των DiffServ δικτύων, δεν απαιτεί δηλαδή την χρήση κάποιας καινοτόμου τεχνολογίας, και ως εκ τούτου δεν εισάγει επιπλέον πολυπλοκότητα, πέραν αυτής που απαντάται σε πολλά σημερινά DiffServ δίκτυα.

6 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία ασχολείται με μηχανισμούς μαρκαρίσματος κίνησης, που στοχεύουν να αντιμετωπίσουν τα φαινόμενα ανισότητας στα σημερινά DiffServ δίκτυα που προσφέρουν υπηρεσίες τύπου AF. Από τους ήδη υπάρχοντες μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση AF υπηρεσιών, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε τον αλγόριθμο Time Sliding Window (TSW) [8] για την μέτρηση μέσου ρυθμού αποστολής στους ακραίους δρομολογητές, και τον RIO [8] μηχανισμό απόρριψης πακέτων στο κέντρο του δικτύου. Επιλέγουμε μια γενική πολιτική μαρκαρίσματος με δύο διαφορετικές κωδικές τιμές IN και OUT, με τα πακέτα που μαρκάρονται σαν IN να λαβαίνουν καλύτερη εξυπηρέτηση, και να προστατεύονται από την παρουσία των OUT πακέτων. Ο διαχωρισμός πακέτων σε δύο κλάσεις που επιτυγχάνεται με τέτοιου είδους μαρκαρίσμα, είναι αρκετός για την εξυπηρέτηση συμβολαίων (SLAs) AF υπηρεσιών απλού τύπου, με τα οποία παρέχεται εγγύηση για την επίτευξη ενός ελάχιστου μέσου ρυθμού αποστολής (*Target Rate*).

Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας, έγκειται στην πρόταση για χρήση απλών αλγορίθμων μαρκαρίσματος στις άκρες του δικτύου, οι οποίοι βασίζονται σε παραμετροποιημένες συναρτήσεις μαρκαρίσματος που προσαρμόζουν κατάλληλα τις τιμές των παραμέτρων τους κατά τις αλλαγές του μίγματος κίνησης, προκειμένου να επιτυγχάνουν σε κάθε διαφορετική περίπτωση, μέγιστη δυνατή απόδοση. Η εκάστοτε τιμή της παραμέτρου ορίζει το ακριβές σημείο του μετρούμενου μέσου ρυθμού αποστολής των πακέτων, πάνω από το οποίο ξεκινάει το μαρκαρίσμα των πακέτων που τα κατατάσσει στην κλάση χαμηλής προτεραιότητας (OUT).

Εξεχρίσαμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις, δίκαιης κατανομής της δικτυακής χωρητικότητας, μία όπου προτείνει την ισόποση διαμοίραση του περισσευούμενου (και την ισόποση υποβάθμιση) εύρους ζώνης, μεταξύ των πηγών ανεξάρτητα από το Target Rate τους, και μια άλλη περίπτωση όπου προτείνεται η διαμοίραση της συνολικής δικτυακής χωρητικότητας με τρόπο, όπου κάθε πηγή λαμβάνει μια ποσότητα ανάλογη του Target Rate της. Διαφορετικοί αλγόριθμοι μαρκαρίσματος προτείνονται για κάθε περίπτωση.

Δείχνουμε ότι με κατάλληλη επιλογή της τιμής της παραμέτρου των συναρτήσεων μαρκαρίσματος, η απόδοση ακόμα και των πιο απλών προσαρμοσμένων αλγορίθμων είναι τέτοια, που στις περισσότερες περιπτώσεις επιτυγχάνεται η δίκαιη διαμοίραση της χωρητικότητας, εξαιρέοντας κατά ένα μεγάλο ποσοστό τα φαινόμενα ανισότητας που εμφανίζονται με χρήση άλλων μηχανισμών μαρκαρίσματος. Μεταξύ των διαφόρων αλγορίθμων που εξετάσαμε, είδαμε ότι μια παραλλαγή του απλού TSW2CM [8] αλγορίθμου πλεονεκτεί έναντι των υπολοίπων καθώς πέρα από υψηλή απόδοση, προσφέρει προβλεψιμότητα στον εντοπισμό της βέλτιστης τιμής παραμέτρου, η οποία υπολογίζεται θεωρητικά με γνώση της δικτυακής χωρητικότητας, του πλήθους και το σύνολο των Target Rates των πηγών που εισάγουν κίνηση κάθε στιγμή στο δίκτυο. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει για τους υπόλοιπους αλγόριθμους που εξετάστηκαν, των οποίων η εφαρμογή και υλοποίηση είναι πιο δύσκολη.

