



**Πανεπιστήμιο Πειραιώς
Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Κατεύθυνση Ψηφιακές Επικοινωνίες και
Δίκτυα**

Διπλωματική Εργασία

«Τεχνικές διαχείρισης φορτίου σε δίκτυα κορμού υψηλών ταχυτήτων»

Επιμέλεια:

Φωτεινός Βασίλειος, ΜΕ08071

Εισηγητής καθηγητής:

Παναγιώτης Δεμέστιχας

Πειραιάς, Οκτώβριος 2011

Ευχαριστώ τον κύριο Π.Δεμέστιχα για την πολύτιμη βοήθειά του.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΙΑ

Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων	3
----------------------------	---

Περίληψη	5
----------------	---

ΜΕΡΟΣ Α΄

1. Εισαγωγή.....	8
2. Static Configuration	10
3. OSPF	13
4. MPLS.....	16
5. ENERGY CONSUMPTION.....	21

ΜΕΡΟΣ Β΄

6. OMNeT++	24
7. Static Configuration	30
7.1 Σενάριο 1	30
7.2 Σενάριο 2	35
8. OSPF	40
8.1 Σενάριο 1	40
8.2 Σενάριο 2	45
8.3 Σενάριο 3	49
8.4 Σενάριο 4	54
9. MPLS.....	60
9.1 Σενάριο 1	60
9.2 Σενάριο 2	65
10. Rerouting.....	78
10.1 Σενάριο 1	78
11. Load Balancing	81
11.1 Σενάριο 1	81
11.2 Σενάριο 2	89
11.3 Σενάριο 3	94
11.4 Σενάριο 4	96
11.5 Σενάριο 5	100
11.6 Σενάριο 6	102
12. Energy Consumption.....	118

12.1 Σενάριο 1	118
12.2 Σενάριο 2	123
12.3 Σενάριο 3	128
13. Συμπερασματικές Παρατηρήσεις	133
13.1 Απόδοση Δικτύου	133
13.2 Ενέργεια.....	135

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Αναφορές.....	143
Κατάλογος εικόνων, πινάκων.....	144
Συνομογραφίες	151

Περίληψη

Οι τεχνικές διαχείρισης φορτίου έχουν αποκτήσει πολύ σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση και λειτουργία δικτύων κορμού υψηλών ταχυτήτων. Αυτό οφείλεται στη διαρκώς αυξανόμενη απαίτηση για ποιότητα υπηρεσιών (QoS), αξιοπιστία και αποδοτικότητα. Οι τεχνικές διαχείρισης φορτίου αντιμετωπίζουν το ζήτημα της βελτίωσης της απόδοσης των δικτύων. Ένας πρωτεύων στόχος των μηχανισμών αυτών είναι η μεταφορά IP κίνησης μέσα σε ένα δίκτυο, με τον πιο αποδοτικό, αξιόπιστο και γρήγορο τρόπο. Μέχρι τώρα, μηχανισμοί αυτού του είδους εμποδίζονταν από τις περιορισμένες λειτουργικές δυνατότητες των συμβατικών IP τεχνολογιών. Όμως, πρόσφατες εξελίξεις στο τρόπο δρομολόγησης της κίνησης σε ένα δίκτυο, όπως είναι το multiprotocol label switching (MPLS), έχουν σαν αποτέλεσμα να δημιουργηθούν νέοι τρόποι αντιμετώπισης των περιορισμών που προκύπτουν από τις συμβατικές τεχνολογίες. Η διπλωματική αυτή ασχολείται με την εφαρμογή των mpls μονοπατιών ως μηχανισμό διαχείρισης της κίνησης στα δίκτυα. Ειδικότερα, εξετάζει πως ο διαμοιρασμός της κίνησης μέσω διαφορετικών μονοπατιών μπορεί να εμποδίσει τη δημιουργία συμφόρησης. Επίσης, ένας άλλος πολύ σημαντικός στόχος που έχει δημιουργηθεί τα τελευταία χρόνια είναι η λειτουργία των δικτύων με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο. Εκτός από την οικολογική ευαισθησία, αυτό το ενδιαφέρον πηγάζει και από οικονομικούς λόγους, από τη στιγμή που τόσο το ενεργειακό κόστος όσο και οι ηλεκτρικές απαιτήσεις των εγκαταστάσεων των εταιριών που παρέχουν δικτυακές υπηρεσίες έχουν την τάση να αυξάνονται διαρκώς. Για το λόγο αυτό, αποτελεί κοινή άποψη των ερευνητών που εργάζονται στα δίκτυα, ότι η εισαγωγή μόνο τεχνολογικού υλικού που καταναλώνει λιγότερη ενέργεια, δεν μπορεί να περιορίσει ικανοποιητικά τις απαιτήσεις για παραπάνω ενέργεια. Επομένως, προκειμένου να αυξηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα των δικτύων, η βελτίωση στο υλικό θα πρέπει να συνδυαστεί και με κατάλληλους μηχανισμούς διαχείρισης της κίνησης, οι οποίοι θα στοχεύουν στην εξοικονόμηση ενέργειας, εκμεταλλευόμενοι συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των δικτύων.

Λέξεις κλειδιά: traffic engineering, ospf, mpls, multipath, energy efficiency

Abstract

Traffic engineering has become an essential consideration in the design and operation of core networks. One of the reasons is the increasing demands for quality of service (QoS), reliability and efficiency. Traffic engineering addresses the issue of performance optimization of operational networks. An important objective of traffic engineering is the transport of IP traffic through a given network in the most efficient, reliable, and expeditious manner possible. Historically, traffic engineering mechanisms have been hampered by the limited functional capabilities of conventional IP technologies. Recent developments in multiprotocol label switching (MPLS) have opened up new possibilities to address some of the limitations of the conventional technologies. This master thesis discusses the applications of MPLS paths to traffic engineering in IP networks. Especially, examines how traffic splitting through different mpls paths can prevent congestion in network. Also, the concept of energy-efficient networking has begun to spread in the past few years. Besides the widespread sensitivity to ecological issues, such interest also stems from economic needs, since both energy costs and electrical requirements of Internet Service Providers' infrastructures around the world show a continuously growing trend. In this respect, a common opinion among networking researchers is that the sole introduction of low consumption hardware technologies may not be enough to effectively curb energy requirements. Thus, in order to increase energy efficiency in networks, these hardware enhancements must be integrated with traffic engineering mechanisms that explicitly manage energy saving, by exploiting network-specific features.

Keywords: traffic engineering, ospf, mpls, multipath, energy efficiency

ΜΕΡΟΣ Α'

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΠΑ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Τα δίκτυα επικοινωνιών υπάρχουν για να μεταφέρουν πληροφορίες εκ μέρους των χρηστών. Οι χρήστες επωφελούνται από τα δίκτυα με βάση τα χαρακτηριστικά της επικοινωνίας που θα έχουν, όπως είναι η καθυστέρηση, η διαπερατότητα και η αξιοπιστία. Οι πάροχοι των δικτύων λειτουργούν τα δίκτυά τους με σκοπό να προσφέρουν υπηρεσίες στους χρήστες μεταφέροντας τα δεδομένα τους σύμφωνα πάντα με τις απαιτήσεις τους. Η διεργασία της διαχείρισης της κατανομής των πόρων του δικτύου για την μεταφορά κίνησης με βάση κάποιους περιορισμούς είναι γνωστή ως Τεχνικές Διαχείρισης Φορτίου (*Traffic Engineering*).

Στο Internet σήμερα υπάρχουν τεχνικές για τη διαχείριση της κίνησης μόνο σε επίπεδο δεδομένων με βάση το χρόνο, με πολύ μικρή υποστήριξη για την εφαρμογή διαφορετικών πολιτικών. Σε αυτή τη διπλωματική θα προσπαθήσουμε να δείξουμε ότι τεχνικές για τη διαχείριση της κίνησης στα δίκτυα είναι απαραίτητες και θα πρέπει να μπορούν να βασίζονται στις πολιτικές και στη στρατηγική που αποφασίζεται από τον διαχειριστή του δικτύου.

Οι τεχνικές διαχείρισης της κίνησης σε ένα δίκτυο στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου. Αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της αποδοτικής κατανομής των δικτυακών πόρων έτσι ώστε οι απαιτήσεις του χρήστη να ικανοποιούνται και ταυτόχρονα τα οφέλη για τον διαχειριστή να μεγιστοποιούνται. Μπορούν να εφαρμόζονται είτε αυτόματα είτε με παρέμβαση του διαχειριστή. Με την τεχνολογία που υπάρχει σήμερα θα μπορούσε κάποιος να ισχυριστεί ότι δεν υπάρχει η ανάγκη για πολύπλοκες τεχνικές διαχείρισης της κίνησης. Η πρόοδος στα δίκτυα οπτικών ινών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση στο bandwidth, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το κόστος. Η ευρεία διάδοση τέτοιων τεχνολογιών επιταχύνεται και οι εταιρίες είναι σε θέση να παρέχουν υψηλό bandwidth στους πελάτες τους τόσο για τοπική επικοινωνία μέσα σε ένα δίκτυο όσο και για επικοινωνία μεταξύ δικτύων διαφορετικών τεχνολογιών.

Χωρίς να παραβλέπουμε αυτήν την εξέλιξη στην τεχνολογία, οι τεχνικές διαχείρισης της κίνησης σε ένα δίκτυο παραμένουν πολύ σημαντικές και επίσης πολύ σημαντικό είναι να βρεθούν αποδοτικοί μηχανισμοί για την εφαρμογή αυτών των τεχνικών. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι που διατηρούν τη σημασία τους όπως για παράδειγμα το γεγονός ότι παράλληλα με την αύξηση στο διαθέσιμο bandwidth αυξάνονται διαρκώς οι χρήστες και οι απαιτήσεις τους. Επιπρόσθετα, το διαθέσιμο bandwidth για τους χρήστες ολοένα και αυξάνεται με την εγκαθίδρυση τεχνολογιών όπως xDSL και οπτικές ίνες. Προφανώς, οι εταιρίες θέλουν να κάνουν απόσβεση στα

χρήματα που έχουν επενδύσει για την ανάπτυξη των τεχνολογιών ώστε οι χρήστες να απολαμβάνουν τόσο μεγάλο bandwidth. Αυτό επιτυγχάνεται με διαφοροποίηση των υπηρεσιών και χρέωση ανάλογα με τη χρήση και την ποιότητα υπηρεσιών που απολαμβάνει ο κάθε χρήστης. Για να είναι η χρέωση απλή και αποτελεσματική χρειάζεται να αναπτυχθούν μηχανισμοί παρακολούθησης του δικτύου αλλά και επιβεβαίωσης ότι οι χρήστες απολαμβάνουν τις υπηρεσίες για τις οποίες έχουν πληρώσει.

Σήμερα, όμως, με τους υπάρχοντες μηχανισμούς υπάρχουν πολλά προβλήματα στον έλεγχο και στη διαχείριση των δικτύων. Ο λόγος είναι η αύξηση των υπηρεσιών που παρέχονται που έχει σαν αποτέλεσμα τεράστιο όγκο κίνησης στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, είναι ξεκάθαρο ότι το Internet αλλά και άλλα δίκτυα που βασίζουν τη δρομολόγηση στο IP (Internet Protocol), δεν παρέχουν επαρκή υποστήριξη για αποδοτικό έλεγχο και διαχείριση της κίνησης.

Οι τεχνικές διαχείρισης της κίνησης σε ένα δίκτυο καθορίζουν πλέον την απόδοση και την αξιοπιστία του. Στην κατεύθυνση αυτή, σημαντική πρόκληση είναι ο τρόπος που το δίκτυο αντιλαμβάνεται και αντιδρά στις δυναμικές και σε πολλές φορές απρόβλεπτες αλλαγές στο φορτίο που δρομολογείται καθώς και ο τρόπος που θα μπορούσε να διαχειριστεί πιθανές διακυμάνσεις στην κίνηση με τρόπο τέτοιο ώστε να διασφαλίζονται η εξισορρόπηση της κίνησης (load balancing) και η αποφυγή συμφόρησης (congestion avoidance). Θα πρέπει λοιπόν να εφαρμόζονται στρατηγικές που στοχεύουν στην βελτίωση της αποδοτικότητας των διαθέσιμων πόρων. Πρακτικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι μηχανισμοί αυτοί θα πρέπει να προσπαθούν να βάζουν την κίνηση εκεί που υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι. Επομένως, πρόκειται για κάποιου είδους βελτιστοποίησης της δρομολόγησης για την ενίσχυση των δυνατοτήτων των δικτύων.

Πρόσφατα, παρατηρείται αυξημένο ενδιαφέρον για ενεργειακά αποδοτική λειτουργία των δικτύων. Η απότομη αύξηση των χρηστών και των υπηρεσιών που πρέπει να υποστηριχθούν, η εξάπλωση της ευρυζωνικής πρόσβασης με την ταυτόχρονη αύξηση στην τιμή της ενέργειας καθιστούν αναγκαίο τον έλεγχο της ενέργειας που καταναλώνεται. Δυστυχώς, οι συσκευές που αποτελούν σήμερα τα δίκτυα δεν παρέχουν υποστήριξη προς την κατεύθυνση της αποδοτικής διαχείρισης της ενέργειας.

Κεφάλαιο 2: Static Configuration

Σε ένα δίκτυο υπάρχουν χρήστες που στέλνουν πληροφορίες σπασμένες σε πακέτα το ένα μετά το άλλο. Τα πακέτα πηγαίνουν από τον έναν δρομολογητή στον επόμενο μέχρι να καταλήξουν στον προορισμό τους. Ο δρομολογητής διαβάζει το κατάλληλο πεδίο, στην κατάλληλη επικεφαλίδα στο πακέτο και αποφασίζει μέσω ποιας διεπαφής πρέπει να το στείλει στον επόμενο δρομολογητή (προώθηση). Για την δρομολόγηση των πακέτων στο δίκτυο υπεύθυνο είναι το επίπεδο δικτύου (IP). Σε αυτήν την παράγραφο θα περιγράψουμε τον τρόπο που κινούνται τα πακέτα όταν έχουμε στατική δρομολόγηση.

Ο ρόλος του επιπέδου δικτύου είναι φαινομενικά απλός, να μεταφέρει τα πακέτα από την πηγή στον προορισμό. Για το σκοπό αυτό χρειάζονται 2 λειτουργίες: η προώθηση και η δρομολόγηση.

- Προώθηση. Όταν ένα πακέτο έρχεται σε μία θύρα του δρομολογητή, ο δρομολογητής πρέπει να μεταφέρει αυτό το πακέτο στην κατάλληλη θύρα εξόδου. Για να πάρει αυτήν την απόφαση χρειάζεται να ελέγξει τον πίνακα δρομολόγησης που έχει. Σε αυτόν υπάρχουν ζεύγη εγγραφών με τις διευθύνσεις των προορισμών και με τις αντίστοιχες θύρες εξόδου.
- Δρομολόγηση. Το επίπεδο δικτύου καθορίζει τη διαδρομή ή αλλιώς το μονοπάτι που θα ακολουθήσουν τα πακέτα καθώς ρέουν από την πηγή προς τον τελικό αποδέκτη. Οι αλγόριθμοι που υπολογίζουν ποια θα είναι αυτά τα μονοπάτια ονομάζονται αλγόριθμοι δρομολόγησης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δηλαδή στη στατική δρομολόγηση δεν γίνεται κάποιος πολύπλοκος υπολογισμός, αλλά σε κάθε δρομολογητή δίνεται ρητά ποια διεπαφή εξόδου αντιστοιχεί σε ποια διεύθυνση προορισμού και η πληροφορία αυτή δεν αλλάζει. Ο δρομολογητής δεν επικοινωνεί με άλλους για να ανταλλάξει πληροφορίες δρομολόγησης. Όλοι έχουν τον δικό τους πίνακα με τα στοιχεία που πρέπει να ξέρουν χωρίς να γνωρίζουν τι γίνεται στο υπόλοιπο δίκτυο.

Επομένως, η προώθηση αναφέρεται στην τοπική λειτουργία του δρομολογητή για την μεταφορά ενός πακέτου από την διεπαφή εισόδου στην κατάλληλη διεπαφή εξόδου. Ενώ, η δρομολόγηση αναφέρεται στη γενικότερη διεργασία του δικτύου η οποία καθορίζει τα μονοπάτια από το ένα άκρο στο άλλο, από την πηγή στον προορισμό.

Σε έναν δρομολογητή μπορούμε να διακρίνουμε 4 μέρη, τις θύρες εισόδου, το τμήμα μεταγωγής, τις θύρες εξόδου και τον επεξεργαστή δρομολόγησης στον οποίο περιλαμβάνεται και ο πίνακας προώθησης. Στις θύρες εισόδου υλοποιούνται αρκετές λειτουργίες. Υλοποιούνται οι λειτουργίες του φυσικού επιπέδου αφού στο σημείο αυτό τελειώνει η σύνδεση και ξεκινάει ο δρομολογητής. Υλοποιούνται οι λειτουργίες του επιπέδου σύνδεσης. Επίσης γίνεται και μία πρώτη λειτουργία προώθησης. Τα πακέτα που περιλαμβάνουν πληροφορίες ελέγχου προωθούνται στον επεξεργαστή δρομολόγησης. Το τμήμα μεταγωγής περνάει τα πακέτα από τις θύρες εισόδου στις θύρες εξόδου. Στις θύρες εξόδου τα πακέτα αποθηκεύονται και στη συνέχεια όταν είναι εφικτό μεταδίδονται στη σύνδεση προς τον επόμενο προορισμό. Στις θύρες εξόδου εκτελούνται αντίστροφα οι λειτουργίες που εκτελέστηκαν στις θύρες εισόδου. Τέλος, στον επεξεργαστή δρομολόγησης εκτελούνται τα πρωτόκολλα δρομολόγησης αν υπάρχουν και δημιουργούνται οι πίνακες προώθησης που χρειάζονται για να δρομολογηθούν τα πακέτα σωστά στο δίκτυο.

Σε κάθε δρομολογητή υπάρχει ένας πίνακας προώθησης. Ο δρομολογητής, πριν προωθήσει το πακέτο, εξετάζει μία τιμή σε ένα πεδίο της επικεφαλίδας του πακέτου και μετά χρησιμοποιεί αυτήν την τιμή για να την αναζητήσει στον πίνακα. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από αυτήν την αναζήτηση δείχνει σε ποια από τις θύρες εξόδου του δρομολογητή πρέπει να προωθηθεί το πακέτο. Ανάλογα με το πρωτόκολλο που ακολουθείται η τιμή στην επικεφαλίδα του πακέτου μπορεί να είναι η διεύθυνση του προορισμού του πακέτου ή μία ένδειξη της κατηγορίας σύνδεσης (κλάσης) στην οποία το πακέτο ανήκει.

Σημαντικό θέμα είναι ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται οι πίνακες προώθησης στους δρομολογητές. Αυτό είναι πολύ κρίσιμο και δείχνει τη σχέση μεταξύ προώθησης και δρομολόγησης. Οι τιμές λοιπόν που μπαίνουν στους πίνακες προώθησης των δρομολογητών καθορίζονται από τον αλγόριθμο δρομολόγησης του δικτύου. Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να είναι κεντροποιημένος, για παράδειγμα με έναν αλγόριθμο που εκτελείται σε έναν κεντρικό υπολογιστή με τις πληροφορίες δρομολόγησης να κατευθύνονται μετά σε όλους τους δρομολογητές, ή αποκεντροποιημένος, για παράδειγμα με ένα κομμάτι του κατανεμημένου αλγορίθμου να τρέχει σε κάθε δρομολογητή. Σε κάθε περίπτωση ο δρομολογητής ενημερώνεται για να γεμίσει τον πίνακά του με τις απαραίτητες πληροφορίες. Όπως είπαμε και πιο πριν εδώ εξετάζουμε τη στατική δρομολόγηση. Άρα, ο δρομολογητής ενημερώνεται μία φορά για τη συσχέτιση διευθύνσεων προορισμών με θύρες εξόδου και ακολουθεί αυτές τις πληροφορίες για να προωθήσει τα πακέτα που έρχονται σε

αυτόν. Δεν έχει γνώση για τίποτα άλλο στο δίκτυο. Θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι σε ένα δίκτυο όλοι οι πίνακες προώθησης ρυθμίζονται στατικά από διαχειριστές του δικτύου οι οποίοι πηγαίνουν σε κάθε δρομολογητή και αποθηκεύουν τα δεδομένα που χρειάζονται. Σε αυτή την περίπτωση δεν θα χρειάζονταν κάποιο πρωτόκολλο. Για να μπορεί βέβαια να επιτευχθεί και η δρομολόγηση των πακέτων θα πρέπει αυτοί οι διαχειριστές να έχουν συνεργαστεί ώστε να εξασφαλίσουν ότι οι πίνακες έχουν ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε τα πακέτα να φτάνουν στον τελικό τους προορισμό. Προφανώς αυτή η προσέγγιση έχει πολλά μειονεκτήματα. Η παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα έχει σαν αποτέλεσμα η διαδικασία να είναι πιο ευάλωτη σε λάθη, να είναι πιο αργή. Επίσης, το μεγαλύτερο μειονέκτημα της στατικής δρομολόγησης είναι ότι το δίκτυο δεν μπορεί να αντιδράσει σε καμία αλλαγή. Το δίκτυο θα έχει ρυθμιστεί μία φορά για τις ανάγκες που υπήρχαν εκείνη τη στιγμή. Αν έχουμε αυξομειώσεις στις απαιτήσεις ενός χρήστη, αν προστεθούν νέοι χρήστες στο δίκτυο, αν συμβεί κάποιο πρόβλημα στο υλικό είτε σε έναν κόμβο είτε σε μία σύνδεση και γενικά για ότι προκύψει, το δίκτυο δεν μπορεί να κάνει κάτι. Τα πακέτα θα συνεχίζουν να κατευθύνονται σε μία σύνδεση που έχει συμφόρηση, σε μία σύνδεση που έχει πέσει, σε έναν δρομολογητή που έχει γεμίσει με αποτέλεσμα να μην φτάσουν ποτέ στον προορισμό τους. Ακόμα και αν δεν έχουμε απώλειες πακέτων είναι ξεκάθαρο ότι θα έχουμε μειωμένη απόδοση.

Κεφάλαιο 3: Open Shortest Path First (OSPF)

Η δρομολόγηση με βάση το πρωτόκολλο OSPF είναι ευρύτερα διαδεδομένη για δρομολόγηση μέσα στο ίδιο AS (Αυτόνομο Σύστημα). Το OSPF χρησιμοποιείται κυρίως στα άνω επίπεδα των ISPs. Η λέξη Open στην ονομασία υποδεικνύει ότι οι προδιαγραφές δρομολόγησης του πρωτοκόλλου δημόσια διαθέσιμες. Η πιο πρόσφατη έκδοση του OSPF η version 2 ορίζεται στο RFC2328, το οποίο είναι δημόσια ανοικτό έγγραφο.

Το OSPF σχεδιάστηκε ως ο διάδοχος του RIP (Routing Information Protocol) και έχει αρκετά προηγμένα χαρακτηριστικά. Κατά βάση είναι ένα link-state πρωτόκολλο το οποίο γεμίζει (flooding) το δίκτυο με πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά και για την κατάσταση των συνδέσεων και έπειτα χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο του Dijkstra για να βρεθούν τα μονοπάτια με το μικρότερο κόστος. Με το OSPF ένας δρομολογητής κατασκευάζει έναν πλήρη τοπολογικό χάρτη (γράφο) του δικτύου. Έπειτα, σε κάθε δρομολογητή τρέχει ο αλγόριθμος του Dijkstra, με σκοπό να δημιουργηθεί ένα δέντρο συντομότερων μονοπατιών, με τον ίδιο ως αφετηρία, προς κάθε προορισμό. Τα κόστη των συνδέσεων καθορίζονται από τον διαχειριστή του δικτύου. Μπορεί να επιλέξει να θέσει κάθε σύνδεση να έχει κόστος ίσο με 1 και με αυτόν τον τρόπο να επιτυγχάνεται δρομολόγηση με τον μικρότερο δυνατό αριθμό δρομολογητών. Σε άλλη περίπτωση μπορεί να επιλέξει να θέσει τα βάρη των συνδέσεων αντιστρόφως ανάλογα με την χωρητικότητά τους έτσι ώστε να αποτρέψει την κίνηση να προωθείται από συνδέσεις με μικρή χωρητικότητα. Στο OSPF δεν καθορίζεται συγκεκριμένη πολιτική για το πώς θα επιλέγονται τα βάρη των συνδέσεων, αυτό είναι δουλειά του διαχειριστή του δικτύου. Αλλά παρέχει τους μηχανισμούς που χρειάζονται για να γίνεται η δρομολόγηση των πακέτων από τα συντομότερα μονοπάτια σύμφωνα με τα βάρη που έχουν οριστεί.

Κάθε δρομολογητής μεταδίδει πληροφορίες δρομολόγησης σε όλους τους άλλους δρομολογητές στο αυτόνομο σύστημα και όχι μόνο στους γειτονικούς του. Στέλνει πληροφορίες και κάθε φορά που υπάρχει μία αλλαγή στην κατάσταση μιας σύνδεσης, για παράδειγμα μπορεί να υπάρχει μία αλλαγή στο κόστος ή μπορεί να υπάρχει ακόμα και πτώση της σύνδεσης. Επίσης, μεταδίδει πληροφορίες για την κατάσταση μιας σύνδεσης ανά περιοδικά διαστήματα ακόμα και αν δεν έχει υπάρξει κάποια αλλαγή. Στο RFC2328 διατυπώνεται ότι αυτή η περιοδική ανανέωση/ενημέρωση της κατάστασης των συνδέσεων προσθέτει ευρωστία στον αλγόριθμο και γενικότερα στη δρομολόγηση στο δίκτυο. Οι OSPF πληροφορίες περιλαμβάνονται σε OSPF μηνύματα, τα οποία μεταφέρονται απευθείας στο IP

επίπεδο. Για το λόγο αυτό θα πρέπει το ίδιο το πρωτόκολλο να εξασφαλίζει την αξιόπιστη μετάδοση και μεταφορά των μηνυμάτων. Για να διαπιστώσει αν οι συνδέσεις λειτουργούν κανονικά σε περιοδικά χρονικά διαστήματα κάθε δρομολογητής στέλνει HELLO μηνύματα στους γειτονικούς του.

Σημαντικά πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- Ασφάλεια. Οι ανταλλαγές μηνυμάτων μεταξύ των δρομολογητών μπορούν να γίνονται με αυθεντικοποίηση. Με τη μέθοδο αυτή μόνο αξιόπιστοι δρομολογητές μπορούν να συμμετέχουν στην λειτουργία του πρωτοκόλλου μέσα σε ένα αυτόνομο σύστημα. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να αποφευχθούν κακόβουλοι χρήστες από το να στείλουν λανθασμένες πληροφορίες δρομολόγησης στους δρομολογητές. Για την αυθεντικοποίηση των πακέτων που περιλαμβάνουν τις πληροφορίες δρομολόγησης μπορεί να χρησιμοποιηθούν πολλές τεχνικές όπως είναι η χρησιμοποίηση κάποιου password που θα είναι γνωστό μόνο στους δρομολογητές.
- Πολλαπλά μονοπάτια ίσου κόστους. Όταν υπάρχουν από μία πηγή προς έναν προορισμό πολλά μονοπάτια με το ίδιο κόστος τότε το OSPF επιτρέπει αυτά να χρησιμοποιηθούν και η κίνηση να σπάσει σε αυτά. Δηλαδή, δεν θα επιλεγεί ένα μόνο μονοπάτι.
- Υποστήριξη τόσο για unicast όσο και για multicast δρομολόγηση. Το Multicast OSPF είναι μία επέκταση που επιτρέπει τη δρομολόγηση των πακέτων ταυτόχρονα προς πολλούς προορισμούς.
- Υποστήριξη ιεραρχίας μέσα στην ίδια περιοχή. Ίσως το πιο σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ικανότητα να δημιουργείται ιεραρχική δομή μέσα στο ίδιο αυτόνομο σύστημα.

Σε ένα αυτόνομο σύστημα που χρησιμοποιεί το OSPF, μπορεί να χωριστεί ιεραρχικά σε περιοχές. Κάθε περιοχή τρέχει τον δικό της αλγόριθμο δρομολόγησης, με τον κάθε δρομολογητή σε αυτή την περιοχή να στέλνει πληροφορίες δρομολόγησης σε όλους τους άλλους δρομολογητές της ίδιας περιοχής. Μέσα σε κάθε περιοχή, θα υπάρχει ένας ή και παραπάνω δρομολογητές οι οποίοι θα είναι υπεύθυνοι για να δρομολογούν τα πακέτα έξω από αυτήν την περιοχή. Βέβαια, σε ένα αυτόνομο σύστημα μία μόνο περιοχή θα είναι η βασική. Ο ρόλος της θα είναι να δρομολογεί την κίνηση μεταξύ των άλλων περιοχών του αυτόνομου συστήματος.

Προηγουμένως, θεωρήσαμε ότι ρυθμίζονται τα βάρη στις συνδέσεις, έπειτα ένας αλγόριθμος δρομολόγησης όπως είναι ο OSPF τρέχει και οι ροές κίνησης κατευθύνονται στο δίκτυο σύμφωνα με τους πίνακες δρομολόγησης που έχουν

προκύψει από την εφαρμογή του αλγορίθμου. Πρώτα δίνονται τα βάρη των συνδέσεων και από αυτά υπολογίζονται τα μονοπάτια με το ελάχιστο κόστος. Από αυτήν την πλευρά τα βάρη των συνδέσεων δείχνουν το κόστος της χρησιμοποίησης κάθε σύνδεσης, για παράδειγμα αν τα βάρη είναι αντιστρόφως ανάλογα της χωρητικότητας τότε η επιλογή συνδέσεων υψηλής χωρητικότητας θα έχει μικρότερα βάρη και θα γίνεται συχνότερα από τον αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος του Dijkstra θα έχει σαν αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Πρακτικά, η σχέση αυτή μεταξύ του βάρους κάθε σύνδεσης και των μονοπατιών δρομολόγησης μπορεί να αντιστραφεί, με τους διαχειριστές ενός δικτύου να ρυθμίζουν τα βάρη με τέτοιο τρόπο ώστε τα μονοπάτια που προκύπτουν να πετυχαίνουν συγκεκριμένους στόχους (traffic engineering). Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι ένας διαχειριστής δικτύου έχει μία εκτίμηση της κίνησης που μπαίνει στο δίκτυο σε κάθε σημείο εισόδου και προορίζεται για κάθε σημείο εξόδου. Ο διαχειριστής μπορεί να επιθυμεί να εφαρμόσει συγκεκριμένο τρόπο δρομολόγησης των πακέτων ώστε η κίνηση από την είσοδο μέχρι την έξοδο να περιοριστεί σε συγκεκριμένα μονοπάτια για να ελαχιστοποιηθεί ο μέγιστος βαθμός χρησιμοποίησης κάθε σύνδεσης στο δίκτυο. Αλλά με έναν αλγόριθμο δρομολόγησης σαν τον OSPF, τα μόνα εργαλεία που έχει στη διάθεσή του ο διαχειριστής είναι τα βάρη των συνδέσεων. Επομένως, προκειμένου να επιτύχει τον στόχο του, πρέπει να τροποποιήσει τα βάρη κατάλληλα για να επιλέγονται τα κατάλληλα μονοπάτια. Αυτή είναι η αντίστροφη εκδοχή από τη στιγμή που πρώτα επιλέγονται τα μονοπάτια και μετά βρίσκονται τα σωστά βάρη από τα οποία με εφαρμογή του αλγορίθμου θα προκύψουν αυτά τα μονοπάτια.

Κεφάλαιο 4: Multiprotocol Label Switching (MPLS)

Το MPLS είναι μια τεχνολογία που έχει καθοριστεί από την IETF (Internet Engineering Task Force) και προσβλέπει στον αποδοτικό προσδιορισμό, δρομολόγηση, προώθηση, και μεταγωγή της ροής της κυκλοφορίας μέσα στο δίκτυο. Τα σημερινά δίκτυα περιορίζονται από προβλήματα ταχύτητας, επεκτασιμότητας, διαχείρισης ποιότητας υπηρεσιών και διαχείριση κινητικότητας μηνυμάτων. Το MPLS παρουσιάστηκε ως ευπροσάρμοστη λύση για τα προβλήματα αυτά. Το σημαντικό σε αυτή την αρχιτεκτονική είναι ότι μπορεί να υπάρξει πάνω από οποιοδήποτε τύπο επιπέδου σύνδεσης (Ethernet, ATM, frame relay, SONET) για αυτό και το όνομά του περιέχει την λέξη "Multiprotocol".

Για την κατανόηση της λειτουργίας του MPLS, παρακάτω δίνονται σε συντομία κάποιοι από τους πιο σημαντικούς όρους που χρησιμοποιούνται σε ένα MPLS δίκτυο. MPLS network είναι ένα δίκτυο το οποίο αποτελείται από δρομολογητές που υποστηρίζουν MPLS. Label Switch Router (LSR) είναι ο δρομολογητής που υποστηρίζει MPLS. Edge Label Switch Router (LER) είναι ο δρομολογητής που ενώνεται με δρομολογητές που δεν υποστηρίζουν MPLS. Βρίσκεται στο άκρο το δικτύου MPLS. Ingress Label Switch Router είναι δρομολογητής που ενώνεται με δρομολογητές που δεν υποστηρίζουν MPLS. Βρίσκεται στο άκρο το δικτύου MPLS, στο σημείο όπου το πακέτο μπαίνει στο MPLS δίκτυο. Egress Label Switch Router είναι ο δρομολογητής που ενώνεται με δρομολογητές που δεν υποστηρίζουν MPLS. Βρίσκεται στο άκρο το δικτύου MPLS, στο σημείο όπου το πακέτο βγαίνει από το MPLS δίκτυο. Forwarding Equivalent Class (FEC) είναι μια ομάδα πακέτων που απαιτεί παρόμοια διαχείριση. Label είναι μια αριθμητική τιμή (ετικέτα) που αντιπροσωπεύει ένα FEC. Label Switching Path (LSP) είναι ολοκληρωμένο μονοπάτι που σχετίζει εισερχόμενα πακέτα που έχουν ετικέτα με κάποια εξερχόμενη ενέργεια. Label Distribution Protocol είναι το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για να κατανέμει τις ετικέτες μεταξύ των LSRs.

Η αρχιτεκτονική MPLS προσβλέπει στον αποδοτικό προσδιορισμό, δρομολόγηση, προώθηση, και μεταγωγή της ροής της κυκλοφορίας μέσα στο δίκτυο. Ο στόχος της επιτυγχάνεται με της λειτουργίες που εκτελούνται στα πακέτα που εισέρχονται σε ένα MPLS δίκτυο. Τα βήματα που ακολουθούνται αναλύονται στην συνέχεια. Πριν οποιαδήποτε μεταφορά πακέτων ξεκινήσει, οι δρομολογητές παίρνουν την απόφαση να δεσμεύσουν μια ετικέτα και να δημιουργήσουν τους πίνακες τους. Η δέσμευση μια ετικέτας συνδέεται με ένα συγκεκριμένο FEC. Οι downstream δρομολογητές ξεκινούν διανομή ετικετών και δέσμευση ετικέτας/FEC.

Για τα σήματα που στέλνονται για το LDP πρωτόκολλο εγκαθιδρύεται TCP σύνδεση. Τα χαρακτηριστικά σχετικά με την κίνηση των μηνυμάτων και οι δυνατότητες του MPLS διαβιβάζονται χρησιμοποιώντας το LDP πρωτόκολλο. Όταν τα LSR λαμβάνουν label binding δημιουργούν εγγραφές στο Label Information Base (LIB). Στα περιεχόμενα του πίνακα θα καθορίζεται η σύνδεση μεταξύ της ετικέτας και του FEC, συγκεκριμένα η εγγραφή του LIB περιέχει input port, input label με output port, output label. Οι εγγραφές αυτές ανανεώνονται όποτε έχουμε επανάδιαβίβαση πακέτων. Η δημιουργία του LSP γίνεται στην αντίθετη κατεύθυνση της εισαγωγής εγγραφών στο πίνακα LIB. Ένας LER δρομολογητής χρησιμοποιεί το LIB πίνακα για βρει τον επόμενο κόμβο για ένα συγκεκριμένο FEC. Οι επόμενοι κόμβοι απλά χρησιμοποιούν την ετικέτα για να βρουν τον επόμενο δρομολογητή. Μόλις το πακέτο φτάσει στο egress LER, η ετικέτα απομακρύνεται από το πακέτο και το πακέτο μεταφέρεται στο προορισμό ανάλογα με το routing protocol που χρησιμοποιείται από τον επόμενο κόμβο. Ο αρχικός LER δρομολογητής αν δεν έχει εγγραφή στο πίνακα LIB για ένα συγκεκριμένο FEC τότε στέλνει label request στον επόμενο κόμβο. Το αίτημα μεταδίδεται στο δίκτυο από τον αρχικό LER στον LER εξόδου. Κάθε δρομολογητής ξεχωριστά λαμβάνει ένα label από τον downstream κόμβο. Η εγκαθίδρυση του LSP γίνεται χρησιμοποιώντας ένα πρωτόκολλο σηματοδότησης. Ο ingress LER θα εισάγει την εγγραφή στον πίνακα και θα προωθήσει το πακέτο στον επόμενο LSR. Κάθε δρομολογητής με την σειρά του θα ελέγξει το label βάση του πίνακα LIB και θα βρει τον επόμενο δρομολογητή του μονοπατιού. Πριν το προωθήσει αντικαθιστά το label με το αντίστοιχο output label. Όταν ο egress LER παραλάβει το μήνυμα θα μετακινήσει το label από το πακέτο επειδή βγαίνει από το MPLS domain και θα το προωθήσει στον προορισμό.

Η επιλογή του MPLS για την αρχιτεκτονική του σώματος του δικτύου στηρίζεται στα ακόλουθα πλεονεκτήματα σε σχέση με την συνηθισμένη προώθηση από IP κόμβους. Η προώθηση των πακέτων με MPLS μπορεί να γίνει με switches, τα οποία είναι ικανά για έλεγχο των ετικετών και αντικατάσταση, αλλά είτε δεν είναι ικανά για ανάλυση της επικεφαλίδας του επιπέδου δικτύου ή δεν είναι ικανά για ανάλυση της επικεφαλίδας του επιπέδου δικτύου με ικανοποιητική ταχύτητα. Από την στιγμή που ένα πακέτο αντιστοιχεί σε ένα FEC όταν εισάγετε στο δίκτυο ο δρομολογητής εισόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον καθορισμό της ανάθεσης οποιασδήποτε πληροφορίας είναι σχετική με το πακέτο, ακόμη και αν αυτή η πληροφορία δεν μπορεί να προκύψει από την επικεφαλίδα του επιπέδου δικτύου. Για παράδειγμα πακέτα που φτάνουν σε διαφορετικά ports μπορεί να ανατεθούν σε διαφορετικά FEC. Στην συνηθισμένη προώθηση IP, μπορεί να μελετήσει

πληροφορίες που βρίσκονται μόνο στην επικεφαλίδα του πακέτου. Ένα πακέτο που εισάγεται στο δίκτυο από ένα συγκεκριμένο δρομολογητή μπορεί να πάρει ετικέτα διαφορετική από ένα ίδιο πακέτο που εισάγεται στο δίκτυο από διαφορετικό δρομολογητή, και ως αποτέλεσμα αποφάσεις προώθησης που εξαρτώνται από τον δρομολογητή εισόδου μπορούν να γίνουν εύκολα. Αυτό δεν μπορεί να γίνει με συνηθισμένη προώθηση, από την στιγμή που η αναγνώριση από τον δρομολογητή εισόδου δεν ταξιδεύει με το πακέτο. Οι αιτίες που καθορίζουν πως το πακέτο αναθέτετε σε ένα FEC μπορεί να γίνουν πολύ πολύπλοκοι, χωρίς καμία επιρροή σε δρομολογητές που προωθούν πακέτα με ετικέτα. Κάποιες φορές είναι επιθυμητό ένα πακέτο να ακολουθήσει μια συγκεκριμένη διαδρομή που είναι επιλεγμένη ρητά πριν ή την στιγμή που το πακέτο εισάγεται στο δίκτυο, λόγω πολιτικής ή για υποστήριξη traffic engineering. Με την συνηθισμένη προώθηση αυτό απαιτεί το πακέτο να μεταφέρει μια κωδικοποίηση κατά μήκος της διαδρομής αυτής (source routing). Στο MPLS, η ετικέτα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναπαραστήσει την διαδρομή, έτσι και η αναγνώριση της ρητής διαδρομής δεν χρειάζεται να μεταφέρετε.

Για την παροχή εγγυήσεων QoS σε ένα δίκτυο πρέπει να χρησιμοποιηθούν τεχνικές διαχείρισης πόρων. Χωρίς διαχείριση πόρων σε τελικά συστήματα (αποστολές και παραλήπτες των δεδομένων), δίκτυα και δικτυακό εξοπλισμό, τα δίκτυα αδυνατούν να παρέχουν αξιόπιστη ποιότητα υπηρεσιών στους χρήστες. Μετάδοση δεδομένων πάνω σε αδέσμευτους πόρους πολλές φορές οδηγεί σε καθυστερημένα και χαμένα πακέτα λόγω της μη διαθεσιμότητας των απαιτούμενων πόρων. Συνεπώς η διαχείριση πόρων παίζει σημαντικό ρόλο. Για το λόγο αυτό ένα πολύ σημαντικό κομμάτι των δικτύων είναι το πρωτόκολλο δέσμευσης πόρων στο επίπεδο δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα πρωτόκολλο δέσμευσης πόρων δεν κάνει καμία δέσμευση απαιτούμενων πόρων το ίδιο, αλλά αποτελεί απλώς ένα μέσο που μεταφέρει πληροφορίες σχετικά με τις απαιτήσεις πόρων και διαπραγματεύεται τις τιμές του QoS που επιθυμούν οι χρήστες για τις εφαρμογές τους από άκρο σε άκρο.

Αν και η διαβάθμιση των μέσων (adaptive media), η οποία ρυθμίζει την ποσότητα των multimedia δεδομένων σύμφωνα με τους πόρους τους συστήματος που είναι κάθε στιγμή διαθέσιμοι, χρησιμοποιείται σε μερικά συστήματα, κάποια εγγύηση εξακολουθεί να απαιτείται από το σύστημα. Τα μέσα μπορούν να διαβαθμιστούν μόνο μέχρι κάποιο ορισμένο βαθμό και όχι κατά βούληση. Τα δίκτυα πρέπει να συνδυάζουν τεχνικές διαχείρισης πόρων για να πετύχουν την καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών με μια συγκεκριμένη ποσότητα πόρων.

Το RSVP (ReSource reserVation Protocol) πρωτόκολλο αποτελεί μέρος μιας ευρύτερης προσπάθειας να αξιοποιηθεί η υπάρχουσα υποδομή του Internet προσφέροντας υποστήριξη για QoS στις υπηρεσίες. Το πρωτόκολλο RSVP χρησιμοποιείται από ένα host προκειμένου να απαιτήσει από το δίκτυο συγκεκριμένη ποιότητα για ροή δεδομένων συγκεκριμένων εφαρμογών. Το RSVP χρησιμοποιείται από δρομολογητές ώστε αυτοί να μεταφέρουν τις συγκεκριμένες QoS απαιτήσεις σε όλους τους κόμβους του μονοπατιού της ροής των δεδομένων αλλά και να εξασφαλίσουν ότι όντως αυτές οι συγκεκριμένες απαιτήσεις πληρούνται.

Το RSVP αποτελεί ένα πρωτόκολλο για multicasting και unicasting σηματοδότηση το οποίο σχεδιάστηκε για την εγκατάσταση και την συντήρηση σταθμών πληροφοριών σε κάθε router που βρίσκεται στο μονοπάτι μετάδοσης δεδομένων, κατά την μετάδοση δεδομένων. Το RSVP επιτρέπει στον παραλήπτη να ζητήσει μία ορισμένη end-to-end ποιότητα υπηρεσίας. Οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου χρησιμοποιούν το RSVP για να δεσμεύσουν τους απαραίτητους πόρους στους routers κατά μήκος του μονοπατιού μετάδοσης, έτσι ώστε να είναι διαθέσιμη η απαιτούμενη χωρητικότητα όταν λάβει χώρα η μετάδοση των δεδομένων. Κατά συνέπεια, το RSVP είναι ένα πρωτόκολλο ελέγχου δικτύου που καθιστά τις Internet εφαρμογές ικανές να αποκτήσουν QoS χαρακτηριστικά. Το RSVP καταλαμβάνει τη θέση ενός πρωτοκόλλου μεταφοράς στο μοντέλο OSI των 7 επιπέδων, παρόλο που το ίδιο το RSVP δεν μεταφέρει τα δεδομένα.

Το RSVP έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά. Η ροή δεδομένων στο RSVP είναι μονής κατεύθυνσης. Το πρωτόκολλο διαχωρίζει τους αποστολείς από τους παραλήπτες. Παρόλο που σε πολλές περιπτώσεις ο αποστολέας μπορεί να είναι και παραλήπτης, το RSVP δεσμεύει πόρους μόνο προς τη μία κατεύθυνση. Το RSVP υποστηρίζει και multicast και unicast και προσαρμόζεται στις συνεχείς αλλαγές ενός δυναμικού περιβάλλοντος. Δηλαδή, επιτρέπεται η δυναμική σύνδεση και αποσύνδεση παραληπτών σε multicast σύνοδο. Παρέχει μια πληθώρα μοντέλων και "μορφών" (styles) ώστε να εξυπηρετεί μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Το RSVP είναι receiver-oriented και μπορεί να χειριστεί διαφορετικές κατηγορίες παραληπτών. Ο κάθε παραλήπτης είναι υπεύθυνος για να διαλέξει το δικό του επίπεδο QoS. Ο αποστολέας διαχωρίζει την κίνηση σε ξεχωριστά flows, ένα για κάθε διαφορετικό επίπεδο QoS. Το RSVP είναι συμπληρωματικό του IP ελέγχοντας τον τρόπο με τον οποίο το IP μεταδίδει τα πακέτα του. Προορίζεται κυρίως για έλεγχο των δεδομένων που αποστέλλονται και όχι για μεταφορά δεδομένων. Είναι αναγκαίο να υπάρχει ενημέρωση για τους διαθέσιμους πόρους πριν γίνουν αλλαγές στην δρομολόγηση. Χρησιμοποιώντας το RSVP ένας αποστολέας δε γνωρίζει ποιοι παραλαμβάνουν τα

δεδομένα που αποστέλλει. Το RSVP έχει καλή συμβατότητα. Τρέχει πάνω από IPv4 και IPv6. Επίσης, λειτουργεί ακόμα και όταν ένας δρομολογητής στο μονοπάτι ροής δεδομένων δεν το υποστηρίζει με την χρήση τεχνικής tunneling (απλά τα RSVP μηνύματα "περνάνε" χωρίς να υπόκεινται σε επεξεργασία).

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Κεφάλαιο 5: Energy Consumption

Η εξοικονόμηση ενέργειας έχει αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για όλες τις βιομηχανίες και πλέον σε αυτές περιλαμβάνεται και αυτές που αφορούν τα δίκτυα επικοινωνιών, καθώς υπάρχει ισχυρό κίνητρο να μειωθεί το κόστος.

Αντίθετα με τα ασύρματα δίκτυα, η διαχείριση της ενέργειας για συσκευές δικτύωσης όπως είναι οι δρομολογητές και άλλα στοιχεία των ενσύρματων δικτύων, δεν είχε μέχρι τώρα ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Οι ερευνητές έχουν προτείνει αρκετές στρατηγικές ώστε να κάνουν τους δρομολογητές περισσότερο ενεργειακά αποδοτικούς. Για παράδειγμα, η χωρητικότητα μιας σύνδεσης μπορεί να προσαρμόζεται στην κίνηση που έχει ή και να κλείνει όταν δεν υπάρχει κίνηση. Αυτή τη στιγμή όμως δεν υπάρχει έτοιμο υλικό που να εφαρμόζει αυτές τις τεχνικές. Βέβαια, τα ακριβή ποσοστά ενέργειας που θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν με αυτές τις μεθόδους δεν είναι ξεκάθαρα. Ένα εμπόδιο για την πρόοδο σε αυτόν τον τομέα είναι η έλλειψη μετρήσεων από πραγματικά δίκτυα και μία καλή κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η ενέργεια καταναλώνεται κάτω από διαφορετικά φορτία κίνησης και κάτω από διαφορετικές συνθήκες δρομολόγησης. Υπάρχουν πολλοί κατασκευαστές δικτυακών συσκευών και δεν υπάρχει καμία πρωτοτυποποίηση στην μέτρηση της ενέργειας που καταναλώνουν. Επίσης, δεν υπάρχουν και συγκριτικά αποτελέσματα για την αποτελεσματικότητα των διάφορων τεχνικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Επιπρόσθετα, αποτελεί πρόκληση για τους κατασκευαστές συσκευών να φτιάξουν τις συσκευές με τέτοιο τρόπο ώστε να καταναλώνουν ενέργεια ανάλογα με την κίνηση που εξυπηρετούν, όπως γίνεται σε ένα laptop. Έρευνα, επίσης, έχει γίνει για το πώς η αντιστοιχία αυτή της ενέργειας στις συσκευές θα μπορούσε να μετρηθεί. Έχει παρατηρηθεί ότι:

- Υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ των δρομολογητών σε σχέση με την μέγιστη ονομαστική ισχύ τους. Η ενέργεια που καταναλώνεται σε έναν δρομολογητή αυξάνεται γραμμικά με τον αριθμό των διεπαφών που συνδέονται στον δρομολογητή όπως και με τον αριθμό των θυρών που είναι ενεργές.
- Η ενέργεια που καταναλώνεται σε έναν δρομολογητή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του πακέτου για μία συγκεκριμένη διαπερατότητα κίνησης.
- Στην ιδανική περίπτωση, οι συσκευές θα πρέπει να καταναλώνουν ενέργεια ανάλογα με την κίνηση που έχουν.

Επίσης από μελέτες έχουν βρεθεί τα εξής:

- Η ισχύς που καταναλώνεται εξαρτάται από τον αριθμό των ενεργών θυρών. Συγκεκριμένα, αν απενεργοποιηθούν θύρες που δεν χρησιμοποιούνται σε μία κάρτα δικτύου τότε θα μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας της συσκευής. Όσο αυξάνει ο αριθμός των ενεργών θυρών, η ισχύς που καταναλώνεται αυξάνεται γραμμικά. Αυτό έχει μετρηθεί για συνδέσεις ταχύτητας 10 Mbps, 100 Mbps και 1 Gbps.
- Η ισχύς που καταναλώνεται εξαρτάται στην ταχύτητα της γραμμής στην οποία συνδέεται μία θύρα. Όταν έχουμε 1Gbps καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια από όταν έχουμε 10Mbps. Αυτό οφείλεται στην παραπάνω ενέργεια

που χρειάζεται για να λειτουργήσει το φυσικό επίπεδο σε υψηλές ταχύτητες. Επομένως, για θύρες με μικρό utilization είναι καλύτερα να ρυθμίζεται η θύρα σε ταχύτητα μικρότερη (10Mbps). Σε αντίθετη περίπτωση θα υπάρχουν πόροι που καταναλώνουν ενέργεια και δεν χρησιμοποιούνται.

- Η κίνηση που περνάει από μία συσκευή δεν έχει σημαντική επίδραση στην ισχύ που καταναλώνεται. Για θύρες σε γραμμές με ταχύτητα 10Mbps η επίδραση της κίνησης στην ισχύ είναι ελάχιστα υψηλότερη από αυτήν σε γραμμές 1 Gbps. Σε αυτήν την περίπτωση η ισχύς δεν επηρεάζεται από το μέγεθος του πακέτου.

Από τις μελέτες αυτές προκύπτουν 2 συμπεράσματα για τους διαχειριστές των δικτύων και για τους κατασκευαστές των συσκευών. Οι μετρήσεις δείχνουν ότι οι κατασκευαστές θα πρέπει να υιοθετήσουν τεχνικές, όπως η απενεργοποίηση κομματιών που δεν χρησιμοποιούνται, για να είναι πιο αποδοτικές ενεργειακά. Ταυτόχρονα βλέπουμε ότι θα μπορούσαμε να εξοικονομήσουμε ενέργεια χρησιμοποιώντας τεχνικές που κατευθύνουν την κίνηση. Θα μπορούσαν, δηλαδή, οι διαχειριστές ενός δικτύου να κατευθύνουν την κίνηση σε συγκεκριμένη κατεύθυνση ώστε να απενεργοποιήσουν τμήματα των δρομολογητών που δεν χρειάζονται να είναι ανοικτά.

ΜΕΡΟΣ Β΄

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΠΑ

Κεφάλαιο 6: OMNeT++

Ο OMNeT++ είναι ένας αντικειμενοστραφής προσομοιωτής διακεκριμένων γεγονότων (Discrete Event Simulator). Διαθέτει μια «γενική» αρχιτεκτονική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς όπως η μοντελοποίηση ασύρματων και ενσύρματων δικτύων επικοινωνιών, η μοντελοποίηση πρωτοκόλλων, η μοντελοποίηση δικτύων ουρών, η μοντελοποίηση μικροεπεξεργαστών και άλλων συστημάτων hardware.

Γενικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση οποιουδήποτε συστήματος για το οποίο είναι κατάλληλη η προσέγγιση των διακεκριμένων γεγονότων και το οποίο μπορεί να αντιστοιχηθεί σε οντότητες που επικοινωνούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας μηνύματα.

Στον OMNeT++ οι προσομοιωτές εξετάζουν διάφορα μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά αναφέρονται ως δίκτυα (networks). Κάθε μοντέλο-δίκτυο αποτελείται από ιεραρχικά δομημένες μονάδες (modules). Η κορυφαία στην ιεραρχία μονάδα είναι η μονάδα συστήματος και ισοδυναμεί με το δίκτυο που προσομοιώνουμε ως οντότητα-αντικείμενο. Αυτή περιέχει άλλα υπομέρη, τις λεγόμενες υπομονάδες (submodules), οι οποίες επίσης δύνανται με τη σειρά τους να περιέχουν άλλες υπομονάδες. Δεν υπάρχει περιορισμός στο εύρος της υποδιαίρεσης μιας μονάδας.

Η δομή ενός μοντέλου περιγράφεται με την NED γλώσσα προγραμματισμού του OMNeT ++. Οι μονάδες που περιέχουν άλλες υπομονάδες λέγονται σύνθετες μονάδες (compound modules). Οι μονάδες που βρίσκονται στο κατώτερο επίπεδο της ιεραρχίας καλούνται απλές μονάδες (simple modules). Οι απλές μονάδες είναι αυτές που περιέχουν τους αλγόριθμους του μοντέλου και καθορίζουν τη συμπεριφορά και λειτουργία του προσομοιωτή. Οι απλές μονάδες υλοποιούνται στη C++.

Τόσο οι απλές όσο και οι σύνθετες μονάδες είναι ενσαρκώσεις τύπων μονάδων (module types). Ο χρήστης όταν σχεδιάζει το μοντέλο ορίζει τύπους μονάδων. Ενσαρκώσεις αυτών αποτελούν μέρη πιο σύνθετων τύπων μονάδων, και εν τέλει ο χρήστης σχεδιάζει το δίκτυο/σύστημα σαν ένα τύπο μονάδος στο οποίο όλοι οι υπόλοιποι τύποι ενσαρκώνονται σαν υπομονάδες.

Όταν ένας τύπος μονάδος χρησιμοποιείται στο χτίσιμο του δικτύου, δεν εξετάζεται αν αυτή είναι απλή ή σύνθετη, και δεν αντιμετωπίζεται διαφορετικά σε κάθε περίπτωση. Δηλαδή με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιούμε ένα τύπο σύνθετης

χρησιμοποιούμε και ένα τύπο απλής μονάδος. Αυτό επιτρέπει να χωρίζουμε μια απλή μονάδα σε πολλές μικρότερες απλές μονάδες οι οποίες να τη συγκροτούν πλέον ως μια σύνθετη μονάδα. Έτσι μπορούμε να οργανώσουμε το σύστημά μας πιο αποδοτικά σε μικρά μέρη με αυτόνομο χαρακτήρα. Φυσικά είναι δυνατό και το αντίθετο, δηλαδή να ενώσουμε μερικές απλές μονάδες που συνιστούν μία σύνθετη σε μια απλή, που να υλοποιεί τις ίδιες λειτουργίες με την πρώτη υλοποίηση, και χωρίς να επηρεάζεται η διαχείριση της μονάδος από το σύστημα.

Ο OMNeT ++ χρησιμοποιεί μηνύματα για να αναπαραστήσει γεγονότα. Κάθε γεγονός είναι μια ενσάρκωση της cMessage τάξης ή κάποιας παράγωγης τάξης της. Τα μηνύματα αποστέλλονται από μονάδα σε μονάδα μέχρι να καταλήξουν στον προορισμό τους. Το γεγονός που ενεργοποιείται από το μήνυμα λαμβάνει χώρα στη μονάδα που παραλαμβάνει το μήνυμα και στον χρόνο προσομοίωσης που το παρέλαβε (arrival time). Τα μηνύματα επομένως εκτελούνται κατά προτεραιότητα παράδοσης στον παραλήπτη. Αν δύο μηνύματα φθάσουν στον ίδιο χρόνο προσομοίωσης στον ίδιο προορισμό, τότε εκτελείται πρώτα αυτό που έχει μικρότερη τιμή στην παράμετρο προτεραιότητα (priority). Αν και αυτή η παράμετρος είναι ίδια για τα δύο μηνύματα τότε πρώτα εκτελείται αυτό που εστάλη πρώτο.

Οι μονάδες επικοινωνούν στο OMNeT ++ ανταλλάσσοντας μηνύματα. Τα μηνύματα αυτά αντιπροσωπεύουν τα στοιχεία ροής του δικτύου που προσομοιώνουμε. Πχ για ένα οδικό δίκτυο τα μηνύματα αντιπροσωπεύουν τα οχήματα, για ένα δίκτυο επικοινωνίας δεδομένων τα πακέτα δεδομένων κλπ. Τα μηνύματα μπορούν να περιέχουν σύνθετες δομές δεδομένων. Ο τοπικός χρόνος προσομοίωσης μιας μονάδος προχωράει όταν αυτή δέχεται ένα μήνυμα. Το μήνυμα αυτό μπορεί να έχει αποσταλεί από κάποια άλλη μονάδα, ή από την ίδια (selfMessage) ώστε να εκκινήσει κάποιο γεγονός. Οι μονάδες μπορούν να στέλνουν μηνύματα κατευθείαν στους προορισμούς τους, ή μέσω θυρών(gates) και συνδέσεων (links). Οι θύρες (gates) είναι τα στοιχεία εισόδου/εξόδου των μονάδων και είναι δύο ειδών:

- input gates : θύρες εισόδου στις οποίες φτάνουν μηνύματα από άλλες μονάδες
- output gates : θύρες εξόδου από τις οποίες στέλνονται μηνύματα προς άλλες μονάδες

Οι συνδέσεις (links) γίνονται αποκλειστικά στο ίδιο επίπεδο ιεραρχίας ή στα αμέσως γειτονικά, εφόσον συνδέεται σύνθετη μονάδα με εσωτερική της υπομονάδα.

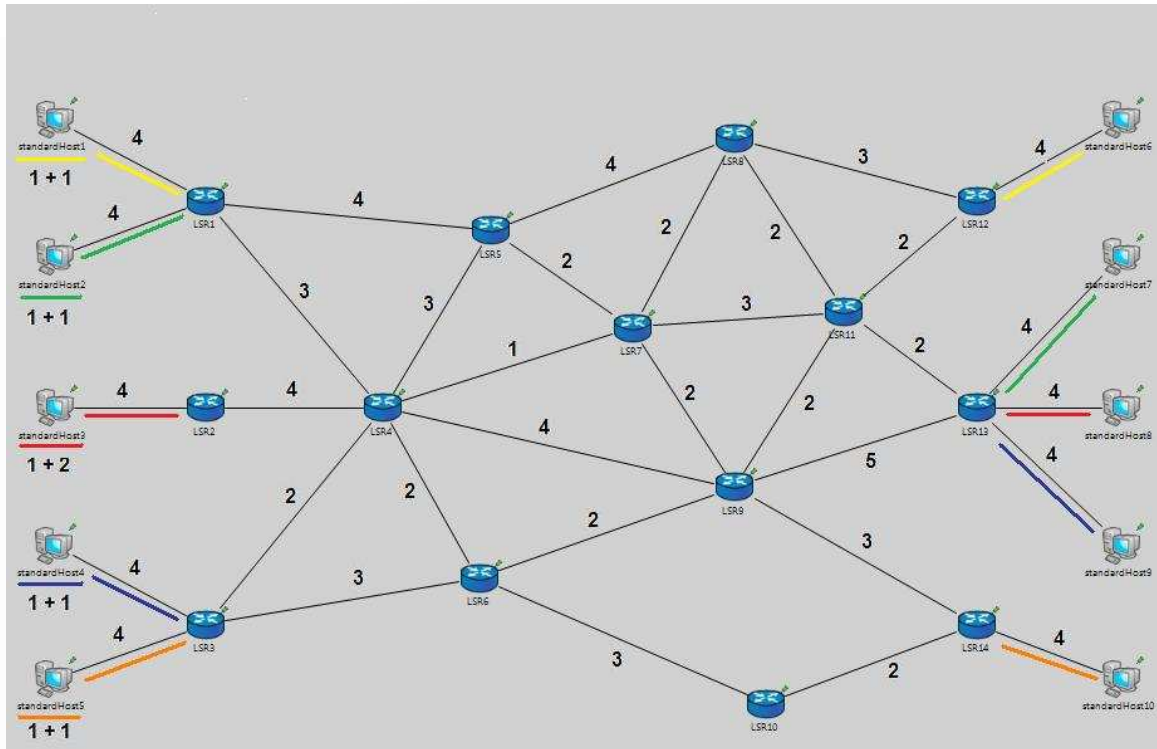
Εντός μιας σύνθετης μονάδας είτε θα συνδέονται μεταξύ τους δύο υπομονάδες είτε μια υπομονάδα με τη σύνθετη μονάδα που την περιέχει. Οι συνδέσεις γίνονται στις θύρες των μονάδων και προφανώς στα άκρα μιας διαδρομής πάντα συνδέεται μια θύρα εξόδου σε μια εισόδου.

Ο OMNeT ++ προσφέρει στο χρήστη δύο διαφορετικούς τρόπους εκτέλεσης προσομοιώσεων:

- a) Σε γραφικό περιβάλλον υλοποιημένο σε Tcl/Tk
- b) Εκτέλεση στη γραμμή εντολών του κελύφους

Κάθε υλοποίηση έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της. Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι το γραφικό περιβάλλον ενδείκνυται για παρουσιάσεις προσομοιώσεων, για εντοπισμό σφαλμάτων (debugging), αφού επιτρέπει την τροποποίηση μεταβλητών των μονάδων και του δικτύου κατά την εκτέλεση και γενικότερα για την καλύτερη εποπτεία της προσομοίωσης. Από την άλλη η εκτέλεση σε γραμμή εντολών δίνει ταχύτητα στην εξαγωγή αποτελεσμάτων και είναι ιδανική για μαζικές εκτελέσεις σεναρίων

Οι προσομοιώσεις στον OMNeT++ ελέγχονται από το αρχείο ρυθμίσεων omnetpp.ini. Στο αρχείο αυτό αποδίδονται οι τιμές των παραμέτρων των μονάδων και ορίζονται οδηγίες για τον τρόπο που θα εκτελείται η προσομοίωση. Κάθε γραμμή περιέχει μια ρύθμιση. Γραμμές που ξεκινούν με # είναι σχόλια. Σχόλια επιτρέπονται και στο τέλος μιας ρύθμισης. Οι ρυθμίσεις στο αρχείο omnetpp.ini ομαδοποιούνται σε τομείς.



Εικόνα 1: Τοπολογία δικτύου, χωρητικότητα των συνδέσεων, απαιτήσεις χρηστών

Για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει χρησιμοποιηθεί το παραπάνω δίκτυο. Όλες οι προσομοιώσεις αφορούν το παραπάνω δίκτυο και έχουν διάρκεια 60sec. Κάτω από τους hosts 1-5 φαίνεται το χρώμα που αντιστοιχεί στη ροή των πακέτων τους καθώς και τα Mbps των udp και tcp ροών τους π.χ. για τον 1 το μονοπάτι που ακολουθούν τα πακέτα του θα φαίνεται με κίτρινο χρώμα και δημιουργεί ροές udp και tcp των 1Mbps. Μέσα στο δίκτυο πάνω από κάθε αμφίδρομη σύνδεση φαίνεται το bandwidth της γραμμής σε Mbps. Επίσης, όπως φαίνεται και από τα χρώματα στους προορισμούς, ο host1 δημιουργεί δεδομένα για τον host6, ο host2 για τον host7, ο host3 για τον host8, ο host4 για τον host9 και ο host5 για τον host10.

Οι hosts 1-5 δημιουργούν 1 udp και 1 tcp ροή. Η udp ροή αφορά τη μετάδοση ενός video (video streaming) με σταθερό ρυθμό μετάδοσης (Constant Bit Rate) 1Mbps. Όλα τα udp πακέτα έχουν το ίδιο μέγεθος το οποίο είναι 1235bytes συνολικά. Για την tcp σύνδεση ρυθμίζονται κατάλληλα το επιτρεπόμενο παράθυρο και το μέγεθος του πακέτου (χρήση flow control), ώστε αν δεν υπάρχουν προβλήματα συμφόρησης και ανεξάρτητα από τη διαδρομή που ακολουθούν τα πακέτα, οι hosts 1,2,4,5 να φορτώνουν το δίκτυο με ρυθμό 1Mbps και ο host3 με ρυθμό 2Mbps. Για τα δίκτυα network_11 και network_12 (static) οι hosts 1,3,4,5 ξεκινούν τις udp ροές σε χρόνο 0 sec, ενώ ο host 2 ξεκινάει τη μετάδοση σε χρόνο 10 sec. Για τα δίκτυα

network_13 - network_18 οι hosts 1,3,4,5 ξεκινούν τις udp ροές σε χρόνο 1 sec για να έχουν προλάβει οι routers να ανταλλάξουν μηνύματα και να δημιουργήσουν τους πίνακες δρομολόγησης (CSPF). Οι tcp συνδέσεις ξεκινούν σε όλες τις προσομοιώσεις σε χρόνο 20sec.

Μετρήσεις γίνονται στην πηγή και στον προορισμό. Σε κάθε host που στέλνει πακέτα υπάρχει κατάλληλο throughputmeter στο upload του και σε κάθε προορισμό υπάρχει αντίστοιχο throughputmeter στο download. Τα throughputmeter είναι εγκατεστημένα μέσα στους hosts μεταξύ επιπέδου 2 και 3. Για αυτό κάθε ροή στο δίκτυο στην πραγματικότητα είναι ελάχιστα μεγαλύτερη σε ποσότητα επειδή προστίθεται άλλη μία επικεφαλίδα του επιπέδου 2. Στη μέτρηση του throughput δεν συμμετέχουν τα πακέτα link state και hello που ανταλλάσσουν οι routers γιατί οι μετρήσεις γίνονται στους hosts. Επίσης, μετρήσεις γίνονται και σε κάθε προορισμό για τα udp πακέτα και τα bytes (tcp) που τελικά έφτασαν. Ακόμα, τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται σε πίνακες. Στους πίνακες οι θεωρητικές τιμές αντιστοιχούν στις επιδόσεις που θα είχε η κάθε ροή στο δίκτυο αν ήταν μόνο της και δεν την επηρέαζε καμία άλλη.

Για τις προσομοιώσεις network_11 και network_12 έχουν χρησιμοποιηθεί απλοί routers οι οποίοι ρυθμίζονται στατικά. Επομένως, για κάθε έναν χρειάζεται να γραφεί ο κατάλληλος πίνακας δρομολόγησης για να βρίσκει που να προωθήσει τα πακέτα ανάλογα με τον προορισμό τους.

Για τις προσομοιώσεις network_13 – network_18 έχουν χρησιμοποιηθεί routers οι οποίοι υλοποιούν το RSVP-TE. Έτσι μπορούν να οριστούν μονοπάτια και labels ώστε να επιλέγουμε εμείς από πού θα πάνε τα πακέτα. Αν δεν οριστούν ρητά μονοπάτια τότε κάθε router προωθεί τα πακέτα του χρησιμοποιώντας Constrained Shortest Path First (rfc2702). Αν δεν οριστούν περιορισμοί στην ουσία δουλεύει ως OSPFv2. Για τις προσομοιώσεις network_13 – network_16 επειδή δεν δίνονται συγκεκριμένοι περιορισμοί η δρομολόγηση βασίζεται στο OSPFv2. Το κόστος κάθε πιθανού μονοπατιού και τελικά το συντομότερο μονοπάτι βρίσκεται με βάση όχι τον αριθμό των routers από τους οποίους περνάει το πακέτο αλλά υπολογίζεται από το bandwidth κάθε σύνδεσης. Έτσι, η ποσότητα metric κάθε σύνδεσης ρυθμίζεται ώστε να αντιπροσωπεύει το ρυθμό μετάδοσης της γραμμής. Για παράδειγμα, στις προσομοιώσεις αυτές η αναλογία bandwidth – βάρος έχει ως εξής: 1Mbps -> 15, 2Mbps -> 14, 3Mbps -> 13, 4Mbps -> 12, 5Mbps -> 11 ... 15Mbps -> 1. Με τον τρόπο αυτό επιλέγονται συνδέσεις με το καλύτερο bandwidth.

Στις προσομοιώσεις network_17 – network_18 υλοποιούνται μονοπάτια ώστε τα πακέτα να μην πηγαίνουν στον προορισμό τους από τα συντομότερα μονοπάτια. Δεν έχουν οριστεί ρητά paths για τα acks γιατί αυτά έχουν μικρό μέγεθος, μόνο 51 bytes το πρώτο (SYN+ACK) και 47 bytes τα υπόλοιπα (ACK), οπότε δεν προκαλούν συμφόρηση. Βέβαια στις περισσότερες φορές γυρνάνε από τα ίδια paths που πηγαίνουν. Στο mpls η τροποποίηση ενός μονοπατιού διαρκεί 1 sec.

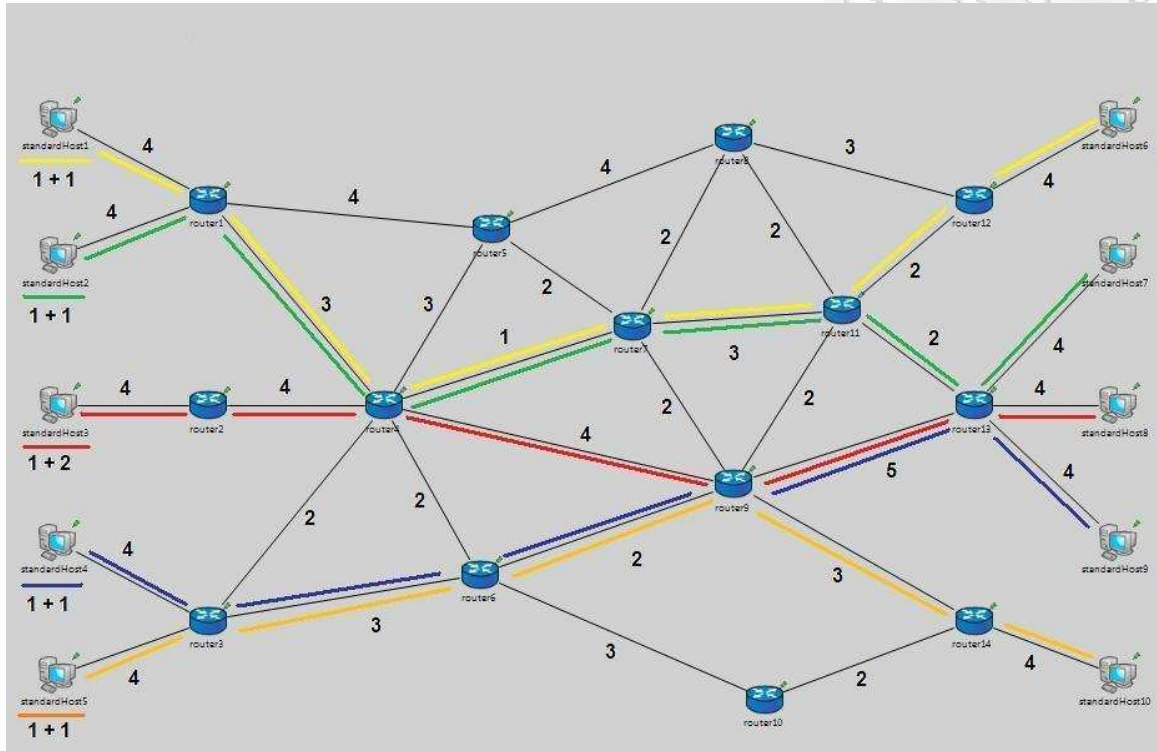
Στην προσομοίωση network_25 βλέπουμε την περίπτωση της επαναδρομολόγησης που εφαρμόζεται από το πρωτόκολλο από τη στιγμή που αντιλαμβάνεται ότι οι απαιτήσεις του χρήστη δεν ικανοποιούνται. Έτσι, τα πακέτα δεν δρομολογούνται από τα συντομότερα μονοπάτια, που έχουν υπολογισθεί σύμφωνα με τα βάρη, αλλά από εναλλακτικές διαδρομές.

Στις προσομοιώσεις network_19 – network_24 γίνεται προσπάθεια να δημιουργηθούν πολλά μονοπάτια μεταξύ ενός ingress router και ενός egress router ώστε να σπάσει η κίνηση σε αυτά. Ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί η μέγιστη χρησιμοποίηση των links στο δίκτυο. Σε αυτές τις προσομοιώσεις ελέγχεται η επίδραση της τεχνικής του multipath σε udp και σε tcp ροές ως προς το end to end throughput.

Στις προσομοιώσεις network_26 – network_28 βλέπουμε πως μεταβάλλεται η κατανάλωση της ενέργειας στο δίκτυο ανάλογα με το πρωτόκολλο και την τεχνική δρομολόγησης που χρησιμοποιείται. Γίνεται προσπάθεια να σπάει η κίνηση, ώστε οι συνδέσεις να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερη χρησιμοποίηση. Θεωρούμε ότι με τον τρόπο αυτόν μπορούν οι δρομολογητές να κλείνουν θύρες ανενεργές και να εξοικονομούν ενέργεια.

Κεφάλαιο 7: Static Configuration

7.1 Σενάριο 1 (static)



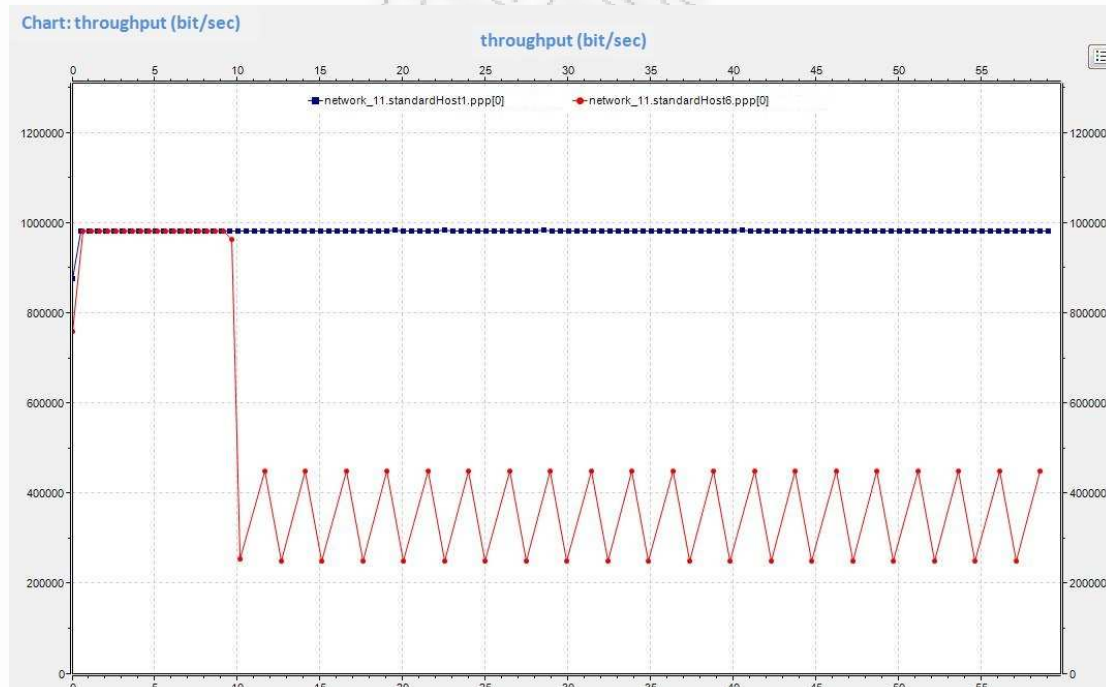
Εικόνα 2: Στατική δρομολόγηση, συμφόρηση στο δίκτυο

Στο δίκτυο αυτό χρησιμοποιούνται απλοί routers. Οι πίνακες δρομολόγησης έχουν ρυθμιστεί στατικά. Όπως φαίνεται και από την εικόνα θα υπάρχει συμφόρηση από τον router1 προς τον router4, από τον router3 προς τον router6, από τον router4 προς τον router7 κυρίως μετά τα 20sec που θα ξεκινήσουν και οι tcp συνδέσεις. Από τον router4 προς τον router7 θα υπάρχει συμφόρηση και για τις udp συνδέσεις. Ακολουθούν πίνακας με συγκεντρωτικά στοιχεία, γραφικές παραστάσεις με τους ρυθμούς μετάδοσης από τις πηγές και τους ρυθμούς στους προορισμούς καθώς και γραφήματα από τους δρομολογητές που απορρίπτουν πακέτα. Όπως φαίνεται από τις μετρήσεις, η συμφόρηση επηρεάζει κυρίως τις tcp συνδέσεις. Επίσης, λόγω της συμφόρησης το throughput ειδικά από sH1->sH6 και sH2->sH7 μειώνεται σημαντικά. Αυτό είναι λογικό γιατί με τον τρόπο που έχει γίνει το routing configuration στο δίκτυο οι 2 πρώτοι hosts παράγουν φορτίο 4Mbps και στη διαδρομή από την οποία στέλνεται αυτή η κίνηση υπάρχει σύνδεση με χωρητικότητα μόνο 1Mbps.