Εξετάσαμε την ευαισθησία των αλγορίθμων μαρκαρίσματος στην επιλογή τιμής παραμέτρου, προκειμένου να διαπιστώσουμε πόσο επηρεάζεται η απόδοσή τους κατά τις αλλαγές του μίγματος κίνησης όπου απαιτείται προσαρμογή των αλγορίθμων, και διαπιστώσαμε την ύπαρξη κάποιου trade-off μεταξύ της μέγιστης απόδοσης των αλγορίθμων με επιλογή βέλτιστης τιμής παραμέτρου, και της ευαισθησίας του αλγορίθμου. Οι δύο αυτές μετρικές μεταβάλλονται αντίστροφα με

την αλλαγή της κλίσης των συναρτήσεων πιθανότητας μαρκαρίσματος ως προς μετρούμενο μέσο ρυθμό, η οποία κλίση υποδεικνύει την διαφορά στην πιθανότητα μαρκαρίσματος σαν OUT που βιώνουν πακέτα με διαφορετικό μετρούμενο μέσο ρυθμό αποστολής. Ένας διαχειριστής δικτύου πιθανώς να πρέπει να επιλέξει τον συνδυασμό μέγιστης απόδοσης – ευαισθησίας που ταιριάζει στα χαρακτηριστικά του δικτύου του, επιλέγοντας αντίστοιχη τιμή για την κλίση της συνάρτησης μαρκαρίσματος.

Ελέγξαμε στη συνέχεια αν και κατά πόσο το κέρδος σε ισότητα που πετυχαίνουν οι προσαρμόσιμοι αλγόριθμοι μαρκαρίσματος κοστίζει σε μείωση του συνολικού ποσοστού εκμετάλλευσης της δικτυακής χωρητικότητας και διαπιστώσαμε ότι αυτό, εφ’ όσον η επιλογή RIO παραμέτρων στο κέντρο του δικτύου είναι κατάλληλη, παραμένει πάντα σε υψηλά επίπεδα, και μάλιστα αγγίζει τις μέγιστες τιμές του, στις περιπτώσεις που και το επίπεδο ισότητας είναι στα υψηλότερα δυνατά σημεία. Για την επιλογή RIO παραμέτρων στο κέντρο του δικτύου, παρατηρήσαμε ότι η επιλογή των ορίων για το μέγεθος της ουράς σε IN και OUT πακέτα πέρα από τα οποία απορρίπτονται πακέτα, δεν πρέπει να τίθενται σε εξαιρετικά χαμηλές τιμές, γιατί παρατηρείται χαμηλό ποσοστό εκμετάλλευσης δικτυακής χωρητικότητας. Όταν κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, διαφορετικές επιλογές για τις τιμές των RIO παραμέτρων δεν έχουν σημαντική επίδραση στην επιτυγχανόμενη ισότητα, ή στο ποσοστό εκμετάλλευσης της δικτυακής χωρητικότητας.

Εξετάσαμε τη λειτουργία των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος σε δίκτυα με πολλαπλούς συμφορημένους κόμβους, και δείξαμε ότι είναι εξίσου αποδοτικοί.

Τέλος, προτείναμε τρόπους υλοποίησης και εφαρμογής της ιδέας των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος σε DiffServ δίκτυα. Συμπεράναμε ότι απαιτείται η παρουσία ενός κεντρικού στοιχείου δικτύου που θα αναλάβει την διαχείριση του συνόλου των μηχανισμών μαρκαρίσματος στους διάφορους ακραίους δρομολογητές του δικτύου, οπότε προτείναμε την χρήση κεντρικών Bandwidth Brokers, ανάλογους αυτών που έχουν προταθεί, υλοποιηθεί και χρησιμοποιηθεί για αντίστοιχους λόγους σε πολλά σημερινά DiffServ δίκτυα.

Σαν αδυναμίες της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής μπορεί να θεωρηθούν τα παρακάτω.

Η επιλογή βέλτιστων τιμών παραμέτρου που βασίζεται στον υπολογισμό των δίκαιων μεριδίων, θεωρεί “επιθετικές” (aggressive) πηγές κίνησης που τείνουν να καταλάβουν όσο το δυνατό μεγαλύτερο μερίδιο της δικτυακής χωρητικότητας, ένα μερίδιο τουλάχιστον ίσο με το δίκαιο μερίδιο που τους αναλογεί. Τέτοιου είδους πηγές είναι οι FTP/TCP πηγές, ή CBR/UDP πηγές με επαρκώς μεγάλο ρυθμό αποστολής, όπως αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα. Η παρουσία διαφορετικού τύπου πηγών (π.χ UDP πηγές με ρυθμό αποστολής μικρότερο του δίκαιου μεριδίου συνολικής χωρητικότητας που της αναλογεί) μπορεί να οδηγήσει σε αδυναμία δίκαιης διαμοίρασης της δικτυακής χωρητικότητας, και ενδεχομένως να απαιτούνται τροποποιήσεις των μηχανισμών που αναφέρθηκαν.