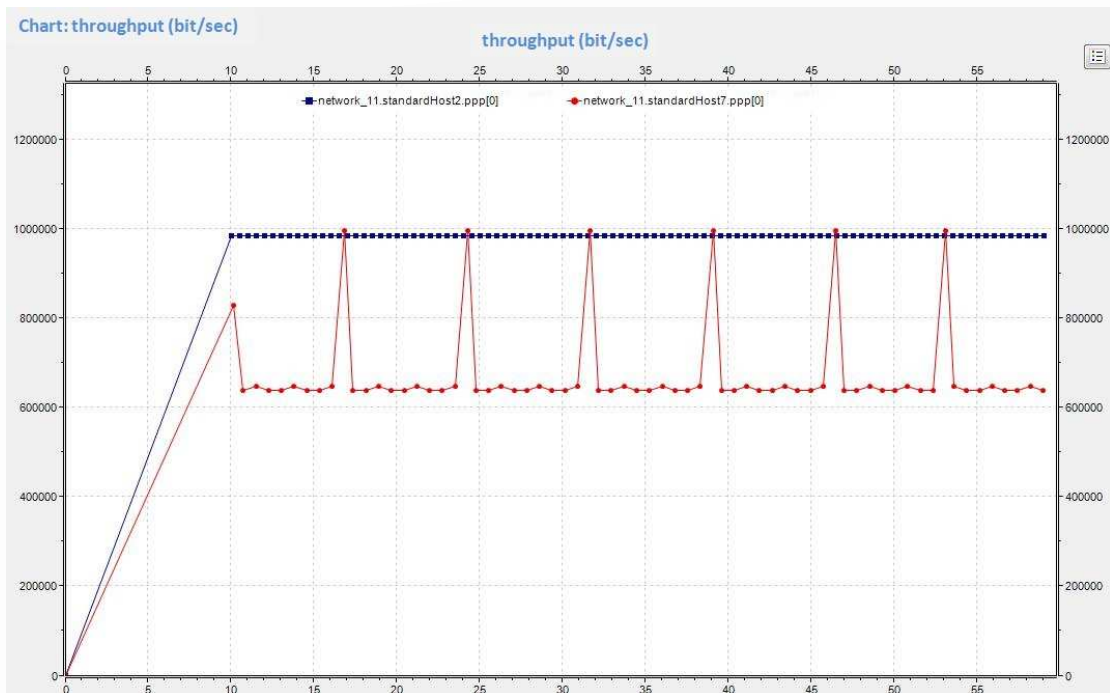
Network 11 (Received)						
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ		ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ		ΑΠΟΔΟΣΗ	
	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)
sH1->sH6	2670	0	5986	4016700	44.6%	0%
sH2->sH7	3376	0	4986	4016700	67.7%	0%
sH3->sH8	5989	7793000	5989	7863000	100%	99.1%
sH4->sH9	5855	159000	5989	4186000	97.7%	3.8%
sH5->sH10	5886	224000	5989	4143000	98.2%	5.4%

Πίνακας 1: Στατική δρομολόγηση, end to end throughput, συμφόρηση στο δίκτυο

Στη συνέχεια ακολουθούν γραφήματα με το end to end throughput για κάθε ροή κίνησης από τα οποία φαίνεται η απώλεια που είχε συγκεκριμένα κάθε ροή. Στην εικόνα 3 βλέπουμε ότι ο host1 στέλνει σταθερή κίνηση 1Mbps για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στα πρώτα 10sec που δεν υπάρχει συμφόρηση δεν χάνονται πακέτα. Μετά, κανονικά θα έπρεπε να στέλνει 2Mbps. Η tcp ροή, όμως, δεν ξεκίνησε ποτέ. Αλλά όπως βλέπουμε και η udp ροή αντιμετωπίζει μεγάλες απώλειες και μόνο το 40% φτάνει στον προορισμό. Επίσης, από τις αυξομειώσεις βλέπουμε ότι υπήρξε ανταγωνισμός μεταξύ των ροών.

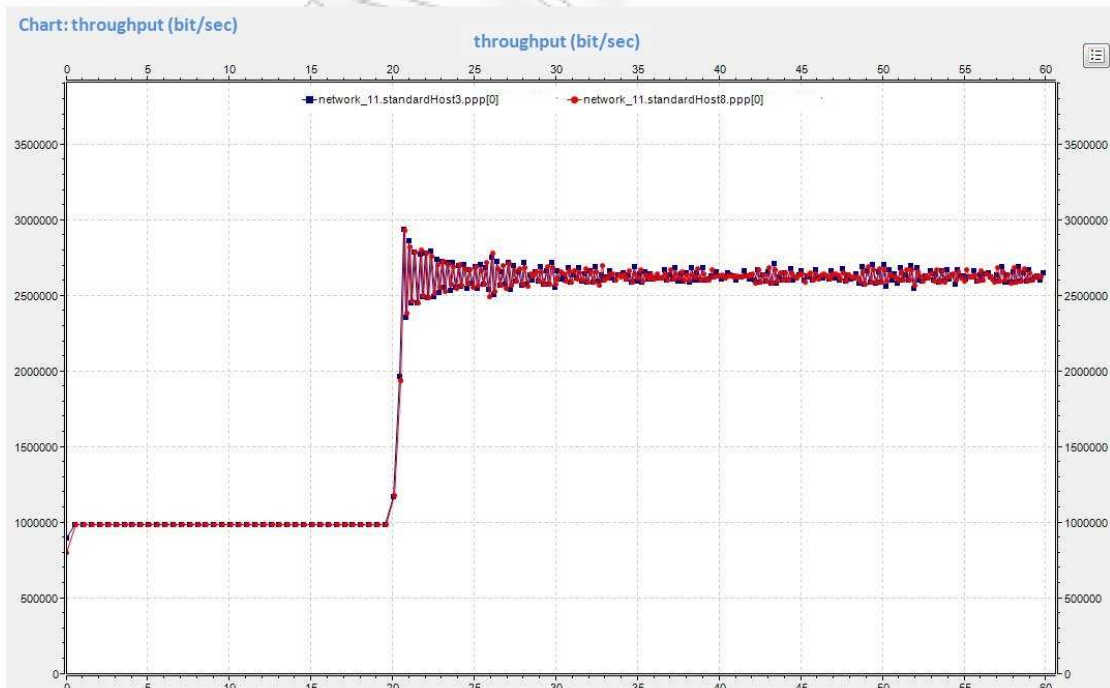


Εικόνα 3: Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host1 στον host6

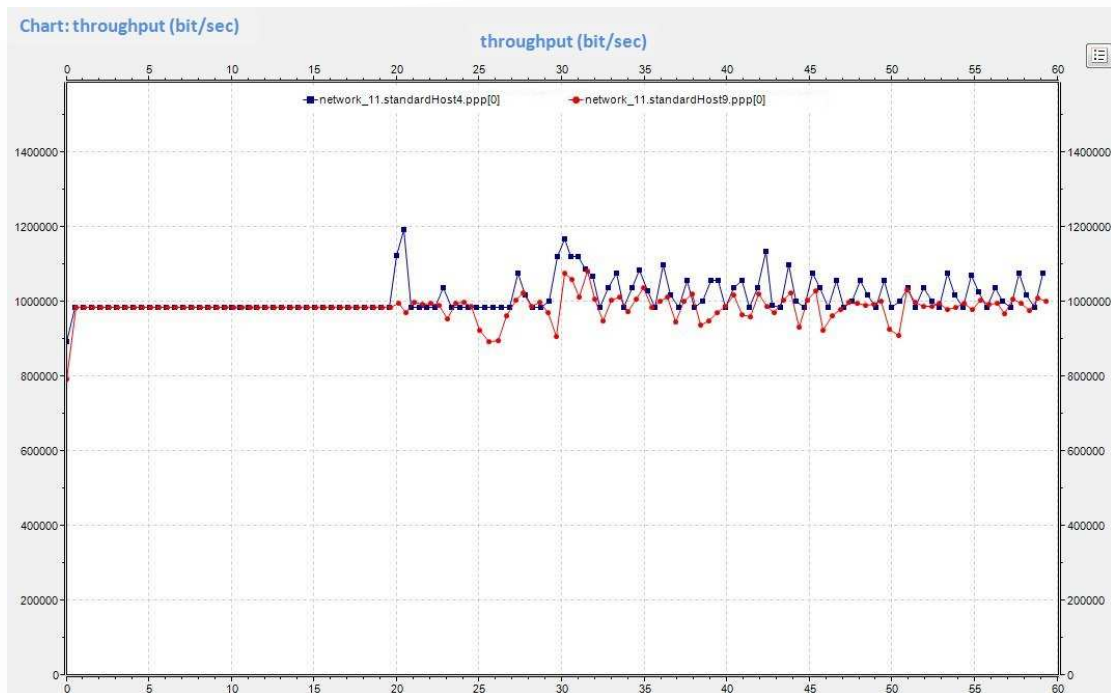


Εικόνα 4: Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host2 στον host7

Στην εικόνα 4 βλέπουμε ότι και ο host2 έχει μεγάλες απώλειες. Η tcp ροή του δεν ξεκίνησε αλλά και η udp αντιμετωπίζει συμφόρηση. Στην εικόνα 5 βλέπουμε ότι ο host3 είχε την ποιότητα υπηρεσιών που ζήτησε και η κίνηση που παράγαγε κατέληξε όλη στον προορισμό. Επίσης, η tcp ροή έπιασε το μέγιστο ρυθμό που μπορούσε και για αυτό παρουσιάζεται να είναι σταθερή.

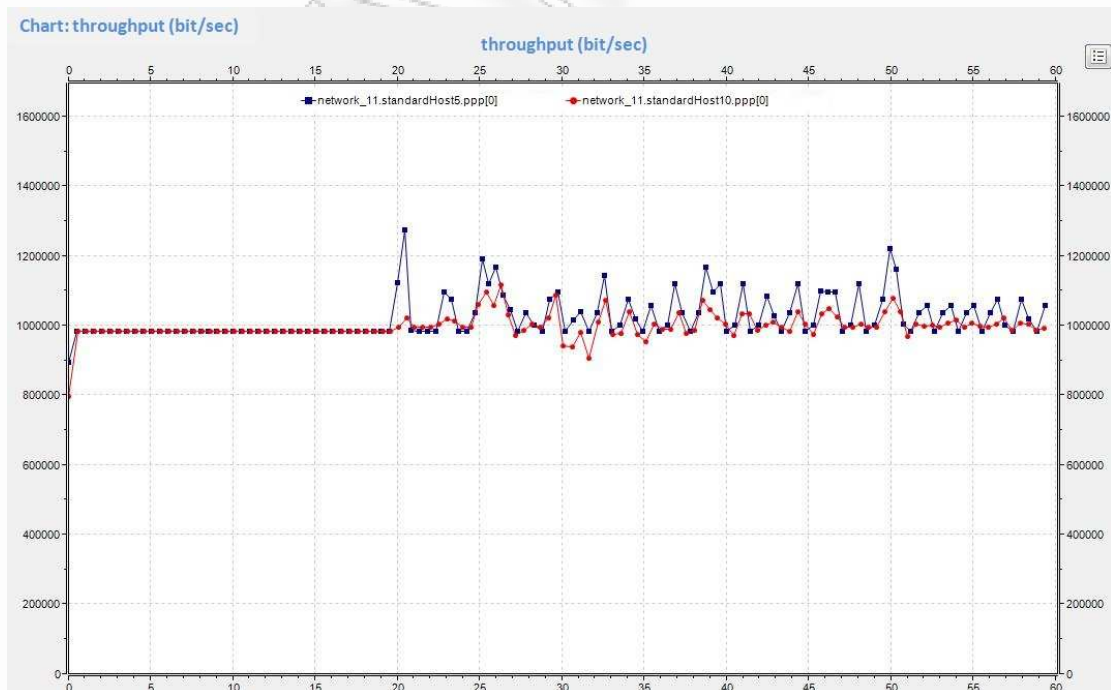


Εικόνα 5: Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host3 στον host8

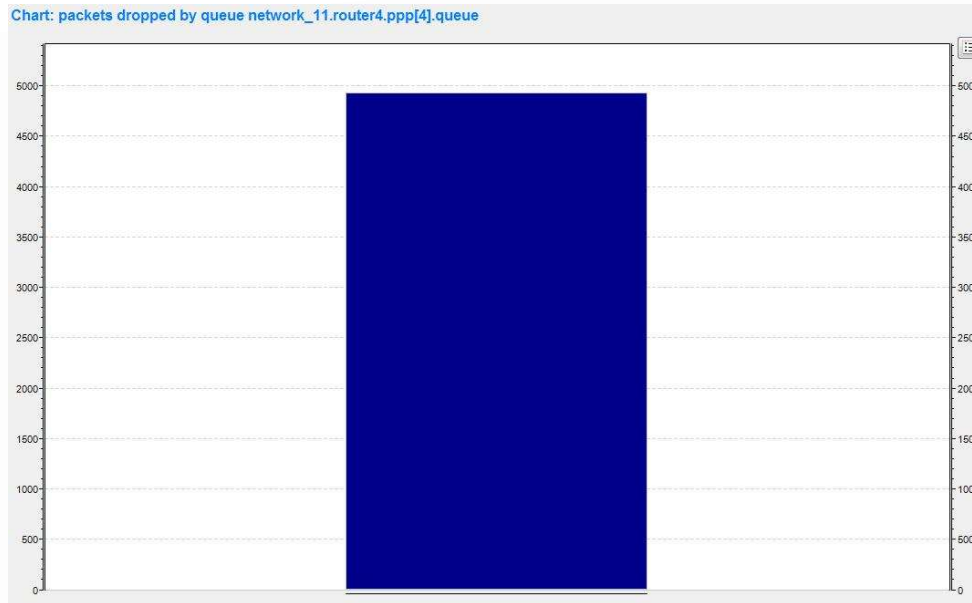


Εικόνα 6: Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host4 στον host9

Στις εικόνες 6,7 βλέπουμε την απόδοση που είχαν οι ροές των host4 και host5. Οι δύο χρήστες θα επιθυμούσαν να στείλουν συνολικά 4Mbps. Αλλά η κίνηση τους από το ίδιο link με χωρητικότητα 2Mbps. Για αυτό περνάει και από τους 2 η υδρορή τους. Από τη στιγμή που μπόρεσαν να ολοκληρώσουν την εγκατάσταση της tcp σύνδεσης περνάει και ένα ελάχιστο ποσοστό από αυτές.

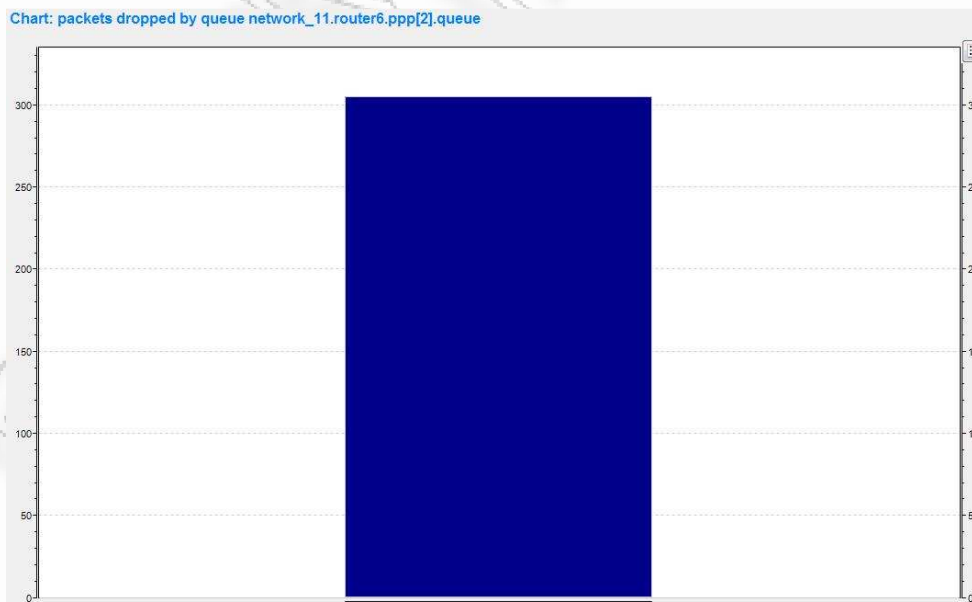


Εικόνα 7: Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host5 στον host10



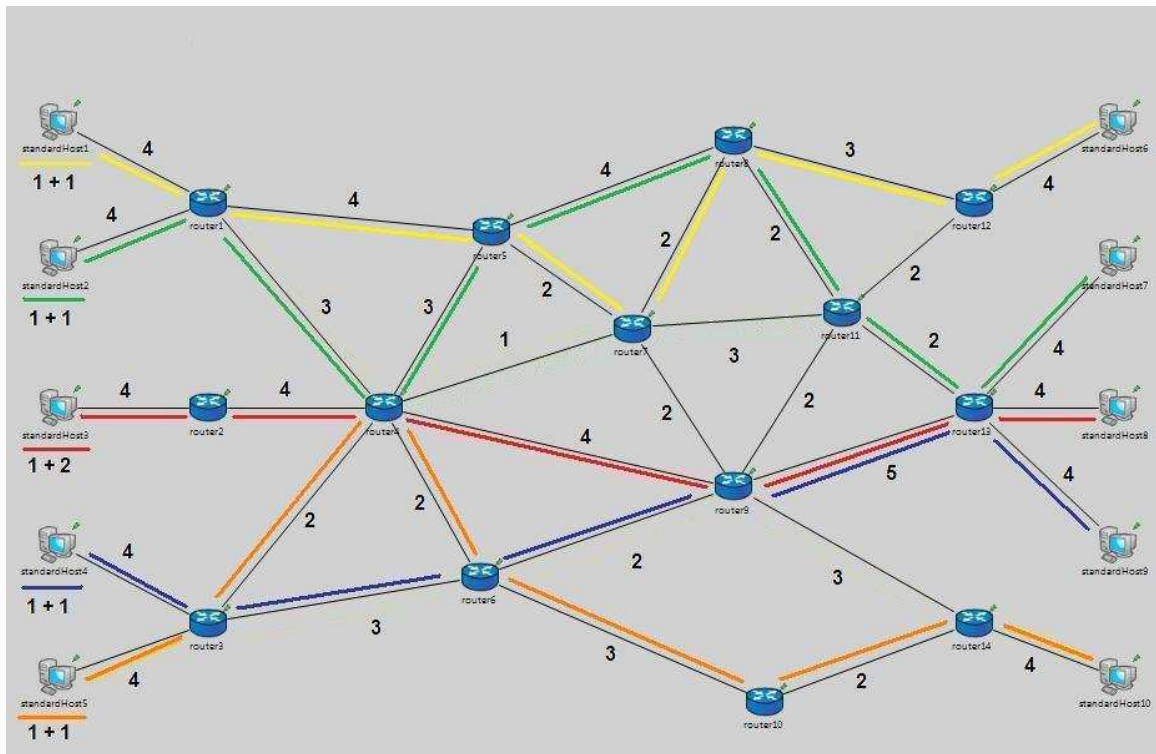
Εικόνα 8: Στατική δρομολόγηση, απώλειες πακέτων στον router4

Όπως είπαμε στις συνδέσεις μεταξύ των router4 – router7, router6 – router9, θα υπάρχει απώλεια πακέτων. Τα πακέτα θα χάνονται στις θύρες εξόδου των router4, router6 που θα αποθηκεύονται για να μεταδοθούν. Επειδή, όμως, θα υπάρχουν περισσότερα από όσα μπορούν να αποθηκεύσουν οι διαθέσιμοι buffers, αναγκαστικά θα απορρίπτονται όσα περισσεύουν. Στις εικόνες 8,9 βλέπουμε τον αριθμό των πακέτων που χάθηκαν στις θύρες εξόδου των αντίστοιχων δρομολογητών.



Εικόνα 9: Στατική δρομολόγηση, απώλειες πακέτων στον router6

7.2 Σενάριο 2 (static optimization)



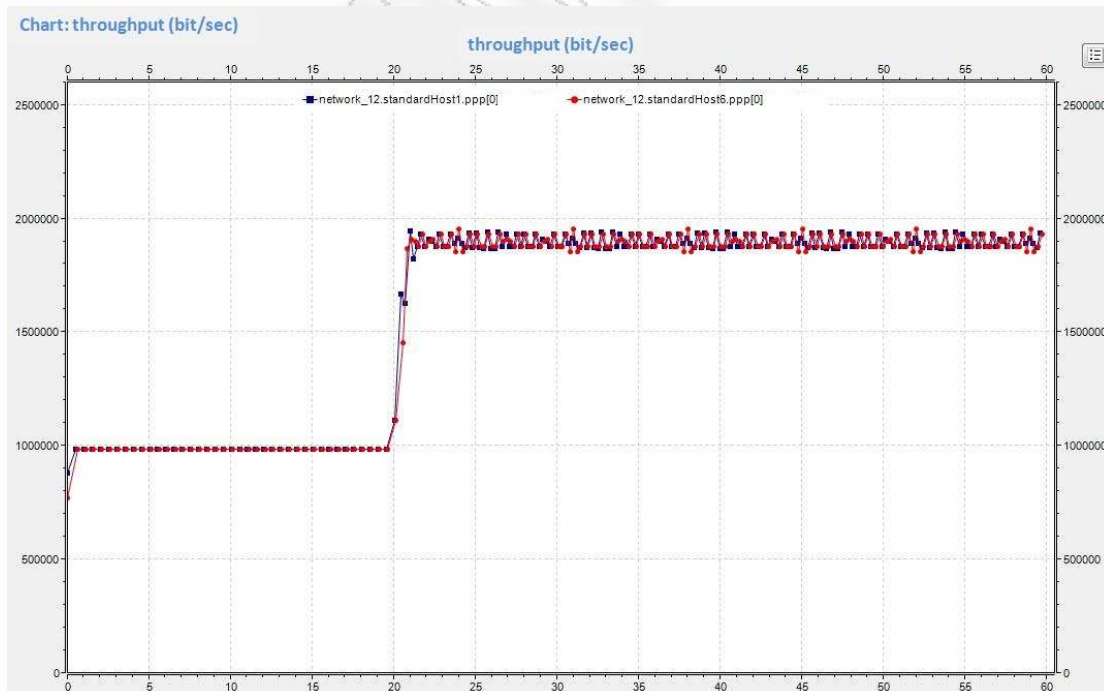
Εικόνα 10: Στατική δρομολόγηση, ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών

Στην προηγούμενη προσομοίωση χάνονταν αρκετά πακέτα. Ένας τρόπος να βελτιωθεί η απόδοση στο δίκτυο είναι να τροποποιηθούν οι πίνακες δρομολόγησης ώστε να μοιράζουν πιο αποδοτικά την κίνηση στο δίκτυο και να μην προκαλείται συμφόρηση. Αυτό προσπαθούμε να κάνουμε σε αυτήν την προσομοίωση. Τροποποιώντας τους πίνακες δρομολόγησης σε 11 δρομολογητές, αλλάζουμε την πορεία της κίνησης στο δίκτυο και αποφεύγουμε τη συμφόρηση. Η κίνηση έχει μοιραστεί σε όλο το δίκτυο. Βέβαια, αυτό μπορεί εύκολα να γίνει στα πλαίσια μίας προσομοίωσης και με ένα μικρό δίκτυο αλλά στην πραγματικότητα δεν είναι απλό ο διαχειριστής να αλλάζει τους πίνακες δρομολόγησης σε κάθε δρομολογητή. Η διαδικασία αυτή δεν είναι αποδοτική, επειδή στο δίκτυο δεν γίνεται μία αλλαγή, αλλά η κίνηση θα αλλάζει διαρκώς. Άρα, θα υπάρχει διαρκής ανάγκη να ρυθμίζονται οι πίνακες δρομολόγησης. Ακολουθεί πίνακας με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την απόδοση του δικτύου. Όπως φαίνεται με τον νέο τρόπο δρομολόγησης των πακέτων αποφύγαμε τη δημιουργία συμφόρησης.

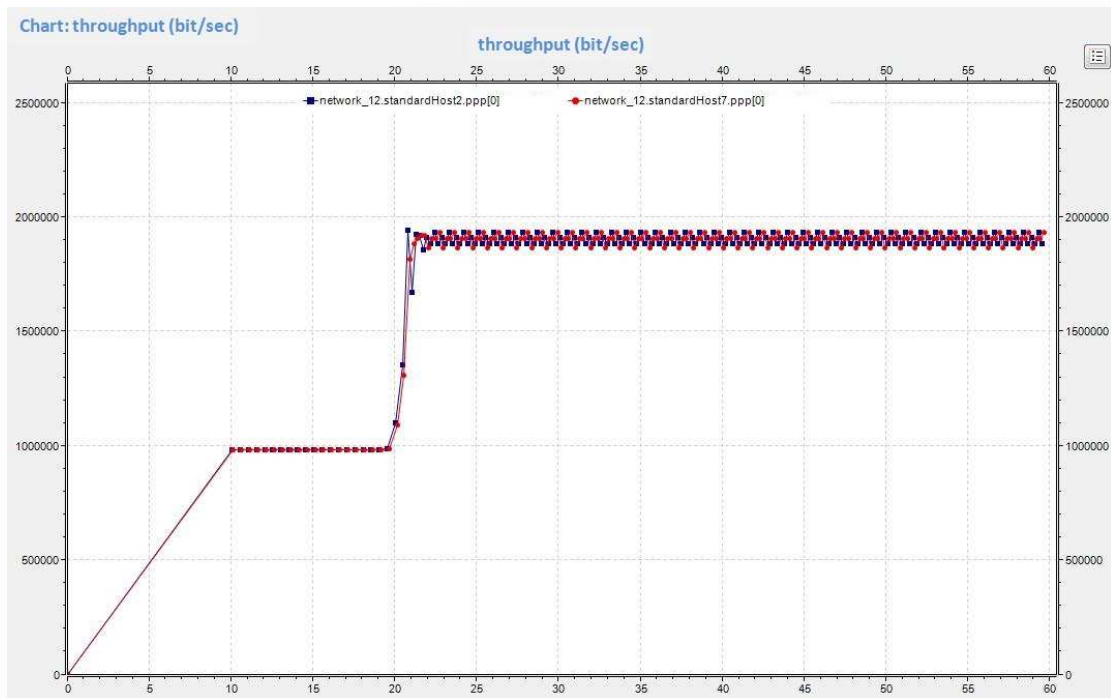
Network 12 (Received)						
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ		ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ		ΑΠΟΔΟΣΗ	
	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)
sH1->sH6	5986	4301100	5986	4419000	100%	97.3%
sH2->sH7	4984	4313700	4984	4437900	100%	97.2%
sH3->sH8	5989	7759000	5989	7863000	100%	98.7%
sH4->sH9	5989	4042000	5989	4186000	100%	96.6%
sH5->sH10	5986	4374000	5986	4494000	100%	97.3%

Πίνακας 2: Στατική δρομολόγηση, end to end throughput, μέγιστη απόδοση στο δίκτυο

Στον πίνακα μπορούμε να δούμε μετρήσεις για τα πακέτα που έφτασαν στους προορισμούς. Όπως, ήταν αναμενόμενο, τα udp πακέτα έφτασαν όλα. Οι tcp συνδέσεις, παρόλο που ως πρωτόκολλο είναι πιο απαιτητικές, κατάφεραν να πιάσουν πολύ υψηλό ρυθμό, σύμφωνα πάντα και με την ποιότητα υπηρεσιών που ζήτησε ο χρήστης. Χαρακτηριστικά, για τους 2 πρώτους hosts, στην προηγούμενη προσομοίωση δεν ξεκίνησαν καθόλου οι tcp συνδέσεις, ενώ τώρα με τις νέες ρυθμίσεις στο δίκτυο έχουν απόδοση 97%. Στη συνέχεια βλέπουμε τη μετάδοση κίνησης από τον host1 στον host6. Βλέπουμε σταθερό ρυθμό 1Mbps μέχρι τα 20sec και μετά από 20 μέχρι 60 ρυθμό 2 Mbps γιατί έχει προστεθεί και η tcp ροή.

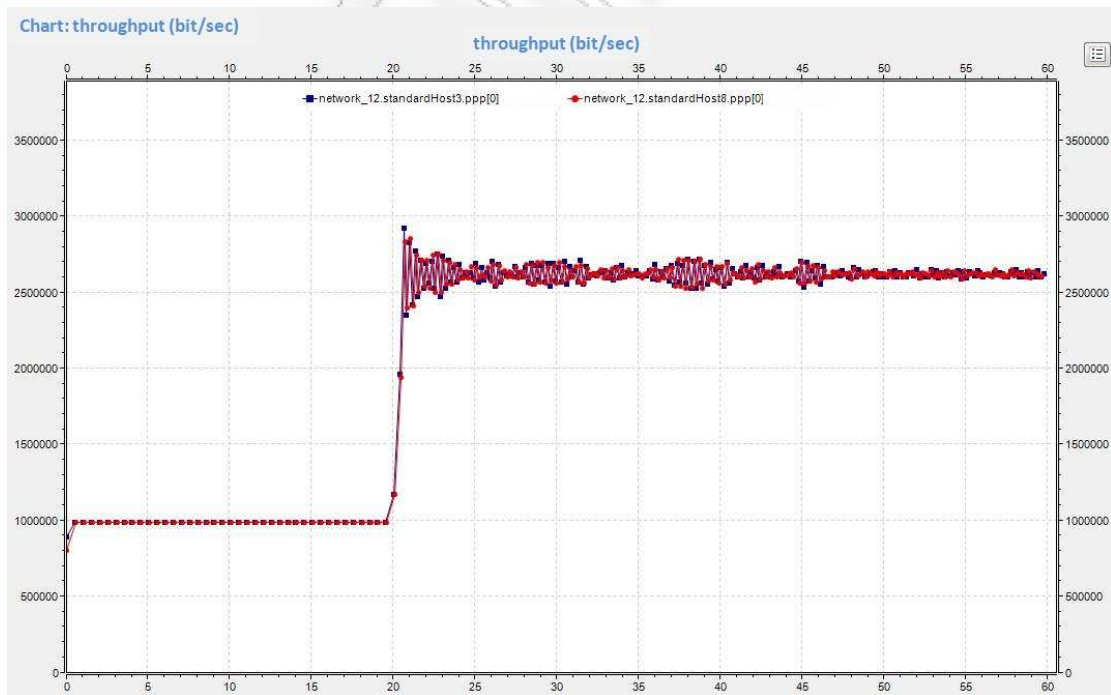


Εικόνα 11: Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host1 στον host6

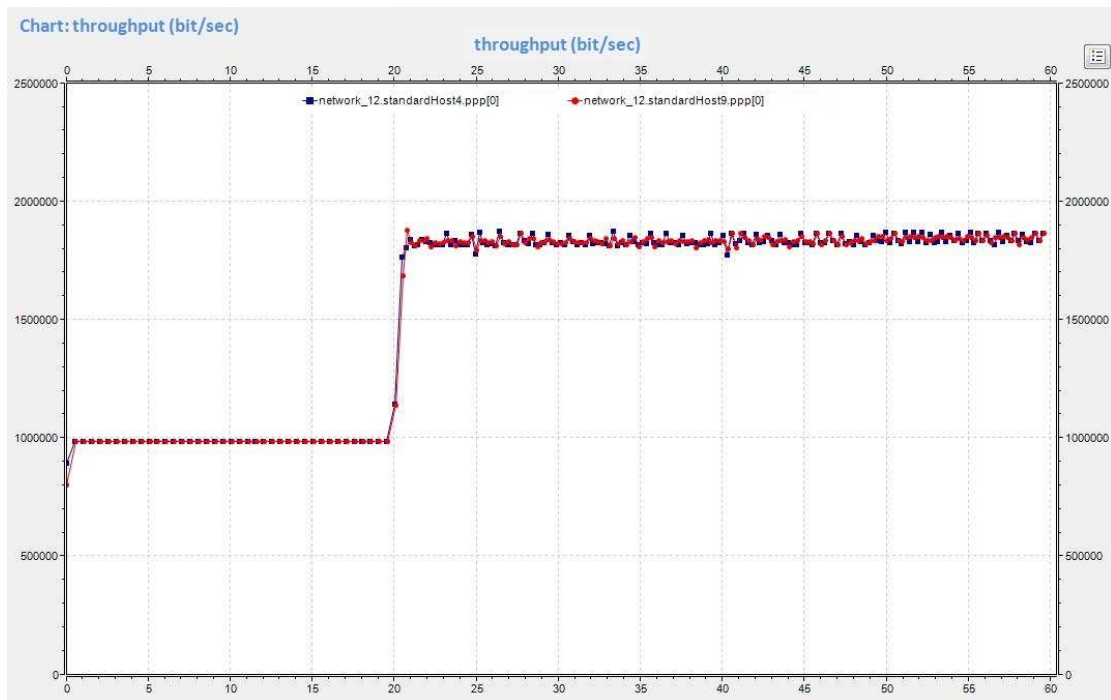


Εικόνα 12: Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host2 στον host7

Στις εικόνες 12,13 βλέπουμε την ποιότητα υπηρεσιών που παρέχεται από το δίκτυο στους host2 και host3. Χωρίς απώλειες πακέτων και με σταθερό ρυθμό έστειλαν τα πακέτα τους στους προορισμούς. Ακόμα και οι tcp συνδέσεις είχαν σταθερό ρυθμό χωρίς αυξομειώσεις.

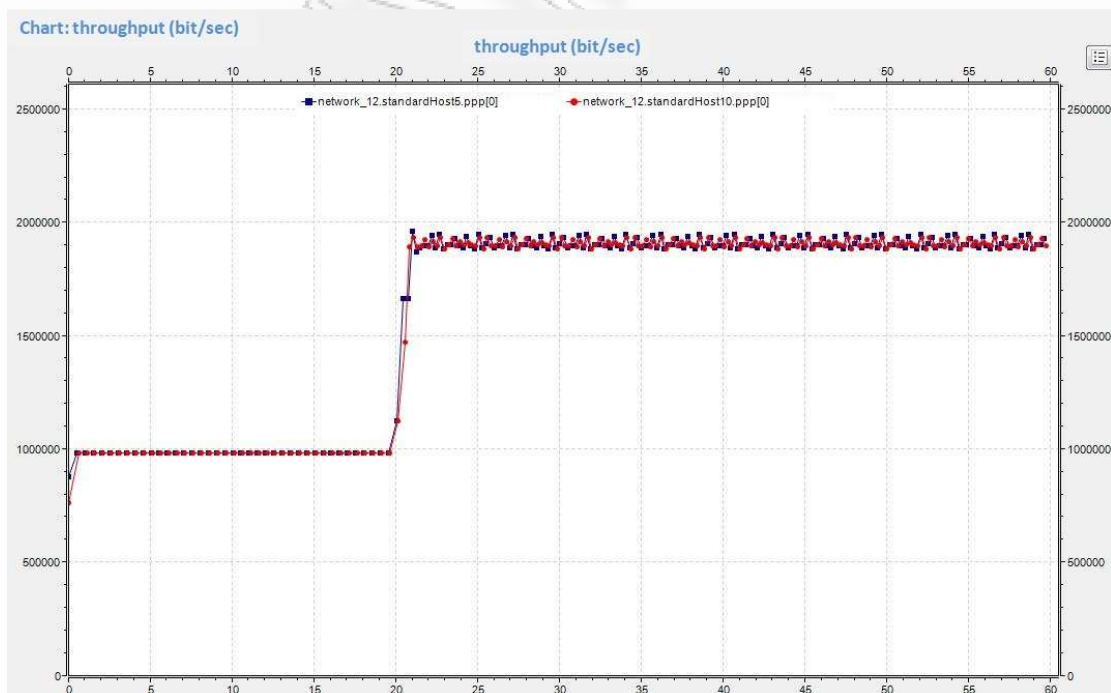


Εικόνα 13: Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host3 στον host8

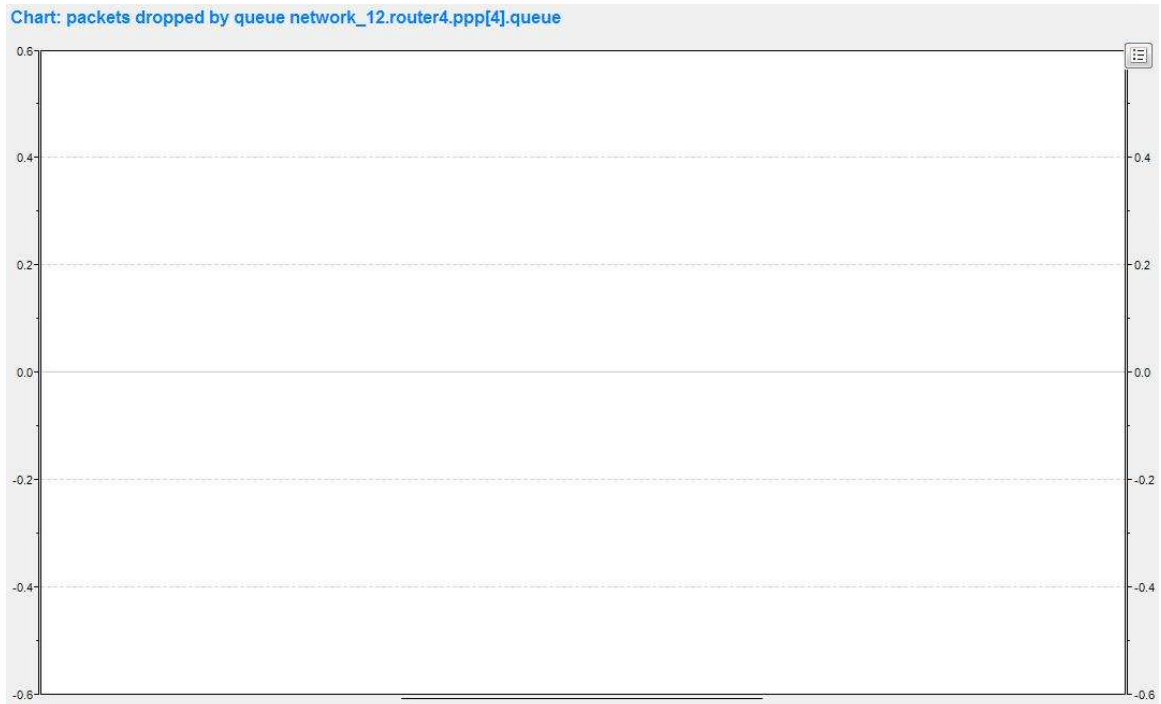


Εικόνα 14: Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host4 στον host9

Η βελτίωση των αποτελεσμάτων φαίνεται και στις εικόνες 14 και 15. Οι χρήστες αυτοί που με τις προηγούμενες ρυθμίσεις δρομολόγησης είχαν αντιμετωπίζουν προβλήματα συμφόρησης, τώρα έστειλαν τα δεδομένα τους χωρίς πρόβλημα. Χαρακτηριστικά, έστειλαν 4.2 και 4.5 Mbps περίπου, αντί για 0,159 και 0,224 Mbps που είχαν στείλει πριν.

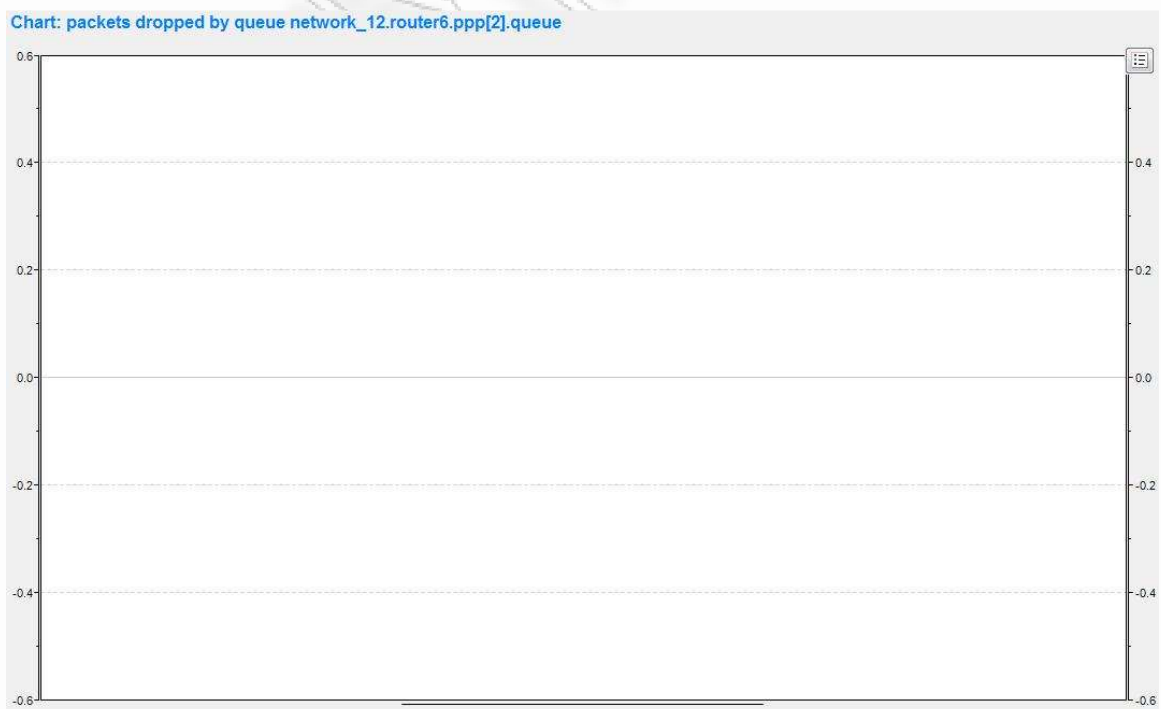


Εικόνα 15: Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host5 στον host10



Εικόνα 16: Στατική δρομολόγηση, χωρίς απώλειες πακέτων στον router4, επιτυχής αποφυγή bottleneck

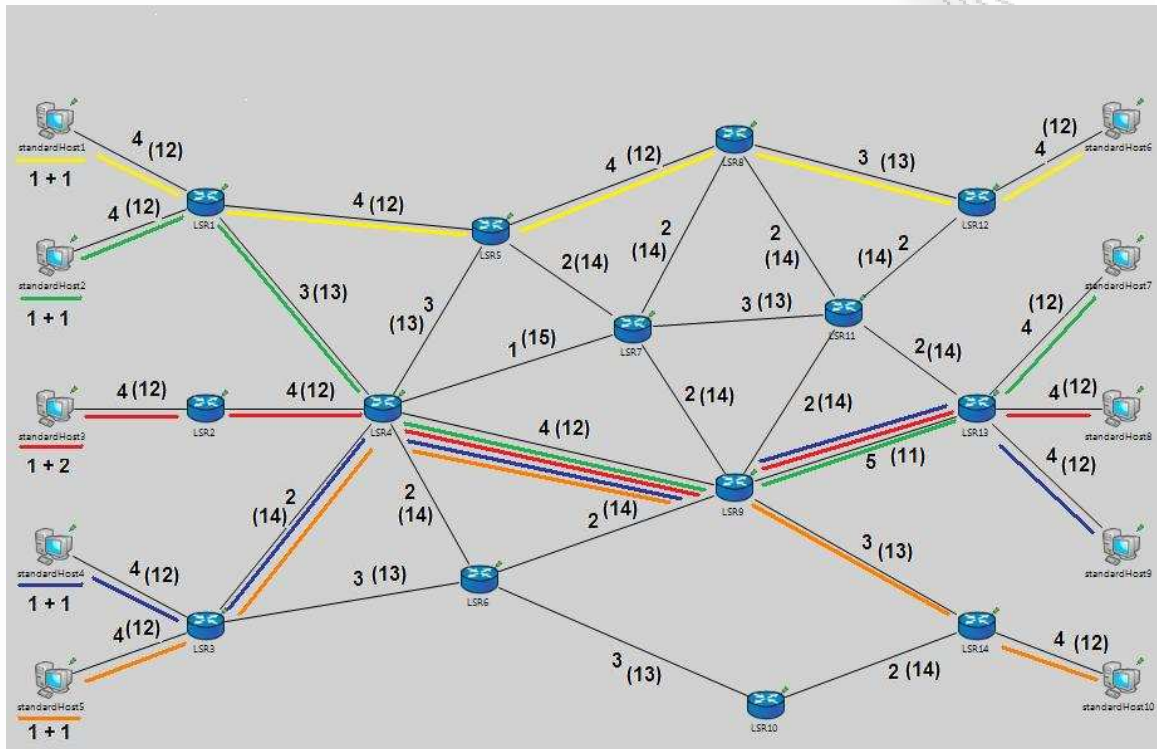
Η αποφυγή της συμφόρησης αποδεικνύεται στις εικόνες 16,17, που μπορούμε να δούμε τι έγινε στους routers 4 και 6 και ειδικότερα στους buffers των θυρών εξόδου. Είναι τα σημεία της προηγούμενης προσομοίωσης, που πριν αναγκάζονταν να απορριφθούν πακέτα. Βλέπουμε ότι πλέον δεν έχουμε καμία απώλεια πακέτων.



Εικόνα 17: Στατική δρομολόγηση, χωρίς απώλειες πακέτων στον router6

Κεφάλαιο 8: Open Shortest Path First (OSPF)

8.1 Σενάριο 1 (OSPF)



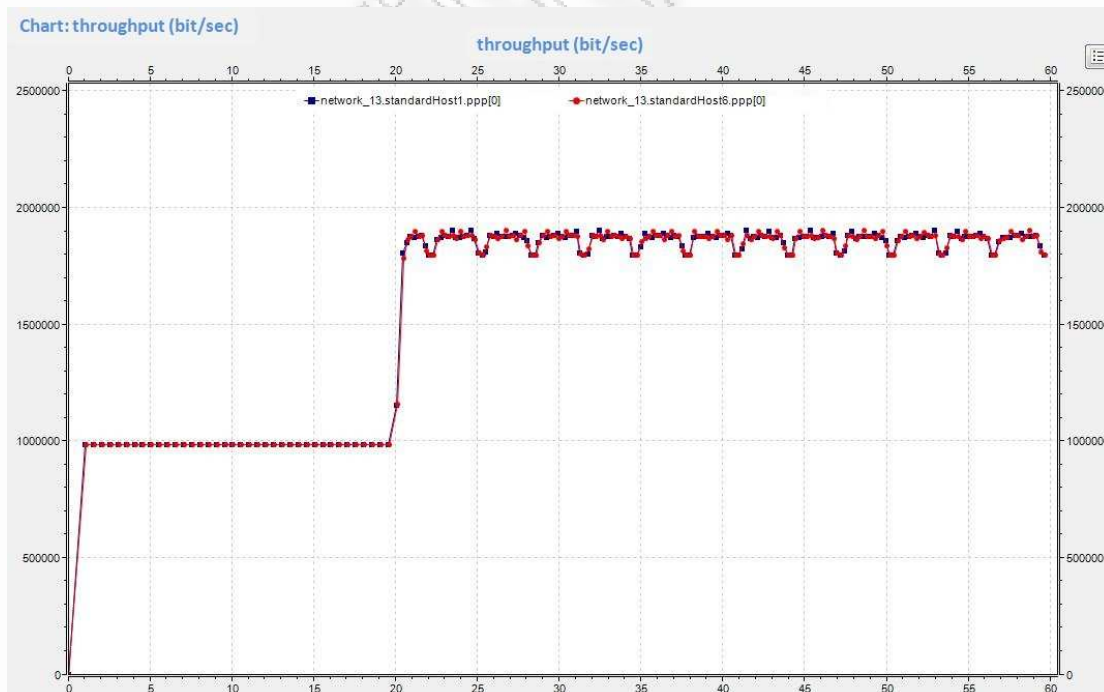
Εικόνα 18: OSPF, μεγάλη συμφόρηση στο δίκτυο

Όπως είδαμε στις προηγούμενες προσομοιώσεις, η στατική ρύθμιση των πινάκων δρομολόγησης, για να έχει αποτέλεσμα, θα πρέπει να γίνεται κάθε φορά που σημειώνεται η παραμικρή αλλαγή στην κίνηση στο δίκτυο. Προφανώς, αυτό είναι κάτι που σήμερα, με τον τεράστιο αριθμό των χρηστών, δεν μπορεί να γίνει. Θα πρέπει να υπάρχει μία διαδικασία περισσότερο αυτοματοποιημένη. Θα πρέπει να μπορεί, σε ένα βαθμό, να αντιλαμβάνεται κάποια χαρακτηριστικά του δικτύου και να τα εκμεταλλεύεται για να προσφέρει καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών στους χρήστες. Για το σκοπό αυτό, στις προσομοιώσεις αυτού του κεφαλαίου οι routers πλέον βασίζουν τη δρομολόγηση των πακέτων σύμφωνα με τα βέλτιστα μονοπάτια ως προς τα bandwidth των συνδέσεων (OSPF). Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται τα μονοπάτια για το δίκτυο που εξετάζουμε. Συνδέσεις με χαμηλό bandwidth όπως μεταξύ του LSR4 και LSR7 αποφεύγονται. Όπως φαίνεται θα υπάρχει συμφόρηση από τον LSR3 στον LSR4 και από τον LSR4 στον LSR9. Από τον LSR9 στον LSR13 δεν θα υπάρχει συμφόρηση γιατί πακέτα έχουν ήδη απορριφθεί στον LSR4 προς τον LSR9. Από τον πίνακα που ακολουθεί βλέπουμε πάλι ότι οι tcp συνδέσεις σε συνθήκες συμφόρησης έχουν πολύ χαμηλή απόδοση σε σχέση με τις udp.

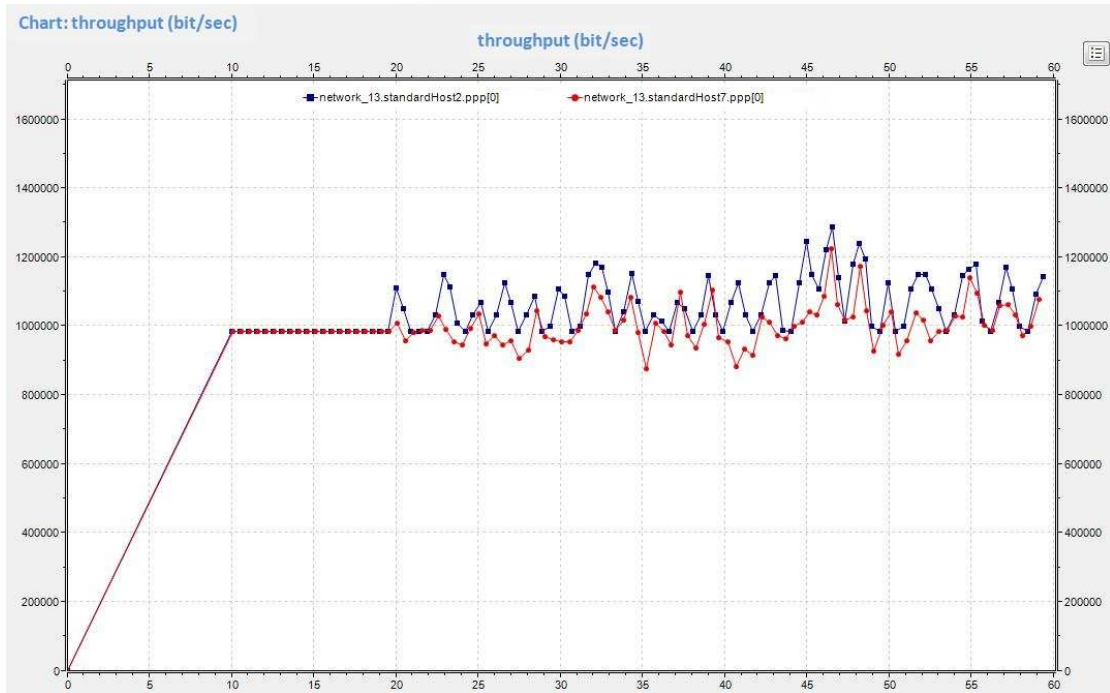
Network 13 (Received)						
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ		ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ		ΑΠΟΔΟΣΗ	
	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)
sH1->sH6	5889	4167000	5889	4185000	100%	99.6%
sH2->sH7	4763	336600	4989	4202100	95.4%	8%
sH3->sH8	5812	298000	5889	8575000	98.7%	3.5%
sH4->sH9	5652	133200	5889	4149000	96%	3.2%
sH5->sH10	5756	153900	5889	4108500	97.7%	3.7%

Πίνακας 3: OSPF, end to end throughput, πολύ χαμηλή απόδοση στο δίκτυο

Πιο συγκεκριμένα, από τα αποτελέσματα του πίνακα 3 βλέπουμε ότι παρότι χρησιμοποιούμε ένα καλύτερο τρόπο δρομολόγησης, ένα πρωτόκολλο που μπορεί να αντιλαμβάνεται ποιες συνδέσεις έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα και να προωθήσει την κίνηση από αυτές, η απόδοση του δικτύου δεν είναι αυτή που θα θέλαμε. Ενώ, το πρωτόκολλο προσφέρει καλύτερα μονοπάτια στις ροές, δεν λύνει τα προβλήματα. Αυτό συμβαίνει γιατί δίνει τα καλύτερα links από πλευράς χωρητικότητας, σε όλες τις ροές χωρίς διαφοροποίηση. Έτσι, μπορεί να επιλεγεί μια σύνδεση των 4Mbps από μία άλλη του 1Mbps, αλλά αν αυτό συμβεί ταυτόχρονα από όλες τις ροές τότε αυτό που θα έχουμε είναι μία σύνδεση 4Mbps με συμφόρηση και μία του 1Mbps άδεια. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το βέλτιστο μονοπάτι με χωρητικότητα 4Mbps επιλέχθηκε να δρομολογήσει συνολική κίνηση 9Mbps. Ταυτόχρονα, υπάρχουν στο δίκτυο μονοπάτια με μικρότερη χωρητικότητα αλλά ελεύθερα.

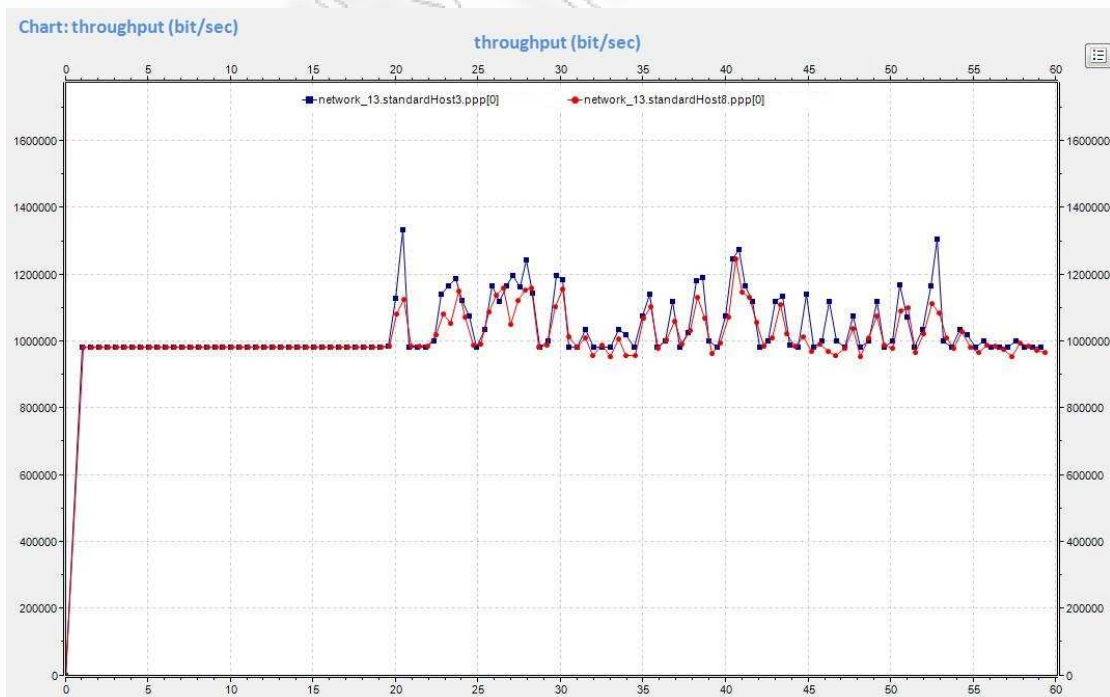


Εικόνα 19: OSPF, end to end throughput από τον host1 στον host6

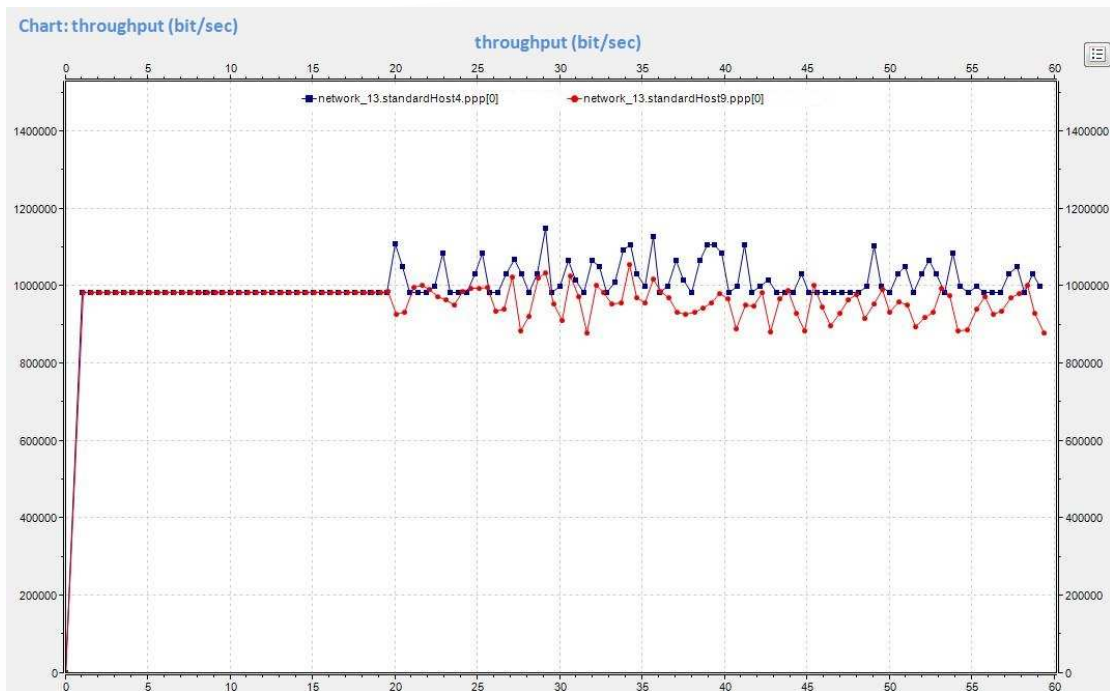


Εικόνα 20: OSPF, end to end throughput από τον host2 στον host7

Στις εικόνες 19,20,21 βλέπουμε το end to end throughput για τις ροές από τον host1 στον host6, από τον host2 στον host7 και από τον host3 στον host8. Ο πρώτος χρήστης μόνο μπόρεσα να στείλει τα δεδομένα που ήθελε. Στους άλλους 2 βλέπουμε ότι το διαθέσιμο bandwidth αφιερώθηκε στα udp πακέτα, ενώ για τις tcp συνδέσεις δεν υπήρχε διαθεσιμότητα στα συγκεκριμένα links. Από τα γραφήματα, φαίνεται και η λειτουργία του tcp πρωτοκόλλου με τις αυξομειώσεις στο ρυθμό μετάδοσης.

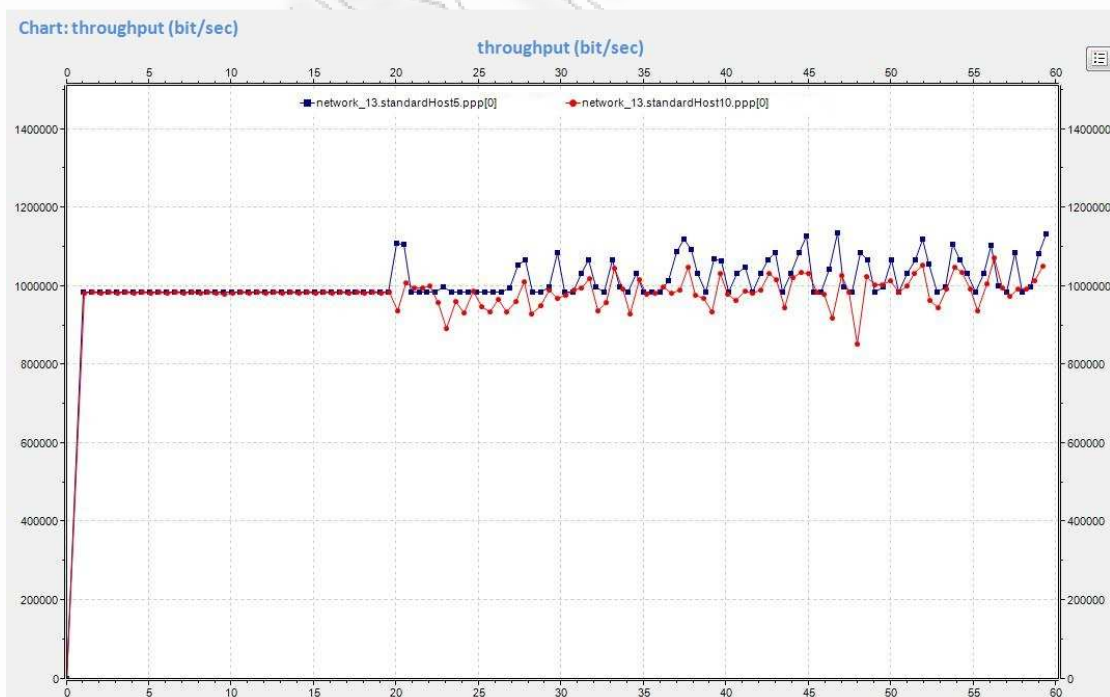


Εικόνα 21: OSPF, end to end throughput από τον host3 στον host8

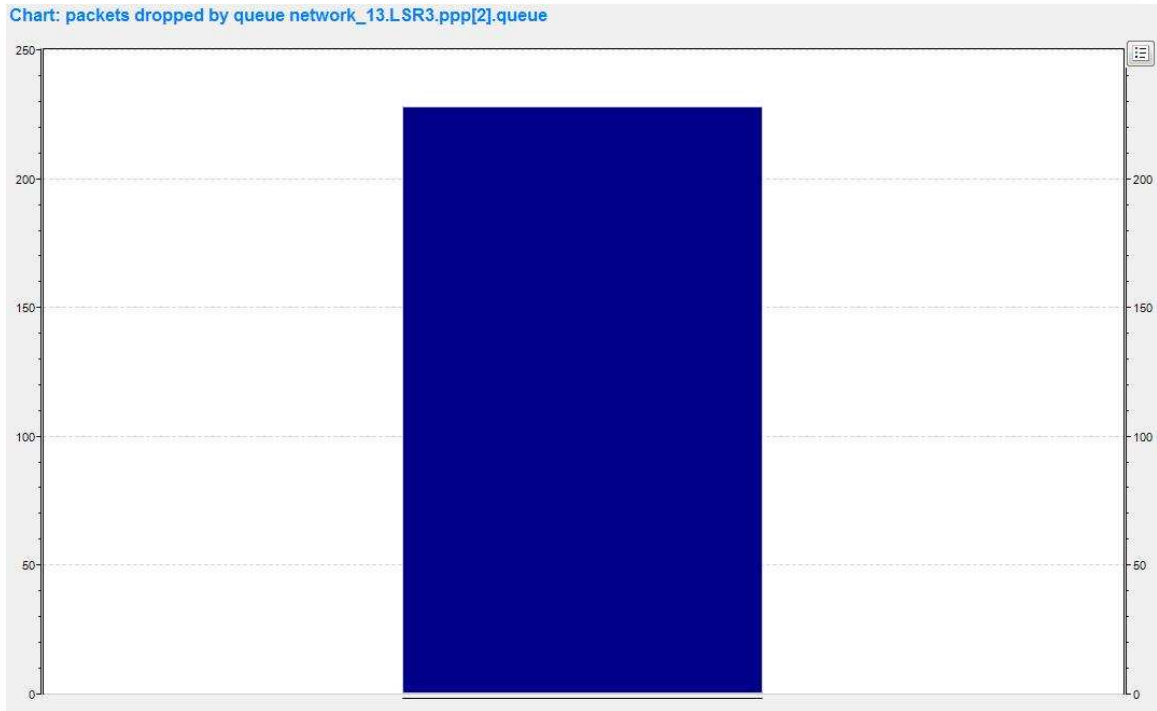


Εικόνα 22: OSPF, end to end throughput από τον host4 στον host9

Το ίδιο συμβαίνει και με την κίνηση από τους χρήστες 4 και 5. Η επιλογή του πρωτοκόλλου να τους προωθήσει από το βέλτιστο μονοπάτι χωρίς να υπολογίζει το φορτίο που έχει ήδη στείλει εκεί, έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορούν να στείλουν τα δεδομένα που θα ήθελαν. Στα γραφήματα διακρίνουμε και την προσπάθεια του tcp πρωτοκόλλου να ανεβάσει τον ρυθμό αποστολής πακέτων, αλλά και τη μείωση του ρυθμού όταν δεν λαμβάνει τα acknowledgements που περιμένει.

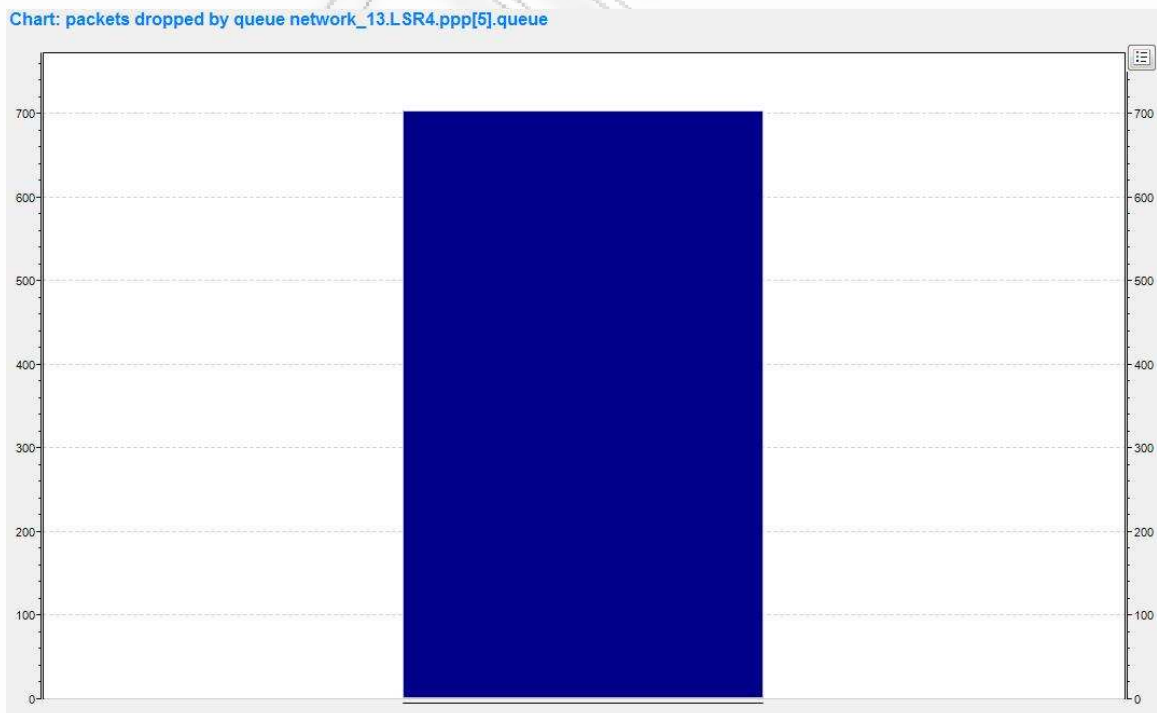


Εικόνα 23: OSPF, end to end throughput από τον host5 στον host10



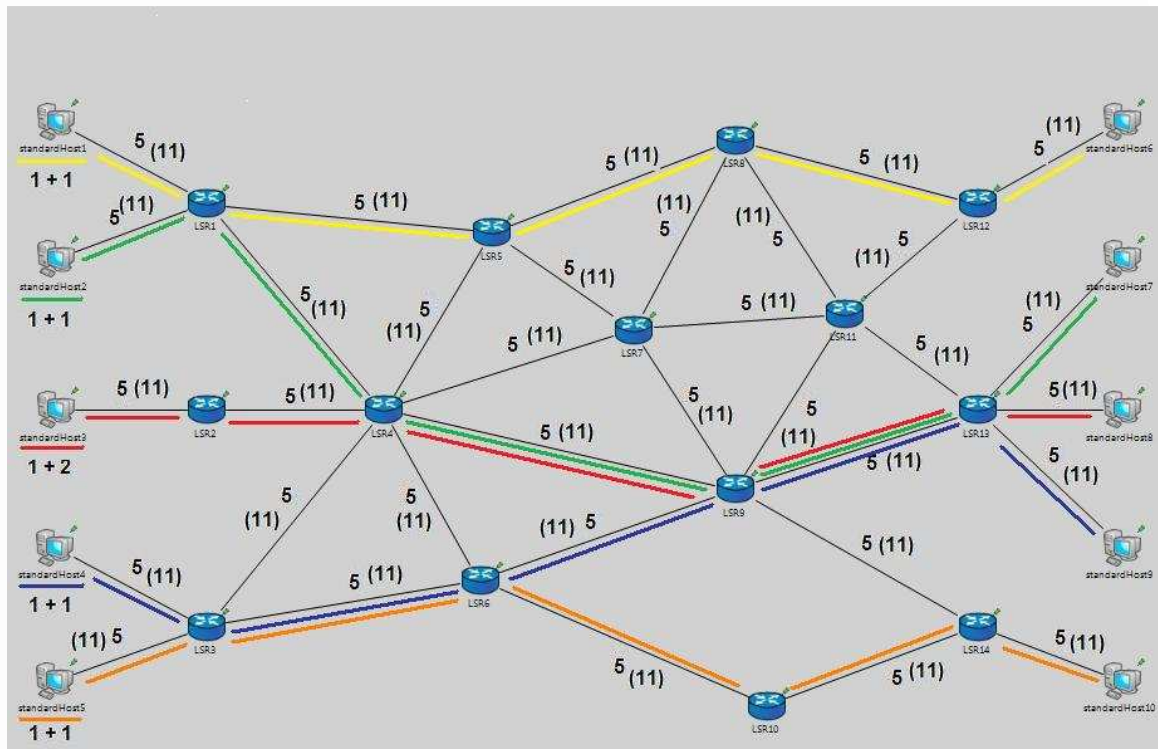
Εικόνα 24: OSPF, απώλειες πακέτων στον router3

Στις εικόνες 24,25 έχουμε τις απώλειες σε πακέτα στις θύρες εξόδου των routers 3 και 4. Στον router 3 λόγω συμφόρησης στη σύνδεση μεταξύ των router 3 και 4 απορρίφθηκαν περίπου 230 πακέτα. Στον router 4 και στη θύρα εξόδου προς τη σύνδεση μεταξύ του router 4 και του router 9 απορρίφθηκαν περίπου 700 πακέτα.



Εικόνα 25: OSPF, απώλειες πακέτων στον router4

8.2 Σενάριο 2 (OSPF αποτυχημένη προσπάθεια αναβάθμισης)



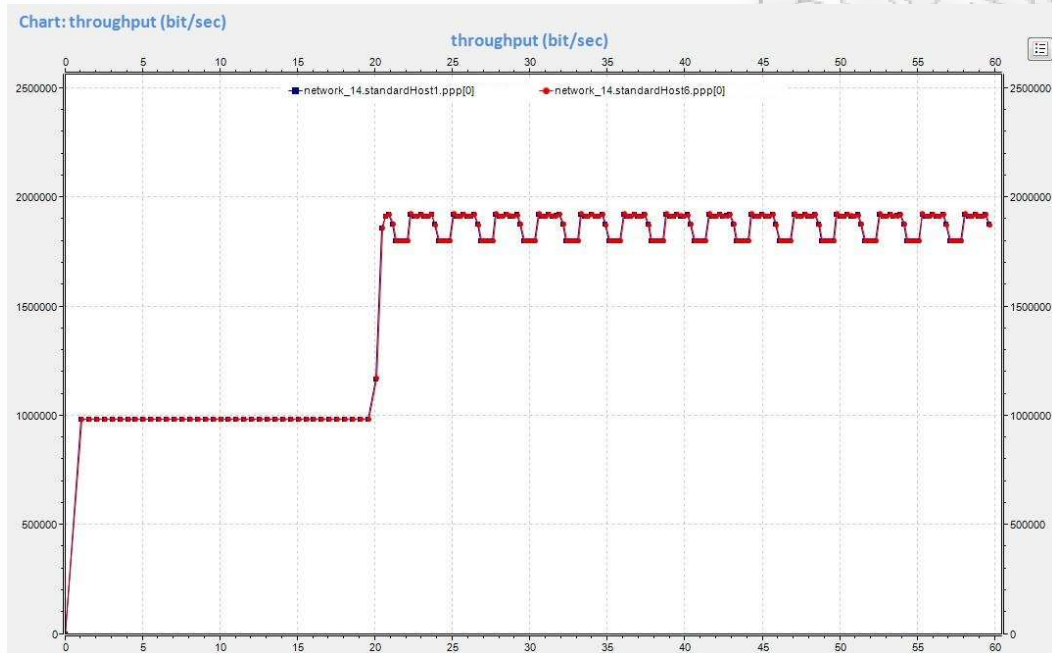
Εικόνα 26: OSPF, αποτυχημένη προσπάθεια αναβάθμισης

Είδαμε στην προηγούμενη προσομοίωση ότι το OSPF δεν μπόρεσε να λύσει τα προβλήματα στη δρομολόγηση. Ο διαχειριστής επομένως θα προσπαθήσει να βρει λύσεις. Σε αυτήν την προσομοίωση θα μελετήσουμε την προσπάθεια αναβάθμισης του δικτύου, με αντικατάσταση όλων των συνδέσεων με άλλες με μεγαλύτερη χωρητικότητα. Παρόλο που αλλάζουν όλες οι συνδέσεις και γίνονται μεγαλύτερες (5Mbps), το πρωτόκολλο δρομολόγησης δεν μπορεί να αξιοποιήσει αυτήν την αναβάθμιση. Πάλι, η επιλογή των συντομότερων μονοπατιών επειδή γίνεται με κοινό τρόπο για όλες τις ροές έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχουν συνδέσεις που μαζεύουν φορτίο. Στον LSR9 θα υπάρξει πάλι συμφόρηση, η οποία θα επηρεάσει ταυτόχρονα 3 ροές. Οι χρήστες 2,3 και 4 δεν θα έχουν την ποιότητα υπηρεσιών που θα ήθελαν.

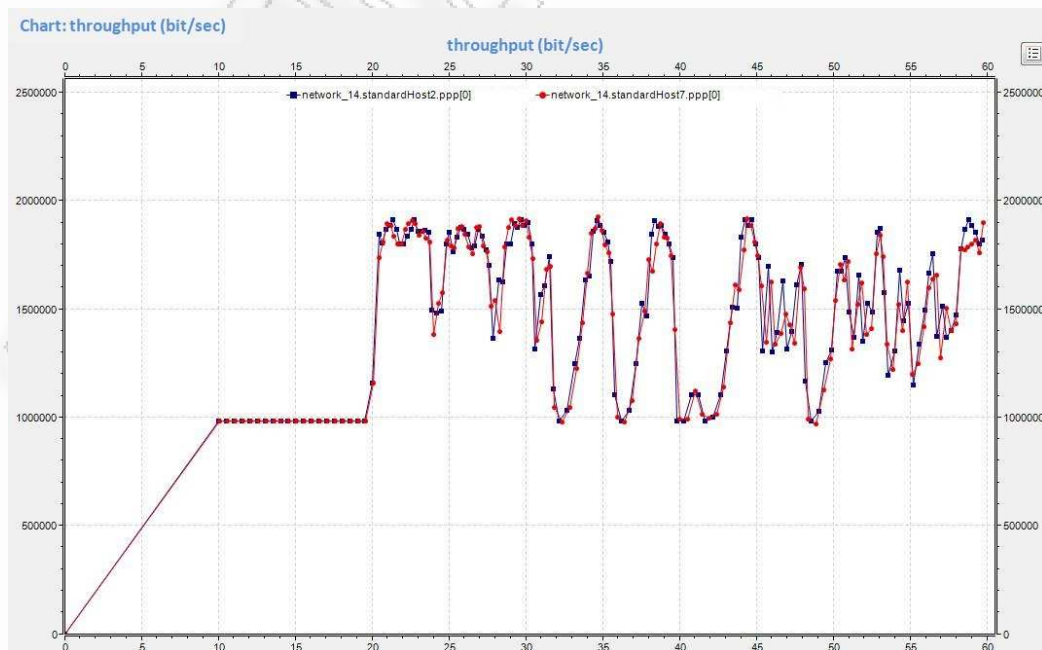
Network 14 (Received)						
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ		ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ		ΑΠΟΔΟΣΗ	
	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)
sH1->sH6	5889	4212000	5889	4287600	100%	98.2%
sH2->sH7	4978	2547000	4989	4287600	99.8%	59.4%
sH3->sH8	5842	3475000	5889	8715000	99.2%	39.9%
sH4->sH9	5858	2373300	5889	4287600	99.5%	55.3%
sH5->sH10	5889	4204800	5889	4287600	100%	98%

Πίνακας 4: OSPF, end to end throughput, απώλειες στο δίκτυο

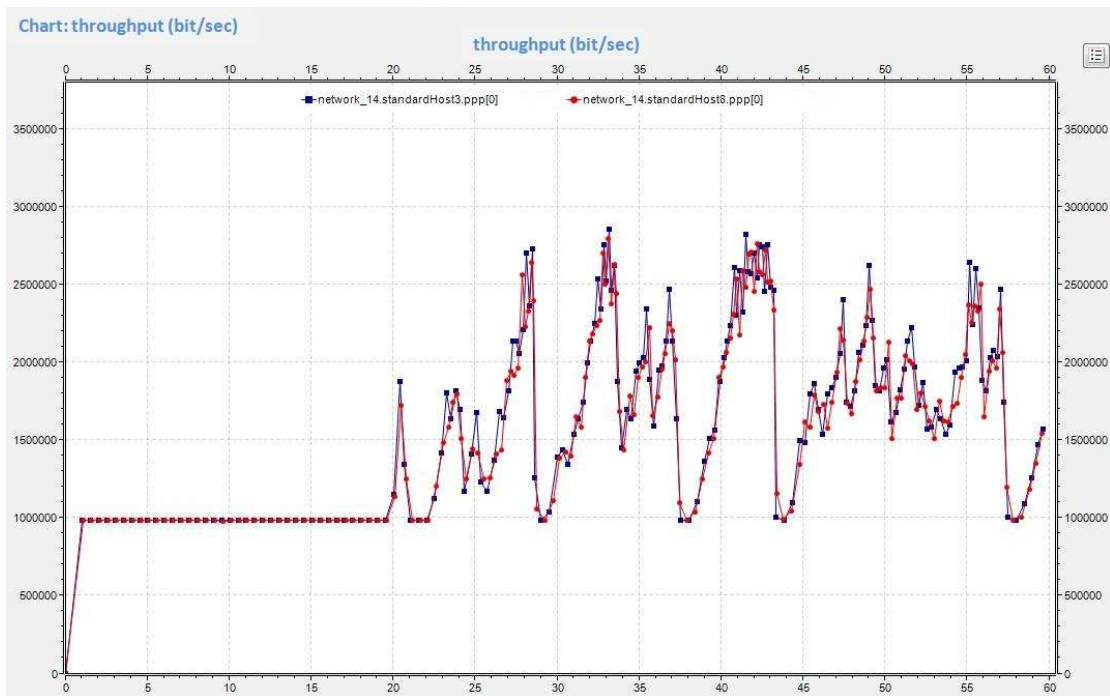
Στον πίνακα 4 βλέπουμε την μειωμένη απόδοση των χρηστών 2,3 και 4. Επίσης και σε αυτήν την προσομοίωση βλέπουμε ότι όταν ανταγωνίζονται udp και tcp ροές, οι tcp λόγω των μηχανισμών που έχουν δεν μπορούν να αυξήσουν το ρυθμό τους και στέλνουν τελικά στους προορισμούς πολύ λίγα πακέτα. Στην εικόνα 28 φαίνεται η προσπάθεια του πρωτοκόλλου να ανέβει ο ρυθμός και η απότομη πτώση όταν αντιλαμβάνεται ότι δεν έχουν έρθει οι επιβεβαιώσεις που θα περίμενε.



Εικόνα 27: OSPF, end to end throughput από τον host1 στον host6

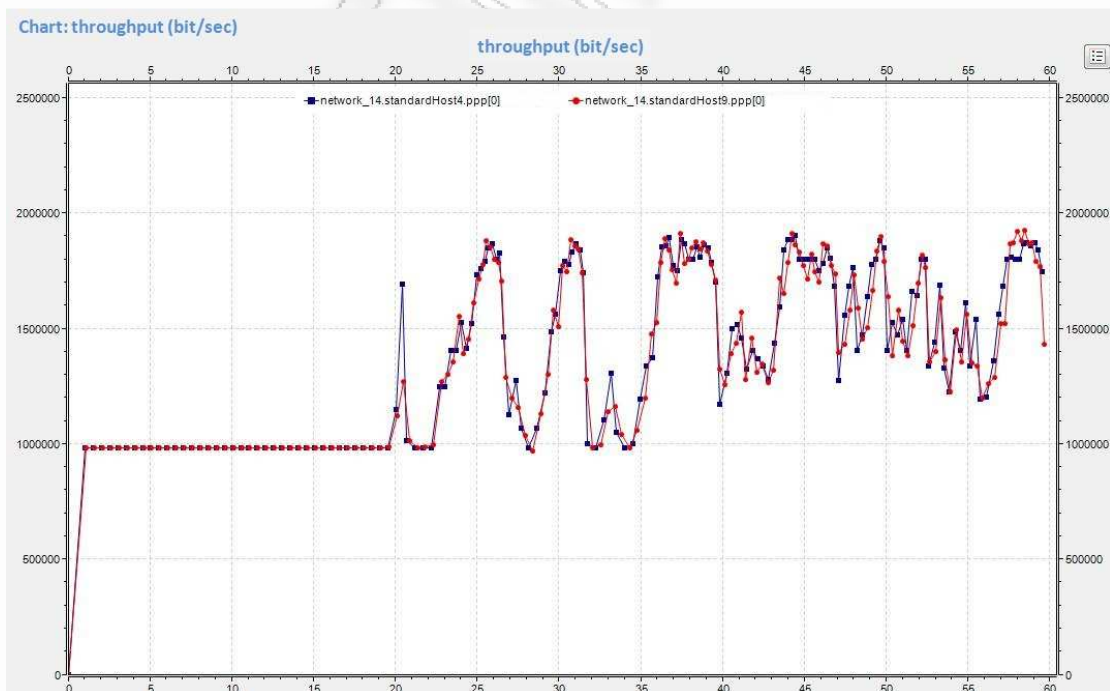


Εικόνα 28: OSPF, end to end throughput από τον host2 στον host7

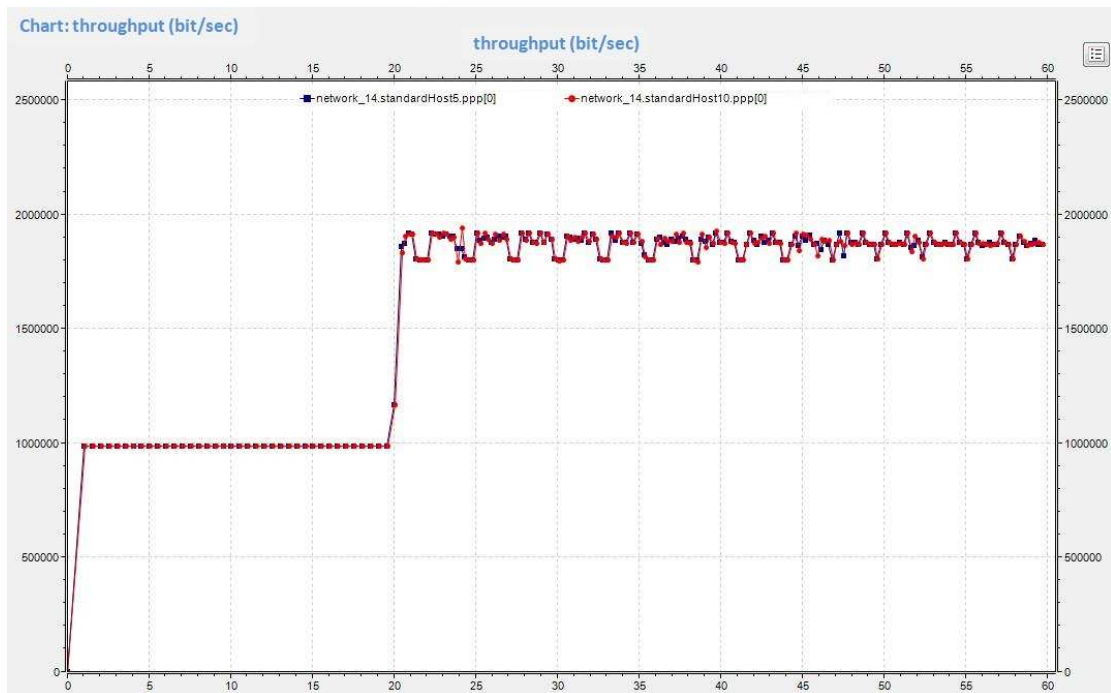


Εικόνα 29: OSPF, end to end throughput από τον host3 στον host8

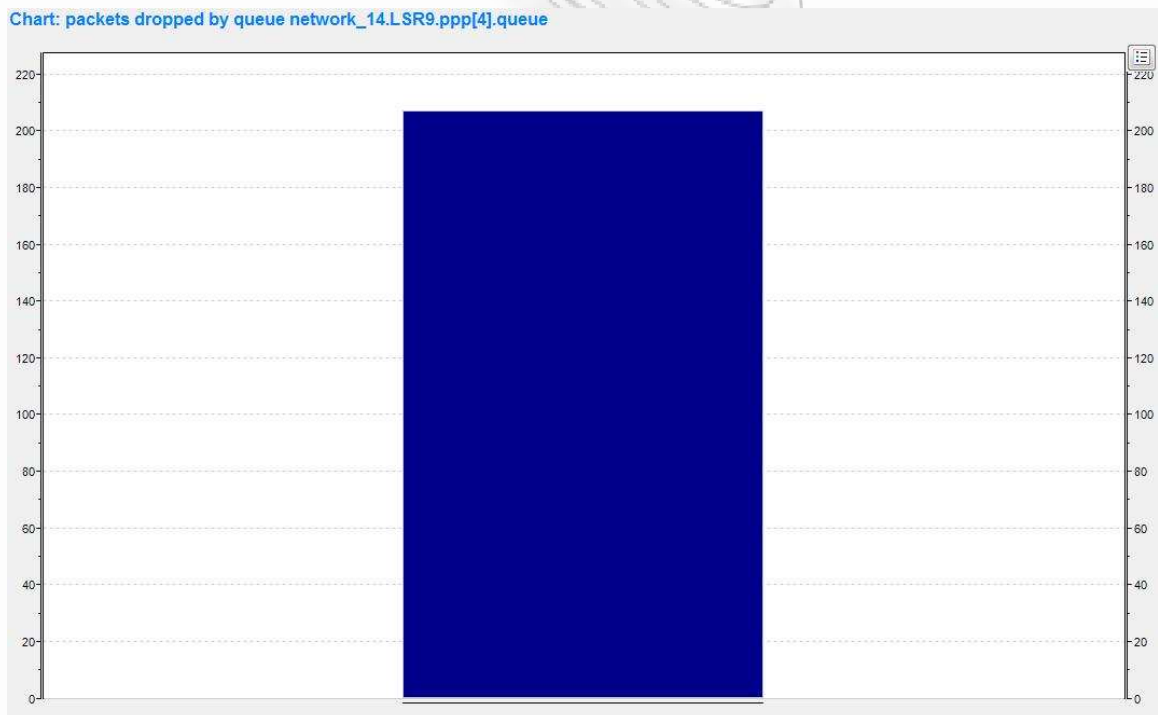
Στις εικόνες 29 και 30 βλέπουμε τις διακυμάνσεις στο end to end throughput για τον τρίτο και τέταρτο χρήστη. Αντίθετα, στην εικόνα 31 βλέπουμε ότι ο 5 χρήστης μπόρεσε να στείλει τα πακέτα του. Στην εικόνα 32 βλέπουμε τα πακέτα που χάθηκαν στον router 9.



Εικόνα 30: OSPF, end to end throughput από τον host4 στον host9



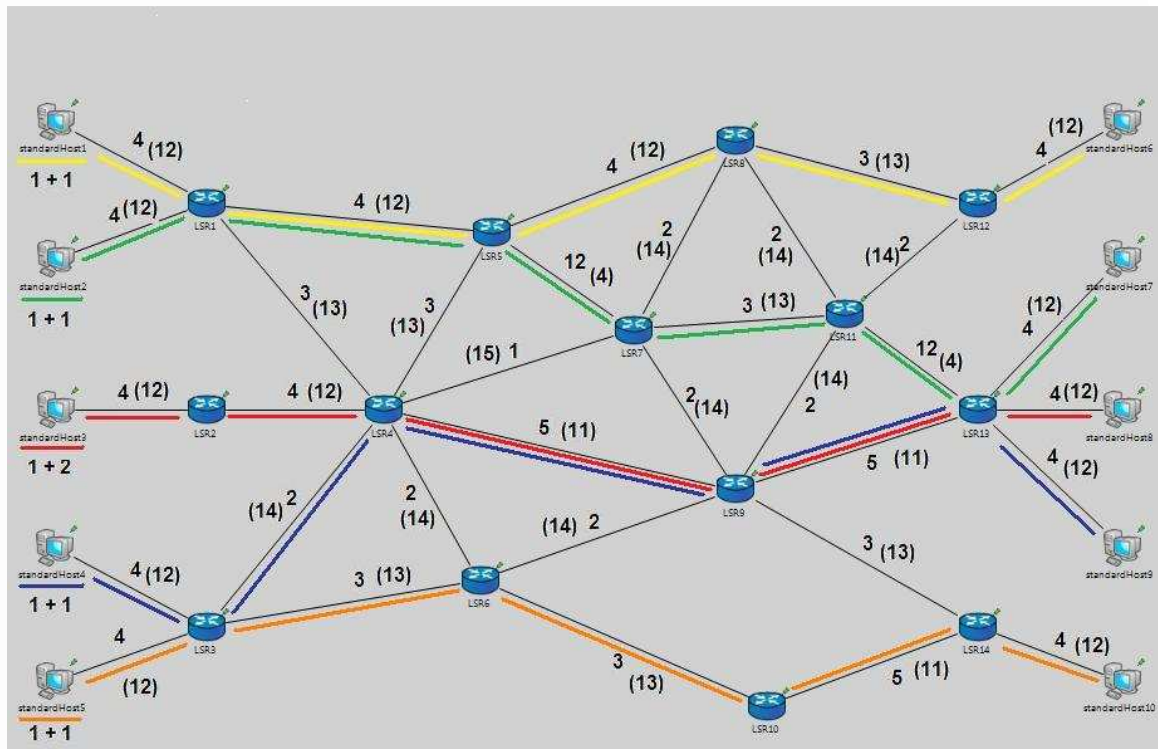
Εικόνα 31: OSPF, end to end throughput από τον host5 στον host10



Εικόνα 32: OSPF, απώλειες πακέτων στον router9

Επομένως, με την ολοκληρωτική αναβάθμιση του δικτύου, δεν πετύχαμε ιδιαίτερη βελτίωση στην απόδοση. Ο λόγος είναι ότι μεγάλο μέρος των πόρων του παρέμειναν ανεκμετάλλετοι. Στόχος θα πρέπει να είναι η εκμετάλλευση δρομολογητών και συνδέσεων που έχουν διαθεσιμότητα.

8.3 Σενάριο 3 (OSPF επιτυχημένη αναβάθμιση)



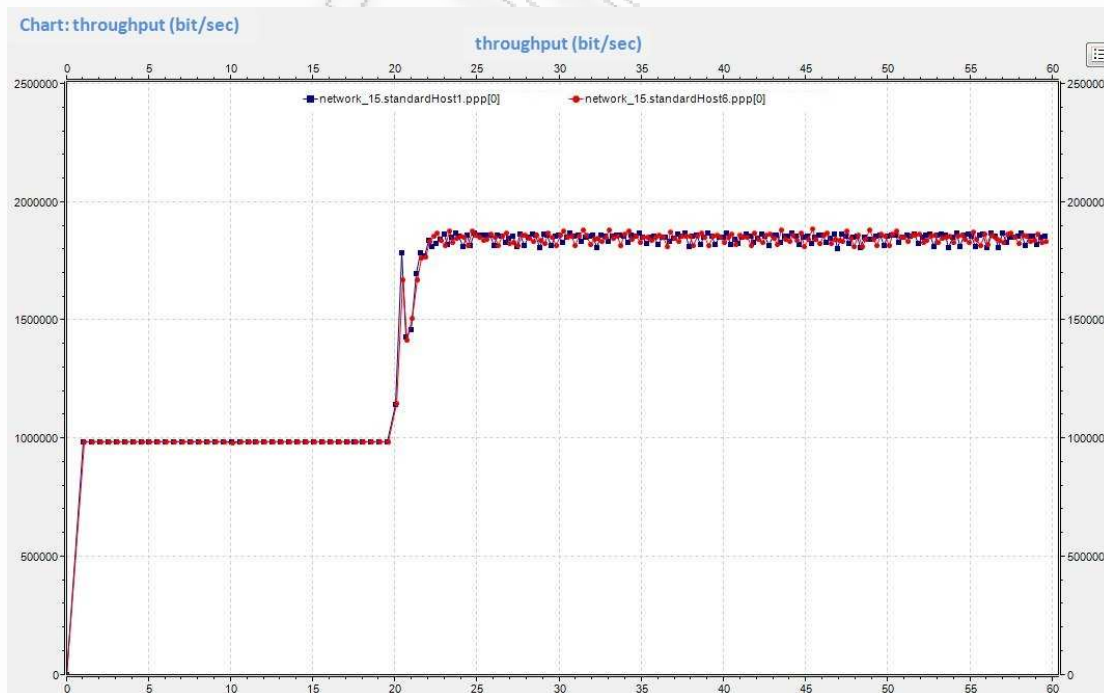
Εικόνα 33: OSPF, επιτυχημένη προσπάθεια αναβάθμισης

Στην προηγούμενη προσομοίωση είδαμε ότι στο OSPF αναβαθμίσεις των συνδέσεων θα πρέπει να στοχεύουν στη χρησιμοποίηση όλων των πόρων του δικτύου. Εδώ φαίνεται μία μελετημένη αναβάθμιση δικτύου η οποία περιλαμβάνει αλλαγή σε 4 μόνο από τις συνδέσεις του δικτύου. Πλέον οι απαιτήσεις των χρηστών ικανοποιούνται σχεδόν στο 100%. Οι αλλαγές που έχουν γίνει στη χωρητικότητα των συνδέσεων είναι οι εξής: για τη σύνδεση μεταξύ των LSR5 και LSR7, από 2 Mbps σε 12 Mbps, για τη σύνδεση μεταξύ των LSR4 και LSR9, από 4 Mbps σε 5 Mbps, για τη σύνδεση μεταξύ των LSR11 και LSR13, από 2 Mbps σε 12 Mbps και για τη σύνδεση μεταξύ των LSR10 και LSR14, από 2 Mbps σε 5 Mbps. Πλέον τα συντομότερα μονοπάτια είναι διαφορετικά για τους χρήστες και η κίνηση μοιράζεται στο δίκτυο. Οι αλλαγές που χρειάστηκαν να γίνουν είναι πολύ λιγότερες. Το συμπέρασμα είναι ότι ακόμα και με απλή τροποποίηση των βαρών, μπορεί ο διαχειριστής σε ένα δίκτυο να αλλάξει τις συνθήκες δρομολόγησης και να αντιμετωπίσει προβλήματα συμφόρησης. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε ότι έφτασαν στους προορισμούς το σύνολο των πακέτων που οι χρήστες επιθυμούσαν να στείλουν. Με τον τρόπο αυτό, ακόμα και αν οι συνθήκες στο δίκτυο αλλάζουν μπορεί ο διαχειριστής πιο εύκολα, αλλάζοντας μόνο τα βάρη να δρομολογήσει την κίνηση. Βέβαια, όπως θα δούμε στη συνέχεια αυτή η τεχνική κρύβει και κινδύνους, αν η αλλαγή στα βάρη δεν γίνει σωστά.

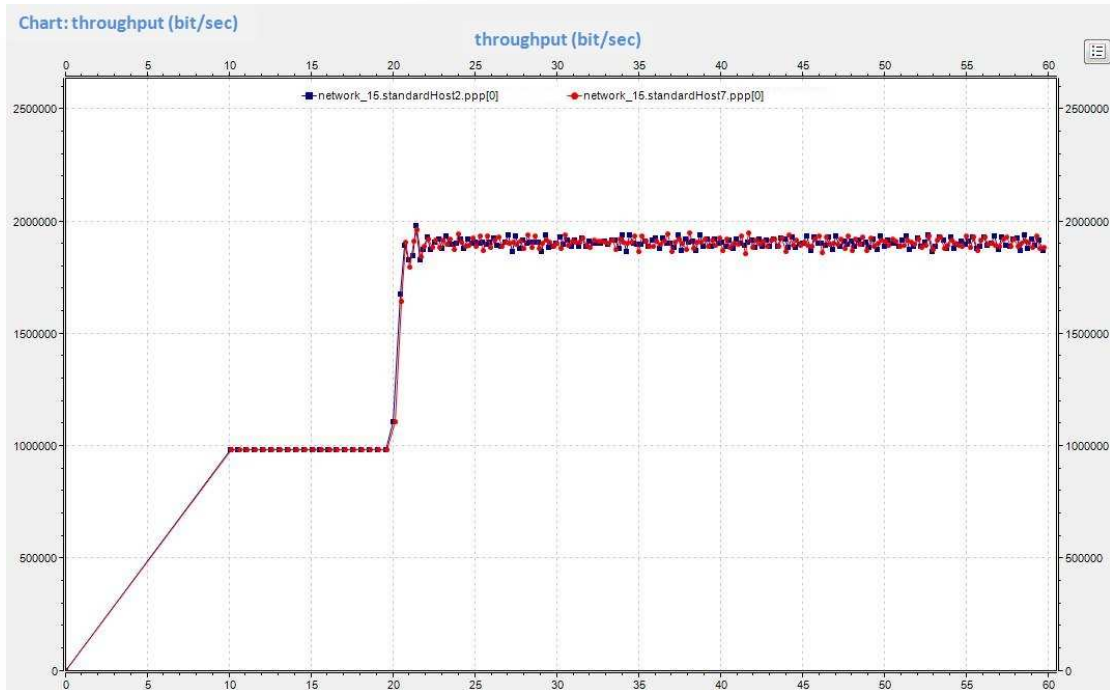
Network 15 (Received)						
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ		ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ		ΑΠΟΔΟΣΗ	
	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)
sH1->sH6	5888	4044600	5889	4185000	100%	96.6%
sH2->sH7	4987	4340700	4987	4376700	100%	99.2%
sH3->sH8	5889	8486000	5889	8599000	100%	98.7%
sH4->sH9	5889	4086900	5889	4167000	100%	98.1%
sH5->sH10	5889	4143600	5889	4177800	100%	99.2%

Πίνακας 5: OSPF, end to end throughput, χωρίς απώλειες στο δίκτυο

Στον πίνακα 5 υπάρχουν μετρήσεις με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η καλύτερη δρομολόγηση των ροών είχε ως αποτέλεσμα όλοι οι χρήστες να έχουν το επίπεδο υπηρεσιών που ήθελαν. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί μπόρεσε να γίνει με ελάχιστη παρέμβαση στο δίκτυο. Τα udp πακέτα που στάλθηκαν με σταθερό ρυθμό έφτασαν στον προορισμό τους χωρίς απώλειες. Ακόμα και οι tcp συνδέσεις, επειδή οι επιβεβαιώσεις λαμβάνονταν στα προβλεπόμενα διαστήματα, μπόρεσαν να στείλουν τα δεδομένα τους με σταθερό υψηλό ρυθμό. Στις παρακάτω εικόνες δίνεται πιο συγκεκριμένα το end to end throughput για κάθε χρήστη. Στην εικόνα 34 βλέπουμε το ρυθμό με τον οποίο έστειλε τα δεδομένα του ο host1 και το ρυθμό με τον οποίο έφτασαν στον host6.

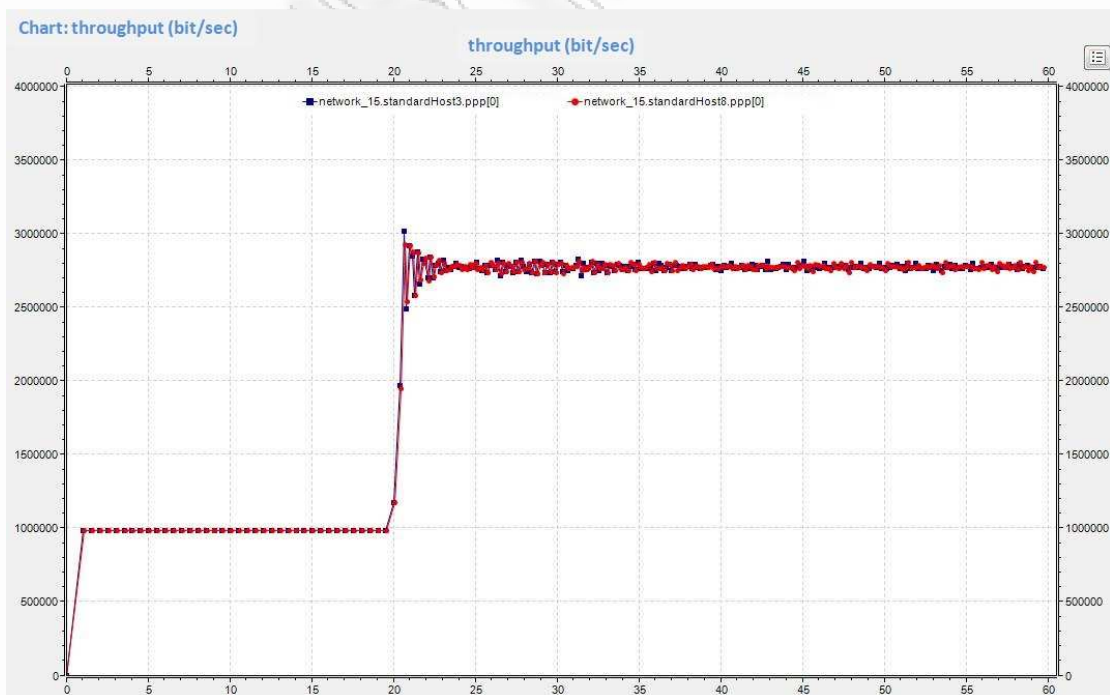


Εικόνα 34: OSPF, end to end throughput από τον host1 στον host6

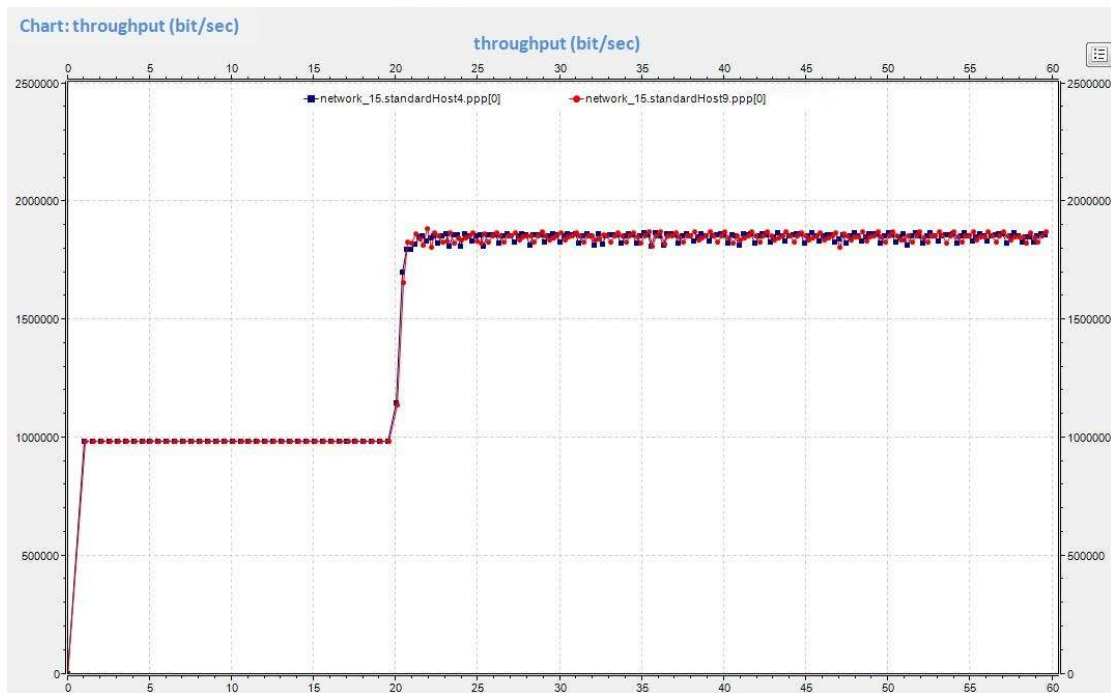


Εικόνα 35: OSPF, end to end throughput από τον host2 στον host7

Στην εικόνα 35 βλέπουμε ότι από χρόνο 10 sec ο host2 άρχισε να στέλνει πακέτα με ρυθμό 1Mbps. Ταυτόχρονα βλέπουμε ότι ο host6 άρχισε να λαμβάνει πακέτα με ρυθμό 1Mbps. Δεν υπάρχουν απώλειες. Από 20 μέχρι 60sec ο host2 ανεβάζει το ρυθμό σε σχεδόν 2Mbps, γιατί αρχίζει και η αποστολή πακέτων για την tcp σύνδεση. Το ίδιο συμβαίνει και στον προορισμό. Στην εικόνα 36 βλέπουμε τα αντίστοιχα στοιχεία για την μετάδοση από τον host3 στον host8.

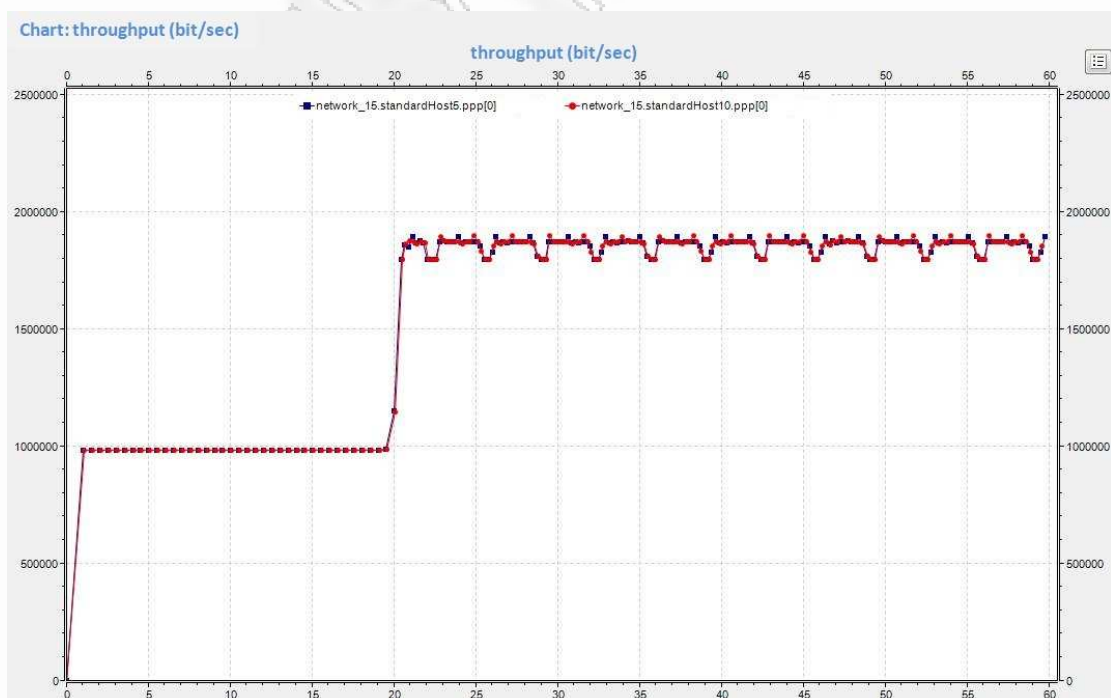


Εικόνα 36: OSPF, end to end throughput από τον host3 στον host8



Εικόνα 37: OSPF, end to end throughput από τον host4 στον host9

Οι εικόνες 37 και 38 είναι παρόμοιες και δείχνουν την κίνηση που ξεκίνησε από τους hosts 4 και 5 για τους hosts 9 και 10 αντίστοιχα. Για τα 20 πρώτα δευτερόλεπτα της προσομοίωσης στέλνουν πακέτα με ρυθμό 1Mbps και τα οποία φτάνουν στους προορισμούς με ρυθμό 1Mbps. Στη συνέχεια και για τα υπόλοιπα 40 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης στέλνεται φορτίο σχεδόν 2 Mbps από τον καθένα, με τους προορισμούς να λαμβάνουν σχεδόν 2Mbps.



Εικόνα 38: OSPF, end to end throughput από τον host5 στον host10



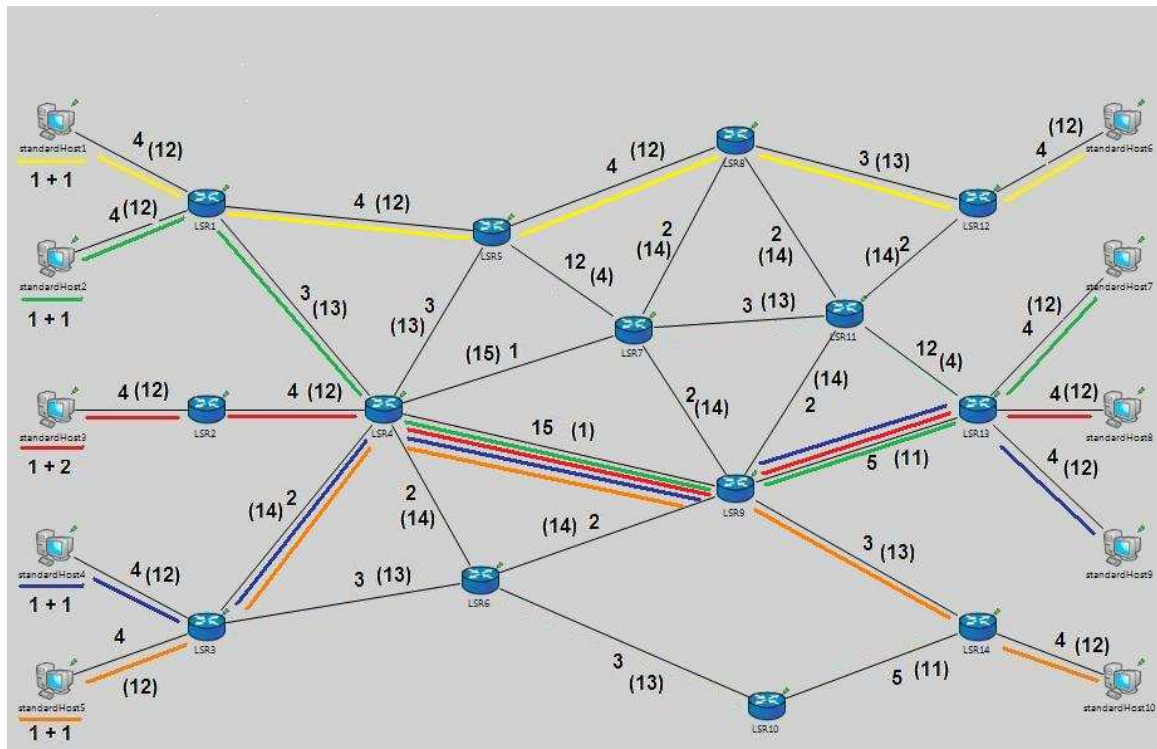
Εικόνα 39: OSPF, απώλειες πακέτων στον router4

Στις εικόνες 39 και 40 βλέπουμε την θετική επίδραση της νέας δρομολόγησης στο δίκτυο στους δρομολογητές 4 και 9. Στις θύρες εξόδου τους πλέον δεν υπάρχουν απώλειες και συγκεκριμένα στις εικόνες δείχνουμε τις θύρες εξόδου που στην προηγούμενη προσομοίωση είχαμε τις απώλειες. Εδώ δεν έχει χαθεί ούτε 1 πακέτο.



Εικόνα 40: OSPF, απώλειες πακέτων στον router9

8.4 Σενάριο 4 (OSPF αποτυχημένη αναβάθμιση)



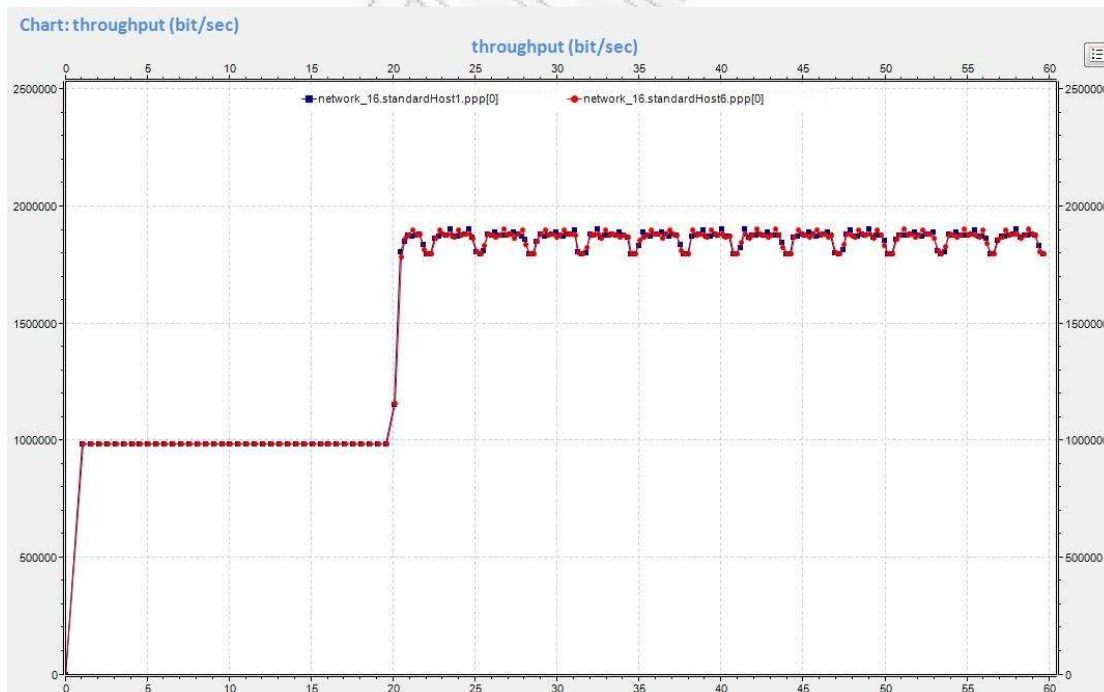
Εικόνα 41: OSPF, αποτυχημένη προσπάθεια αναβάθμισης

Όπως είπαμε σε προηγούμενη προσομοίωση, η αλλαγή στο βάρος μίας σύνδεσης στο δίκτυο μπορεί να έχει επίδραση στους πίνακες δρομολόγησης πολλών δρομολογητών. Ο τρόπος που δουλεύει το OSPF έχει σαν αποτέλεσμα κάθε αλλαγή να προωθείται σε όλους τους δρομολογητές ώστε να αλλάζουν την εικόνα που έχουν για το δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό όμως και τα συντομότερα μονοπάτια θα αλλάξουν. Οπότε, πλέον τα καινούργια συντομότερα μονοπάτια μπορεί να περνάνε από τις ίδιες συνδέσεις και να μην μπορούν να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των χρηστών. Εδώ μελετάμε την περίπτωση όπου μία μόνο αναβάθμιση μίας γραμμής, χωρίς να υπολογίζεται η υπόλοιπη τοπολογία, μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα και να μη βελτιώσει την απόδοση του δικτύου. Όπως φαίνεται στην εικόνα 41 θα υπάρξει συμφόρηση στη σύνδεση από τον LSR3 στον LSR4 και στη σύνδεση από τον LSR9 στον LSR13. Η αναβαθμισμένη σύνδεση, από τον LSR4 στον LSR9 (από 5Mbps σε 15 Mbps), δεν έχει συμφόρηση, αλλά επηρεάζει το αποτέλεσμα του αλγορίθμου. Η κίνηση προωθείται από εκεί με συνέπεια πολλά πακέτα να απορρίπτονται στην σύνδεση από τον LSR9 προς τον LSR13. Δηλαδή, εκτός από την ίδια τη σύνδεση, όσο και αν αυτή έχει αναβαθμιστεί, σημασία έχουν και οι υπόλοιπες.

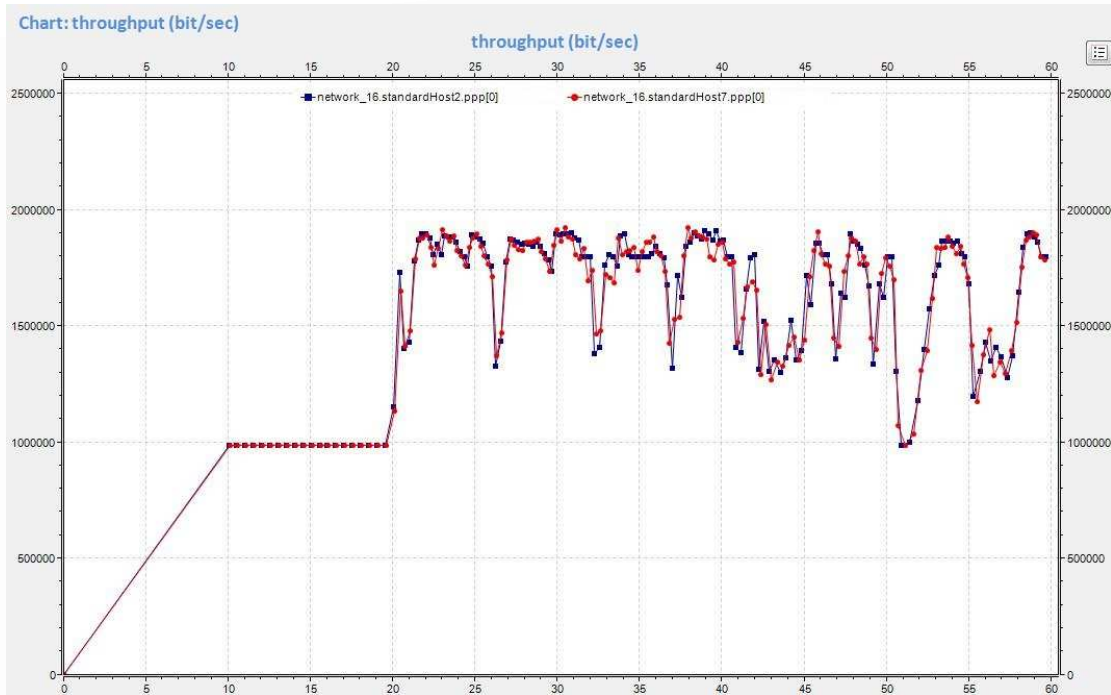
Network 16 (Received)						
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ		ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ		ΑΠΟΔΟΣΗ	
	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)
sH1->sH6	5889	4167000	5889	4185000	100%	99.6%
sH2->sH7	4981	3235500	4989	4260600	99.8%	75.9%
sH3->sH8	5873	4679000	5889	8695000	99.7%	53.8%
sH4->sH9	5722	121500	5889	4202100	97.2%	2.9%
sH5->sH10	5837	215100	5889	4167000	99.1%	5.2%

Πίνακας 6: OSPF, end to end throughput, απώλειες στο δίκτυο

Στον πίνακα 6 μπορούμε να δούμε μετρήσεις για την κίνηση που τελικά έφτασε στους προορισμούς. Χαρακτηριστικό είναι ότι είχαμε έστω και μικρές απώλειες πακέτων ακόμα και για τα udp πακέτα, ενώ οι χρήστες 4 και 5 στην πραγματικότητα οι tcp συνδέσεις τους δεν μπόρεσαν να λειτουργήσουν. Με ποσοστό 3% και 5% δεν μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι χρήστες αυτοί κατάφεραν να στείλουν δεδομένα. Αλλά και ο τρίτος χρήστης βλέπουμε ότι για την tcp σύνδεση του μπόρεσε να φτάσει μόνο στο μισό ρυθμό μετάδοσης από αυτόν που θα έφτανε χωρίς την συμφόρηση. Στη συνέχεια θα δούμε τις μετρήσεις για το end to end throughput από τους χρήστες στους προορισμούς. Στην εικόνα 42 βλέπουμε το ρυθμό των δεδομένων που έστειλε ο πρώτος χρήστης και τον ρυθμό με τον οποίο έφτασαν στον προορισμό. Είναι ο μόνος χρήστης που δεν αντιμετώπισε προβλήματα συμφόρησης.

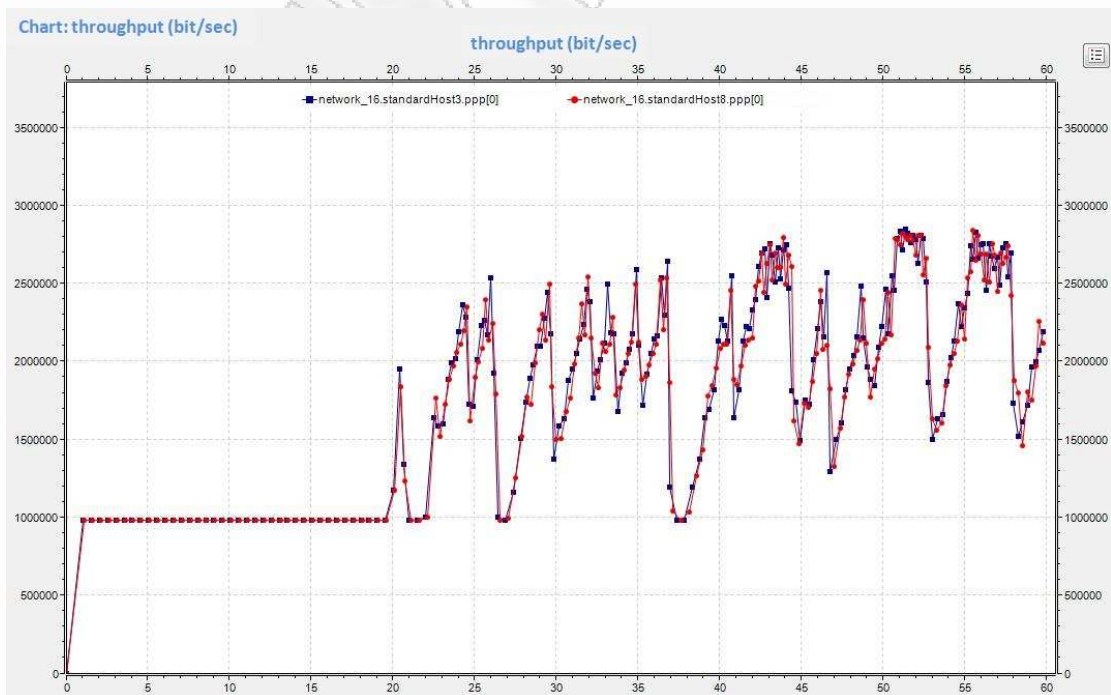


Εικόνα 42: OSPF, end to end throughput από τον host1 στον host6

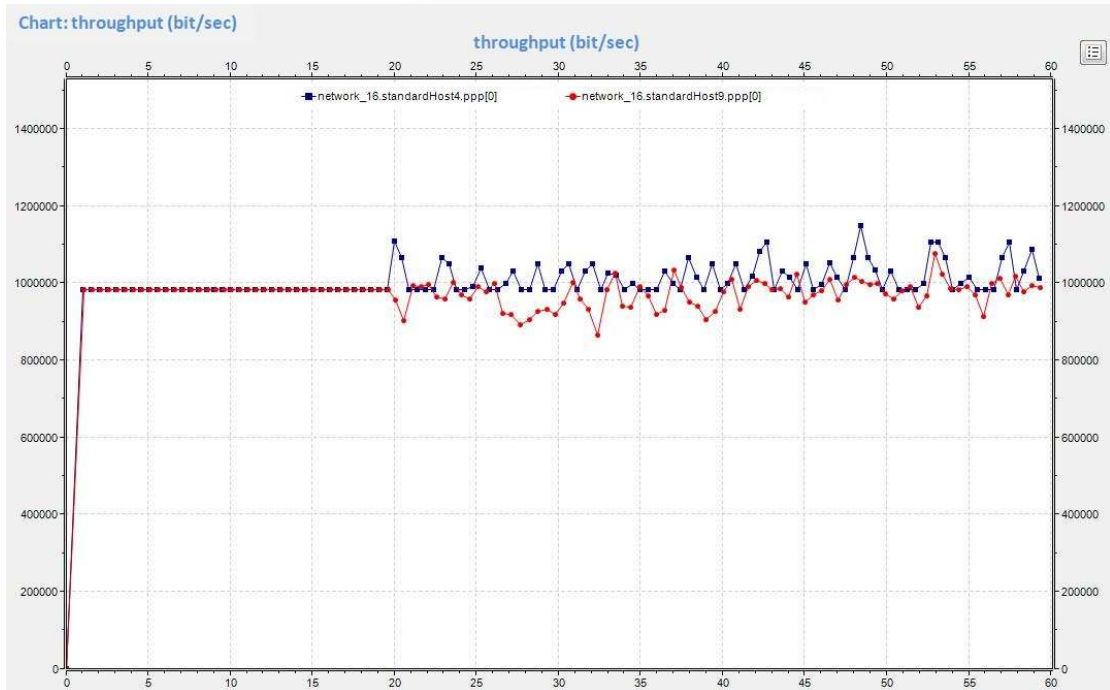


Εικόνα 43: OSPF, end to end throughput από τον host2 στον host7

Στις εικόνες 43 και 44 είναι ξεκάθαρο η προσπάθεια που κάνουν ο δεύτερος και ο τρίτος χρήστης και πιο συγκεκριμένα οι tcp συνδέσεις τους, να ανεβάσουν το ρυθμό μετάδοσης κίνησης στο δίκτυο. Όμως, όπως μπορούμε να δούμε, εξαιτίας της συμφόρησης, αναγκαστικά χάνονται πακέτα, οι επιβεβαιώσεις δεν λαμβάνονται όπως θα έπρεπε και ο μηχανισμός αντιμετώπισης συμφόρησης του tcp μειώνει το ρυθμό αποστολής πακέτων.

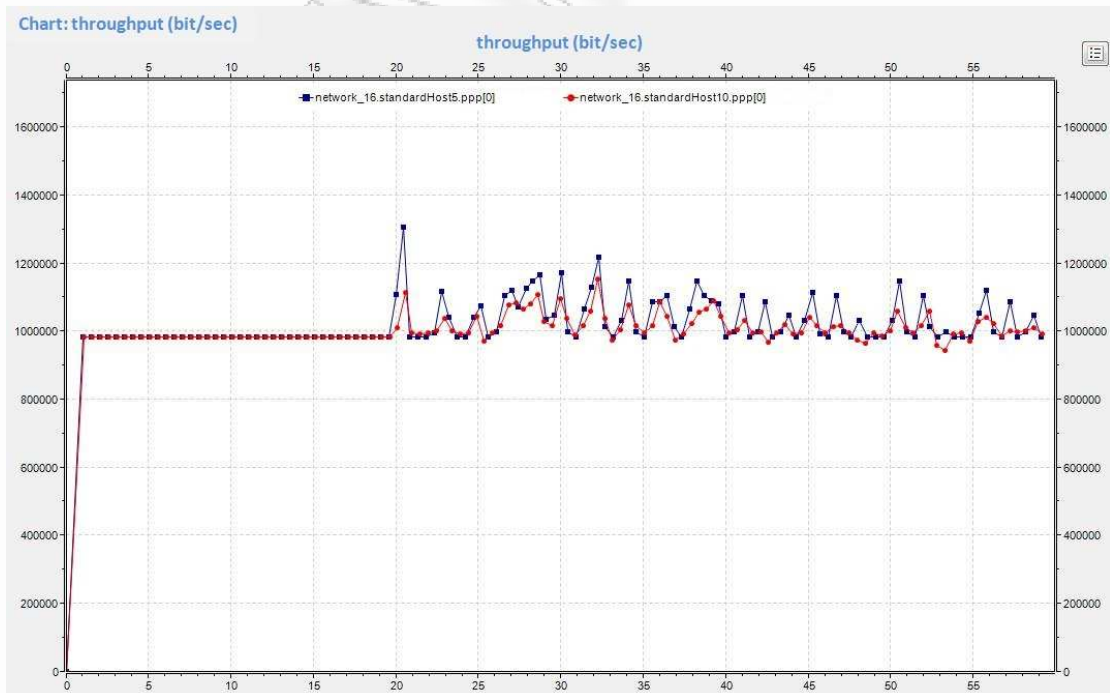


Εικόνα 44: OSPF, end to end throughput από τον host3 στον host8

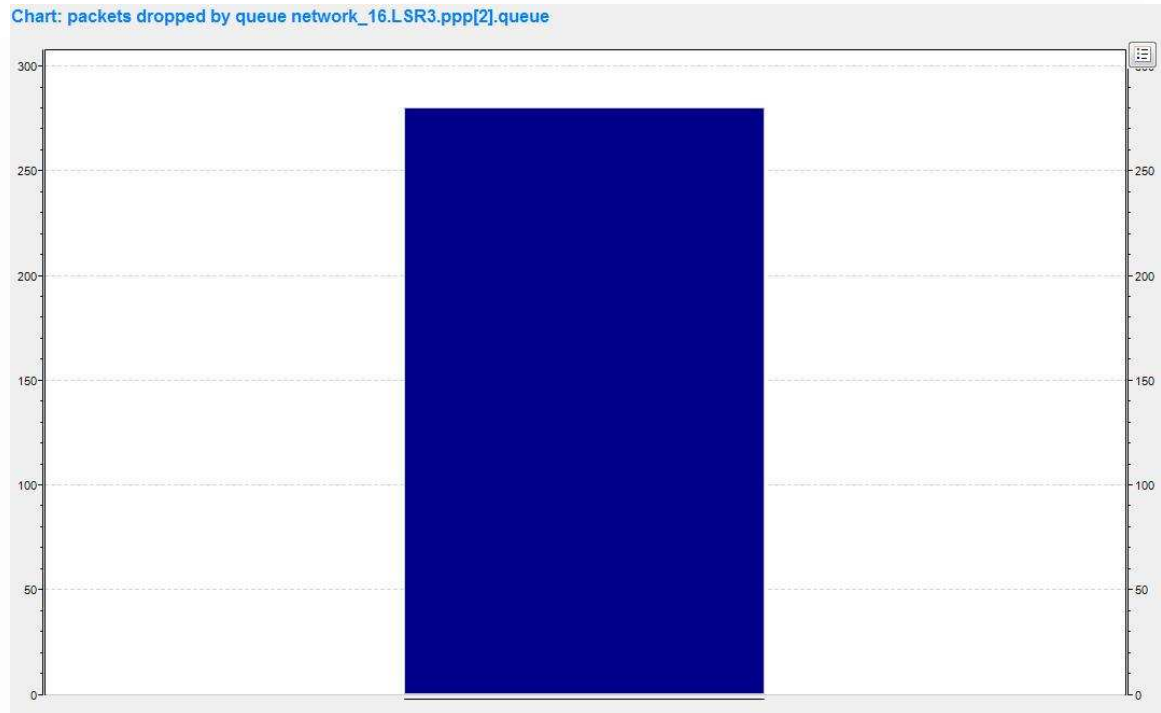


Εικόνα 45: OSPF, end to end throughput από τον host4 στον host9

Στις εικόνες 45 και 46 έχουμε τις μετρήσεις για την κίνηση των χρηστών 4 και 5. Βλέπουμε ότι ενώ μέχρι το χρόνο των 20 sec έχουν στείλει κανονικά τα πακέτα τους και αυτά έχουν παραλειφθεί στους προορισμούς, από 20 και μέχρι το τέλος της προσομοίωσης ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων δεν μπόρεσε να αυξηθεί παρά ελάχιστα.

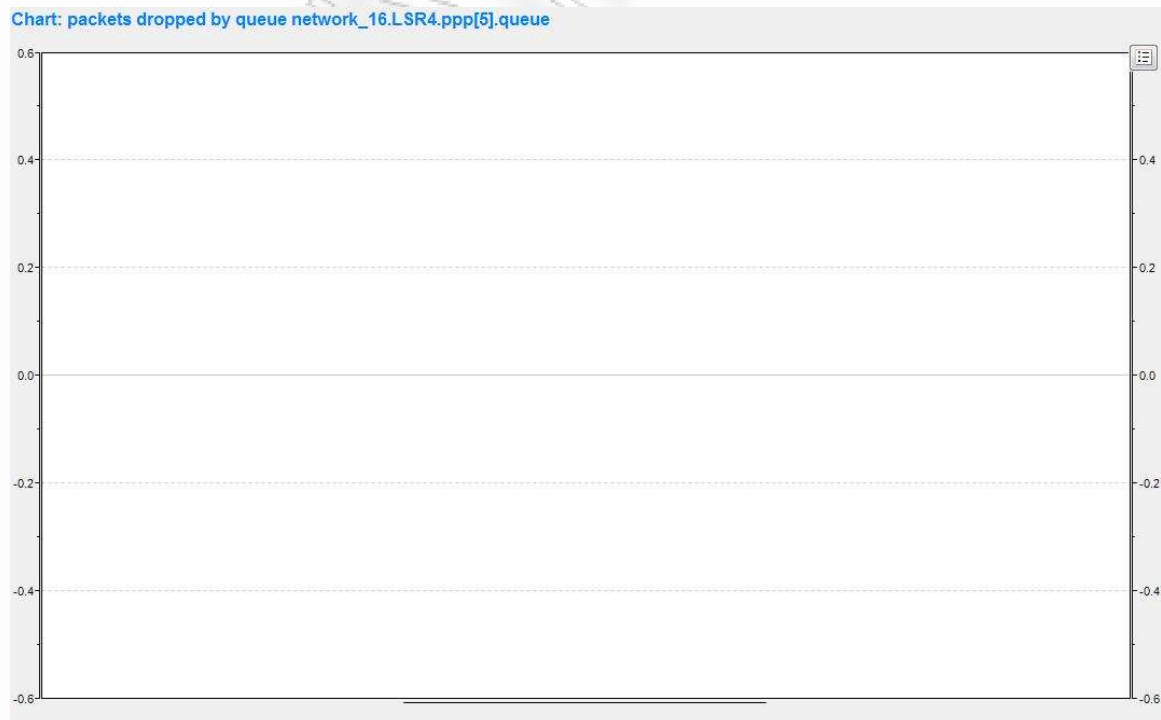


Εικόνα 46: OSPF, end to end throughput από τον host5 στον host10

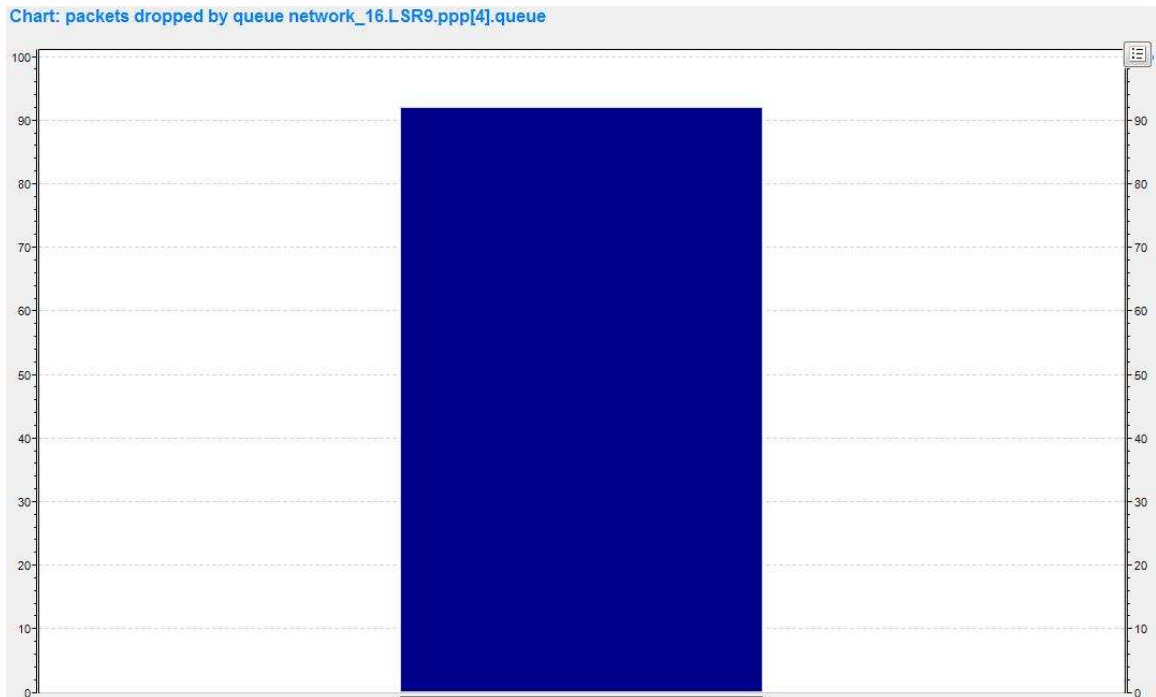


Εικόνα 47: OSPF, απώλειες πακέτων στον router3

Στην εικόνα 48 βλέπουμε ότι η αύξηση της χωρητικότητας στη σύνδεση μεταξύ των δρομολογητών 4 και 9 είχε σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχει συμφόρηση και ο δρομολογητής 4 να μην απορρίπτει πακέτα που προορίζονται για αυτή τη σύνδεση. Όμως, η επιλογή του πρωτοκόλλου να στέλνει τα πακέτα από αυτή τη σύνδεση δημιούργησε συμφόρηση μεταξύ του δρομολογητή 3 και 4 (εικόνα 47).



Εικόνα 48: OSPF, απώλειες πακέτων στον router4

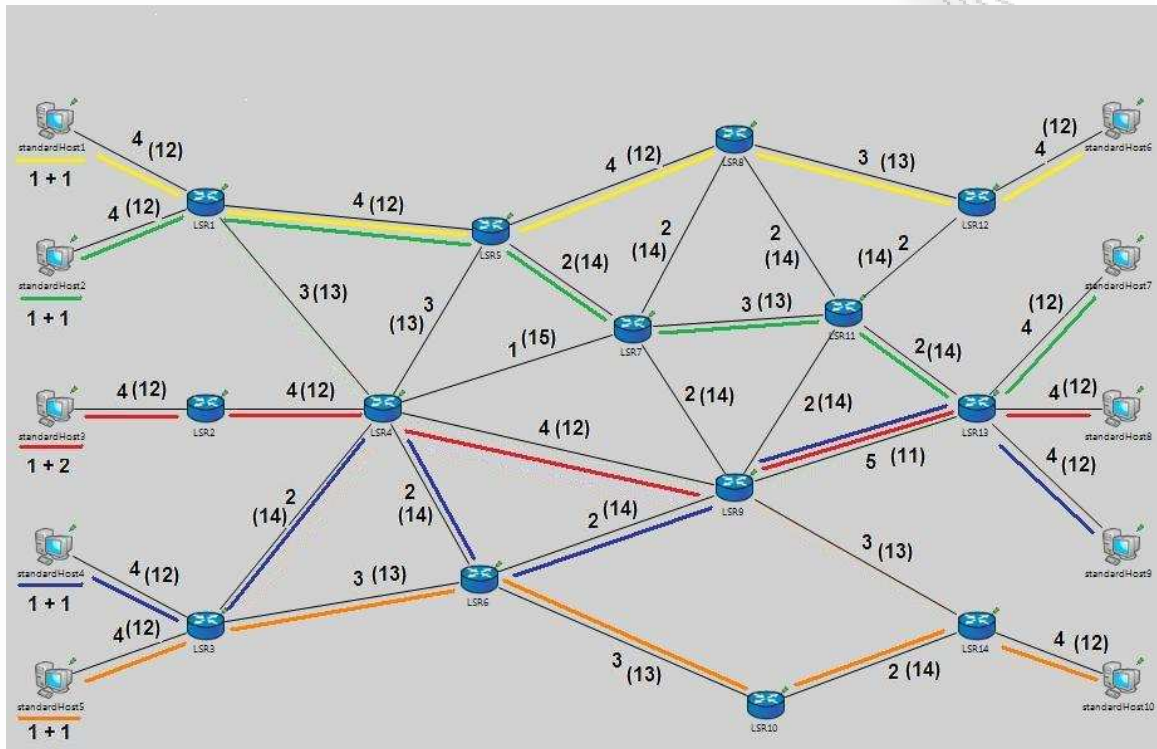


Εικόνα 49: OSPF, απώλειες πακέτων στον router9

Επίσης, συμφόρηση δημιουργήθηκε και σε σύνδεση μετά από αυτήν που αναβαθμίστηκε. Συγκεκριμένα, μετά τη σύνδεση που αναβαθμίστηκε, στη σύνδεση των δρομολογητών 9 με 13 βλέπουμε στην εικόνα 49 ότι είχαμε απώλειες πακέτων. Λογικά, η επιλογή από το πρωτόκολλο τα συντομότερα μονοπάτια να συμπεριλάβουν τη σύνδεση με τη μεγαλύτερη χωρητικότητα έχει ως συνέπεια να μαζεύεται η κίνηση σε αυτή. Όμως, από εκεί η κίνηση πρέπει να συνεχίσει και να προωθηθεί στους προορισμούς. Αναπόφευκτα, στο δρομολογητή που ακολουθεί θα έρχονται πακέτα με πολύ μεγάλο ρυθμό και ο δρομολογητής δεν θα προλαβαίνει να τα προωθήσει.

Κεφάλαιο 9: Multiprotocol Label Switching (MPLS)

9.1 Σενάριο 1



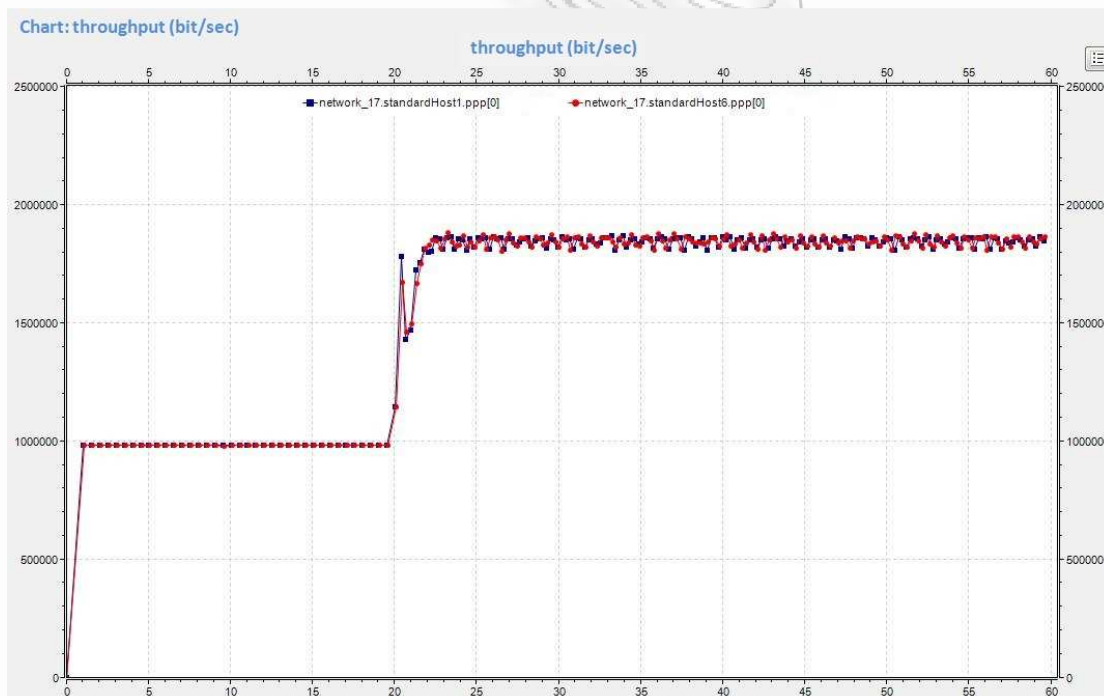
Εικόνα 50: MPLS paths, χωρίς συμφόρηση

Από τις προηγούμενες προσομοιώσεις φάνηκε ότι τόσο στην περίπτωση της στατικής δρομολόγησης όσο και στην περίπτωση της δρομολόγησης με βάση το πρωτόκολλο OSPF, δεν εξασφαλίζεται η ικανοποίηση της ποιότητας υπηρεσιών που έχουν ζητήσει οι χρήστες. Μία πολύ καλή λύση είναι η χρησιμοποίηση του mpls που δίνει μεγαλύτερη ευελιξία στον διαχειριστή, να διαφοροποιήσει τις ροές σύμφωνα με αποστολέα και προορισμό και να τις αντιμετωπίσει μεμονωμένα. Τώρα θα δείξουμε πως βελτιώνεται η δρομολόγηση στο δίκτυο που μελετάμε χρησιμοποιώντας mpls paths και χωρίς να αλλάξουμε κάτι στους πόρους ή στα χαρακτηριστικά του δικτύου. Θα προσπαθήσουμε να αξιοποιήσουμε τους πόρους που ήδη υπάρχουν και οι προηγούμενοι τρόποι δρομολόγησης δεν μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν. Με τα paths λοιπόν που μπορούμε να δημιουργήσουμε στο mpls, θα επιλέξουμε να προωθήσουμε την κίνηση από διαφορετικές διαδρομές, για να μην έχουμε συμφόρηση. Τα μονοπάτια δεν θα είναι όλα τα βέλτιστα σύμφωνα με τα bandwidth των συνδέσεων αλλά θα ορίζονται ρητά από τον διαχειριστή του δικτύου. Στη συνέχεια, ακολουθούν οι μετρήσεις που έγιναν και στις προηγούμενες προσομοιώσεις για να δούμε την βελτίωση στην απόδοση του δικτύου.

Network 17 (Received)						
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ		ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ		ΑΠΟΔΟΣΗ	
	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)
sH1->sH6	5889	4041000	5889	4182300	100%	96.6%
sH2->sH7	4986	4343400	4987	4496400	100%	96.6%
sH3->sH8	5889	8435000	5889	8572000	100%	98.4%
sH4->sH9	5887	4262400	5887	4463100	100%	95.5%
sH5->sH10	5889	4441500	5889	4711500	100%	94.3%

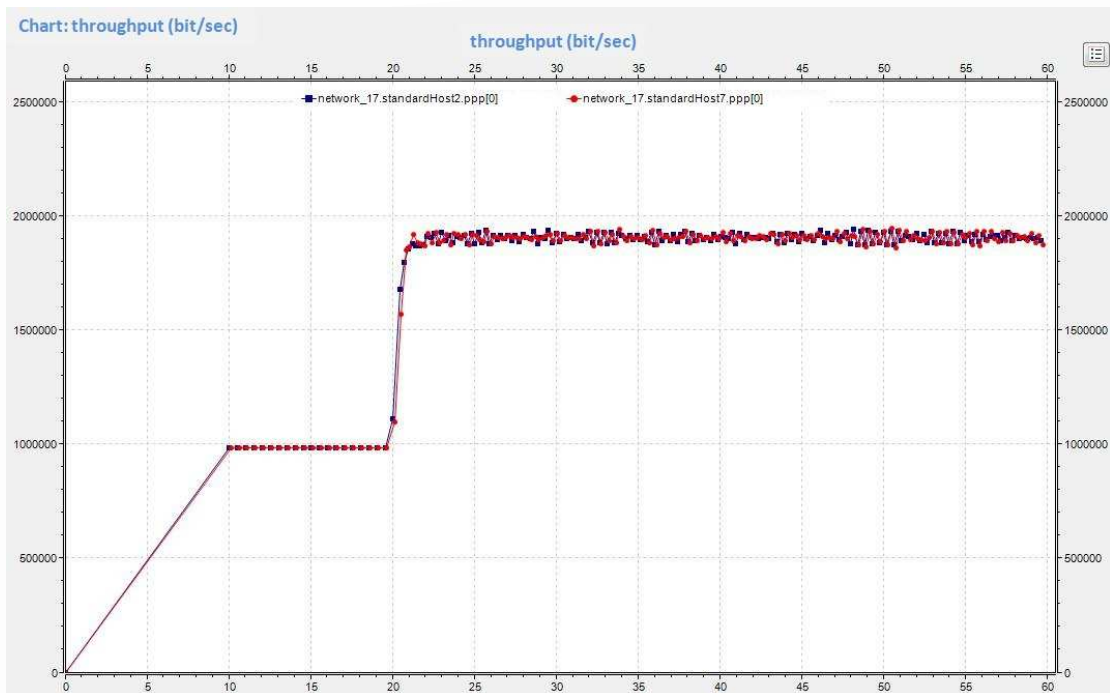
Πίνακας 7: MPLS, end to end throughput, χωρίς απώλειες στο δίκτυο

Στον πίνακα 7 έχουμε τις μετρήσεις με τα πακέτα που τελικά έφτασαν στους προορισμούς. Όπως βλέπουμε δεν χάθηκαν πακέτα. Οι tcp συνδέσεις κατάφεραν να έχουν πολύ υψηλό ρυθμό μετάδοσης, σχεδόν στο 100%. Στις εικόνες 51-55 μπορούμε να δούμε το end to end throughput για την κίνηση των πέντε χρηστών. Στην εικόνα 51, ο χρήστης 1 στέλνει κανονικά για τα πρώτα 20 δευτερόλεπτα κίνηση 1Mbps και για τα επόμενα 40 κίνηση 2Mbps συνολικά. Βλέπουμε ότι όλη η κίνηση φτάνει στον προορισμό και είναι και αυτή ακριβώς που επιθυμούσε ο χρήστης να στείλει.



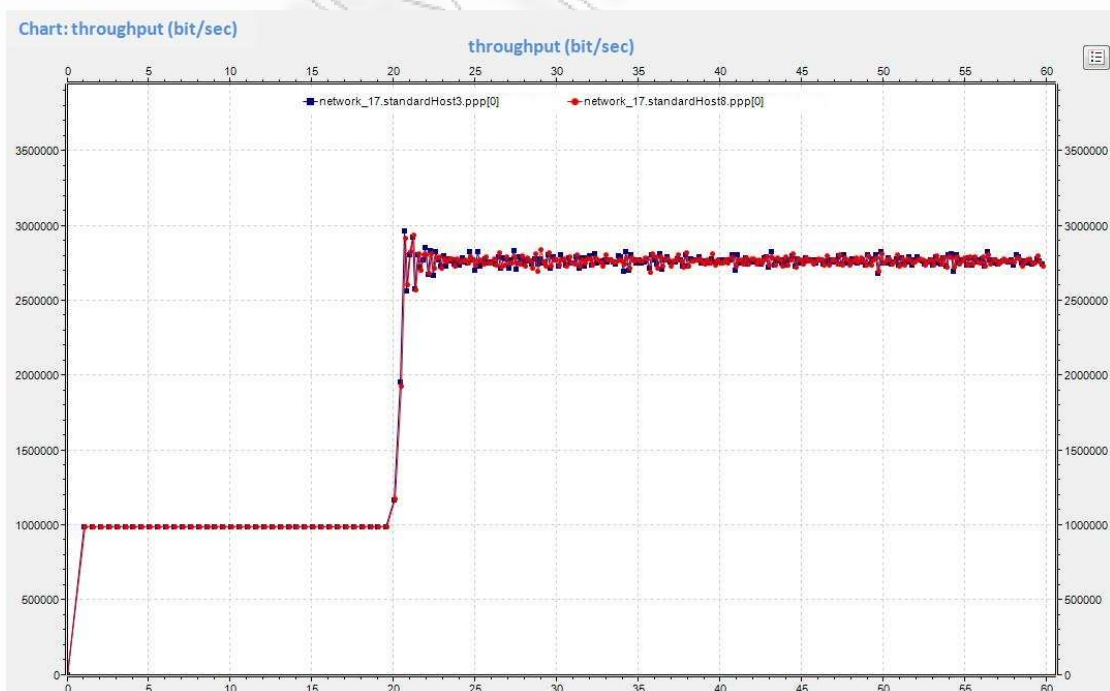
Εικόνα 51: MPLS, end to end throughput από τον host1 στον host6

Στην εικόνα 52 που ακολουθεί βλέπουμε ότι ο χρήστης 2 σε χρόνο 10 sec ξεκίνησε την αποστολή δεδομένων με σταθερό ρυθμό 1Mbps και σε χρόνο 20sec πρόσθεσε άλλο 1Mbps. Ο χρήστης 7 παρέλαβε το σύνολο των δεδομένων αφού βλέπουμε ότι ο ρυθμός που λάμβανε τα δεδομένα είναι ακριβώς ο ίδιος με τον ρυθμό που μεταδίδονταν.

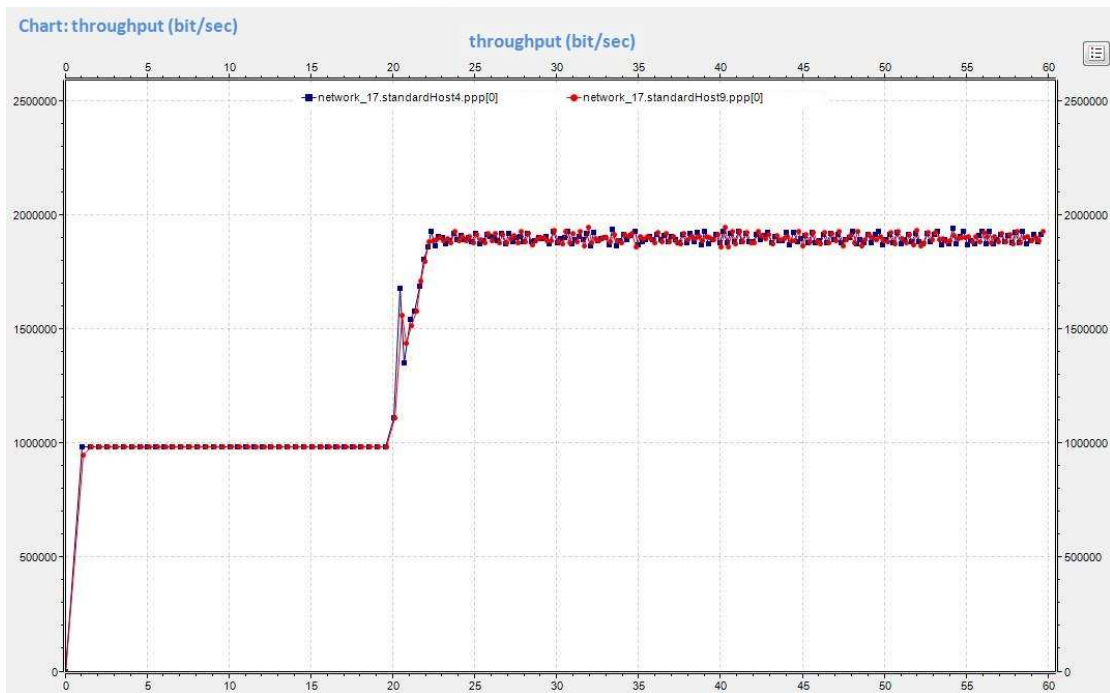


Εικόνα 52: MPLS, end to end throughput από τον host2 στον host7

Στην εικόνα 53 έχουμε τις ίδιες μετρήσεις για τα δεδομένα του τρίτου χρήστη. Από 0 έως 20sec έστειλε πακέτα με σταθερό ρυθμό 1Mbps και από 20 μέχρι 60 ανέβασε το ρυθμό σε σχεδόν 3Mbps. Τα πακέτα έφτασαν στο σύνολο τους στον προορισμό τους.

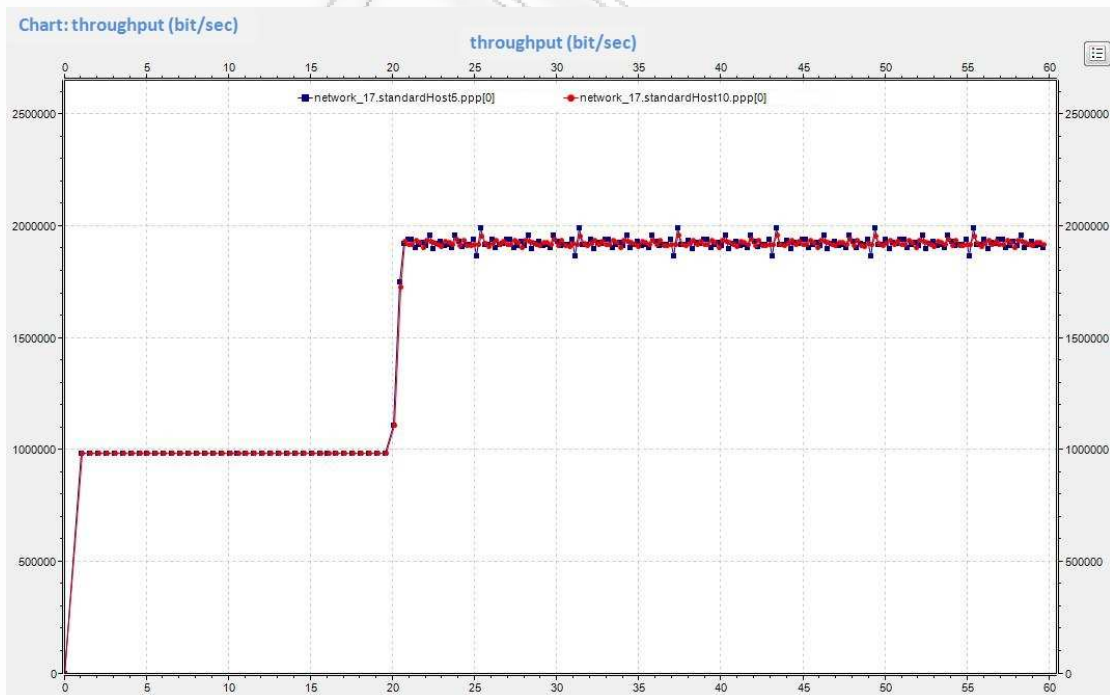


Εικόνα 53: MPLS, end to end throughput από τον host3 στον host8



Εικόνα 54: MPLS, end to end throughput από τον host4 στον host9

Στις εικόνες 54 και 55 βλέπουμε τις μετρήσεις για τους χρήστες 4 και 5. Όπως φαίνεται και αυτοί με το νέο τρόπο δρομολόγησης των πακέτων, κατάφεραν να στείλουν όσα δεδομένα επιθυμούσαν με τον ρυθμό που είχαν ζητήσει.