Επιπλέον, η εφαρμογή της ιδέας των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος, απαιτεί ένα βαθμό προβλεψιμότητας και σταθερότητας στο δίκτυο, τέτοιον ώστε να μπορεί να εφαρμόζεται αποδοτικά η κατά διαστήματα προσαρμογή των αλγορίθμων. Για αυτό προτείνεται η χρήση των προσαρμόσιμων αλγορίθμων μαρκαρίσματος σε δίκτυα όπου η κίνηση που εισάγουν οι πηγές είναι ως ένα βαθμό καθορισμένη μέσω προσυμφωνημένων συμβολαίων (SLAs) τα οποία γενικά δεν μεταβάλλονται συχνά, και είθισται να ισχύουν για σεβαστά χρονικά διαστήματα,

όπως συμβαίνει για παράδειγμα με SLAs που ορίζονται για την συνολική κίνηση (aggregate) οργανισμών, πανεπιστημίων κ.λ.π.

Οι περιορισμοί που αναφέρθηκαν, μπορούν να αποτελέσουν θέματα μελλοντικής μελέτης και επέκτασης του προτεινόμενου μηχανισμού. Άλλες επεκτάσεις είναι δυνατόν να προταθούν για την εξυπηρέτηση συμβολαίων πιο πολύπλοκου τύπου, όπως για παράδειγμα συμβολαίων που ορίζουν μέσο και μέγιστο ρυθμό αποστολής (CIR και PIR) που η εξυπηρέτησή τους απαιτεί συνήθως την κατάταξη των πακέτων σε τρεις διαφορετικές κλάσεις, μέσω μαρκαρίσματος των πακέτων με τρία διαφορετικά χρώματα (αντί για δύο – IN, OUT).

7 Αναφορές

- [1] “Bandwidth Assurance Issues for TCP flows in a Differentiated Services Network”, *Nabil Seddigh et al.*
- [2] “Diffserv’s Assured Forwarding PHB: What Assurance does the Customer Have?”, *B. Nandy et al.*
- [3] “Equation-Based Packet Marking for Assured Forwarding Services”, *Mohamed A. El-Gendy and Kang G. Shin*
- [4] “Intelligent Traffic Conditioners for Assured Forwarding Based Differentiated Services Networks”, *B. Nandy et al.*
- [5] “Unfairness of Assured Service and a Rate Adaptive Marking Strategy”, *Seung-joon Seok et al*
- [6] “Counters-Based Modified Traffic Conditioner”, *Maria-Dolores Cano et al*
- [7] “A two rate three color marker,” RFC 2698, J. Heinanen and R. Guerin, IETF September 1999.
- [8] “Explicit allocation of best-effort packet delivery service”, D. Clark and W. Fang, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, no. 4, pp. 362–373, August 1998.
- [9] “On achievable service differentiation with token marking for tcp”, S. Sahu, P. Nain, D. Towsley, C. Diot, and V. Firiou, *Proc. of ACM Sigmetrics ’00, Santa Clara, CA. Also in Performance Evaluation Review*, vol.28, no. 1, Jun. 2000.
- [10] “How to make assured services more assured”, W. Lin, R. Zheng, and J. Hou, *Proc. of ICNP ’99*, 1999.
- [11] “A Memory-Based Approach for a TCP-Friendly Traffic Conditioner in DiffServ Networks”, Kumar K.R.R., A.L.Ananda and L.Jacob, Proceedings of the 9th International Conference on Network Protocols, Riverside, California, November 2001
- [12] “Assured forwarding PHB group”, J. Heinanen, F. Baker, W.Weiss, and J. Wroclawski, RFC 2597, IETF, June 1999
- [13] “On Achievable Service Differentiation with Token Bucket Marking for TCP” *Sambit Sahu et. al.*
- [14] “A Two-bit Differentiated Services Architecture for the Internet” K. Nichols *et al.* IETF Internet Draft, November 1997.
- [15] “Aggregate Flow Control: Improving Assurances for Differentiated Services Network”, *Biswajit Nandy et. al.*
- [16] “Realizing throughput guarantees in a differentiated services network”, *Ikjun Yeom et. al.*
- [17] NS simulator, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [18] “The Art of Computer Systems Performance Analysis”, R. Jain, John Wiley and Sons Inc., 1991
- [19] “An Architecture for Differentiated Services”, RFC 2475, S. Blake, et al., December 1998
- [20] “Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the Ipv4 and Ipv6 Headers”, RFC 2474, K. Nichols, et al., December 1998
- [21] “Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance”, Sally Floyd and Van Jacobson, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, August 1993