Εικόνα 55: MPLS, end to end throughput από τον host5 στον host10

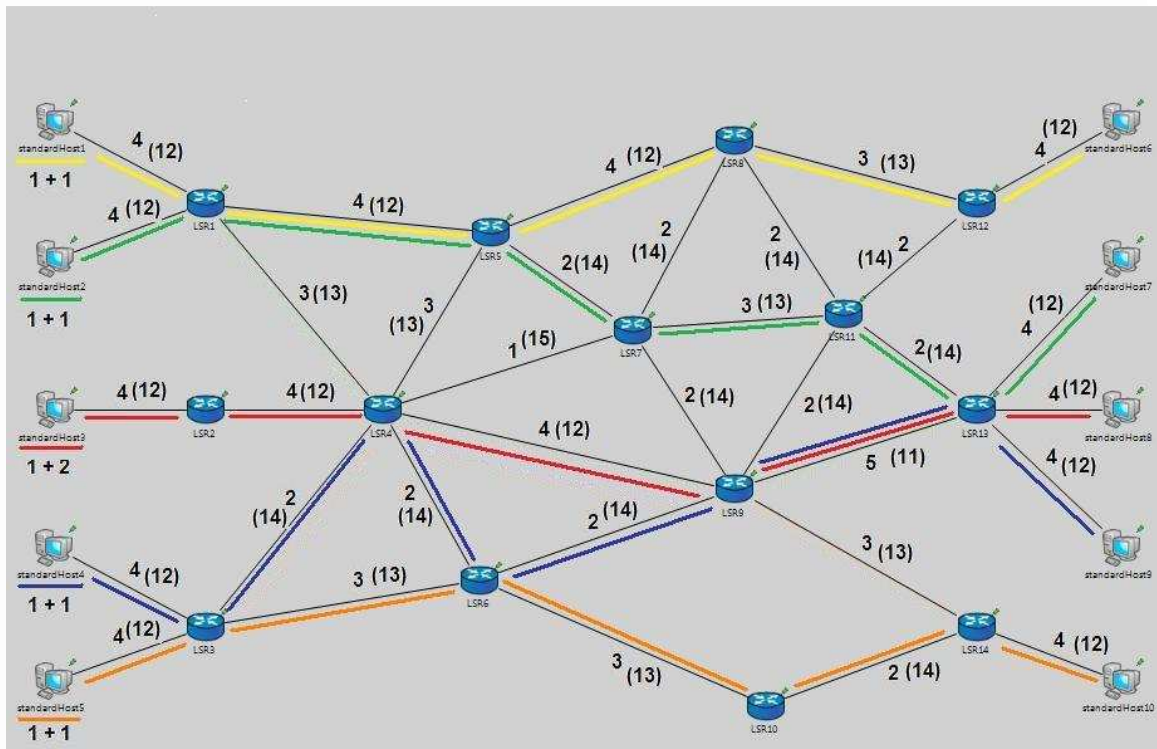


Εικόνα 56: MPLS, απώλειες πακέτων στον router4

Στην εικόνα 56 βλέπουμε και συγκεκριμένα ότι στον δρομολογητή 4, στην θύρα εξόδου που αντιστοιχεί στη σύνδεση από τον δρομολογητή 4 στον δρομολογητή 9, δεν χάθηκαν πακέτα. Δείχνουμε το συγκεκριμένο σημείο στο δίκτυο, γιατί σε αυτό λόγω της θέσης του και της χωρητικότητας των συνδέσεων, μέχρι τώρα επιλέγονταν από το πρωτόκολλο με αποτέλεσμα να έχει συχνά συμφόρηση.

Επομένως, δείξαμε πως μπορεί ο διαχειριστής ενός δικτύου, χωρίς κόστος, να βελτιώσει την απόδοση του δικτύου, να αξιοποιήσει όλους τους πόρους του και να διαχειριστεί μεμονωμένα τις ροές ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των χρηστών. Είναι πολύ σημαντικό ότι αυτό μπορεί να γίνει μόνο με απλή εισαγωγή ετικετών στα πακέτα και τη δημιουργία μονοπατιών.

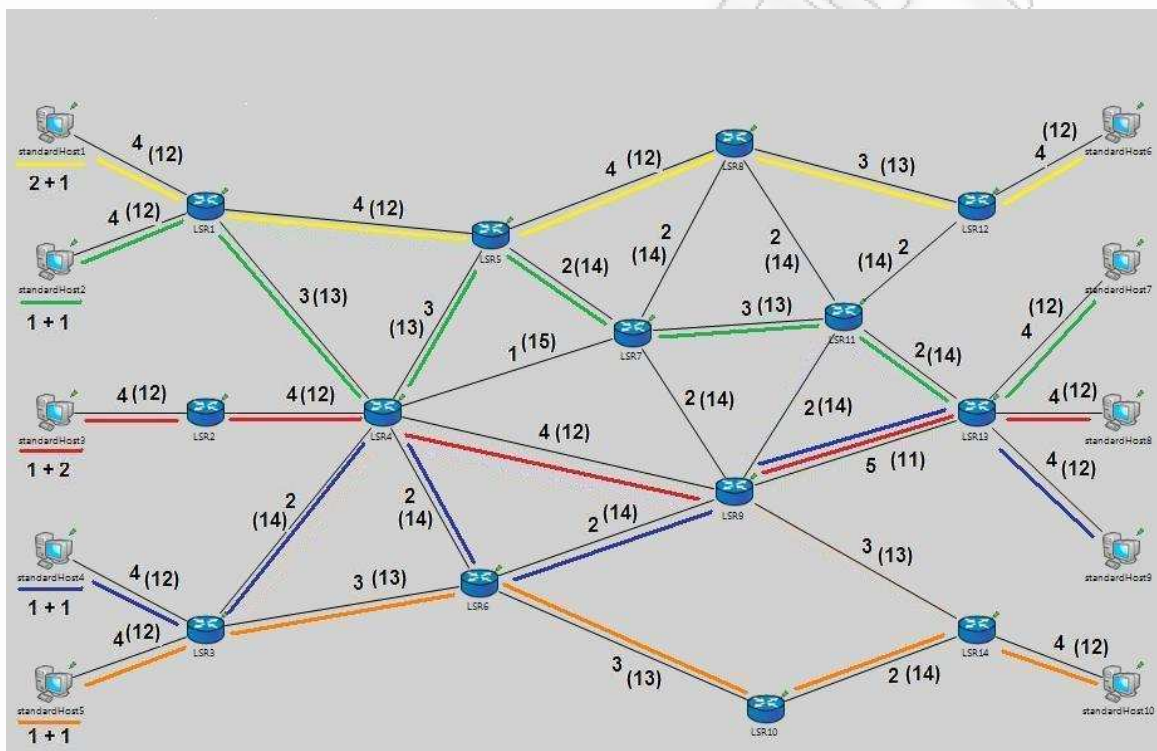
9.2 Σενάριο 2



Εικόνα 57: MPLS paths, συμφόρηση

Μέχρι τώρα οι τεχνικές διαχείρισης της κίνησης που μελετήσαμε είχαν προεπιλεγεί πριν την προσομοίωση και παρέμειναν για όλη τη διάρκεια. Με τον τρόπο αυτό, πριν ξεκινήσουν οι χρήστες να στέλνουν πακέτα, είχαν δημιουργηθεί οι πίνακες δρομολόγησης με σκοπό να εξυπηρετήσουν τη συγκεκριμένη κίνηση. Στις μέρες μας, όμως, οι χρήστες που επιθυμούν να στείλουν δεδομένα ολοένα και αυξάνονται όπως επίσης και η κίνηση που αυτοί θα βάλουν στο δίκτυο δεν μπορεί να προβλεφθεί. Επομένως, η εικόνα ενός δικτύου, με τις ροές κίνησης να ξεκινάνε από τους χρήστες και να καταλήγουν στους προορισμούς, συνεχώς αλλάζει. Οπότε, ο τρόπος που αντιμετωπίζονταν η δρομολόγηση των πακέτων μέχρι τώρα ήταν στατικός και δεν θα μπορούσε να προσαρμοστεί σε τυχόν αλλαγές της κίνησης. Για το σκοπό αυτό, σε αυτήν την προσομοίωση θα μελετήσουμε πως μπορεί σε ένα δίκτυο χρησιμοποιώντας mpls paths να τροποποιηθούν κάποια μονοπάτια ως αντίδραση σε κάποια αλλαγή που έγινε. Με τον τρόπο αυτό, μπορούμε να αποφύγουμε συνθήκες συμφόρησης, οι οποίες δεν θα μπορούσαν να προβλεφθούν από πριν αλλά έπρεπε να αντιμετωπιστούν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στην εικόνα 57, λοιπόν, βλέπουμε το δίκτυο και τα μονοπάτια που έχουν δημιουργηθεί στην αρχή για να εξυπηρετηθούν όλοι οι χρήστες. Με την δρομολόγηση αυτή τα πακέτα θα σταλθούν κανονικά χωρίς να υπάρχουν απώλειες. Όμως, σε

χρόνο 15sec ο χρήστης 2 θα προσθέσει μία νέα ροή 1Mbps στο δίκτυο και πλέον με τη δρομολόγηση που ισχύει θα αρχίσουν να χάνονται πακέτα. Ευτυχώς, το mpls δίνει στο διαχειριστή του δικτύου τη δυνατότητα να μπορεί να αλλάξει την πορεία των μονοπατιών. Επομένως, με πολύ μικρή παρέμβαση και χωρίς κόστος, μπορεί να επαναδρομολογήσει μία ροή και να την προωθήσει από συνδέσεις που έχουν διαθεσιμότητα αποφεύγοντας έτσι τη δημιουργία συμφόρησης. Στην εικόνα 58 βλέπουμε το νέο μονοπάτι που δημιουργήθηκε για την κίνηση που παράγει ο δεύτερος χρήστης.



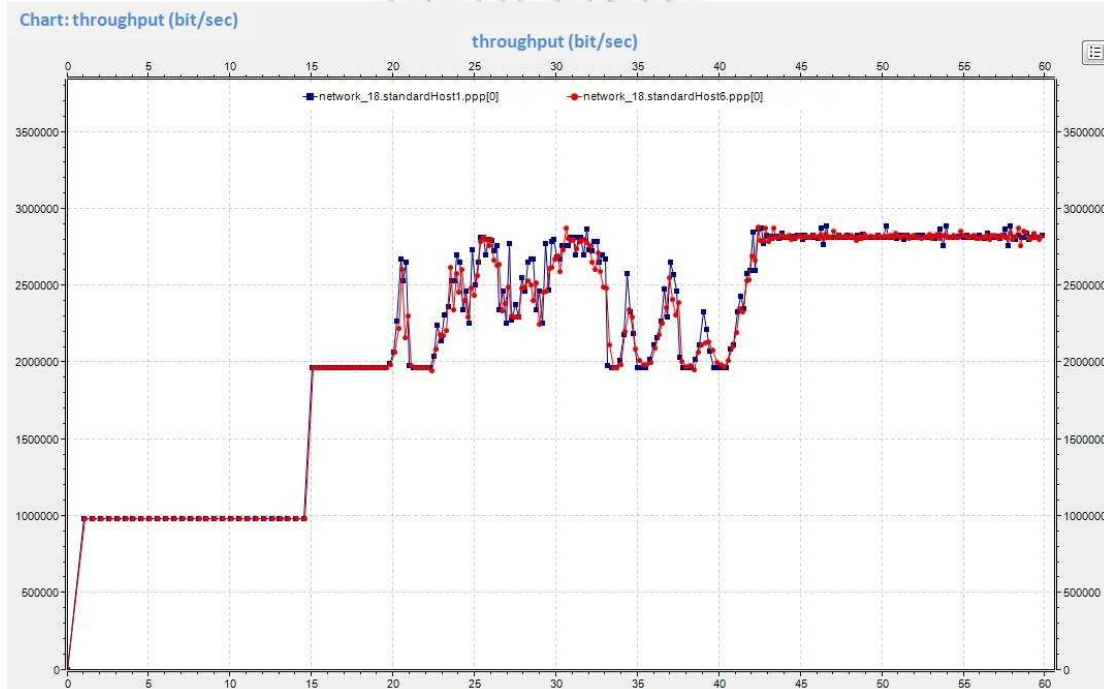
Εικόνα 58: MPLS paths, αποφυγή συμφόρησης με επαναδρομολόγηση

Αρκετά σημαντικό είναι το πόσο γρήγορα γίνεται αντιληπτή η πιθανότητα συμφόρησης στο δίκτυο ώστε να παρθεί η απόφαση για επαναδρομολόγηση μίας ροής. Για αυτό στη συνέχεια θα δείξουμε 3 περιπτώσεις. Μία με επαναδρομολόγηση στα 40 sec ώστε να φανεί ότι όσο αργεί χάνονται πακέτα, μία με επαναδρομολόγηση στα 15 sec για να φανεί ότι αν γίνει έγκαιρα δεν θα χαθούν πακέτα και μία χωρίς επαναδρομολόγηση για να δείξουμε ότι όσο καλά και να στηθούν τα μονοπάτια στην αρχή, αν ο διαχειριστής δεν αντιδράσει στις αλλαγές τότε είναι σίγουρο ότι θα υπάρξουν απώλειες. Είναι απαραίτητο οι τεχνικές διαχείρισης της κίνησης να είναι δυναμικές, να αντιλαμβάνονται τις αλλαγές και να τις αντιμετωπίζουν (online traffic engineering).

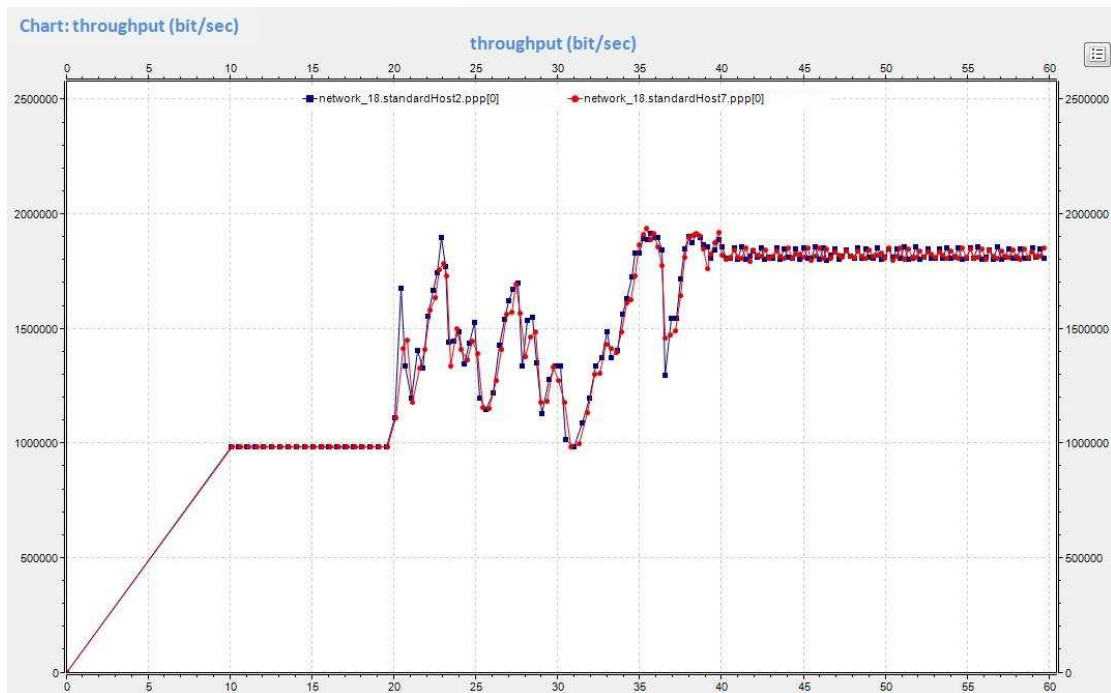
Network 18 - Επαναδρομολόγηση 40 sec (Received)						
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ		ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ		ΑΠΟΔΟΣΗ	
	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)
sH1->sH6	10325	2822400	10378	4182300	99.5%	67.5%
sH2->sH7	4969	3195900	4986	4283100	99.7%	74.6%
sH3->sH8	5889	8436000	5889	8572000	100%	98.4%
sH4->sH9	5887	4260600	5887	4463100	100%	95.5%
sH5->sH10	5889	4441500	5889	4711500	100%	94.3%

Πίνακας 8: MPLS, end to end throughput, καθυστερημένη επαναδρομολόγηση

Στον πίνακα 8 μπορούμε να δούμε μετρήσεις για την ποσότητα της κίνησης που τελικά έφτασε στους προορισμούς, αν η επαναδρομολόγηση γίνει σε χρόνο 40 δευτερολέπτων. Όπως, βλέπουμε για τους 2 πρώτους χρήστες θα υπάρχει συμφόρηση και δεν θα έχουν την απόδοση που θα επιθυμούσαν. Στην εικόνα 59 βλέπουμε ότι συγκεκριμένα για τον πρώτο χρήστη μέχρι τα 40 sec η tcp σύνδεσή του θα προσπαθεί να ανεβάσει το ρυθμό μετάδοσης πακέτων αλλά δεν θα καταφέρει. Αντίθετα, μετά τα 40sec φαίνεται ότι πλέον δεν υπάρχει πρόβλημα και ο χρήστης στέλνει τα δεδομένα του με τον σταθερό ρυθμό που θα επιθυμούσε.

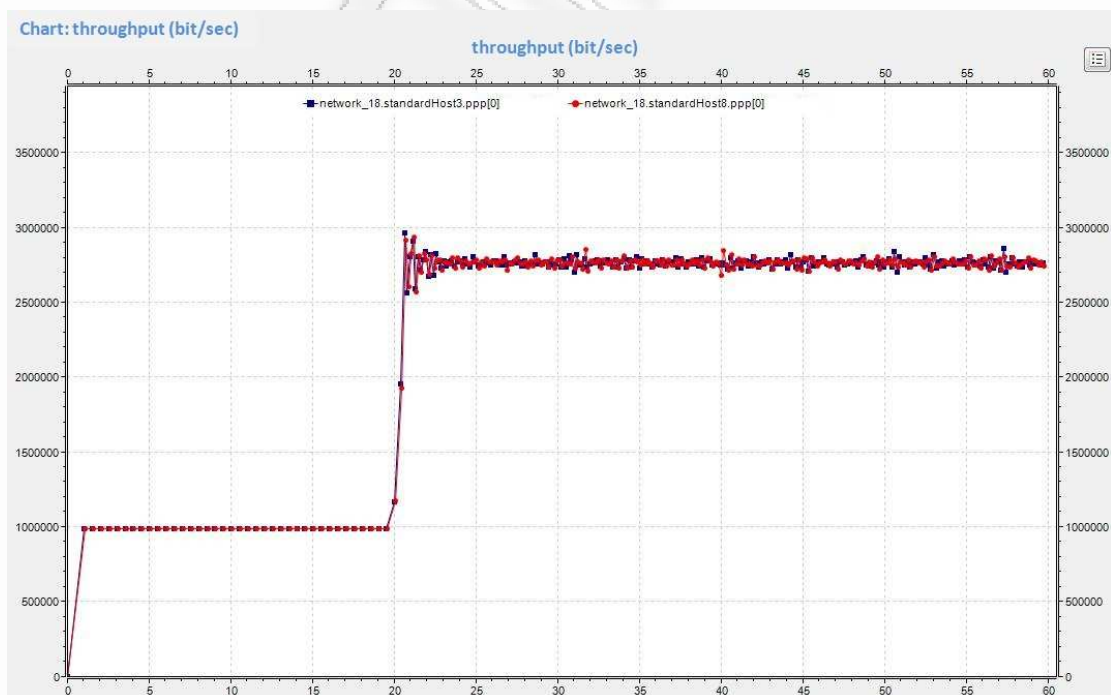


Εικόνα 59: MPLS, end to end throughput από τον host1 στον host6

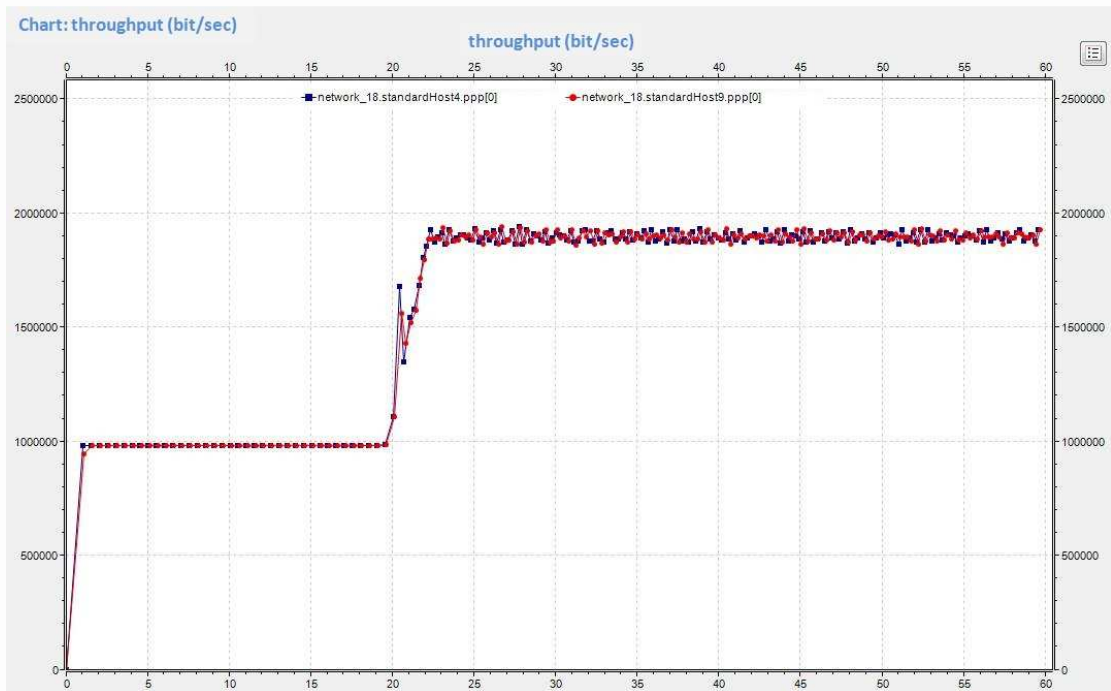


Εικόνα 60: MPLS, end to end throughput από τον host2 στον host7

Το ίδιο φαίνεται και για τον δεύτερο χρήστη. Μέχρι τα 40 sec λόγω απώλειας πακέτων η tcp σύνδεσή του έχει πολύ χαμηλή απόδοση, ενώ όλα ομαλοποιούνται μετά τα 40 sec που έχει γίνει η επαναδρομολόγηση. Στις εικόνες 61,62,63 βλέπουμε τις μετρήσεις για τους άλλους 3 χρήστες οι οποίοι δεν επηρεάζονται.



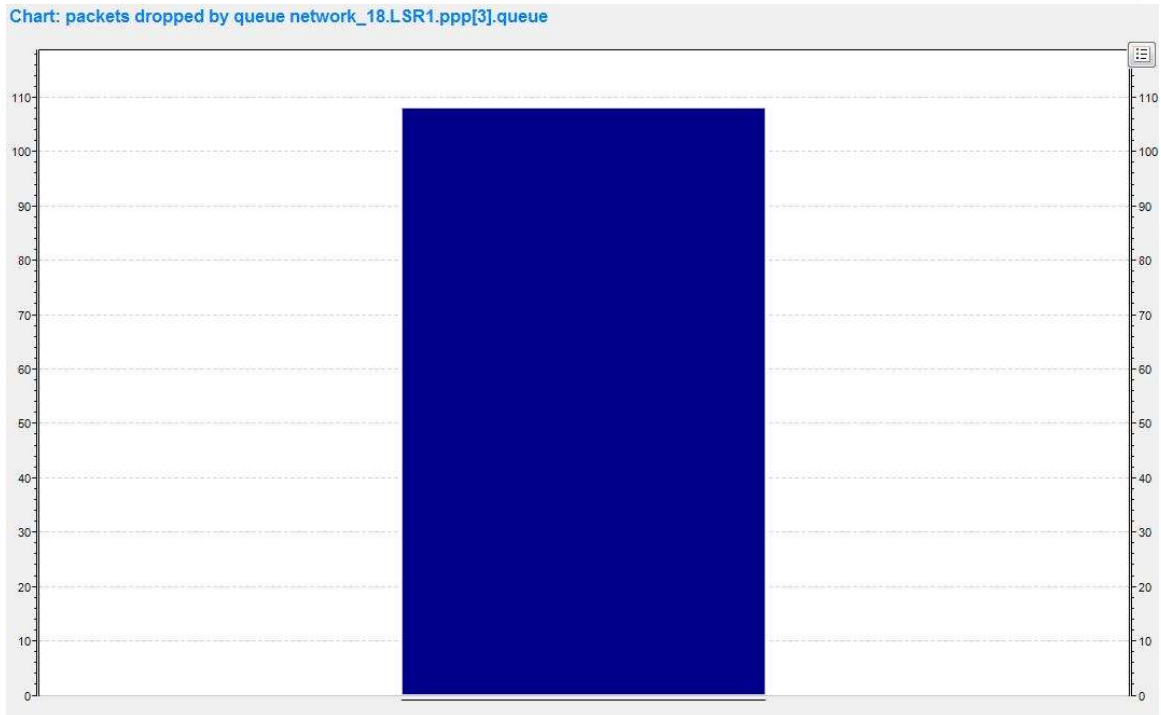
Εικόνα 61: MPLS, end to end throughput από τον host3 στον host8



Εικόνα 62: MPLS, end to end throughput από τον host4 στον host9



Εικόνα 63: MPLS, end to end throughput από τον host5 στον host10



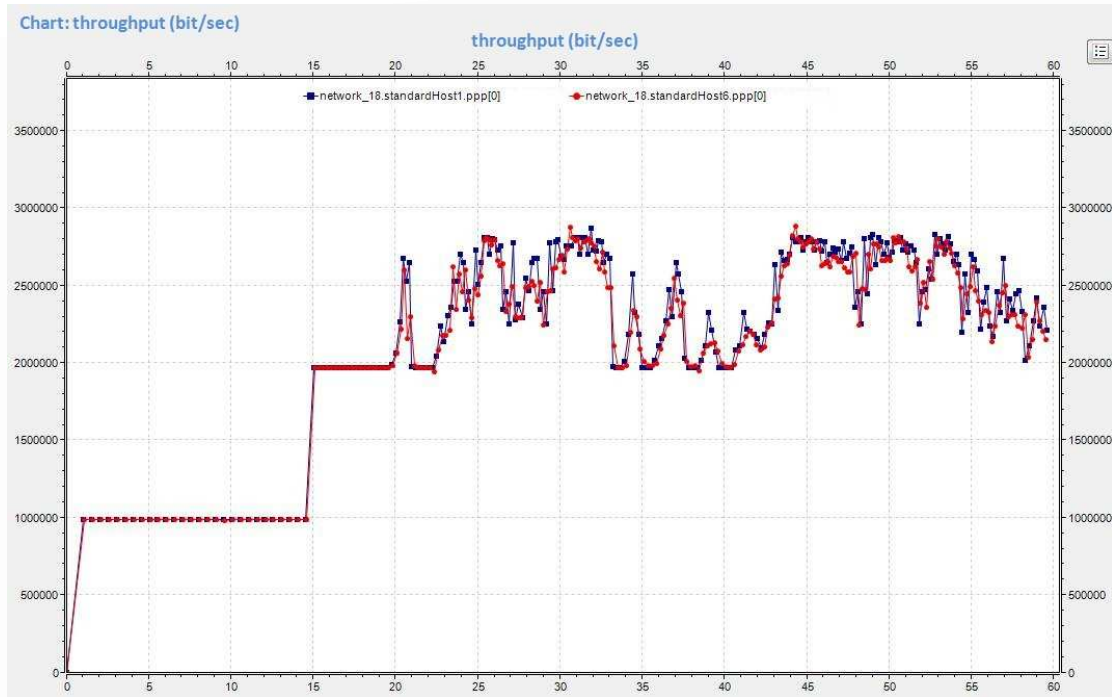
Εικόνα 64: MPLS, απώλειες πακέτων στον router1

Στην εικόνα 64 βλέπουμε τον αριθμό των πακέτων που χάθηκαν μέχρι να γίνει η επαναδρομολόγηση.

Αν η τροποποίηση στο μονοπάτι που ακολουθούν τα πακέτα του δεύτερου χρήστη δεν γίνει καθόλου τότε η απόδοση του δικτύου θα πέσει ακόμα πιο πολύ. Στις μετρήσεις που ακολουθούν φαίνεται ότι από τα 20 μέχρι τα 60sec έχουμε απώλειες στο δίκτυο. Στον πίνακα 9 βλέπουμε ότι οι 2 πρώτοι χρήστες είχαν αρκετά χαμηλότερη ποιότητα υπηρεσιών από αυτή που θα ήθελαν. Χαρακτηριστικά από 4,2 Mbytes που θα ήθελε να στείλει ο πρώτος χρήστης τελικά έστειλε 2,2 Mbytes δηλαδή σχεδόν τα μισά. Ενώ, ο δεύτερος χρήστης από 4,5 Mbytes που θα ήθελε να στείλει τελικά έστειλε μόλις 2,1 Mbytes.

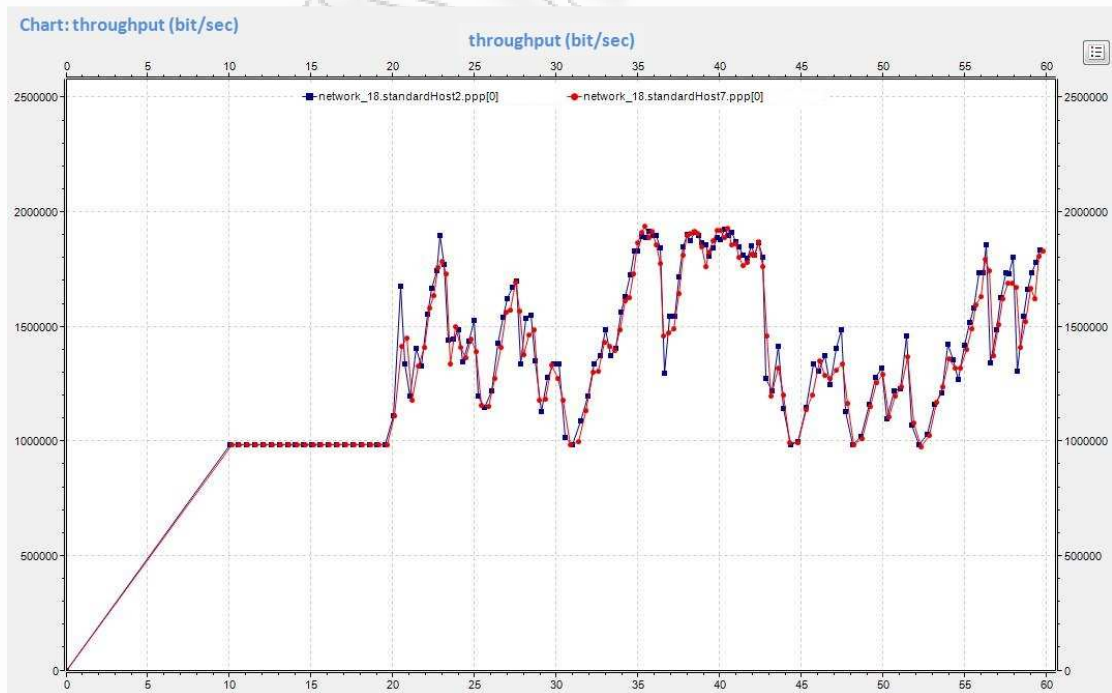
Network 18 – Χωρίς Επαναδρομολόγηση (Received)						
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ		ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ		ΑΠΟΔΟΣΗ	
	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)
sH1->sH6	10272	2222100	10378	4182300	99%	53.1%
sH2->sH7	4951	2157300	4987	4496400	99.3%	48%
sH3->sH8	5889	8438000	5889	8572000	100%	98.4%
sH4->sH9	5887	4260600	5887	4463100	100%	95.5%
sH5->sH10	5889	4441500	5889	4711500	100%	94.3%

Πίνακας 9: MPLS, end to end throughput, χωρίς επαναδρομολόγηση

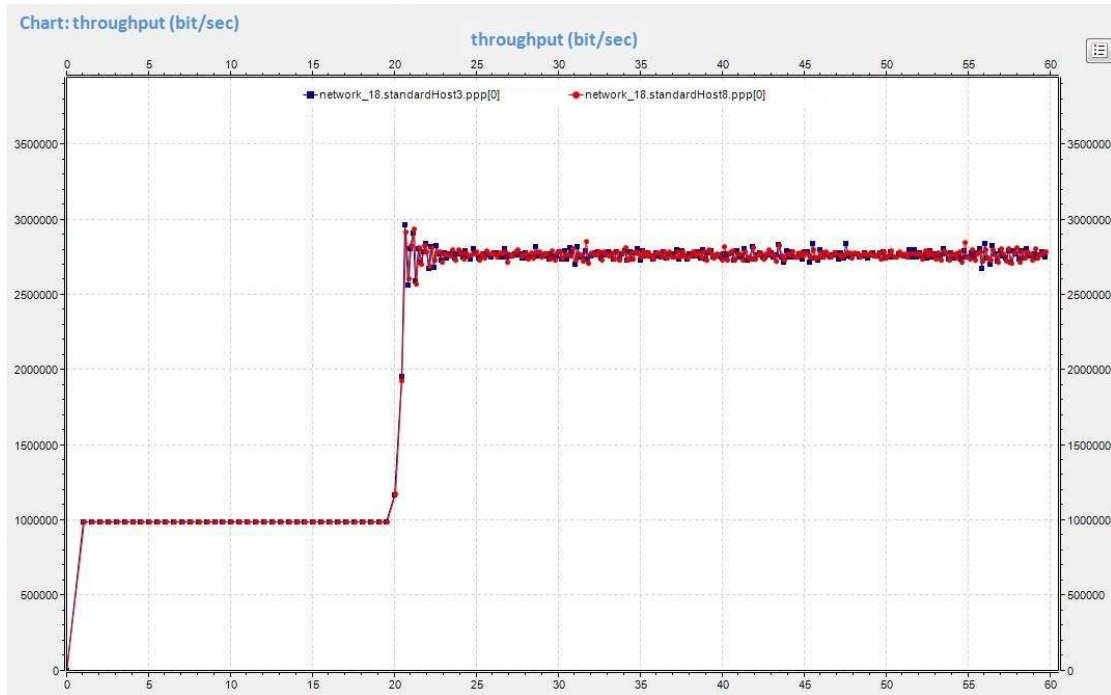


Εικόνα 65: MPLS, end to end throughput από τον host1 στον host6

Στις εικόνες 65 και 66 βλέπουμε τις διακυμάνσεις στο throughput και για τον χρήστη 1 και για τον χρήστη 2. Από 20 μέχρι 60 sec και οι δύο προσπαθούν να αυξήσουν το ρυθμό μετάδοσης, χωρίς επιτυχία, από τη στιγμή που και οι 2 προσπαθούν να στείλουν τα πακέτα τους από μία σύνδεση που δεν αρκεί για να εξυπηρετήσει και τους 2.

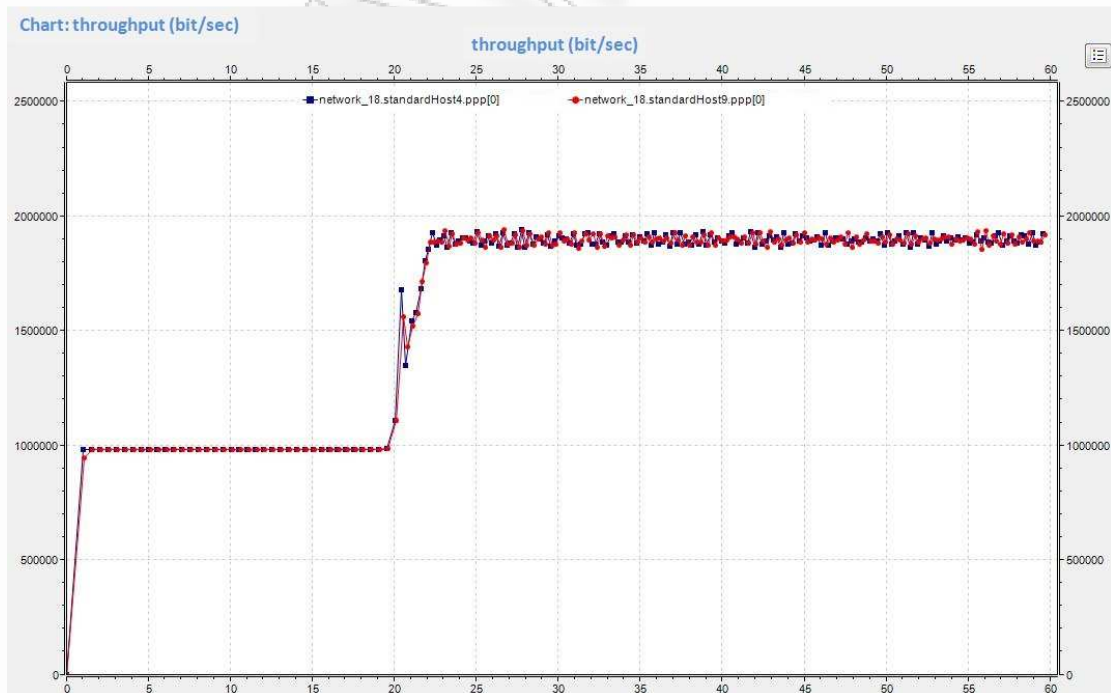


Εικόνα 66: MPLS, end to end throughput από τον host2 στον host7

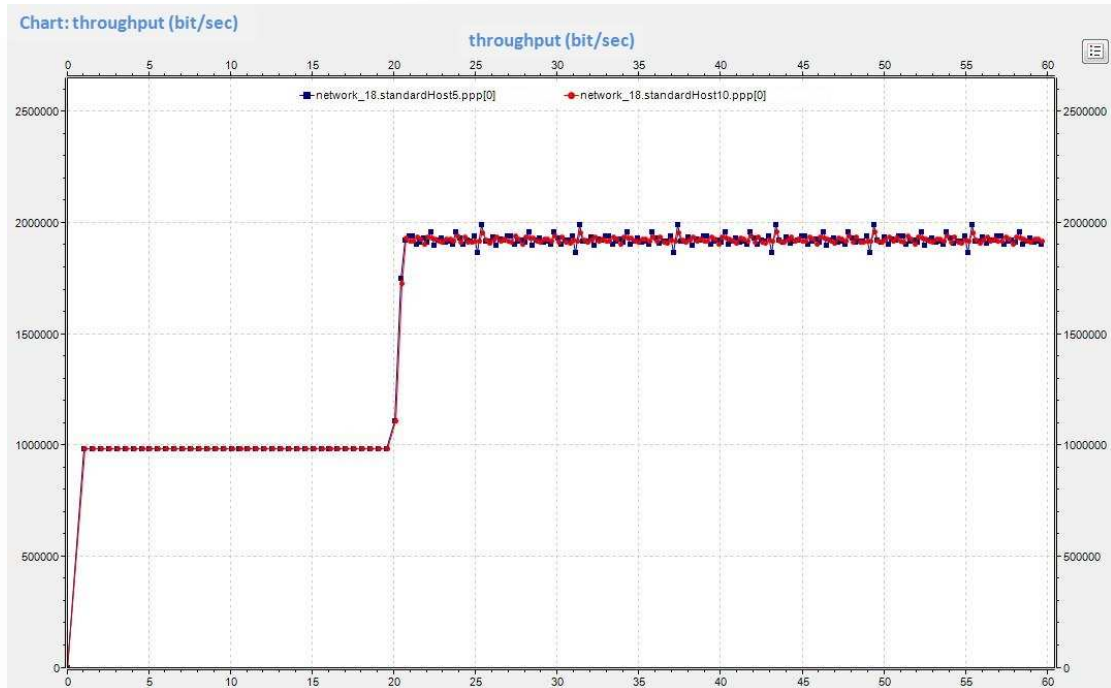


Εικόνα 67: MPLS, end to end throughput από τον host3 στον host8

Στις εικόνες 67,68,69 βλέπουμε ότι οι άλλοι 3 χρήστες δεν επηρεάζονται από τη συμφόρηση που αντιμετωπίζουν οι 2 πρώτοι.

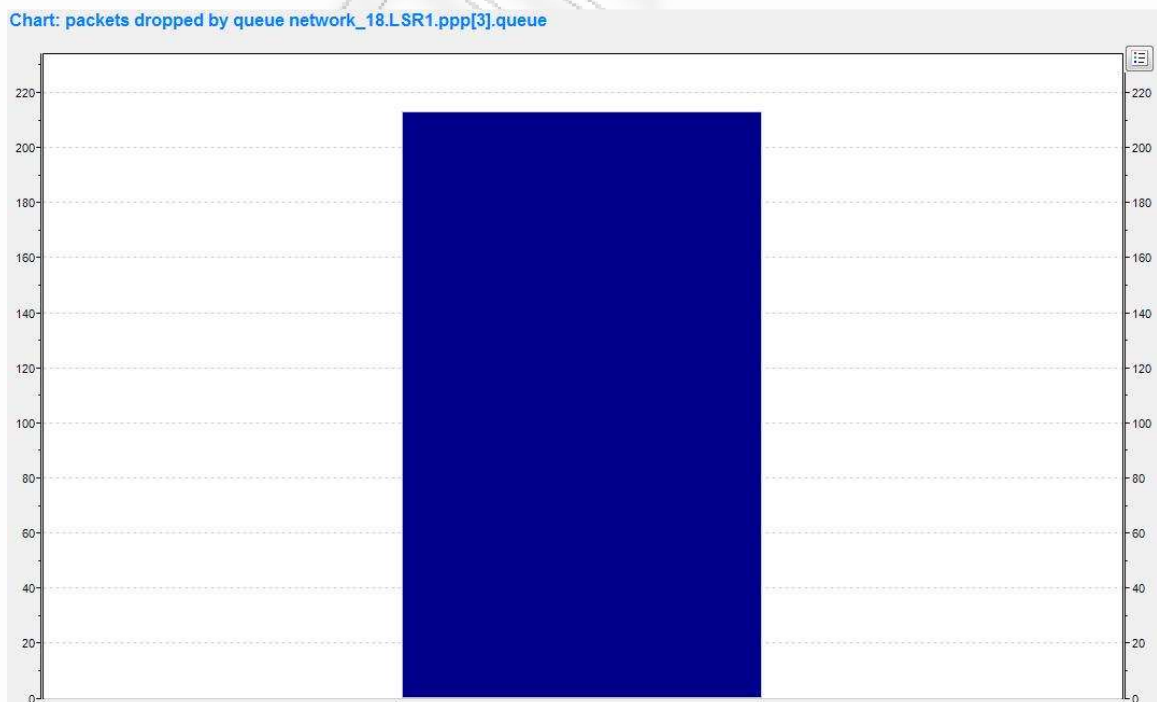


Εικόνα 68: MPLS, end to end throughput από τον host4 στον host9



Εικόνα 69: MPLS, end to end throughput από τον host5 στον host10

Στην εικόνα 70 βλέπουμε τον αριθμό των πακέτων που χάθηκαν λόγω της συμφόρησης στο δίκτυο και της μη έγκαιρης επαναδρομολόγησης. Χάθηκαν περίπου 215 πακέτα ενώ στην προηγούμενη περίπτωση είχαν χαθεί μόνο τα μισά. Όσο, δεν γίνονταν η επαναδρομολόγηση τόσο χάνονταν πακέτα.

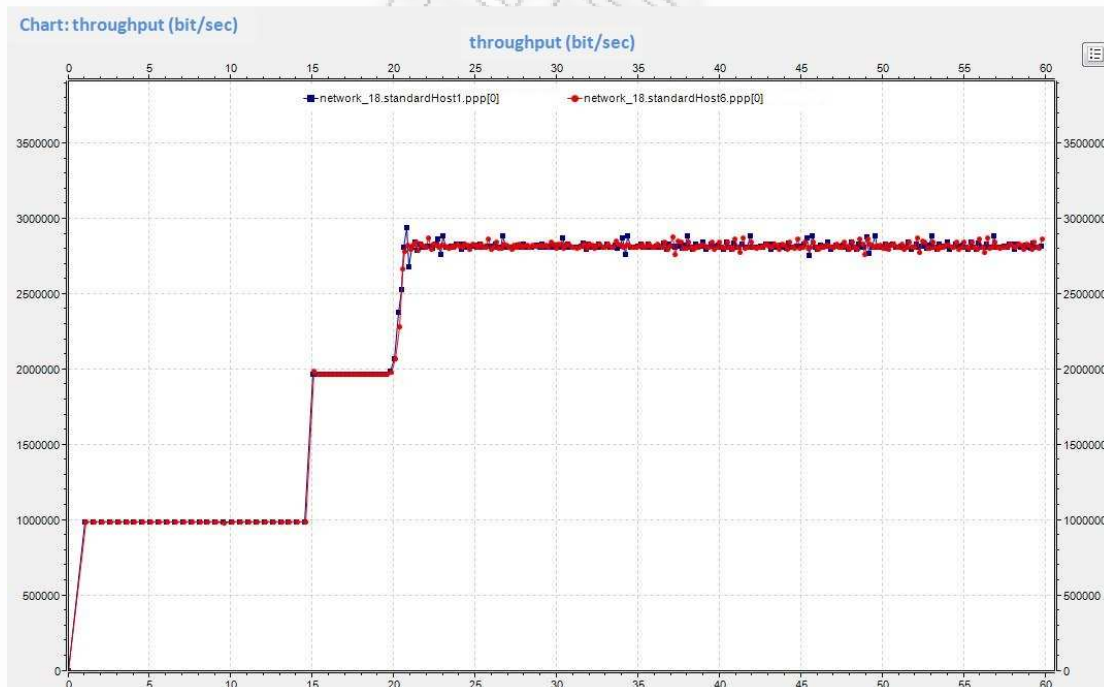


Εικόνα 70: MPLS, απώλειες πακέτων στον router1

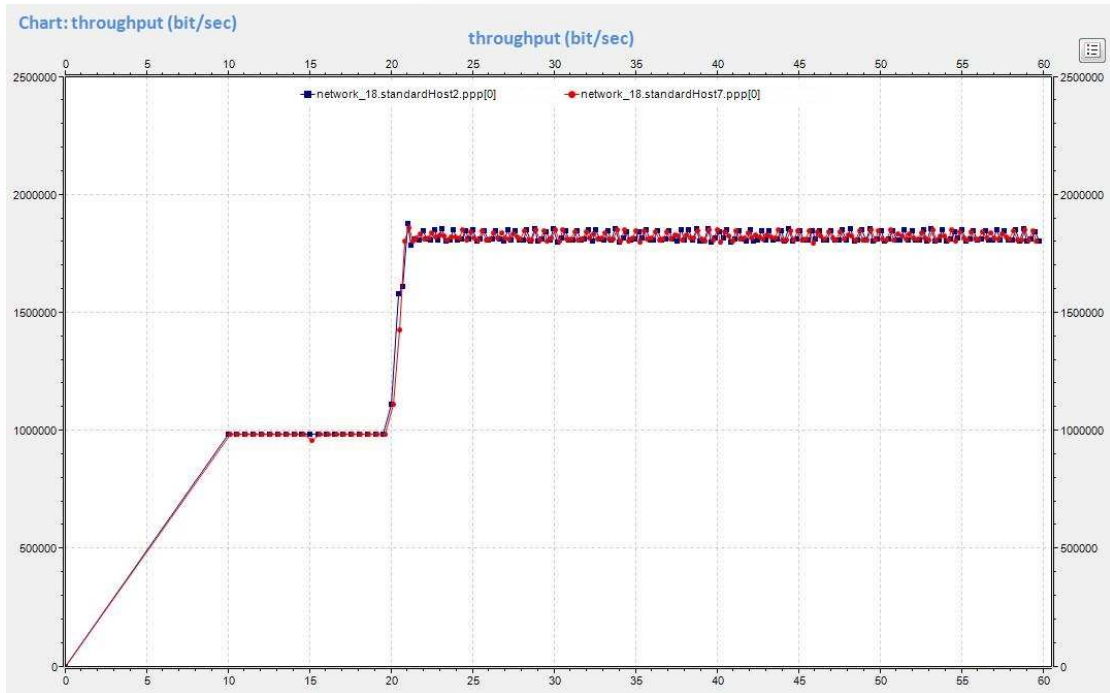
Network 18 - Επαναδρομολόγηση 15 sec (Received)						
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ		ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ		ΑΠΟΔΟΣΗ	
	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)	udp (packets)	tcp (bytes)
sH1->sH6	10378	4032000	10378	4182300	100%	96.4%
sH2->sH7	4986	3955500	4986	4067100	100%	97.3%
sH3->sH8	5889	8432000	5889	8572000	100%	98.4%
sH4->sH9	5887	4262400	5887	4463100	100%	95.5%
sH5->sH10	5889	4441500	5889	4711500	100%	94.3%

Πίνακας 10: MPLS, end to end throughput, άμεση επαναδρομολόγηση

Στην περίπτωση όμως που η επαναδρομολόγηση γίνει άμεσα στα 15sec τότε στο δίκτυο δεν θα υπάρξει πρόβλημα και θα ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των χρηστών. Αυτό φαίνεται και στον πίνακα 10 με τις μετρήσεις των πακέτων που τελικά έφτασαν στους προορισμούς. Πλέον και οι 5 έστειλαν τις πληροφορίες που ήθελαν. Στην εικόνα 71 μπορούμε να δούμε συγκεκριμένα πως ο πρώτος χρήστης έστειλε την κίνησή του στο δίκτυο, τότε ανέβασε το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και πως ταυτόχρονα αυξήθηκε και ο ρυθμός που έφταναν στον προορισμό. Η διαφορά σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις είναι εμφανής.

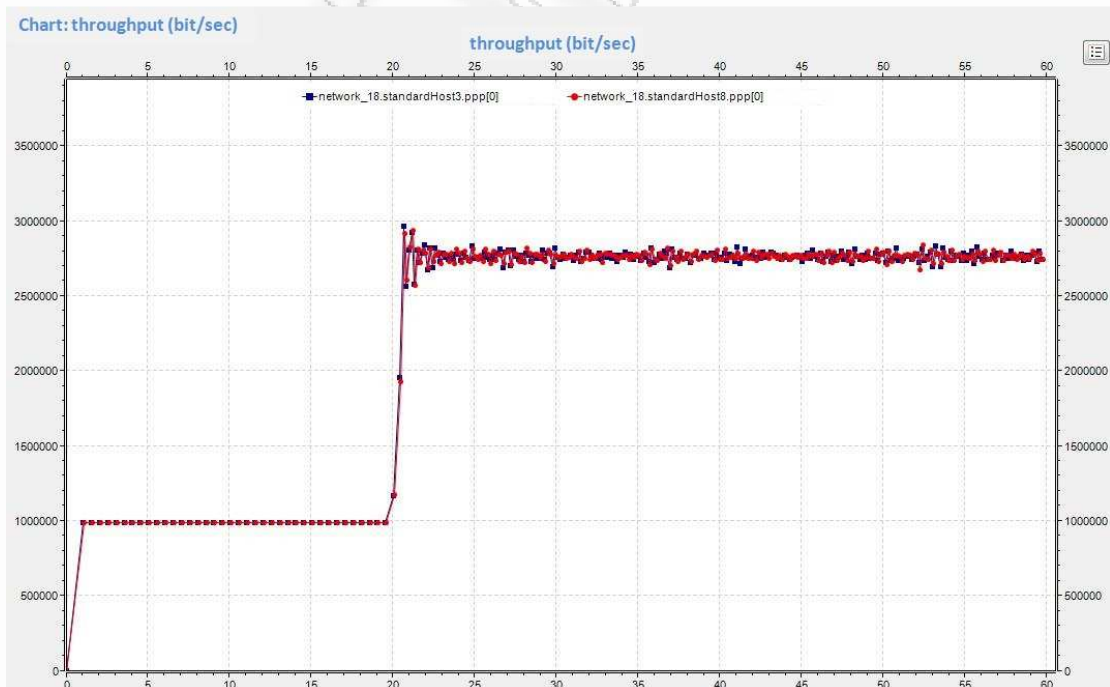


Εικόνα 71: MPLS, end to end throughput από τον host1 στον host6

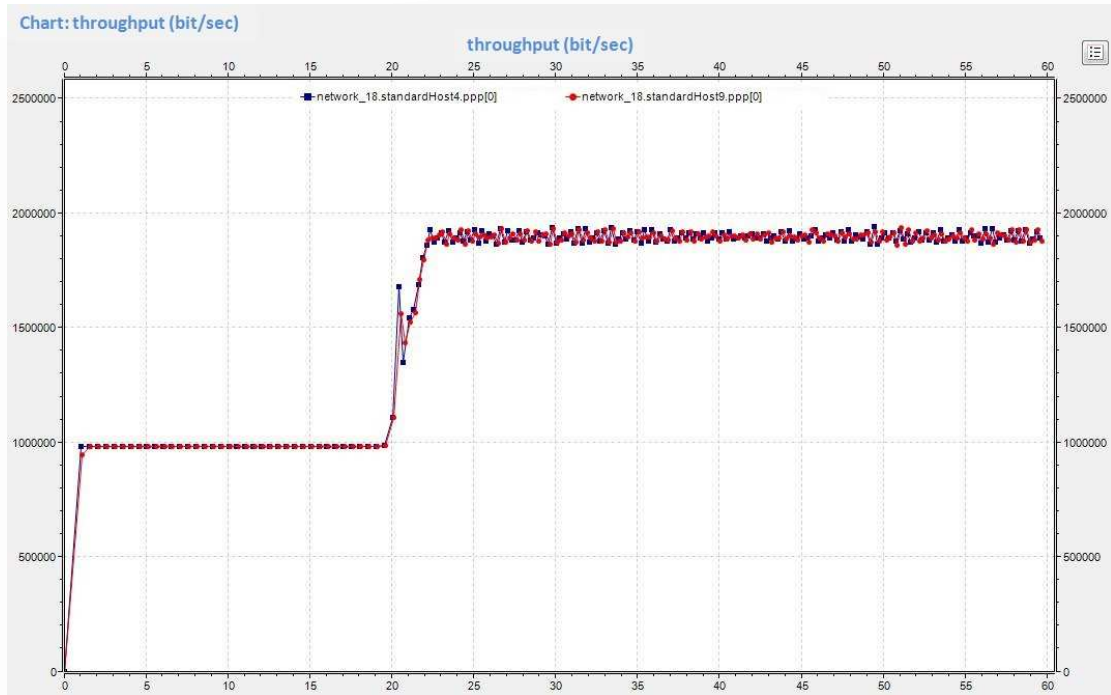


Εικόνα 72: MPLS, end to end throughput από τον host2 στον host7

Το ίδιο βλέπουμε και για τον χρήστη 2 στην εικόνα 72. Εξαιτίας της έγκαιρης επαναδρομολόγησης μπόρεσα να αυξήσει το ρυθμό μετάδοσης χωρίς να αντιμετωπίσει απώλειες πακέτων.

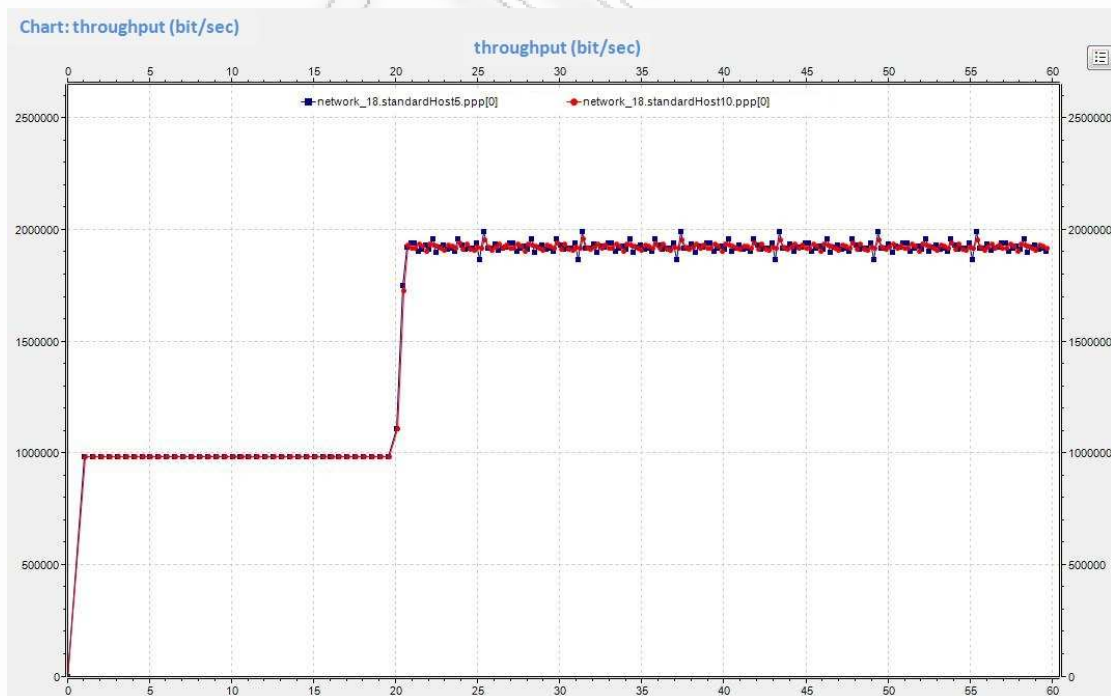


Εικόνα 73: MPLS, end to end throughput από τον host3 στον host8



Εικόνα 74: MPLS, end to end throughput από τον host4 στον host9

Στις εικόνες 73,74,75 βλέπουμε ότι και οι άλλοι 3 χρήστες μπόρεσαν να στείλουν κανονικά τα δεδομένα τους χωρίς προβλήματα. Η επαναδρομολόγηση στο μονοπάτι του δεύτερου χρήστη δεν επηρέασε τα δικά τους μονοπάτια.



Εικόνα 75: MPLS, end to end throughput από τον host5 στον host10



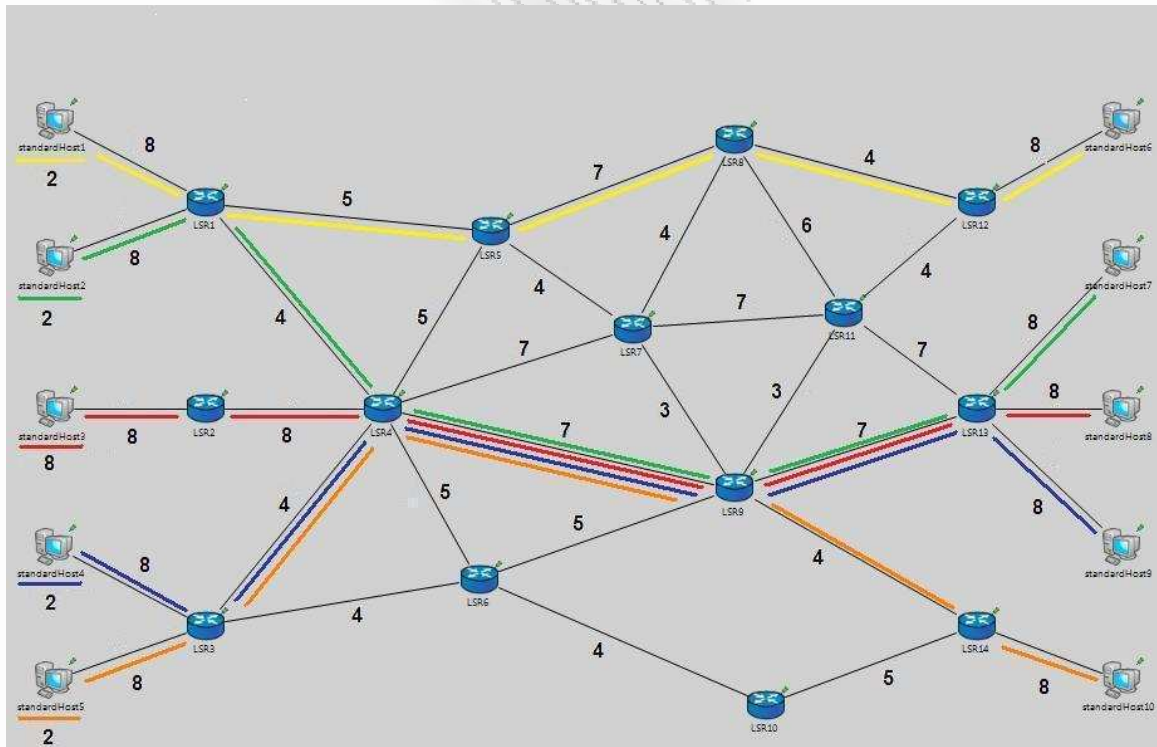
Εικόνα 76: MPLS, απώλειες πακέτων στον router1

Στην εικόνα 76 βλέπουμε ότι πλέον δεν χάθηκε ούτε ένα πακέτο στον δρομολογητή 1. Σε αντίθεση με τα 215 και τα 107 πακέτα που είχαν χαθεί τις πρώτες φορές. Συμπερασματικά, από αυτές τις προσομοιώσεις φάνηκε ότι το να φτιαχτούν κάποια στιγμή σωστά μονοπάτια για να μοιράσουν την κίνηση στο δίκτυο και να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των χρηστών δεν σημαίνει ότι δεν θα προκύψει κάποιο πρόβλημα συμφόρησης. Το βέλτιστο θα είναι να υπάρχει παρακολούθηση (monitoring) στην κυκλοφορία στο δίκτυο και να εξασφαλίζεται ότι ο χρήστης έχει την απόδοση που έχει ζητήσει, με όσες παρεμβάσεις/διορθώσεις στη δρομολόγηση χρειάζονται.

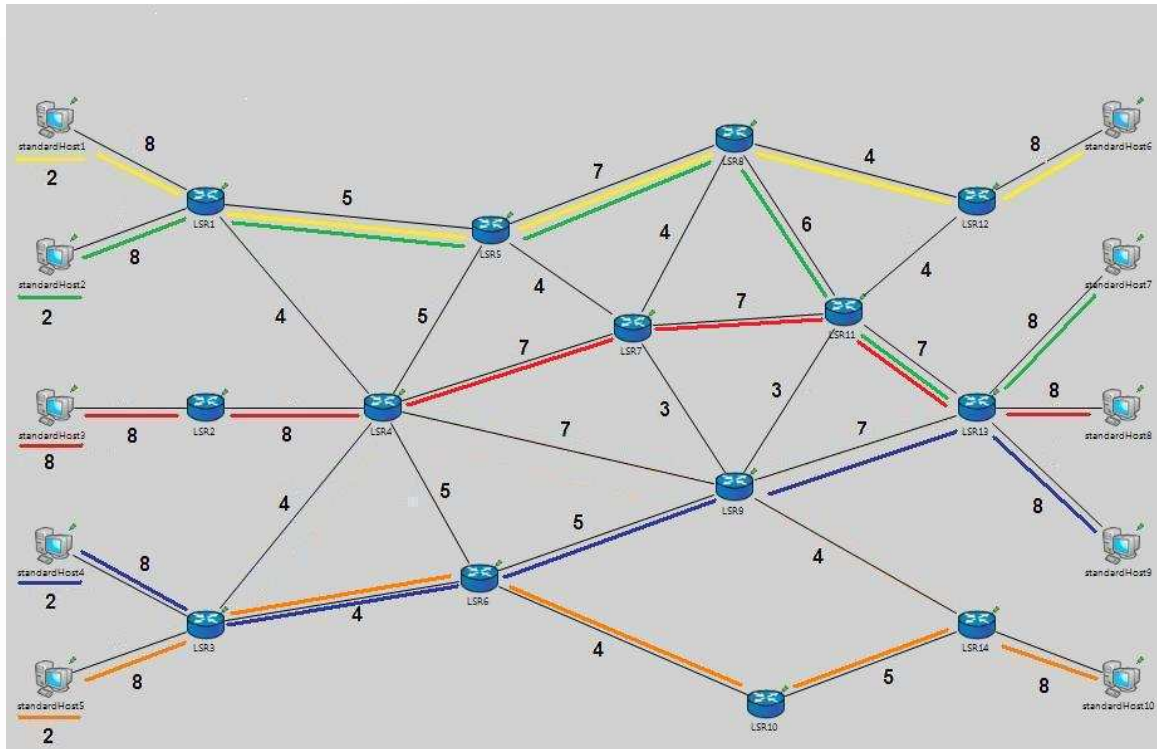
Κεφάλαιο 10: Rerouting

10.1 Σενάριο 1 (OSPF - rerouting)

Στην επόμενη προσομοίωση το πρωτόκολλο αντιλαμβάνεται ότι με βάση τις ρυθμίσεις δρομολόγησης που υπάρχουν στο δίκτυο, δεν μπορεί να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των χρηστών. Για το λόγο αυτό προβαίνει σε επαναδρομολόγηση, επιλέγοντας να μην στέλνει την κίνηση από τα βέλτιστα μονοπάτια αλλά από εναλλακτικές διαδρομές. Αυτά μπορεί να έχουν μεγαλύτερο κόστος από πλευράς βάρους, όμως δεν χρησιμοποιούνται και αυτό επιτρέπει στα πακέτα να φτάσουν στον προορισμό τους χωρίς απώλειες. Στην εικόνα 77 βλέπουμε πως είναι αρχικά οι διαδρομές που ακολουθούν τα πακέτα. Λόγω του OSPF έχουν επιλεγθεί τα συντομότερα μονοπάτια. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να υπάρξει συμφόρηση στη σύνδεση μεταξύ των δρομολογητών 4 και 9.



Εικόνα 77: OSPF, paths before rerouting



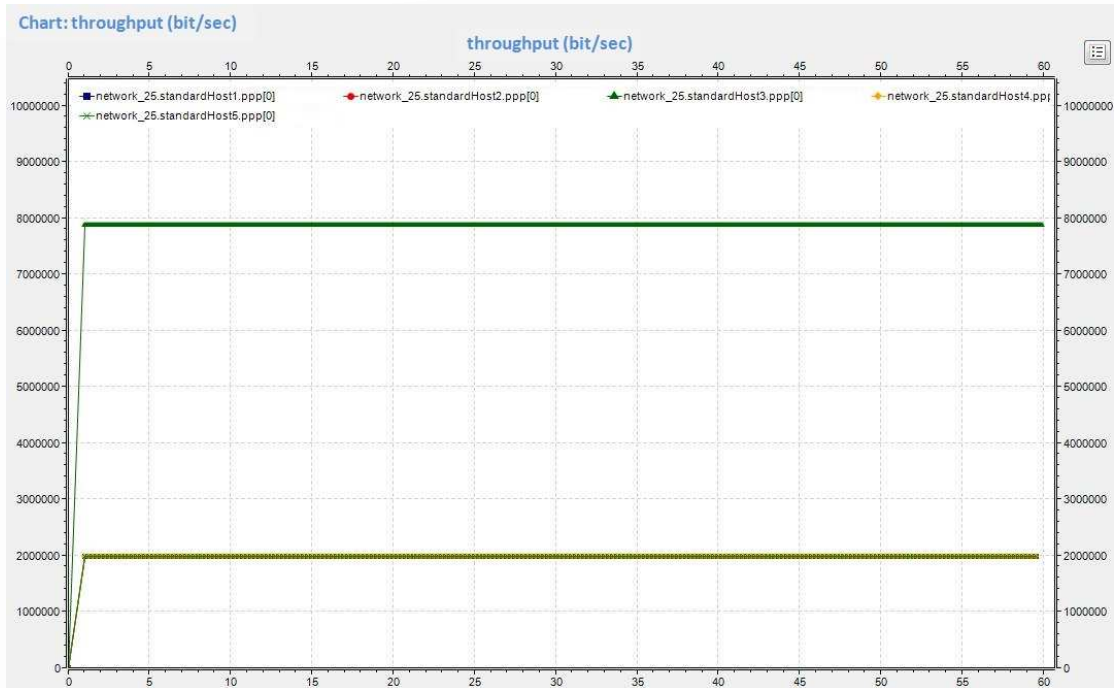
Εικόνα 78: OSPF, paths after rerouting

Στην εικόνα 78 βλέπουμε ποιες διαδρομές θα ακολουθήσουν τα πακέτα στο δίκτυο μετά την επαναδρομολόγηση. Πλέον, τα μονοπάτια που επιλέγονται δεν είναι τα βέλτιστα αλλά η διαθέσιμη χωρητικότητα τους είναι αρκετή για να εξυπηρετήσει την κίνηση. Εξαίρεση αποτελεί η σύνδεση μεταξύ του δρομολογητή 11 και 13. Εκεί, η κίνηση από τον χρήστη 2 θα αντιμετωπίσει συμφόρηση εξαιτίας της κίνησης από τον χρήστη 3 που είναι αρκετά μεγάλη. Όπως βλέπουμε το πρόβλημα δεν είναι εύκολο να αντιμετωπιστεί. Σε αυτήν την περίπτωση η λύση θα μπορούσε να δοθεί με το σπάσιμο της μεγάλης ροής από τον χρήστη 3 σε 2 μικρότερες. Αυτό θα το δούμε σε επόμενες προσομοιώσεις. Στον πίνακα 11 βλέπουμε τις μετρήσεις για τα πακέτα που έφτασαν στους προορισμούς. Για τους 3 χρήστες, με εξαίρεση μόνο τον δεύτερο και τον τρίτο χρήστη που δεν μπορούσε να γίνει αλλιώς, η επαναδρομολόγηση βοήθησε για να στείλουν όλη την πληροφορία που ήθελαν.

Network 25 (OSPF - rerouting)			
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ (packets)	ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ (packets)	ΑΠΟΔΟΣΗ
sH1->sH6	11778	11779	99.99%
sH2->sH7	6736	11779	57.19%
sH3->sH8*	34618	41640	83.14%
sH4->sH9	11718	11779	99.48%
sH5->sH10	11422	11779	96.97%

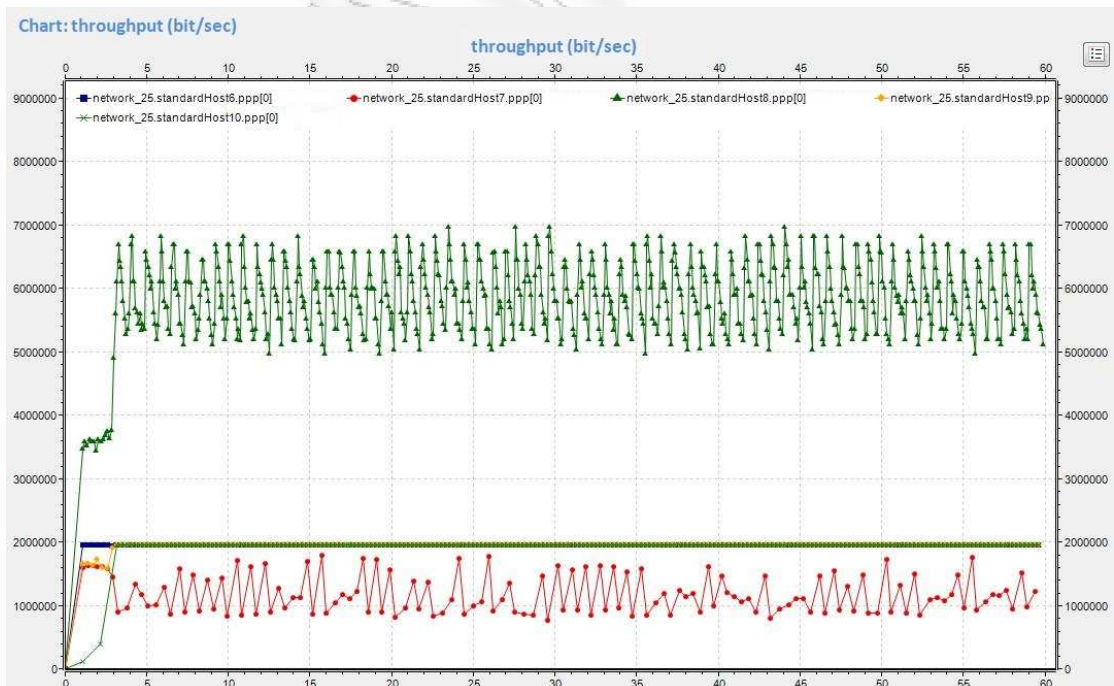
Πίνακας 11: OSPF, end to end throughput, rerouting

*Μέχρι 7Mbps



Εικόνα 79: OSPF, rerouting, source throughput

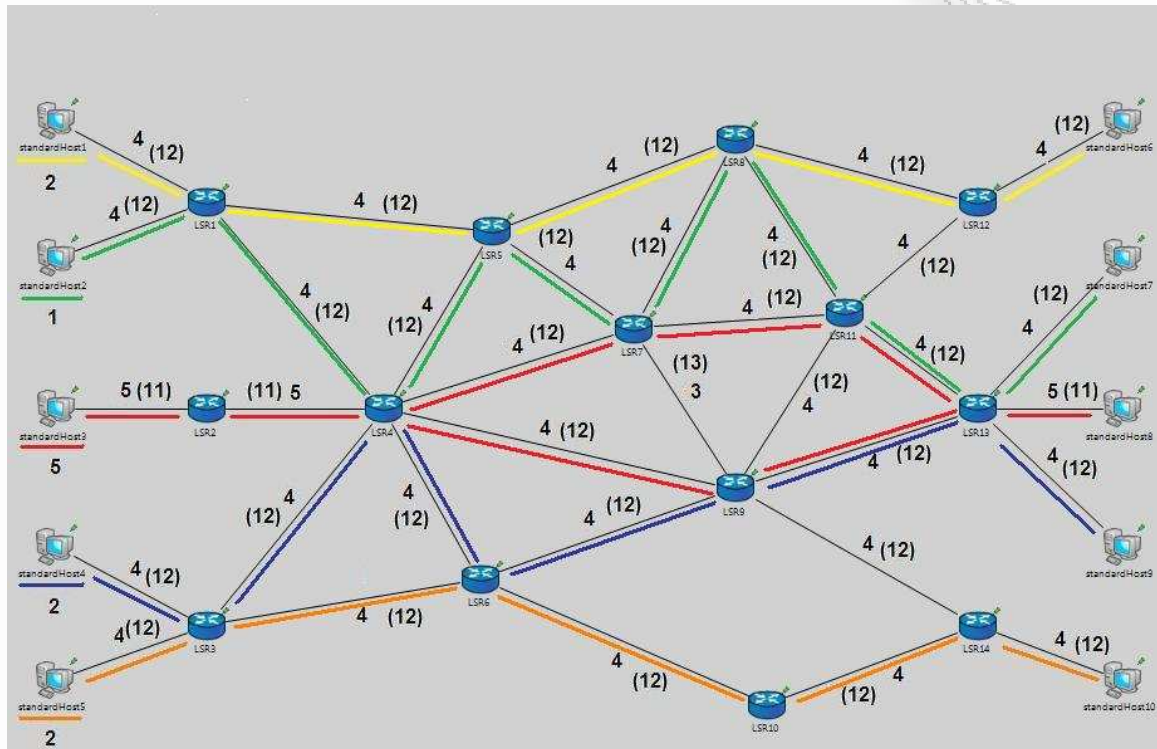
Στις εικόνες 79 και 80 βλέπουμε πως η επαναδρομολόγηση που έγινε στα πρώτα δευτερόλεπτα βοήθησε να βελτιωθεί η απόδοση στο δίκτυο. Ξεκίνησε η προσομοίωση και στους προορισμούς έφταναν πακέτα με ρυθμό 9 Mbps αθροιστικά, ενώ μετά την επαναδρομολόγηση τα πακέτα έφταναν με συνολικό ρυθμό 13Mbps αθροιστικά. Βελτίωση σχεδόν 50%.



Εικόνα 80: OSPF, rerouting, destination throughput

Κεφάλαιο 11: Load Balancing

11.1 Σενάριο 1 (load balancing - UDP)



Εικόνα 81: Load Balancing, UDP flows

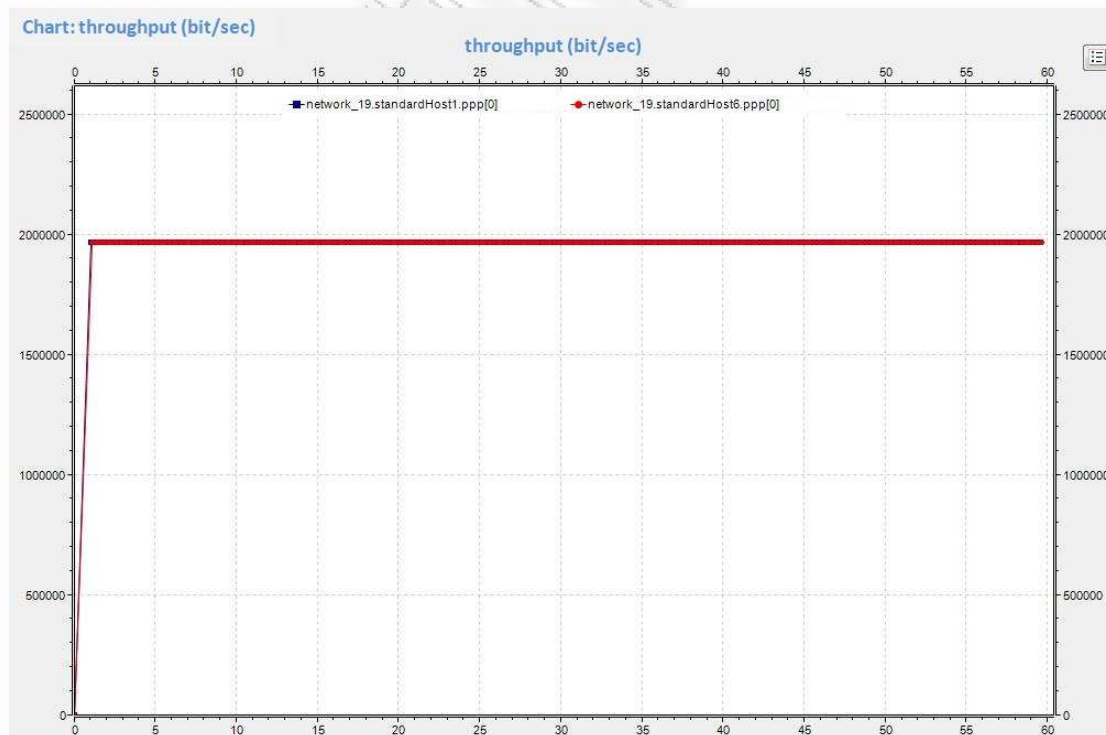
Όπως είδαμε στην τελευταία προσομοίωση, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η δημιουργία μόνο ξεχωριστών μονοπατιών δεν μπορεί να διορθώσει όλα τα προβλήματα. Μερικές φορές θα πρέπει να γίνεται και διαχωρισμός της ίδιας ροής. Σε αυτή την προσομοίωση προσπαθούμε να μοιράσουμε την κίνηση στο δίκτυο σε πολλά διαφορετικά μεταξύ τους paths, ώστε να μην υπάρχουν links πολύ φορτωμένα ενώ κάποια άλλα δεν χρησιμοποιούνται. Οι ροές αφορούν τη μετάδοση ενός video (video streaming) με udp πακέτα με σταθερό ρυθμό μετάδοσης (Constant Bit Rate). Σε χρόνο 1 sec ξεκινάνε και οι 5 μεταδόσεις με ρυθμό 2Mbps, 1Mbps, 5Mbps, 2Mbps, 2Mbps αντίστοιχα. Για τις κίτρινη, πράσινη, μπλε, πορτοκαλί ροές χρησιμοποιούμε strict paths του mpls. Η κόκκινη ροή είναι 5Mbps ενώ όλα τα links μεταξύ LSR4 και LSR13 είναι 4Mbps. Επομένως ακόμα και αν δημιουργηθεί μονοπάτι(tunnel) αποκλειστικά για αυτή τη ροή και πάλι το δίκτυο δεν μπορεί να εξασφαλίσει τους απαραίτητους πόρους για το χρήστη. Για αυτή τη ροή θα χρησιμοποιήσουμε multipath. Στον LSR4 θα πραγματοποιείται ο διαχωρισμός της ροής σε 2 μονοπάτια. Ο διαχωρισμός γίνεται αξιολογώντας και την υπόλοιπη κίνηση στο δίκτυο. Επειδή στα links LSR11-LSR13 και LSR9-LSR13 υποχρεωτικά περνάνε

η πράσινη και η μπλε ροή, ο διαχωρισμός πρέπει να προσαρμοστεί σε αυτά τα δεδομένα και να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να μην προκληθεί συμφόρηση. Επομένως, το 60%(3Mbps) των πακέτων θα προωθούνται προς το μονοπάτι LSR4 – LSR7 – LSR11 – LSR13 και το 40%(2Mbps) θα προωθούνται προς το μονοπάτι LSR4 – LSR9 – LSR13. Στον πίνακα που ακολουθεί υπάρχει ο αριθμός των πακέτων για κάθε ροή που τελικά έφτασαν στον προορισμό, ο θεωρητικά βέλτιστος αριθμός που μπορεί να φτάσει και η απόδοση που είχε κάθε ροή. Βλέπουμε ότι ο συνδυασμός της χρησιμοποίησης mpls μονοπατιών με το σπάσιμο μίας ροής σε μικρότερες, είχε ως αποτέλεσμα την αξιοποίηση των ανεκμετάλλευτων πόρων του δικτύου και τη μεγιστοποίηση της απόδοσης.

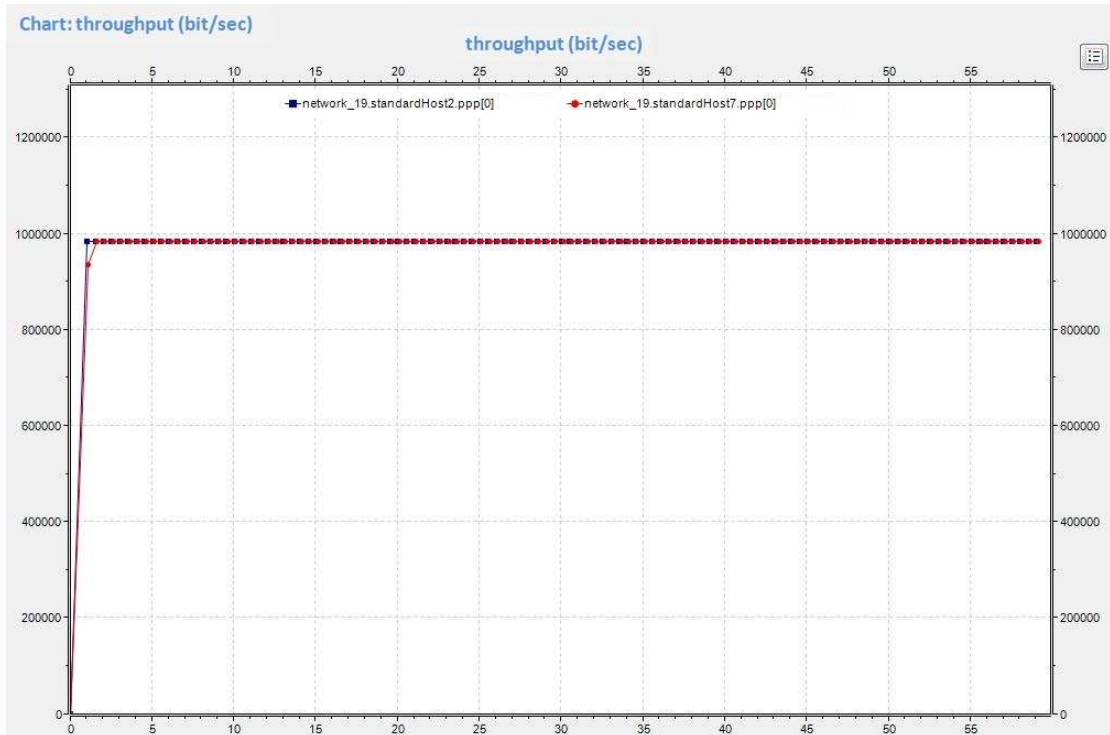
Network 19 (Load Balancing- Multipath : YES)			
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ	ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ	ΑΠΟΔΟΣΗ
	udp (packets)	udp (packets)	udp (packets)
sH1->sH6	11778	11778	100%
sH2->sH7	5885	5885	100%
sH3->sH8	29440	29446*	99.99%
sH4->sH9	11775	11775	100%
sH5->sH10	11778	11778	100%

Πίνακας 12: Load Balancing, UDP flows

* Αν στο δίκτυο υπήρχαν συνδέσεις 5 Mbps ώστε να δημιουργηθεί αποκλειστικό path που θα εξυπηρετούσε όλη την κίνηση της κόκκινης ροής.

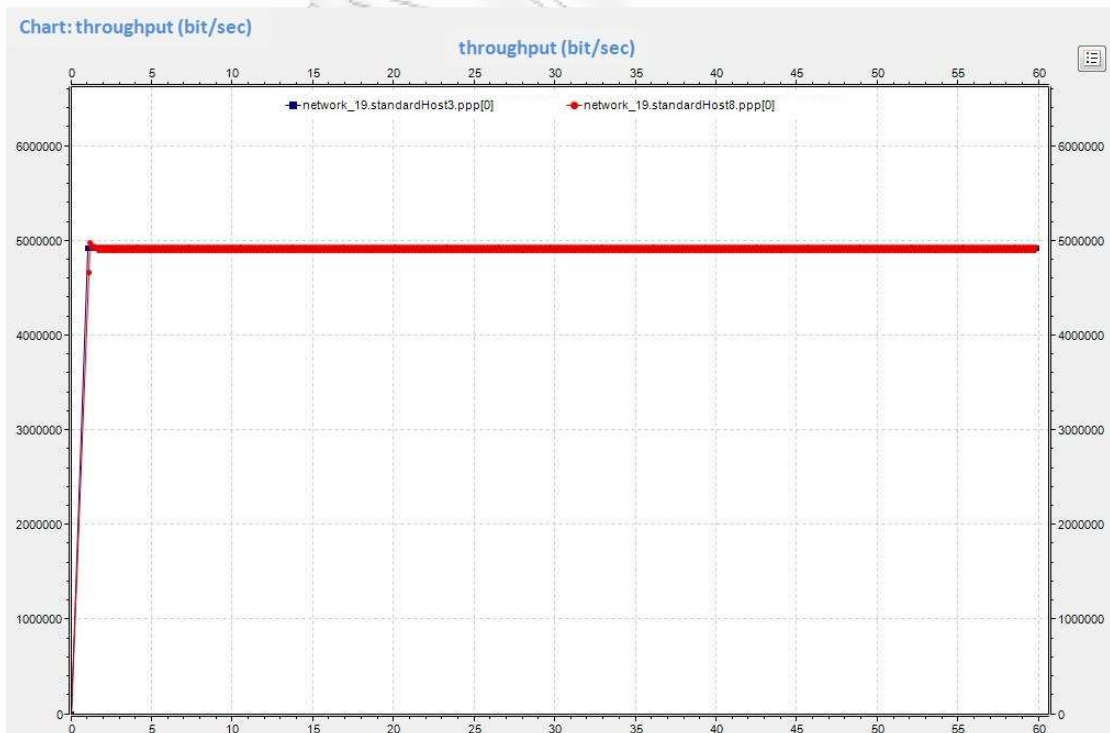


Εικόνα 82: Load Balancing, end to end throughput από τον host1 στον host6

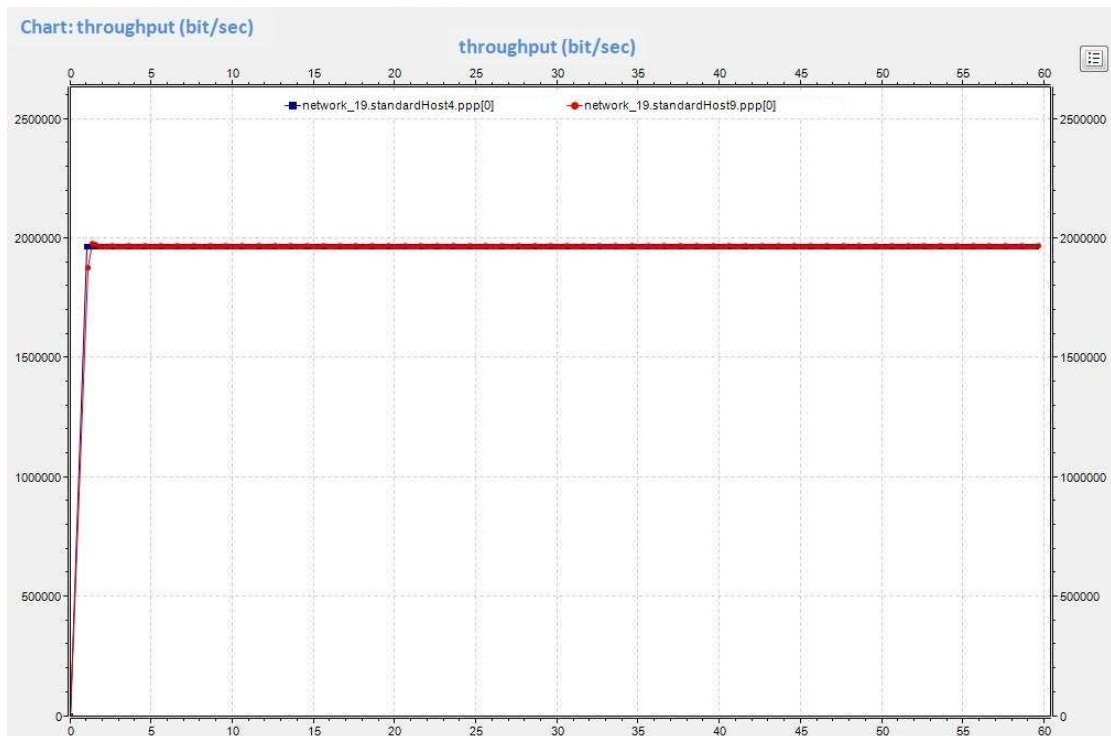


Εικόνα 83: Load Balancing, end to end throughput από τον host2 στον host7

Στις εικόνες 82-86 βλέπουμε το end to end throughput για τους 5 χρήστες. Όπως φαίνεται και οι 5 είχαν την ποιότητα υπηρεσιών που ζήτησαν και μπόρεσαν να στείλουν τα δεδομένα τους με πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, χωρίς να υπάρχουν απώλειες.

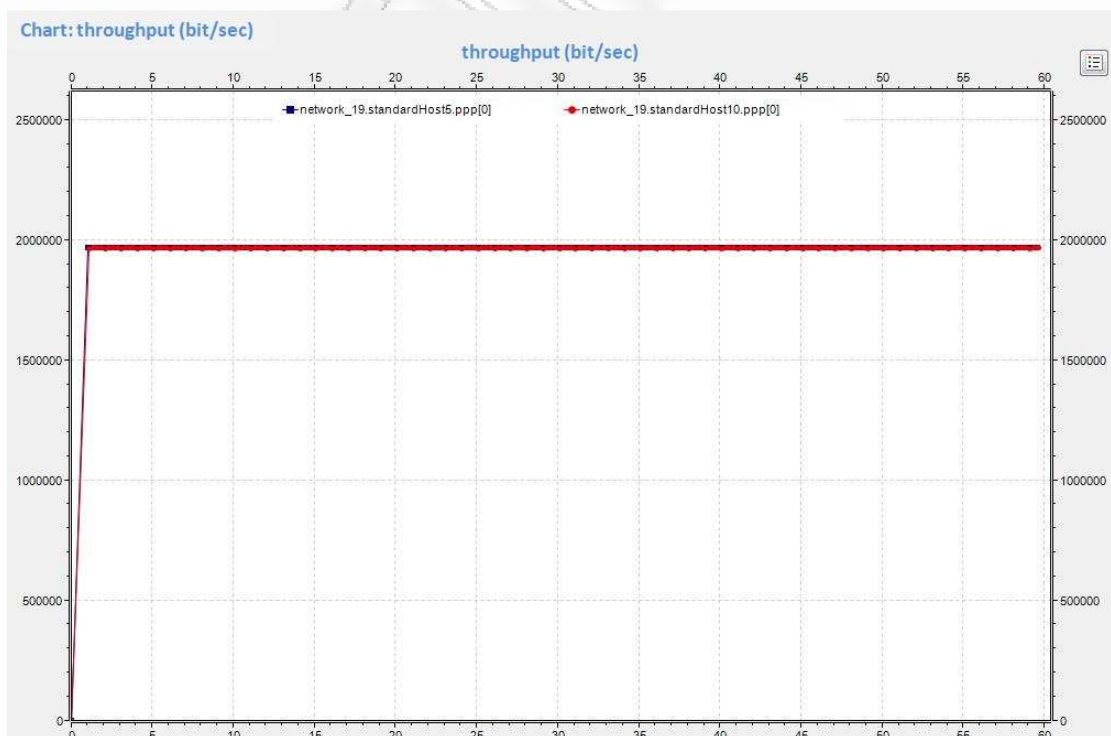


Εικόνα 84: Load Balancing, end to end throughput από τον host3 στον host8



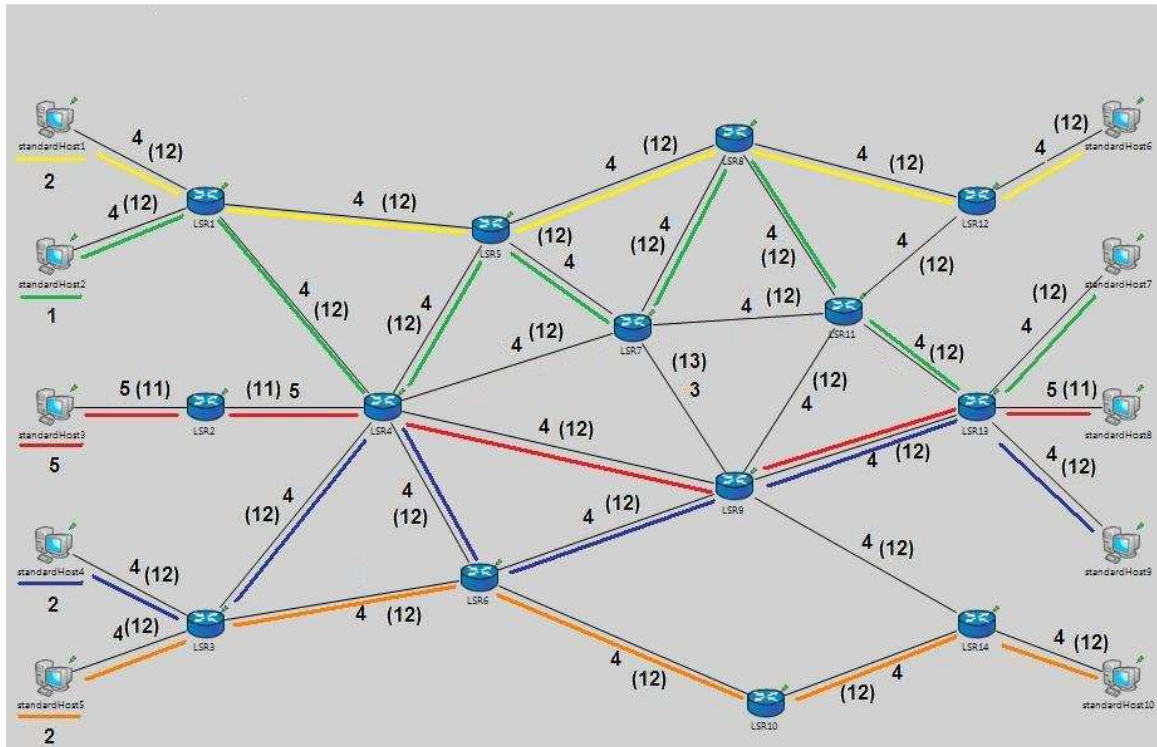
Εικόνα 85: Load Balancing, end to end throughput από τον host4 στον host9

Η χρησιμοποίηση, λοιπόν, των διαφορετικών τεχνικών διαχείρισης της κίνησης, επέτρεψε στο διαχειριστή του δικτύου να ρυθμίσει κατάλληλα το δίκτυο χωρίς κάποιο ιδιαίτερο κόστος.



Εικόνα 86: Load Balancing, end to end throughput από τον host5 στον host10

Χωρίς Multipath



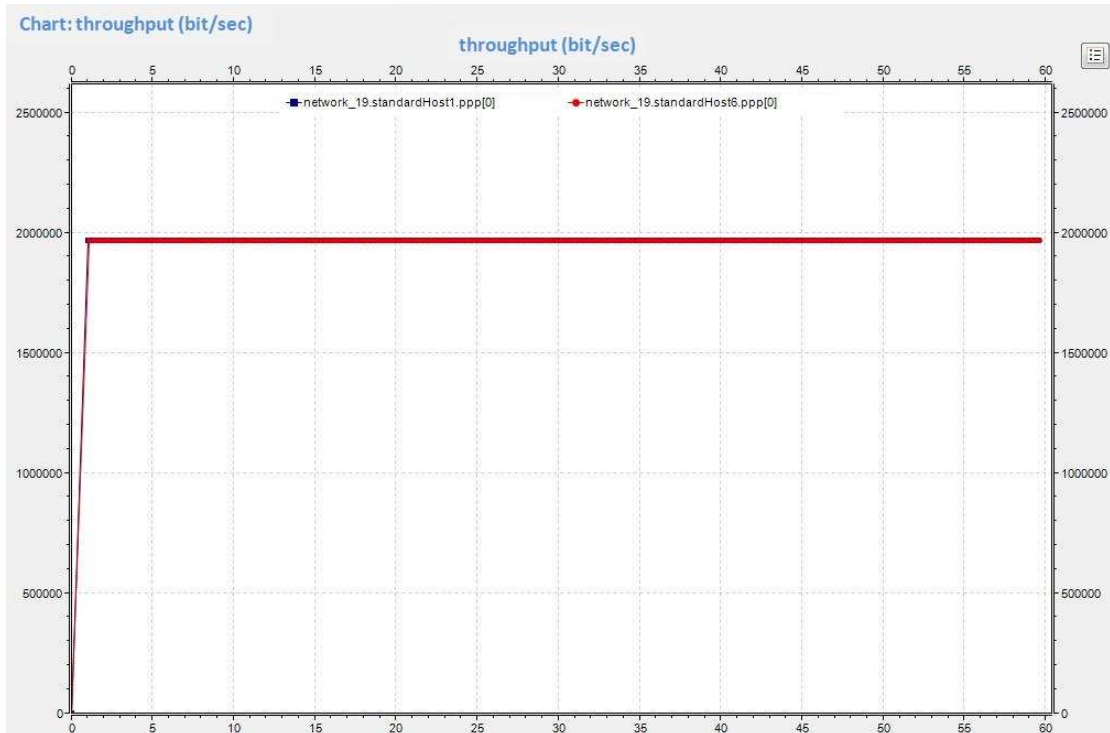
Εικόνα 87: No Load Balancing, UDP flows

Είδαμε πριν ότι η αντιμετώπιση μίας πολύ απαιτητικής ροής, μπορεί να γίνει με το σπάσιμο αυτής σε μικρότερες. Εδώ θα δούμε τι θα γίνονταν στο δίκτυο, αν δεν είχαμε χρησιμοποιήσει αυτήν την τεχνική. Χωρίς να χρησιμοποιηθεί multipath, το δίκτυο δεν έχει τους πόρους για να δημιουργήσει μονοπάτι 5Mbps, οπότε αναπόφευκτα ο χρήστης 3 δεν θα εξυπηρετηθεί στο επίπεδο που θα επιθυμούσε. Επιπρόσθετα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 87 στη σύνδεση LSR9-LSR13 θα δημιουργηθεί συμφόρηση. Στον πίνακα 13 βλέπουμε αυτήν την πτώση στην απόδοση στο δίκτυο. Ο τρίτος χρήστης μπόρεσε να στείλει μόνο το 42% των δεδομένων που ήθελε, ποσοστό ιδιαίτερα χαμηλό.

Network 19 (Load Balancing – Multipath : NO)			
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ	ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ	ΑΠΟΔΟΣΗ
	udp (packets)	udp (packets)	udp (packets)
sH1->sH6	11778	11778	100%
sH2->sH7	5849	5885	99.38%
sH3->sH8	12397	29446*	42.1%
sH4->sH9	11592	11775	98.44%
sH5->sH10	11778	11778	100%

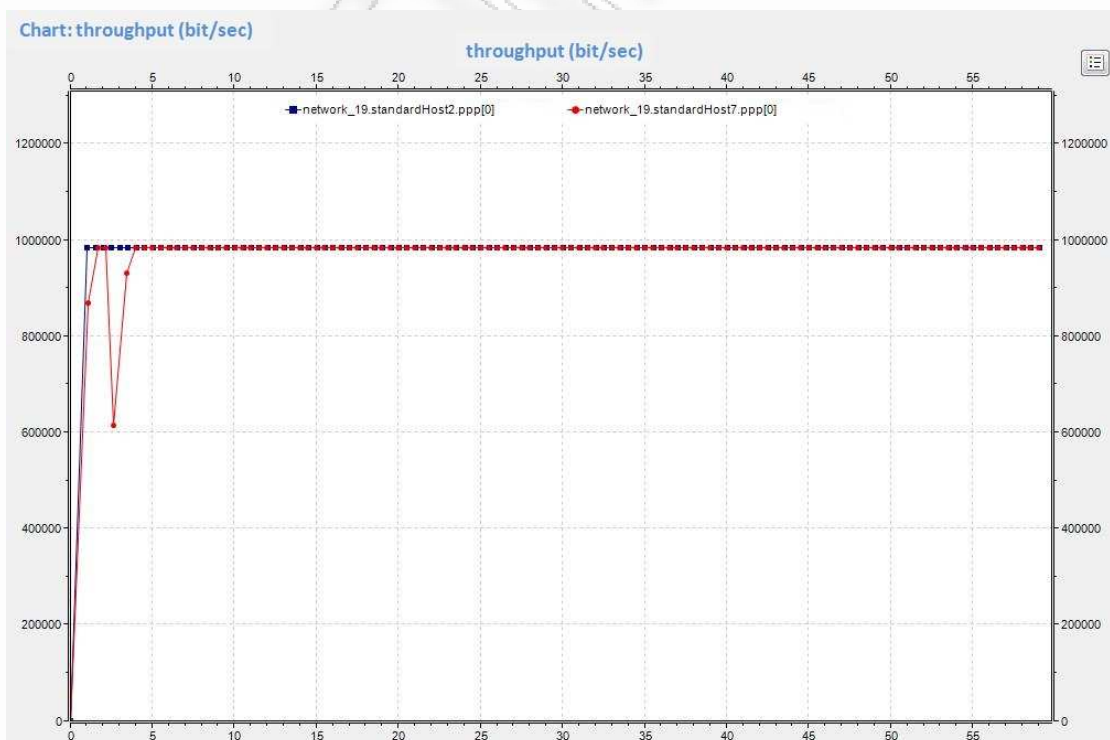
Πίνακας 13: No Load Balancing, UDP flows

* Αν στο δίκτυο υπήρχαν συνδέσεις 5 Mbps ώστε να δημιουργηθεί αποκλειστικό path που θα εξυπηρετούσε όλη την κίνηση της κόκκινης ροής.

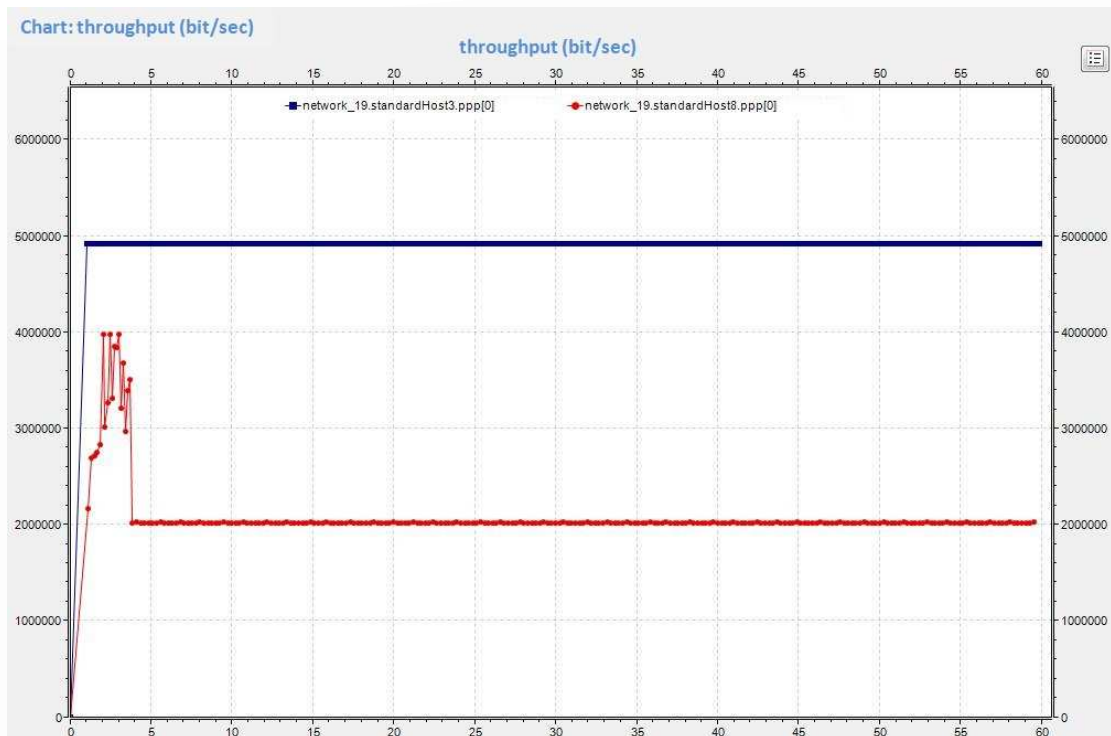


Εικόνα 88: No Load Balancing, end to end throughput από τον host1 στον host6

Στις εικόνες 88 και 89 βλέπουμε τις μετρήσεις για τους 2 πρώτους χρήστες, οι οποίοι δεν αντιμετώπισαν προβλήματα στη μετάδοση των δεδομένων τους.

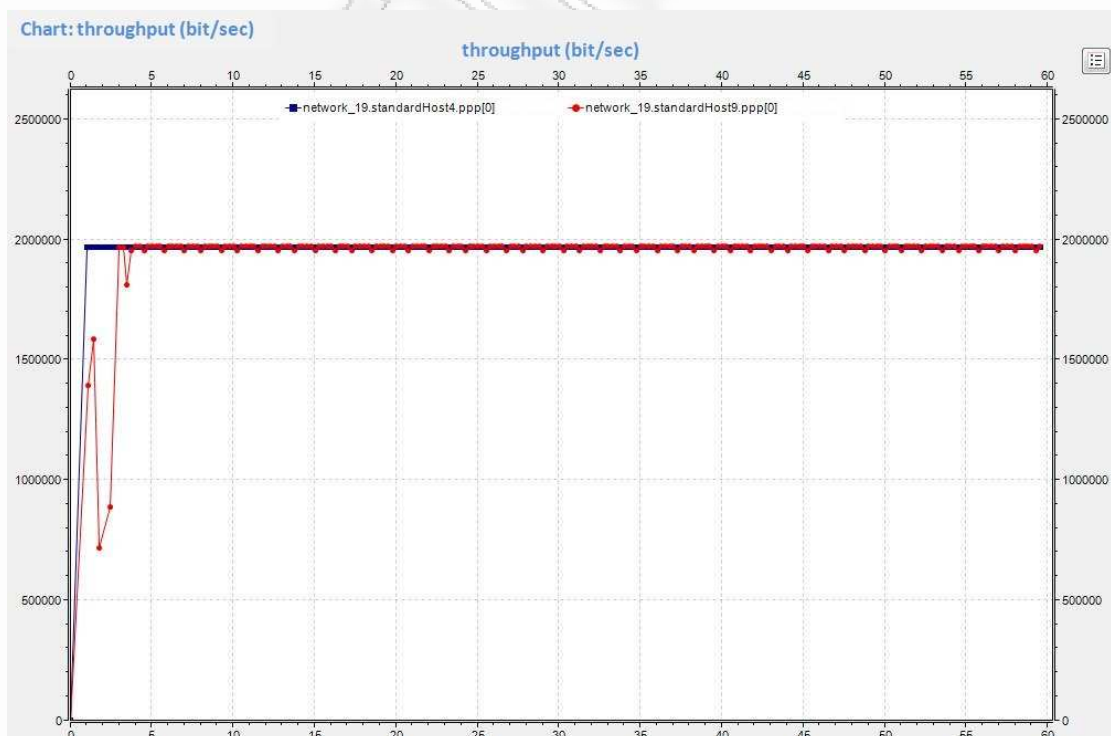


Εικόνα 89: No Load Balancing, end to end throughput από τον host2 στον host7

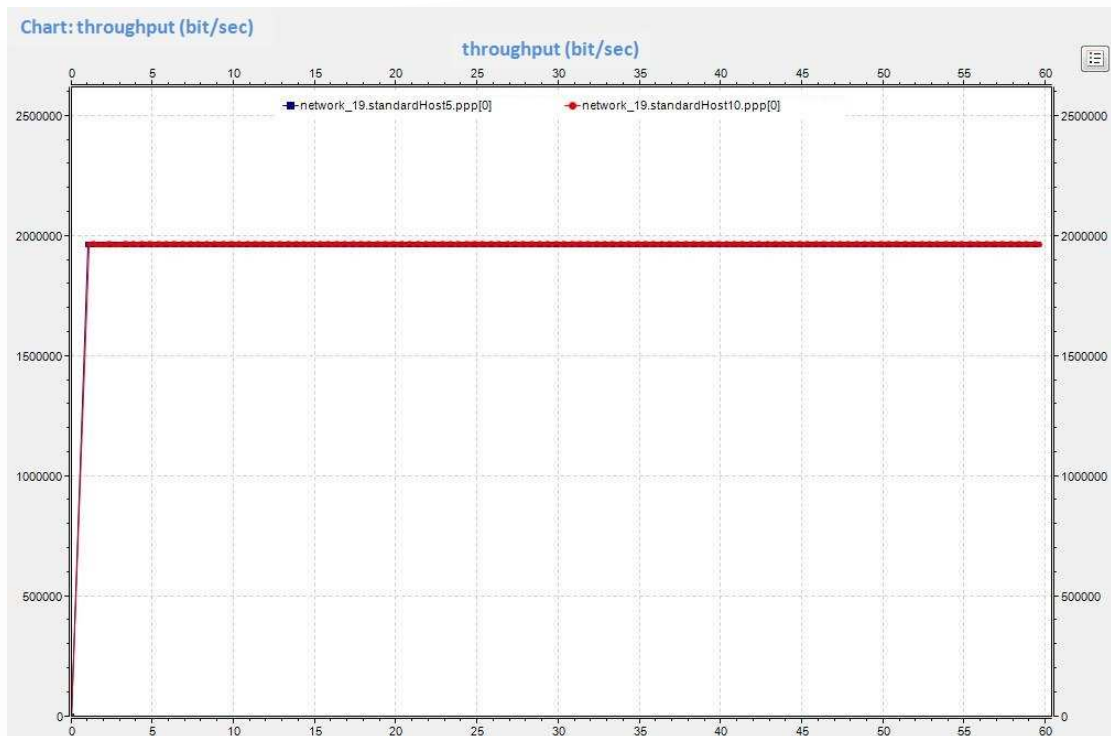


Εικόνα 90: No Load Balancing, end to end throughput από τον host3 στον host8

Στην εικόνα 90 βλέπουμε ότι ο χρήστης 3 ενώ βάζει στο δίκτυο φορτίο με ρυθμό 5Mbps, η κίνηση που φτάνει στον προορισμό είναι μόνο 2 Mbps. Δηλαδή, το 60% της πληροφορίας χάνεται λόγω συμφόρησης.



Εικόνα 91: No Load Balancing, end to end throughput από τον host4 στον host9



Εικόνα 92: No Load Balancing, end to end throughput από τον host5 στον host10

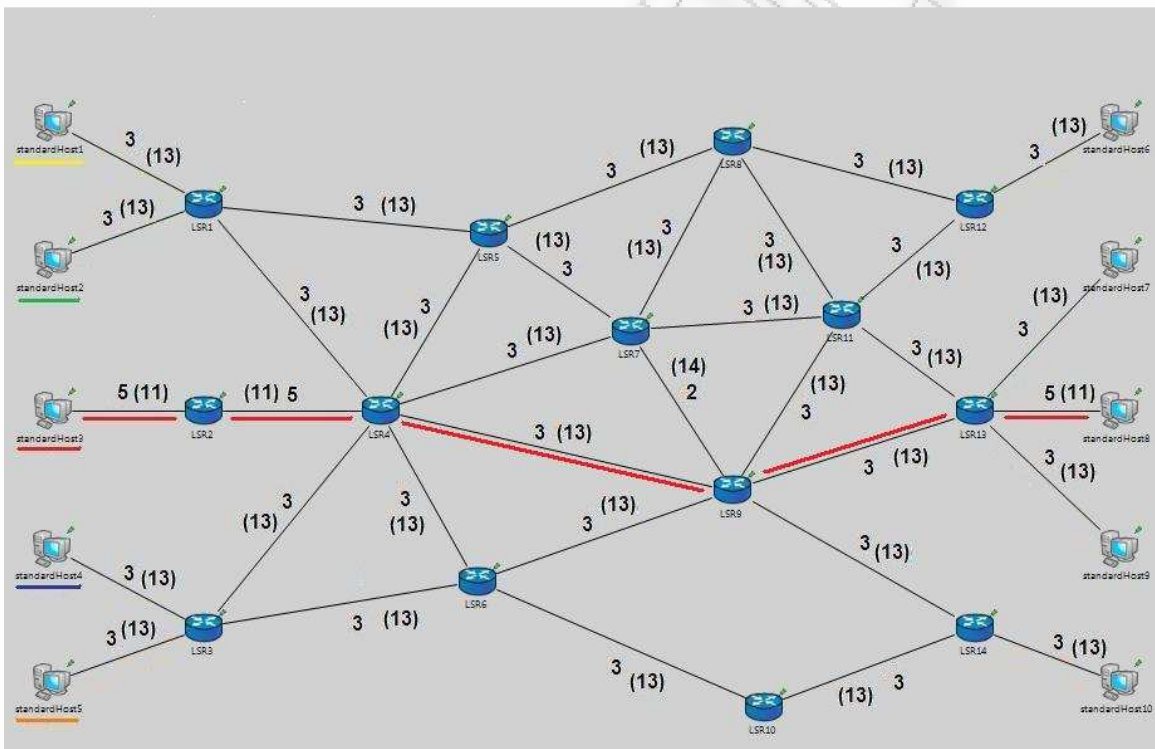
Στις εικόνες 91 και 92 βλέπουμε τις αντίστοιχες μετρήσεις για τους χρήστες 4 και 5, οι οποίοι δεν αντιμετώπισαν προβλήματα.

Συμπερασματικά σε αυτήν την προσομοίωση, δείξαμε ότι η τεχνική του σπασίματος μίας ροής είναι αναπόφευκτη για να αντιμετωπιστούν πολύ απαιτητικές ροές, οι οποίες καλύπτουν τους πόρους του δικτύου. Όσο προσεκτικά και αν επιλεχθούν τα μονοπάτια στο δίκτυο για να μοιράσουν την κίνηση, δεν θα μπορέσουν να ικανοποιήσουν μία ροή που υπερβαίνει τη χωρητικότητα των συνδέσεων.

11.2 Σενάριο 2 (load balancing - TCP)

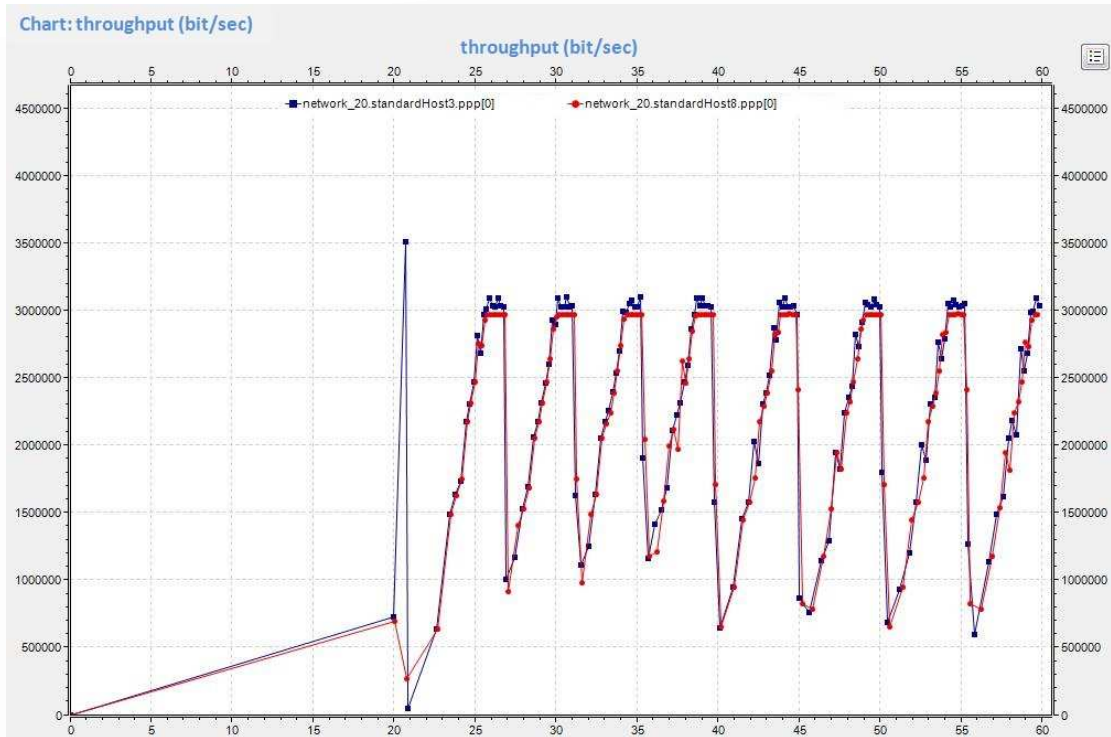
Προσομοίωση 1

Στην προηγούμενη περίπτωση μελετήσαμε το σπάσιμο μίας udp ροής. Σε περίπτωση tcp σύνδεσης, εξαιτίας της πολυπλοκότητας του πρωτοκόλλου τα πράγματα είναι πιο πολύπλοκα. Για το λόγο αυτό, σε αυτό το σενάριο θα δούμε τι συμβαίνει όταν σπάμε μία tcp ροή. Για να είναι πιο ξεκάθαρο, στο δίκτυο δεν θα υπάρχει άλλη κίνηση. Έτσι, στην εικόνα 93 βλέπουμε το δίκτυο και τον τρίτο χρήστη που επιθυμεί να στείλει τα δεδομένα του με περίπου 4Mbps ρυθμό.



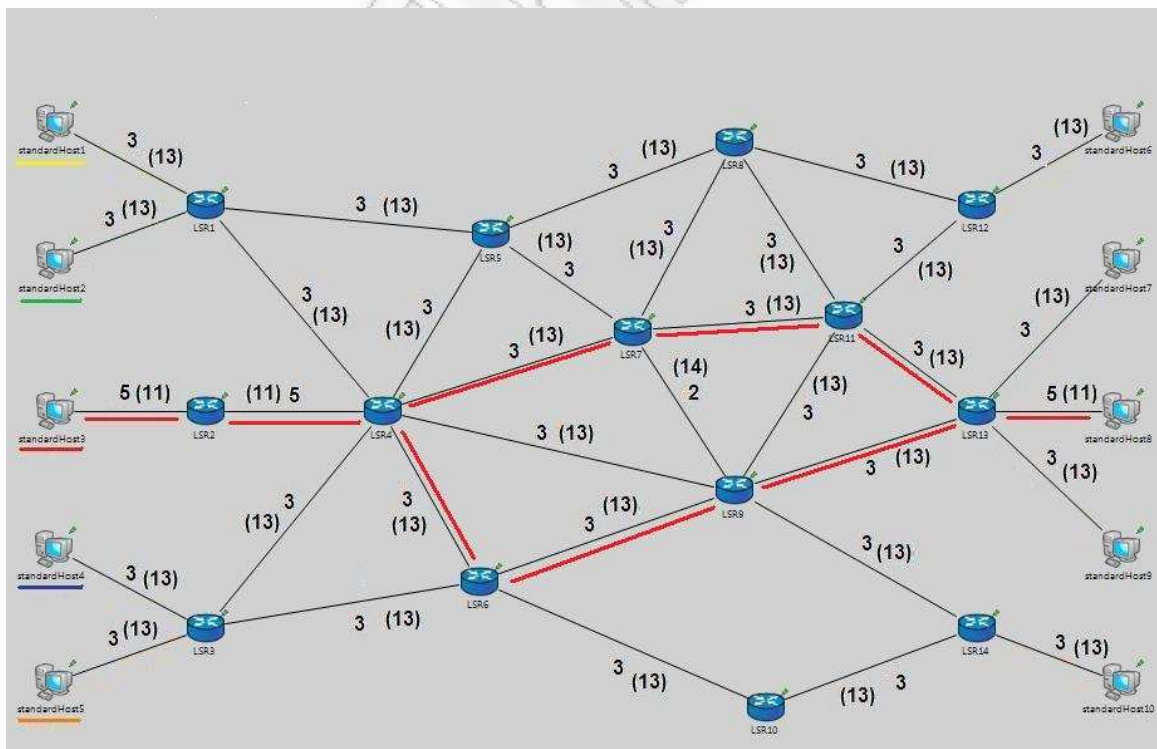
Εικόνα 93: No Load Balancing, tcp flow

Στην εικόνα 94 που ακολουθεί βλέπουμε τη λειτουργία του πρωτοκόλλου για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Στέλνονται τα πακέτα και όσο λαμβάνονται σωστά οι επιβεβαιώσεις, ο ρυθμός αυξάνεται. Αναπόφευκτα, όμως, αφού ο χρήστης προσπαθεί να στείλει 4Mbps από συνδέσεις 3Mbps θα δει ότι πακέτα χάνονται. Οι απώλειες αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα να μην επιστρέφουν οι επιβεβαιώσεις όπως θα έπρεπε και το πρωτόκολλο να μειώνει το ρυθμό, ως μία προσπάθεια αντιμετώπισης της συμφόρησης.



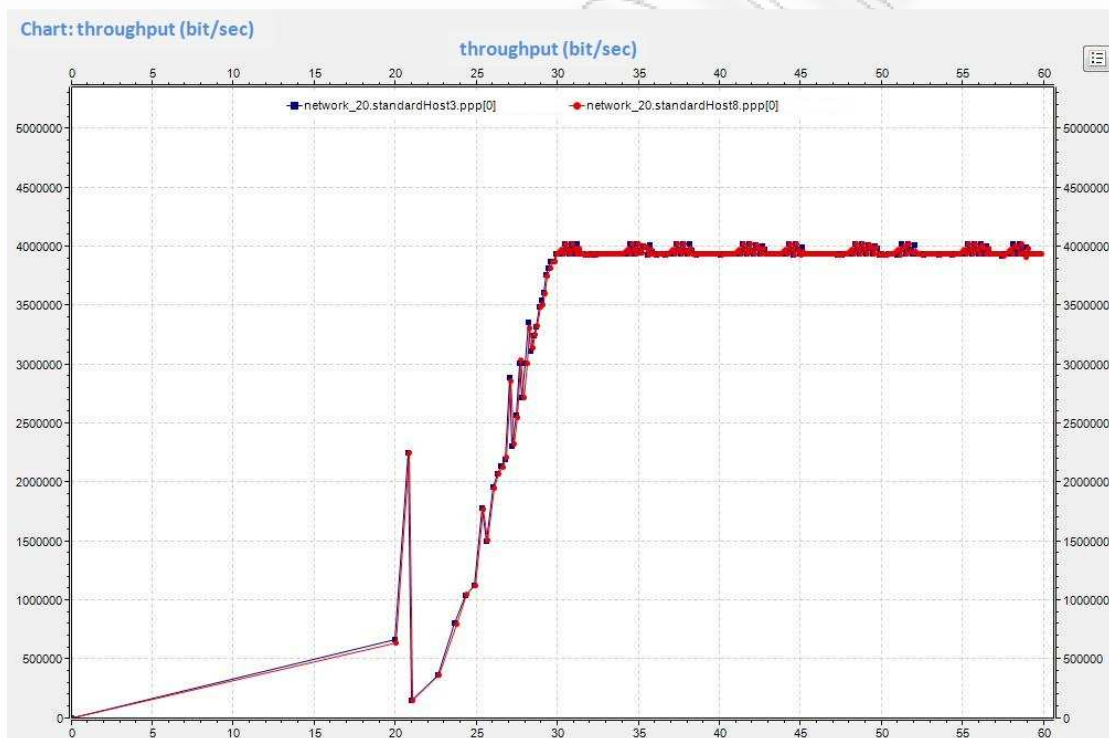
Εικόνα 94: No Load Balancing, tcp flow, end to end throughput

Προσομοίωση 2 (Multipath)



Εικόνα 95: Load Balancing (paths with equal end to end delay), tcp flow

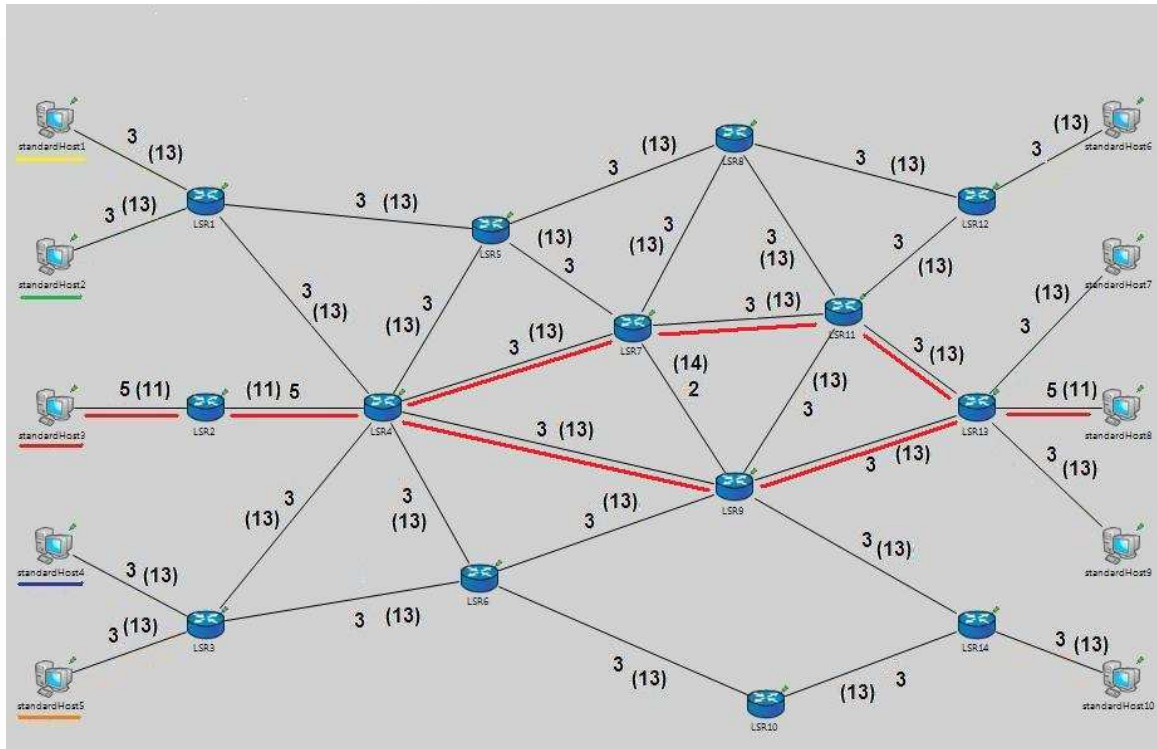
Για να βελτιώσουμε την απόδοση στο δίκτυο και για να εξυπηρετηθεί η απαίτηση για 4Mbps από συνδέσεις μέχρι 3Mbps είναι λογικό ότι θα πρέπει να σπάσουμε αυτή τη ροή σε μικρότερες. Αυτό στην περίπτωση των udp ροών μπορεί να γίνει εύκολα χωρίς να χρειάζεται κάποια μέριμνα για το σε ποια μονοπάτια θα σπάσει η ροή. Στην περίπτωση όμως των tcp συνδέσεων, δεν γίνεται τόσο εύκολα. Σε αυτήν την προσομοίωση, θα δείξουμε μία επιτυχημένη προσπάθεια διαχωρισμού της κίνησης σε 2 μονοπάτια (εικόνα 95). Όπως βλέπουμε και στην εικόνα 96, εξαιτίας αυτής της τεχνικής μπορέσαμε να μοιράσουμε την κίνηση και αυτή πλέον να μπορεί να εξυπηρετηθεί από τους πόρους του δικτύου. Για αυτό, από ένα σημείο και μετά ο χρήστης στέλνει τα πακέτα του με σταθερό ρυθμό 4Mbps. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι ο χρήστης στέλνει με ρυθμό 4Mbps, όταν οι συνδέσεις μεταξύ ingress και egress δρομολογητών είναι μέχρι 3 Mbps.



Εικόνα 96: Load Balancing (paths with equal end to end delay), tcp flow, end to end throughput

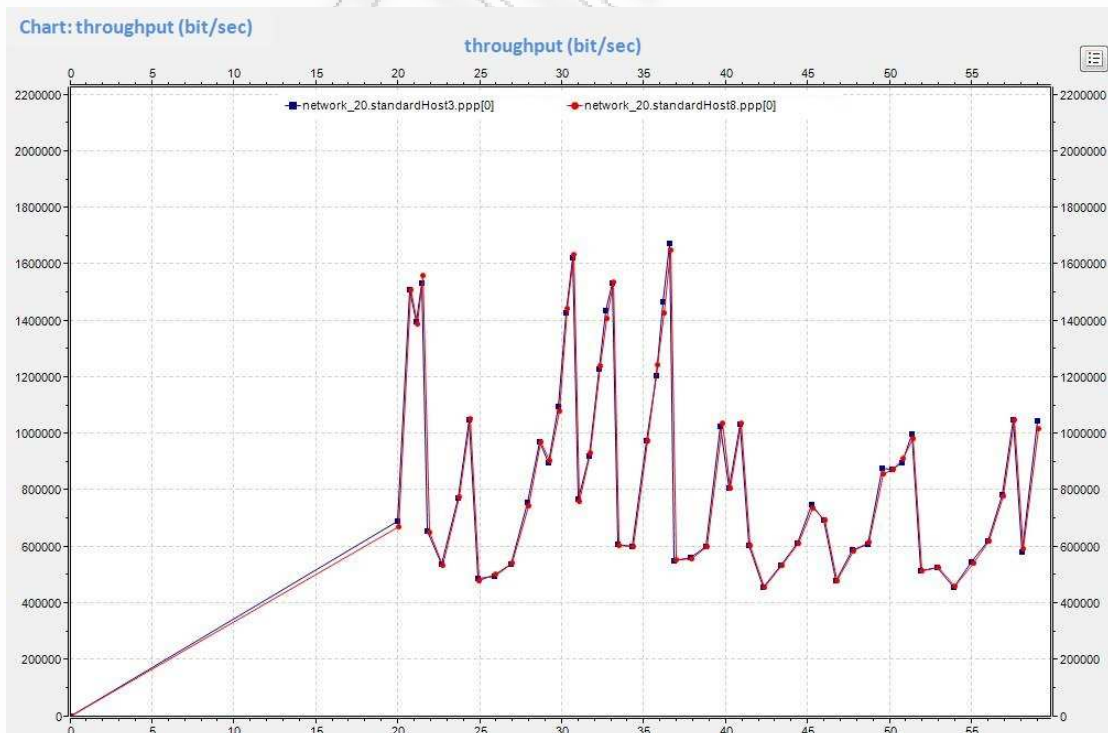
Προσομοίωση 3 (Multipath)

Στην εικόνα 97 δείχνουμε μελετάμε πάλι το σπάσιμο της tcp ροής αλλά αυτή τη φορά δεν είναι ίδια τα μονοπάτια. Όπως θα δούμε στην εικόνα 98 η απόδοση είναι πολύ χαμηλή και ο ρυθμός μετάδοσης των πακέτων αυξάνεται λίγο και αμέσως μειώνεται. Προφανώς, ο λόγος δεν μπορεί να είναι η απώλεια πακέτων, αφού έχουμε μοιράσει το φορτίο σε 2 ξεχωριστά μονοπάτια όπως και πριν.



Εικόνα 97: Load Balancing (paths with not equal end to end delay), tcp flow

Ο λόγος που έχουμε τη χαμηλή απόδοση που φαίνεται στην εικόνα 98 είναι οι χαμένες επιβεβαιώσεις και μάλιστα πιο συγκεκριμένα οι επιβεβαιώσεις που λαμβάνονται με λανθασμένη σειρά.



Εικόνα 98: Load Balancing (paths with not equal end to end delay), tcp flow, end to end throughput

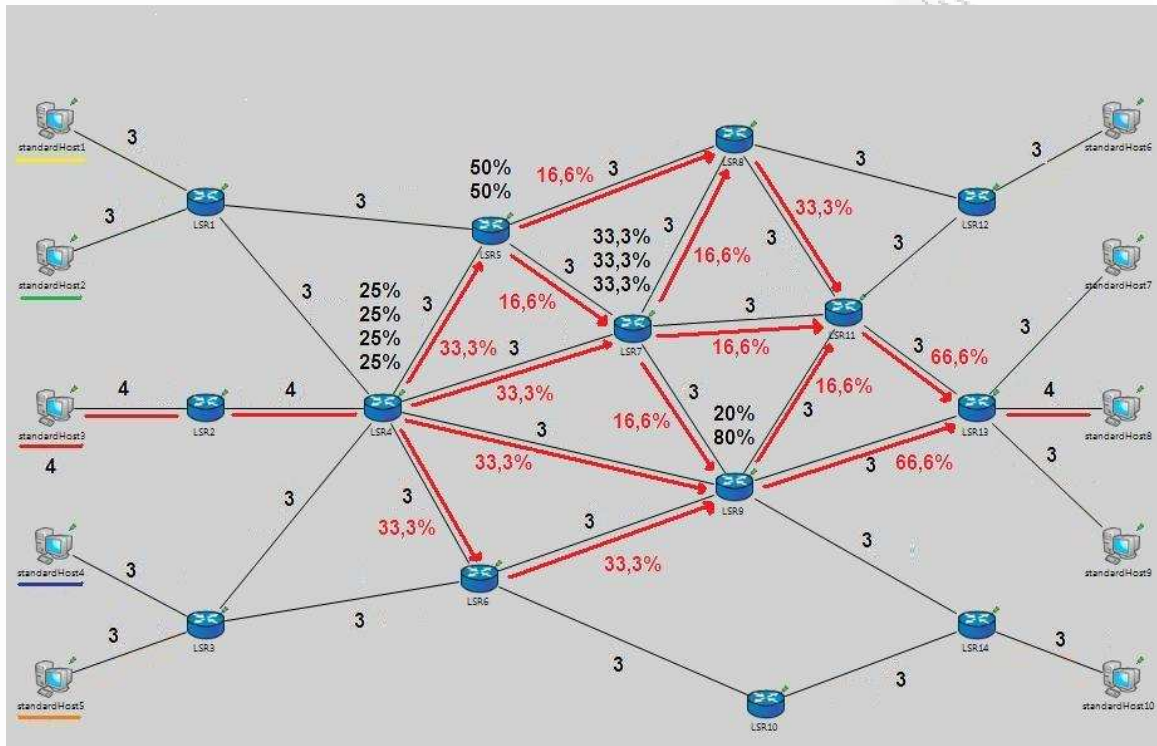
network 20 (load balancing - TCP)		
	Received (bytes)	Ρυθμός
Προσομοίωση 1	9170200	<3Mbps
Προσομοίωση 2	16246100	4Mbps
Προσομοίωση 3	3586700	<1.6Mbps

Πίνακας 14: Load Balancing, tcp flows

Συμπερασματικά, σε αυτές τις προσομοιώσεις μελετήσαμε την απόδοση της εφαρμογής του multipath για tcp ροή. Επειδή, οι tcp ροές, σε συνθήκες ανταγωνισμού, υστερούν σε σχέση με τις udp, για τις συγκεκριμένες προσομοιώσεις εξετάστηκαν μόνες τους στο δίκτυο. Οι tcp ροές ξεκινήσανε σε χρόνο 20sec. Στην πρώτη περίπτωση είχαμε μία απλή tcp ροή από τον standardHost3 στον standardHost8. Στη δεύτερη περίπτωση, στον LSR4 πραγματοποιήθηκε ο διαχωρισμός της ροής και το 50% των πακέτων προωθήθηκαν στο μονοπάτι LSR4 – LSR7 - LSR11 – LSR13 και το άλλο 50% προωθήθηκαν στο μονοπάτι LSR4 – LSR6 – LSR9 – LSR13. Στη τρίτη περίπτωση, πάλι στον LSR4 πραγματοποιήθηκε ο διαχωρισμός της ροής και το 50% των πακέτων προωθήθηκαν στο μονοπάτι LSR4 – LSR7 - LSR11 – LSR13 και το άλλο 50% προωθήθηκαν στο μονοπάτι LSR4 – LSR9 – LSR13.

Όπως φαίνεται και από τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα στον πίνακα 14, στη δεύτερη προσομοίωση η προώθηση των πακέτων από 2 μονοπάτια βελτίωσε την απόδοση του δικτύου και είχαμε σχεδόν σταθερό ρυθμό μετάδοσης 4Mbps ενώ μεταξύ των LSR4 και LSR13 όλες οι συνδέσεις είναι μέχρι 3Mbps. Στην τρίτη όμως προσομοίωση ενώ χρησιμοποιήθηκε πάλι διαχωρισμός της ροής στον LSR4 η απόδοση του δικτύου όχι μόνο δεν βελτιώθηκε αλλά μειώθηκε σημαντικά. Το διαφορετικό σημείο σε αυτές τις 2 περιπτώσεις είναι τα μονοπάτια που επιλέχθηκαν για το διαχωρισμό της ροής και ιδιαίτερα το μήκος τους ως προς τη συνολική καθυστέρηση (delay). Στη δεύτερη προσομοίωση τα 2 μονοπάτια έχουν ίδιο μήκος, την ίδια συνολική καθυστέρηση, άρα τα πακέτα φτάνουν στον προορισμό με τη σειρά που τα έστειλε ο χρήστης. Επομένως και οι επιβεβαιώσεις στέλνονται πίσω με τη σωστή σειρά και το πρωτόκολλο μπορεί να αυξήσει το ρυθμό. Αντίθετα, στην Τρίτη προσομοίωση τα μονοπάτια έχουν διαφορετικό μήκος, διαφορετική καθυστέρηση και τα πακέτα φτάνουν στον προορισμό χωρίς απώλειες αλλά με λανθασμένη σειρά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να στέλνονται και οι επιβεβαιώσεις με λανθασμένη σειρά και το πρωτόκολλο να θεωρεί ότι υπάρχει συμφόρηση και να μειώνει το ρυθμό.

11.3 Σενάριο 3 (load balancing – multiple paths - UDP)

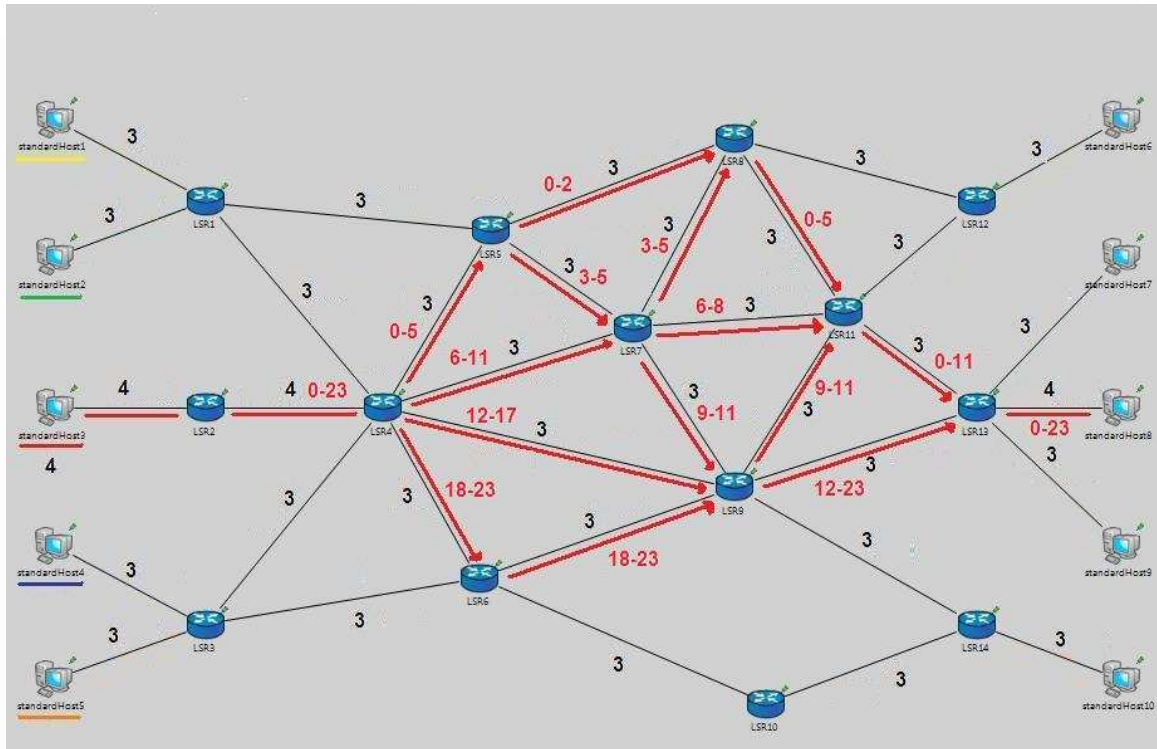


Εικόνα 98: Load Balancing (multiple paths), udp flow

Σε αυτήν την προσομοίωση θα σπάσουμε σε πολλαπλά μονοπάτια μία udp ροή. Ο διαχωρισμός της κίνησης θα γίνει στον LSR4 και τα ποσοστά στα οποία μοιράζεται σε κάθε link φαίνονται στην παραπάνω εικόνα. Όπως βλέπουμε στον επόμενο πίνακα (πίνακας 15), πάρα το ότι η κίνηση διαχέεται σχεδόν σε όλο το δίκτυο, η απόδοση δεν επηρεάζεται αρνητικά. Έτσι, το end to end throughput παραμένει σταθερό με το network utilization να μειώνεται αφού πλέον από τα links περνάει μικρότερο φορτίο.

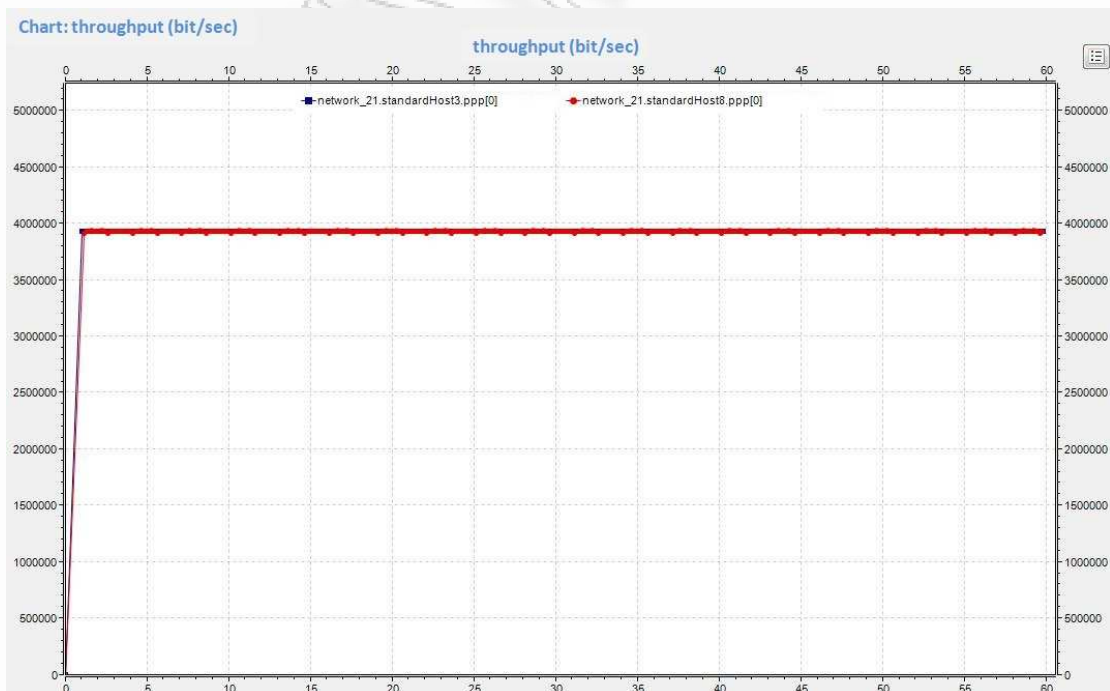
Network 21 (load balancing – multiple paths - UDP)			
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ	ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ	ΑΠΟΔΟΣΗ
	udp (packets)	udp (packets)	udp (packets)
sH3->sH8	23544	23544	100%

Πίνακας 15: Load Balancing, multiple paths, udp flow



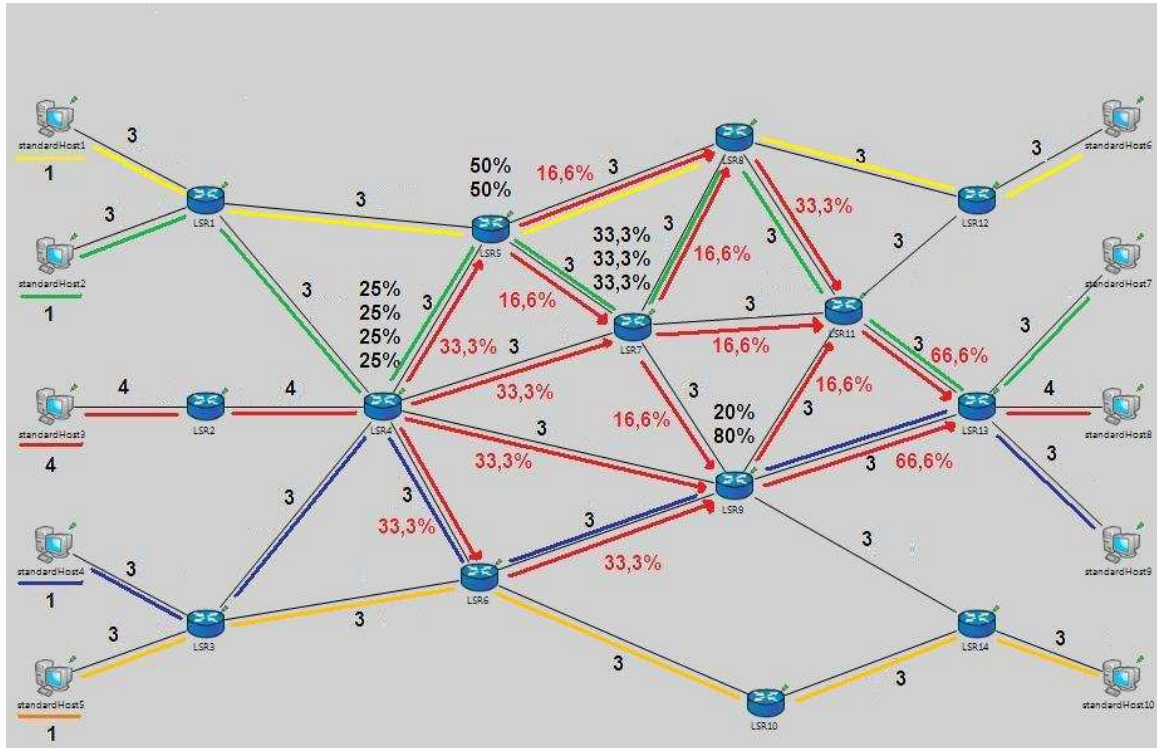
Εικόνα 99: Traffic splitting

Στην προηγούμενη εικόνα (εικόνα 99) βλέπουμε ποιες διαφορετικές διαδρομές ακολουθούν τα πακέτα με αύξων αριθμό από 0 μέχρι 23. Στην εικόνα 100 μπορούμε να δούμε τον σταθερά υψηλό ρυθμό μετάδοσης πακέτων του χρήστη 3 καθώς και πως αυτά τα πακέτα λαμβάνονται στον προορισμό με τον ίδιο ρυθμό.



Εικόνα 100: Traffic splitting, end to end throughput

11.4 Σενάριο 4 (load balancing – multiple paths - UDP)

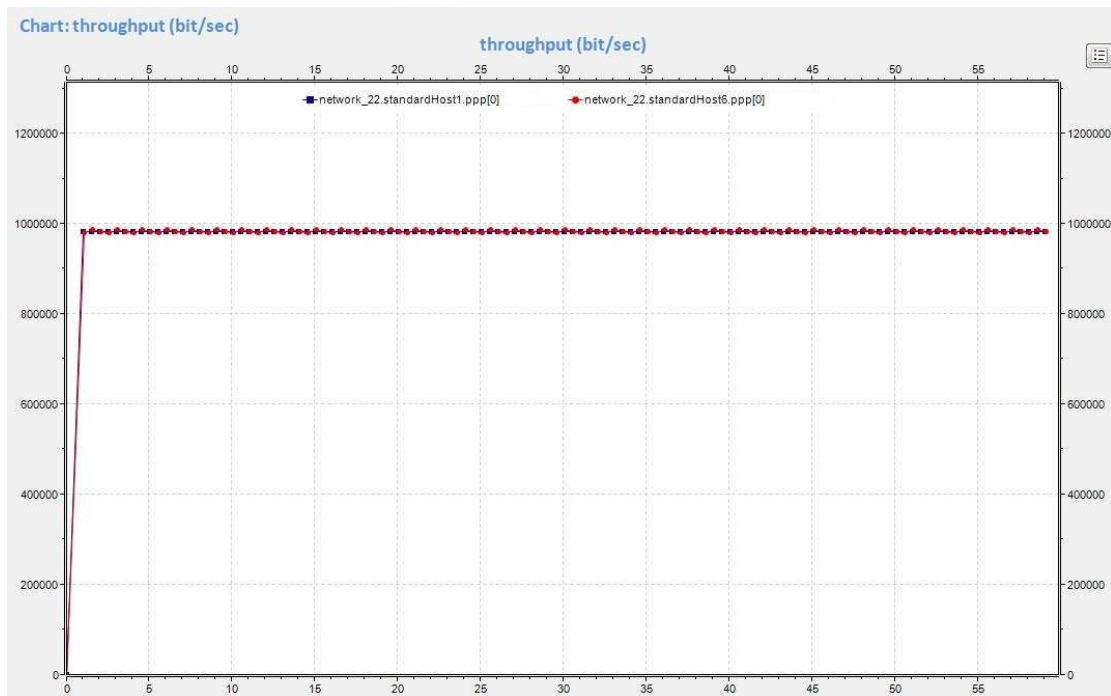


Εικόνα 101: Traffic splitting, paths, udp

Στις προηγούμενες προσομοιώσεις είδαμε πως σπάει μία ροή σε πολλαπλά μονοπάτια αλλά χωρίς να υπάρχει άλλη κίνηση στο δίκτυο. Σε αυτήν την προσομοίωση έχουν προστεθεί στο δίκτυο και άλλες ροές (εικόνα 101). Στον πίνακα 16 που ακολουθεί βλέπουμε ότι οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για τη δρομολόγηση των πακέτων είχαν αποτελεσματικότητα, αφού στο δίκτυο έχουμε την επιθυμητή απόδοση και δεν έχουμε απώλεια πακέτων. Το πιο σημαντικό στοιχείο όμως σε αυτήν την προσομοίωση είναι πως εξαιτίας αυτών των τεχνικών (mpls paths και multipath) το network utilization είναι μικρότερο. Η χρησιμοποίηση των συνδέσεων παραμένει όσο πιο χαμηλά γίνεται.

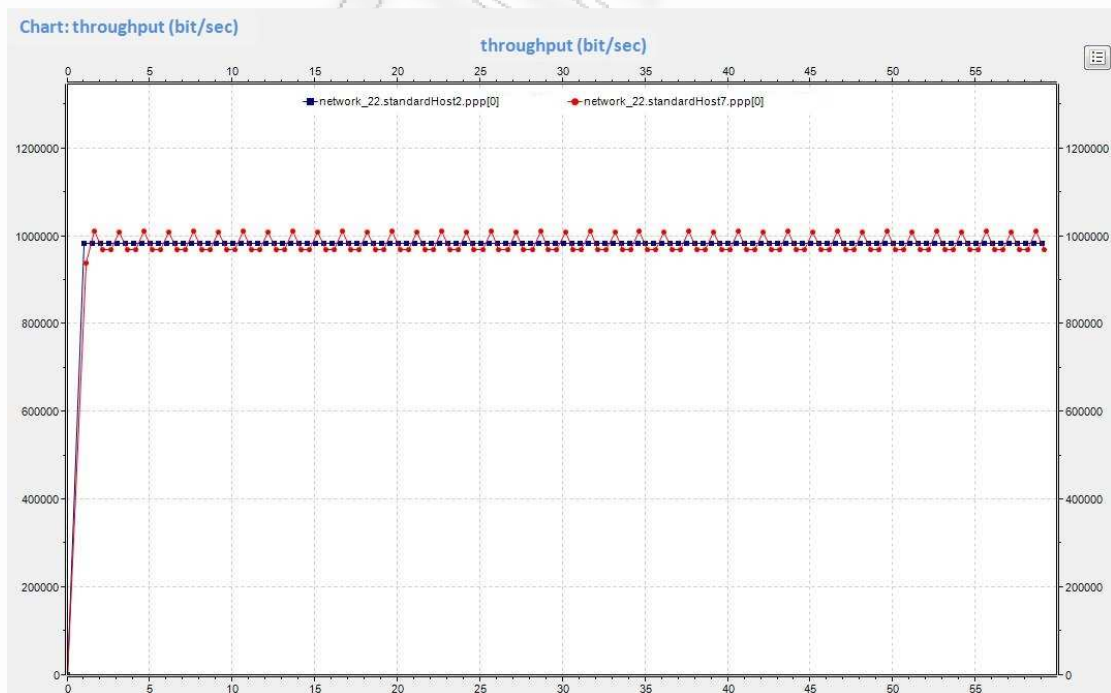
Network 22 (load balancing – multiple paths - UDP)			
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ	ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ	ΑΠΟΔΟΣΗ
	udp (packets)	udp (packets)	udp (packets)
sH1->sH6	5889	5889	100%
sH2->sH7	5884	5884	100%
sH3->sH8	23544	23544	100%
sH4->sH9	5887	5887	100%
sH5->sH10	5889	5889	100%

Πίνακας 16: Traffic splitting, paths, udp

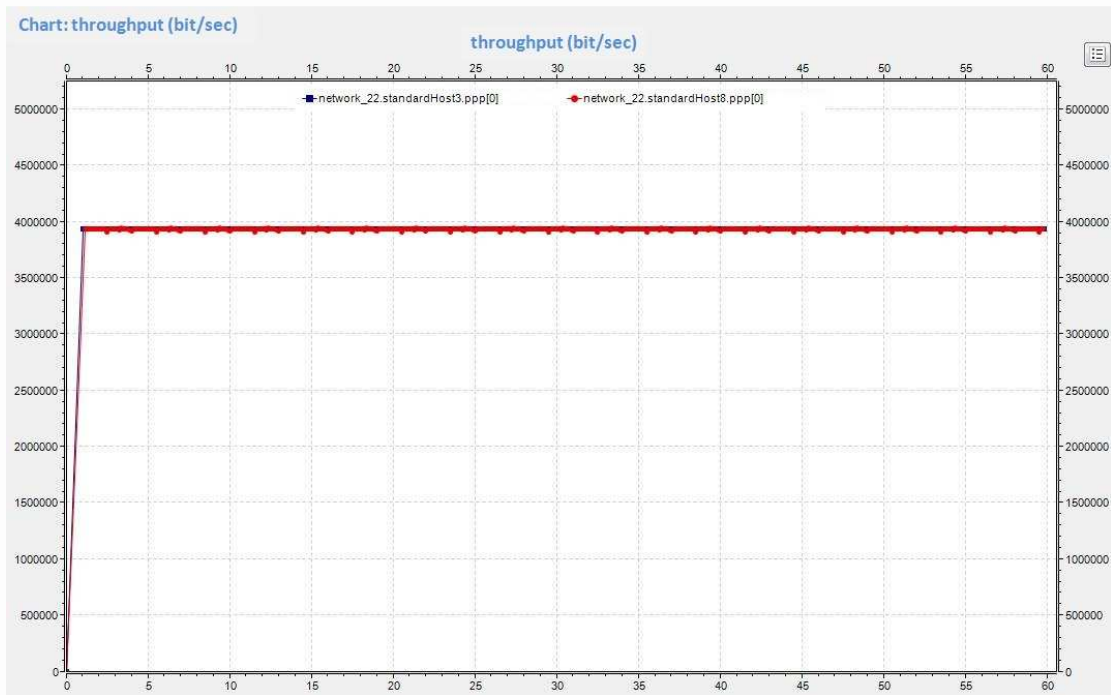


Εικόνα 102: Load Balancing, end to end throughput από τον host1 στον host6

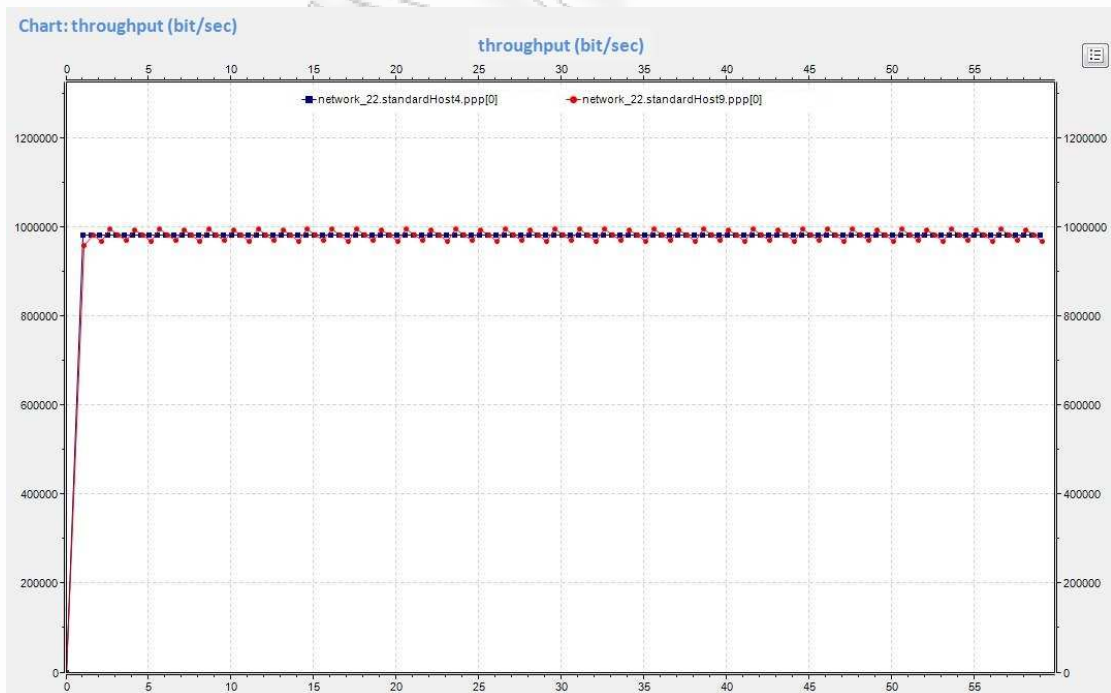
Στις εικόνες 102 έως 106 μπορούμε να δούμε συγκεκριμένα για κάθε χρήστη το end to end throughput. Όπως φαίνεται και οι 5 έστειλαν τα δεδομένα τους στο ρυθμό που ήθελαν και αυτά έφτασαν στον προορισμό με τον ίδιο ακριβώς ρυθμό, άρα χωρίς να υπάρχει απώλεια πακέτων.



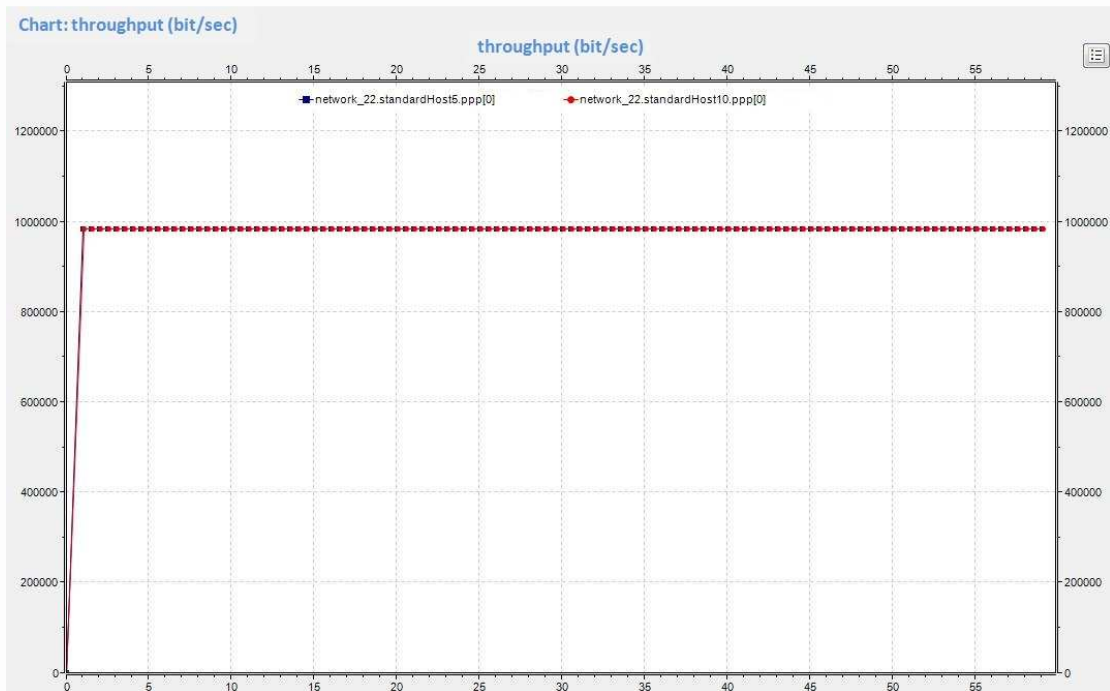
Εικόνα 103: Load Balancing, end to end throughput από τον host2 στον host7



Εικόνα 104: Load Balancing, end to end throughput από τον host3 στον host8



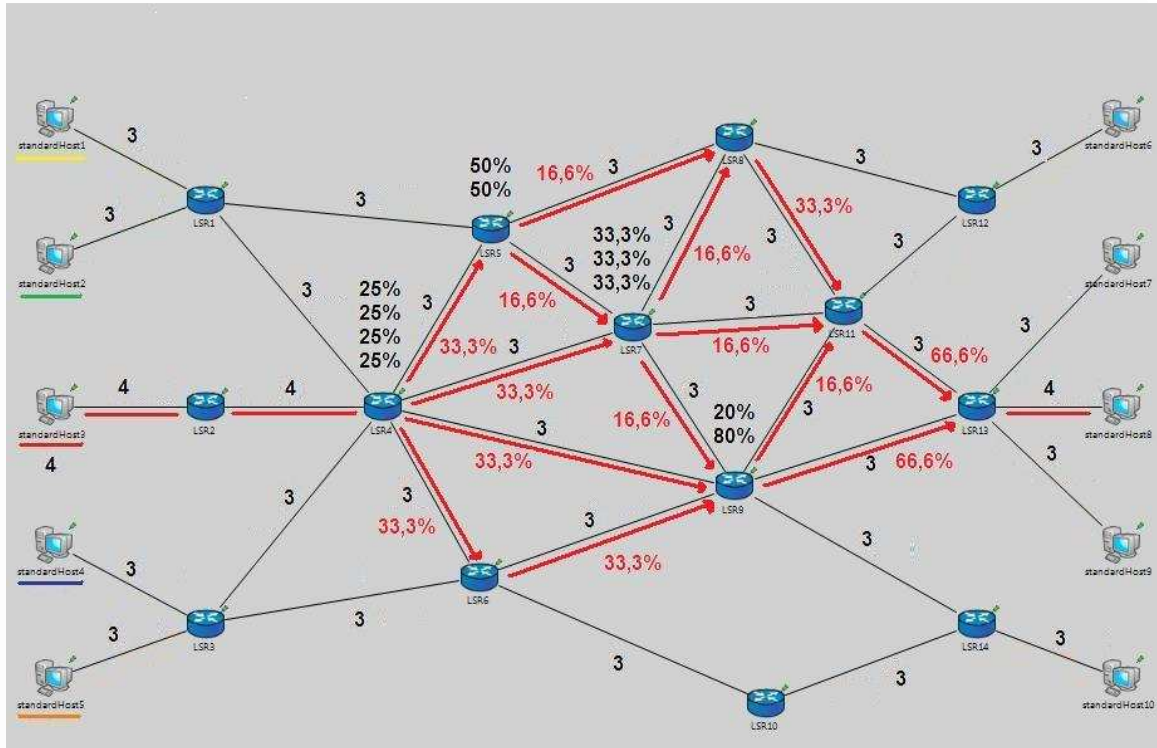
Εικόνα 105: Load Balancing, end to end throughput από τον host4 στον host9



Εικόνα 106: Load Balancing, end to end throughput από τον host5 στον host10

Όπως είδαμε σε αυτήν την προσομοίωση, ο διαχειριστής ενός δικτύου έχει τη δυνατότητα εκτός από το να προσφέρει στους χρήστες τη ποιότητα υπηρεσιών που αυτοί θέλουν, να χρησιμοποιήσει και τεχνικές διαχείρισης της κίνησης στο δίκτυο με στόχο να βελτιώσει άλλα χαρακτηριστικά που δεν αφορούν τους χρήστες αλλά είναι απαραίτητα για την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Για παράδειγμα, πολύ σημαντικό είναι στο δίκτυο να μην υπάρχουν συνδέσεις πολύ φορτωμένες ενώ άλλες είναι αχρησιμοποίητες.

11.5 Σενάριο 5 (load balancing – multiple paths - TCP)

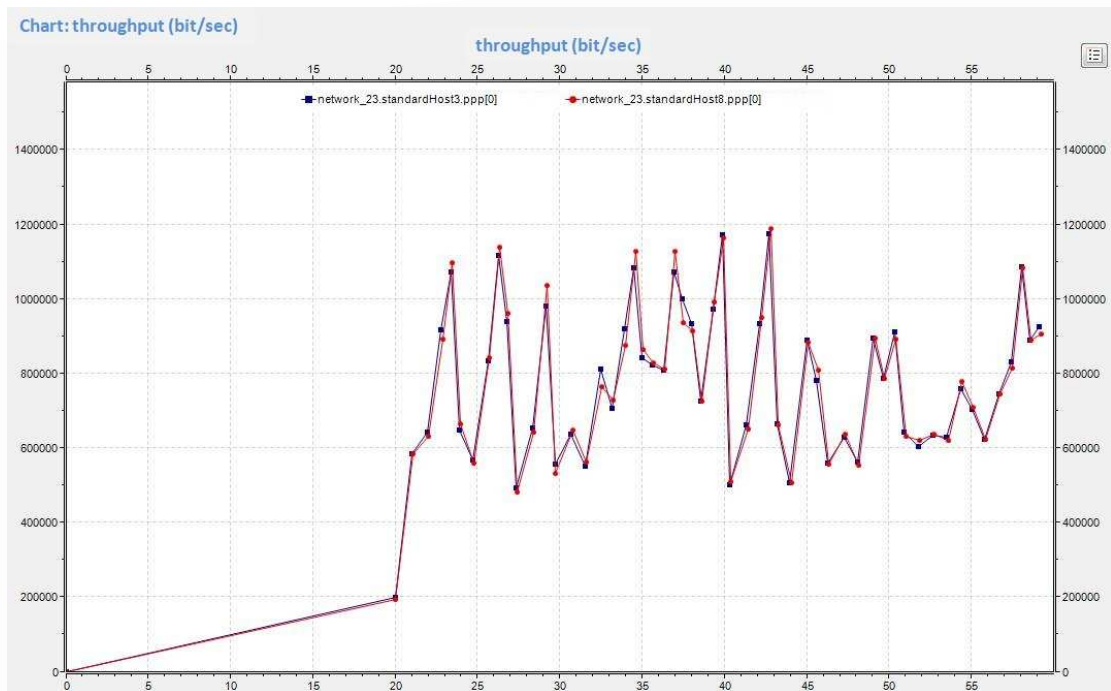


Εικόνα 107: Traffic splitting, tcp flow

Σε αυτήν την προσομοίωση επιχειρούμε να εφαρμόσουμε την προηγούμενη τεχνική των πολλαπλών μονοπατιών αλλά αυτή τη φορά για μία tcp ροή (εικόνα 107). Όπως είναι αναμενόμενο, το σπάσιμο της κίνησης σε πολλές διαδρομές έχει ως αποτέλεσμα τα πακέτα να φτάνουν στον προορισμό με εντελώς λανθασμένη σειρά (packet reordering). Για την απόδοση του tcp πρωτοκόλλου αυτό έχει καταστροφικές συνέπειες αφού ο host στον προορισμό ζητά συνέχεια επαναμεταδόσεις και απορρίπτει τα πακέτα που φτάνουν. Αυτό προέκυψε και στην προσομοίωση όπως φαίνεται από τον πίνακα και τις εικόνες που ακολουθούν. Στον πίνακα 17 βλέπουμε ότι ενώ ο χρήστης θα επιθυμούσε να στείλει τα πακέτα του με ρυθμό 4Mbps και ενώ το δίκτυο είναι άδαιο, τελικά τα πακέτα έφτασαν με ρυθμό μικρότερο και από 1,2 Mbps.

network 23 (load balancing – multiple paths - TCP)		
	Received (bytes)	Ρυθμός
Προσομοίωση 1	3487900	<1.2Mbps

Πίνακας 17: Traffic splitting, tcp

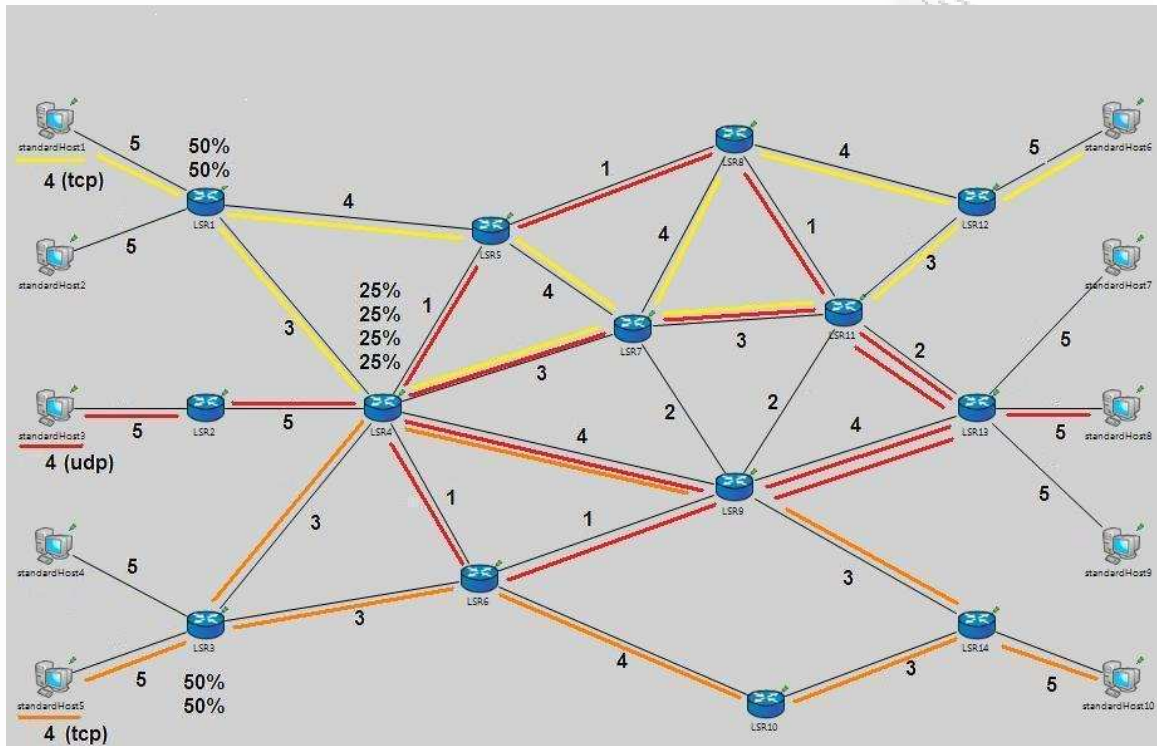


Εικόνα 108: Traffic splitting, end to end throughput από τον host3 στον host8

Ο πολύ χαμηλός ρυθμός επιβεβαιώνεται και στην εικόνα 108 όπου βλέπουμε το end to end throughput. Χαρακτηριστικά ο ρυθμός αυξομειώνεται μεταξύ 500Kbps και 1,2Mbps δηλαδή μεταξύ 12,5 και 30% της επιθυμητής απόδοσης. Προφανώς, η επιλογή της προώθησης των tcp πακέτων από τόσα πολλά μονοπάτια μπέρδεψε τελείως τη σειρά που αυτά έφτασαν στον προορισμό κάνοντας το πρωτόκολλο να θεωρήσει ότι στο δίκτυο υπάρχει μεγάλη συμφόρηση.

11.6 Σενάριο 6 (load balancing – UDP,TCP)

Προσομοίωση 1

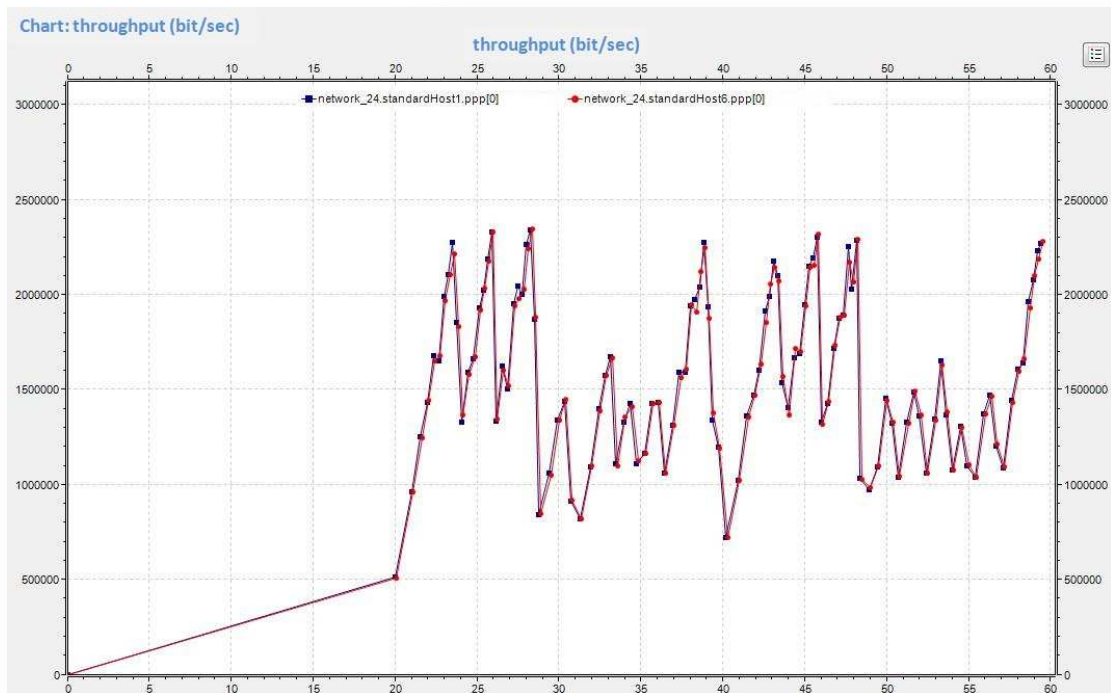


Εικόνα 109: Traffic splitting, udp flows, tcp flow

Εδώ θα ελέγξουμε πως δουλεύει η τεχνική του multipath σε ένα δίκτυο που έχει ταυτόχρονα udp και tcp ροές. Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα (εικόνα 109) 3 ροές σπάνε σε 8 διαφορετικά paths με αποτέλεσμα την χρησιμοποίηση σχεδόν όλων των links δικτύου. Τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα. Στο δίκτυο έχουμε χαμηλό utilization, η udp ροή δεν επηρεάζεται, η tcp ροή που σπάει σε μονοπάτια με διαφορετικό delay έχει μειωμένη απόδοση λόγω packet reordering, ενώ η tcp ροή που σπάει σε μονοπάτια που έχουν το ίδιο delay διατηρεί το ρυθμό της και επιπρόσθετα στέλνει δεδομένα με ρυθμό 4,3 Mbps ενώ οι συνδέσεις είναι μέχρι 4Mbps. Τα συμπεράσματα αυτά παρατηρούνται στον επόμενο πίνακα και στις εικόνες που ακολουθούν. Συγκεκριμένα, στον πίνακα 18 βλέπουμε ότι ο χρήστης 1 δεν είχε το ρυθμό που θα ήθελε, ο χρήστης 3 είχε σταθερό ρυθμό όπως αναμενόταν και ο χρήστης 5 είχε βέλτιστη απόδοση.

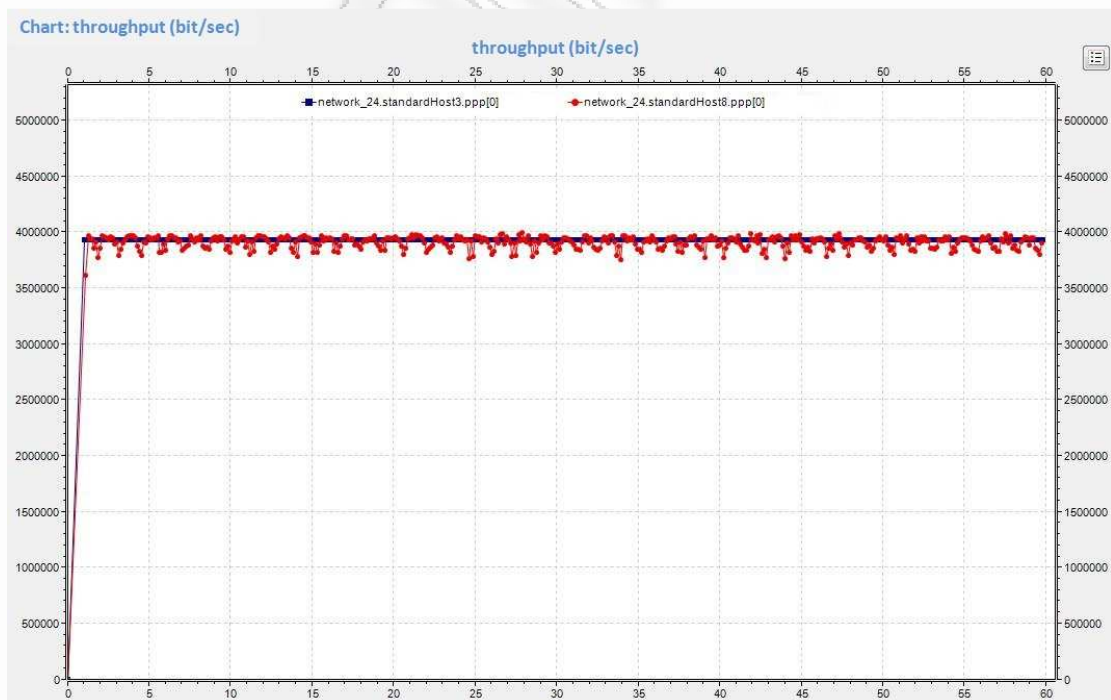
network 24 (load balancing – UDP,TCP) - Προσομοίωση 1		
	Received	Ρυθμός
sh1 --- sh6	6965400 bytes	< 2.4 Mbps
sh3 --- sh8	23396 packets	4 Mbps
sh5 --- sh10	18452200 bytes	4.3 Mbps

Πίνακας 18: Traffic splitting, udp flows, tcp flow

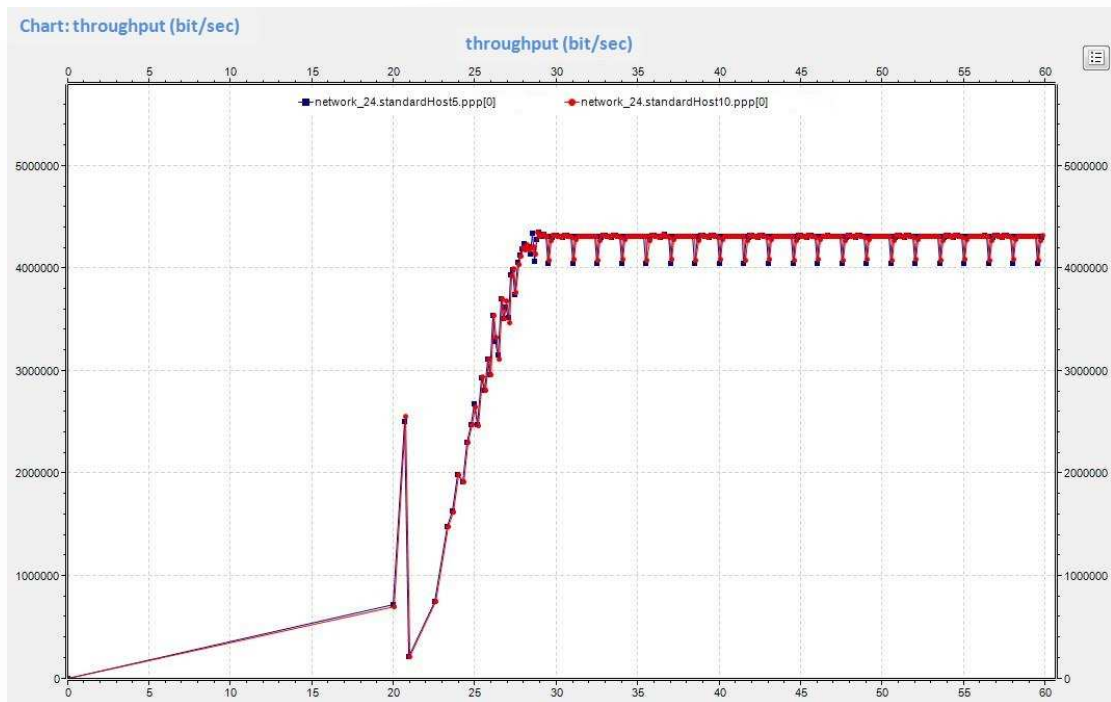


Εικόνα 110: Traffic splitting, end to end throughput από τον host1 στον host6

Στην εικόνα 110 βλέπουμε τις διακυμάνσεις στο end to end througput για τον πρώτο χρήστη. Ο ρυθμός μεταβάλλεται διαρκώς από 700Kbps μέχρι 2,3 Mbps. Στην εικόνα 111 βλέπουμε ότι ο χρήστης 3 έστειλε τα πακέτα με σταθερό ρυθμό 4Mbps και αυτά έφτασαν στον προορισμό με τον ίδιο ακριβώς ρυθμό.

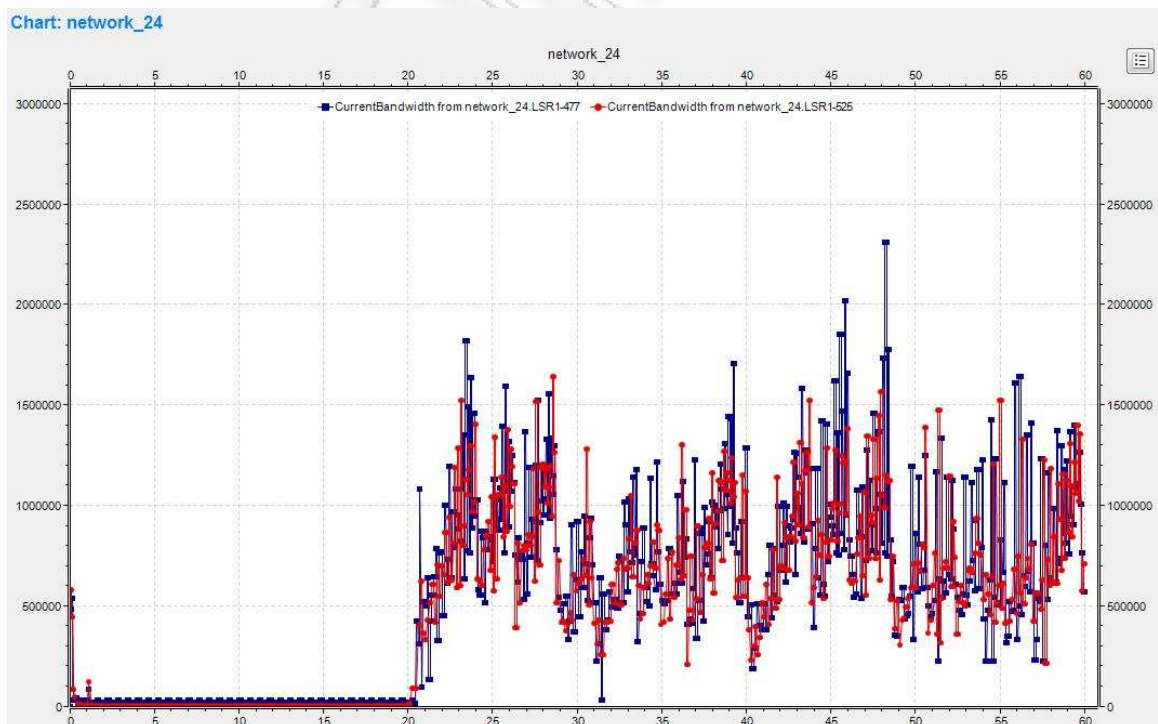


Εικόνα 111: Traffic splitting, end to end throughput από τον host3 στον host8

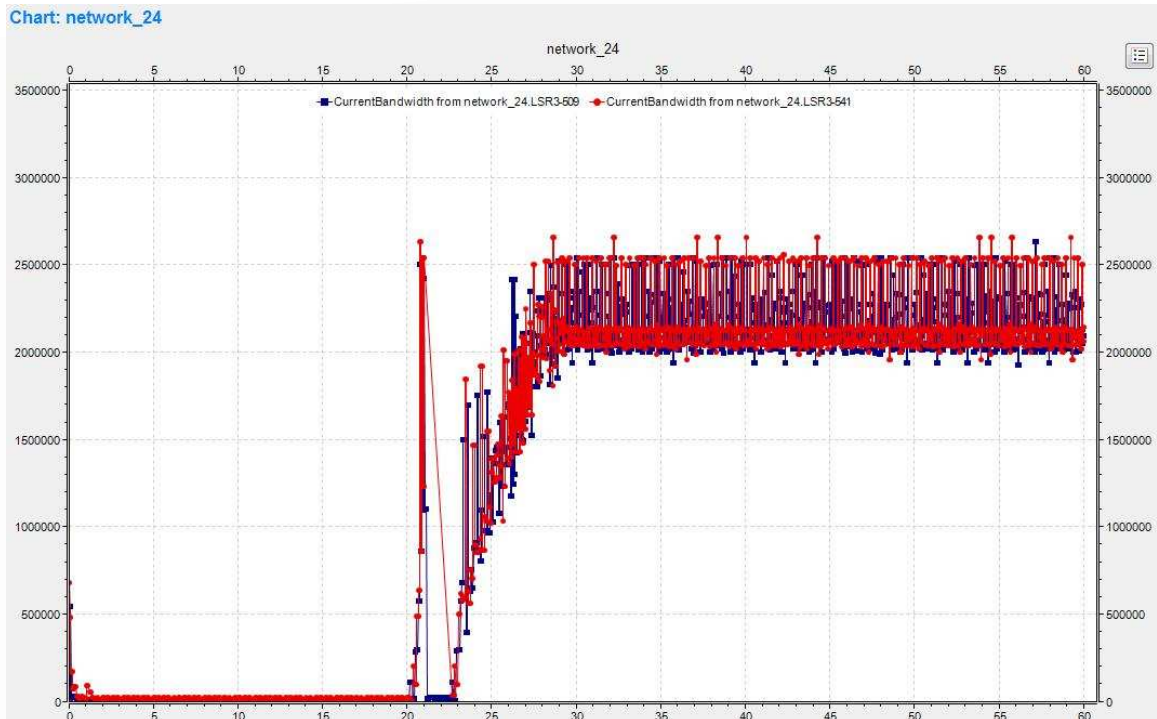


Εικόνα 112: Traffic splitting, end to end throughput από τον host5 στον host10

Στην εικόνα 112 βλέπουμε την απόδοση για τον πέμπτο χρήστη ο οποίος επωφεληθήκε από τις τεχνικές διαχείρισης της κίνησης και έστειλε τα πακέτα του με ρυθμό 4,3Mbps. Στην εικόνα 113 βλέπουμε το ρυθμό με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα από τον δρομολογητή 1 προς τους δρομολογητές 4 και 5 (φορτίο χρήστη 1).

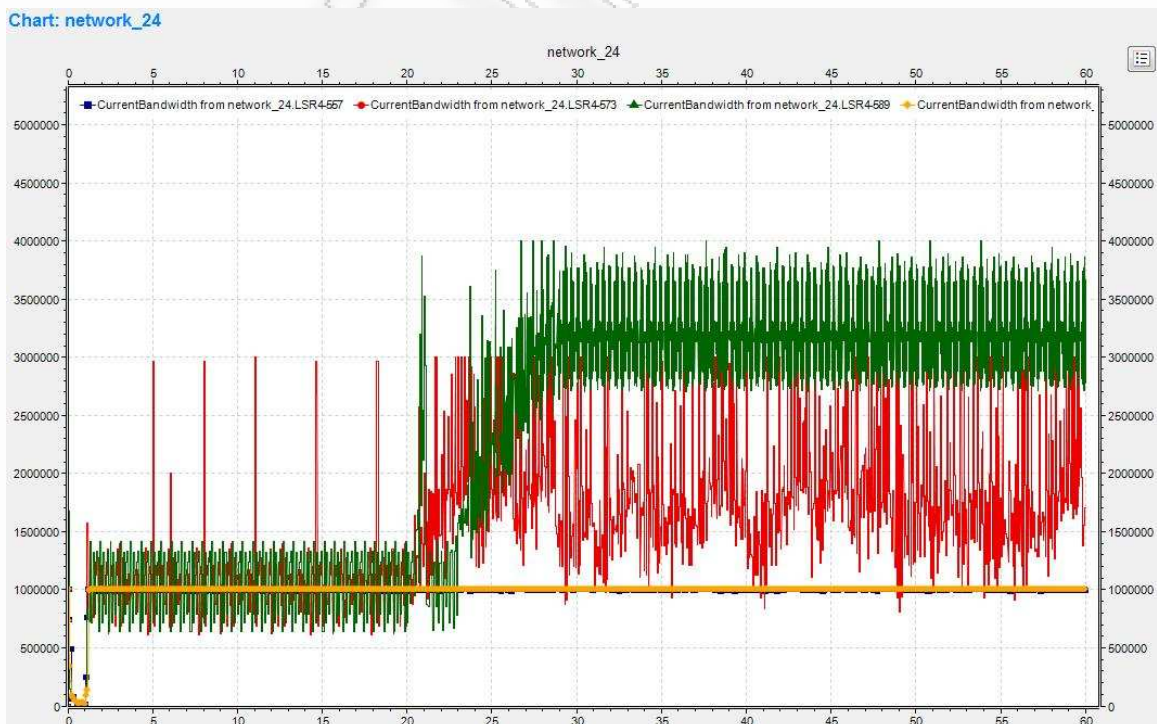


Εικόνα 113: Current Bandwidth, Μπλε: LSR1 – LSR4, Κόκκινη: LSR1 – LSR5



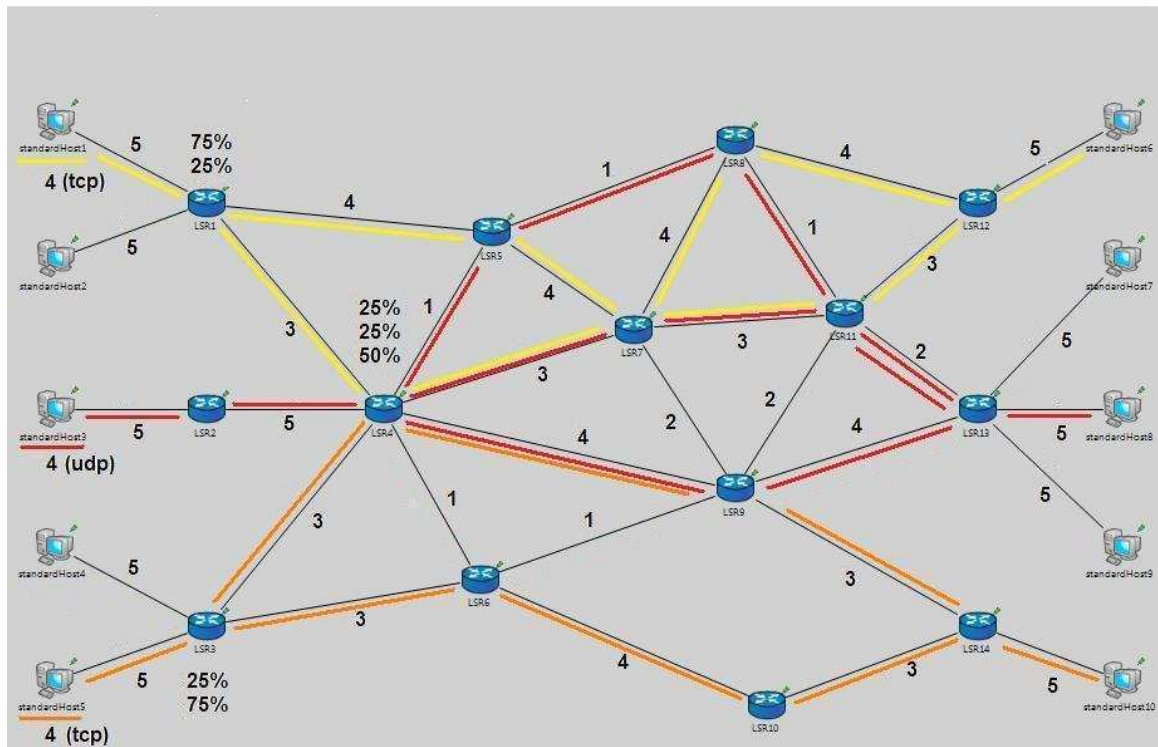
Εικόνα 114: Current Bandwidth, Μπλε: LSR3 – LSR4, Κόκκινη: LSR3 – LSR6

Στην εικόνα 114 βλέπουμε το ρυθμό με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα από τον δρομολογητή 3 προς τους δρομολογητές 4 και 6 (φορτίο χρήστη 5). Ενώ, στην εικόνα 115 βλέπουμε το ρυθμό με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα από τον δρομολογητή 4 προς τους δρομολογητές 5,7,9 και 6 (φορτίο χρήστη 3).



Εικόνα 115: Current Bandwidth, Μπλε: LSR4 – LSR5, Κόκκινη: LSR4 – LSR7, Πράσινη: LSR4 – LSR9, Κίτρινη: LSR4 – LSR6

Προσομοίωση 2

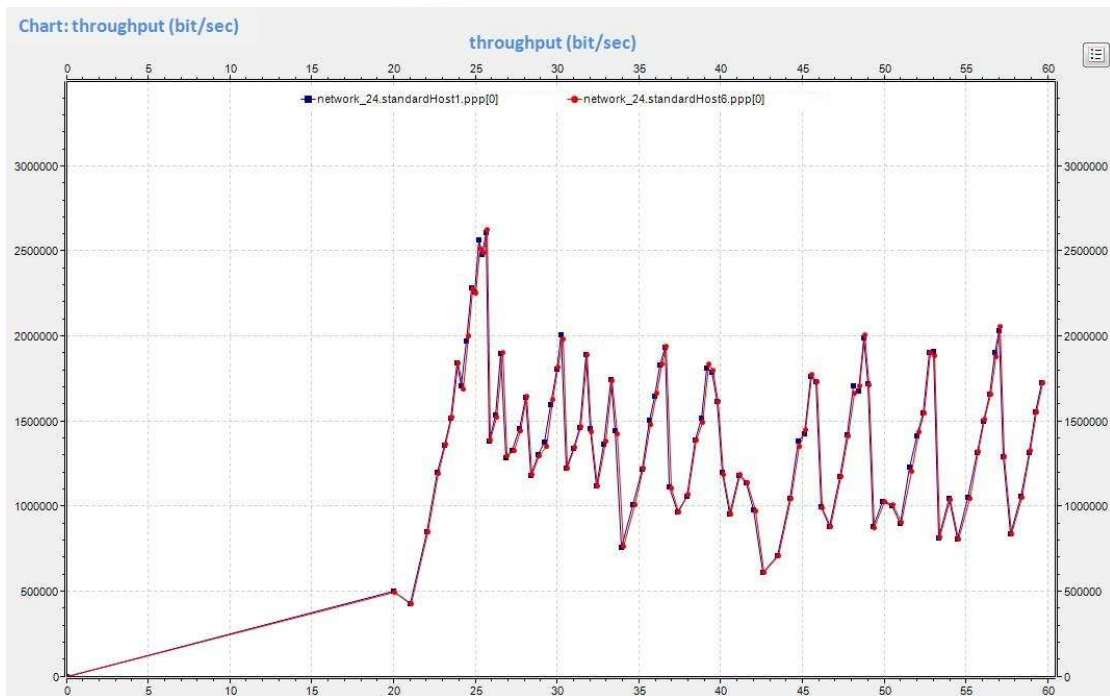


Εικόνα 116: Traffic splitting, udp flows, tcp flow

Σε αυτήν την προσομοίωση (εικόνα 116) μειώσαμε τον αριθμό των μονοπατιών στα οποία σπάει η udp ροή. Αυτό δεν αλλάζει κάτι στην απόδοση του δικτύου και τα αποτελέσματα θα είναι περίπου ίδια με πριν. Η σύνδεση μόνο μεταξύ των δρομολογητών 4 και 9 θα έχει μεγαλύτερη χρησιμοποίηση. Για το λόγο αυτό ο χρήστης 5 δεν θα μπορέσει να έχει ρυθμό 4,3 Mbps αλλά 4Mbps που και πάλι είναι ικανοποιητικός. Στον πίνακα 19 έχουμε τις μετρήσεις με τα δεδομένα που τελικά έφτασαν στους προορισμούς.

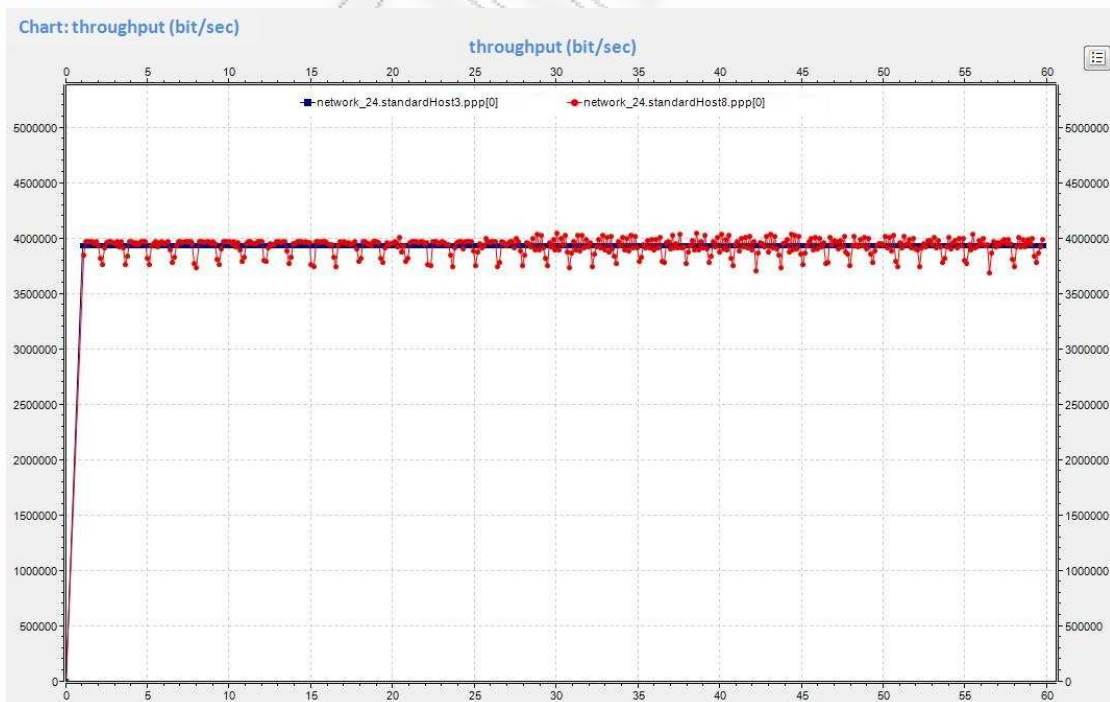
network 24 (load balancing – UDP,TCP) - Προσομοίωση 2		
	Received	Ρυθμός
sH1 --- sH6	6129500 bytes	< 2.5 Mbps
sH3 --- sH8	23493 packets	4 Mbps
sH5 --- sH10	16601000bytes	4 Mbps

Πίνακας 19: Traffic splitting, udp flows, tcp flow

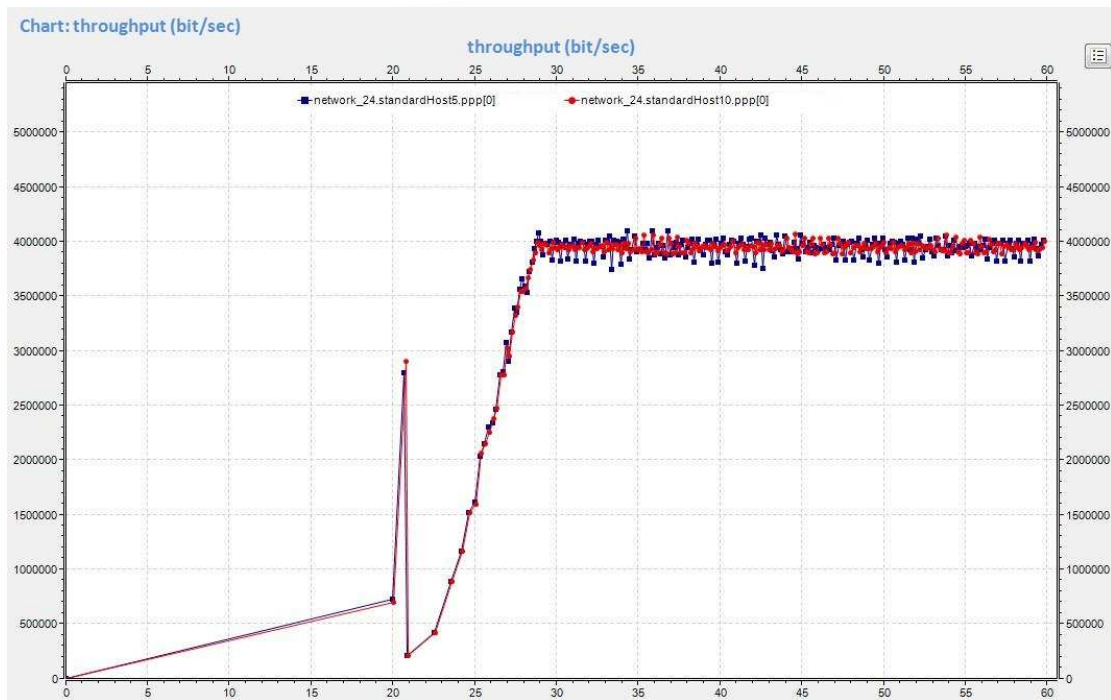


Εικόνα 117: Traffic splitting, end to end throughput από τον host1 στον host6

Στην εικόνα 117 βλέπουμε τις διακυμάνσεις στο end to end throughput για τον πρώτο χρήστη. Ο ρυθμός μεταβάλλεται διαρκώς από 700Kbps μέχρι 2 Mbps. Στην εικόνα 118 βλέπουμε ότι ο χρήστης 3 έστειλε τα πακέτα με σταθερό ρυθμό 4Mbps και αυτά έφτασαν στον προορισμό με τον ίδιο ακριβώς ρυθμό.

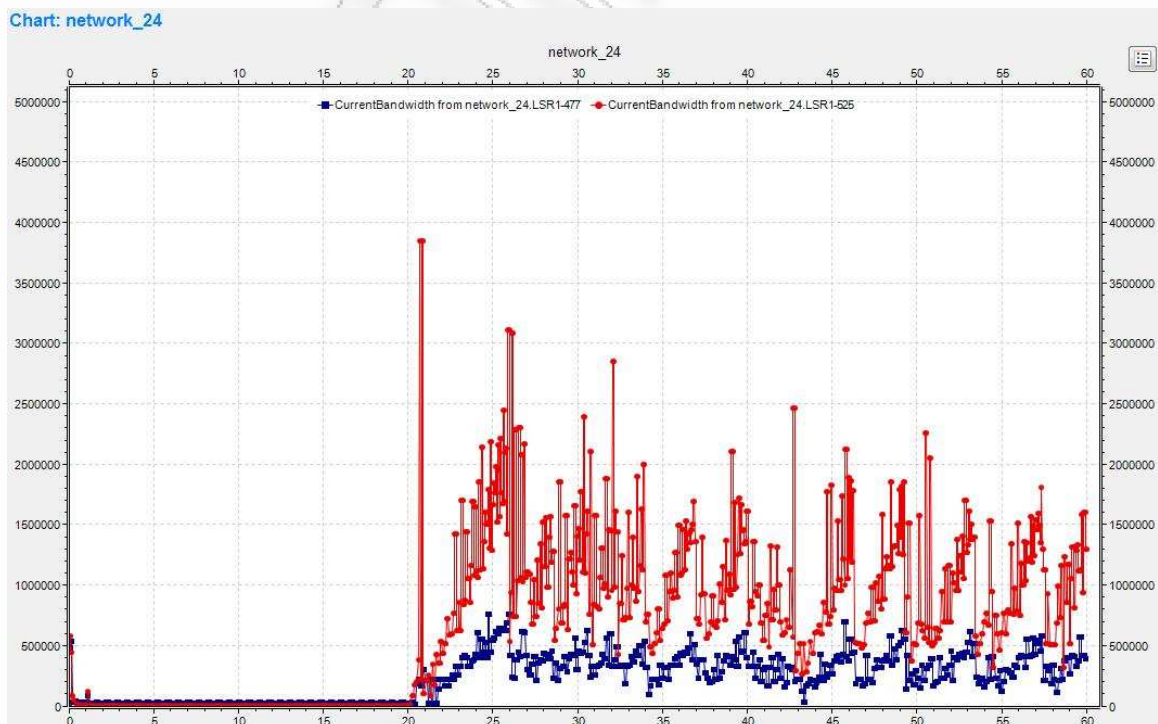


Εικόνα 118: Traffic splitting, end to end throughput από τον host3 στον host8

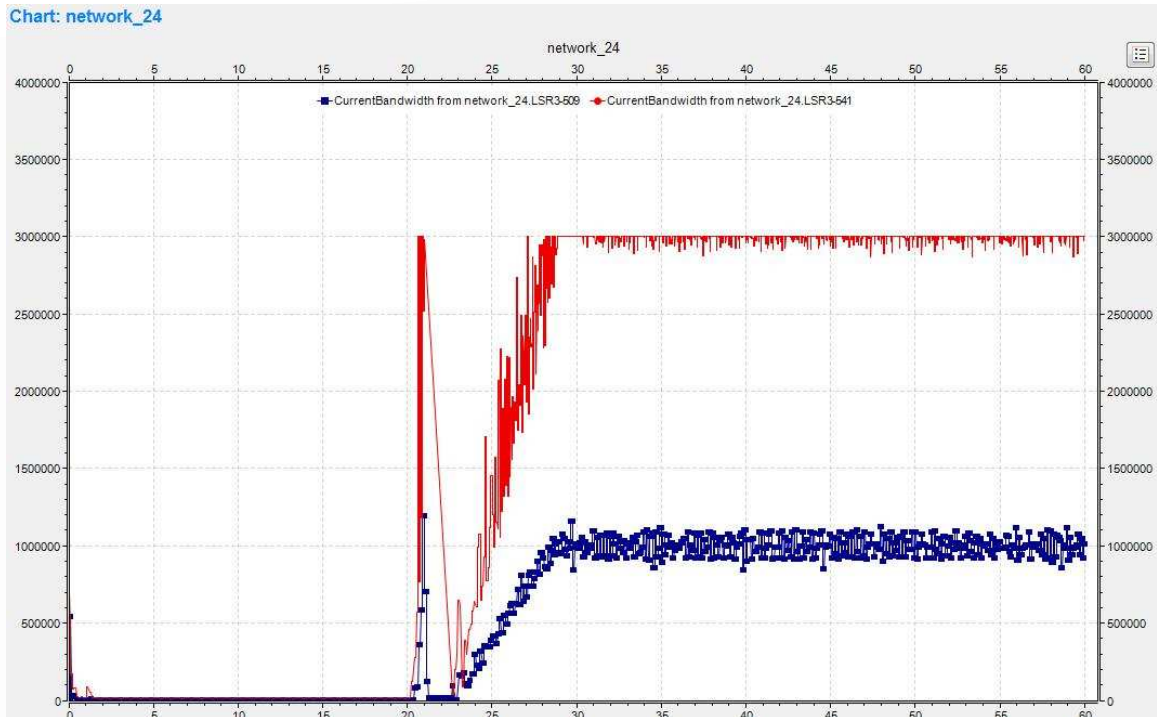


Εικόνα 119: Traffic splitting, end to end throughput από τον host5 στον host10

Στην εικόνα 119 βλέπουμε την απόδοση για τον πέμπτο χρήστη ο οποίος επωφεληθήκε από τις τεχνικές διαχείρισης της κίνησης και έστειλε τα πακέτα του με ρυθμό 4Mbps. Στην εικόνα 120 βλέπουμε το ρυθμό με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα από τον δρομολογητή 1 προς τους δρομολογητές 4 και 5 (φορτίο χρήστη 1).

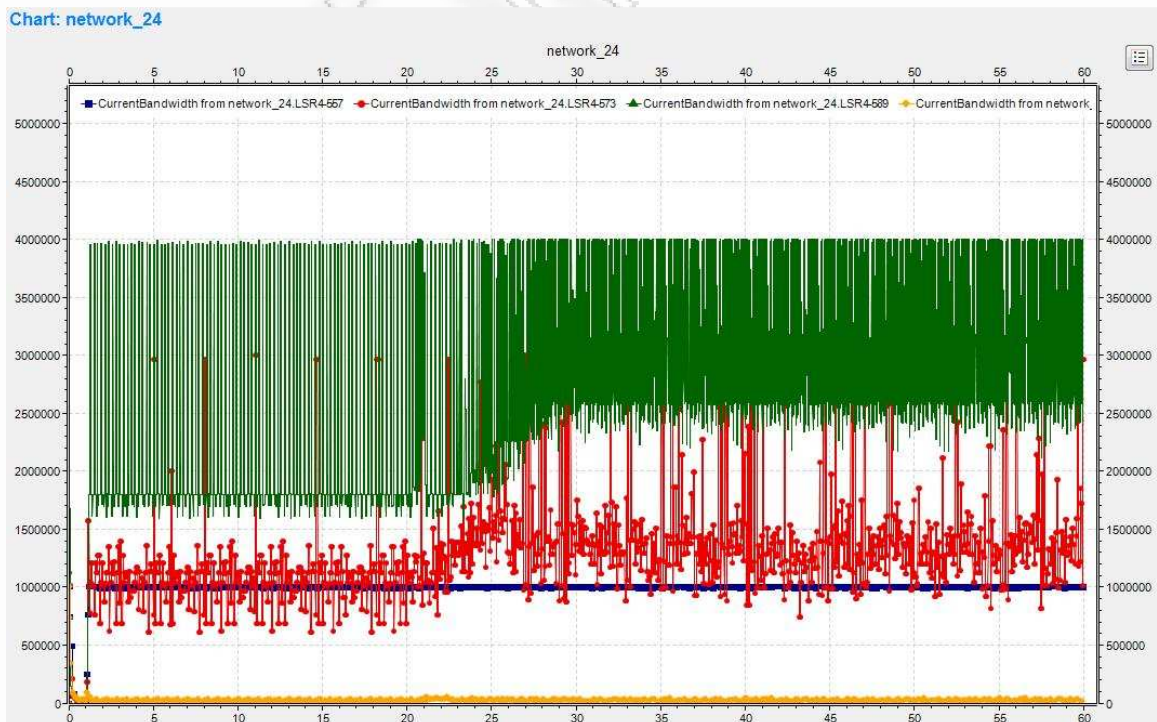


Εικόνα 120: Current Bandwidth, Μπλε: LSR1 – LSR4, Κόκκινη: LSR1 – LSR5



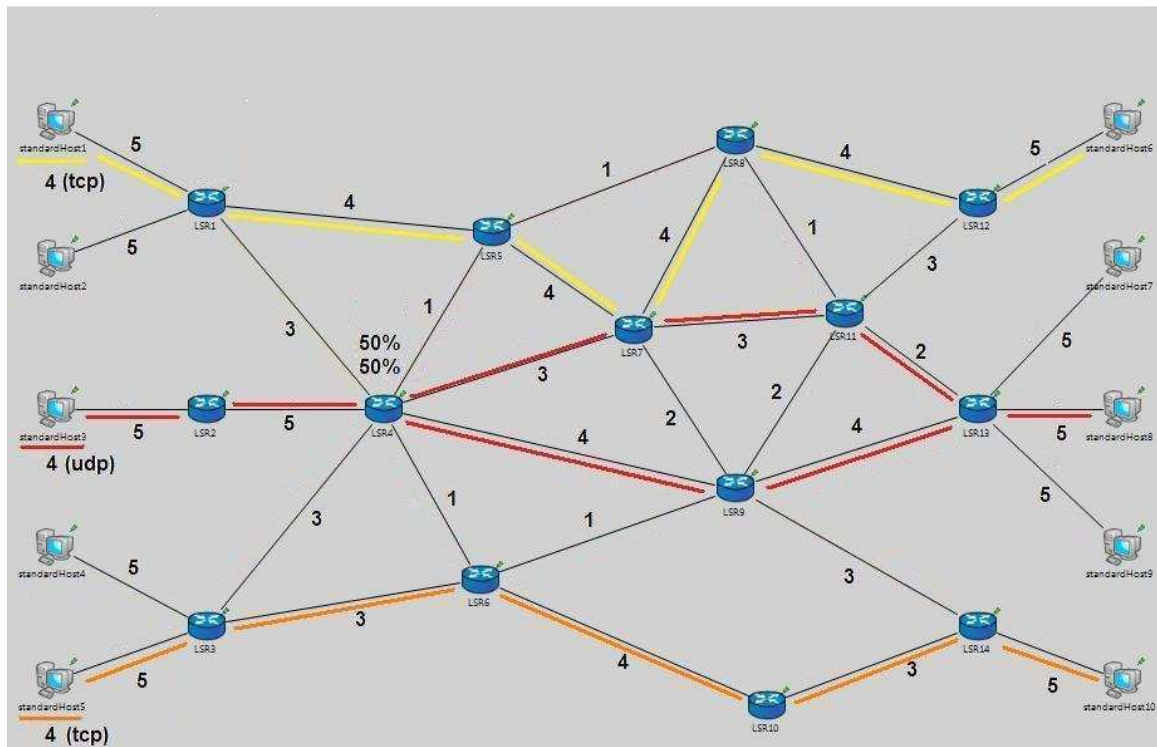
Εικόνα 121: Current Bandwidth, Μπλε: LSR3 – LSR4, Κόκκινη: LSR3 – LSR6

Στην εικόνα 121 βλέπουμε το ρυθμό με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα από τον δρομολογητή 3 προς τους δρομολογητές 4 και 6 (φορτίο χρήστη 5). Ενώ, στην εικόνα 122 βλέπουμε το ρυθμό με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα από τον δρομολογητή 4 προς τους δρομολογητές 5,7,9 και 6 (φορτίο χρήστη 3).



Εικόνα 122: Current Bandwidth, Μπλε: LSR4 – LSR5, Κόκκινη: LSR4 – LSR7, Πράσινη: LSR4 – LSR9, Κίτρινη: LSR4 – LSR6

Προσομοίωση 3

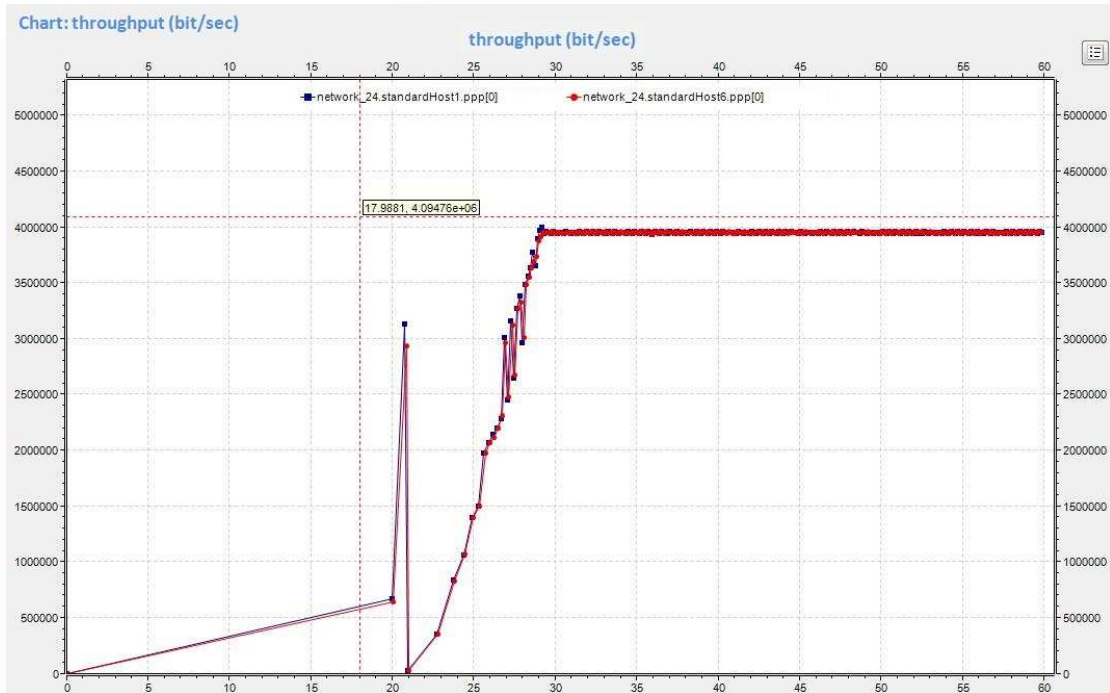


Εικόνα 123: Traffic splitting, udp flows, tcp flow

Εδώ μειώσαμε και άλλο τον αριθμό των μονοπατιών από τα οποία περνάνε οι ροές στο δίκτυο (εικόνα 123). Με τον τρόπο αυτό διορθώθηκε η απόδοση της tcp ροής που αντιμετώπιζε πρόβλημα από το packet reordering. Η απόδοση και των 3 ροών είναι υψηλή. Βέβαια, πλέον στο δίκτυο χρησιμοποιούνται λίγα links, πολλά μένουν ανενεργά με συνέπεια να έχουμε υψηλό network utilization. Ακόμα, η εφαρμογή του multipath στην tcp ροή από τον host5 στον host10 βοήθησε να έχει η ροή ρυθμό μεγαλύτερη των 4Mbps τη στιγμή που τα links από τα οποία πέραγε ήταν μέχρι 4Mbps. Πλέον, σε αυτή την προσομοίωση που περνάει από ένα μόνο μονοπάτι ο ρυθμός της περιορίζεται από τη χωρητικότητα της μικρότερης σύνδεσης του μονοπατιού. Αυτά τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 20 που ακολουθεί.

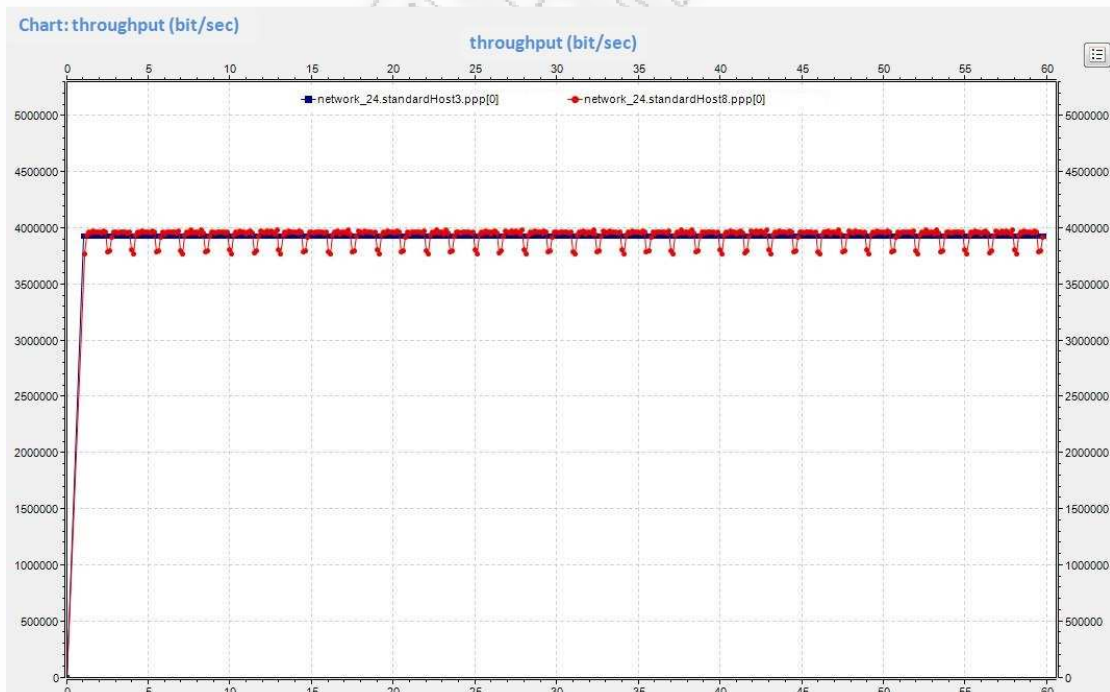
network 24 (load balancing – UDP,TCP) - Προσομοίωση 3		
	Received	Ρυθμός
sH1 --- sH6	16386500 bytes	4 Mbps
sH3 --- sH8	23547 packets	4 Mbps
sH5 --- sH10	8132800 bytes	< 3 Mbps

Πίνακας 20: Traffic splitting, udp flows, tcp flow

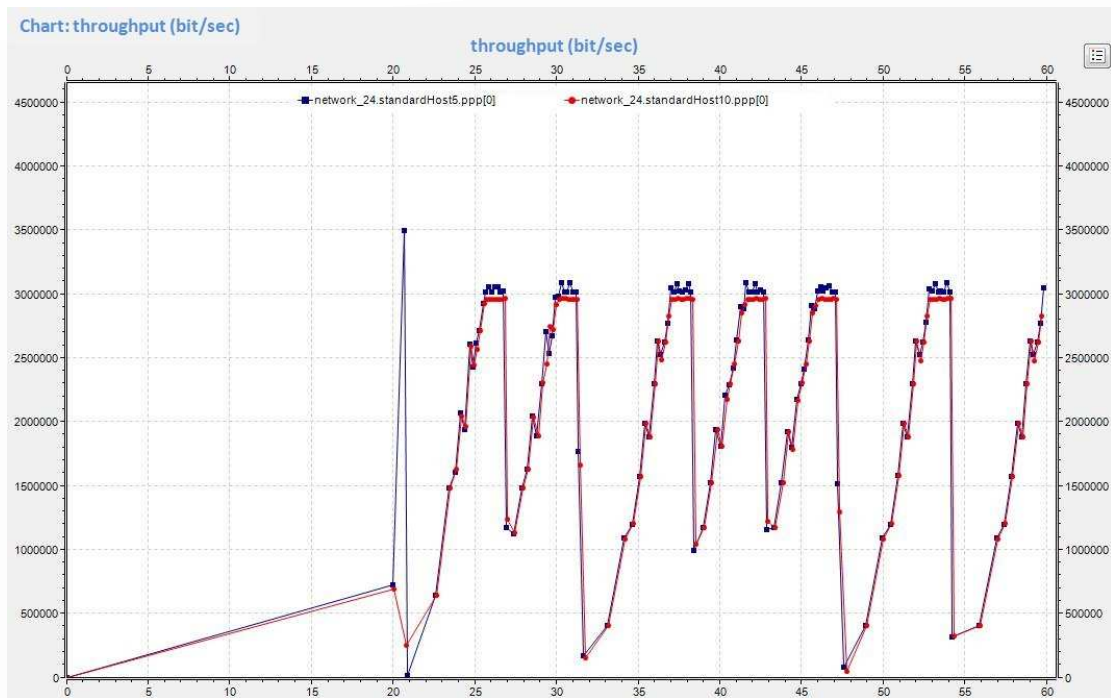


Εικόνα 124: Traffic splitting, end to end throughput από τον host1 στον host6

Στην εικόνα 124 βλέπουμε ότι πλέον ο πρώτος χρήστης απολαμβάνει την ποιότητα υπηρεσιών που χρειάζεται και στέλνει τα δεδομένα του με ρυθμό 4Mbps. Το ίδιο βλέπουμε και στην εικόνα 125 για τον τρίτο χρήστη.

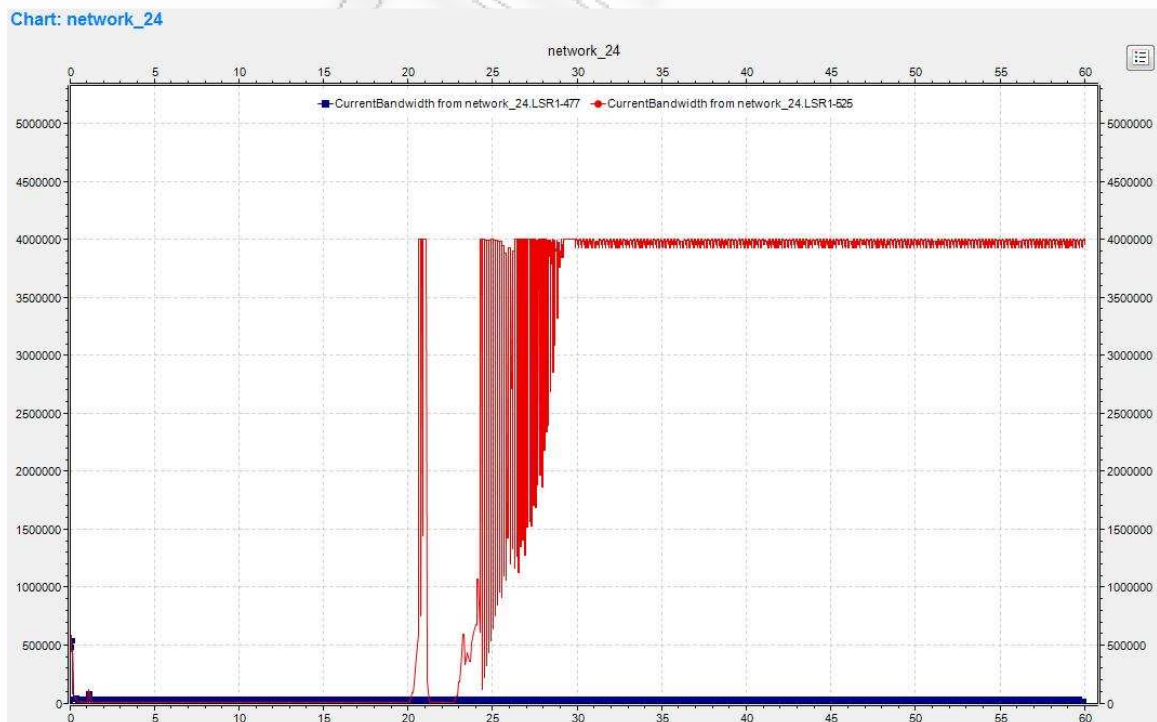


Εικόνα 125: Traffic splitting, end to end throughput από τον host2 στον host7

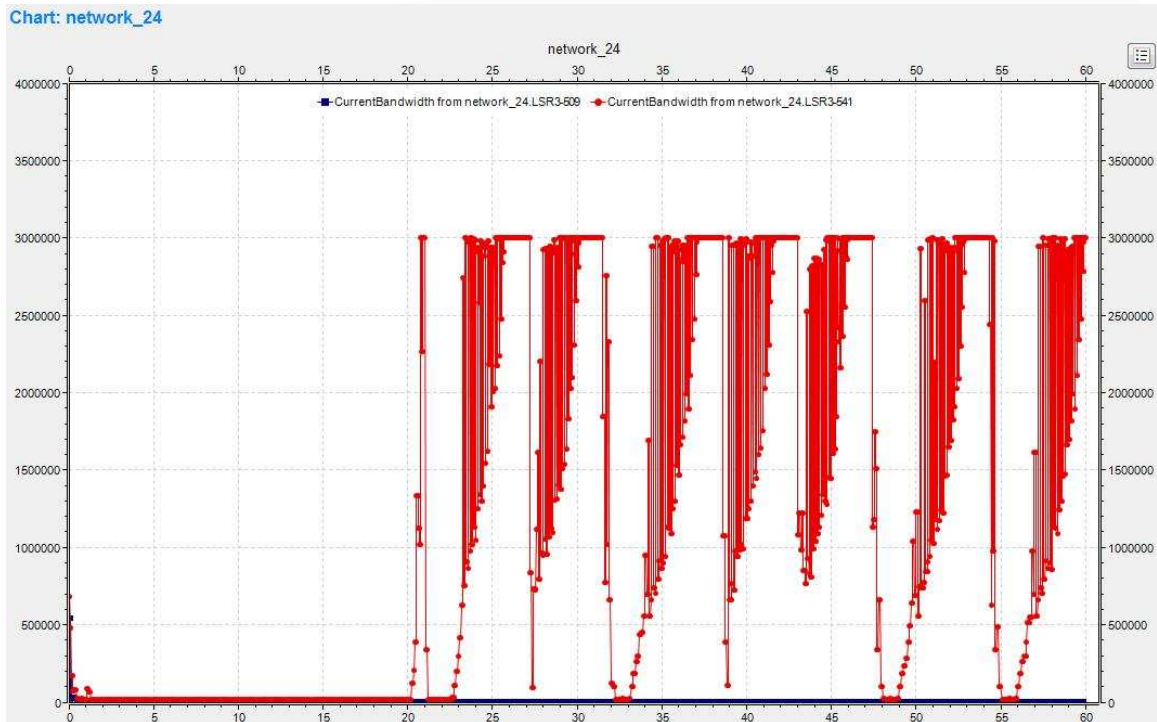


Εικόνα 126: Traffic splitting, end to end throughput από τον host5 στον host10

Αντίθετα, στην εικόνα 126 βλέπουμε ότι τώρα ο χρήστης 5 δεν κατάφερε να στείλει τα πακέτα του με το ρυθμό να έχει μεγάλες διακυμάνσεις. Στην εικόνα 127 βλέπουμε το ρυθμό με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα από τον δρομολογητή 1 προς τους δρομολογητές 4 και 5 (φορτίο χρήστη 1).



Εικόνα 127: Current Bandwidth, Μπλε: LSR1 – LSR4, Κόκκινη: LSR1 – LSR5



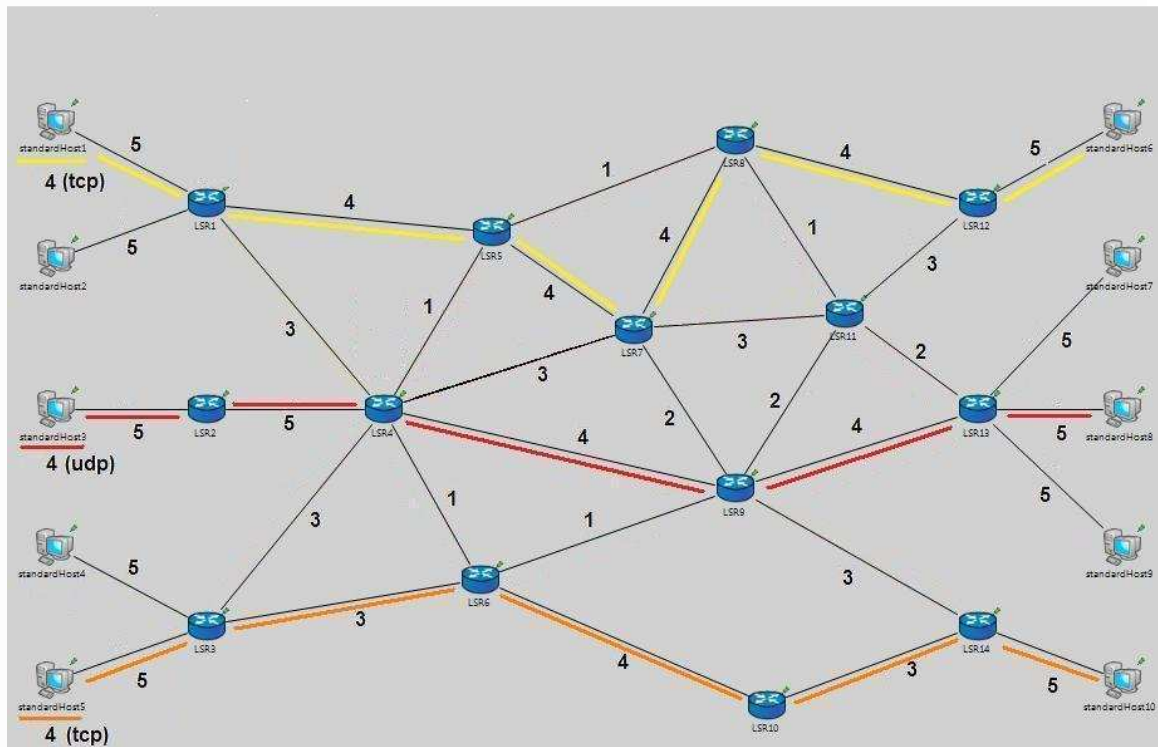
Εικόνα 128: Current Bandwidth, Μπλε: LSR3 – LSR4, Κόκκινη: LSR3 – LSR6

Στην εικόνα 128 βλέπουμε το ρυθμό με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα από τον δρομολογητή 3 προς τους δρομολογητές 4 και 6 (φορτίο χρήστη 5). Ενώ, στην εικόνα 129 βλέπουμε το ρυθμό με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα από τον δρομολογητή 4 προς τους δρομολογητές 5,7,9 και 6 (φορτίο χρήστη 3).



Εικόνα 129: Current Bandwidth, Μπλε: LSR4 – LSR5, Κόκκινη: LSR4 – LSR7, Πράσινη: LSR4 – LSR9, Κίτρινη: LSR4 – LSR6

Προσομοίωση 4

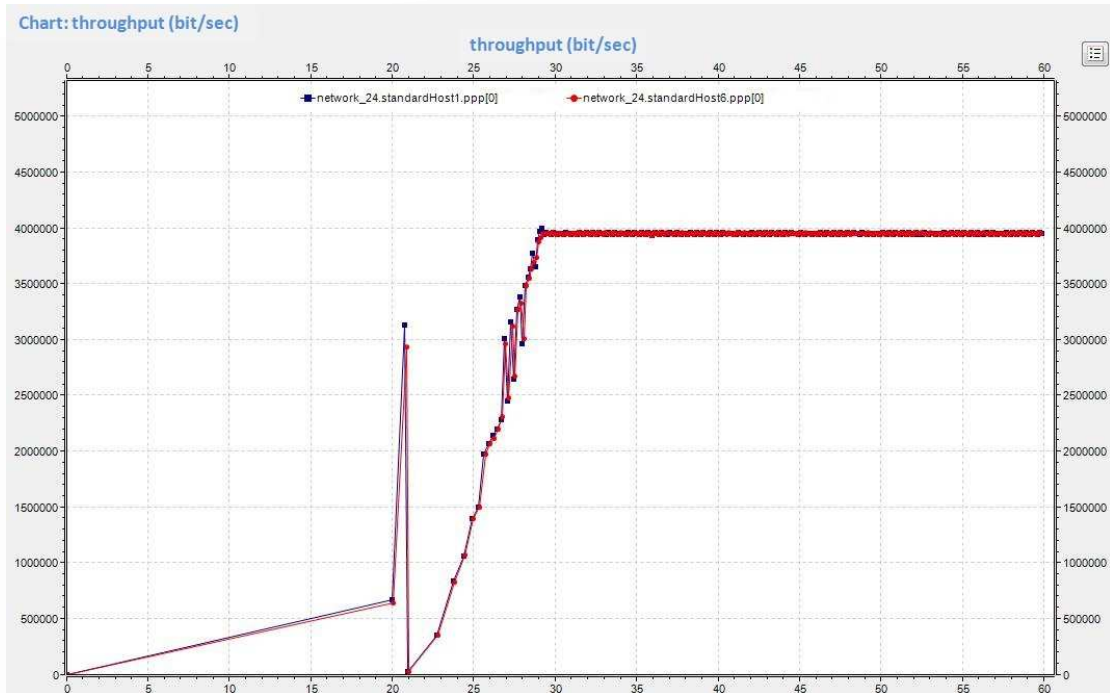


Εικόνα 130: Traffic splitting, udp flows, tcp flow

Εδώ πλέον οι 3 ροές δρομολογούνται από 3 μόνο μονοπάτια (εικόνα 130). Έχουμε αφαιρέσει δηλαδή τη δυνατότητα του multipath για να δείξουμε μόνο τα mpls paths. Με τον τρόπο αυτό βλέπουμε ότι δεν έχουμε πλέον χαμηλό network utilization καθώς και ότι η μία tcp ροή έχει μικρότερη απόδοση από όσο θα μπορούσε να έχει. Όπως βλέπουμε στον πίνακα 21 ο χρήστης 1 και ο χρήστης 3 δεν αντιμετώπισαν κάποιο πρόβλημα όμως ο χρήστης 5 έστειλε τα πακέτα του με ρυθμό μικρότερο από 3Mbps.

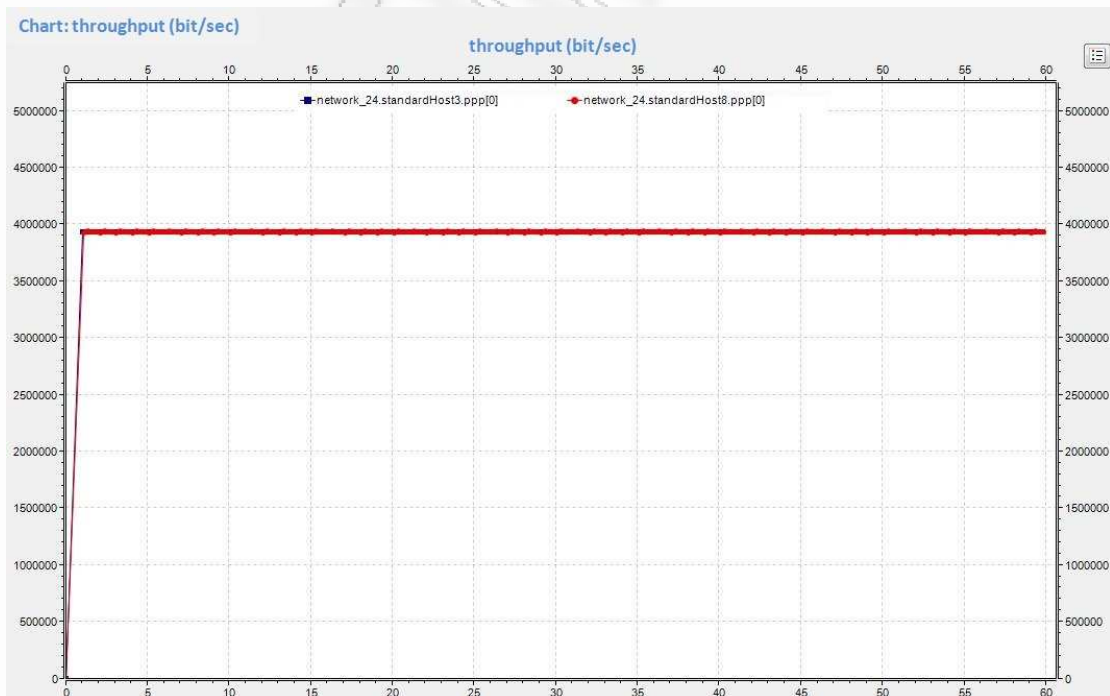
network 24 (load balancing – UDP,TCP) - Προσομοίωση 4		
	Received	Ρυθμός
sH1 --- sH6	16386500 bytes	4 Mbps
sH3 --- sH8	23556 packets	4 Mbps
sH5 --- sH10	8628100 bytes	< 3 Mbps

Πίνακας 21: Traffic splitting, udp flows, tcp flow

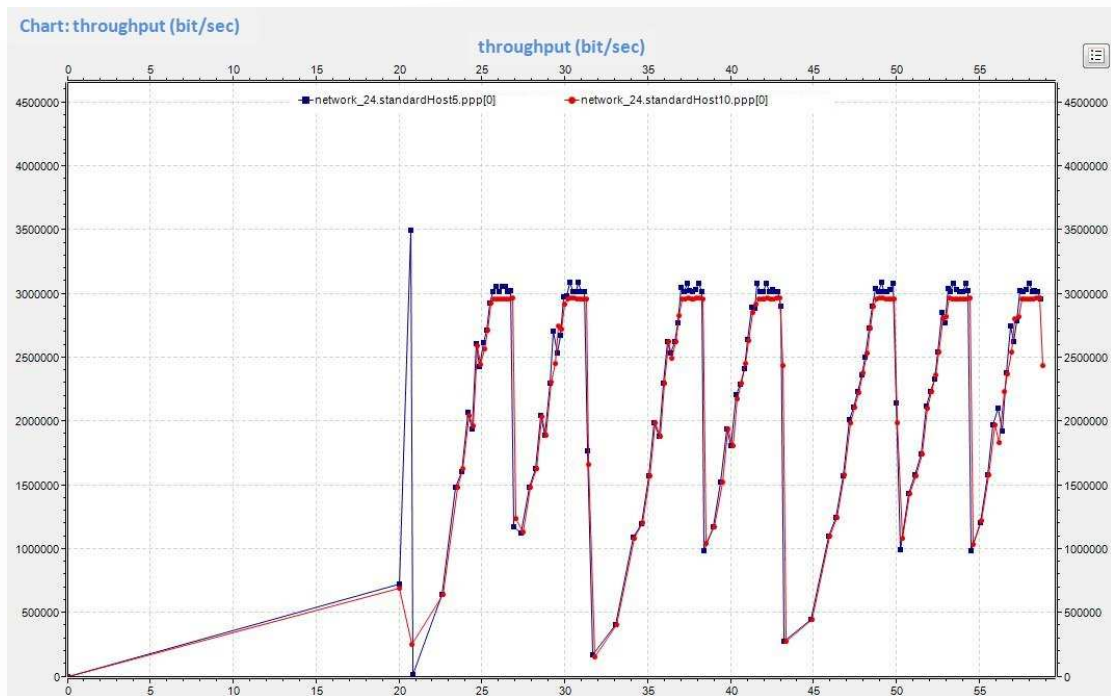


Εικόνα 131: Traffic splitting, end to end throughput από τον host1 στον host6

Στην εικόνα 131 βλέπουμε ότι ο πρώτος χρήστης απολαμβάνει την ποιότητα υπηρεσιών που χρειάζεται και στέλνει τα δεδομένα του με σταθερό ρυθμό 4Mbps. Το ίδιο βλέπουμε και στην εικόνα 132 για τον τρίτο χρήστη ο οποίος επίσης στέλνει τα δεδομένα του με ρυθμό 4Mbps.

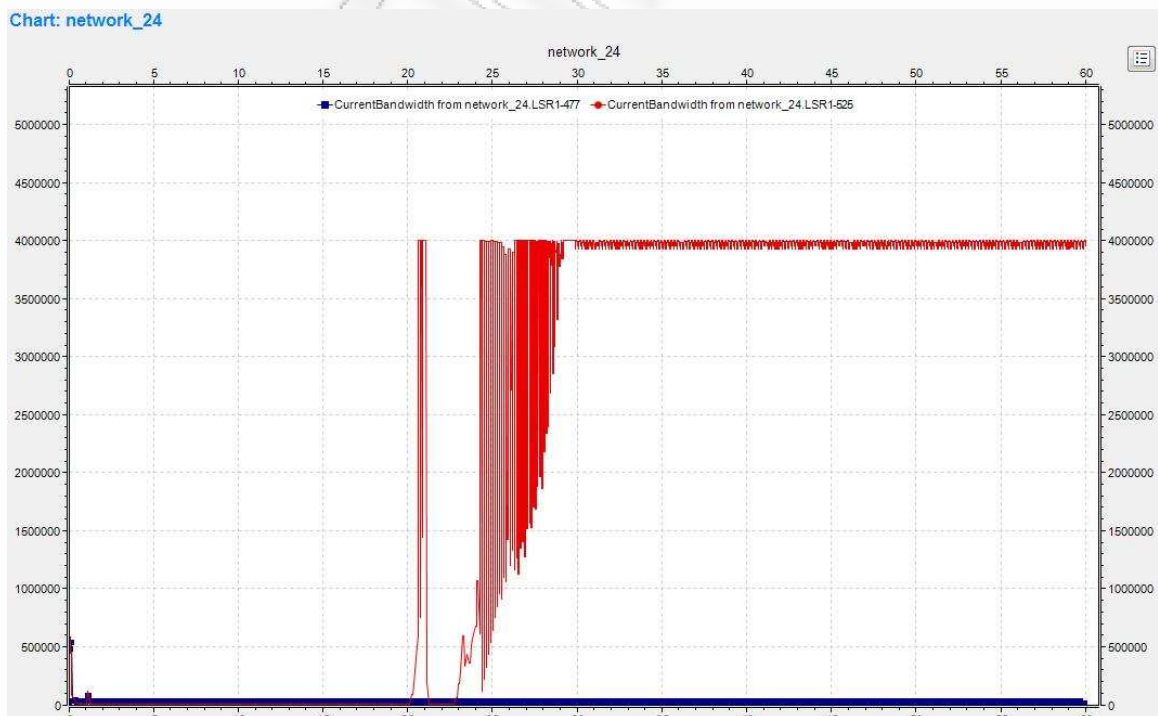


Εικόνα 132: Traffic splitting, end to end throughput από τον host3 στον host8

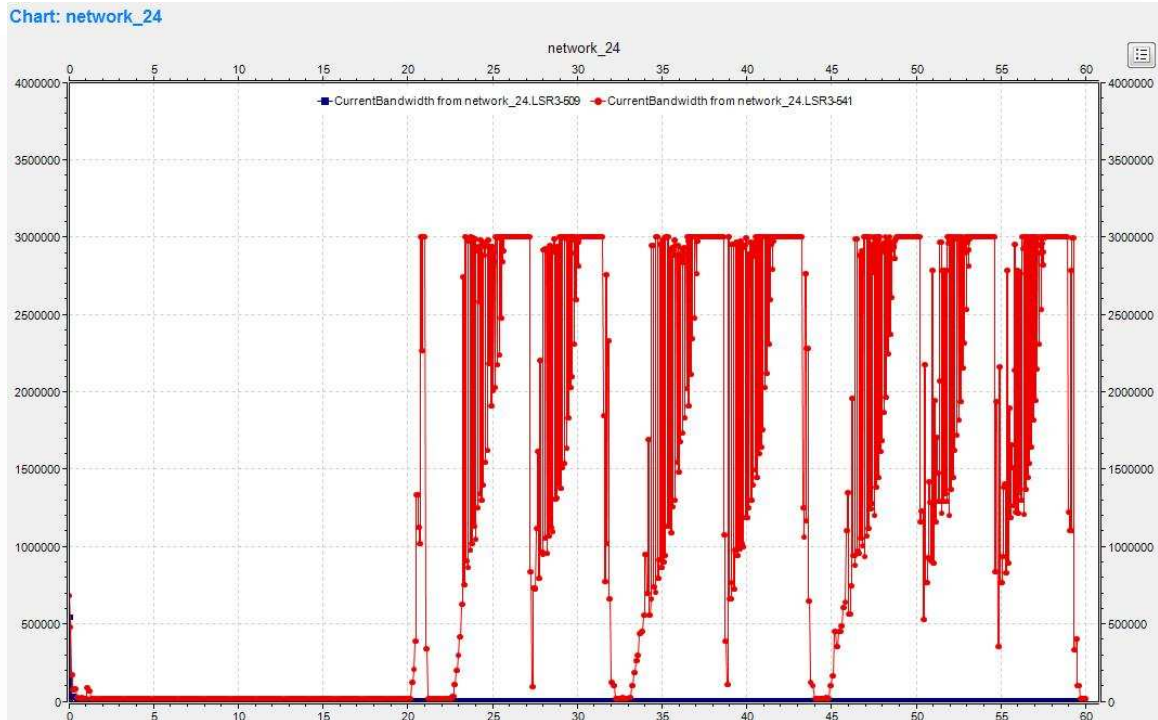


Εικόνα 133: Traffic splitting, end to end throughput από τον host5 στον host10

Στην εικόνα 133 βλέπουμε ότι ο χρήστης 5 δεν κατάφερε να στείλει τα πακέτα του, με το ρυθμό να έχει μεγάλες και απότομες διακυμάνσεις. Στην εικόνα 134 βλέπουμε το ρυθμό με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα από τον δρομολογητή 1 προς τους δρομολογητές 4 και 5 (φορτίο χρήστη 1).

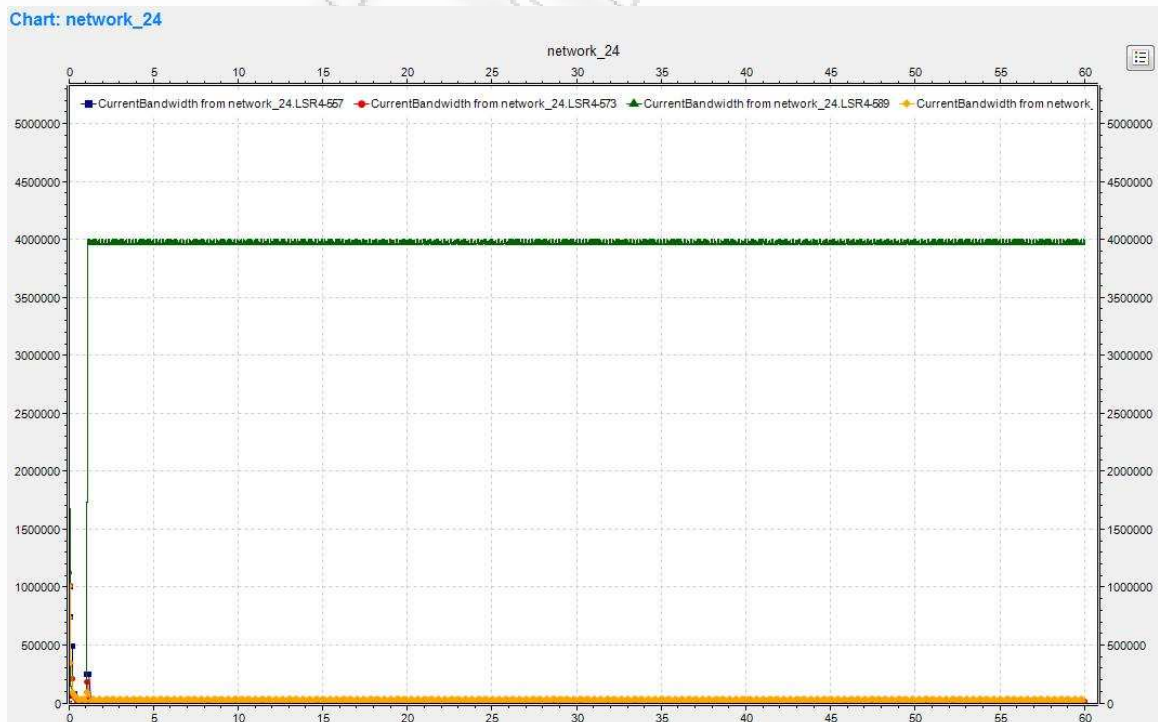


Εικόνα 134: Current Bandwidth, Μπλε: LSR1 – LSR4, Κόκκινη: LSR1 – LSR5



Εικόνα 135: Current Bandwidth, Μπλε: LSR3 – LSR4, Κόκκινη: LSR3 – LSR6

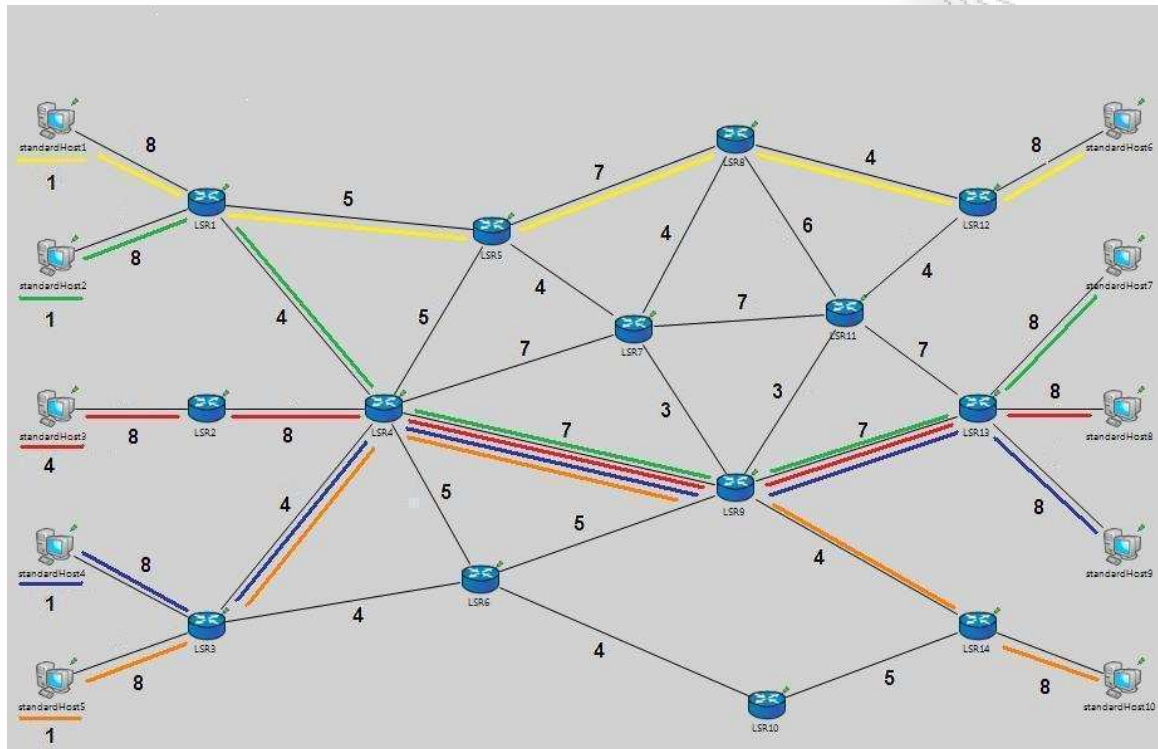
Στην εικόνα 135 βλέπουμε το ρυθμό με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα από τον δρομολογητή 3 προς τους δρομολογητές 4 και 6 (φορτίο χρήστη 5). Ενώ, στην εικόνα 136 βλέπουμε το ρυθμό με τον οποίο προωθούνται τα πακέτα από τον δρομολογητή 4 προς τους δρομολογητές 5,7,9 και 6 (φορτίο χρήστη 3).



Εικόνα 136: Current Bandwidth, Μπλε: LSR4 – LSR5, Κόκκινη: LSR4 – LSR7, Πράσινη: LSR4 – LSR9, Κίτρινη: LSR4 – LSR6

Κεφάλαιο 12: Energy Consumption

12.1 Σενάριο 1 (OSPF)

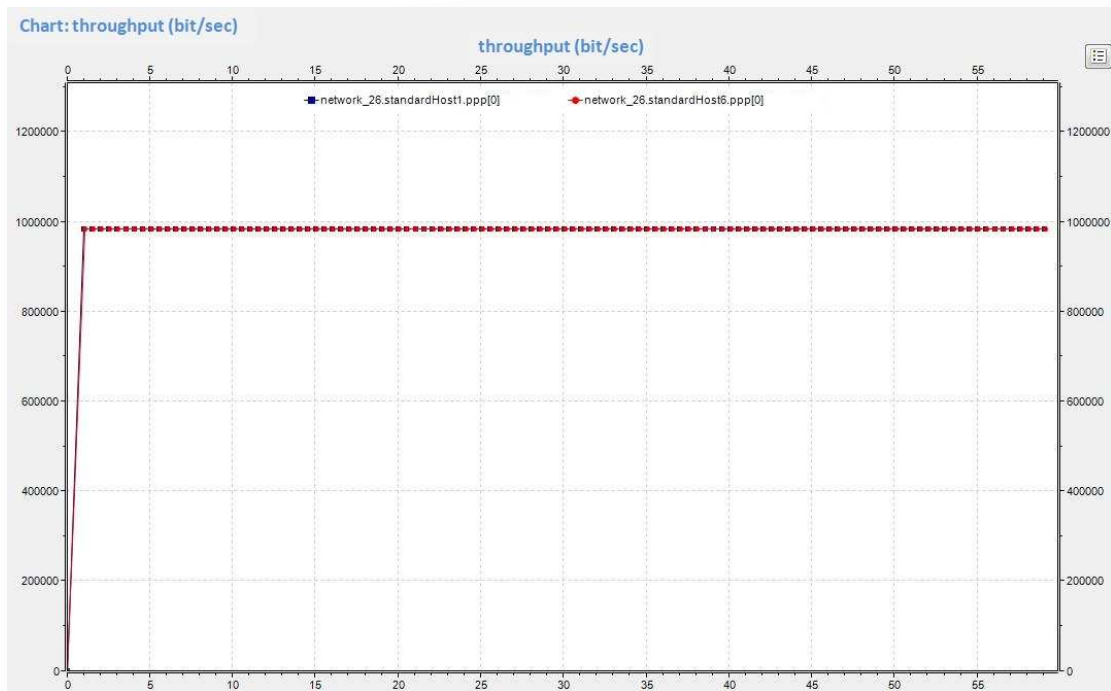


Εικόνα 137: Energy consumption, ospf

Στις επόμενες προσομοιώσεις μελετάμε το θέμα της κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο για τα διαφορετικά πρωτόκολλα και τεχνικές δρομολόγησης που χρησιμοποιούμε. Εδώ ξεκινάμε με δρομολόγηση OSPF (εικόνα 137). Θα δείξουμε και τις μετρήσεις που αφορούν την απόδοση του δικτύου όπως γίνονταν μέχρι τώρα και έχουν προστεθεί γραφήματα που δείχνουν την ενέργεια που καταναλώνεται σε κομβικές συνδέσεις. Η ενέργεια υπολογίζεται σύμφωνα με το utilization του link. Στον πίνακα 22 βλέπουμε πρώτα την απόδοση των χρηστών στο δίκτυο. Οι 5 χρήστες έστειλαν τα δεδομένα τους χωρίς απώλειες.

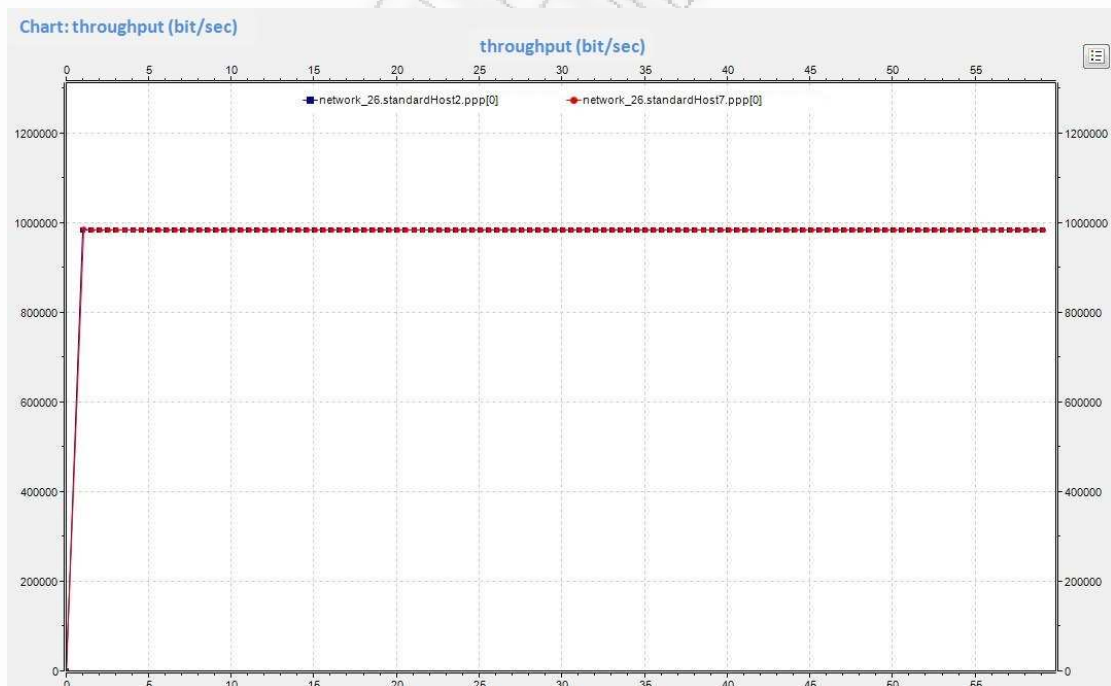
Network 26 (OSPF)		
	Received	Ρυθμός
sH1 --- sH6	5890 packets	1 Mbps
sH2 --- sH7	5890 packets	1 Mbps
sH3 --- sH8	23557 packets	4 Mbps
sH4 --- sH9	5889 packets	1 Mbps
sH5 --- sH10	5889 packets	1 Mbps

Πίνακας 22: Energy consumption, ospf, end to end throughput

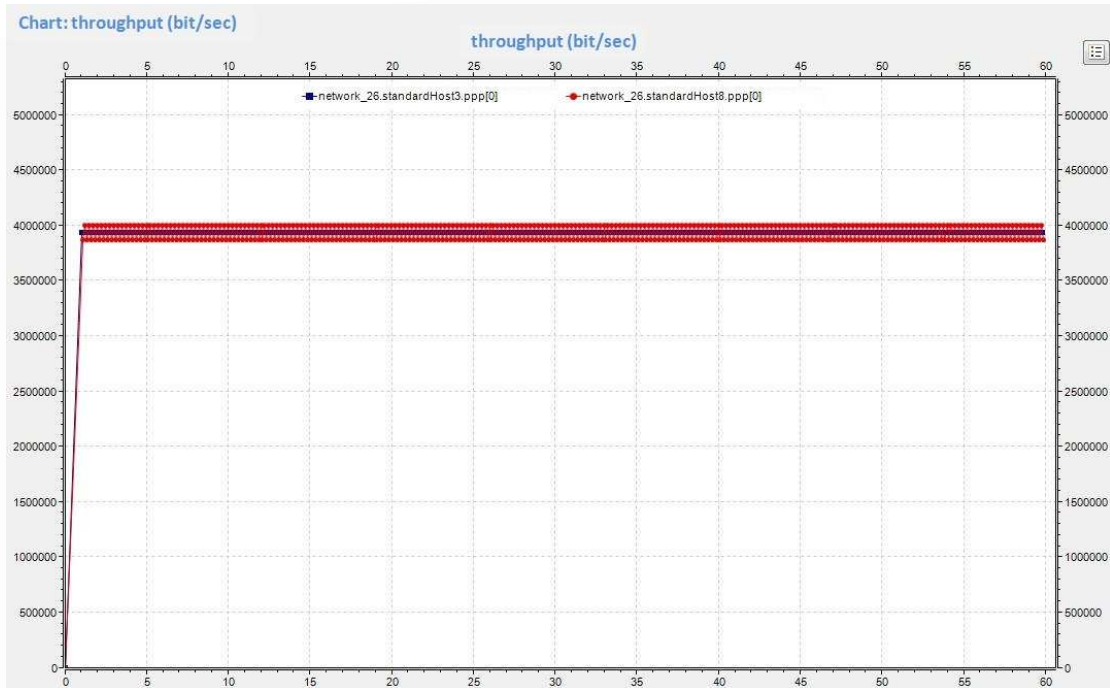


Εικόνα 138: Energy consumption, end to end throughput από τον host1 στον host6

Στις εικόνες 138-142 μπορούμε να δούμε το end to end throughput για τους 5 χρήστες και να επιβεβαιώσουμε ότι και οι 5 είχαν το σταθερό ρυθμό που επιθυμούσαν.

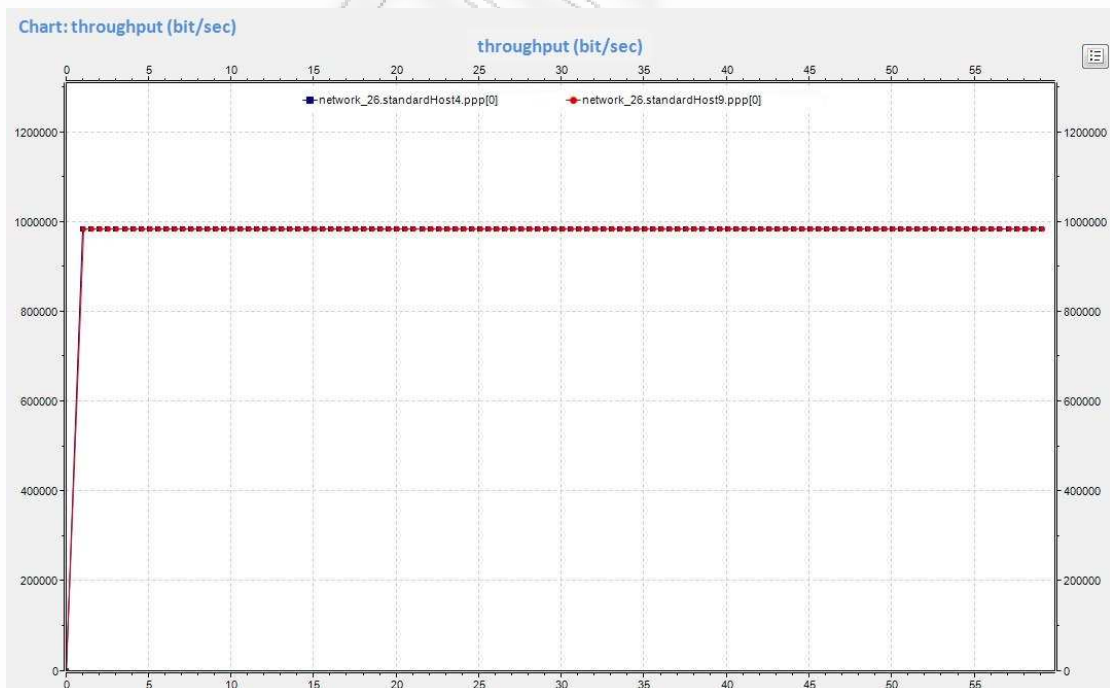


Εικόνα 139: Energy consumption, end to end throughput από τον host2 στον host7

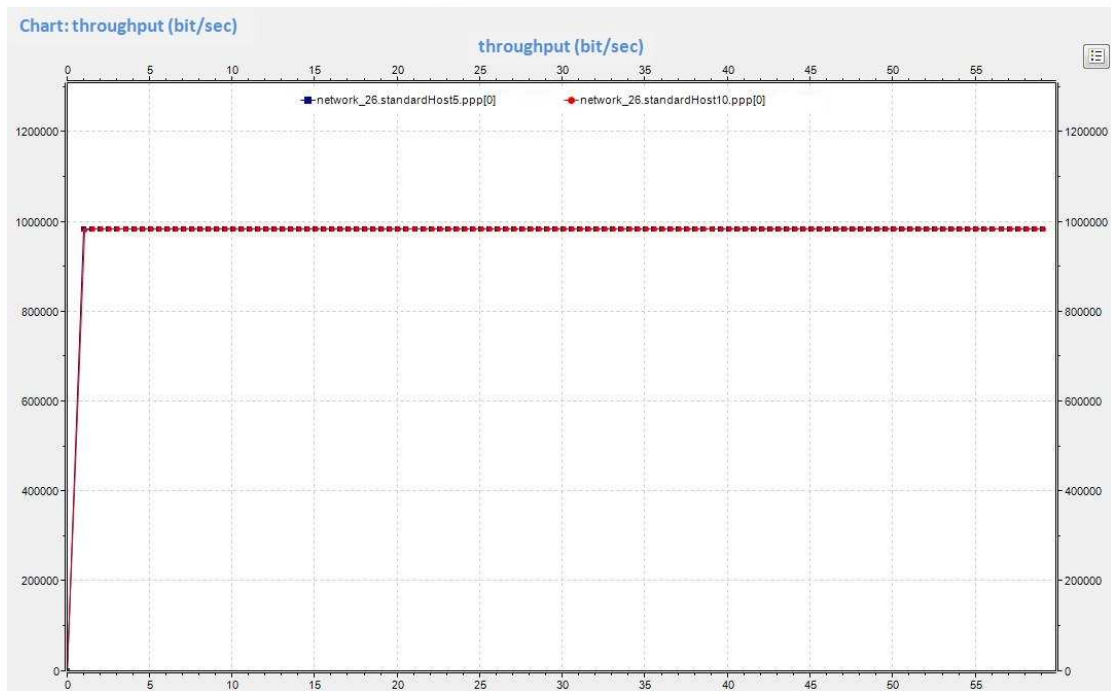


Εικόνα 140: Energy consumption, end to end throughput από τον host3 στον host8

Στη συνέχεια θα δούμε περισσότερα στοιχεία για 3 συνδέσεις, από τον δρομολογητή 3 στον 4, από τον 4 στον 9 και από τον 9 στον 13. Ο λόγος είναι ότι σύμφωνα με τις προσομοιώσεις που έχουμε μελετήσει, αυτές οι συνδέσεις συνήθως μαζεύουν πολύ κίνηση και οι διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιήσαμε στοχεύουν στο αντίθετο.

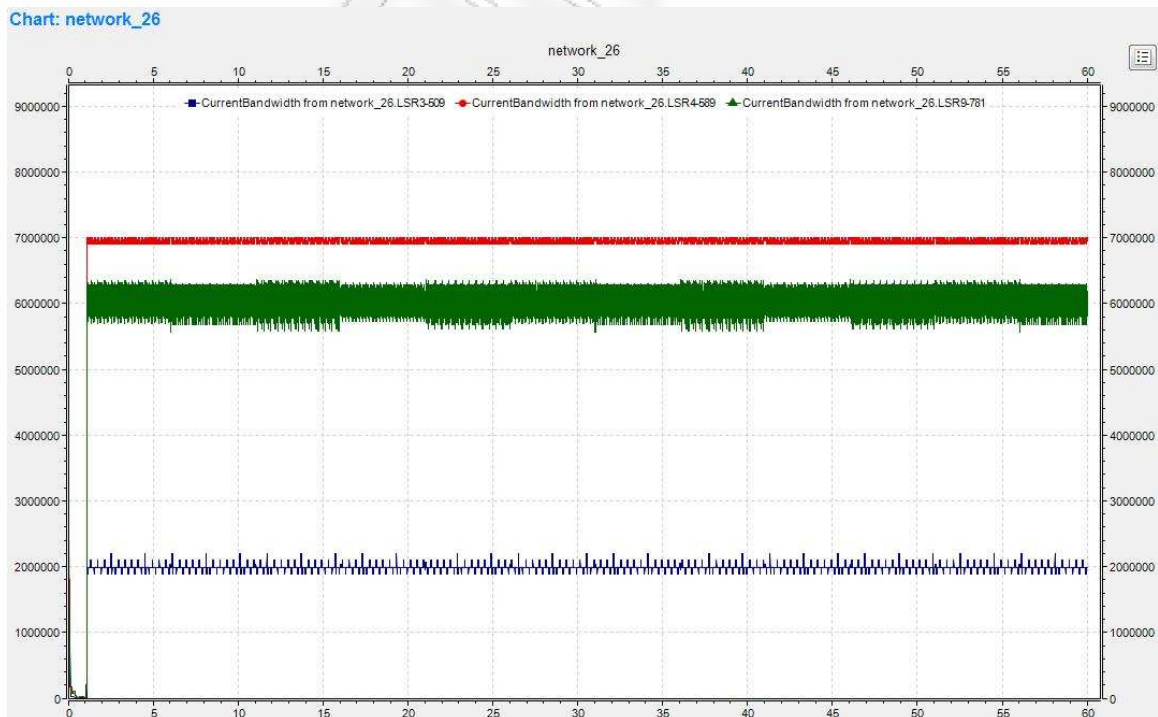


Εικόνα 141: Energy consumption, end to end throughput από τον host4 στον host9

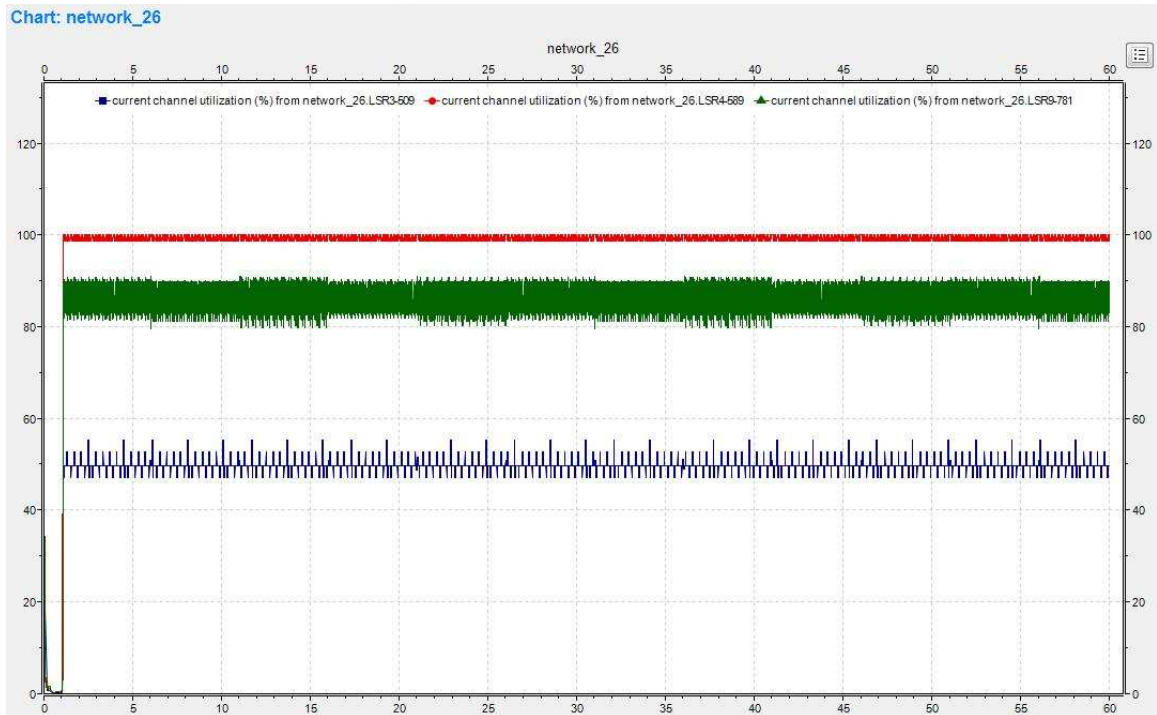


Εικόνα 142: Energy consumption, end to end throughput από τον host5 στον host10

Οπότε, από τις μεταβολές σε αυτές τις συνδέσεις θα διαπιστώσουμε πως μεταβάλλεται και η κατανάλωση της ενέργειας. Στην εικόνα 143 βλέπουμε το φορτίο που προωθείται σε αυτές τις συνδέσεις κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η σύνδεση μεταξύ των δρομολογητών 4 και 9 εξυπηρετεί το μεγαλύτερο φορτίο.

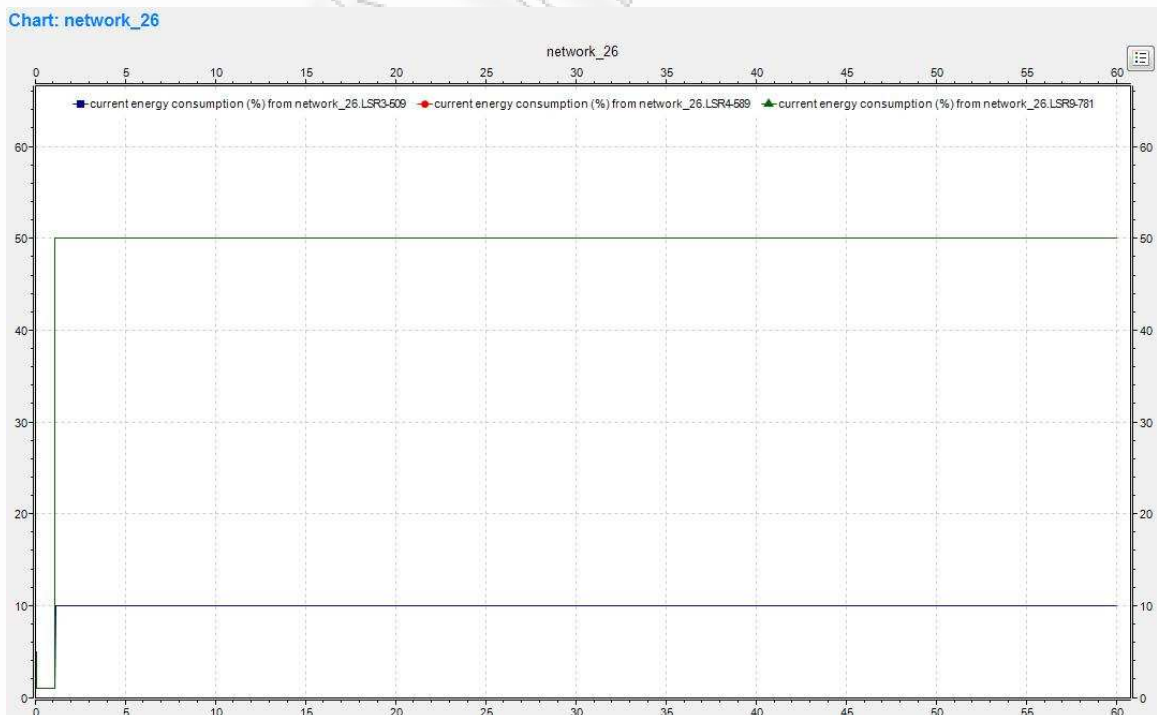


Εικόνα 143: Current Bandwidth, ΜΠΛΕ: LSR3->LSR4, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR4->LSR9, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR9->LSR13



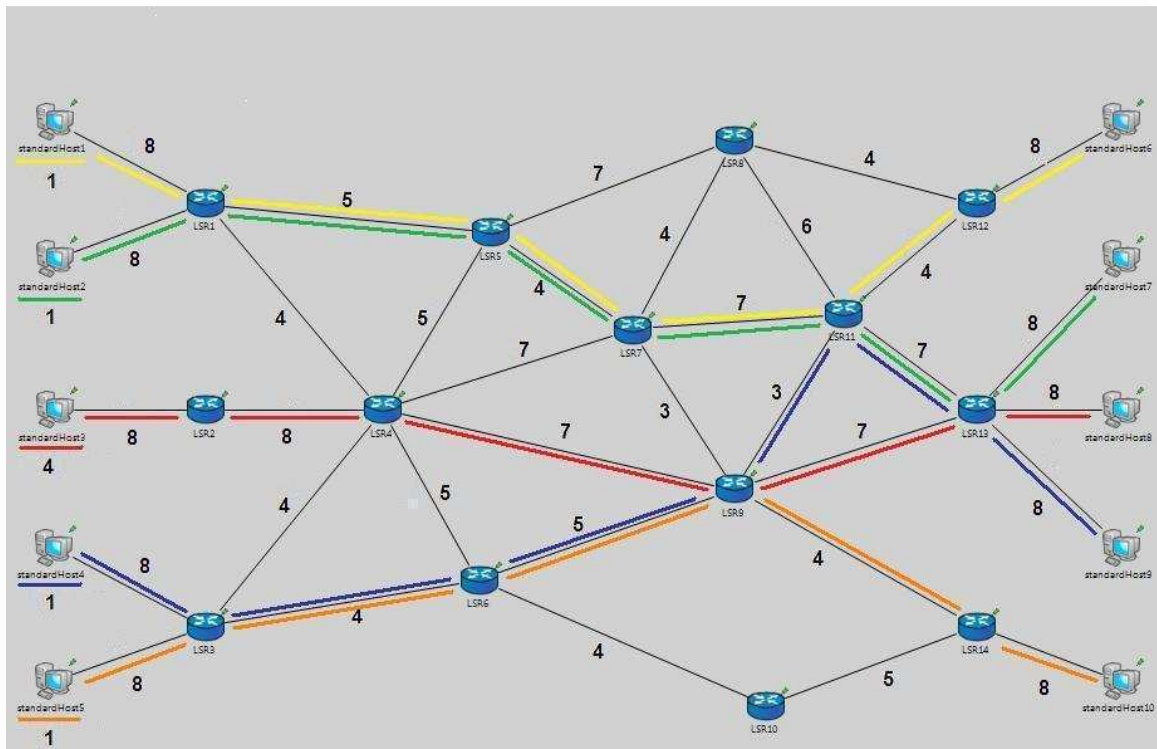
Εικόνα 144: Channel utilization, ΜΠΛΕ: LSR3->LSR4, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR4->LSR9, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR9->LSR13

Στην εικόνα 144 μπορούμε να δούμε ότι η χρησιμοποίηση σε αυτές τις συνδέσεις είναι 50%, 85% και 100%. Στην εικόνα 145 μπορούμε να δούμε αυτός ο βαθμός χρησιμοποίησης των συνδέσεων σε πόση ενέργεια αντιστοιχεί. Προφανώς όσο αυξάνεται ο βαθμός χρησιμοποίησης μιας σύνδεσης αυξάνεται και η ενέργεια.



Εικόνα 145: Energy Consumption, ΜΠΛΕ: LSR3->LSR4, ΚΟΚΚΙΝΗ*: LSR4->LSR9, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR9->LSR13 (*Η κόκκινη γραμμή ταυτίζεται με την πράσινη)

12.2 Σενάριο 2 (MPLS)

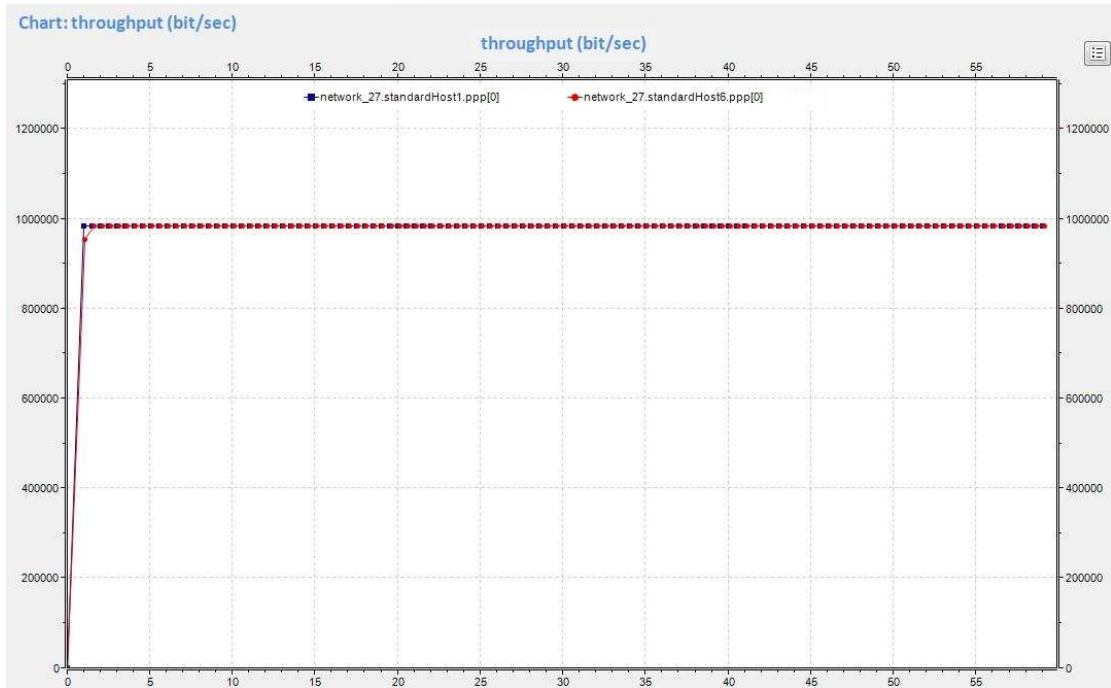


Εικόνα 146: Energy consumption, mpls

Σε αυτό το σενάριο ο στόχος είναι να δείξουμε πως βελτιώθηκε η κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο χρησιμοποιώντας mpls paths και κατευθύνοντάς τα με τέτοιο τρόπο ώστε να μοιράζεται η κίνηση και να αποφεύγεται η υπερφόρτωση κάποιας σύνδεσης (εικόνα 146). Πάλι ακολουθούν μετρήσεις τόσο για την απόδοση όσο και για την ενέργεια, επειδή η απόδοση του δικτύου εξακολουθεί να μας ενδιαφέρει. Ο στόχος δεν είναι να έχουμε τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας με οποιοδήποτε κόστος αλλά να έχουμε λιγότερη κατανάλωση ενέργειας ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του χρήστη. Στον πίνακα 23 επιβεβαιώνουμε πως οι χρήστες είχαν την ποιότητα υπηρεσιών που ήθελαν.

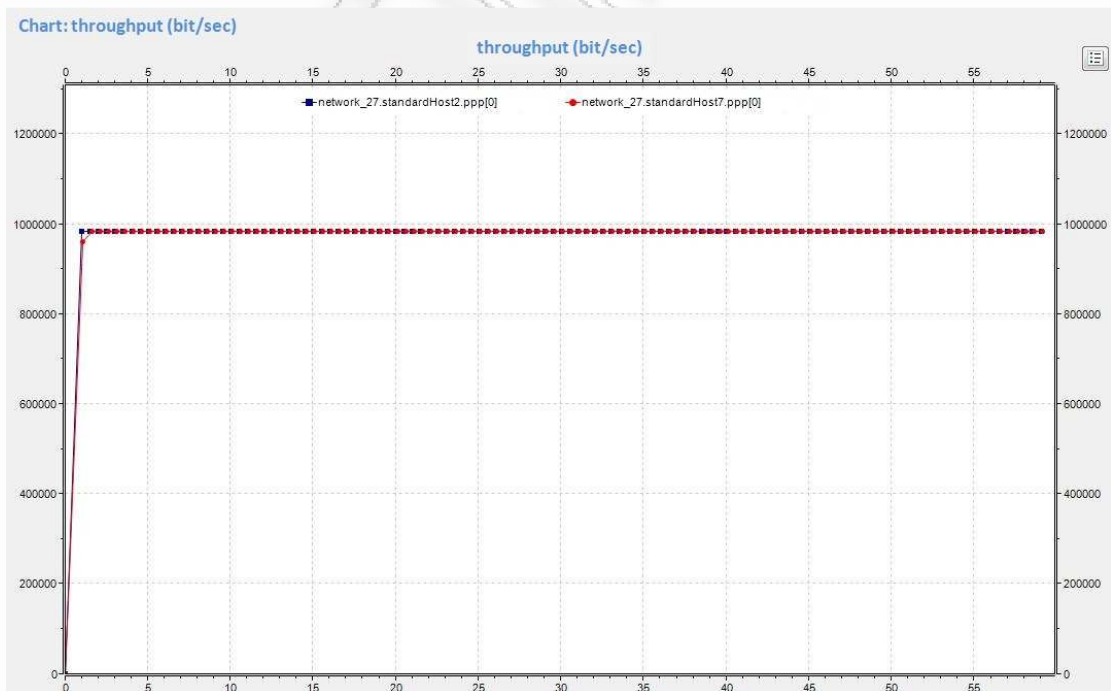
Network 27 (MPLS)		
	Received	Ρυθμός
sH1 --- sH6	5888 packets	1 Mbps
sH2 --- sH7	5889 packets	1 Mbps
sH3 --- sH8	23558 packets	4 Mbps
sH4 --- sH9	5888 packets	1 Mbps
sH5 --- sH10	5890 packets	1 Mbps

Πίνακας 23: Energy consumption, mpls, end to end throughput

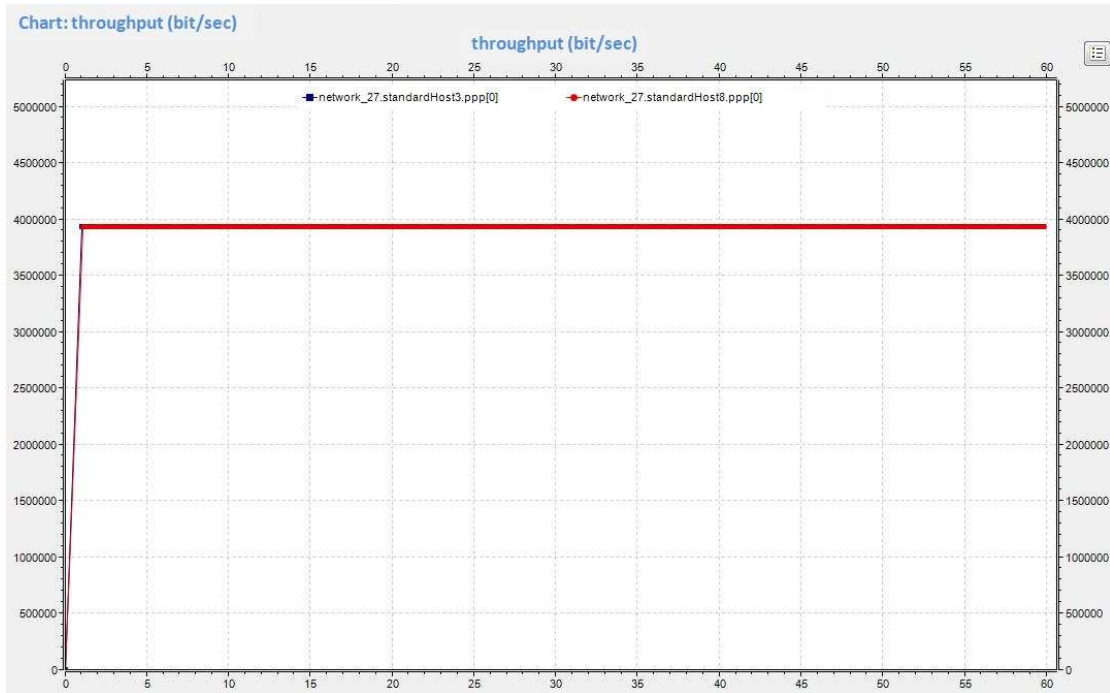


Εικόνα 147: Energy consumption, end to end throughput από τον host1 στον host6

Στις εικόνες 147-151 μπορούμε να δούμε το end to end throughput για τους 5 χρήστες και να επιβεβαιώσουμε ότι και οι 5 είχαν το σταθερό ρυθμό που επιθυμούσαν.

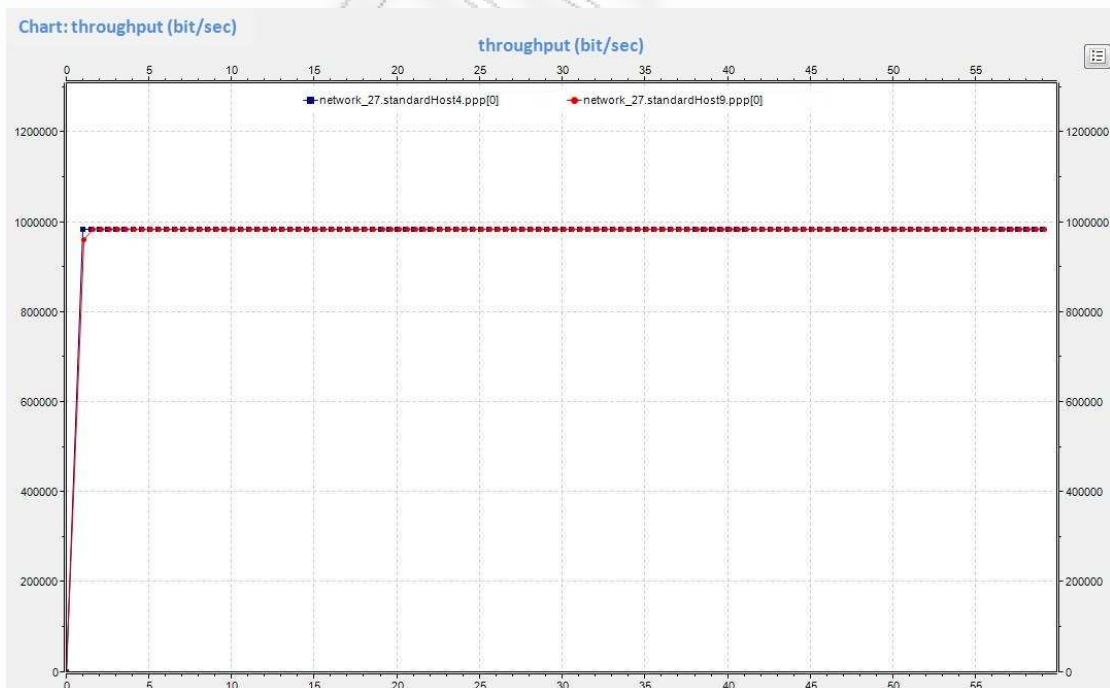


Εικόνα 148: Energy consumption, end to end throughput από τον host2 στον host7

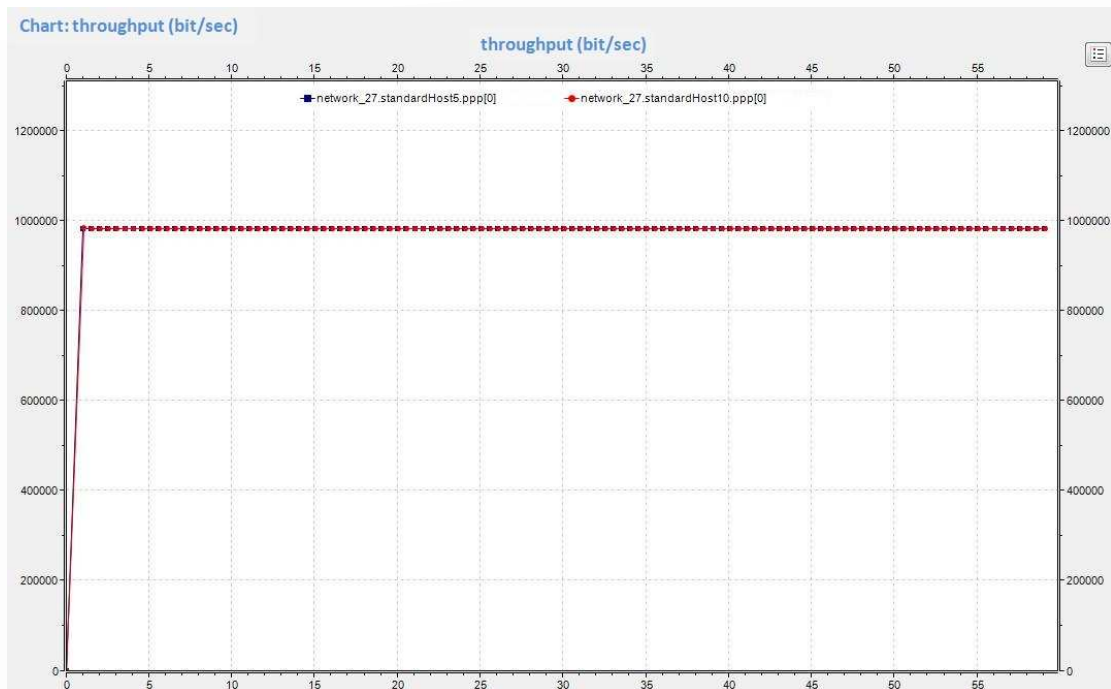


Εικόνα 149: Energy consumption, end to end throughput από τον host3 στον host8

Στη συνέχεια θα δούμε πάλι περισσότερα στοιχεία για 4 συνδέσεις. Ο λόγος είναι ότι με βάση τις αλλαγές στη δρομολόγηση, σε αυτές τις συνδέσεις πλέον έχει αλλάξει η κίνηση που περνάει και θέλουμε να μελετήσουμε αυτήν την αλλαγή τόσο ως προς την απόδοση όσο και ως προς την κατανάλωση ενέργειας.

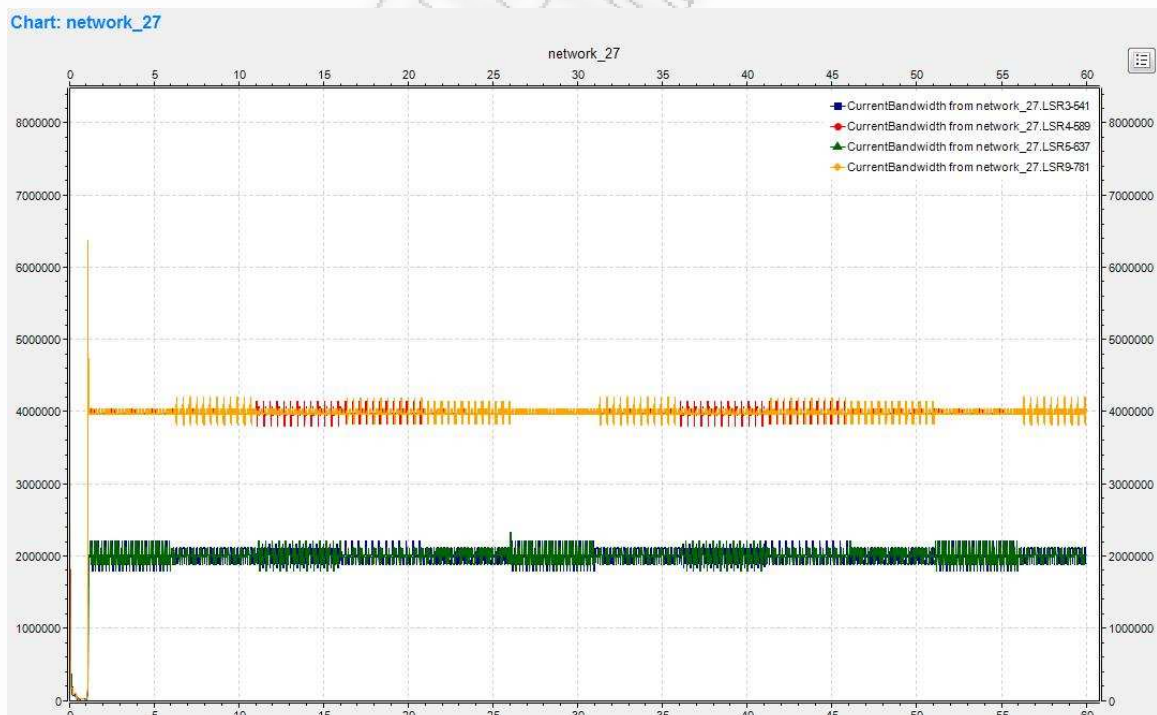


Εικόνα 150: Energy consumption, end to end throughput από τον host4 στον host9

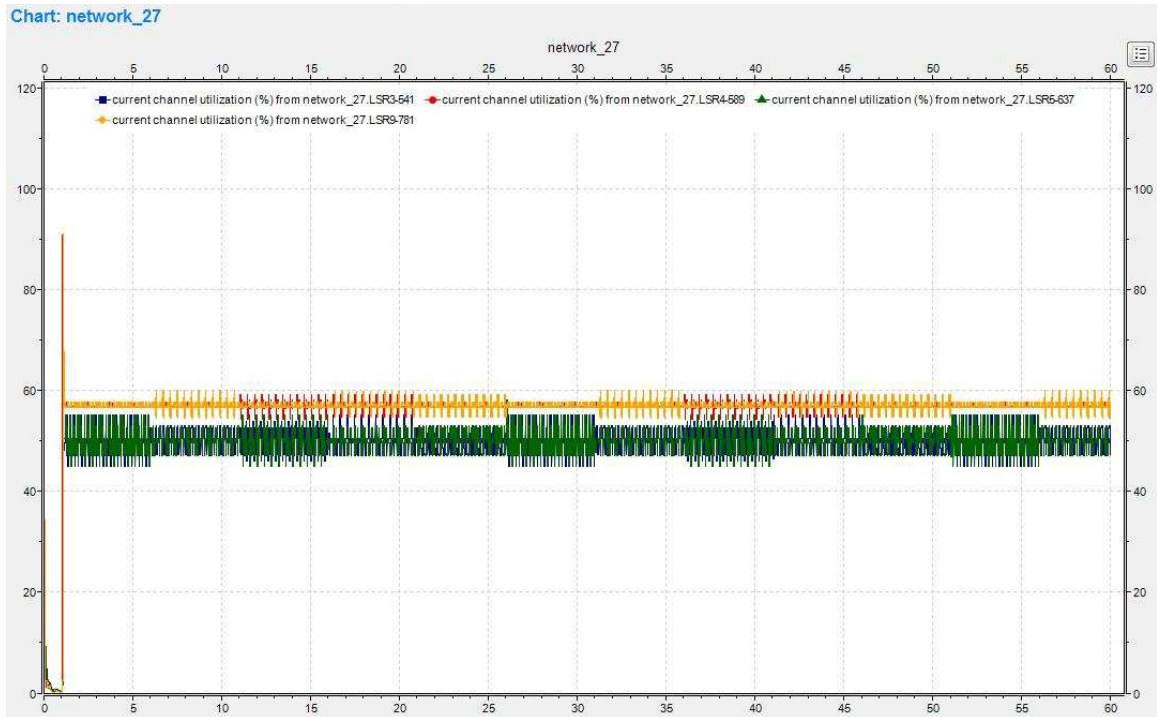


Εικόνα 151: Energy consumption, end to end throughput από τον host5 στον host10

Στην εικόνα 152 βλέπουμε το φορτίο που προωθείται σε αυτές τις συνδέσεις κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Οι συνδέσεις μεταξύ των δρομολογητών 4 με 9 και 9 με 13 εξυπηρετούν το μεγαλύτερο φορτίο (χαμηλότερο όμως από πριν).

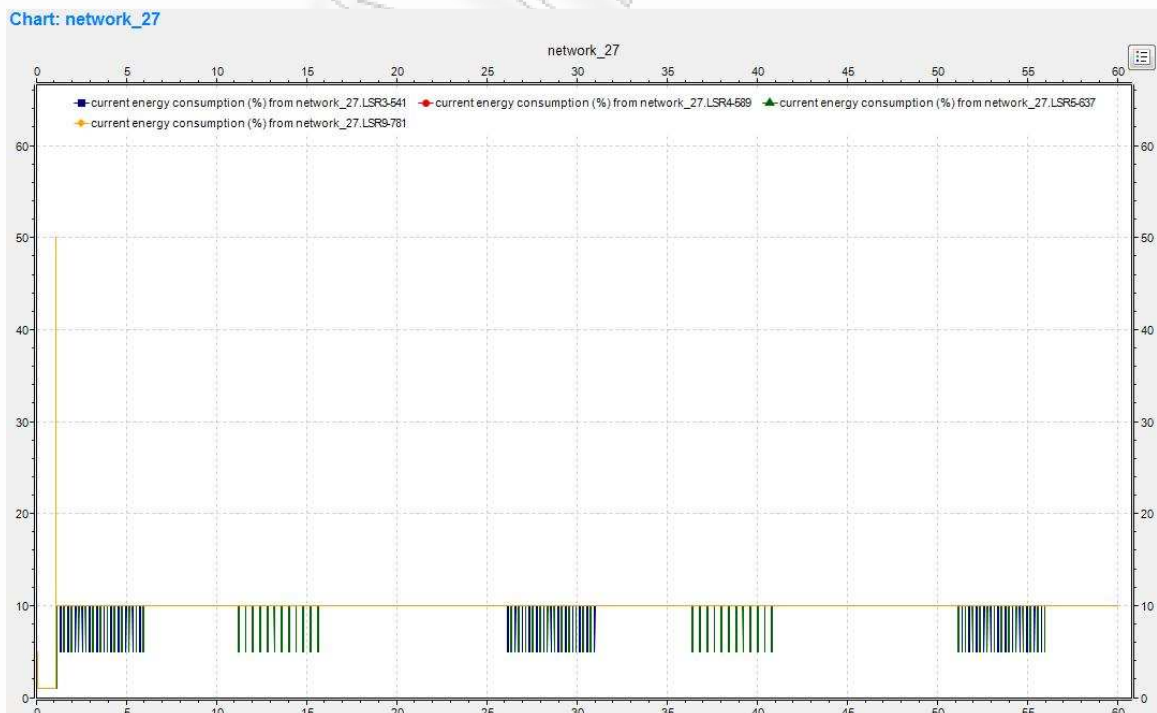


Εικόνα 152: Current Bandwidth, ΜΠΛΕ: LSR3->LSR6, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR4->LSR9, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR5->LSR7, ΚΙΤΡΙΝΗ: LSR9->LSR13



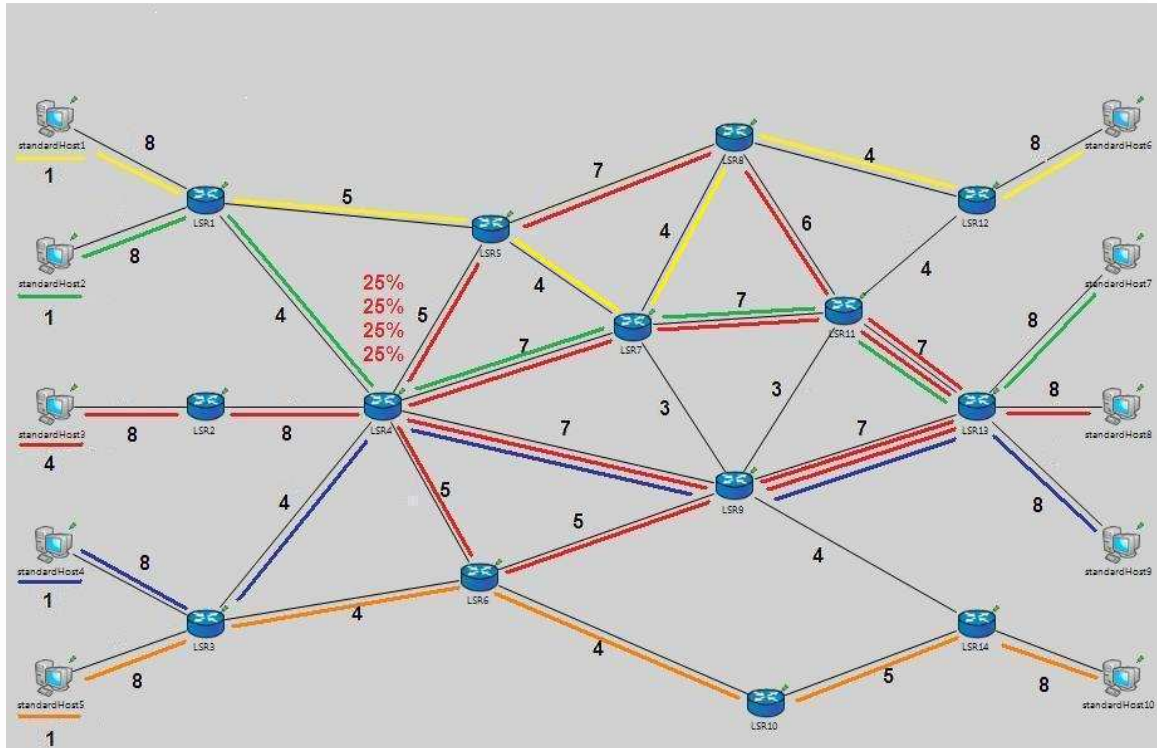
Εικόνα 153: Channel utilization, ΜΠΛΕ: LSR3->LSR6, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR4->LSR9, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR5->LSR7, ΚΙΤΡΙΝΗ: LSR9->LSR13

Στην εικόνα 153 μπορούμε να δούμε ότι η χρησιμοποίηση σε αυτές τις συνδέσεις είναι μεταξύ 50% και 60%. Στην εικόνα 154 μπορούμε να δούμε αυτός ο βαθμός χρησιμοποίησης των συνδέσεων σε πόση ενέργεια αντιστοιχεί. Προφανώς, τώρα καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια.



Εικόνα 154: Energy Consumption, ΜΠΛΕ: LSR3->LSR6, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR4->LSR9, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR5->LSR7, ΚΙΤΡΙΝΗ: LSR9->LSR13

12.3 Σενάριο 3 (LOAD BALANCING)

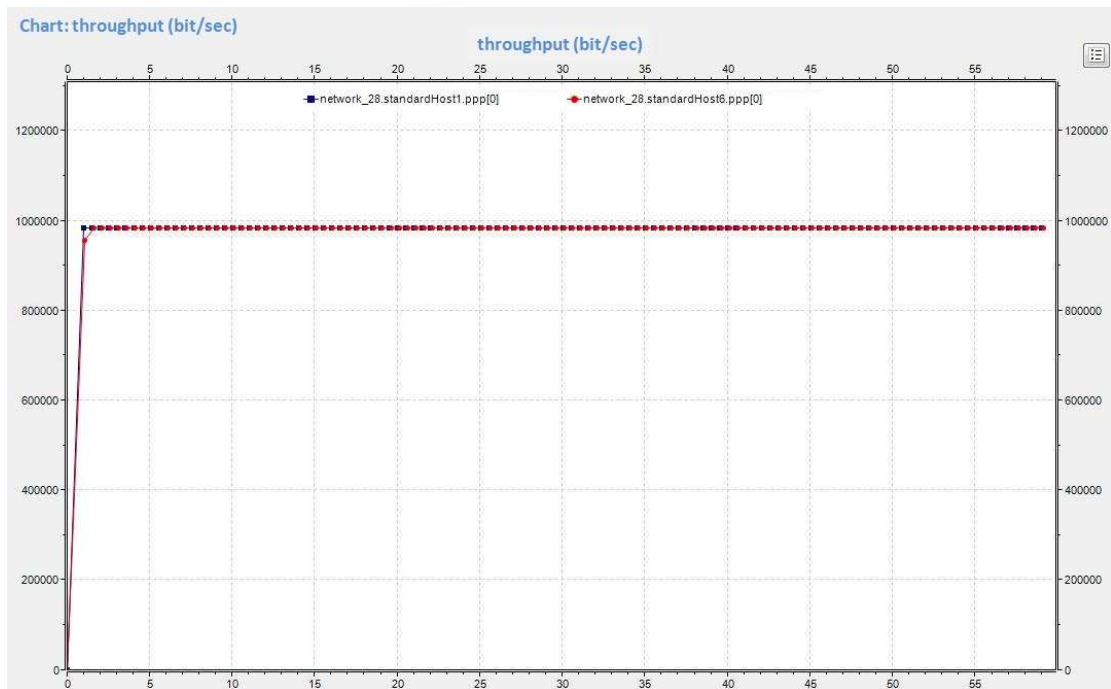


Εικόνα 155: Energy consumption, load balancing

Εδώ βελτιώνουμε ακόμη περισσότερο την κατανάλωση ενέργειας γιατί εκτός από mpls paths χρησιμοποιούμε και την τεχνική του multipath (εικόνα 155). Με τον τρόπο αυτό μία ροή των 4Mbps την μετατρέπουμε σε 4 ροές του 1Mbps κρατώντας με τον τρόπο αυτό χαμηλά την κατανάλωση ενέργειας. Οπωσδήποτε, όμως, παρέχοντας στους χρήστες την ποιότητα υπηρεσιών που έχουν ζητήσει (πίνακας 24).

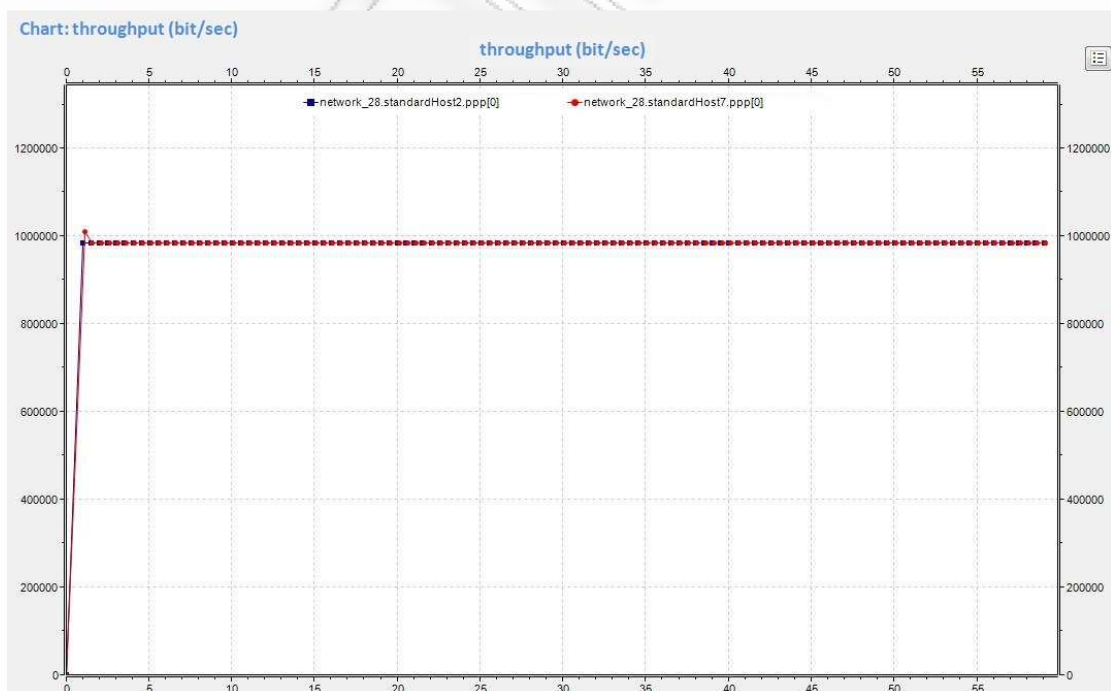
Network 28 (LOAD BALANCING)		
	Received	Ρυθμός
sH1 --- sH6	5888 packets	1 Mbps
sH2 --- sH7	5889 packets	1 Mbps
sH3 --- sH8	23553 packets	4 Mbps
sH4 --- sH9	5890 packets	1 Mbps
sH5 --- sH10	5890 packets	1 Mbps

Πίνακας 24: Energy consumption, load balancing, end to end throughput

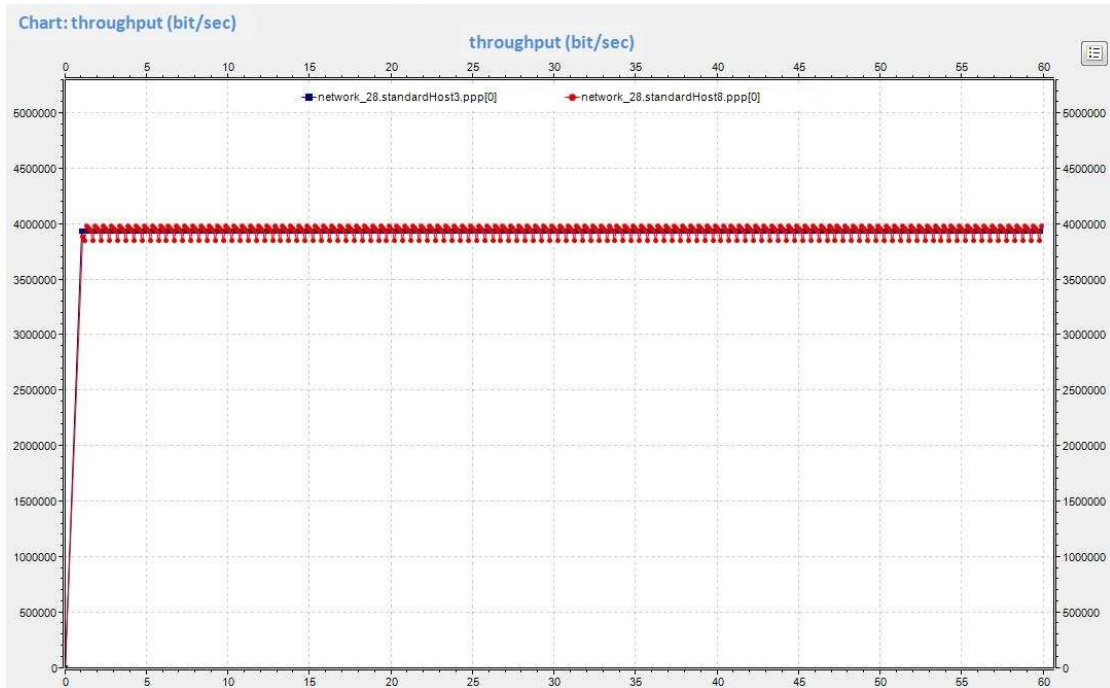


Εικόνα 156: Energy consumption, end to end throughput από τον host1 στον host6

Στις εικόνες 156-160 μπορούμε να δούμε το end to end throughput για τους 5 χρήστες και να επιβεβαιώσουμε ότι και οι 5 είχαν το σταθερό ρυθμό που επιθυμούσαν.

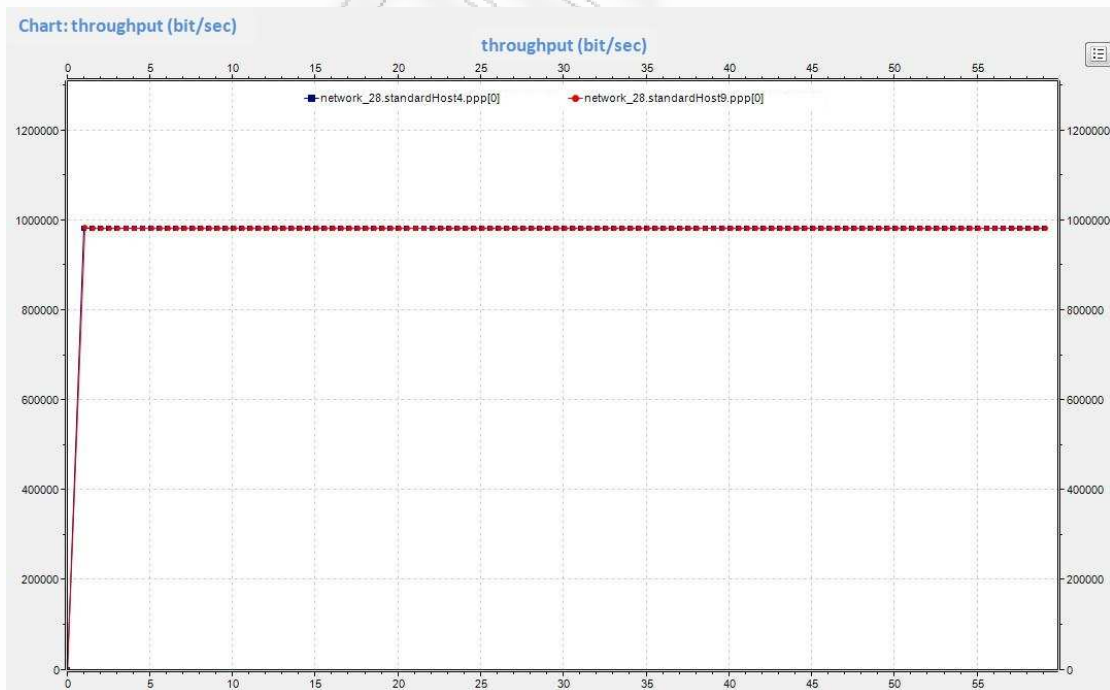


Εικόνα 157: Energy consumption, end to end throughput από τον host2 στον host7

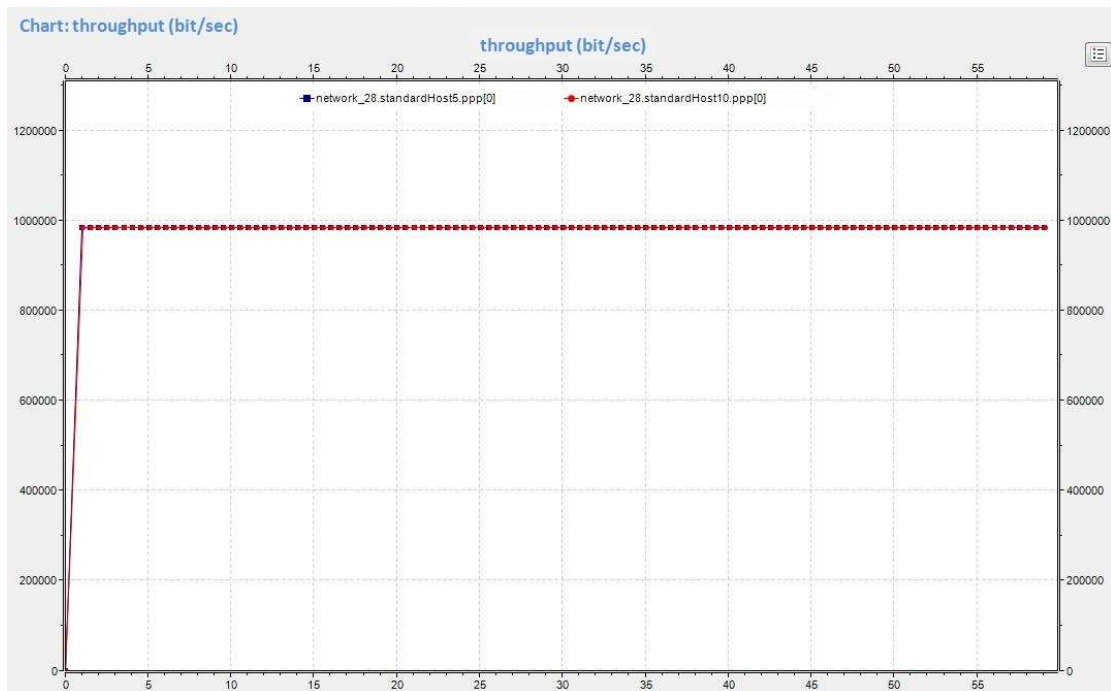


Εικόνα 158: Energy consumption, end to end throughput από τον host3 στον host8

Στη συνέχεια θα δούμε πάλι περισσότερα στοιχεία για 3 συνδέσεις. Ο λόγος είναι ότι με βάση τις αλλαγές στη δρομολόγηση, σε αυτές τις συνδέσεις πλέον έχει αλλάξει η κίνηση που περνάει και θέλουμε να μελετήσουμε αυτήν την αλλαγή τόσο ως προς την απόδοση όσο και ως προς την κατανάλωση ενέργειας.

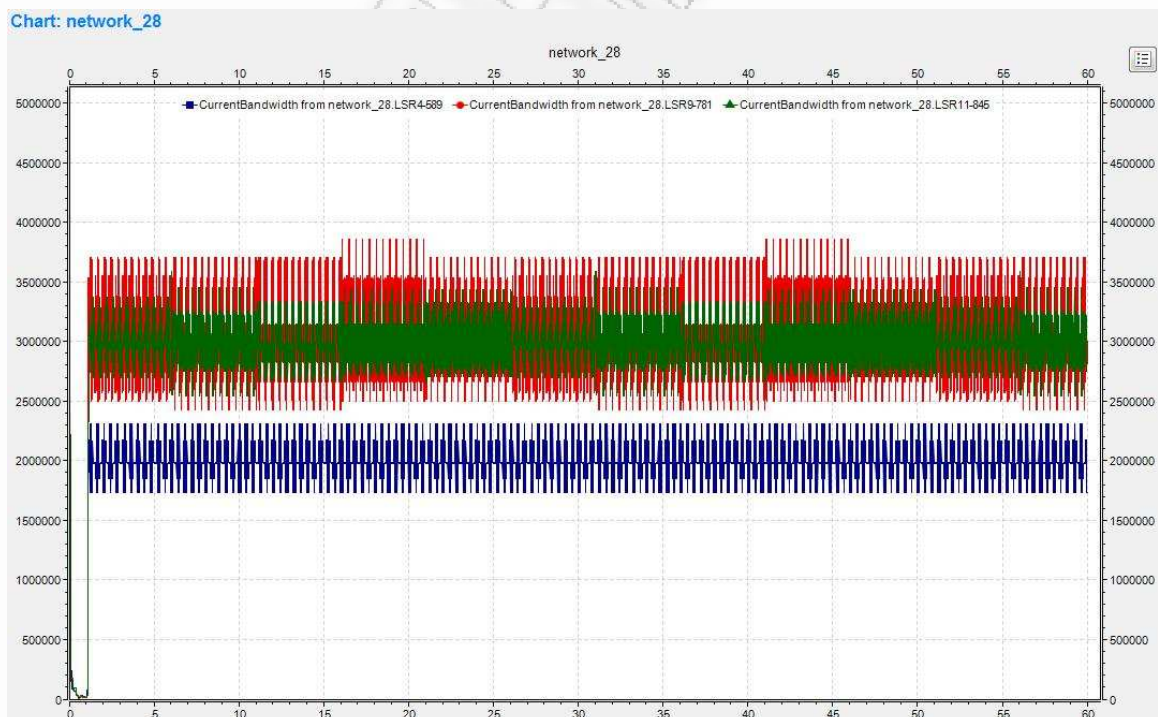


Εικόνα 159: Energy consumption, end to end throughput από τον host4 στον host9

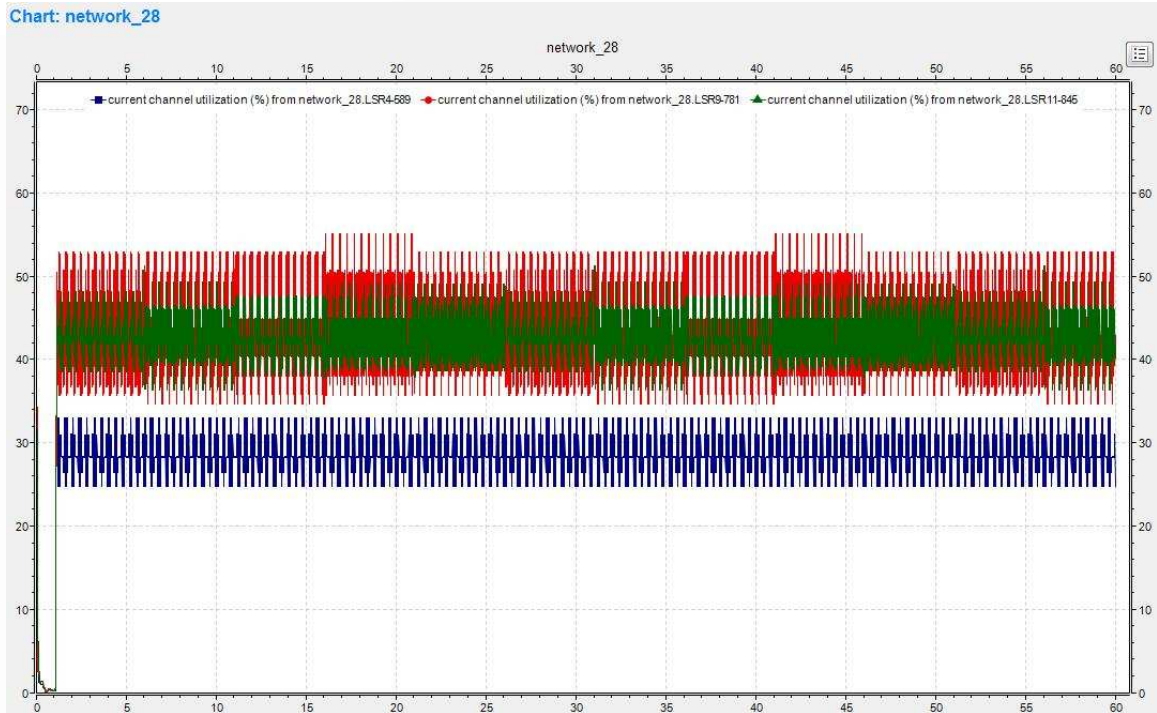


Εικόνα 160: Energy consumption, end to end throughput από τον host5 στον host10

Στην εικόνα 161 βλέπουμε το φορτίο που προωθείται σε αυτές τις συνδέσεις κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Οι συνδέσεις μεταξύ των δρομολογητών 9 με 13 και 11 με 13 εξυπηρετούν το μεγαλύτερο φορτίο.

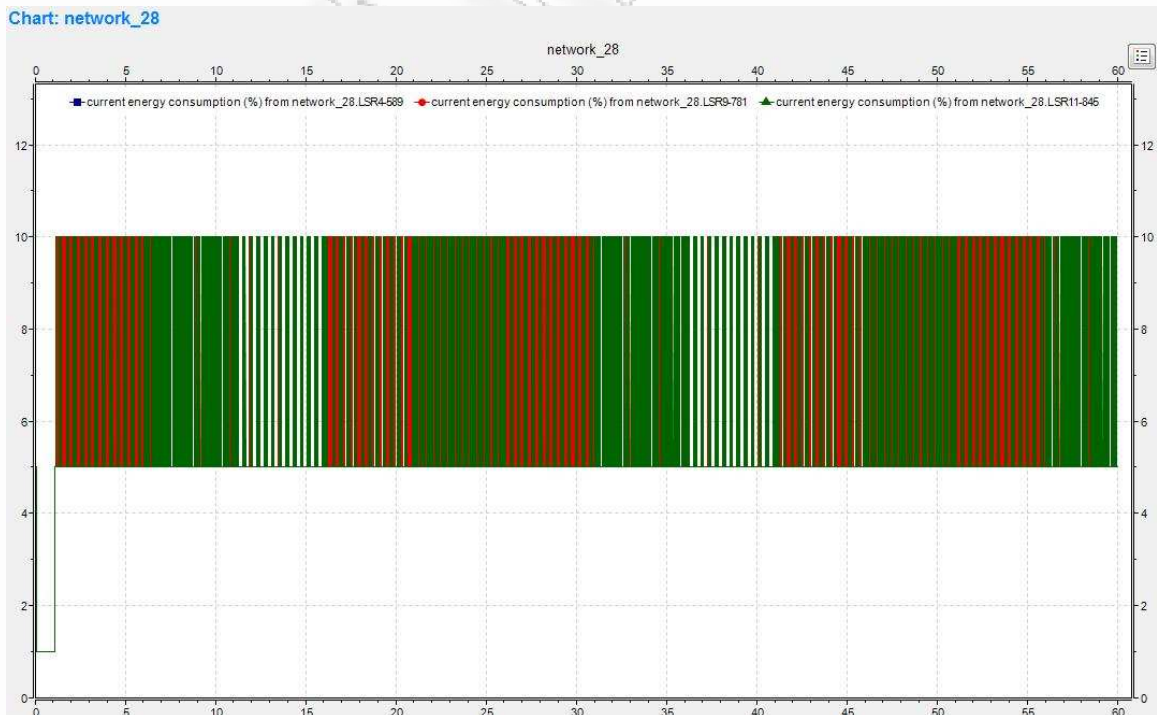


Εικόνα 161: Current Bandwidth, ΜΠΛΕ: LSR4->LSR9, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR9->LSR13, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR11->LSR13



Εικόνα 162: Channel utilization, ΜΠΛΕ: LSR4->LSR9, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR9->LSR13, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR11->LSR13

Στην εικόνα 162 μπορούμε να δούμε ότι η χρησιμοποίηση σε αυτές τις συνδέσεις είναι μεταξύ 25% και 55%. Στην εικόνα 163 μπορούμε να δούμε αυτός ο βαθμός χρησιμοποίησης των συνδέσεων σε πόση ενέργεια αντιστοιχεί. Προφανώς, τώρα καταναλώνεται ακόμα λιγότερη ενέργεια σε όλο το δίκτυο.



Εικόνα 163: Energy Consumption, ΜΠΛΕ: LSR4->LSR9, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR9->LSR13, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR11->LSR13

Κεφάλαιο 13: Συμπερασματικές Παρατηρήσεις

13.1 Απόδοση Δικτύου

Από τις παραπάνω προσομοιώσεις φαίνεται ότι και οι 4 τρόποι δρομολόγησης των πακέτων (static, OSPF, MPLS, multipath) μπορούν κατά περίπτωση να χρησιμοποιηθούν και το δίκτυο να έχει μεγάλη απόδοση. Βέβαια, ανάλογα με την εξέλιξη και την προσθήκη ή την αφαίρεση ροών, αλλάζουν τα δεδομένα και χρειάζονται τροποποιήσεις για να μην επηρεαστεί η λειτουργία του δικτύου και να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των χρηστών.

Με στατική δρομολόγηση δεν υπάρχει η δυνατότητα της εύκολης τροποποίησης των ρυθμίσεων στους δρομολογητές ώστε να ανταποκριθούν στις νέες απαιτήσεις. Για να υπάρξει αυτή η τροποποίηση θα πρέπει είτε ο διαχειριστής να πάει στους δρομολογητές (φυσική παρουσία) είτε χρησιμοποιώντας κάποιο πρωτόκολλο να στείλει σε κάθε έναν τα νέα δεδομένα. Αυτή η διαδικασία θα είναι αρκετά χρονοβόρα και προφανώς μέχρι να γίνουν οι ρυθμίσεις υπάρχει περίπτωση τα δεδομένα στο δίκτυο να έχουν αλλάξει πάλι. Προφανώς θα οδηγούμασταν σε αδιέξοδο αν υπήρχε μόνο αυτός ο τρόπος.

Με το πρωτόκολλο OSPF οι χρήστες απολαμβάνουν καλύτερη απόδοση, αφού στέλνουν τα πακέτα από τα συντομότερα μονοπάτια. Επίσης, αν τα βάρη των συνδέσεων συνδεθούν με το utilization που έχουν το πρωτόκολλο μπορεί να ανταπεξέλθει και σε συνθήκες συμφόρησης. Ακόμα, έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ένα καταναμημένο πρωτόκολλο, οι δρομολογητές ανταλλάσσουν μεταξύ τους τις πληροφορίες που χρειάζονται και βρίσκουν που πρέπει να πρέπει να προωθήσουν τα πακέτα χωρίς να χρειάζεται να παρέμβει ο διαχειριστής. Άρα, το OSPF προσφέρει πολύ μεγάλη βελτίωση στη δρομολόγηση σε σχέση με τη στατική δρομολόγηση.

Με το RSVP-TE και τη δυνατότητα της δημιουργίας MPLS μονοπατιών έχουμε ακόμα περισσότερες δυνατότητες. Πλέον, μπορούμε να διαφοροποιήσουμε την κίνηση σε κατηγορίες και να τις αντιμετωπίζουμε ξεχωριστά. Ειδικά στην εποχή μας που οι υπηρεσίες που παρέχονται στους χρήστες έχουν τόσο διαφορετικά χαρακτηριστικά, δεν είναι αποδοτικό να αντιμετωπίζονται όλοι οι χρήστες με τον ίδιο τρόπο. Επίσης, με χρήση μονοπατιών έχουμε αξιοποίηση όλων των πόρων του δικτύου. Δεν θα ήταν λογικό να αναβαθμίζονται συνέχεια μερικές συνδέσεις που έχουν την περισσότερη κίνηση, ενώ ταυτόχρονα υπάρχουν συνδέσεις που μένουν ανεκμετάλλευτες. Ένα ακόμα σημαντικό σημείο είναι η εύκολη προσαρμογή των μονοπατιών στις γρήγορες αλλαγές στο δίκτυο. Αν κάποια σύνδεση πέσει ή

φορτωθεί πολύ τότε πολύ εύκολα μπορεί να δημιουργηθούν paths που θα αποφεύγουν τα σημεία συμφόρησης. Επίσης, με το mpls και αν προστεθεί και η δυνατότητα που υπάρχει για δέσμευση πόρων, μπορεί να υπάρξει και εγγύηση για τις υπηρεσίες που έχει ζητήσει κάποιος χρήστης. Οπότε, βλέπουμε ότι από όλες τις πλευρές το mpls βοηθάει τον διαχειριστή του δικτύου, προσφέροντας καλύτερη απόδοση, αξιοπιστία, ευελιξία και διαφοροποίηση υπηρεσιών.

Επιπρόσθετα, αν τα mpls paths συνδυαστούν και με την τεχνική του multipath μπορούμε να έχουμε ακόμα μεγαλύτερη ευελιξία και αξιοποίηση των πόρων σε ένα δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό αντιμετωπίζονται ροές που σε σχέση με την χωρητικότητα των συνδέσεων είναι μεγάλες. Μετατρέπονται σε μικρότερες οι οποίες μπορούν να αντιμετωπιστούν ξεχωριστά.

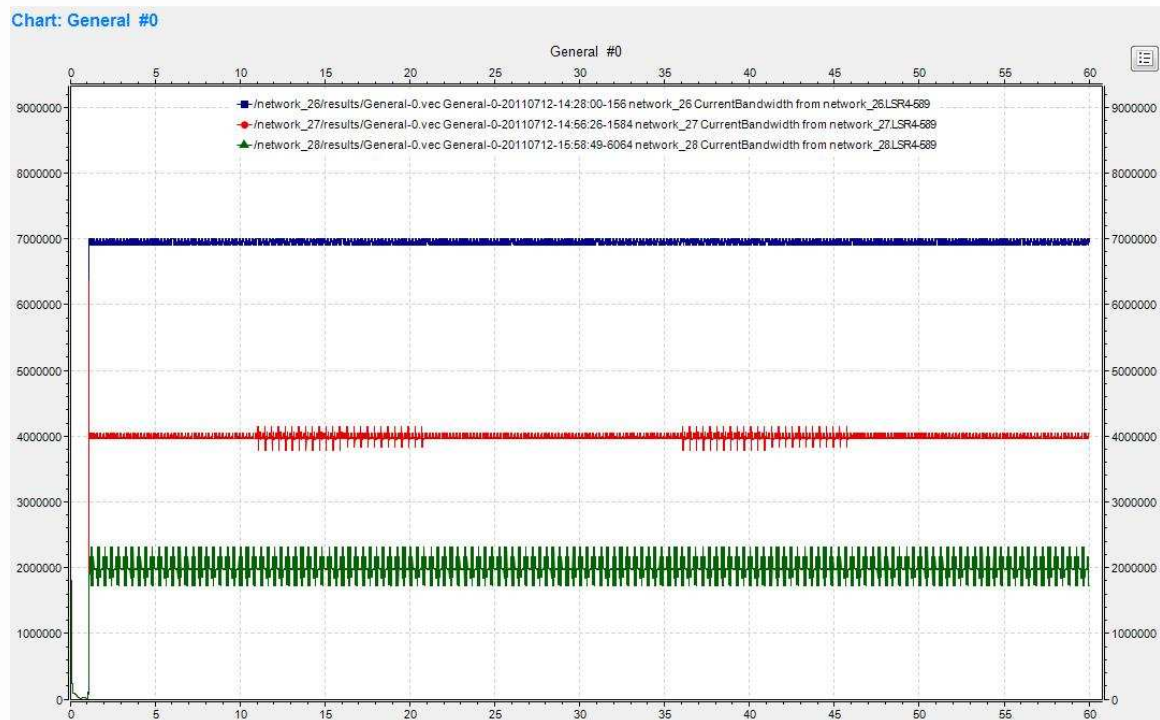
Επειδή πάντα υπάρχει και η περίπτωση κάποιας αστοχίας, από τις προσομοιώσεις φάνηκε ότι ένα λάθος στους πίνακες δρομολόγησης για την περίπτωση της στατικής δρομολόγησης αλλά και του OSPF μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες. Το λάθος αυτό είναι δυνατό να δημιουργήσει πρόβλημα σε μεγάλο μέρος της κίνησης. Ειδικά στο OSPF μία λάθος ενημέρωση για το βάρος μία σύνδεσης μπορεί να αλλοιώσει το αποτέλεσμα του αλγορίθμου που βρίσκει τα συντομότερα μονοπάτια και όλοι οι δρομολογητές να έχουν λανθασμένη εικόνα του δικτύου. Αντίθετα, με τη χρήση mpls paths έχουμε διαφοροποίηση των ροών, οι οποίες χάρις στις ετικέτες που έχουν αντιμετωπίζονται ξεχωριστά και ένα λάθος σε έναν πίνακα δρομολόγησης θα έχει συνέπειες μόνο για τη μία αυτή ροή.

Τέλος, από τις προσομοιώσεις προέκυψε και ένα συμπέρασμα για το επίπεδο μεταφοράς και συγκεκριμένα για τις συνδέσεις tcp και udp. Σε όλες τις περιπτώσεις ανταγωνισμού των 2 πρωτοκόλλων φάνηκε ότι το tcp αδικείται σε σχέση με το udp. Σε συνθήκες συμφόρησης η απόδοση των tcp συνδέσεων είναι εξαιρετικά χαμηλή ενώ την ίδια στιγμή οι udp εκμεταλλεύονται όλο το bandwidth που είναι διαθέσιμο. Βέβαια, αυτό συμβαίνει λόγω των μηχανισμών που υπάρχουν στις tcp συνδέσεις (flow control, congestion control) και δεν υπάρχουν στις udp.

13.2 Ενέργεια

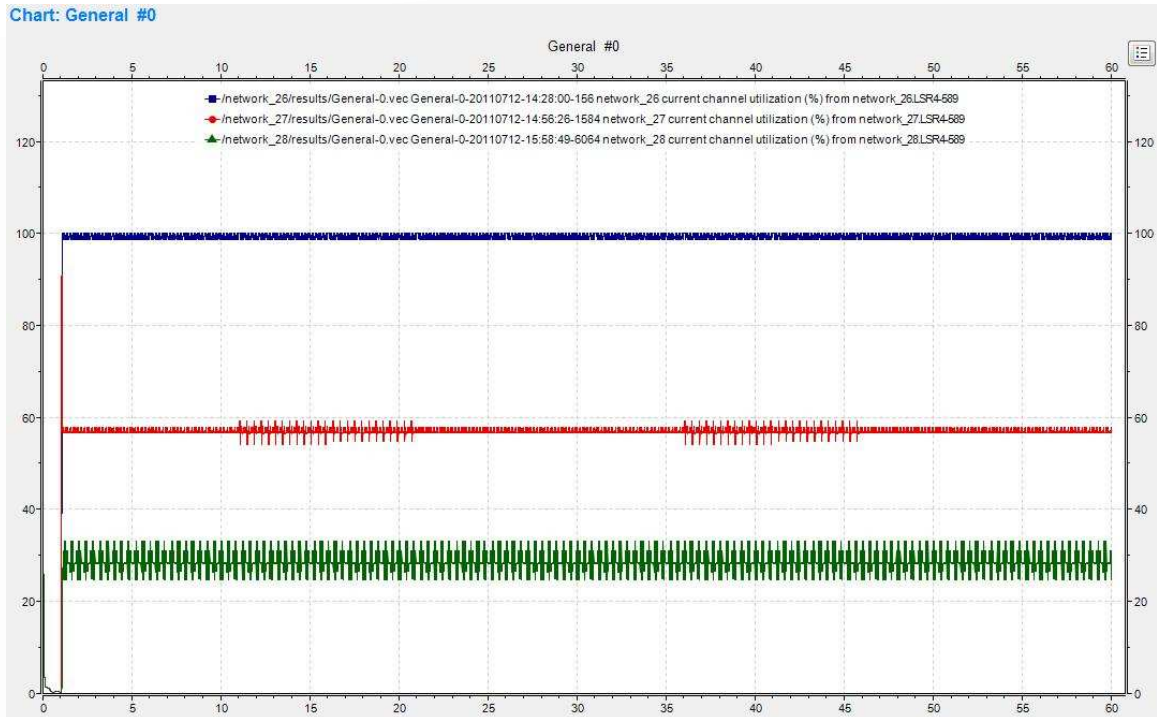
Το θέμα της ενέργειας εξετάστηκε στις τελευταίες 3 προσομοιώσεις και συγκεκριμένα για το OSPF, MPLS, MPLS με χρήση multipath. Η προσπάθεια γίνεται για να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο, διατηρώντας την απόδοση του δικτύου και με σεβασμό πάντα στην ποιότητα υπηρεσιών που έχει ζητήσει ο χρήστης. Από αυτές τις προσομοιώσεις φάνηκε ότι για εξοικονόμηση ενέργειας χρειάζεται να μειωθεί το utilization των links ώστε οι δρομολογητές να μπορούν να κλείσουν περισσότερες ανενεργές θύρες και γενικότερα για να δουλέψουν οι λιγότεροι πόροι στο δίκτυο και οι άλλοι να απενεργοποιηθούν. Στην κατεύθυνση αυτή χειρότερη συμπεριφορά είχαμε με το OSPF το οποίο μάζευε την κίνηση σε λίγα links αναγκάζοντάς τα να λειτουργούν στο 100% με μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Καλύτερα αποτελέσματα είχαμε όταν χρησιμοποιήσαμε mpls paths με χρήση multipath και είχαμε ένα δίκτυο με εξισορροπημένη κίνηση, χαμηλό network utilization, links με utilization πολύ χαμηλό και επομένως μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Στη συνέχεια δίνονται για τις τρεις αυτές προσομοιώσεις συγκριτικά αποτελέσματα για τρεις κομβικές συνδέσεις. Όπως είπαμε, επειδή ταυτόχρονα με την ενέργεια εξακολουθεί να μας ενδιαφέρει και η απόδοση στο δίκτυο, οι μετρήσεις αφορούν current bandwidth, channel utilization, energy consumption, για να έχουμε ολοκληρωμένη εικόνα. Δεν θα είχε νόημα, να καταναλώνουμε λιγότερη ενέργεια και ταυτόχρονα να μην μπορούσαν να δρομολογηθούν τα πακέτα όπως θα έπρεπε.

Για τη σύνδεση μεταξύ των router 4 και router 9:



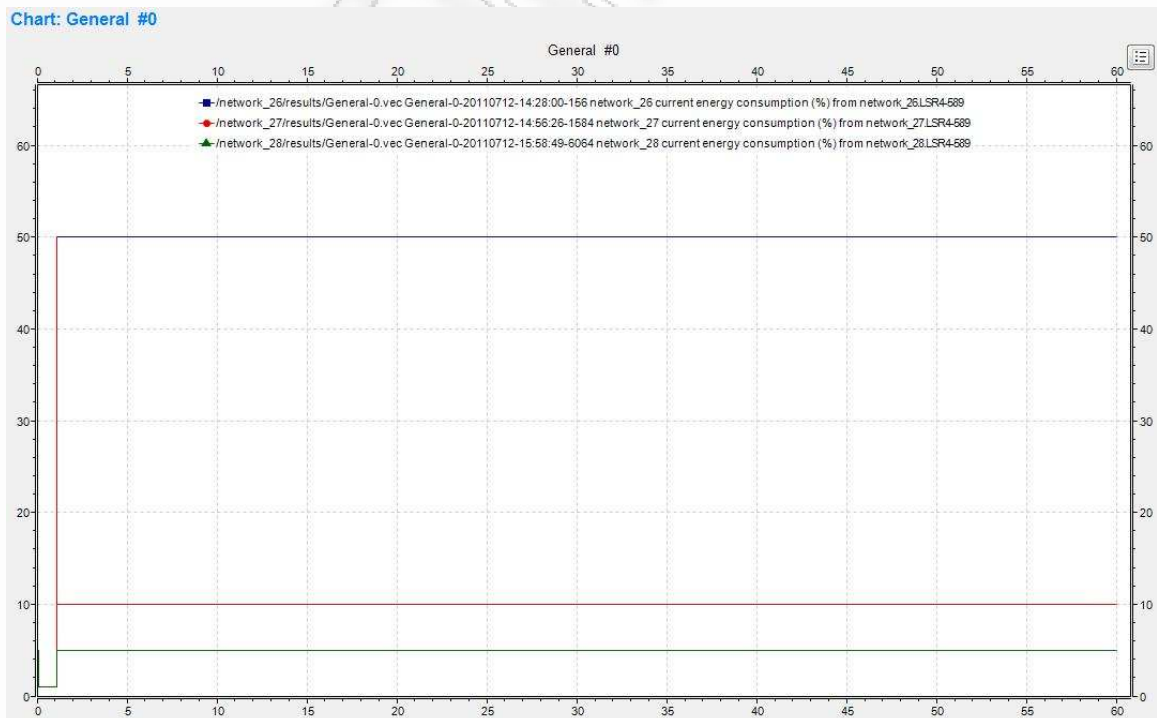
Εικόνα 164: Current Bandwidth LSR4-LSR9, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28

Στην εικόνα 164 βλέπουμε τη διακύμανση της κίνησης μέσα από τη σύνδεση στα 60 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης. Στην περίπτωση του OSPF περνάει κίνηση περίπου 7 Mbps. Αλλάζοντας τον τρόπο δρομολόγησης και χρησιμοποιώντας multiple paths η κίνηση μειώθηκε και είχε ρυθμό 4 Mbps. Έπειτα, προσθέτοντας και την τεχνική του multipath και σπάζοντας της ροές μπορέσαμε να μειώσουμε την κίνηση σε αυτήν την σύνδεση σε μόνο 2Mbps. Συνολικά από 7Mbps σε 2Mbps δηλαδή σχεδόν 70% μείωση. Αυτή η μείωση είχε θετικές συνέπειες στο utilization της σύνδεσης. Όπως φαίνεται στην εικόνα 165 το utilization για την περίπτωση της δρομολόγησης με βάση το OSPF έφτασε το 100%. Δηλαδή, σε αυτήν την περίπτωση η σύνδεση είχε καλύψει πλήρως τη χωρητικότητά της και επιπλέον πακέτα απορρίπτονταν. Με την χρησιμοποίηση των μονοπατιών μπορέσαμε να μειώσουμε το βαθμό χρησιμοποίησης της σύνδεσης σε 58%. Η μείωση είναι αρκετά σημαντική αφού πλέον δεν έχουμε απώλειες αλλά υπάρχει και διαθέσιμη χωρητικότητα ώστε να προστεθεί και άλλο φορτίο αν χρειαστεί. Επιπλέον, προσθέτοντας και το multipath το utilization της σύνδεσης έπεσε σε μόνο 28%, σε επίπεδα πλέον πολύ ικανοποιητικά. Η μείωση αυτή στη χρησιμοποίηση της γραμμής έχει ως συνέπεια και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Είναι λογικό ότι αφού χρησιμοποιείται ένα μέρος μόνο από τους πόρους σε αυτήν την σύνδεση, οι πόροι που περισσεύουν μπορούν να



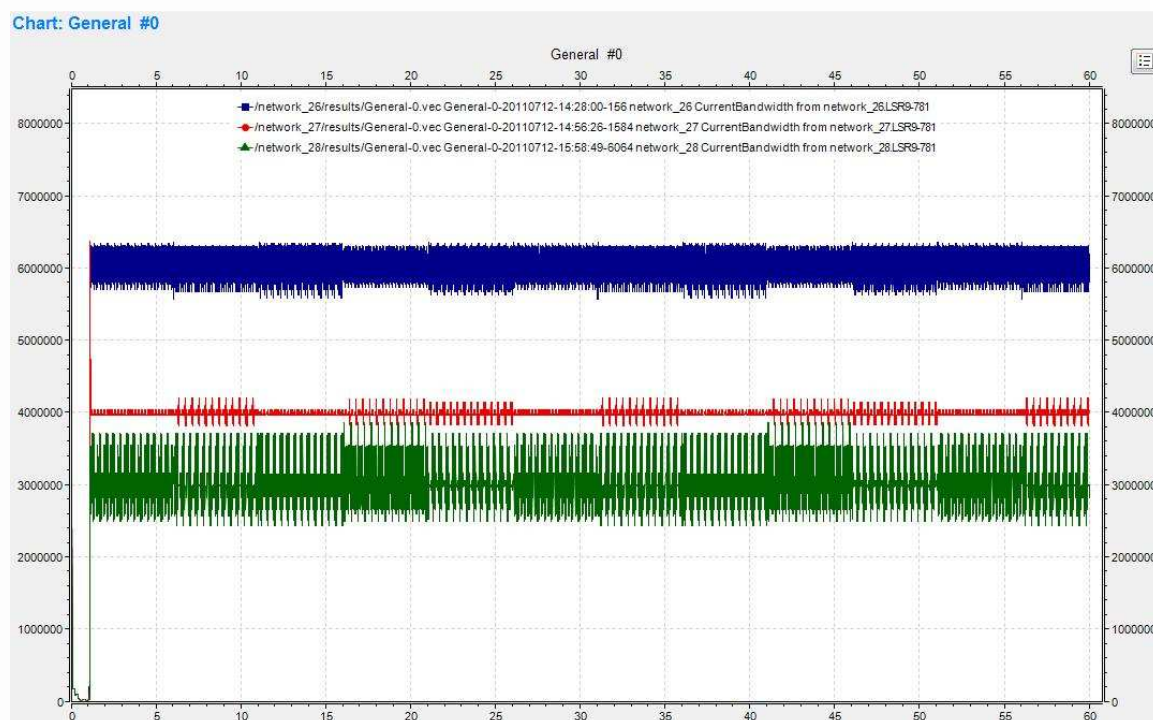
Εικόνα 165: Channel utilization LSR4-LSR9, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28

απενεργοποιηθούν. Η εξοικονόμηση αυτή φαίνεται στην εικόνα 166 όπου από η κατανάλωση έχει πέσει από τις 50 μονάδες ενέργειας για το OSPF, σε 10 για τα mpls paths και σε μόνο 5 όταν μοιράσαμε την ίδια ροή σε πολλά διαφορετικά μονοπάτια.



Εικόνα 166: Energy Consumption LSR4-LSR9, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28

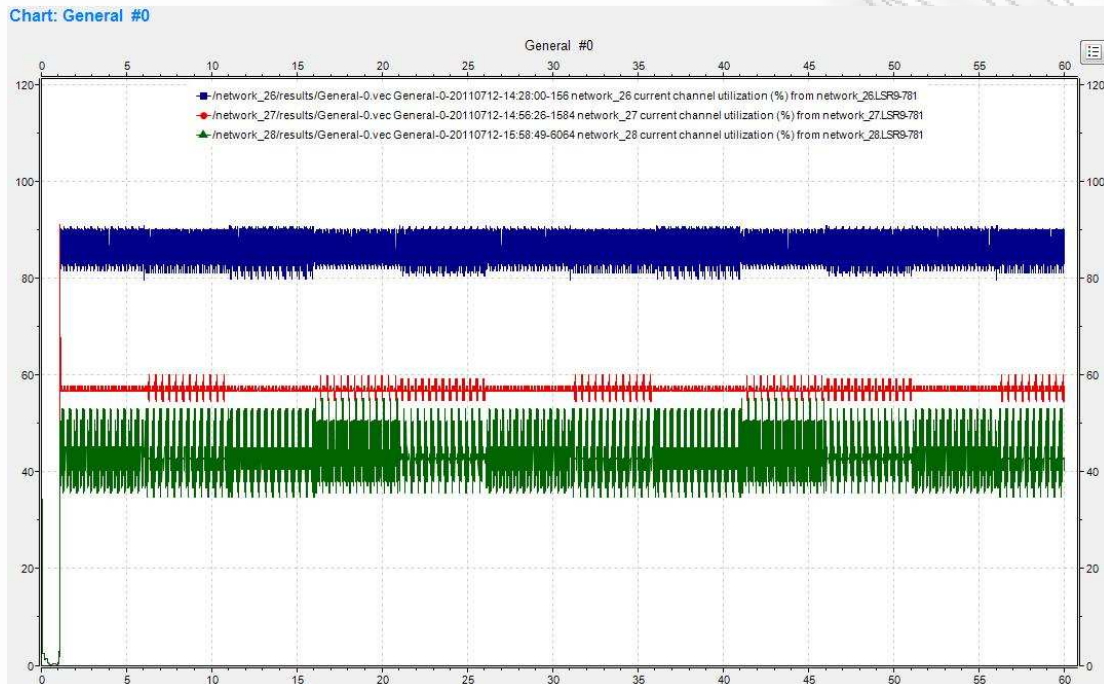
Για τη σύνδεση μεταξύ των router 9 και router 13:



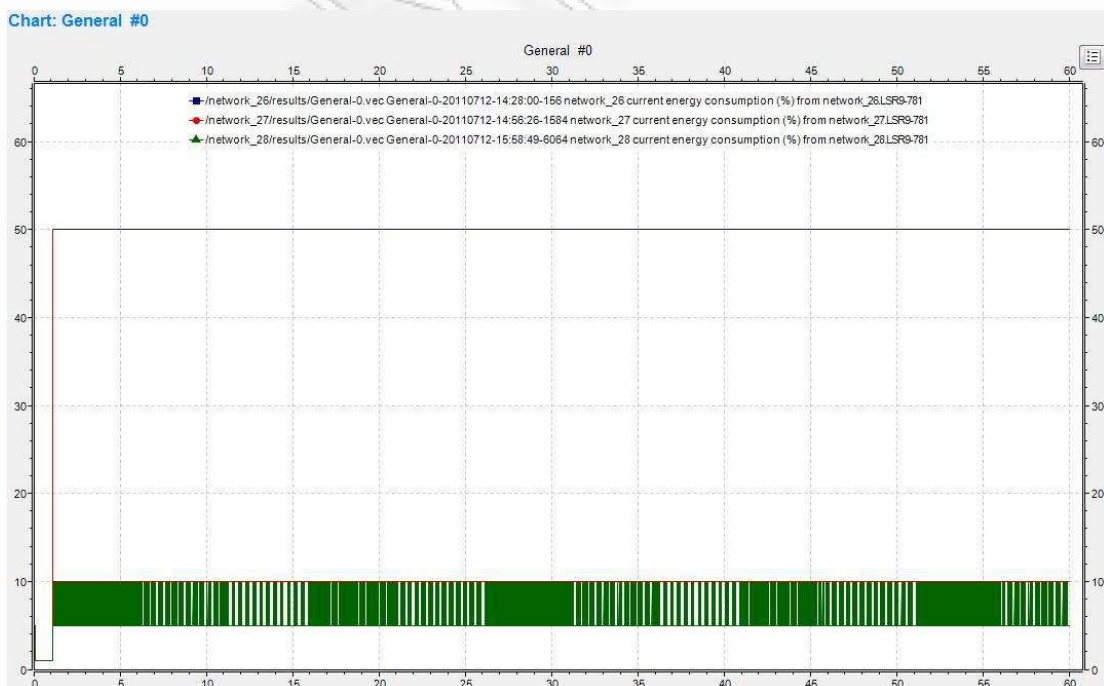
Εικόνα 167: Current Bandwidth LSR9-LSR13, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28

Εδώ θα δούμε τι συνέβη σε αυτές τις προσομοιώσεις στη σύνδεση μεταξύ των δρομολογητών 9 και 13. Όπως και η προηγούμενη μεταξύ των 4 και 9 επιλέχθηκε γιατί σε πολλές προσομοιώσεις φάνηκε η σημασία της για το δίκτυο. Στην εικόνα 167 βλέπουμε την κίνηση που εξυπηρετήσε στις 3 διαφορετικές περιπτώσεις. Όταν η δρομολόγηση έγινε με βάση το OSPF η σύνδεση είχε φορτωθεί με 6,2 Mbps. Φορτίο που για τα δεδομένα του δικτύου είναι πολύ μεγάλο. Στη συνέχεια, με την εφαρμογή των *mpls paths* βλέπουμε την κίνηση να μειώνεται στα 4Mbps. Ενώ, όταν προσθέσαμε στο δίκτυο και τη δυνατότητα να μοιράζει το φορτίο μιας ροής σε πολλά διαφορετικά μονοπάτια, η κίνηση μειώθηκε και άλλο περίπου στα 3Mbps. Η μείωση του όγκου της κίνησης που πέρασε από αυτή τη σύνδεση αποδεικνύεται και στην εικόνα 168, που βλέπουμε το utilization. Στην πρώτη περίπτωση του OSPF η σύνδεση κάλυψε τη χωρητικότητά της σχεδόν κατά 90%. Στη δεύτερη περίπτωση χρειάστηκε το 58% περίπου της χωρητικότητας, ενώ στην τρίτη χρειάστηκε σχεδόν 42%. Μπορεί να μην πετύχαμε να μειωθεί η χρησιμοποίηση αυτής της σύνδεσης όσο μειώθηκε στην προηγούμενη σύνδεση όμως και πάλι έπεσε από 90% σε 42%. Ενώ, στην περίπτωση του OSPF ήταν στα όρια της συμφόρησης, πλέον με τις νέες τεχνικές υπάρχει διαθέσιμο σχεδόν 60% της χωρητικότητάς της. Προφανώς και σε αυτήν την σύνδεση καταφέραμε να μειώσουμε την κατανάλωση ενέργειας. Από τη

στιγμή που σχεδόν 60% των πόρων δεν χρειάζονται, τότε αυτοί οι πόροι μπορούν να απενεργοποιηθούν. Η εξοικονόμηση αυτή φαίνεται στην εικόνα 169 όπου από η κατανάλωση έχει πέσει από τις 50 μονάδες ενέργειας για το OSPF, σε 10 για τα mpls paths και μετά κυμαίνεται μεταξύ 5 και 10 μονάδες ενέργειας όταν μοιράσαμε την ίδια ροή σε πολλά διαφορετικά μονοπάτια.

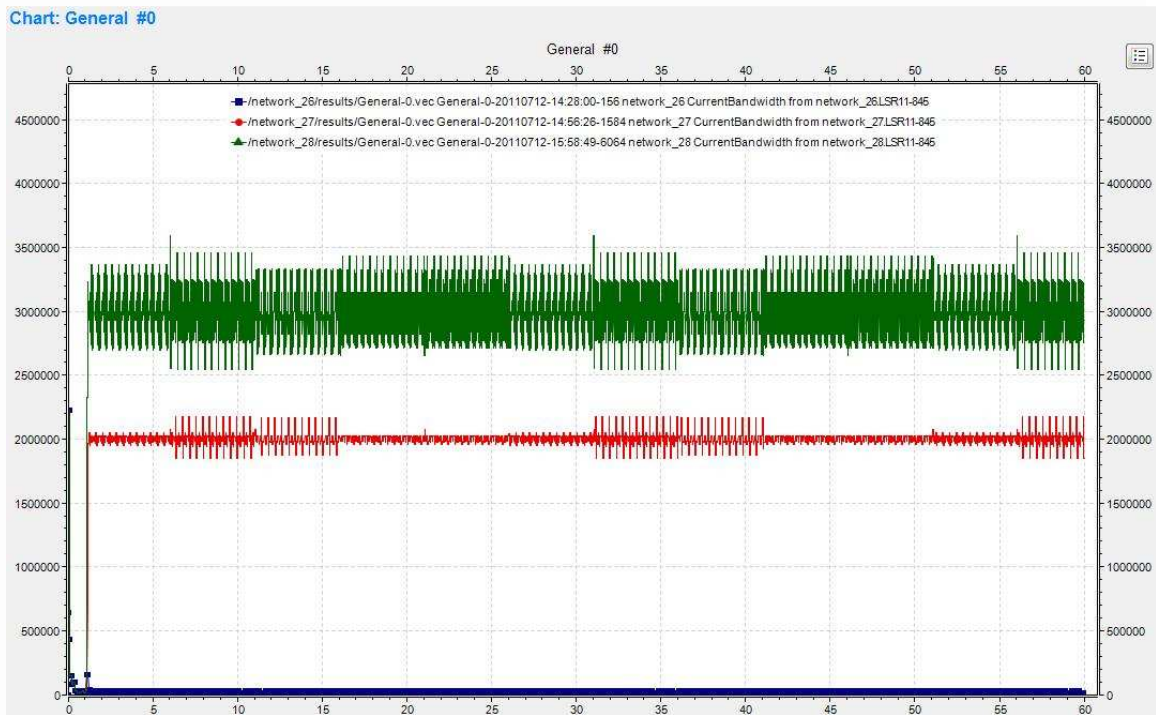


Εικόνα 168: Channel utilization LSR9-LSR13, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28



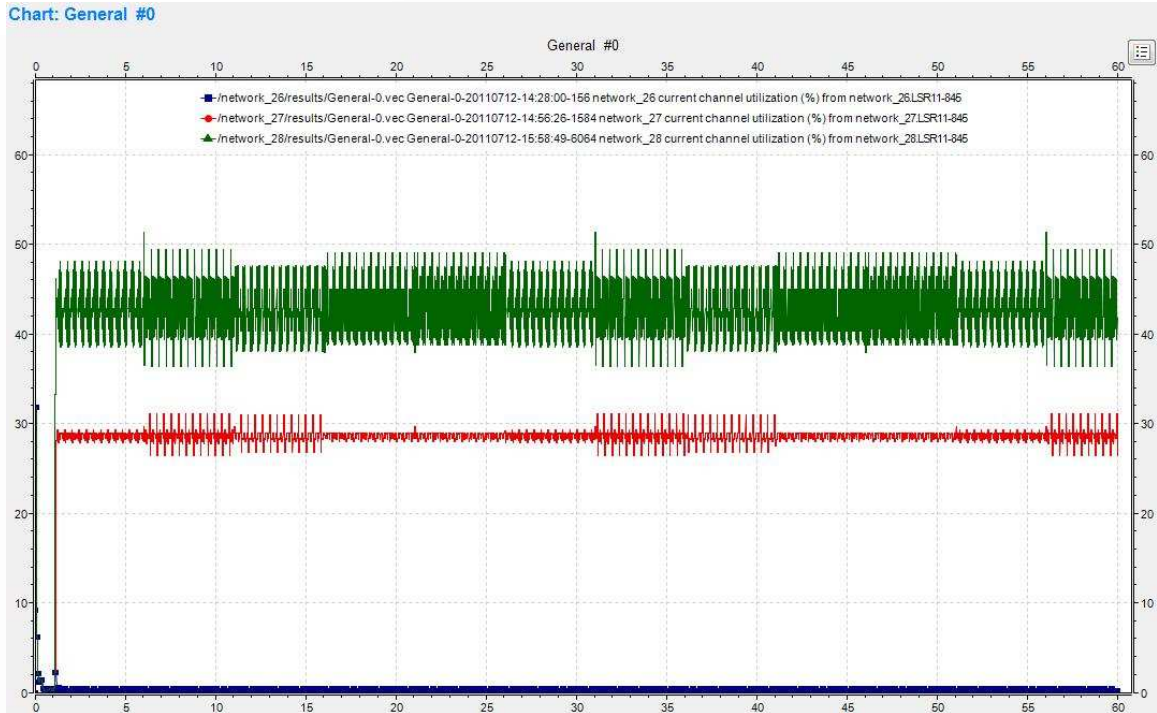
Εικόνα 169: Energy Consumption LSR9-LSR13, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28

Για τη σύνδεση μεταξύ των router 11 και router 13:



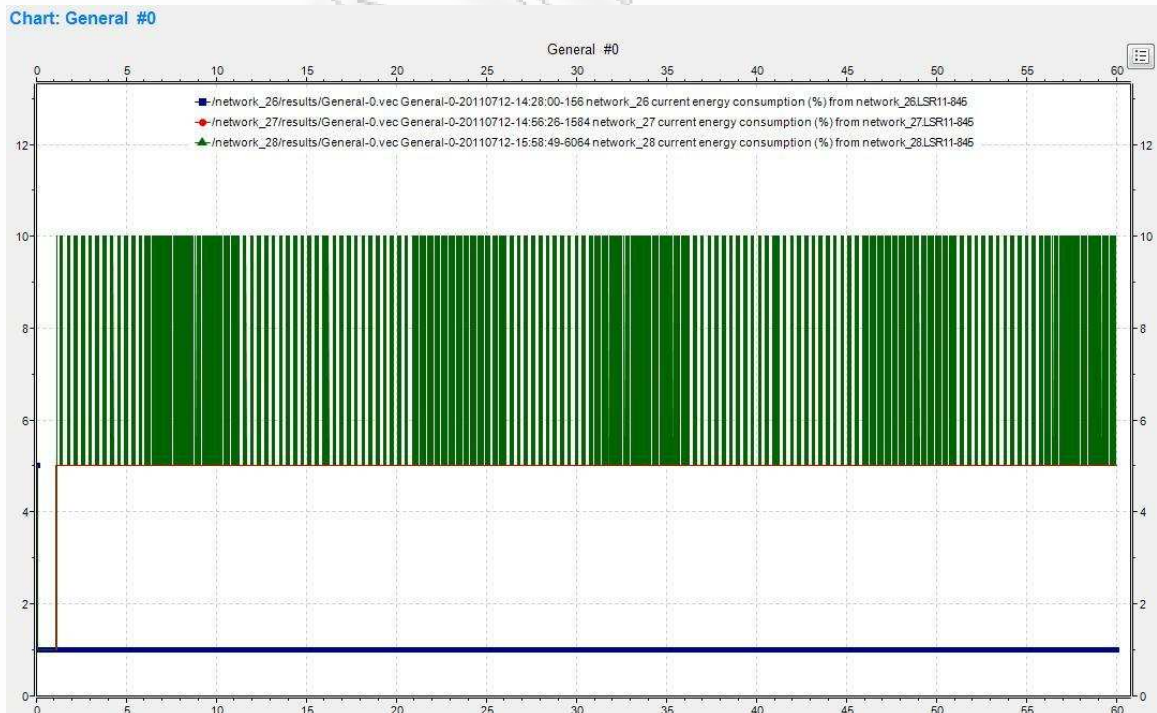
Εικόνα 170: Current Bandwidth LSR11-LSR13, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28

Δείξαμε ότι μοιράζοντας την κίνηση στο δίκτυο, πετυχαίνουμε μικρότερη χρησιμοποίηση κάποιων συνδέσεων. Με τον τρόπο αυτό, διατηρούμε σε αυτές διαθέσιμη χωρητικότητα για να εξυπηρετήσουν επιπρόσθετη κίνηση. Ταυτόχρονα εξοικονομούμε ενέργεια από τους πόρους που δεν χρησιμοποιούμε. Βέβαια, από τη στιγμή που παίρνουμε την κίνηση από κάποια φορτωμένα σημεία και την προωθούμε σε άλλα, αυτό σημαίνει ότι κάποιες συνδέσεις που δεν χρησιμοποιούνταν, τώρα θα χρησιμοποιηθούν. Σημαντικό είναι να δείξουμε, ότι λόγω της μικρής ποσότητας κίνησης που θα περάσει από αυτές τις μέχρι τώρα ανενεργές συνδέσεις, η συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο θα παραμείνει μειωμένη αλλά και αυτές οι συνδέσεις θα παραμείνουν με αρκετή διαθεσιμότητα. Δηλαδή, δεν μεταφέρουμε την κίνηση απλά για να υπερφορτώσουμε κάποιες άλλες συνδέσεις. Στην εικόνα 170 βλέπουμε την αύξηση της κίνησης στη σύνδεση μεταξύ των δρομολογητών 11 και 13 λόγω του διαμοιρασμού της κίνησης στο δίκτυο. Έτσι, ενώ στην περίπτωση του OSPF από αυτήν τη σύνδεση δεν χρειάστηκε να περάσει φορτίο, στην περίπτωση των mpls paths πέρασε φορτίο με ρυθμό 2Mbps και στην περίπτωση που χρησιμοποιήσαμε multipath πέρασε φορτίο με ρυθμό 3Mbps. Το φορτίο αυτό όμως δεν είναι μεγάλο. Δηλαδή, μειώσαμε τη συμφόρηση σε άλλες συνδέσεις χωρίς να δημιουργήσουμε συμφόρηση αλλού. Στην εικόνα 171 μπορούμε να δούμε ότι η χρησιμοποίηση αυτής της σύνδεσης για τις 3 διαφορετικές περιπτώσεις αυξήθηκε από 0% σε 28% και έπειτα σε 45%.



Εικόνα 171: Channel utilization LSR11-LSR13, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28

Επίσης, στην εικόνα 172 βλέπουμε ότι η κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε από 0 σε 5 και μετά μεταξύ 5 και 10. Όμως, η αύξηση αυτή είναι μικρότερη από την μείωση που είχαμε πετύχει σε άλλη σύνδεση στην οποία η κατανάλωση ενέργειας είχε μειωθεί από 50 σε 5.



Εικόνα 172: Energy Consumption LSR11-LSR13, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΑΙΑ

Αναφορές

- 1) James F.Kurose, Keith W.Ross, "Computer Networking-A Top Down Approach", Pearson.
- 2) Bruce S.Davis, Adrian Farrel, "MPLS: Next Steps", Morgan Kaufmann
- 3) B. Fortz and M. Thorup, "Internet Traffic Engineering by Optimizing OSPF Weights," in Proceedings of IEEE INFOCOM, 2000.
- 4) B. Fortz, M. Thorup. Optimizing OSPF Weights in a Changing World. IEEE JSAC, 2002.
- 5) A. Elwalid, C. Jin, S. Low, I. Widjaja, MATE: MPLS Adaptive Traffic Engineering, IEEE INFOCOM, 2001.
- 6) M. Gupta and S. Singh. Greening of the Internet. In SIGCOMM, 2003.
- 7) C. Gunaratne, K. Christensen, and B. Nordman. Managing Energy Consumption Costs in Desktop PCs and LAN Switches with Proxying, Split TCP Connections, and Scaling of Link Speed. Int. J. Netw. Manag., 15(5):297–310, 2005.
- 8) Daniel O.Awduche," MPLS and Traffic Engineering in IP Networks", IEEE Communications Magazine December 1999.
- 9) Raffaele Bolla, Roberto Bruschi, Franco Davoli, Flavio Cucchietti," Energy Efficiency in the Future Internet: A Survey of Existing Approaches and Trends in Energy-Aware Fixed Network Infrastructures", IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL.13, NO.2, SECOND QUARTER 2011.
- 10) Παπαδόπουλος Νικόλαος, Κυρτόπουλος Σταύρος, "ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ", Πτυχιακή εργασία, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Ηλεκτρονικής, Θεσσαλονίκη 2008.
- 11) Κατερίνα Κουνούνη, Βάσος Βασιλείου, "ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MPLS ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ", Διπλωματική εργασία, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ, ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ, Μάρτιος 2008.
- 12) Μαρία Παπά, "Ανοχή Σφαλμάτων και Μηχανική κυκλοφορίας σε Δίκτυα MPLS ", Διατριβή Μεταπτυχιακού, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ, ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ, Ιούνιος 2009.
- 13) Λαζαρόπουλος Σ.Νικόλαος, Γεώργιος Γ. Παπαβασιλόπουλος, "Βέλτιστη δρομολόγηση οχήματος σε συνθήκες αβεβαιότητας", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, Ιούλιος 2010.
- 14) George Athanasiou, Kostas Tsagkaris, Panagiotis Vlacheas and Panagiotis Demestichas, "Introducing Energy-Awareness in Traffic Engineering for Future Networks", CNSM 2011.
- 15) [23] P. Mahadevan, P. Sharma, S. Banerjee, and P. Ranganathan, "A Power Benchmarking Framework for Network Devices," in Proceedings of IFIP Networking, May 2009.
- 16) Προκοπίδης Γεώργιος, Νικοπολιτίδης Πέτρος, "Routing Configuration", Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ, Επικοινωνιακά Συστήματα & Επικοινωνίες, Ιανουάριος 2007.
- 17) Γκάμας Απόστολος, Χ.Μπούρας, "Υπηρεσίες και πρωτόκολλα πραγματικού χρόνου", Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα μηχανικών ηλεκτρονικών υπολογιστών και πληροφορικής, Ιούνιος 2000.
- 18) Παντελής Σταμπουλής, Παναγιώτης Φουληράς, "Δικτυακή προσομοίωση με OMNeT++ Φιλτράρισμα καθυστερημένων πακέτων RTP", Θεσσαλονίκη 2010.
- 19) Rfc 2328, "OSPF Version 2", April 1998
- 20) Richard Mortier, "Internet traffic engineering", Technical report, Number 532, April 2002.
- 21) Βούτος Διονύσης, Βεσκούκης Βασίλειος, " Προσαρμογή Λογισμικών Προσομοίωσης Δικτύων Για Την Προσομοίωση Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων (WSNs) Υψηλής Χωρικής Πυκνότητας", Διπλωματική Εργασία, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ, Μάρτιος 2010.
- 22) N. Wang, K. Ho, G. Pavlou, M. Howarth, An Overview of Routing Optimisation for IP Traffic Engineering, IEEE Surveys and Tutorials, Vol. 10, No. 1, IEEE, pp. 36-56, 2008.

Κατάλογος εικόνων, πινάκων

Εικόνες

1. **Εικόνα 1:** Τοπολογία δικτύου, χωρητικότητα των συνδέσεων, απαιτήσεις χρηστών, σελ. 27.
2. **Εικόνα 2:** Στατική δρομολόγηση, συμφόρηση στο δίκτυο, σελ. 30.
3. **Εικόνα 3:** Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 31.
4. **Εικόνα 4:** Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 32.
5. **Εικόνα 5:** Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 32.
6. **Εικόνα 6:** Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 33.
7. **Εικόνα 7:** Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 33.
8. **Εικόνα 8:** Στατική δρομολόγηση, απώλειες πακέτων στον router4, σελ. 34.
9. **Εικόνα 9:** Στατική δρομολόγηση, απώλειες πακέτων στον router6, σελ. 34.
10. **Εικόνα 10:** Στατική δρομολόγηση, ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών, σελ. 35.
11. **Εικόνα 11:** Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 36.
12. **Εικόνα 12:** Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 37.
13. **Εικόνα 13:** Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 37.
14. **Εικόνα 14:** Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 38.
15. **Εικόνα 15:** Στατική δρομολόγηση, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 38.
16. **Εικόνα 16:** Στατική δρομολόγηση, χωρίς απώλειες πακέτων στον router4, επιτυχής αποφυγή bottleneck, σελ. 39.
17. **Εικόνα 17:** Στατική δρομολόγηση, χωρίς απώλειες πακέτων στον router6, σελ. 39.
18. **Εικόνα 18:** OSPF, μεγάλη συμφόρηση στο δίκτυο, σελ. 40.
19. **Εικόνα 19:** OSPF, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 41.
20. **Εικόνα 20:** OSPF, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 42.
21. **Εικόνα 21:** OSPF, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 42.
22. **Εικόνα 22:** OSPF, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 43.
23. **Εικόνα 23:** OSPF, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 43.
24. **Εικόνα 24:** OSPF, απώλειες πακέτων στον router3, σελ. 44.
25. **Εικόνα 25:** OSPF, απώλειες πακέτων στον router4, σελ. 44.
26. **Εικόνα 26:** OSPF, αποτυχημένη προσπάθεια αναβάθμισης, σελ. 45.
27. **Εικόνα 27:** OSPF, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 46.
28. **Εικόνα 28:** OSPF, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 46.

29. **Εικόνα 29:** OSPF, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 47.
30. **Εικόνα 30:** OSPF, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 47.
31. **Εικόνα 31:** OSPF, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 48.
32. **Εικόνα 32:** OSPF, απώλειες πακέτων στον router9, σελ. 48.
33. **Εικόνα 33:** OSPF, επιτυχημένη προσπάθεια αναβάθμισης, σελ. 49.
34. **Εικόνα 34:** OSPF, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 50.
35. **Εικόνα 35:** OSPF, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 51.
36. **Εικόνα 36:** OSPF, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 51.
37. **Εικόνα 37:** OSPF, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 52.
38. **Εικόνα 38:** OSPF, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 52.
39. **Εικόνα 39:** OSPF, απώλειες πακέτων στον router4, σελ. 53.
40. **Εικόνα 40:** OSPF, απώλειες πακέτων στον router9, σελ. 53.
41. **Εικόνα 41:** OSPF, αποτυχημένη προσπάθεια αναβάθμισης, σελ. 54.
42. **Εικόνα 42:** OSPF, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 55.
43. **Εικόνα 43:** OSPF, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 56.
44. **Εικόνα 44:** OSPF, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 56.
45. **Εικόνα 45:** OSPF, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 57.
46. **Εικόνα 46:** OSPF, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 57.
47. **Εικόνα 47:** OSPF, απώλειες πακέτων στον router3, σελ. 58.
48. **Εικόνα 48:** OSPF, απώλειες πακέτων στον router4, σελ. 58.
49. **Εικόνα 49:** OSPF, απώλειες πακέτων στον router9, σελ. 59.
50. **Εικόνα 50:** MPLS paths, χωρίς συμφόρηση, σελ. 60.
51. **Εικόνα 51:** MPLS, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 61.
52. **Εικόνα 52:** MPLS, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 62.
53. **Εικόνα 53:** MPLS, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 62.
54. **Εικόνα 54:** MPLS, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 63.
55. **Εικόνα 55:** MPLS, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 63.
56. **Εικόνα 56:** MPLS, απώλειες πακέτων στον router4, σελ. 64.
57. **Εικόνα 57:** MPLS paths, συμφόρηση, σελ. 65.
58. **Εικόνα 58:** MPLS paths, αποφυγή συμφόρησης με επαναδρομολόγηση, σελ. 66.
59. **Εικόνα 59:** MPLS, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 67.
60. **Εικόνα 60:** MPLS, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 68.
61. **Εικόνα 61:** MPLS, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 68.
62. **Εικόνα 62:** MPLS, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 69.

63. **Εικόνα 63:** MPLS, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 69.
64. **Εικόνα 64:** MPLS, απώλειες πακέτων στον router1, σελ. 70.
65. **Εικόνα 65:** MPLS, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 71.
66. **Εικόνα 66:** MPLS, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 71.
67. **Εικόνα 67:** MPLS, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 72.
68. **Εικόνα 68:** MPLS, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 72.
69. **Εικόνα 69:** MPLS, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 73.
70. **Εικόνα 70:** MPLS, απώλειες πακέτων στον router1, σελ. 73.
71. **Εικόνα 71:** MPLS, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 74.
72. **Εικόνα 72:** MPLS, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 75.
73. **Εικόνα 73:** MPLS, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 75.
74. **Εικόνα 74:** MPLS, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 76.
75. **Εικόνα 75:** MPLS, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 76.
76. **Εικόνα 76:** MPLS, απώλειες πακέτων στον router1, σελ. 77.
77. **Εικόνα 77:** OSPF, paths before rerouting, σελ. 78.
78. **Εικόνα 78:** OSPF, paths after rerouting, σελ. 79.
79. **Εικόνα 79:** OSPF, rerouting, source throughput, σελ. 80.
80. **Εικόνα 80:** OSPF, rerouting, destination throughput, σελ. 80.
81. **Εικόνα 81:** Load Balancing, UDP flows, σελ. 81.
82. **Εικόνα 82:** Load Balancing, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 82.
83. **Εικόνα 83:** Load Balancing, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 83.
84. **Εικόνα 84:** Load Balancing, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 83.
85. **Εικόνα 85:** Load Balancing, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 84.
86. **Εικόνα 86:** Load Balancing, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 84.
87. **Εικόνα 87:** No Load Balancing, UDP flows, σελ. 85.
88. **Εικόνα 88:** No Load Balancing, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 86.
89. **Εικόνα 89:** No Load Balancing, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 86.
90. **Εικόνα 90:** No Load Balancing, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 87.
91. **Εικόνα 91:** No Load Balancing, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 87.
92. **Εικόνα 92:** No Load Balancing, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 88.
93. **Εικόνα 93:** No Load Balancing, tcp flow, σελ. 89.
94. **Εικόνα 94:** No Load Balancing, tcp flow, end to end throughput, σελ. 90.
95. **Εικόνα 95:** Load Balancing (paths with equal end to end delay), tcp flow, σελ. 90.
96. **Εικόνα 96:** Load Balancing (paths with equal end to end delay), tcp flow, end to end throughput, σελ. 91.

97. **Εικόνα 97:** Load Balancing (paths with not equal end to end delay), tcp flow, σελ. 92.
98. **Εικόνα 98:** Load Balancing (multiple paths), udp flow, σελ. 94.
99. **Εικόνα 99:** Traffic splitting, σελ. 95.
100. **Εικόνα 100:** Traffic splitting, end to end throughput, σελ. 95.
101. **Εικόνα 101:** Traffic splitting, paths, udp, σελ. 96.
102. **Εικόνα 102:** Load Balancing, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 97.
103. **Εικόνα 103:** Load Balancing, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 97.
104. **Εικόνα 104:** Load Balancing, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 98.
105. **Εικόνα 105:** Load Balancing, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 98.
106. **Εικόνα 106:** Load Balancing, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 99.
107. **Εικόνα 107:** Traffic splitting, tcp flow, σελ. 100.
108. **Εικόνα 108:** Traffic splitting, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 101.
109. **Εικόνα 109:** Traffic splitting, udp flows, tcp flow, σελ. 102.
110. **Εικόνα 110:** Traffic splitting, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 103.
111. **Εικόνα 111:** Traffic splitting, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 103.
112. **Εικόνα 112:** Traffic splitting, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 104.
113. **Εικόνα 113:** Current Bandwidth, Μπλε: LSR1 – LSR4, Κόκκινη: LSR1 – LSR5, σελ. 104.
114. **Εικόνα 114:** Current Bandwidth, Μπλε: LSR3 – LSR4, Κόκκινη: LSR3 – LSR6, σελ. 105.
115. **Εικόνα 115:** Current Bandwidth, Μπλε: LSR4 – LSR5, Κόκκινη: LSR4 – LSR7, Πράσινη: LSR4 – LSR9, Κίτρινη: LSR4 – LSR6, σελ. 105.
116. **Εικόνα 116:** Traffic splitting, udp flows, tcp flow, σελ. 106.
117. **Εικόνα 117:** Traffic splitting, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 107.
118. **Εικόνα 118:** Traffic splitting, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 107.
119. **Εικόνα 119:** Traffic splitting, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 108.
120. **Εικόνα 120:** Current Bandwidth, Μπλε: LSR1 – LSR4, Κόκκινη: LSR1 – LSR5, σελ. 108.
121. **Εικόνα 121:** Current Bandwidth, Μπλε: LSR3 – LSR4, Κόκκινη: LSR3 – LSR6, σελ. 109.
122. **Εικόνα 122:** Current Bandwidth, Μπλε: LSR4 – LSR5, Κόκκινη: LSR4 – LSR7, Πράσινη: LSR4 – LSR9, Κίτρινη: LSR4 – LSR6, σελ. 109.
123. **Εικόνα 123:** Traffic splitting, udp flows, tcp flow, σελ. 110.
124. **Εικόνα 124:** Traffic splitting, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 111.
125. **Εικόνα 125:** Traffic splitting, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 111.
126. **Εικόνα 126:** Traffic splitting, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 112.
127. **Εικόνα 127:** Current Bandwidth, Μπλε: LSR1 – LSR4, Κόκκινη: LSR1 – LSR5, σελ. 112.
128. **Εικόνα 128:** Current Bandwidth, Μπλε: LSR3 – LSR4, Κόκκινη: LSR3 – LSR6, σελ. 113.
129. **Εικόνα 129:** Current Bandwidth, Μπλε: LSR4 – LSR5, Κόκκινη: LSR4 – LSR7, Πράσινη: LSR4 – LSR9, Κίτρινη: LSR4 – LSR6, σελ. 113.

- 130. Εικόνα 130:** Traffic splitting, udp flows, tcp flow, σελ. 114.
- 131. Εικόνα 131:** Traffic splitting, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 115.
- 132. Εικόνα 132:** Traffic splitting, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 115.
- 133. Εικόνα 133:** Traffic splitting, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 116.
- 134. Εικόνα 134:** Current Bandwidth, Μπλε: LSR1 – LSR4, Κόκκινη: LSR1 – LSR5, σελ. 116.
- 135. Εικόνα 135:** Current Bandwidth, Μπλε: LSR3 – LSR4, Κόκκινη: LSR3 – LSR6, σελ. 117.
- 136. Εικόνα 136:** Current Bandwidth, Μπλε: LSR4 – LSR5, Κόκκινη: LSR4 – LSR7, Πράσινη: LSR4 – LSR9, Κίτρινη: LSR4 – LSR6, σελ. 117.
- 137. Εικόνα 137:** Energy consumption, ospf, σελ. 118.
- 138. Εικόνα 138:** Energy consumption, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 119.
- 139. Εικόνα 139:** Energy consumption, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 119.
- 140. Εικόνα 140:** Energy consumption, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 120.
- 141. Εικόνα 141:** Energy consumption, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 120.
- 142. Εικόνα 142:** Energy consumption, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 121.
- 143. Εικόνα 143:** Current Bandwidth, ΜΠΛΕ: LSR3->LSR4, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR4->LSR9, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR9->LSR13, σελ. 121.
- 144. Εικόνα 144:** Channel utilization, ΜΠΛΕ: LSR3->LSR4, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR4->LSR9, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR9->LSR13, σελ. 122.
- 145. Εικόνα 145:** Energy Consumption, ΜΠΛΕ: LSR3->LSR4, ΚΟΚΚΙΝΗ*: LSR4->LSR9, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR9->LSR13, σελ. 122.
- 146. Εικόνα 146:** Energy consumption, mpls, σελ. 123.
- 147. Εικόνα 147:** Energy consumption, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 124.
- 148. Εικόνα 148:** Energy consumption, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 124.
- 149. Εικόνα 149:** Energy consumption, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 125.
- 150. Εικόνα 150:** Energy consumption, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 125.
- 151. Εικόνα 151:** Energy consumption, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 126.
- 152. Εικόνα 152:** Current Bandwidth, ΜΠΛΕ: LSR3->LSR6, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR4->LSR9, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR5->LSR7, ΚΙΤΡΙΝΗ: LSR9->LSR13, σελ. 126.
- 153. Εικόνα 153:** Channel utilization, ΜΠΛΕ: LSR3->LSR6, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR4->LSR9, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR5->LSR7, ΚΙΤΡΙΝΗ: LSR9->LSR13, σελ. 127.
- 154. Εικόνα 154:** Energy Consumption, ΜΠΛΕ: LSR3->LSR6, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR4->LSR9, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR5->LSR7, ΚΙΤΡΙΝΗ: LSR9->LSR13, σελ. 127.
- 155. Εικόνα 155:** Energy consumption, load balancing, σελ. 128.
- 156. Εικόνα 156:** Energy consumption, end to end throughput από τον host1 στον host6, σελ. 129.
- 157. Εικόνα 157:** Energy consumption, end to end throughput από τον host2 στον host7, σελ. 129.
- 158. Εικόνα 158:** Energy consumption, end to end throughput από τον host3 στον host8, σελ. 130.
- 159. Εικόνα 159:** Energy consumption, end to end throughput από τον host4 στον host9, σελ. 130.
- 160. Εικόνα 160:** Energy consumption, end to end throughput από τον host5 στον host10, σελ. 131.

- 161. Εικόνα 161:** Current Bandwidth, ΜΠΛΕ: LSR4->LSR9, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR9->LSR13, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR11->LSR13, σελ. 131.
- 162. Εικόνα 162:** Channel utilization, ΜΠΛΕ: LSR4->LSR9, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR9->LSR13, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR11->LSR13, σελ. 132.
- 163. Εικόνα 163:** Energy Consumption, ΜΠΛΕ: LSR4->LSR9, ΚΟΚΚΙΝΗ: LSR9->LSR13, ΠΡΑΣΙΝΗ: LSR11->LSR13, σελ. 132.
- 164. Εικόνα 164:** Current Bandwidth LSR4-LSR9, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28, σελ. 136.
- 165. Εικόνα 165:** Channel utilization LSR4-LSR9, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28, σελ. 137.
- 166. Εικόνα 166:** Energy Consumption LSR4-LSR9, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28, σελ. 137.
- 167. Εικόνα 167:** Current Bandwidth LSR9-LSR13, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28, σελ. 138.
- 168. Εικόνα 168:** Channel utilization LSR9-LSR13, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28, σελ. 139.
- 169. Εικόνα 169:** Energy Consumption LSR9-LSR13, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28, σελ. 139.
- 170. Εικόνα 170:** Current Bandwidth LSR11-LSR13, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28, σελ. 140.
- 171. Εικόνα 171:** Channel utilization LSR11-LSR13, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28, σελ. 141.
- 172. Εικόνα 172:** Energy Consumption LSR11-LSR13, ΜΠΛΕ: network_26, ΚΟΚΚΙΝΗ: network_27, ΠΡΑΣΙΝΗ: network_28, σελ. 141.

Πίνακες

- 1. Πίνακας 1:** Στατική δρομολόγηση, end to end throughput, συμφόρηση στο δίκτυο, σελ. 31.
- 2. Πίνακας 2:** Στατική δρομολόγηση, end to end throughput, μέγιστη απόδοση στο δίκτυο, σελ. 36.
- 3. Πίνακας 3:** OSPF, end to end throughput, πολύ χαμηλή απόδοση στο δίκτυο, σελ. 41.
- 4. Πίνακας 4:** OSPF, end to end throughput, απώλειες στο δίκτυο, σελ. 45.
- 5. Πίνακας 5:** OSPF, end to end throughput, χωρίς απώλειες στο δίκτυο, σελ. 50.
- 6. Πίνακας 6:** OSPF, end to end throughput, απώλειες στο δίκτυο, σελ. 55.
- 7. Πίνακας 7:** MPLS, end to end throughput, χωρίς απώλειες στο δίκτυο, σελ. 61.
- 8. Πίνακας 8:** MPLS, end to end throughput, καθυστερημένη επαναδρομολόγηση, σελ. 67.
- 9. Πίνακας 9:** MPLS, end to end throughput, χωρίς επαναδρομολόγηση, σελ. 70.
- 10. Πίνακας 10:** MPLS, end to end throughput, άμεση επαναδρομολόγηση, σελ. 74.
- 11. Πίνακας 11:** OSPF, end to end throughput, rerouting, σελ. 79.
- 12. Πίνακας 12:** Load Balancing, UDP flows, σελ. 82.

- 13. Πίνακας 13:** No Load Balancing, UDP flows, σελ. 85.
- 14. Πίνακας 14:** Load Balancing, tcp flows, σελ. 93.
- 15. Πίνακας 15:** Load Balancing, multiple paths, udp flow, σελ. 94.
- 16. Πίνακας 16:** Traffic splitting, paths, udp, σελ. 96.
- 17. Πίνακας 17:** Traffic splitting, tcp, σελ. 100.
- 18. Πίνακας 18:** Traffic splitting, udp flows, tcp flow, σελ. 102.
- 19. Πίνακας 19:** Traffic splitting, udp flows, tcp flow, σελ. 106.
- 20. Πίνακας 20:** Traffic splitting, udp flows, tcp flow, σελ. 110.
- 21. Πίνακας 21:** Traffic splitting, udp flows, tcp flow, σελ. 114.
- 22. Πίνακας 22:** Energy consumption, ospf, end to end throughput, σελ. 118.
- 23. Πίνακας 23:** Energy consumption, mpls, end to end throughput, σελ. 123.
- 24. Πίνακας 24:** Energy consumption, load balancing, end to end throughput, σελ. 128.

Συντομογραφίες

IP: Internet Protocol

MPLS: Multiprotocol Label Switch

OSPF: Open Shortest Path First

QoS: Quality of Service

RSVP: Resource ReSerVation Protocol

TCP: Transmission Control Protocol

UDP: User Datagram Protocol

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